



ÓBUDAI EGYETEM  
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

---

**MOLNÁR FERENC**

# A hazai villamosenergia-ellátás biztonsága a fenntarthatóság tükrében, a karbonmentes források térnyerésének kérdései

Témavezető: Prof. Dr. Rajnai Zoltán

---

**BIZTONSÁGTUDOMÁNYI  
DOKTORI ISKOLA**

Budapest, 2022.09.12.



**Szigorlati/komplex vizsga bizottság:**

Elnök:

Prof. Em. Dr. Berek Lajos professor emeritus, ÓE

Tagok:

Dr. habil Kovács Tibor egyetemi docens, ÓE

Dr. Kiss Sándor egyetemi docens, külső - NKE (nyugállományú)

**Nyilvános védés teljes bizottsága:**

Elnök:

Prof. Em. Dr. Berek Lajos professor emeritus, ÓE

Titkár:

Dr. Pálfi Judith adjunktus, ÓE

Tagok:

Dr. Puskás Béla adjunktus, külső – NKE

Dr. Szilágyi Győző Attila adjunktus, ÓE

Prof. Dr. Kádár Péter egyetemi tanár, ÓE

Bírálok:

Prof. Dr. Novothny Ferenc, külső (nyugállományú)

Dr. Istók Róbert egyetemi docens, ÓE

**Nyilvános védés időpontja:**

2022.

# TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS .....	7
A tudományos probléma megfogalmazás .....	7
Célkitűzések .....	9
A téma kutatásának hipotézisei .....	10
Kutatási módszerek .....	11
1    A VILLAMOS ENERGIA FELHASZNÁLÁS ÉS A TERMELÉSI SZERKEZET VIZSGÁLATA .....	13
1.1    A biztonság értelmezése a hazai villamosenergia-ellátásban .....	13
1.1.1    A biztonság fogalma .....	13
1.1.2    A kritikus infrastruktúrák .....	14
1.1.3    Villamosenergia-rendszer alágazat európai és nemzeti kritériumai .....	16
1.2    A villamosenergia-felhasználás és -termelés elemzése .....	17
1.2.1    Az üvegházhatású gáz kibocsátás vizsgálata .....	17
1.2.2    Globális energiafelhasználás és termelés .....	21
1.2.3    A villamosenergia-felhasználás és termelés globális vizsgálata .....	23
1.2.4    A villamos erőművek kiöregedése és fejlesztése .....	26
1.3    Tiszta bolygót mindenkinek .....	30
1.3.1    A bolygónk védelme .....	30
1.3.2    Virágzó, modern, versenyképes és klímasemleges gazdaság távlatai Európában .....	31
1.3.3    A zéró emisszióval rendelkező gazdaságra való átállás .....	31
1.4    Tiszta energiatermelés .....	33
1.4.1    Az európai zöld megállapodás .....	33
1.4.2    Az energiatermelés karbonmentesítése .....	34
1.5    A hazai villamosenergia-felhasználás és termelés .....	36
1.5.1    A Magyar villamosenergia-rendszer .....	36
1.5.2    A megújuló energiaforrások helyzete és előre törése .....	38
1.5.3    Az időjárásfüggő megújuló bázisú villamosenergia-termelés jellemzői .....	39
1.5.4    Új jelenségek és feladatok a VER-ben .....	40
1.5.5    Kiváltható-e az atomerőmű napelemekkel? .....	45
1.5.6    Az új atomerőmű technológia .....	48

1.5.7	Az energiatárolás és a rendszerszabályozás összefüggései.....	51
2	A MAGYAR VILLAMOSENERGIA-RENDSZER ÁTVITELI HÁLÓZATÁNAK VIZSGÁLATA A FOTOVOLTAIKUS ENERGIFORRÁSOK TÉRNYERÉSÉNEK TÜKRÉBEN .....	54
2.1	A magyar villamosenergia-rendszer hálózat fejlesztési tervezési folyamatának vizsgálata .....	54
2.2	Újszerű felhősödési vizsgálat. A 2030-ra prognosztizált hazai fotovoltaikus erőművi teljesítményváltozás hatása az átviteli hálózat üzemére .....	61
3	ÁTVITELI HÁLÓZAT ÜZEMBIZTONSÁGI VIZSGÁLATA.....	74
3.1	Üzemállapot, mint halmaz.....	74
3.2	Egyszerű (soros, párhuzamos) hálózat üzemzavari üzembizonytalansága .....	75
3.2.1	Soros hálózat üzemzavari üzembizonytalansága .....	75
3.2.2	Párhuzamos hálózat üzembizonytalansága .....	76
3.3	Hurkolt hálózat üzembizonytalanság számítása vágat módszerrel.....	76
3.3.1	A vágat.....	77
3.3.2	A két pont közötti kapcsolat, azaz az átvitel.....	78
3.4	Elemek megbízhatósága (üzembizonytalansága) az alapadat .....	79
3.5	Átviteli hálózat gráfjának egyszerűsítése minimális csomópont és minimális ág számra.....	83
3.6	A minimalizált gráf ágainak üzembizonytalansága .....	88
3.7	A PAKS-körzet Budapest –körzet átvitel üzemképtelenségi vágatai .....	96
3.7.1	Az üzemképtelenségi vágat mátrix .....	96
3.7.2	Az üzemképtelenségi vágatok üzembizonytalanságának számítása .....	100
3.8	A PAKS-körzet Budapest –körzet átvitel üzembizonytalanság számítás.....	107
4	A HAZAI ÁTVITELI HÁLÓZAT SZABÁLYOZÁSI TARTALÉKIGÉNYÉNEK VIZSGÁLATA A RENDSZERBIZTONSÁG FENNTARTHATÓSÁG SZEMPONTJÁBÓL .....	109
4.1	A frekvencia stabilitásának rendszerszintű biztosítása .....	110
4.2	A forrásoldal és a fogyasztói oldal közötti rendszerszintű teljesítmény-egyensúly vesztese .	110
4.2.1	Fogyasztói igények véletlenszerű változása .....	111
4.2.2	Forrásoldali véletlenszerű teljesítményvesztés, ami az energiatermelő egységek véletlenszerű meghibásodásának a következménye .....	111
4.2.3	Az időjárásfüggő villamosenergia-termelő egységek véletlenszerű teljesítménybetáplálása .....	112
4.2.4	A rendszerszintű szabályozási célú tartalék kapacitások új definíciói.....	112
4.2.5	A különböző funkciójú szabályozási célú tartalék kapacitások .....	113
4.3	Az időjárásfüggő megújuló bázisú erőművek és energiatermelésük alakulása a közelmúltban .....	114

4.4	Az FRR le- és felszabályozási teljesítményigények vizsgálata 2015 - 2021. évben .....	119
4.4.1	A folyamatot leíró függvények generálása .....	119
4.4.2	A 2015. évi és a 2021. évi FRR rendszerszintű kiszabályozási (fel- és leszabályozási teljesítményigények összehasonlítása .....	122
4.5	Az atomerőművi és az időjárásfüggő megújuló kapacitások jövőbeli párhuzamos üzemének vizsgálata .....	122
4.6	A szükséges szabályozási célú kapacitások biztosításának lehetőségei .....	134
4.7	A Sima település környezetébe feltételezett SZET villamosenergia-rendszerbe integrálásának vizsgálata villamos hálózati szempontból.....	138
4.7.1	A hálózati csatlakozás modellezése .....	138
4.7.2	Hálózatvizsgálatok eredményének értékelése.....	141
4.7.3	Az átviteli hálózaton jelentkező szűk keresztmetszetek .....	142
4.7.4	A 132 kV-os elosztóhálózaton jelentkező szűk keresztmetszetek .....	143
	ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK.....	147
	Új tudományos eredmények.....	149
	Ajánlások .....	155
	IRODALOMJEGYZÉK .....	156
	RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK.....	162
	TÁBLÁZATJEGYZÉK.....	164
	ÁBRAJEGYZÉK.....	166
	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS .....	172

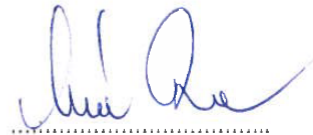
**NYILATKOZAT**  
**A MUNKA ÖNÁLLÓSÁGÁRÓL, IRODALMI FORRÁSOK**  
**MEGFELELŐ MÓDON TÖRTÉNT IDÉZÉSÉRŐL**

Alulírott **Molnár Ferenc** kijelentem, hogy a

**A hazai villamosenergia ellátás biztonsága a fenntarthatóság tükrében, a karbonmentes források térnyerésének kérdései**

című benyújtott doktori értekezést magam készítettem, és abban csak az irodalmi hivatkozások listáján megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, amelyet szó szerint, vagy azonos tartalomban, de átfogalmazva más forrásból átvettem, a forrás megadásával egyértelműen megjelöltem.

Budapest, 2022. szeptember 12.



.....

# BEVEZETÉS

## A tudományos probléma megfogalmazás

Az emberiség történelmét végig kíséri az energia jelenléte, folyamatosan bővülő felhasználási területei és formái valamint az egyre növekvő energiaigény [1 p.8]. Az energia kifejezést életünk szinte minden területén használjuk, az energia megszámlálhatatlan formájában szolgálja a mindennapjainkat. Az energiát a tudomány különféle ágazatai is másképpen írják le a saját szempontrendszerük szerint, mindegyikben jelen van, és mindben másként nyilvánul meg. A legkézenfekvőbb példaként említhetjük a fizikát, a kémiát, a biológiát vagy éppen a tudományok energetika ágazatát. Ha megkérdeznénk az energia jelentését, valószínűleg mindenki másként fogalmazná meg. Olyan sokféleképpen határozza meg az életünket az energia, hogy - a saját élethelyzetéből kiemelve a jelentőségét - mindenkinek mást jelentene. Az energia általánosságban a változásra való képességet, tehát magát az élet alapját jelenti. A fizikában az energia azt a munkavégző képességet jelenti, amelynek segítségével egy rendszer az egyik állapotából a másikba jut.

Az emberiség túlélése és sikeres fajként a Föld benépesítése az energia tudatos használata nélkül nem teljesülhetett volna. Az első emberi közösségekben a tűz felfedezése, mint az energia egyik megnyilvánulási formája indította el az energia tudatos felhasználását. A villámcsapás következtében kigyulladt fa lángja mellett tudtak melegedni, a fényével világítani, hőjével húst sütni és hatásával távol tudták tartani a ragadozókat és az ellenségeiket is.

Az emberi civilizációk kezdeti tudomány irányába ható gondolkodásának egyik nagy eredménye volt a környezeti jelenségek tanulmányozása, elemzése és az eredmények megfogalmazása.

Az ókori görögök már tudatosan tekintettek az elektromosságra. Ismerték az elektromos töltéseket. A ma is használt elektron szó a görögül a borostyánt jelenti. Az ókorban megfigyelték, hogy a megdörzsölt borostyánkő magához vonzotta a szöszöket.

Az elektromosság mélyebb megismerésére egészen a 18. századig kellett várni. Az ipari forradalmat követő felfedezések tudományos eredményeit a 19. század fejlesztései ültették át a gyakorlatba.

A jelenkor civilizált embere számára az energia olyan számos megjelenési és felhasználási formában van jelen, hogy felsorolni is csak a teljesség igénye nélkül lehetne. A civilizált ember életének minden szegmensében meghatározó az energia használata. Túlzás nélkül ki lehet jelenteni, hogy a ma élő urbanizált ember életfeltételei szűnnének meg az energia hiányában. Villamos energia nélkül nem működne semmi, így a számítástechnikai eszközökkel megvalósított irányító rendszerek, sem az alapellátó rendszerek fő és segédberendezései. Könnyű belátni, hogy villamos energia hiányában leállna a víz-, gázellátás. Nem működnének a szellőző rendszerek. Leállna a közlekedés és éjszaka minden sötétbe borulna. Nem lenne a lakásoknak fűtési és hűtési lehetősége. Leállna az ipari és mezőgazdasági termelés. Sem ivóvíz, sem élelem nem lenne. Nem működnének a kommunikációs és biztonsági rendszerek. Az ország-, és rendvédelem sem tudná ellátni a feladatát. Az energia hiánya gazdasági és társadalmi katasztrófához vezetne [1 p.8].

A jelenlegi csaknem 8 milliárdnyi globális populáció a fenntartható fejlődéshez maximalizált energiaszükséglet többszörösét emészti fel minden pillanatban. A rohamosan gyarapodó létszámú emberiség kíméletlen mértékű energiafelhasználás árán rendkívül önző és pazarló módon meríti ki a föld energiakészletét és rombolja le a természeti környezetét [1 p.8].

A jelenkori energiafelhasználás mértékének egyik negatív hatása a Föld készleteinek mérhetetlen kizsákmányolása és a globális felmelegedés felgyorsulása. A globális felmelegedés ciklusai végig kísérik a Földtörténetet. A több évmilliós ciklust az emberi tevékenységek néhány száz évre rövidítették le, oka az üvegházhatást növelő gázok légkörbe történő fokozott kibocsátása. A Föld légkörének a jelenlegi klímáját - többek között - az üvegházhatás biztosítja. A Földet az üvegházhatást okozó gázok üvegburaként veszik körbe. A jelenség az üvegház jelenségről kapta a nevét. A nap sugárzása áthatol az üvegen, felmelegíti a földfelszínt és a keletkező hő egy részét az üvegfalak, vagyis az üvegbúra magába zárja. Ez a jelenség biztosította a jelenlegi földi élet kialakulásához szükséges klimatikus viszonyokat és annak fennmaradásához is szükséges. Az ipari forradalom óta az emberi tevékenység hatására folyamatosan emelkedő mértékben egyre nagyobb mennyiségű a légtérbe juttatott üvegházhatású gáz. Ennek következtében egyre vastagabb a felhalmozódott üvegházhatású gázréteg, tehát folyamatosan erősödik az üvegházhatás, amelynek eredménye, hogy csökken a légtérből kijutó hőmennyiség. A légkör felmelegedésének erősödéséhez nagyban hozzájárul a légtérbe jutott hőmennyiség mértékének fokozódása is. A környezetbe jutó többlet hőmennyiség az



általunk felhasznált energiák veszteségi hányadából származik. A legnagyobb veszteségi hőmennyiség és egyben üvegházhatású gáz kibocsátó szektorok az energia előállítás, a közlekedés-szállítás, az ipar és az épületek. A szektorok egyre emelkedő energia felhasználása, és az egyes ember növekvő fogyasztása, a mára csaknem 8 milliárdnyi populáció folyamatos gyarapodása valamint az elavult technológiák alkalmazása okozza. A tét nem kisebb, mint az emberiség túlélése, amely csak az élhető bolygónk megőrzésével lehetséges [3 p.5].

Amennyiben a civilizáció jelenlegi „fejlődési” irányán nem sikerül változtatni, akkor az egész emberiség életfeltételei kerülnek veszélybe, mégpedig belátható közelségben. Ebben az esetben a jövő generációk életfeltételeit szüntetjük meg. Közhelyszámba menő, találó mondás miszerint a Föld nem a miénk csupán kölcsön kaptuk az unokáinktól. Az én személyes motivációm a klímavédelem kapcsán, hogy egy élhető világot adjunk tovább az utókor számára. A civilizáció ártalmi közé sorolhatjuk a globális felmelegedés következtében kialakuló klímaváltozás és a környezetszennyezés hatásaként bekövetkező nagyszámú megbetegedéseket és humán áldozatokat [1 p.8].

A témához való személyes kötődésem másik aspektusa, hogy villamosmérnökként közel 35 éve foglalkozom erőmű beruházások irányításával. Ez idő alatt a munkám során szinte minden villamos energia ipari technológiával közvetlen kapcsolatba kerültem. Rendszer szinten komplex szempontok alapján elemezve illetve értékelve látom a jelenlegi globális energetikai folyamatok kitűzött irányait, azok gazdasági-, társadalmi kockázatait és a lehetséges megoldási alternatívákat is. Kiemelten fontos számomra, hogy minél hatékonyabban, környezetkímélő és fenntartható módon elégíthessük ki az emberiség folyamatosan növekvő energiaigényét [1 p.9].

A tiszta technológiák és az energiahatékonyságot szolgáló eljárások folyamatos fejlesztésénél kiemelt jelentősége van a szemléletformálásnak. A legolcsóbb és legkörnyezetkímélőbb az el nem fogyasztott energia. A kormányzati, az ipari-kereskedelmi és a végfelhasználó stakeholderok energia-, és környezettudatos magatartása nélkülözhetetlen az energiatakarékoskodás, az energia hatékonyság, a fenntarthatóság valamint a tiszta energia felhasználás felé vezető úton [1 p.9].

## **Célkitűzések**

Kutatómunkám célja egy olyan hazai villamosenergia-termelő szerkezet kialakítása, amely hosszú távon az Európai Unió klímavédelmi és ellátásbiztonsági szabályozásához

harmonizált hazai energiastratégia figyelembe vételével, megbízhatóan és biztonságosan kielégíti a hazai felhasználói igényeket. Ehhez tanulmányoztam a korábbi tudományos eredményeket, a hazai és nemzetközi szakirodalmat, és terjedelmes személyesen beszerzett adatot dolgoztam fel. Az ellátásbiztonság ebben az esetben a villamos energia rendelkezésre állását jelenti az ipari és lakossági fogyasztók csatlakozási pontjain, minden időpillanatban a megfelelő minőségi paraméterek teljesülése mellett. Az ellátásbiztonságot a rendszerbiztonság vagy rendszermegfelelőség aspektusából vizsgálom.

1. Célként fogalmaztam meg annak vizsgálatát, hogy a hazai villamos átviteli hálózat hogyan felel meg hosszú távon az időjárásfüggő megújuló energia alapú villamosenergia-termelés térnyerésének következtében jelentkező kihívásoknak.
  - műszaki terhelhetőség, paraméterek,
  - szabályozhatóság,
  - decentralizált elhelyezkedés hatása (termelés – fotovoltaiikus erőművek, fogyasztás – elektrifikáció)
2. Célul tűztem magam elé annak vizsgálatát, hogy hogyan vizsgálható a villamosenergia-átvitel megbízhatósága hazai 400 kV-os átviteli hálózaton. A 400 kV-os átviteli hálózat szereleleleit magába foglaló új modell megalkotása matematikai (gráfelméleti) és villamosmérnöki tudományok komplex alkalmazásával.
3. Célként fogalmaztam meg, a hosszú távú fogyasztási és termelési jelleg-változás vizsgálatát és jellegsávok meghatározását. A fenntarthatósági és ellátásbiztonsági célok teljesülése érdekében, az időjárásfüggő megújuló kapacitások - szélsőséges viselkedésének figyelembe vételével - rendszerbe illeszthetőségüket biztosító jellegsávokat állítok elő a szabályozási igény meghatározására. A szabályozási igénytől függően megvizsgálom egy nagyteljesítményű szivattyús-energiatároló, mint rugalmas kapacitás villamos hálózatba illesztését.

### **A téma kutatásának hipotézisei**

1. Azzal a feltételezéssel élek, hogy az időjárásfüggő megújuló energiaforrások beépített összes kapacitása és termelésük időbeli változásainak hatása, 2030-ban

- a feltételezett növekedési ütem mellett – meghaladja az átviteli hálózat képességeit (fizikai paraméterek, szabályozhatóság).
2. Feltételezem, hogy készíthető matematikai és villamosmérnöki megfontolások alapján olyan minimális hurkolt hálózati modell, amelyen – minimális üzemképtelenségi vágatok meghatározásával – a hálózat átviteli üzembizonytalansága, megbízhatósága számítható.
  3. Vélelmezem, hogy megalkotható olyan fogyasztói és termelési becsült jellegsáv, amellyel a becsült karbonmentes (nukleáris, szél, fotovoltaiikus) kumulált termelői jellegsáv okozta kiszabályozatlanság mértéke és időbelisége meghatározható. Tehát meghatározható a szabályozási igény kiszolgálásához szükséges energiatároló nagysága és a vele szemben támasztott rendszerszintű rugalmassági igény. Hálózati modellezéssel meghatározható a szabályozó egység hálózati csatlakozási pontja. A rendszerszintű vizsgálatok elvégzését követően igazolható egy nagyteljesítményű szivattyús energiatároló, mint rugalmas kapacitás rendszerbe integrálása.

## **Kutatási módszerek**

A kutatási terület választását determinálta, hogy 35 éve a villamos energia iparág vezető cég-csoportjában az MVM Csoportban nagyerművi beruházások irányításával foglalkozom. Az eddigi tanulmányaim során szerzett ismeretek a villamosenergia-ipar fejlődését szolgálják.

A téma választását indokolta az energetika széles palettájából a jövőnkét alapvetően meghatározó egyes legégetőbb kérdések lehetséges válaszainak alátámasztása, tudományos módszertan vizsgálatai által nyert eredmények felhasználásával.

A kutatás komplex szemléletmódot igényelt, több tudományterület eredményeire támaszkodott, és mind elméleti mind gyakorlati aspektusú

A rendkívül széles és összetett szakmai terület tudományos előzményeinek vizsgálata, elemzése, rendszerbe illesztése széles körű hazai és nemzetközi szakirodalom feldolgozásával valósulhatott meg. A tudományos felületeken elérhető szakmai publikációkon túlmenően a témában meghatározó tanulmányok, kiadványok, könyvek és tudományos konferencia előadások feldolgozása segítette a munkámat. A kutatás elvégzéséhez saját korábbi munkáim is jelentős támpontot nyújtottak.

1. Loadflow vizsgálatok, becsült termelési és fogyasztási modell alkotása az átviteli hálózat teljesítőképességének vizsgálatára. A meglévő fejlesztési eszköztár vizsgálata, alkalmasságának megítélése a műszaki megfelelés szempontjából. Az értekezés készítése során végzett villamos hálózat vizsgálatok a Siemens PTI cég PSS/E szoftverének v35-ös verziójával készültek. A számítógépes modellező rendszer technikai és tervező szakértői támogatását a MAVIR biztosította számomra. Ez egyben azt is lehetővé tette, hogy a Hálózatfejlesztési Terv céljára készült modelleket közvetlenül fel tudjam használni, formátumkonverzió vagy hangolás szükségszerűsége nélkül.
2. A meglévő gráfelméleti és villamosmérnöki ismeretek birtokában új módszer kidolgozása, egyszerűsített - 400 kV-os átviteli hálózat - hurkolt hálózati gráf megalkotására. Új módszer és kritérium kidolgozása a minimális üzemképtelenségi vágatok meghatározása. (Dr. Pálfi Judit sejtés alapján ellenőrzött vágatmátrix szám.) Az átviteli üzembizonytalanság, megbízhatóság meghatározása.
3. A matematikai statisztikai módszerekkel a feldolgozott, prognosztizált és képzett adatokkal jellemző értékek meghatározása a fogyasztói és terhelési új jellegsvámodellek megalkotása. Relativizált értékek létrehozásán keresztül a megújuló relatív termelési és terhelési modell összevetése annak megállapítására, hogy mekkora és milyen jellegű tároló-szabályozó kapacitást rendszerbe illesztése szükséges az időjárásfüggő termelők további integrálásához.

# 1 A VILLAMOS ENERGIA FELHASZNÁLÁS ÉS A TERMELÉSI SZERKEZET VIZSGÁLATA

## 1.1 A biztonság értelmezése a hazai villamosenergia-ellátásban

Az emberiség kényelmét biztosítják az egyre szélesebb körben terjedő villamosenergia-alapú technológiák. Az automatizálás és a digitális technológiák térhódítása a kényelem biztosításán túl a gazdasági tevékenységek hatékonyságát javítja, valamint segíti a fenntartható energiatermelés megvalósíthatóságát. Nem tudunk olyan szegmensét említeni a háztartásoknak, az ipari és mezőgazdasági termelésnek, a gyógyászatnak, a kutatás-fejlesztésnek, az oktatásnak, és még számtalan területnek, ahol a villamos energia igény valamilyen formában ne lenne meghatározó jelentőségű. A villamos energia folyamatos rendelkezésre állása a mindennapjaink biztonságának is az alapját képezi. Az államigazgatás, a közigazgatás, a vagyonvédelem, a rendfenntartás és az ország védelme sem nélkülözheti a villamos energia folyamatos rendelkezésre állását. A kényelmünk és a biztonságunk egyre inkább energiafüggő így kiszolgáltatottá válunk, mindennapi életünk az energiaellátás biztonságától, azaz rendszerek biztonságától függ. Ezzel összefüggésben az energia ellátó rendszerek infrastruktúráit egyre gyakrabban érheti külső támadás. Az energiaellátásban meghatározó szerepet betöltő technológiák megbízhatóságát úgy kell növelni, hogy környezetből érkező lehetséges veszélyekre is fel legyen készítve, hatásuk alatt is üzembiztosan működjön [2]. A globális és a hazai fenntartható fejlődési célok eléréséhez nélkülözhetetlen nukleáris energiatermelés fizikai védelmével kapcsolatos hazai szabályozást kormányrendelet tartalmazza. A rendelet az atomenergia alkalmazására vonatkozó fizikai védelem minden szintjére részletes előírásokat fogalmaz meg [58].

A továbbiakban a biztonság fogalmának egyes értelmezési aspektusait vizsgálom meg valamint az energiaellátó rendszerek vonatkozásában azonosítom a potenciális külső veszélyforrásokat és az ellenük alkalmazható védekezési lehetőségeket [2].

### 1.1.1 A biztonság fogalma

A társadalmak elengedhetetlen működési feltétele a biztonság folyamatos rendelkezésre állása. Hagyományos értelmezésben az évtizedekkel ezelőtt kialakult nézettel megegyezően a katonai fenyegetettség elleni védelmet jelenti. Manapság a szélesebb szemléletmódot tükröző komplex megközelítésben az emberi tényező mellett a természeti

veszélyforrásokat is szem előtt kell tartani az egyéni és társadalmi szintű védelmi intézkedések meghatározásakor [4].

Bukovics a biztonságot egyensúlyként értelmezi a veszélyforrások és azok kezelésére adott megoldások között [5].

Számadó Róza szerint a társadalmak és technológiák egyre szélesebb spektrumon ható fejlődésében megnyilvánuló változásai befolyásolják negatívan az egyének és közösségek biztonságérzetét. A gyorsan végbemenő technológiai változások közepette az egymásra ható technikai rendszerek kockázat növelő hatásúak mind gazdasági mind védelmi területen [6].

Muha Lajos olyan kedvező állapottal azonosítja a biztonságot, amely esetén a fenyegetés előfordulási lehetősége illetve az esetlegesen bekövetkező veszélyhelyzet következményei az elérhető legkisebb szintre korlátozódnak [7].

A biztonság szó sokrétű értelmezését és árnyalatait jól érzékelteti az angol nyelvű terminológiákban használatos kifejezések változatossága. A biztos jelleg hangsúlyozására a security szolgál, a veszélytelenséget a safety fejezi ki, a megvédelemzésre a protection szót használják, a védekezéshez a defence kifejezés áll legközelebb és a biztossá tételt az assurance érzékelteti leginkább. [8]

A villamosenergia-iparban alkalmazott technológiai védelmek a protection kifejezéshez tartoznak. Az ellátásbiztonságra a security míg a munkavédelemre a safety fogalom alkalmazható.

Saáry Réka megállapítása szerint a fenyegetettség pszichológiai aspektusa lehet valós, de elképzelhető, hogy nem létező, tehát csak vélelmezett veszélyforrás ébreszti a veszélyeztetettség érzetét [9].

A biztonság nem katonai jellegű vonatkozásai szempontjából a nemzetközi helyzetet és a számunkra mértékadó stratégiákat tanulmányozva Magyarország számára kiemelt jelentőségű feladat a kibertámadások-, a kritikus infrastruktúrákkal szembeni támadások- valamint az ipari és természeti katasztrófa elleni védekezésekre való felkészülés [10].

### **1.1.2 A kritikus infrastruktúrák**

Az infrastruktúra definíciójára az egységes értelmezés mellett is több forrás kínál alternatívákat [11].

Bonnyai Tünde több releváns forrás definíciójának elemzését elvégezve úgy találta, hogy az Európai Unió által a tagállamok felé megfogalmazott infrastruktúra meghatározás a legkifejezőbb, amely a következőt mondja ki. Az infrastruktúra olyan hálózatok rendszere, amelyben a hálózatok függenek egymástól, valamint ennek részét képezik a

kritikus infrastruktúra ágazatok, intézmények és képességek. Ezek biztosítják a kormányok teljeskörű folyamatos működését a létrehozott termékek és szolgáltatások biztonságos áramlásán keresztül [12].

Rajnai Zoltán és Fregan Beatrix vélekedése egybe vág az előzőekben leírtakkal. A modern társadalmakban erős függőség alakul ki az egymásra is jelentős hatással bíró komplex infrastruktúra rendszerektől. Az állam, a gazdaság és a társadalmi rétegek létének meghatározó feltétele, hogy a kritikus infrastruktúrák valamint létfontosságú rendszerek üzembiztosan, zavarok nélkül, nagy biztonsággal működjenek. [32]

Az Európai Unió Zöld Könyvének infrastruktúrára vonatkozó megállapításai a jogalkotási munka részeként születtek meg [13].

Az infrastruktúrák közül kritikusnak nevezzük azokat, amelyek megsemmisülése vagy korlátozott elérhetősége az érintett felhasználói kör léteire illetve életminőségére negatívan hat.

A katasztrófavédelemről és a hozzá kapcsolódó egyes törvények módosításáról szóló 2011. évi CXXVIII. törvény végrehajtásáról szóló 234/2011. (XI. 10.) kormányrendelet 1. § 25. pontja a következőképpen fogalmaz. Kritikus infrastruktúra: Magyarországon található azon eszközök, rendszerek vagy ezek részei, amelyek elengedhetetlenek a létfontosságú társadalmi feladatok ellátásához, az egészségüghöz, a biztonsághoz, az emberek gazdasági és szociális jólétéhez, valamint amelyek megzavarása vagy megsemmisítése, e feladatok folyamatos ellátásának hiánya miatt jelentős következményekkel járna. [14] 2011. évi CXXVIII. törvény végrehajtásáról szóló 234/2011. (XI. 10.) kormányrendelet 1. § 25.

A fenti fogalmat az alábbi 5 alapvető tulajdonság teszi teljessé:

- interdependencia – egymástól való függőség;
- informatikai biztonság – kiemelt terület, digitalizált munkafolyamatok;
- üzemeltetés – sajátosságok, egyedi jelleg;
- dominóelv – láncreakciószerű jellegű sérülés/károsodás;
- leggyengébb láncszem és a rész-egész elv – összekapcsolódó hálózatok stabilitása a leggyengébb elem erősségétől függ [11].

A BM Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság prioritást élvező felelőssége a kritikusinfrastruktúra-elemek biztonságos működésének védelme. A kritikus infrastruktúrák védelmével összefüggő hatósági feladatokon belül az alapvető szolgáltatást nyújtó szereplők között első helyen szerepel az Energia [15] [11].

Az európai létfontosságú rendszerek és létesítmények védelmével összefüggésben a belügyminiszter végzi a nemzeti kapcsolattartó és koordinációs feladatokat. A katasztrófavédelmi, a polgári válságkezelési, és a kritikus infrastruktúra védelmi feladatok kormányzati koordinációja, valamint ezen elemeivel kapcsolatos feladatokról szóló jogszabályok előkészítése szintén a belügyminiszter hatáskörébe tartozik. Az energetikai kormányrendelet, az energetikai szektort három alszektorra bontva taglalja. Ezek a villamosenergia-rendszer létesítményei, a kőolajipar és a földgázipar [11] [16].

### **1.1.3 Villamosenergia-rendszer alágazat európai és nemzeti kritériumai**

Európai szintű rendszerelem kijelölési kritérium:

- A rendszerelem kiesése önmagában a szolgáltatás legalább 6 órát elérő korlátozottságához vezet úgy, hogy ez által egyidejűleg olyan tartós erőművi vagy import teljesítményhiány áll elő, amelynél a villamosenergia-rendszer erőművi tartaléka— az importtal együtt — a bruttó hazai felhasználás legfeljebb 7%-a;

Nemzeti rendszerelem kijelölés kritériumai:

Villamosenergia-termelés vonatkozásában:

- Az a rendszerelem, amelynek kiesése esetén az ellátásbiztonság nem tartható fenn, és amely 30 percen belül nem helyettesíthető. Az a rendszerelem, amelynek importtal vagy más módon sem helyettesíthető kiesése legalább 24 órán át, a vizsgálatot megelőző három év csúcsidei bruttó felhasználása átlagának legalább 10%-át elérő teljesítménycsökkenést okoz a belföldi villamosenergia-termelés egésze tekintetében.

Átviteli hálózat vonatkozásában:

- Az a rendszerelem, amelynek kiesése hatására bármely további elemnek a rendelet 2. mellékletében meghatározott feszültségszinttől való eltérése a 24 órát meghaladja, és az az adott tevékenység ellátása szempontjából más módon nem pótolható.

Az elosztó hálózat vonatkozásában:

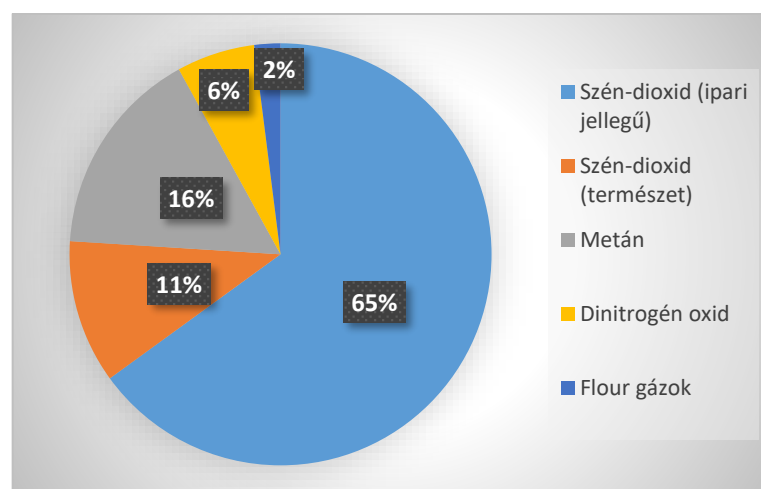
- Az az 1 kV-osnál nagyobb, de legfeljebb 132 kV-os rendszerelem, amelynek
  - a) a 24 órát meghaladó, de a 48 órát el nem érő kiesése legalább 10 000 felhasználót zár ki a vételezésből,
  - b) a legalább 48 órás, de a 72 órát el nem érő kiesése legalább 5000 felhasználót zár ki a vételezésből,
  - c) legalább 72 órás kiesése, legalább 2000 felhasználót zár ki a vételezésből [11] [79].



## 1.2 A villamosenergia-felhasználás és -termelés elemzése

### 1.2.1 Az üvegházhatású gázkibocsátás vizsgálata

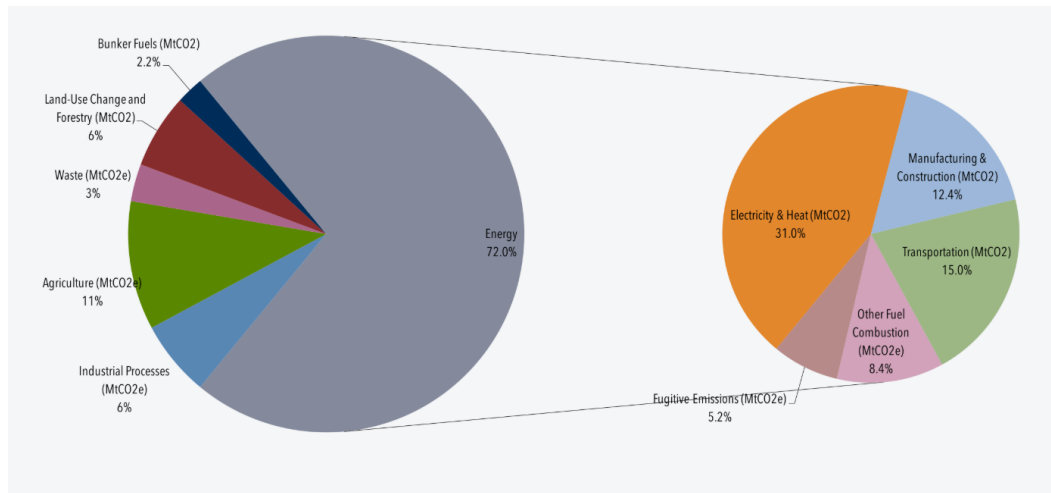
A szakmai elemzők előrejelzése szerint az előttünk álló két évtized végére a gazdasági fejlődés velejáráó következményeként a városok lakossága globális szinten 1,7 milliárddal fog bővülni [17 p.106] [18 p.23]. Ennek természetes hozadéka, hogy az emberiség környezetre gyakorolt hatása is nagymértékben megváltozik. Ilyen hatások közül a legfontosabbak a Föld készleteinek gyorsuló ütemű felemésztése, a növekvő hulladékmennyiség okozta szennyeződés, a levegőszennyezés és az üvegházhatású gázok kibocsátásának drasztikus emelkedése [17 p.106] [19].



1. ábra: A globális üvegház hatású gázkibocsátás összetétele 2014-ben. (saját szerkesztés EPA, 2020 alapján) [20]

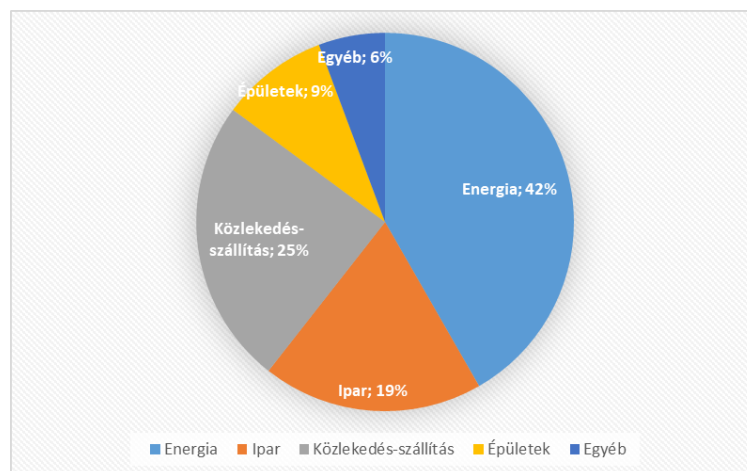
Az üvegházhatású gázok legnagyobb volumenű összetevője a szén-dioxid kibocsátás. A CO<sub>2</sub> gázok 76%-os részesedéséből 11%-pont az erdőgazdálkodás és a mezőgazdaság számlájára írható. A meghatározó 65%-os terjedelem azonban az ipari jellegű tevékenységek következményeként jut a légtérbe [20]. A CO<sub>2</sub> keletkezése az égési folyamatok során történik. A légkörbe kibocsátott CO<sub>2</sub> döntő hányada a fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből származik. A fosszilis tüzelőanyagok elégetése a felelős a metán és a dinitrigén oxid keletkezésének egy részéért is. A fluor tartalmú gázokat részben az a kénhexafluorid SF<sub>6</sub> gáz alkotja, amelyet például az erősáramú villamosenergetikai berendezésekben villamos szigetelésre és ívoltagezésre használnak.

Egy másik csoportosítási szempont szerint is érdemes megvizsgálni az üvegházhatású gázok összetételét. A kibocsátó ágazatok szerinti bontást a World Resources Institute, 2017-ben közzétett, 2013. évi feldolgozott adatai alapján a Center For Climate And Energy Solutions jelenítette meg [17 p.106].



2. ábra. A globális üvegházhatású gázkibocsátás primer források szerinti összetétele 2013-ban [21]

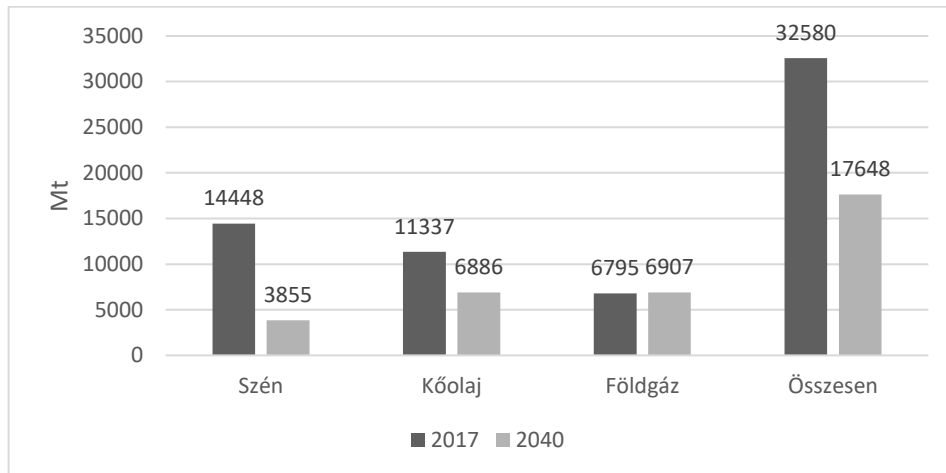
A primer források szerinti csoportosítás alapján megállapítható, hogy 2013-ban az üvegházhatást okozó gázok 72%-ának kibocsátásáért a különböző gazdasági szektorok energiafelhasználása tehető felelőssé. Ezek közül a legjelentősebb a villamos- és hőenergia iparág 31%-os részesedéssel, amelyet a közlekedés-szállítás követ 15%-kal és jelentősnek mondható még a gyártás-szerelés ágazat több mint 12%-kal [21] [17 p.106]. Megvizsgáltam az emisszió primer forrásait és arra az eredményre jutottam, hogy az energiafelhasználás jelentős átalakítása elkerülhetetlen a bolygónk megóvása érdekében. A vizsgálat eredménye szerint a kibocsátott szén-dioxid mennyisége befolyásolja a legnagyobb mértékben a Föld éghajlatát a légkörben csapdába zárt hőmennyiség okán. Ebből következően a klímaváltozás elleni intézkedések leghatékonyabb eszköze a szén-dioxid kibocsátás erőteljes csökkentése lehet. A beavatkozási lehetőségek feltérképezéséhez megvizsgálom a legnagyobb hányadot képviselő széndioxid kibocsátás összetételét [17 p.107].



3. ábra: A globális szén-dioxid-kibocsátás összetétele 2017-ben (saját szerkesztés WEO 2018 alapján) [18]

A szén-dioxid-kibocsátás összetételének szemügyre vétele során megállapítottam, hogy a legnagyobb részesedést az energetikai iparág tudhatja magáénak, de a közlekedés-szállítás és az ipar emissziója is jelentős. Az emisszió csökkentésének lehetőségeit még pontosabban tudom behatárolni, ha megvizsgálom a teljes szén-dioxid-emisszió primer tüzelőanyag szerinti megoszlását [17 p.108].

A 4. ábra jól szemlélteti, hogy a szén-dioxid-kibocsátás teljes mennyisége a három fő fosszilis tüzelőanyag fajta elégetéséből származik.

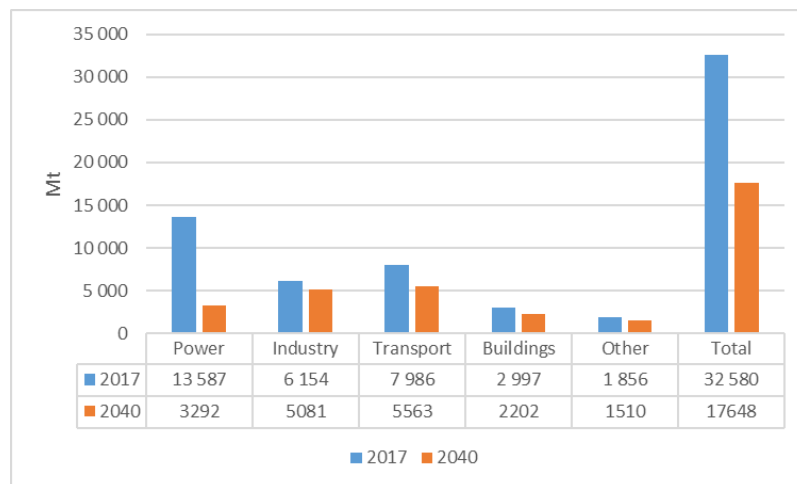


4. ábra A globális szén-dioxid kibocsátás megoszlása és mértéke tüzelőanyagokénti bontásban, 2017-ben és 2040-ben megatonnában megjelenítve (saját szerkesztés WEO 2018 alapján) [18 p.46]

2017-ben a legnagyobb volumenű kibocsátásért a szénből nyert energia tehető felelőssé, de közel hasonló nagyságrendet képvisel a kőolajszármazékok hasznosítása során keletkező széndioxid is. A szén elégetéséből elsősorban az ipari és az energetikai ágazat az olaj felhasználásából pedig az energetikai ágazaton kívül döntő hányadban a közlekedési szektor jut energiához. A fenntartható fejlődés érdekében a felvázolt jövőkép eléréséhez, elvárt emisszió érték csökkentésére a szén és az olaj nagymértékű háttérbe szorítása szükséges. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy mind az ipar mind az energetika a karbonmentes forrásokra épülő új technológiák előre törését fogja előnyben részesíteni. A közlekedés-szállítás területén szintén erőteljessé válik a karbonmentes technológiák penetrációja. A prognózis szerint a földgáz felhasználás mértéke közel állandó marad a következő 20 év során is. Valószínűsítem, hogy a földgáz kiemelt szerepe továbbra is megmarad az épületek fűtése, a villamos hálózatszabályozás és az ipari felhasználás területén.

A karbonkibocsátás csökkentése szempontjából a három kiemelt ágazati területet érintő lehetséges intézkedések egymással összefüggenek. Az ipari technológiákban a digitalizáció vagyis az automatizálás előtérbe kerülése hozhat értékelhető változást. A

közlekedés-szállítás területén az elektromobilitás vagyis a villamos hajtású járművek terjedése fog lendületes változást előidézni. Mindkét esetben az elektrifikáción alapuló változások várhatóak. Az elektrifikáció azt jelenti, hogy a hagyományos technológiákat felváltják a villamos energiát felhasználó berendezések, előtérbe kerül a villamos energia használata a fosszilis energiaforrásokkal szemben. A sikeres energiaátmenetet elősegíti a nagyon magas szintű automatizálás, vagyis az okos rendszerek alkalmazása, amely az energiahatékonyságot növelve jelentősen mérsékelni fogja az energiaigényeket [17 pp.108-109].



5. ábra: A globális szén-dioxid kibocsátás összetétele és mértéke ágazatonkénti bontásban, 2017-ben és 2040-ben Mega tonnában megjelenítve (saját szerkesztés WEO 2018 alapján) [18 p.90]

Az energia-iparágban van a legnagyobb szükség termelési szerkezet átalakítására. A teljes emisszióból a legjelentősebb hányadot képviseli és a széles körű elektrifikáció a villamosenergia-igény szignifikáns növekedését fogja eredményezni. Az emberiség folyamatosan növekvő energiaigényét fenntartható módon csak a villamosenergia-termelő technológiák teljes átalakulása tudja kiszolgálni. A World Energy Outlook a lehetséges jövőképekre többféle alternatívát is vizsgál. Ezek a Jelenlegi Energiapolitikák, az Új Energiapolitikák és a Fenntartható Fejlődéshez kalkulált feltételek. Az 5. ábra a fenntartható fejlődés eléréséhez szükséges, a 2017. évi és a 2040-re az emisszió csökkenési trendhez prognosztizált szén-dioxid kibocsátási értékeket szemlélteti ágazatonkénti bontásban. Az előzőekben tárgyaltak szerint nemcsak szükségszerű az energia ágazat átalakítása, de a klímavédelem szempontjából a legnagyobb szerkezeti átalakulási és technológiai fejlődési potenciál is itt mutatkozik [17 pp.109-110].

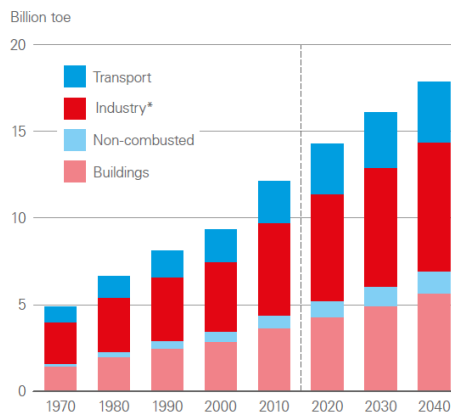
### 1.2.2 Globális energiafelhasználás és termelés

A világban végbemenő változásoknak köszönhetően 2040-re a globális energia-igény a három évvel korábbi értékeket egynegyedével fogja túlszárnyalni. A növekedés mértéke kétszeres lenne a fenntartható fejlődés érdekében tervezett energiahatékonysági intézkedések hiányában [17 p.110] [18 p.23].

Az energiafelhasználási trendek szerkezeti elemzését három fő szempont szerint érdemes elvégezni a következőkben taglaltak szerint [17 p.110] [22].

#### a) Az energiaigény szektoronkénti megoszlása

Jelenleg a globális energiafelhasználás csaknem felét az ipari szegmens igényli. A közlekedés 21%-kal, a lakó és a kereskedelmi épületek 29%-kal veszik ki a részüket. Az energiahatékonyság növekedése a közlekedési ágazatban lesz a legerősebb [22][17 p.110].

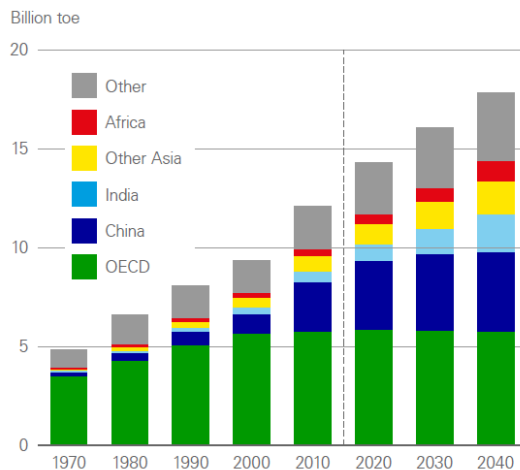


6. ábra: A globális energiafogyasztás ágazatonkénti megoszlása [22]

A gazdasági növekedés eredményeként az emberek egyre szélesebb rétegei számára lesznek elérhetőek a jóléti és kényelmi vívmányok. A szakmai döntések illetve a szemléletformálás eredményeként meghatározó jelentőségű, hogy az energiafelhasználás növekedését kövesse a fogyasztói berendezések modernizációja. Korszerű technológiák jelenjenek meg az elektrifikáció térnyerése következtében, egyre jobban automatizált rendszerekben [17 pp.110-111].

### b) Az energia igény régiókénti megoszlása

Az energiaátmenet egyik döntően meghatározó jellemzője, hogy az energiafelhasználás súlypontjai régióként áthelyeződnek. A globális energiaigény-növekedés hajtóerejét a fejlődő országok fogják jelenteni.

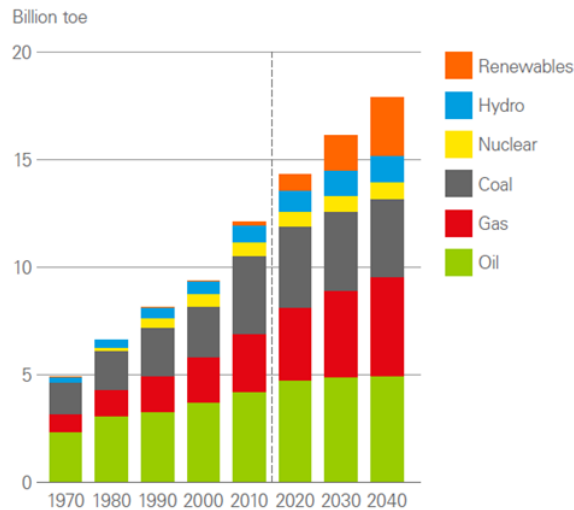


7. ábra: A globális energiafogyasztás régiókénti megoszlása [22]

A fejlődő régiók gazdaságilag húzó országai Kína és India maradnak, így az energiaigény-növekedésben szintén domináns szerepet fognak továbbra is betölteni. Az ázsiai régiók energiafogyasztásának emelkedő trendjét a termelés növekedésén túl az életszínvonal javulása is eredményezni fogja. Az energiapiac átrendeződését jól szemlélteti, hogy 1990-ben a világ energiafogyasztásának kétharmadát az OECD országok fogyasztása tette ki [22][23 pp.8-9].

### c) Az energia igény megoszlása a primer források szerint

A fenntartható fejlődés megvalósíthatóságának elsődleges feltételei közé tartozik, hogy a szén-dioxid-kibocsátást drasztikus mértékben csökkentsük. Ehhez megvizsgálom a legnagyobb emisszióforrásokat és feltárom a csökkentés lehetséges módozatait. A légtérbe jutó széndioxid legnagyobb arányú kibocsátását az energiafelhasználásunk okozza. A következőkben azt vizsgálom meg, hogy az energiaforrások aránya hogyan alakult 1970-től napjainkig és a szakma szerint milyen változáson fog átmenni az energiamix szerkezete a 2040-ig tartó kitekintésben [23 p.9].



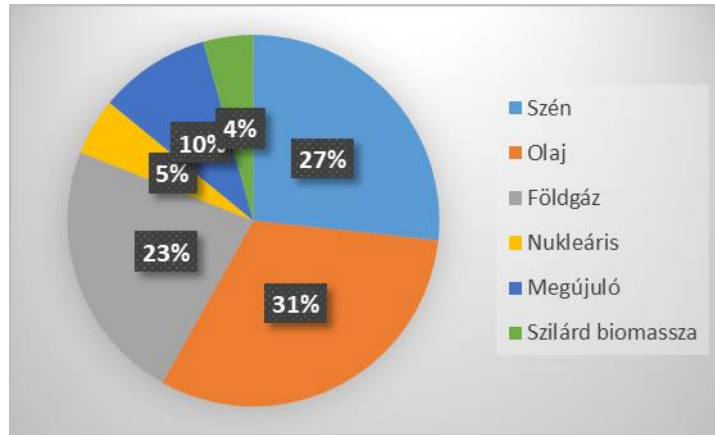
8. ábra: Az energiaigény szerkezete a primer források szerint [22]

Az energia átmenet az energiaforrások szerkezeti összetételében a karbonmentesek arányának növekedését hozza. Az alacsony széndioxid kibocsátású villamosenergia-előállítás felé vezető folyamatban a megújuló bázisú termelés és a földgáz szerepe fog egyre nagyobb hangsúlyhoz jutni a szén- és olajfelhasználás arányához viszonyítva.

A megújuló energia ágazat a leggyorsabban növekvő primer energiaforrás, amely a növekedési volumen csaknem felét fogja biztosítani. A fosszilis tüzelőanyagok között a földgáz jelentősége erőteljesen növekedni fog. A globális energiaigény-növekedés több mint 80%-át a megújulók és földgáz források növekedése biztosíthatja majd. A megújuló energiák a 2020. évi 0,8 milliárd toe (tonna olaj-egyenérték) mennyiségről 2040-re már valószínűleg 2,7 milliárd toe értékre fogják növelni részesedésüket. A 2040-re várható energiamixben ez 15%-os megújuló arányt fog jelenteni. A nukleáris energiatermelés enyhe növekedése várható a jelenlegi mértékéhez képest [22][23 p.9].

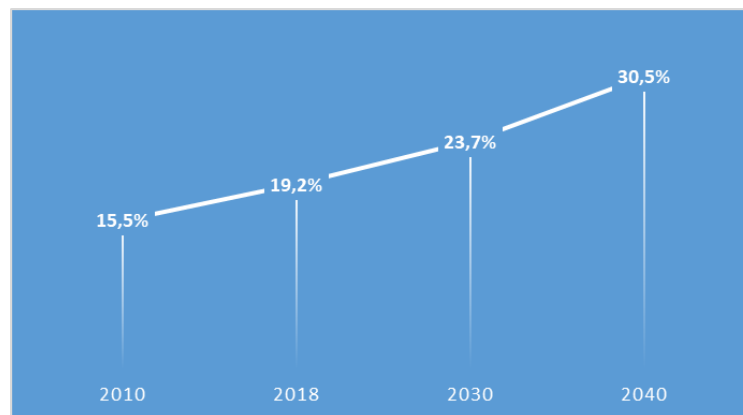
### 1.2.3 A villamosenergia-felhasználás és termelés globális vizsgálata

A globális energiaigény-növekedés folyamatában a 2010. óta eltelt időszakot elemeztem és azt találtam, hogy a 2018. év produkálta a legnagyobb mértékű fogyasztásnövekedést ezzel elérve a 14314 Mtoe (Megatonna olaj-egyenérték) értéket. A 2018-as bővülés mértéke 2,3% volt, amelynek 70%-áért az USA, Kína és India együttesen voltak felelősek. Annak ellenére, hogy 2010. óta a primer energiaforrások közül a legnagyobb növekedést a megújuló források érték [24][25].



9. ábra: A globális primer energia felhasználás arányai 2018-ban (saját szerkesztés WEO 2019 alapján) [24]

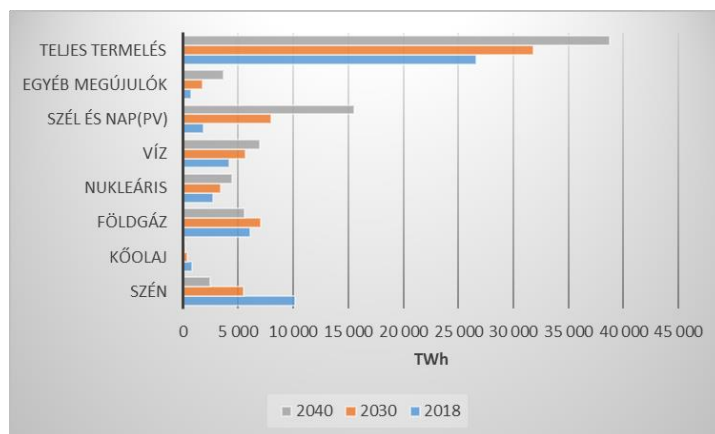
A szakmai előrejelzések azt mutatják, hogy az előttünk álló 2040-ig tartó időszak éves energiaigény növekedése valamivel 1% felett fog alakulni, ellentétben a 2000. óta tartó évi 2% emelkedési tendenciával. A fenntartható fejlődésben a villamos energia teljes energiaigényhez viszonyított növekvő részarányát szemlélteti a 10. ábra [24] [25].



10. ábra A fenntartható fejlődésben a villamosenergia részaránya a végső fogyasztáshoz képest %-ban megadva. (saját szerkesztés WEO 2019 alapján) [24]

A villamos energia szerepét a dekarbonizációs célok teljesítésében jól érzékelteti, hogy a végső felhasználáshoz viszonyítva a jelenlegi valamivel 19 %-os részesedése több mint, 30 %-os értékre fog növekedni. Megvizsgálom, hogy a villamosenergia-előállítás szerkezeti összetétele milyen képet festett 2018-ban, és a fenntarthatóság érdekében milyen arányban kellene a primer energiaforrásoknak részt vennie az energiamixben 2040-ben [25].





11. ábra: A fenntartható fejlődésben a villamosenergia-termelés primer forrásainak részesedése a teljes előállításon belül TWh-ban megadva. (saját szerkesztés WEO 2019 alapján) [24]

A grafikon egyik érdekessége, hogy amíg az új megújuló források, azaz a szél és a nap erőteljes térnyerése mellett a kőolaj és a szén energetikai felhasználása folyamatosan és drasztikusan csökken addig a földgáz szerepe 2030-ig még hangsúlyozottabbá válik. A villamos hálózat stabilitását az együtt járó rendszerek egyensúlya biztosítja. A mindenkori fogyasztói igényeknek – tároló nélküli rendszerben - és a megtermelt villamos energiának egyensúlyban kell lennie. A rugalmassági, tehát szabályzó kapacitások az alap és a menetrendtartó erőművek által megtermelt villamos energia és a fogyasztói igények közötti rést hivatottak kitölteni [59 p.65].

A világviszonylatban az alacsony emissziójú energiaforrások által megtermelt villamosenergia mennyiségén belül a legnagyobb hányadot a vízenergia képviseli, maga mögé rendelve a nukleáris alapú energiatermelést is. A hektikusan termelő szél- és naperőművek terjedésével arányosan a hálózatra gyakorolt hatásuk kiegyensúlyozására az energiatárolók egyre nagyobb jelentőséggel bírnak. A globális energiatároló kapacitások több mint 90%-át a szivattyús vízerőművek tették ki 2019-ben, amely összességében nagyjából 160 GW beépített kapacitást jelentett [54] [55] [56].

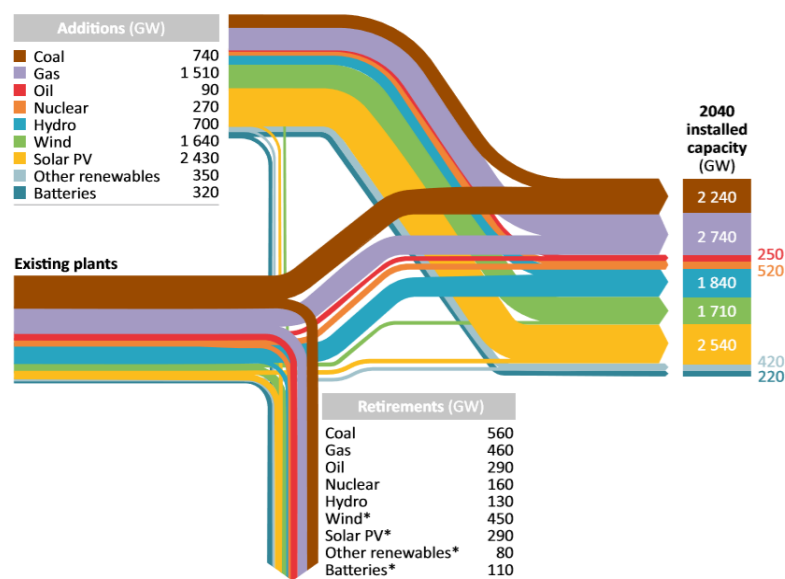
A Három-Szurdok-Gát teljes kapacitása 22,5 GW. Szemléltetésként a Paksi Atomerőmű négy blokkja összesen 2 GW teljesítménnyel képes termelni [57].

A terhelési és termelési görbe közötti különbséget nagyon gyakran gázturbinákkal és gázmotorokkal tudják kiszabályozni. Az időjárás függvényében termelő megújuló bázisú erőművek hektikus termelésének és az elektrifikáció következtében egyre változatosabb formában felhasznált villamosenergia-igény változásának eredményeként minden eddiginél nagyobb szükség lesz a fogyasztói elvárások és a menetrendtartó termelés közötti különbség kiegyenlítésére. Amíg a korszerű energiatárolók fejlesztése és elterjedése nem hoz átütő eredményt addig a gázturbinák szerepe a hálózati paraméterek

megőrzésében megkerülhetetlen. Kedvező természeti adottságú országok a villamosenergia-rendszerük terheléskiegyenlítési és hálózatszabályozási feladataikat szivattyús-energiatározós (SZET) [60] erőművekkel is megoldhatják. A technológia lényege, hogy egy tóból vagy folyóból a termelési időszakok többletként jelentkező, olcsó energiájával felszivattyúzzák a vizet egy magasabb terepszinten mesterségesen kialakított tározóba. A tározóban felhalmozott vízmennyiséget a villamosenergia-rendszer szabályozási igényei alapján engedik le a vízturbinákon keresztül, amelyek a villamos hálózatra termelnek. Ezek a létesítmények a szivattyúzási üzemmódjukon keresztül a leszabályozási feladatokban is hatékonyan részt vehetnek [25].

#### 1.2.4 A villamos erőművek kiöregedése és fejlesztése

Az erőműveket élettartamra méretezik. Az élettartam hosszabbító beruházások is csak véges időtartamra nyújtják ki az erőművek üzemidejét, éppen ezért szükséges új erőművi kapacitások létesítése. [26] [27] [28] A 12. ábra nagyon szemléletesen mutatja be a 2018. és 2040. közötti időszakra tervezett kapacitás megújítás illetve bővítés összetevőit és annak rendszerszintű sémáját globális viszonylatban [29 p.150].

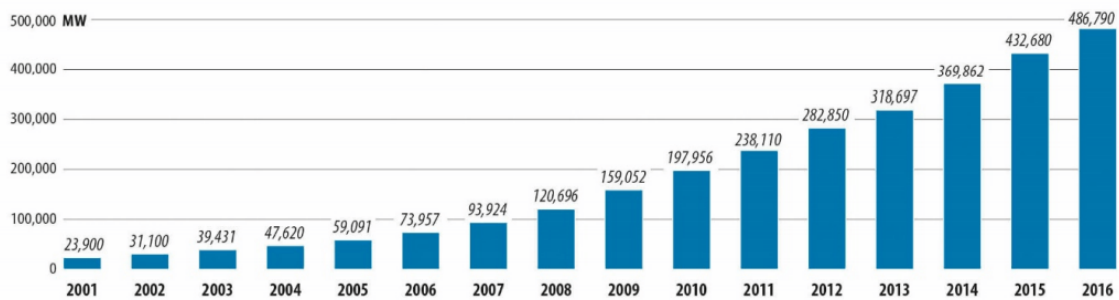


12. ábra A globális erőműpark kiöregedése és bővítése. (WEO, 2018) [18 p.346]

Megvizsgáltam és azt állapítottam meg, hogy a világban a 2018-ban üzemelő teljes beépített kapacitás több mint egyharmada le fog állni a vizsgált időtartam alatt, azaz 2040-ig. Ez hozzávetőlegesen 2500 GW összteljesítményű termelő erőmű kiesését jelenti. A termelésből kiálló, élettartamukat lefutott erőművek több mint a fele fosszilis tüzelőanyagot felhasználó technológiát képvisel. Ezek jellemző életkora 30 év felett van. A tüzelőanyag szerinti megoszlásuk alapján az erőművek fele kőolaj, egyharmada szén

és egyötöde földgáztüzelésű technológiát képvisel. Ez a folyamat néhány ország számára egyben a teljes szenes erőműflotta megszüntetését is jelenti egyben. A megújuló bázisú termelő technológiák közül összesen 950 GW teljesítménytől kell búcsút venni. Ezek közül a vízerőművek kivételével a legtöbbnek a tervezett élettartama 20÷25 év, amely meglehetősen rövidnek számít az erőművek világában [18 pp.346-347] [29 p.150].

A 13. ábrából vonok le következtetéseket annak megítélésére, hogy a szél erőművek viszonylatában mit jelent globálisan a nyugállományba vonulás, tehát milyen teljesítmény kiesés várható a következő években.



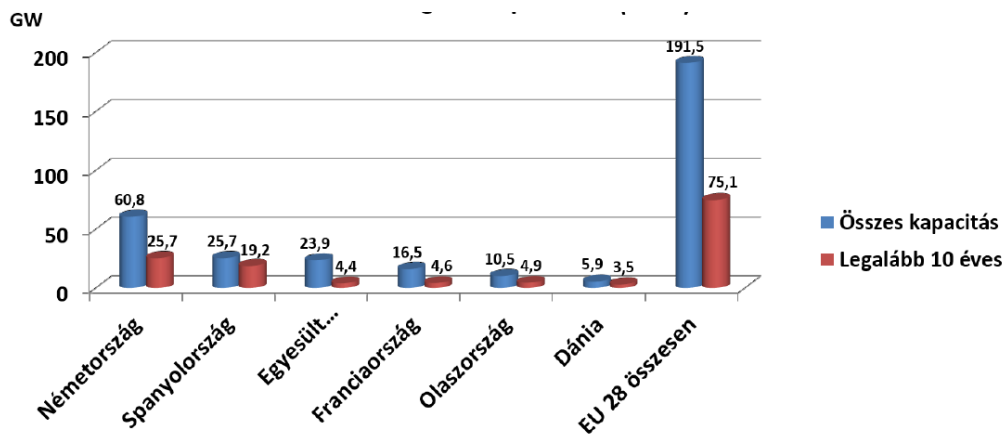
13. ábra. Világviszonylatban beépített szél erőmű teljesítmények 2001. és 2016. között [35]

A kiöregedett szél erőmű kapacitások további 10 évnél hosszabb életciklus hosszabbítását egy új berendezés létesítési költségének nagyjából a tizedéből el lehet végezni, ezért ez egy reális alternatívát képvisel a tulajdonosok számára [35]. A teljesség megítéléséhez hozzá teszem, hogy fiatal technológia lévén, jelenleg még nem áll rendelkezésre széleskörű tapasztalat ahhoz, hogy egyértelmű és megalapozott döntést lehessen hozni a teljes leszerelés, a teljes felújítás vagy az üzemidő hosszabbítás mellett.

Számos ország felismerte az atomerőművek meghatározó szerepét a klímavédelem és az ellátásbiztonság terén, ezért üzemidő hosszabbító beruházásokat hajtottak végre. Ezek közül a jelentősebbek közé tartozik az USA-ban kiadott 99 reaktorra vonatkozó engedély, amelyből 85 esetben 20 év hosszabbítással 60 éves élettartamot futhatnak és négy esetén 60-ról 80 évre bővíthet a termelési lehetőség. Az előző folyamathoz hasonlítom az MVM Paksi Atomerőmű négy blokkjának 20 évvel történő üzemidő hosszabbítását is. A Cseh Köztársaság jelenleg végzi a négy Dukovany egység benyújtott tervdokumentációjának ellenőrzését további 20-20 év élettartam hosszabbítás szándékával. A francia székhelyű EDF reaktorai közül 15 egység, amely az Egyesült Királyságban működik, megkapta a 40 évre szóló hosszabbítási engedélyt. Svédország is az üzemidő kiterjesztése mellett döntött az öt üzemelő reaktora esetében. Kanada tíz reaktor felújítását végzi, amely flottája nagy részének üzemidejét 2050-ig terjeszti ki [18] [29 p.151][61].

Megítélésem szerint a villamosenergia-ellátás biztonságának megalapozása hosszú távú, komplex stratégiai tervezést igényel, amelynek az aktuális árampiaci mutatók a sok közül csak egyik bemenő adatát jelentik. A pillanatnyi áramár-értékek túldimenzionálása kockázatot hordoz a villamosenergia-termelő ágazat jövőjére nézve [29 pp.151-152].

A megújuló bázisú termelők közül az időjárástól függő szél- és naperőmű technológiákat vizsgáltam meg az Európai Unió viszonylatában. A megújuló energia bumm következményeként 2019. évvel bezárólag az EU-28 tagállamaiban együttesen 130 GW fotovoltaikus, és 191 GW összteljesítményű szél- és naperőmű került megépítésre. Összehasonlításként megemlítem, hogy ezen teljesítmény értékek a 966 GW teljes erőművi portfólió részét képezték és a 2019. évi 3100 TWh teljes nettó megtermelt energia mennyiségén belül közel 558 TWh – val vették ki a részüket. A téma aktualitását növeli, hogy a szélenergia bázison termelők közel negyede 2007. előtt lépett üzembe.



14. ábra Az EU-28 legnagyobb szél- és naperőmű kapacitással rendelkező országai 2020-ban [34]

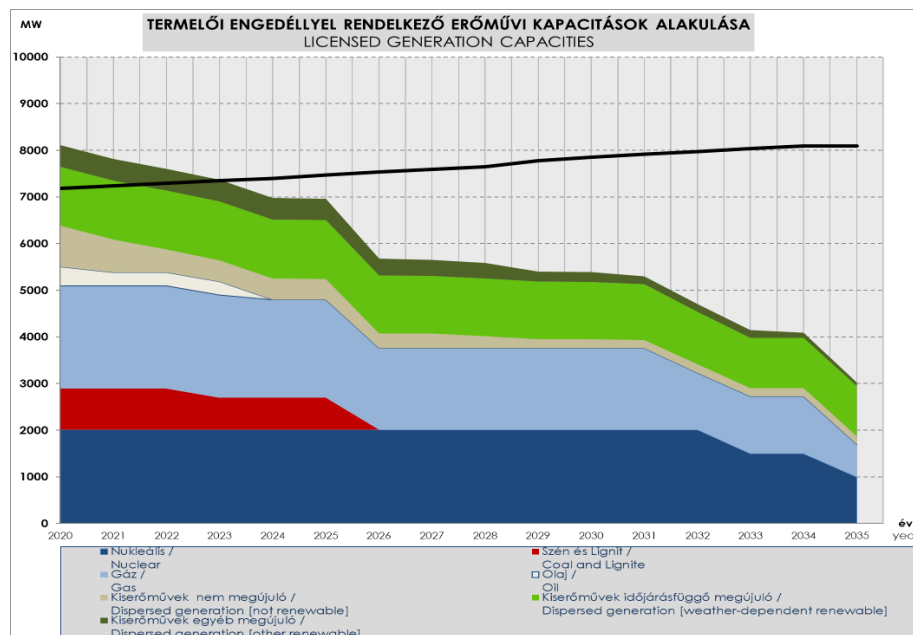
A 10 évnél korosabb szélkapacitások aránya 2020-ban Németország esetén 42%, Spanyolországban 74,%, Dániában 58,8%, Olaszországban 46,6%, Franciaországban 28% végül az Egyesült Királyság 18,5%-al zárja a sort.

Az EU-28 tagállamára vetített teljes kép több mint 39%-os 10 évnél idősebb részesedést mutat. Ami figyelemfelkeltő, hogy 2030-ra csaknem 75 GW volumen eléri a még korábbi technológiákra jellemző 20 éves tervezett üzemidőt, vagyis az előirányzott élettartamának a végére ér [34].

Az EU-28 országait a napelemes szegmens vonatkozásában megvizsgáltam és megállapítottam, hogy a 2020-ban regisztrált beépített teljesítmény 12%-a, azaz 16 GW mennyiség épült 2010. előtt. Ez az év azért érdekes számunkra, mert 2011-ben állt üzembe a legnagyobb éves kontingens 22 GW összteljesítménnyel. Ebből azt a következtetést is levontam, hogy a napelemes termelők térnyerése meglehetősen nagy késleltetéssel követte a szélkerekek felfutását ezért a 2030-as referencia évben

alacsonyabb mértékű kifutásukat valószínűsítem. A teljességhez hozzá tartozik, hogy az inverterek cseréjére a napelemes erőművek tervezett élettartama alatt legalább egyszer biztosan sor kerül és a napelemek degradációja folytán az erőművek hatásfoka is folyamatosan csökkenő tendenciát mutat. A hálózatfejlesztések, a rugalmassági technológiák, köztük az energiatárolási módok még jelentős kihívásokat tartogatnak az üzemeltetők és a fejlesztők részére [34].

Megvizsgáltam és megállapítottam, hogy a hazai erőműparkra is jellemzőek a globális trendek. A MAVIR előrejelzése alapján a 2019. év elején üzemelő csaknem 8900 MW beépített kapacitásból a kiöregedésük következtében 2029-re mindössze 5323 MW, míg 2033-ra csupán 3908 MW ipari nagyerőművi összkapacitás vehető figyelembe. A jelenleg is üzemelő kiserőművekből 2033-ra mintegy 849 MW kapacitással lehet számolni [30] [29 p.152].



15. ábra A Villamos Energia Rendszerben maradó források és a várható csúcsterhelés [33]

A fenti grafikon a 2020-tól 2035-ig terjedő időintervallumban szemlélteti a különböző hazai erőművi technológiák kiöregedési folyamatát és a fogyasztói igény növekedés várható trendjét. A két görbe közötti növekvő rés az erőmű megújítások, kapacitás-pótlások és az erőmű-park bővítésének szükségességét irányozza elő. Az energiaellátás biztonságát szakmai stratégiai tervezési munka kell, hogy megalapozza. A tervezés bemenő adatai komplex elemzések eredményeként születnek. Figyelembe kell venni többek között a gazdaságosságot, az előrejelzéseket, a klímavédelmet, az alaperőművi ellátás megőrzését, a megújuló bázisú energiatermelők rendszerbe integrálását, az import

kitettség csökkentését, a rugalmassági kapacitásokat, a hálózat szabályozhatóságát és az európai energiastratégiát is [29 pp.152-153].

## **1.3 Tiszta bolygót mindenkinek**

### **1.3.1 A bolygónk védelme**

Az Európai Bizottság (EB) 2018-ban jelentést készített „Európa hosszútávú stratégiai jövőkép egy virágzó, modern, versenyképes és klímasemleges gazdaságról” a „Tiszta bolygót mindenkinek” címmel. A dokumentumot megküldte az Európai Parlamentnek, az Európai Tanácsnak, az Európai Gazdasági Szociális Bizottságnak, a Régiók Bizottságának, az Európai Beruházási Banknak. A közlemény részletesen bemutatja az éghajlatváltozás kiváltó okát valamint annak már most is tapasztalható és várható negatív hatásait. A gyorsuló globális felmelegedés következtében egyre gyakoribbá és intenzívebbé válnak az időjárás szélsőséges megnyilvánulásai. Az északi sarkkör erőteljes felmelegedése, aszályok, árvizek, hóhullámok, erdőtüzek, hurrikánok pusztító hatását tapasztaljuk egyre gyakrabban. Az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) 2018. októberben kiadott jelentésében részletesen elemzi az ipari forradalom előtti állapothoz képest bekövetkezett 1C°-os globális átlaghőmérséklet emelkedés kiváltó okait, következményeit és a folytatásban várható forgatókönyveket. Tudományos megalapozottsággal mutatja be a további felmelegedési lépcsőkhöz tartozó várható következményeket. Beavatkozás nélkül 2060 után már a 2C°-ot is elérheti az átlaghőmérséklet növekedése. Ebben az esetben a bolygónk szárazföld területeinek 13%-án változhat meg a jelenlegi ökológiai egyensúly. A korallzátonyokból mindössze 1%-a maradhat meg és az északi jégsapka teljes eltűnésével akár 7 m-el is megemelkedhet a tengerek vízszintje, amely az alacsonyan fekvő partszakaszok elárasztásával fog járni. Az időjárás szélsőséges megnyilvánulásai jelenleg Európa polgárainak 5%-át érinti, de 2017-ben ez 283 Mrd Euró többletköltséget jelentett. Szakmai intézkedések nélkül 2100-ra már az európai népesség kétharmadát érintheti ez a hatás. Ezen időszak alatt a mediterránium több mint 15%-a válhat terméketlenné a szárazság következtében. Észak-Afrika és a Földközi tenger környezetéből meginduló népvándorlás háborúk kitörését, a gazdasági, társadalmi stabilitások megbomlását eredményezheti. A szakmai döntések eredményeként alapozhatjuk meg a fenntartható fejlődést és a régió biztonságát [31] [29 p.153].

### **1.3.2 Virágzó, modern, versenyképes és klímasemleges gazdaság távlatai**

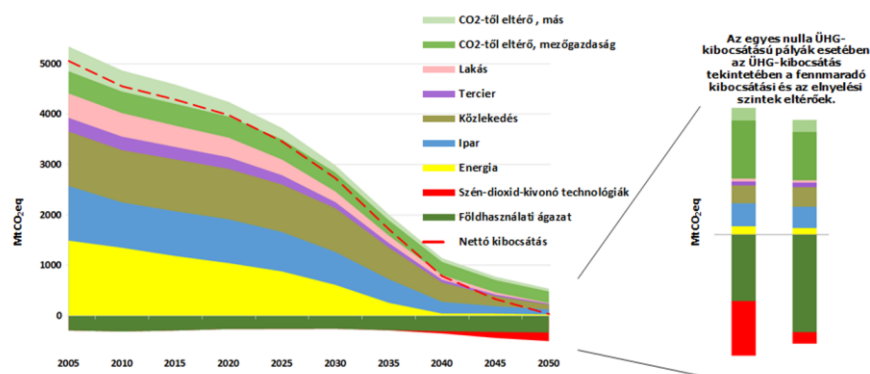
#### **Európában**

A 2050-ig szóló stratégia Európa és egyben a globális klímavédelmi tervek megvalósításáról szóló törekvéseket tartalmazza. Ez a célok megőrzése mellett azok elérésének javasolt módozatait, a lehetséges irányokat tartalmazza. A legfontosabb cél, hogy 2050-re gazdasági és társadalmi megrázkódtatások nélkül teljesüljön az üvegház hatású gázok nettó zéró emissziója. A célok meghatározásánál az ENSZ és a Párizsi Egyezmény által meghatározott elvárások teljesítése a döntő szempont. A globális üvegházhatású gázok kibocsátásának 10%-a köthető az EU tagállamok tevékenységéhez. Az EU eddigi legmagasabb emisszió értéke 1979-ben terhelte a légkört. Az elindított energiaátmenetnek köszönhetően az 1990. és 2016. közötti időszakban elért 54%-os GDP bővülést, 2%-os energiacsökkenés és 22%-os emisszió mérséklődés mellett sikerült elérni. Az EU klímavédelmi intézkedéseinek betudhatóan új gazdasági ágazatok jelentek meg, bővítve a munkaerő piacot és a fejlesztések eredményeként egyben a költségek csökkentését is lehetővé tette. A legjobb példák egyike, hogy 2005-höz képest, 8%-os bővüléssel a megújuló energiák használatának részesedése 2017-re elérte a 17%-os arányt. Az EU által megvalósítandó energiaunió elsődleges feladatai közé sorolja az EB az energiahatékonyság és a megújuló energiák használatának vezető szerepét. Az emisszió kereskedelmi szabályozások fő törekvése, hogy a szén-dioxid kibocsátás és kivonás egyensúlyba kerüljön. A 2030-ra vonatkozó célszámok szerint az energiahatékonyság 32,5%-os javulását és 32%-os megújuló felhasználást várnak el a végső energiafelhasználásra vonatkoztatva. Mindezt az 1990-es értékhez képest 40%-os emisszió csökkentés mellett végrehajtva. Az iránymutatás egyik lényeges eleme, hogy a 2050-re vállalt karbonsemlegesség úgyis megvalósítható, hogy valamelyik ágazat kibocsátását egy másik ágazat kivonja, például erdősítéssel. A merész elképzelések kizárólag széleskörű összefogással valósulhatnak meg, amely a társadalom minden rétegét érinti. A közös erőfeszítések a fenntarthatóság megteremtése mellett a polgárok életminőségének emelkedését is jelentik [31] [29 p.154].

### **1.3.3 A zéró emisszióval rendelkező gazdaságra való átállás**

A társadalmi és gazdasági korszerűsítések kulcsfigurája az állampolgár és a fogyasztó vagyis az emberi tényező. A jövő iránya a digitalizáció által biztosított okos rendszerek felé vezet, amely minden energiaágazatot és közlekedést is megváltoztatja a végfelhasználó kényelmét szolgálva. Minden eddiginél nagyobb szerephez jut a kutatás-

fejlesztés és az innovációk segítése. A versenyhelyzetet a fejlődő gazdaságok fogják egyre élesebbé tenni. Az Európai Unióban az üvegházkibocsátású gázok csaknem 75%-a az energiafelhasználással hozható összefüggésbe. Az okos- megoldások és technológiák forradalmi átalakulása az innovációkat is magába integráló energiaátmenet felé vezet, amelynek végállomása a zero kibocsátás megközelítése. A döntéshozók és a gazdasági vezetők feladata, hogy az innovatív megoldások a lehető leggyorsabban beépüljenek a technikai struktúrákba, hogy a leghatékonyabb eszközök alapozzák meg a célkitűzések elérését. Az ipari termelés új termékei meg fogják változtatni a piaci viszonyokat is. Az infrastruktúra fejlesztések nélkül a digitalizáció, automatizálás és az energiaátmenet nem érvényesülhetne. Szükség van a kommunikációs hálózatok, a villamos művek, a gázvezetékek és gáztárolók valamint a közlekedési utak és intelligens töltőhálózat fejlesztésére. A bioenergiák előállítás fejlesztésének jelentőségét a 2050-re 30%-al gyarapodó európai népesség táplálékkal való ellátása, a biomassa primer forrásként történő figyelembe vétele és a növényzet szénmegkötő képessége helyezik előtérbe. A CCUS technológiákat a negatív CO<sub>2</sub> kibocsátás érdekében kell fejleszteni. Ez azt jelenti, hogy több szén-dioxidot vonunk ki a légkörből, mint amennyit kibocsátunk. A technológia gazdaságosságának és kereskedelmi érettségének eléréséhez még hosszú az út a fejlesztők és innovátorok előtt [31]. [29 pp.155-156].



16. ábra Az üvegházhatású gázkibocsátási elvárás szerkezeti összetétele a 1,5 °C globális átlaghőmérséklet-növekedés megtartásához [31]

A 16. ábrán vázolt, szektoronként megjelenített emisszió csökkentési elvárások teljesülése nagyon sok kihívással és buktatóval jár. A megvalósítás lehetséges módozataira születtek forgatókönyvek és ajánlások. A globálisan fenntartható fejlődés és az Európai Unió biztonságának, társadalmi és gazdasági vívmányainak megőrzése valamint továbbfejlesztése érdekében a politikai-, gazdasági vezetők összefogására, a teljes lakosság energiatudatos személyes döntéseire van szükség. A Clean Planet for all



c. EU dokumentum elsősorban megújuló termelést preferálja a nukleáris alapú termeléssel szemben, holott az atomerőművek termelése jelentős CO<sub>2</sub> csökkentési képességet képvisel. Az EU erre építi fel későbbi kereskedelmi, hiteltámogatási rendszerét is. Ebben a kérdésben jelenleg is komoly szakmai és politikai viták folynak, amelyben a „pro-nukleáris” tagállamok és nukleáris szervezetek, így például a FORATOM is ennek megváltoztatását, reális alternatívájú, működőképes kiegészítését indítványozzák az atomenergia kellő súllyal történő figyelembe vétele érdekében. A hazai ellátásbiztonság és a klímavédelem szempontjából meghatározó az MVM Paksi Atomerőmű által stabilan, gazdaságosan előállított villamosenergia-mennyiség, amely a belföldi termelési szerkezeten belül megtermelt villamos energia mennyiség csaknem felét, 90% feletti teljesítménykihasználási-tényező mellett biztosítja. Az atomerőmű 20 évvel hosszabbított üzemideje 2032. és 2037. között mind a négy blokkra vonatkoztatva le fog járni ezért a kapacitás fenntartásáról gondoskodni kell [31][29 pp.156-157].

## **1.4 Tiszta energiatermelés**

### **1.4.1 Az európai zöld megállapodás**

Az Európai Unió célul tűzte ki maga elé, hogy 2050-ig megvalósuljon a klímasemlegesség. Ez valójában egy stratégia. Ennek elérése elképzelhetetlen a gazdaság valamint a társadalom mélyreható változása nélkül és amelynek jelszavai a költséghatékonyság, igazságosság, társadalmi kiegyensúlyozottság.

A kitűzött célok megvalósítását az „Irány az 55%!” jogi keret biztosítja. A csomag jogalkotási javaslatok sorozata, amely az éghajlat, az energia és a közlekedés jelenlegi szabályozások módosítását érinti. Ezzel együtt új jogalkotási kezdeményezések érintik többek között a kibocsátás-kereskedelemet, emisszió csökkentés, erdőgazdálkodás, megújuló energiák, energiahatékonyság ágazatokat.

Az „Európai klímarendelet” irányozza elő, hogy az EU nettó üvegházhatású gáz emissziót minimum 55%-al kell mérsékelni 2030-ra az 1990-es szinthez képest.

„Az éghajlatváltozás hatásaihoz való alkalmazkodásra vonatkozó uniós stratégia” a pozitív szemléletű alkalmazkodásra képes társadalom kialakítását célozza meg a megelőzés, a felkészültség, a reagálás, a helyreállítás tevékenységek prioritása mellett.

Az „Európai iparstratégia” legfontosabb feladatának szánja az innovációk és a digitalizációs fejlesztések nyomatékosítását a zöld átállás folyamatában.

„A körforgásos gazdaságra vonatkozó cselekvési terv” előirányzata, hogy a gazdasági növekedést ne befolyásolja az erőforrásoktól való függőség.

Az „Elemek, illetve akkumulátorok és hulladékelemek, illetve –akkumulátorok” akkumulátor útleveél bevezetésével igyekeznek megvalósítani a veszélyes anyagok nyomon követhetőségét a teljes életciklus alatt valamint az újrafeldolgozást előtérbe helyezni.

Az „Igazságos átmenet” a nagyobb fosszilis függőséggel rendelkező régiók számára biztosít kiemelt támogatást a klímasemlegesség eléréséhez 2050-ig.

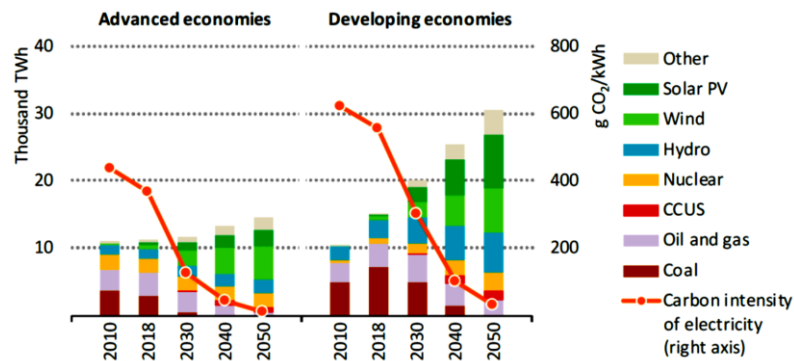
A „Tiszta, megfizethető és biztonságos energiaellátás” kiemelt jelentőséggel bír ugyanis az Európai Unió üvegházhatású-gáz kibocsátásának 75%-áért az energiafelhasználás tehető felelőssé. Fő szempontjai között találjuk a tiszta források használatát, az energiarendszerek integrációját valamint a megújuló energiák és az energiahatékonyság előtérbe helyezését.

A „Kezdeményezések a fenntartható és intelligens mobilitással kapcsolatban” célja, hogy a közlekedési szektor emissziója 90%-al csökkenjen 2050-re.

Az „Erdőstratégia és erdőirtásmentes behozatalok” törekvése, hogy fával borított területek mérete növekedjen, ennek érdekében 2030-ig 3 milliárd fa ültetését támogatja [80].

#### **1.4.2 Az energiatermelés karbonmentesítése**

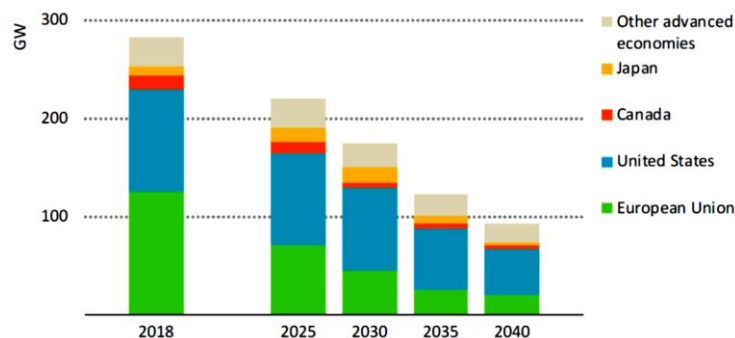
A klímavédelmi intézkedések közül a legfontosabbak közé tartozó széndioxid kibocsátás csökkentéséhez az atomenergia felhasználása nagymértékben hozzájárul. A fenntartható fejlődéshez áttörésre van szükség bioenergiák hasznosításában is. Ezek hasznosítása a remélt 7%-os részesedést fogja elérni. A CCUS (Carbon Capture, Utilization, and Storage) új alkalmazott technológiaként teheti lehetővé 5%-nyi saját résszel a szén és földgáz tiszta energiaként történő felhasználását. A CO<sub>2</sub> kivonás nélküli széntüzelést alkalmazó energiaátalakítási technológiák a fejlett gazdaságokban 2030-ig, a fejlődő gazdaságokból 2045-ig valószínűleg kivonásra fognak kerülni a termelési szerkezetből. A 19. ábrán azt követhetjük végig, hogy 2050-ig milyen energiaátmenetet kell megvalósítani a fejlett és fejlődő gazdaságoknak a fenntartható jövő érdekében [24] [25 p.95].



17. ábra A fejlett és fejlődő gazdaságok trendje a zero karbon kibocsátás felé a villamosenergia-termelésben [24]

Ahhoz, hogy 2050-re a villamosenergia-termelés karbon intenzitása 23g CO<sub>2</sub>/kWh értékre csökkenjen a 2018-as 475 g CO<sub>2</sub>/kWh értékről a következő energiaátmenet megvalósulását kellene elérni. A Föld teljes lakossága rendelkezni fog a villamosenergia-felhasználás lehetőségével. Ennek kiegészítéseként a közlekedés-szállítás, más ágazatokkal együtt villamos energiafelhasználásra fog áttérni a jelenlegi egyéb más energiaforrásokról. A globális energiafelhasználáson belül a 2018-ban rögzített 19%-os villamosenergia-részarány 2050-re közel meg kell, hogy kétszereződjön. Ezzel a növekedéssel a villamosenergia-fogyasztás a 2018-ban felhasznált mennyiségéhez képest, 2050-re 70%-kal lesz nagyobb, amely több mint 45 000 TWh érték lesz. A villamosenergia-termelés forrásszerkezete teljesen át fog rendeződni az alacsony emissziót biztosító energia mix irányába. A karbonmentes források 2018. évi 36%-os aránya a 2030-ra prognosztizált 60% körüli értéken keresztül el kell, hogy érje a 94%-os részesedést [24] [51].

Az üzemelő atomerőművek átlagéletkora 35 év. Az üzemidő hosszabbításoknak köszönhetően még hosszú időre versenyképes tiszta energiaforrásként lehet rájuk számítani. A gazdaságosságukra jellemző adat, hogy a retrofiton átesett létesítmények előre becsülhetően 40÷60 USD/MWh közötti fajlagos áron tudnak majd nagy mennyiségben karbonmentes áramot termelni. Az üzemidő hosszabbításra más országokhoz hasonlóan hazánkban is jó példa az MVM Paksi Atomerőmű folyamatos korszerűsítése. A meghosszabbított üzemidővel termelő erőművek még a csökkenő költség trendet felmutató megújuló technológiákkal szemben is piacképes alternatívát kínálnak [24][25 pp.95-96].



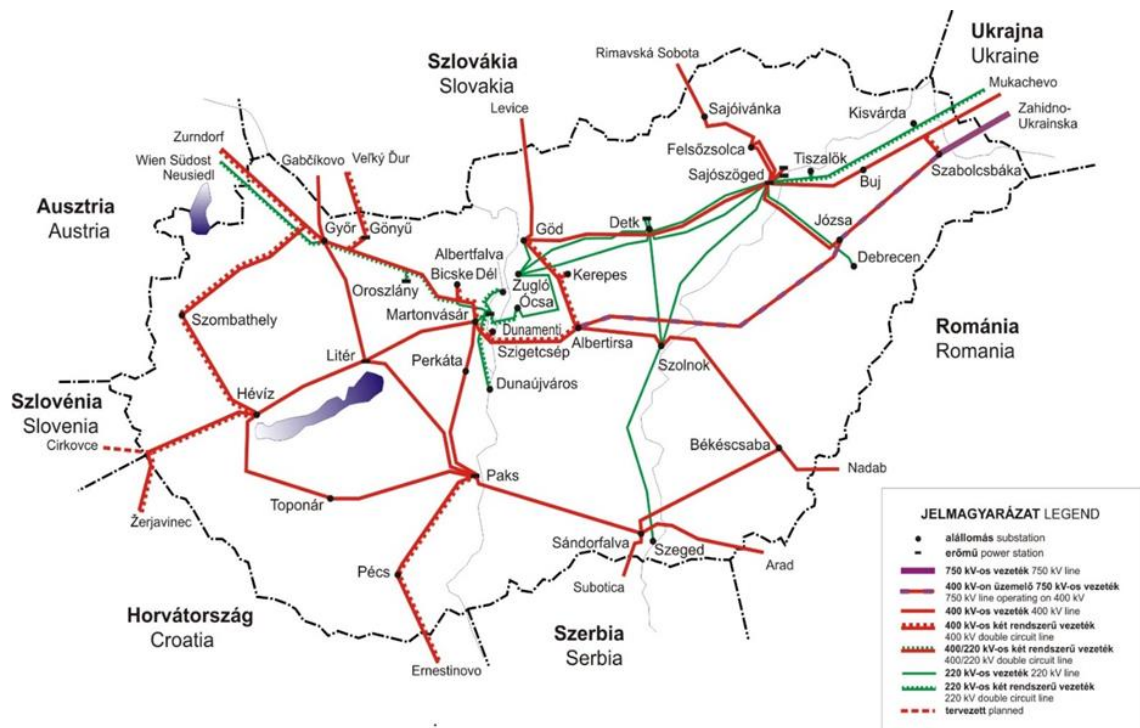
18. ábra A jelenleg üzemelő atomenergia kapacitások jövője a fejlett gazdaságokban további beruházások nélkül [24 p.91]

Amennyiben nem történnek üzemidő hosszabbítások és nem indulnak új beruházások a fejlett gazdaságokban, abban az esetben 2040-re a beépített atomerőmű összteljesítmény az egyharmadára fog csökkenni a 2018-as állapothoz képest. Ez a klímavédelemre és a villamos energia árra is erős, negatív hatást gyakorolna. A fejlesztés alatt álló kisméretű moduláris reaktorok piaci megjelenése hozhat széleskörű pozitív fogadtatást és új lendületet a nukleáris kapacitásokat bővítő beruházásoknak. A kieső illetve elmaradó nukleáris kapacitások esetén az egyébként sem könnyű fenntartható fejlődéshez szükséges emisszió csökkentési célok eléréséhez jóval nagyobb erőfeszítések kellenének. A rendszerből ily módon hiányzó atomerőművek helyettesítése megújuló forrásokkal becsülhetően csak 2040-ig legalább 1,6 trillió USD többlet beruházási költséget jelentene [24 p.91] [25 pp.96-97].

## 1.5 A hazai villamosenergia-felhasználás és termelés

### 1.5.1 A Magyar villamosenergia-rendszer

A magyar villamos energia rendszer (VER) felépítése funkcionálisan és feszültség szint szerinti hierarchikus szintekre tagolódik. A villamos hálózat rendeltetése, hogy az erőművekben előállított villamos energiát összegyűjtse és eljuttassa a felhasználóig.

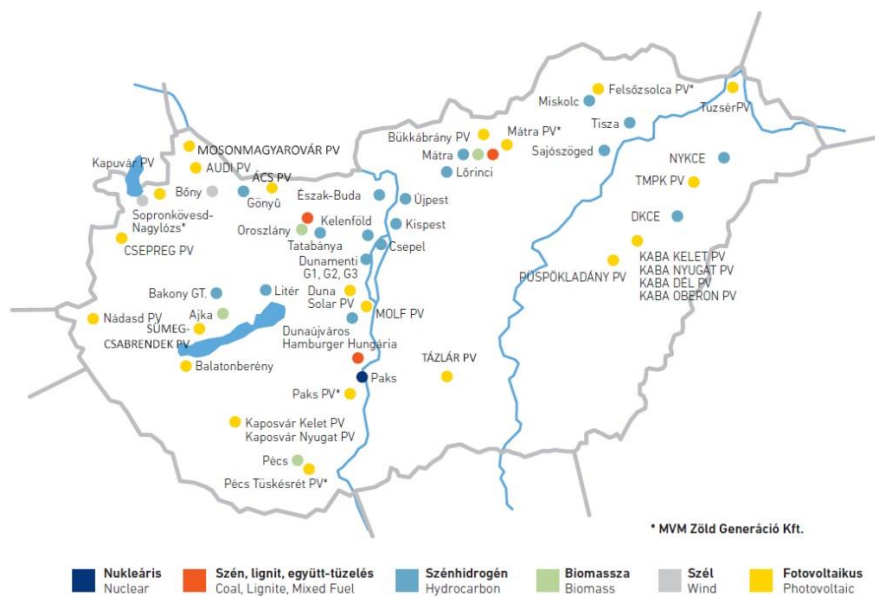


**A magyar átviteli hálózat (2021)**  
The Hungarian transmission network (2021)

HUNG2021a\_h\_kisok\_jelmag COR 2021.10.05. F.Z.

19. ábra A magyar átviteli hálózat [37 p.12]

Az erőművek rendeltetésük szerint lehetnek alaperőművek, menetrendtartó és csúcserőművek. Az MVM Paksi Atomerőmű 2000 MW feletti beépített teljesítménnyel tipikus alaperőművi termelő. Alaperőművi és menetrendtartó feladatokat is képes ellátni a lignit(barnaszén) tüzelésű Mátrai Erőmű is csaknem 1 GW beépített kapacitással. A primer energiaforrások átalakítását szolgáló technológia szerint is különbséget tehetünk, nukleáris, fosszilis bázisú, megújuló alapú energiatermelő technológiák között. A villamos hálózat legmagasabb hierarchikus szintje az átviteli hálózat, amely 220 kV, 400 kV valamint 750 kV-ra szigetelt rendszerek együttese és csaknem 5000 km vezeték hosszban tesz eleget rendeltetésének. Rendszerszintű feladata a nagy mennyiségű energiák gazdaságos szállítása nagy távolságokra. Ezeken a feszültségszinteken történik a határkeresztező kapacitások által biztosított nemzetközi kooperáció valamint az alaperőművek és a jellemzően 100 MW feletti termelő létesítmények betáplálása [23 p.12].



20. ábra A rendszerszintű koordinációban résztvevő erőművek 2021. december 31-én [37 p.29]

A VER 35 átviteli hálózati transzformátor állomásán keresztül jut el a villamos energia legnagyobb hányada az elosztóhálózatba, amely 132 kV, 35 kV, 22 kV, 10 kV feszültség szinten látja el a nagy ipari üzemeket és a fogyasztói körzeteket. Erre a feszültség szintre csatlakozhatnak a 100 MW alatti beépített teljesítménnyel rendelkező ipari méretű erőművek. Az ipari üzemek belső hálózatai 10 kV, 6 kV és 3 kV középfeszültségen üzemelnek. A lakossági fogyasztók részére kisfeszültségen, vagyis 0,4 kV-on juttatják el a villamos energiát az Elosztóhálózati Engedélyesek, vagyis az áramszolgáltatók [23 pp.8-9].

### 1.5.2 A megújuló energiaforrások helyzete és előre törése

„A fenntartható fejlődés olyan fejlődés, amely kielégíti a jelen szükségleteit anélkül, hogy csökkentené a jövő generációk képességét, hogy kielégítsék a saját szükségleteiket..”, [38]

Az éghajlatváltozás kiszámíthatatlan következményei súlyos gazdasági károkat okoznak. A gazdasági szereplők is keresik a fenntartható fejlődést szolgáló energiaforrásokat. Ezt a tendenciát erősítve a finanszírozók egyre több forrást csoportosítanak a megújuló energiaforrások projektjeinek finanszírozására [39][40]. Az ökológiai megfontolások pedig csak tovább növelik a megújuló iránti érdeklődést [41].

A villamosenergia-termelés, különböző technológiai tesztek lehetővé, hogy a villamos erőművekben a különböző sajátos átalakítási módok segítségével a különféle primer energiahordozók energiájából villamos energiát nyerjünk [42].

Az energiatermelő egységek attól függően, hogy a bemenő vagy a kimenő energiát lehet változtatni, lehetnek irányítható vagy szabályozható illetve irányítható és szabályozható technológiák. Ez igaz a megújuló energiát termelő egységekre is. Irányítható az az energia-termelő technológia, amelynél a bemenő tehát primer energia hordozót tudjuk változtatni. Szabályozható az az energiatermelő technológia, amelynél a kimenő tehát megtermelt energiát tudjuk változtatni [43].

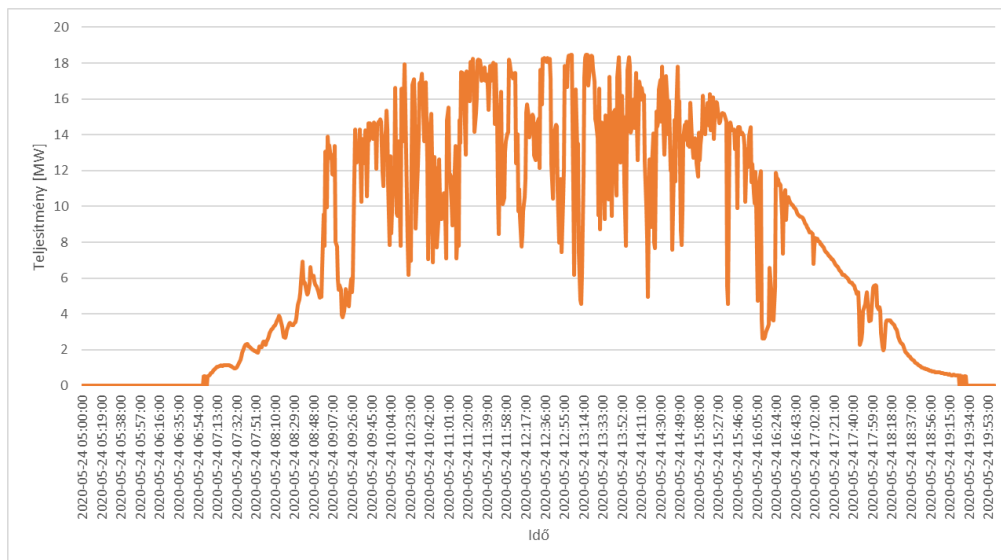
### 1.5.3 Az időjárásfüggő megújuló bázisú villamosenergia-termelés jellemzői

A megújuló alapú technológiák közül hazánk természeti adottságai a napenergia hasznosítás szempontjából kifejezetten kedvezőek [44].

A naperőművek jellegzetességei közé tartozik, hogy a primer energiaforrás tekintetében nem irányítható azonban kizárólag le irányban szabályozható, tehát a kitáplálendő teljesítménye csökkenthető.

Az időjárásfüggő megújulók termelési jellemzőire jó példa a Pakson üzemelő 20,68 MWp beépített teljesítményű fotovoltaikus naperőmű napi termelési görbéje.

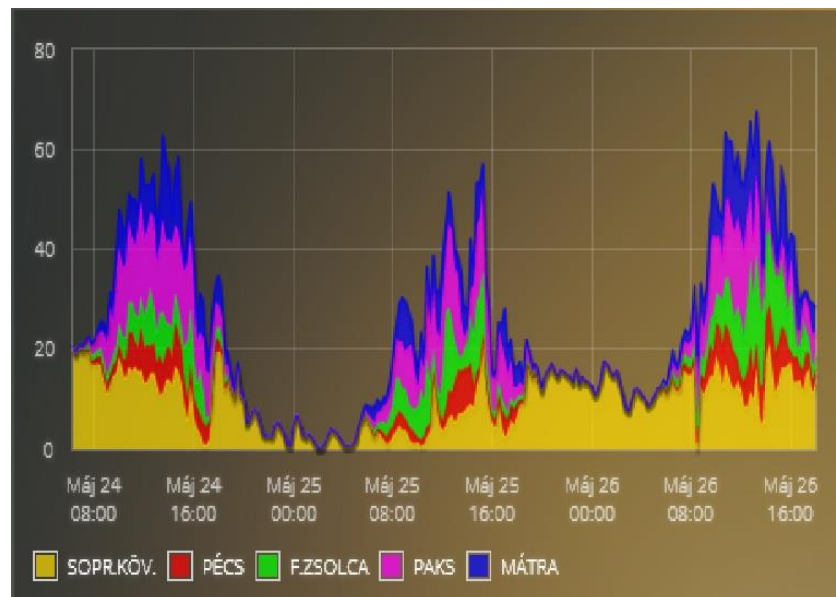
A 21. ábra termelési grafikonon nyomon követhető az inverterek indulása a reggeli órákban és kikapcsolása a kora esti időszakban.



21. ábra A Paksi 20,6 MW-os Naperőmű napi termelési diagramja 2020.05.24-én [44]

Az átvonuló felhők okozta termelési görbe beszakadások jól érzékeltetik az időjárási viszonyoknak való termelési kiszolgáltatottságot. Amit érdemes a grafikon alapján megjegyezni, hogy villamosenergia-felhasználás igénye akkor is jelentkezik, amikor nem üzemelnek a naperőművek. A hálózati szabályzó kapacitásokat a fogyasztói igényváltozáson túl az előre nehezen kiszámítható termelés-ingadozásokhoz is

figyelembe kell venni. A hálózati csatlakozási pont kellően stabil kell, hogy legyen, tehát nagy mögöttes teljesítménnyel kell, hogy rendelkezzen [23 p.13]. Van olyan álláspont, amely szerint az ország eltérő földrajzi helyein üzemelő megújuló bázisú erőművek termelését nem ugyanabban az időszakban befolyásolja ugyanaz a természeti hatás, ezért azok kiadott teljesítmény értékei kiegyenlíthetik egymást. A 22. ábra az ország egymástól távoli pontjain elhelyezkedő nagy beépített teljesítményű megújuló bázisú, szél és nap erőművek összesített termelési görbéjét mutatja be.



22. ábra Az MVM Zrt. tulajdonú nagy megújuló erőművek össztermelése 2020. május 24. és 26. között [44]

A grafikon vizsgálatakor megállapítható, hogy a „perces” időtartamokon belül valóban lehetséges a görbék átfedése, azonban az összegzett teljesítmény görbe is megőrzi az időjárásfüggő jellegét. Az időjárásfüggő megújuló bázisú villamos energia előállítását – csak időszakosan és erős korlátok között - az alaperőművi termelésen felüli kiegészítésként vehetjük figyelembe. A tényerésükkel az eddigiekhez képest új és nehezen megoldandó feladatok jelentkeznek az ellátásbiztonság fenntarthatósága érdekében [23 p.13].

#### 1.5.4 Új jelenségek és feladatok a VER-ben

Az előzőekben taglaltak szerint az időjárásfüggő megújuló energiaforrások fokozódó tényerése világméretű trend, amelynek hazánk is részese. Az új megújuló termelők előretörése gyökeresen változtatja meg mind a termelési mind fogyasztási szokásokat. Az újonnan kialakuló struktúrák új feladatok elé állítják a villamosenergia-rendszerek

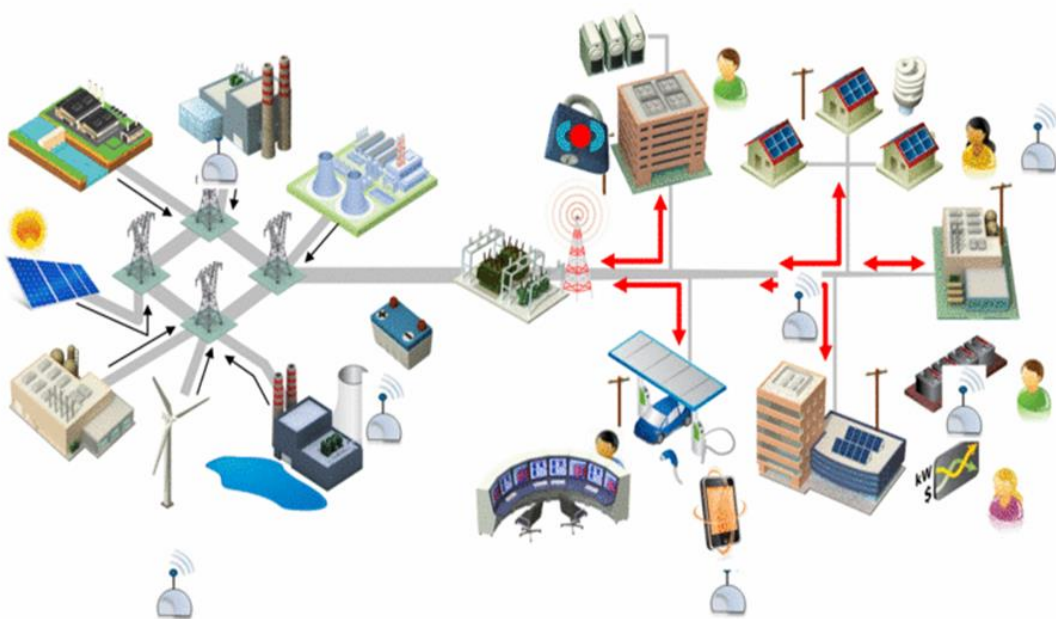


üzemeltetőit, az energiakereskedőket és a villamosenergia-ipar tervezőinek kreativitását [23 p.14].

A korábban centralizáltan termelő forrásokhoz igazított hálózati struktúra, folyamatos és teljes átalakuláson megy keresztül. Korábban az energiaáramlás jól tervezhető módon a nagyerőművektől áramlott az ipari és a lakossági fogyasztók felé. Napjainkban a decentralizáltan termelő kis és háztartási erőművek előre nehezen prognosztizálható menetrend szerint már kis és közép feszültségről táplálnak a hálózatba, gyakran megfordítva ezzel az energia áramlások irányát. A decentralizált termelés jelentős hálózatfejlesztési igényeket hoz magával, valamint teljesen újra kell tervezni és át kell alakítani a hálózati automatikák és villamos védelmek rendszerét [23 p.14].

A fotovoltaikus erőművek a MAVIR 2021.december 31-i adatbázisát alapul véve, az egész ország területén 137 166 hálózat csatlakozási ponton táplálták be megtermelt energiájukat a hazai VER-be a korábbi évtizedekre jellemző 100 alatti hagyományos erőmű csatlakozási ponthoz képest. A napenergia-hasznosítás felfutásának hazai trendjét jól szemlélteti, hogy a beépített kapacitásuk a 2011. évi több, mint 3 MW értékről - 2021. év végére - közel 3000 MW-ra, tehát nagyjából ezerszeresére növekedett. [37 pp.34-36]

A villamos energia ellátási lánc végén a szolgáltatást igénybe vevő fogyasztó áll, amely szintén érintett a rendszerszintű átalakítás hatásai által. A következő ábra szemléletesen mutatja be a centrális energiatermelés hagyományos felépítésének és az elosztott rendszerben betápláló kiserőművek termelési szerkezetének új ötvözetét [23 p.14].



23. ábra Hagyományos és új struktúra a VER-ben [46]

A következőkben röviden áttekintem, hogy a jelenlegi és a jövőben várhatóan fokozódó változások milyen hatásaival kell szembe néznünk, és milyen lehetséges megoldási irányok rajzolódnak ki előttünk az átviteli és elosztói hálózatokon.

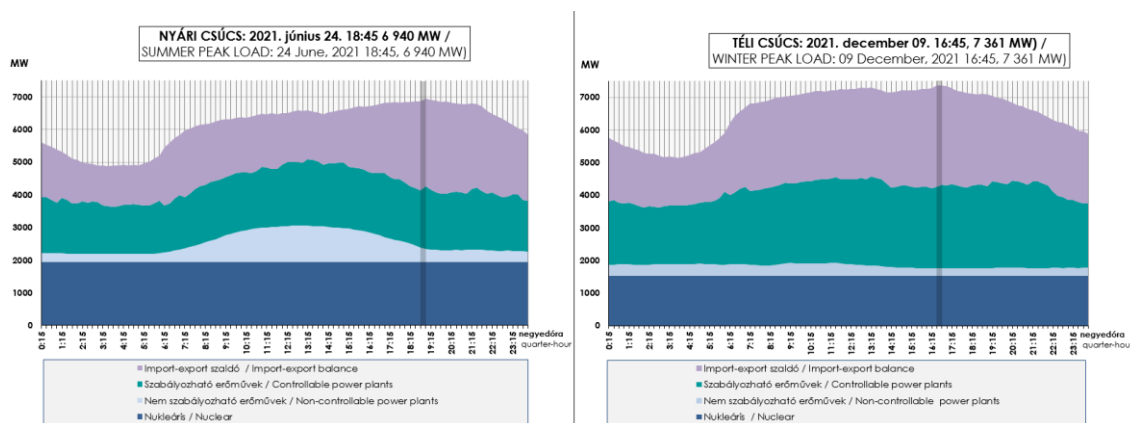
- Megszűnik az egyirányú energiaáramlás, azaz egyes ellátási körzetekben akár naponta többször is megváltozhat az energia áramlás iránya. A hagyományos felépítésű VER-ben a több száz megawattos nagyságrendű nagyerművek a nagyfeszültségű hálózati csomópontokba csatlakoztatva, irányíthatóan és szabályozhatóan termelték a fogyasztási igények kielégítéséhez szükséges villamos energiát. Az energia áramlása, kevés nagyipari kivételtől eltekintve a hálózat nagyfeszültségű rendszere felől áramlott a közép és kisfeszültségen vételező fogyasztók felé. Az új struktúrában a folyamatosan kiöregedő néhányszor tíz nagyermű helyét a közép és kisfeszültségen betápláló új megújuló források veszik át, amelyek már napjainkban is közel 140 000 új betáplálási pontot jelentenek és a számuk ugrásszerűen növekszik. Az egyik új jelenség, hogy jellemzően a kertvárosi illetve kisvárosi hálózati körzetekben a háztetőkre telepített napelemes kiserőművek éppen akkor termelnek, amikor a házak lakói az otthonuktól távol vannak így az energia felhasználása elmarad. Egyes transzformátor körzetekben ennek következtében naponta többször megfordulhat az energia áramlási iránya, vagyis a kisfeszültségű hálózattól elosztó hálózat irányába. Extrém esetben ez a hatás az átviteli hálózaton is megjelenhet.
- Elektrifikáció növekedése az előzőekben taglaltak szerint globális szinten meghatározó eszköz a klímavédelem érdekében. Ezt elősegíti a fotovoltaikus naperőművek rohamos elterjedése. Az ezzel együtt jelentkező hatás a termelés kihasználásának motivációja a Prosumerek, tehát a „termelő-fogyasztó” részéről. A szaldó elszámolásban megtermelt villamos energia felhasználása érdekében az otthonokban jelentősen bővül a villamos fogyasztói berendezések használata. Közülük a legjelentősebbek az elektromos járművek, a villamos fűtés-hűtés és a lakások automatizálása, vagyis az okos otthonok terjedése.
- Átviteli elemek időszakosan túlterhelődnek a kiszélesedett betáplálási és vételezési teljesítményhatárok következtében. A jelenleg üzemelő hálózati topológiák kialakítását és a beépített átviteli kapacitás méretezésének alapját a hagyományos hálózati üzemállapotok képezték.

- A frekvencia ingadozások következtében a hálózatstabilitás fenntartása és a hálózat minőségi paramétereinek megtartása (például a feszültség tűréssávon belül tartása a jelentős feszültség ingadozás következtében) szintén új feladatokat jelentenek.
- A háztartások jelentős része egy fázison csatlakozik a hálózathoz. Kisfeszültségen a csatlakozási pontokon a napelemes rendszerek által betáplált energiaterhelési aszimmetriákat és feszültség torzulásokat okoz.
- A forgógépes nagyerőművek leállításával a meddőszabályozási képességek így a feszültségtartási lehetőségek is csökkennek. Ennek megtartása - akár teljesítményelektronika segítségével - az elsődleges feladatok közé tartozik.
- A forgógépes nagyerőművek kiesésével a rendszer inercia is folyamatosan csökken és vele a stabilitási képesség is. A stabilitás megtartása legalább minimum szinten teljesítendő feladat.
- Hálózat és rendszerelemek fejlesztési igényei:
  - Hagyományos fejlesztések, amelyek a beépített vezetékek hossz és keresztmetszet növelését jelentik, finanszírozási és fizikai korlátokba ütköznek.
  - Szűk keresztmetszetek feltérképezése elengedhetetlen a helyes hálózatfejlesztési koncepció kialakításához.
  - „Okos” megoldásokkal kell kiegészíteni a fizikai fejlesztéseket. Folyamatos az igény az új innovatív megoldások iránt. Egyik lehetőség az energia közösségek, microgridok kialakítása lehet.
  - A termelési és ellátási láncban a teljesítményelektronika használata minden eddiginél jobban felértékelődik.
  - A villamos védelmi és automatika rendszerek újratervezése szükséges. A teljesítmény és feszültség szabályozás a termelők és hálózati engedélyes együttműködésében valósulhat meg.
  - A kommunikáció fontossága több hierarchikus szinten is előtérbe kerül. Egyrészt az ellátási és kereskedelmi lánc résztvevői között kell az eddiginél sokkal intenzívebb információcsere. Szoros együttműködés, folyamatos információcsere szükséges a TSO-k, DSO-k, fogyasztók, termelők valamint a Prosumerek között. Másrészt a folyamatosan okosodó hálózat műszaki elemei közötti adatforgalom felértékelődik. A gyors változások követése érdekében a valós idejű mérések kiszélesítése,

adatgyűjtés és feldolgozás, hálózati állapotok elemzése a hálózati rugalmasság növelése a jövő feladata. Üzemirányítás támogatása sem valósulhat meg a kommunikációs eszközök fejlesztése nélkül (pl. műszaki adatok, meteorológiai előrejelzések, hálózatmodellezés).

- Fogyasztói szokások befolyásolása is előtérbe kell, hogy kerüljön. A szolgáltató olyan ösztönzőkkel keresheti meg a végfelhasználókat, amelyek a felhasználás helyén segítik a termelés és fogyasztás egyensúlyának megtartását gazdaságos formában. Jelentkezhet ez pl. energia megtakarítás, vezérelhető fogyasztói berendezések illetve helyi tárolás megvalósításában.
- Energia tárolási megoldások a túlermelésből adódó többlet energia raktározására és ennek szabályozási célra való felhasználására kínálnak megoldásokat.
  - a termelés helyén,
  - központi tárolás (szabályozási csomópontokban)
  - akkumulátoros, P2G, hő(villanykazánok), SZET technológiák
- A szabályozási igény fokozódása a szabályozási tartalékok növeléséhez vezet.
- Stratégiai tervezés előtérbe kerülésének szükségességét jól érzékelteti, hogy egy fotovoltaikus erőmű beruházási ideje legfeljebb 1,5 év addig egy transzformátor és kapcsoló alállomás esetében ez legalább 5 éves átfutási időt jelent.

Az üzemeltetési sajátosságok gyökeres átalakulása a karbantartások ütemezésében is hasonló változásokat hoz. A folyamatos újratervezés a korábbiaknál sokkal nagyobb jelentőséggel fog bírni [23 pp14-15].



24. ábra A 2021. év nyári és téli csúcsterhelések [37p.21]

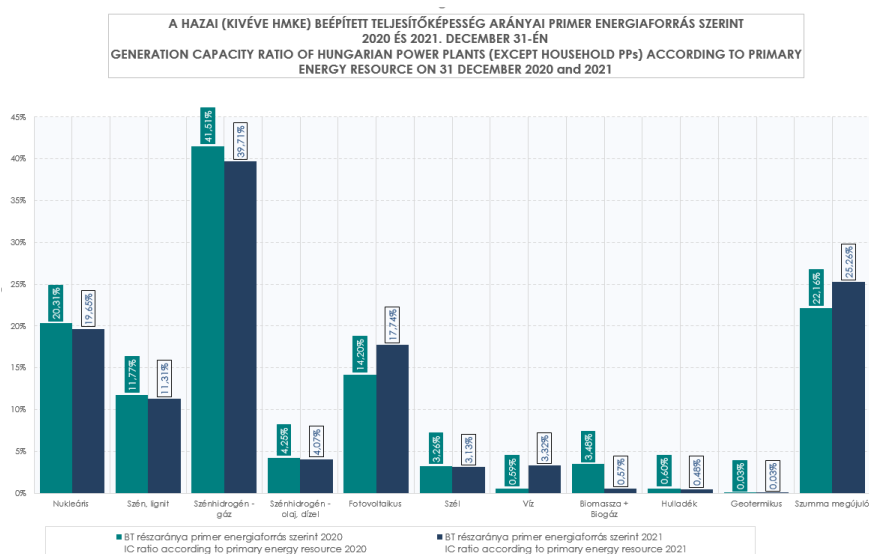
Érdeemes megvizsgálni a 2021. év nyári és téli csúcsterhelési időszakok forrásoldali összetételét. Mindkét ábrán nyomon követhető az időjárásfüggő energiatermelés szignifikáns jellemzője, amely azt mutatja, hogy az általuk megtermelt villamos energia mennyisége nem a felhasználói igényhez igazodik, hanem a nap és a szél intenzitásától

függ. Mindkét ábra tanulsága, hogy a hazai szél és napenergia alapon termelő több mint 3300 MW beépített kapacitás a csúcsidejakban szerény mértékben járult hozzá a hazai terhelés kiszolgálásához. A 2021. évi nyári csúcsidegény kiszolgálásában a szél és fotovoltaikus bázisú termelők mindössze 6% arányt képviseltek 38% import mellett. A 2021. évi téli csúcsterhelést 41% import beszerzésével sikerült kielégíteni 3% időjárásfüggő rendelkezésre állása mellett [37 p.21].

### 1.5.5 Kiváltható-e az atomerőmű napelemekkel?

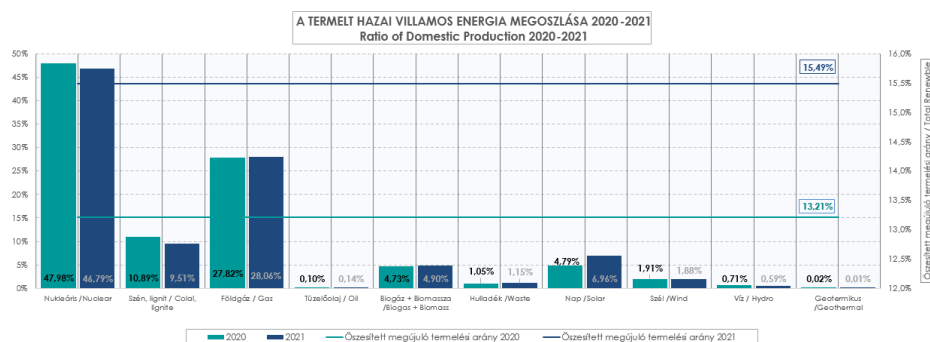
Vizsgáljuk meg, hogy az atomerőművek kiválthatók-e megújuló forrásokkal? Nézzük meg a kérdést tényszerűen, műszaki szempontból tárgyilagosan vizsgálva. Az előzőekben ismertetett elemzésekből az időjárásfüggő megújuló források térnyerésére lehet következtetni. Ez hazai viszonylatban a napenergia felhasználást jelenti.

Először is elemezzük a hazai villamosenergia-rendszer termelő szerkezetének jellemzőit. A MAVIR által 2019. évben közzétett 2018. év végi állapot szerint az összes hazai erőmű beépített teljesítőképesség primer forrás szerinti megoszlásában a nukleáris termelő kapacitás 51,4 % míg a fotovoltaikus alapon termelő erőművek 3,8 % arányt képviseltek a bruttó 8878,5 MW teljes beépített teljesítményen belül. Ehhez képest a hazai erőművek által a 2018. évben előállított több mint 31 TWh villamos energiában a paksi atomerőmű 50,64 %-al vette ki a részét szemben a fotovoltaikus termelők 0,8 %-os részesedésével [52][53].



25. ábra A hazai ipari méretű beépített teljesítőképesség arányai primer energiaforrás szerint 2020. és 2021. december 31-én [37 p.28]

A hazai bruttó teljesítőképesség a 2018.december 31-én fennálló 8878,5 MW értékről 2021.december 31-ig, 10313,8 MW-ra növekedett. Ebben a volumenben a nukleáris részesedés 19,6 %-ot, az ipari méretű fotovoltaikus erőművi arány a korábbi évekhez mérten jelentős bővülést felmutatva pedig 17,7 %-ot tett ki. Látjuk, hogy az ipari méretű napenergia bázison termelő technológiák a nukleáris termelő kapacitással már csaknem azonos hányadot képviselnek a teljes hazai villamosenergia-termelő szerkezeten belül [37 p.28].



26. ábra A termelt hazai villamos energia megoszlása 2020. és 2021. években [37 pp.30-31]

A 2021. évben a hazai ipari méretű erőművek által megtermelt több mint 34 TWh teljes villamos energia mennyiségén belül a nukleáris termelés 46,79 %-ot, fotovoltaikus szektor 6,96 %-ot képviselt közel azonos beépített teljesítőképesség mellett [37 pp.30-31].

A további elemzéshez vegyük alapul a magyarországi tiszta energiák fővárosában Pakson egymás közelében üzemelő két nagyerőművet. Az MVM Paksi Atomerőmű 2019-ben, 2013 MW beépített teljesítménnyel, a Paksi Naperőmű 20,68 MWp telepített napelem kapacitással és 17,2 MW inverter kapacitással állított elő villamos energiát. 2019-ben az atomerőmű alaperőműként 92,36%, míg a naperőmű 15% teljesítménykihasználási tényezővel üzemelt. Ez már önmagában is azt jelenti, hogy az atomerőmű minden MW-nyi beépített teljesítményéből, több mint hatszor annyi villamos energiát nyertünk egy év alatt, mint a naperőmű egy MW-nyi telepített kapacitásából. Tehát számszakilag a Pakson üzemelő atomerőmű által megtermelt energia mennyiséget 12395 MWp összteljesítményű, Paks város környékére telepített fotovoltaikus panel tudta előállítani 2019-ben. Ez a napelem mennyiség csaknem 600-szorosa a Paksi Naperőműben jelenleg termelő panelek mennyiségének. A Paksi Naperőmű 50 hektár területet vesz igénybe. Tehát a kiváltáshoz szükséges napelem mennyiséget a jelenlegi méret 600-szorosán, azaz 30 000 hektár területen lehetne elhelyezni. Az atomerőmű teljes

területe, beleértve a kiszolgáló létesítményeket és az 5-6 blokkok fejlesztésre kijelölt helyét is mindössze 460 hektár. A naperőmű létesítéséhez sík, árnyékhatás-mentes, ár- és belvízmentes, gyenge termőképességű, jól megközelíthető terület szükséges, közeli, stabil hálózati csatlakozási csomóponttal. A kifejezetten stabil hálózati csatlakozási lehetőség azért szükséges, mert a napelemek az időjárástól tehát a napsugárzás intenzitásától függően termelnek. Ez az előzőekben megvizsgált, meglehetősen hektikus termelési görbét eredményez, amely elsősorban rendszerszintű problémákat okoz mind a rendszer kiszabályozásában, mind a hazai és a nemzetközi kereskedelmi menetrendek tartásában. A probléma feloldása jelentős kiegyenlítési többlet igényt generál, ezért a kiegyenlítésre használt szabályozási tartalékok a korábbinál bővebb teret kell, hogy kapjanak. Ezek egyik eleme lehet többek között a szivattyús energia-tározós erőmű technológia. Az időjárásfüggő erőművek által betáplált teljesítmény hektikusan változó értéke a hálózati csomópontokban az ellátás minőségi jellemzőire is hatást gyakorol, mint például a feszültség értékének előre nem látható változásai. A hálózatfejlesztési módszertan csak a szabványos határértékek tartományából kieső állandósult állapoti feszültségeket kezeli. A feszültségeknek az időjárásfüggő termeléssel összefüggő gyors változásait a módszertan nem tudja előre jelezni, ezért azok – mint ellátás-minőségi jellemzők – kezelése nem része a rendszerszintű fejlesztés tervezési munkának.

A 30 000 hektár méretű, napelemek telepítésére alkalmas terület és a kitáplálendő villamos teljesítmény fogadására alkalmas hálózat kialakítása valamint finanszírozási forrásigénye meglehetősen nagy kihívást jelentene a beruházó részére. Azonban itt még nem állhat meg az összevetés ugyanis az alaperőmű a nap 24 órájában, folyamatosan és egyenletesen, névleges kapacitása közelében termel. Egy ilyen gigantikus méretű naperőmű a nap sugárzás függvényében időszakonként a fogyasztói igények szerinti menetrend többszörösét, máskor a töredékét állítaná elő, azonban a vizsgált éves időszak legnagyobb részében a napsugárzás hiányában semmit sem termel. A vizsgált 2019. év hazai legnagyobb csúcsterhelése a 2019. december 5-én mért 7105 MW volt. Látható, hogy a fogyasztói igények és a termelés viszonylatában értelmezett, időszakonkénti jelentős többlet energiát raktározni a hiányzót pedig pótolni kellene. A 12 395 MWp összteljesítményű beépített napelem mellé már extrém méretű, több ezer MWh energiatároló kapacitást is szükséges lenne telepíteni. Nem hagyható figyelmen kívül a különböző létesítmények eltérő élettartama sem. Az MVM Paksi Atomerőmű 50 éves üzemideje alatt a 25 évre tervezett naperőmű potenciált kétszer kellene megépíteni. Ezen felül további műszaki feladat lenne a hálózati topológiák átalakítása a decentralizált

betáplálási pontokhoz alkalmazkodva, amely a hálózat bővítésén túl magával hozná a rendszerszintű villamos védelmi és automatika rendszerek teljes megreformálását is. Végül, de nem utolsó sorban nem hagyható figyelmen kívül az együtt járó rendszer villamos inerciájának és a hálózat feszültségszabályozásához szükséges meddő teljesítmény-gazdálkodásának kérdésköre sem, amelyek teljesülése egyelőre csak a forgógépes termelőkhez köthető [3 p.20-21].

### **1.5.6 Az új atomerőmű technológia**

A Nemzeti Energiastratégia 2030 dokumentum 2011. évi első kiadása és a 2020-ban kiadott felülvizsgált változat is kiemelt szerepet szán a hazai nukleáris kapacitás fenntartásának, amely hosszú időre tervezhetően emissziómentes termeléssel szolgálja az ellátásbiztonságot és a klímavédelmet [47][48][29 p.157]. Csökkenti az importfüggőséget, mert az üzemanyag nagy energiasűrűsége révén évekre is jól készletezhető. Az alaperőművi zsinórtermelés nélkülözhetetlen eleme egy villamosenergia-rendszernek. Hazánkban a zsinórtermelést a lignit tüzelésű Mátrai Erőmű és az MVM Paksi Atomerőmű biztosítja. 2037-ig a jelenleg üzemelő mindkét alaperőművünk ki fog futni a termelői szerkezetből. A hazai adottságokat figyelembe véve, klímabarát módon a pótlásukat az alaperőművi funkciók megtartásával csak a nukleáris energia felhasználásával tudjuk biztosítani. A legújabb generációs atomerőműveknek megnövelt biztonsága mellett az ENTSO-E előírása szerint már manőverező képességgel is rendelkezniük kell. Ez 50÷100% közötti teljesítmény érték változtatási képességet jelent [29 pp.154-155]. Magyarország Atomtörvénye vagyis az 1996. évi CXVI törvény hatálya alá tartozik minden tevékenység, amely a nukleáris energia használatával kapcsolatos. A 40/2008-as Országgyűlési Határozat felhatalmazást adott a Kormánynak a nukleáris kapacitás fenntartására szolgáló atomerőművi bővítéshez szükséges előkészítési tevékenységek megkezdésére. A Parlament 2009. március 30-án, 93,6%-os többségben, mondhatni egyhangúan döntött arról, hogy a Kormány által megkezdett előkészítő munka folytatásaként paksi helyszínre kezdődhessen meg az új létesítés előkészítése. A Kormány megbízása alapján a feladat végrehajtását az MVM Zrt. kezdte meg Lévai Projekt néven, amelynek eredményeként 2012-ben elkészült az Előzetes Konzultációs Dokumentum. A környezetvédelmi engedélyezési eljárás részeként elkészült anyag azonosította a hazai rendszerszintű műszaki és terhelési igényekhez szóba jöhető blokkokat [49].



A hazai rendszerszintű elvárásokon túlmenően a lehetséges technológia kiválasztásához figyelembe kellett venni a 118/2011. Kormányrendeletet a Nukleáris Biztonsági Szabályzatok (NBSZ) című mellékleteivel együtt valamint a vonatkozó nemzetközi előírásokat. A Pakson megvalósítandó új blokkok technológiájaként jelenleg is nagy referenciával és üzemi tapasztalattal rendelkező típus jöhetett szóba. A világon a legelterjedtebb típusú reaktor a könnyűvíz hűtésű és könnyűvíz moderátorral rendelkező nyomottvizes (PWR: Pressurized Water Reactor) technológia. A sort a forralóvízes reaktor (BWR: Boiling Water Reactor) folytatja, azonban a Fukushimaiban bekövetkezett események jelentősen visszavetették az elfogadottságát. A PWR reaktorok kétkörös kialakítása teszi lehetővé, hogy a primer oldali hűtőközeg nem érintkezik a szekunder kör berendezéseivel, vagyis a turbina szigettel és a hozzá tartozó technológiai egységekkel. A globálisan létesítés alatt álló blokkoknak csak az egyötöde nem PWR típus. A hazai nukleáris létesítési szabályzatok nem kizárólagos jellegűek, tehát nem tartalmaznak kötelezően választandó reaktortípust viszont az előírt műszaki és biztonsági paramétereknek kell megfelelni a lehetséges reaktorok jellemzőit. Jelenleg a 3 és a 3+ generációs technológiák létesíthetőek. A különbség közöttük a biztonsági rendszerek fejlettségében van. A 3+ generációs erőművek biztonsági rendszerei a fukushimai baleset tapasztalatait integrálva, rendelkeznek a tervezési alapon túli események és a passzív biztonsági rendszerek alkalmazásának előnyeivel, különös jelentőséget tulajdonítva a külső eredetű veszélyforrásokkal szembeni védelemnek. A technológia kiválasztásához vezető vizsgálat az AP1000/Westinghouse, az APR-1400/KEPCO, az EPR/Areva és a VVER-1200/Rosatom reaktorokat érintette [50].

Az új paksi blokkok gyártójának kiválasztásához az elsődleges szempont a biztonsági követelmények legmagasabb szintű teljesítése. Az NBSZ 3a. fejezete nagyon szigorú elvárásokat támaszt az új létesítésekkel szemben. Csak olyan atomerőművi blokk létesíthető, amelyre igaz, hogy 10-5/év érték alatt van a súlyosabb zónasérüléseket kiváltó események várható összesített gyakorisága. A zóna sérülése vagy megolvadása nem okozhat jelentős környezetbe kerülést. Jelentős radioaktív környezetre gyakorolt hatás a 10-6/év érték alatt kell, hogy maradjon. Az új reaktorok esetén ki kell terjeszteni a tervezési alapot. Ahhoz, hogy a kezdeti események következménye ne járjon a környezetre gyakorolt jelentős hatással a teljes feszültségkimaradás vagy a teljes hűtőközeg elvesztése esetén is rendelkeznie kell megfelelő védelemmel. Az esetleges súlyos balesetek esetén viszont a mérnöki rendszereknek kell a biztonságot szavatolni. Az NBSZ követelményein túl az aktív biztonsági rendszereknek a tervezési üzemzavarok

esetén kell helyt állni. Ezek közé sorolható az üzemzavari zónahűtő-, vészbórozó- és az üzemzavari tápvízrendszer. A biztonsági filozófia négyszeres redundanciát követel. A passzív biztonsági rendszerek a tervezési alap kiterjesztésén túli történések esetén nyújtanak védelmet. Aktív hűtőrendszer hiányában a passzív hőelvezető rendszer 200 MW hőteljesítmény elvonására alkalmas. A passzív hűtőrendszer része a gőzfejlesztőnként egy-egy 450m<sup>3</sup>-es felül nyitott víztartály, amelyek a konténment passzív hűtését is ellátják szükség esetén. Amennyiben mégis bekövetkezne a zónaolvadás, abban az esetben a zónaolvadék-csapda fogja fel és hűti le a reaktortartályt átolvasztó olvadékokat. A fenti követelményeket kielégítő VVER-1200 típusú reaktor V491-es altípusa került kiválasztásra az MVM Paksi Atomerőmű kapacitás fenntartására. A kiválasztott reaktortípus zónasérülési gyakorisága  $6 \times 10^{-7}$ /év és a jelentős korai radioaktív kibocsátás számított gyakorisága  $2 \times 10^{-8}$ /év érték. Mindkét érték jóval az elvárt határ alatt van [49].

A kiválasztott reaktortípus a VVER-1200 V491 referencia létesítménye a Leningrád II erőműben található, amelynek első blokkja 2018. március 9-től hálózatra termel. A 3200 MW hőteljesítményű és 1198 MW villamos teljesítményű blokkokat egyenként, 34,8% nettó hatásfokkal, 7,1% önfogyasztással, 90% feletti teljesítménykihasználási tényezővel 60 év üzemidőre méretezték. A primer kör nyomása 162 bar, a szekunder kör üzemi értéke 68 bar. A GE Alstom Arabelle 1000 típusú turbinasziget lett a nemzetközi közbeszerzési versenyeztetés nyertese 2018-ban. (Rosatom ZAKUPKI) A blokkvezérlő rendszer gyártási és szállítási lehetőségét a Framatome SAS-Siemens AG francia-német konzorcium nyerte szintén a Rosatom nemzetközi közbeszerzési tenderen 2020-ban. A primer hűtőrendszert négy hurokban vízszintesen elhelyezett egy-egy gőzfejlesztő alkotja. Ez a kialakítás csak a VVER reaktorokban található. A zónában 4,57 m magas és 3,16 m külső átmérővel rendelkező, 163 db üzemanyag kazettát találunk. A reaktor szabályozását fésűs szabályzó elemek látják el. Az üzemanyag kezdeti dúsítási értéke 4,79% és gadolínium kiegészítő mérget tartalmaz 12 hónapos kampányra. A reaktortartály falvastagsága 20 cm, anyaga szénacél, belső plattírozott ausztenites réteggel. A reaktortartály osztósíkiig mért magassága 11,2 m, tömege 330 tonna. Minden gőzfejlesztő 11 000 db hőcserélő csövet tartalmaz, amelyek 6100 m<sup>2</sup> felülettel teremtenek kapcsolatot a primer és szekunder kör között. A gőzfejlesztőkből négy egységet találunk, amelyek hossza egyenként 14 m. A teljes primer kört a reaktoral és a gőzfejlesztőkkel együtt a vasbetonból készült 2,4 m vastagságú és 51,6 m átmérőjű talapzaton álló duplafalú 44 m belső átmérővel tervezett konténment zárja magába. A kijutást akadályozó előfeszített

120 cm vastag belső fal reaktor felé eső oldalán 6 mm korrózióálló acél palást található. A külső fal akár a jelenleg forgalomban levő legnagyobb utasszállító gép becsapódásának hatásától is képes megvédeni a primer kör berendezéseinek épségét [49].

### **1.5.7 Az energiatárolás és a rendszerszabályozás összefüggései**

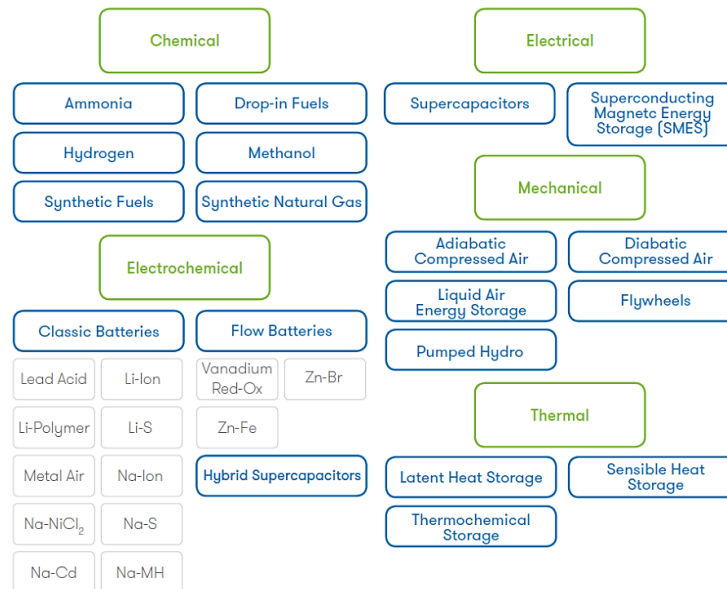
Az előző évtizedek gyakorlatához képest a villamos hálózatokkal szemben teljesen újszerű és nagy befolyással bíró hatások jelentek meg. Ezek közül a legjelentősebbek az elektrifikáció következtében gyorsan növekvő villamosenergia-igény, az időjárásfüggő megújuló bázisú erőművek hektikus termelése és a rohamosan terjedő, nagyszámú elektromos hajtású jármű töltési terhelésének egyidejűségi hatása, illetve szabályozatlansága. A villamos hálózatok fejlesztése elkerülhetetlen, azonban nem mindegy annak mértéke. Az éves viszonylatban rövid időszakokban jelentkező kedvezőtlen egyidejűségű túlterhelések kiszolgálására alkalmas hálózati fejlesztés rendkívül gazdaságtalan lenne, és nagyon sok esetben fizikailag is lehetetlen lenne megvalósítani. Az időjárásfüggő megújuló erőművek változó termelése a hálózat nagymértékű rugalmasságának növelését igényli, amely kedvezőtlen geológiai adottságok esetén döntően a jelenlegi kiforrott technológiák közül az akkumulátoros energiatárolók létesítését jelentheti.

A villamos hálózatok legfontosabb minőségi jellemzői a frekvencia és a feszültség. Az együtt járó rendszerekben a hálózatba betáplált, tehát megtermelt villamos energia mennyisége minden időpillanatban meg kell, hogy egyezzen a hálózatból vételezett, azaz felhasznált villamos energia mennyiségével. Amennyiben több a hálózatba betáplált energia, mint a vételezett, az a frekvencia növekedésével jár. Ellenkező esetben csökken a hálózat frekvenciája.

A villamos hálózat önmagában nem képes a villamos energia tárolására. Ahhoz, hogy a rendszert egyensúlyban tartsuk, vagyis a hálózati frekvencia csak a megengedett tartományon belül változzon, a hálózat szabályozására van szükségünk. A szabályozás az előzőekben említett rugalmassági kapacitások bevonásával történhet. A hálózat hagyományos szabályozása során a hiányzó energia mennyiséget egyrészt pótolhatjuk szabályozható vízerőművekkel, szivattyús energiatároló erőművekkel, forgógépes vagy forgótengelyes meleg tartalékok és gázturbinák segítségével. A szabályozás hatékonyabb módja az energiatároló technológiák rendszerbe integrálása. Az energiatárolók alkalmasak a hálózatban jelentkező energia többlet felvételére, és a tárolt energia kitáplálására is. Az energiatárolókat célszerű az időjárásfüggő, hektikusan termelő megújuló bázisú

erőművek (nap, szél,) többlet energiájával, illetve a mélyvölgyi terhelési időszak olcsó energiájával tölteni. Az energiatárolók kisütése a hálózatban jelentkező energia hiány pótlására kiegyenlítő energiaként és a fogyasztási csúcsidőszakban a magas villamos energia árak mellett használható gazdaságosan [62 pp.93-94].

Az European Association for Storage of Energy (EASE) a 27. ábra szerint csoportosította a tárolási technológiákat [76] [62 p.94].



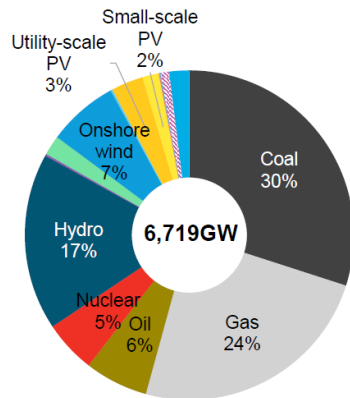
27. ábra A tárolási technológiák csoportosítása [76] [62 p.94]

Az energiatárolók a megújuló energiák rendszerbe integrálásán túlmenően energiahatékonysági célokat is szolgálnak, ugyanis lehetővé teszik az időjárásfüggő megújuló bázisú erőművek nagyobb kihasználtságát.

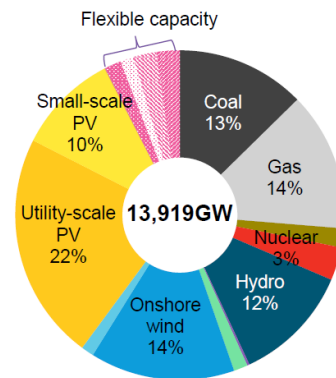
A technológiák sajátosságai szerint a rendszerbe integrálásuk módja lehet központi vagy decentralizált.

A rugalmas kapacitások jelentős mértékű bővülését prognosztizálja a Bloomberg előrejelzése. A 28. ábra jól szemlélteti, hogy az energia átmenet során a hálózati szabályozáshoz szükséges technológiák alkalmazására milyen drasztikus igénynövekedés várható.

Global cumulative installed capacity: 2016



Global cumulative installed capacity: 2040



28. ábra A globális villamosenergia-termelési szerkezet összetétele 2016-ban és a 2040-es előrejelzés [77] [62 p.95]

Az elektrifikáció, a megújuló energiák használata, az elektromos járművek és az okos rendszerek elterjedése az elektrokémiai energiatárolók közül a hagyományos akkumulátorok használatára alapuló technológiákkal történik. 2018 februárjában az Egyesült Államok gazdasága szempontjából kritikusnak ítélt 35 féle ásványi anyagot tartalmazó listára került a kobalt is. Ezt követően az USA hosszú idő óta először kezdte meg ismét a kobalt bányászatot. Az elektromos járművek terjedését alapvetően meghatározza az akkumulátorok előállítási költsége, amely a járművek árának a felét teszik ki. A kobalt és a lítium az akkumulátor gyártás meghatározó elemei [78] [62 p.94]. A fentiek alapján megállapítható, hogy az energiahatékonyság valamint az energiaátmenet érdekében történő technológiai korszakváltás főbb rendszer elemei, mint a hálózat szabályozás és a villamosított közlekedés-szállítás, jelentős beruházási szükséglettel járnak.

A klímavédelem és energiahatékonyság szempontjából figyelembe kell venni azt is, hogy a közlekedés-szállítás zöldítéséhez milyen primer energiahordozókat átalakító technológiák biztosítják a villamos energiát. Ahhoz, hogy a teljes energia folyamat karbon intenzitása alacsony maradjon, a nukleáris energiatermelés megkerülhetetlen. Az új megújulók integrálásának vonatkozásában pedig arra kell törekedni, hogy a szabályozáshoz szükséges energia eredete minél kisebb karbon lábnyommal rendelkezzen [62 p.95].

## **2 A MAGYAR VILLAMOSENERGIA-RENDSZER ÁTVITELI HÁLÓZATÁNAK VIZSGÁLATA A FOTOVOLTAIKUS ENERGIFORRÁSOK TÉRNYERÉSÉNEK TÜKRÉBEN**

### **2.1 A magyar villamosenergia-rendszer hálózat fejlesztési tervezési folyamatának vizsgálata**

A hálózatfejlesztés-tervezés folyamatának hazai jogszabályi és szabályzati hátterét a villamosenergia-törvény (VET), annak végrehajtási rendelete (Vhr.), az Üzemi Szabályzat (ÜSZ) [89] és az annak mellékletét képező hálózatfejlesztés-tervezési irányelv képezi. Ezen jogszabályi és szabályzati háttérnek való megfelelés a Hálózatfejlesztési Terv MEKH általi jóváhagyásának alapja, ezért a tervezési folyamat elsődlegesen ezen előírásoknak megfelelően lett kialakítva. A normaszövegek tartalmának ismerete elengedhetetlen a folyamat szervezésének és lépéseinek megértése szempontjából, ezért a következőkben áttekintem a vonatkozó részeket.

A Hálózatfejlesztési Terv (HFT) készítését a villamos energiáról szóló 2007. évi LXXXVI. törvény (VET) 25. §-a írja elő [88].

A VET 25. § lényegi tartalmi elemeit a következőkben foglalom össze.

A Hálózatfejlesztési Tervet az átviteli rendszerirányító készíti minden évben. A tervezés a 132 kV-os és nagyobb feszültségű (hurkolt) hálózatokra vonatkozóan minden esetben 10 évre tekint előre. A HFT-nek meg kell felelni az EU és a hazai energetikai szakpolitikai szempontoknak.

Ezek között szerepel többek között a keresletoldali szabályozás és az energiahatékonyság is.

Ezen felül az átviteli rendszerirányító rendszerszintű hálózatfejlesztési tervet is készít az elosztói engedélyesekkel együttműködve, amely összhangban áll az uniós közösségi szintű tízéves hálózatfejlesztési tervvel (Ten Year Network Development Plan – TYNDP), valamint az Unió által előírt nemzeti energia- és klímateranggal (NEKT) [93] és figyelembe veszi az egyedi új üzleti igények érdekében szükséges fejlesztéseket is.

Az MEKH által jóváhagyott fejlesztéseket a hálózati engedélyeseknek meg kell valósítani, azonban a beruházások költségei az árszabályozás részét képezik.

A villamos energiáról szóló 2007. évi LXXXVI. törvény egyes rendelkezéseinek végrehajtásáról szóló 273/2007. (X. 19.) Korm. rendeletet (Vhr.) [90] a VET 25. §-sal összefüggésben a 9. § - a tartalma a következőképpen foglalható össze.

Az átviteli rendszerirányító a HFT bemeneti adatainak megalapozása érdekében elemzi a fogyasztói igényeket és a forrásoldali kapacitás fejlesztéseket. Az elemzés része az előző évi tervezés értékelése is. Ezen túlmenően össze kell hasonlítani a műszakilag egyenértékű fejlesztési változatokat gazdasági és megvalósíthatósági szempontok alapján, amelynek eredménye alapján javaslatot tesz a megvalósítandó fejlesztési változatokra.

MAVIR Üzemi szabályzat [89] 4.3 Hálózatfejlesztési terv készítésének és a 4.3.1 HFT általános előírásainak tartalmi összegzése a tervezési folyamat szempontjából előírja, hogy mit kell a hálózatmodellekben leképezni. Ezek lehetnek meglévő berendezések, létesítés alatt levő hálózati elemek illetve korábban jóváhagyott fejlesztések.

A hálózathasználati prognózisokat a termelésre, terhelésre, külső hálózati feltételek alakulására természetviselkedésekbe kell csoportosítani. A HFT készítése az MEKH és a hálózati engedélyesek együttműködésével történik közösen kialakított, azonos természetviselkedések és fejlesztési politikák figyelembevételével. Az iparági tervezési folyamat részeként működtetett Tervezési Munkabizottságban kell a hálózati engedélyeseknek közösen kiválasztani a preferált fejlesztési stratégiát úgy, hogy kimutatott üzembiztonsági problémára több lehetséges alternatívát vizsgálnak műszaki és gazdaságossági szempontból. A fejlesztési stratégia kiválasztását a műszakilag megfelelők közül a legkisebb költség elve alapján végzik.

A hálózati engedélyesek 5 és 10 évre készítik el a célállapot tervezést. A tervezés során nem tekinthetnek el a legkisebb költség elvétől és nem enyhíthetnek az Üzemi Szabályzat mellékletét képező hálózatfejlesztési irányelvben megadott üzembiztonsági kritériumokhoz képest. A 15 évre vonatkozó kitekintést csak az átviteli rendszerirányító végzi el az elosztó hálózati engedélyesek bevonása nélkül. A tervezési célú számítások során magyar hálózatot a szinkron üzemelő kontinentális európai rendszeregyesülés hálózatának részeként, megfelelő részletességű külső hálózati modell alkalmazásával kell leképezni.

Az ÜSZ 4.3.2 pontja A HFT iparági koordinációjára létrehozott HFT Iparági Bizottság felépítésére ad útmutatást. Ennek lényege, hogy az MEKH folyamatosan része legyen a

tervkészítés folyamatának és naprakész információkkal rendelkezzen a tervezés menetéről valamint a konkrét műszaki tartalomról. Ne csak az elbírálásra benyújtott, már elkészített tervvel találkozzon, hanem folyamatosan lássa az inputokat vagyis természetviselkedéseket. Rálátása legyen a számításokból kiadódó műszaki problémákra és a hálózati engedélyesek által figyelembe vett fejlesztési alternatívákra is.

ÜSZ 4.3.3 a Hálózatfejlesztési Terv dokumentációja öt különálló kötetből épül fel. Ezek a HFT kiindulási adatai valamint a hazai villamosenergia rendszer fejlesztési politikái, természetviselkedései, lehetséges fejlesztési stratégiái, hálózatfejlesztési terve. Az iparági bizottsági folyamat részeként az egyes köteteknek eltérő elkészítési és jóváhagyási határidői vannak. A teljes éves folyamat időigénye több, mint egy év, ezért átfedések vannak az előző évi és az aktuálisan megkezdett tervezési folyamat között. A folyamat augusztus 1-től kezdődik, miközben november 30-ig még tart az előző évi folyamat is.

ÜSZ 4.3.4 HFT elkészítés éves ciklusának négy fázisa a bemeneti információk összegyűjtése és rögzítése, a természetviselkedések és fejlesztési politikák kidolgozása, a sarakévi végállapot-tervezés, az értékelés és alapszenárió-választás.

A tervezési ciklus indításakor megtörténik a módszertan felülvizsgálata, a felmerült módosítási igények megvitatása, a folyamatban levő beruházások státuszának és költségeinek aktualizálása, az országos terhelésmérési napokon gyűjtött terhelési adatok feldolgozása, a hazai és nemzetközi energiapolitikai alapelvek, ajánlások, irányelvek és előírások összegyűjtése és áttekintése.

A természetviselkedések előkészítésének részeként megtörténik a termelői engedélyes erőművek bővítésének, kapacitás fenntartásának vagy leállítási ütemezésének, továbbá az új erőmű csatlakoztatási igényeknek a felmérése. Elkészül a villamosenergia-fogyasztást érintő gazdasági trendek elemzése és létrejön a hálózati engedélyesek közti egyeztetése. Megtörténik a koncentrált nagyfogyasztói csatlakozási igények felmérése és egyeztetése valamint az uniós közösségi szintű tervvel (TYNDP) való összhang megteremtése.

A fejlesztési politikák előkészítésének részeként megtörténik a villamosenergia-rendszert a jövőben érő alapvető kihívások felmérése az új hálózat használói technológiák, időjárásfüggő megújuló és az elosztott termelés terjedésére-, az európai piacintegrációs előírások okozta infrastrukturális kihívásokra-, a hálózatüzemeltetés kihívásaira vonatkozóan.



A természetviselkedések alternatíváihoz koncepciók kerülnek kialakításra, amelyek figyelembe veszik a makrogazdasági előjelzések és regulációs körülmények hatásait az energetikára, mind a forrásoldal, mind a fogyasztás alakulása vonatkozásában. Meghatározásra kerül a modellezés szempontjából releváns jellemző terhelési időszakok rendszerterhelése az energiahatékonyság és a terhelési görbét befolyásoló fogyasztói technológiák elterjedésének figyelembevételével.

A természetviselkedések tartalmazhatnak koncepcióba nem illeszthető elemeket is, ezeket tipikusan jelentős bizonytalanságok figyelembevételéhez használják és kockázati tényezőknek nevezik. Erre lehet példa az atomerőművi bővítés esetleges késedelmének vagy az új nagy gázturbinás egységek bizonytalan üzemelési idejének hatása.

Tételes, hálózati csomópontokra lebontott terhelési és termelési teljesítményprognózisok készülnek a tervezés 5 éves és 10 éves előretekintő sarokéveire, mindegyik sarokév vonatkozásában az összes, a modellezés szempontjából releváns jellemző rendszerüzemállapotra. Ezek a maximális naperőművi betáplálással figyelembe vett tavaszi hétvégi/ünnepnapi nappali (11 h) alacsony terhelésű üzemállapot és a nyári munkanapi napközbeni (13 h) bruttó csúcsterhelési üzemállapot valamint naperőművi betáplálás nélküli nyári munkanapi esti (20 h) nettó csúcsterhelési üzemállapot és a téli munkanapi esti (17 h) csúcsterhelési üzemállapot.

A Bemeneti információk munkafázis során előkészített információk alapján megtörténik a fejlesztési politika opciók kidolgozása. A műszakilag egyaránt megfelelő alternatív beavatkozások közül a különböző fejlesztési politikákban más és más lehet a preferált beavatkozás, az adott fejlesztési politika koncepciójától függően. Az erőforrással kiszolgálhatóság, illetve az ütemezés tarthatósága érdekében jelenleg két fejlesztési politikát lehet figyelembe venni. Az egyik fejlesztési politika általában a legkisebb beruházási költségre való szigorú törekvés jegyében fogalmazódik meg, ennek megfelelően feltételezéseket tesz a rendszerben meglévő rugalmas beavatkozási lehetőségekre – amelyek jövőbeni rendelkezésre állása egyébként nem feltétlenül garantálható. Ilyenek a költségmentes vagy költséges operatív beavatkozások, üzemirányítói topológiamódosítás vagy erőművi újra-teherelosztás. A második fejlesztési politikába lehet beépíteni azokat a feltételezéseket, amelyek révén a hálózat robusztusabb, üzemzavartűrőbb állapotba fejleszhető. Ezen hálózati fejlesztésekkel olyan műszaki vagy társadalmi hozzáadott hasznok keletkeznek, amelyek a rendszerbiztonság szempontjából indokoltan figyelembe vehetők, de nem monetizálhatók. A második fejlesztési politika esetében, ha az összköltség túl költséges fejlesztési stratégiákat

eredményez, akkor a stratégiaválasztás folyamatában szinte biztosan elvetésre fog kerülni.

Sarokévi célállapot tervezés szakasz írja le a tényleges hálózattervezési feladatokat az első 5 évre előre tekintő tervezési sarokévre vonatkozóan. A kiinduló hálózati állapot a hálózat jelenleg is létező elemeiből és a már elkezdett, reálisan nem leállítható beruházásokból áll. A modellváltozatok számát a természetviselkedések száma és az azokon belül figyelembe veendő, az opcionálisan beazonosított kockázati tényezők miatt szükséges alváltozatok száma határozza meg. A kiindulási modellekre üzembiztonsági hálózatszámításokat - teljesítményáramlás, kiesésvizsgálatok, zárlatszámítás - kell végezni. Ezeket a vizsgálatokat nevezi a szabályzati terminológia beruházás-generáló vizsgálatoknak, ami beavatkozás-generáló is lehet, mert az operatív beavatkozások rendelkezésre állása esetén nem feltétlenül generálódik beruházás. Ezek után javaslatot kell tenni a kimutatott üzembiztonsági problémák mindegyikét megoldó beavatkozás-csomagra, annyiféle változatban, ahány fejlesztési politika lett definiálva. Itt van mozgáster a mérnöki szemléletnek és megfontolásoknak. Előfordulhat például határérték-túllépés esetén, hogy nem célszerű minden egyes probléma megoldásához egy külön beavatkozást rendelni, hanem létezik kevesebb beavatkozásból álló intézkedés-csomag, amely az összes problémát megoldja.

A 10. év végére kialakítandó hálózattervezési szakasz írja le a tényleges hálózattervezési feladatokat a második tervezési sarokévre, azaz a 10 évre előre tekintő időszakra vonatkozóan. A kiinduló hálózati állapotokat ebben az esetben az első 5 évre előre tekintő tervezési sarokév célállapotai képezik. Számosság szempontjából lényeges eltérés az első sarokévhez képest, hogy a fejlesztési politikák darabszáma szerint többszöröződik a kiinduló állapotok száma, ez hatással van a vizsgálandó változatok számára is. A kiindulási modellek ebben az esetben is a kiinduló hálózati állapotokra ráültetett sarokévi természetviselkedések és kockázati tényezők szerinti csomóponthasználatok és terhelések, valamint a külföldi hálózaton tervezett változtatások a TYNDP alapján. A kiindulási modellekre üzembiztonsági hálózatszámításokat kell végezni. Ezek után javaslatot kell tenni a kimutatott üzembiztonsági problémák mindegyikét megoldó beavatkozás-csomagra, annyiféle változatban, ahány fejlesztési politika definiálva lett. Ezek a lépések módszertanilag azonosak az első sarokévre előírt lépésekkel. Itt egy fontos eltérés van az első sarokévhez képest. Az engedélyesek ellenőrzik, hogy a 10 évre előre

tekintő sarokév célállapotába kiválasztott valamely műszaki megoldás nem tesz-e feleslegessé egy olyan beavatkozást, amely az első 5 évre előre tekintő sarokév célállapotára lett előirányozva. Ilyen esetben meg kell vizsgálni a feleslegessé vált első sarokévi beruházás törlését és az azt feleslegessé tevő második sarokévi beruházás előbbre hozását. Ha az elvégzett vizsgálat alapján célszerűbb és egyéb körülmények nem zárják ki, akkor vissza kell vezetni a módosítást az első sarokévi célállapoti modellekbe és meg kell ismételni a célállapoti ellenőrző számításokat. Ez biztosítja, hogy a tervezett beruházások nem csak az adott sarokévben, hanem a tervezés teljes időtávjában optimálisak és minimális összköltségűek legyenek. Ennek megtörténte után tekinthetők véglegesnek az 5 és a 10 sarokévi célállapoti modellek és az azok által tartalmazott fejlesztési beruházásokból felépülő stratégiák.

Értékelni kell, majd az értékelés alapján össze kell hasonlítani a fejlesztési stratégiákat, amelyek az első és második tervezési sarokévre együttesen vonatkoznak. Az értékelés és összehasonlítás szempontjai között szerepel a költségek volumene, időbeli eloszlása és költségtípusok közti megoszlása. Figyelembe kell venni a megvalósulási kockázatok becsült mértékét és kezelhetőségét valamint a költségeken kívüli egyéb, számszerűsített műszaki vagy gazdasági hasznok értékeit. A megvalósulási kockázatok körében elsősorban az engedélyeztetéssel kapcsolatos kockázatokat lehet a tervkészítés fázisában elemezni. Egy új távvezeték mindig kockázatosabb a vezetékjogi engedélyeztetés miatt, mint egy meglévő távvezeték engedélyeztetést nem igénylő rekonstrukciója vagy átalakítása.

A kiértékelt stratégiák közül az iparági együttműködés keretei között megtörténik a választás. A stratégia egy természetviselkedés és egy fejlesztési politika kombinációja, ezért a stratégiaválasztáskor nemcsak preferált fejlesztési politikát, hanem egyben preferált természetviselkedést is kiválasztásra kerül.

Ezután a kiválasztott stratégia alapján meg kell tervezni a 15 évre előre tekintő sarokévet, melynek módszere a korábbiakkal megegyező. A kiindulási modellek létrehozása, üzembiztonsági vizsgálatok futtatása és kiértékelése, a feltárt problémákra fejlesztési alternatívák definiálása, majd a végleges beruházási csomag kialakítása.

Végezetül a rendszerirányító elvégzi mindhárom sarokév tervezési célállapotaira a rendszerszintű ellenőrző vizsgálatokat.

Az elhatározott fejlesztések megvalósítása rendelkezés értelmében az MEKH által jóváhagyott Hálózatfejlesztési Tervben szereplő beruházásokat a hálózati

engedélyeseknek be kell illeszteniük az üzleti terveikbe, közcélúvá minősítést kell kérelmezniük az MEKH - tól, majd ténylegesen is meg kell valósítaniuk azokat.

Az Üzemi Szabályzat Hálózatfejlesztés-tervezési irányelv tartalmából csak a tervezési folyamat megértése szempontjából legszükségesebb fogalmakat és kritériumokat tekintem át [91].

Az N-1 elv definíciója azt mondja ki, hogy tervezett üzemállapothoz képesti egyszeres hiányállapotban nem keletkezhetsen a villamosenergia-rendszer hurkolt hálózatán beavatkozás-generáló mértékű határérték-túllépés sem gyűjtősín-feszültség, sem ág-terhelhetőség szempontjából. Az egyszeres hiányt villamosenergia-rendszeri berendezésre, hálózati berendezésre vagy erőművi egységre kell érteni, nem eseményre. Tehát egy kétrendszerű távvezetékoszlop kidőlése, amely mindkét távvezeték kiesését eredményezi, egyszeri esemény, de nem egyszeres hiányállapot. Hasonlóképpen egy gyűjtősínzárlat, aminek hatására a védelem végleges háromsarkú kioldással kikapcsolja a gyűjtősínre csatlakozó összes távvezetékét, egyszeri esemény, de nem egyszeres hiányállapot. Ezek nem az N-1 kritérium szerinti hiányállapotok.

A 5. fejezet tartalmazza a kiesésvizsgálatok során alkalmazandó hiányállapoti kritériumok teljes körének definícióját.

- Mind az átviteli hálózatnak, mind a 132 kV-os elosztóhálózatnak akkor is teljesíteni kell az N-1 elvet, ha egyidejűleg egy erőművi egység a tervezett üzemállapothoz képest hiányzik. G-1/N-1 kritérium.
- Az átviteli hálózatnak akkor is teljesíteni kell az N-1 elvet, ha egyidejűleg a 132 kV-os elosztóhálózaton egy hálózati ág a tervezett üzemállapothoz képest hiányzik. TSO-DSO N-1-1 kritérium.
- Az átviteli hálózatnak akkor is teljesíteni kell az N-1 elvet, ha egyidejűleg a hazai villamosenergia-rendszerrel szomszédos külföldi hálózatokon egy hálózati ág a tervezett üzemállapothoz képest hiányzik. TSO-külföld N-1-1 kritérium.
- A 132 kV-os elosztóhálózatnak akkor is teljesíteni kell az N-1 elvet, ha egyidejűleg az átviteli hálózaton egy hálózati ág a tervezett üzemállapothoz képest hiányzik. TSO-DSO N-1-1 kritérium.

Az atomerőműben termelt teljesítmény elszállításában szerepet játszó hálózati ágak egyidejű kétszeres hiányállapota mellett sem keletkezhetsen beavatkozás-generáló mértékű határérték-túllépés. Atomerőművi N-2 kritérium.

A 6.1. és 6.2. alfejezetek tartalmazzák a hálózati ágakra figyelembe veendő tartós terhelhetőségi határértékeket, valamint a gyűjtősín-feszültségek alsó és felső határértékeit. Ezeket az 5. fejezet szerinti mértékadó hiányállapotokban is be kell tartani. A 6.3. és 6.4. alfejezetek tartalmazzák a zárlatszámítással és a stabilitásvizsgálatokkal kapcsolatos előírásokat. 3F és 1FN gyűjtősínzárlatok vizsgálatával kell ellenőrizni, hogy a fellépő maximális zárlati igénybevételek nem haladják meg az adott hibahelyen kiépített zárlati szilárdság értékét.

A tranziens stabilitás vizsgálatokor a vizsgált erőművi egység hálózati csatlakozási pontján 3F zárlatot kell modellezni, melynek kritikus háritási ideje nem lehet rövidebb, mint a zárlat tartalékvédelem általi háritási ideje megszakító-beragadást követően. Ez az érték az átviteli hálózaton 160 ms, amelynél az egység szinkron stabilitása még fennmarad. Ezt a követelményt az erőművi egységnek akkor is teljesítenie kell, ha az Európai Unió irányelvben - Requirements for Generators - előírt feszültség-meddőteljesítmény tartomány legalján üzemel, amely maximális meddőnyelést jelent.

A dinamikus stabilitási követelmény az erőművi egység turbinaszabályozójának és gerjesztésszabályozójának lengéshajlam-mentességét írja elő. Egységugrás perturbáció hatására a kialakuló lengéseknek kellően gyorsan csillapodniuk kell. Ez a vizsgálat nem képezi a HFT-terjedelem részét, csak új erőművi csatlakozás esetén kerül elvégzésre.

## **2.2 Újszerű felhősödési vizsgálat. A 2030-ra prognosztizált hazai fotovoltaikus erőművi teljesítményváltozás hatása az átviteli hálózat üzemére**

Az időjárásfüggő megújuló bázisú erőművek erőltetett ütemű bővülése minden villamosenergia-rendszer üzemeltető illetve hálózati engedélyes számára egy teljesen új helyzetre való felkészülést jelent az eddig megszokott üzemállapotokhoz képest. Éppen ezért elkerülhetetlen, hogy a villamos hálózat tervezésének vizsgálatába folyamatosan új szempontok kerüljenek. Ezen megfontolásból kiindulva megvizsgáltam az átviteli hálózat jelenlegi hálózat fejlesztési módszertanát, kritériumait és folyamatát, amelynek eredményét az előző fejezetben fejtettem ki. A gyakorlatban az átviteli hálózati engedélyes által elvégzett vizsgálatokat tanulmányoztam és azt találtam, hogy a nagyléptékű fotovoltaikus beépített kapacitás növekedés átviteli hálózatra gyakorolt

hatásának vizsgálatát lehetne tovább finomítani úgy, hogy az a jelenleg a MAVIR-nál használt eszközökkel és keretrendszerrel elvégezhető legyen.

Új modellt hoztam létre, amelynek újszerűsége abban áll, hogy a napelemes erőművek termelését alapvetően meghatározó felhősödési vizsgálatokat nem az egész ország egyidejű lefedettségére értelmeztem, hanem az ország földrajzi tájolásához igazodó részleges árnyékhatások következményeit — egymást követően — rendre külön-külön megvizsgáltam.

A jelenleg rendszeresített hasonló jellegű vizsgálatokhoz képest ez bizonyos vonatkozásban egyfajta újszerű érzékenység vizsgálatnak is tekinthető.

A jelenlegi hálózattervezési modellek a fotovoltaikus termelés vonatkozásában két szélső állapotot vizsgálnak nyári állapotra országos viszonylatban. A jelenleg alkalmazott modell abból a feltételezésből indul ki, hogy a fotovoltaikus termelés tekintetében a két szélsőség okozhatja a legfeszítettebb üzemállapotokat.

- alacsony terhelésű munkaszüneti napi rendszerállapot, maximális prognosztizált fotovoltaikus elterjedés mellett maximális beépített teljesítőképességből adódó betáplálással,
- magas terhelésű munkanapi esti bruttó csúcsterhelés fotovoltaikus termelés nélkül (nem süt a nap).

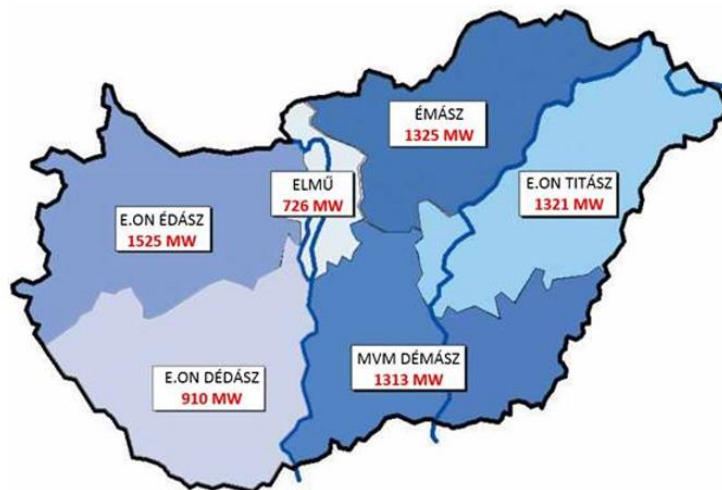
Az általam felállított új modell a korábbi vizsgálati szempontoktól merőben eltérő feltételei szerint a hálózat üzemállapotai közül és a napelemes erőművek termelési jellegéhez relevánsabb vizsgálati állapotot hoz létre. Ennek értelmében egy olyan nyári munkanapi napközbeni csúcsterhelés-közeli állapotot vizsgálok, amely időszakban maximális napelemes betáplálás mérhető. Ez egy jóval tipikusabb, gyakoribb, relevánsabb üzemállapot, mint az a kettő, amelyet a hálózattervezés ma vizsgál.

A modell felállításakor, azaz 2021. év első felében a MAVIR HFT-2020. hivatalosan publikált 2025-re prognosztizált sarokszámait vettem alapul [94].

A fogyasztói terhelés 7917 MW összes értékét az áramszolgáltatói ellátási területek tartalmazzák az igények földrajzi eloszlása szerint a következő ábrán szemléltetve.



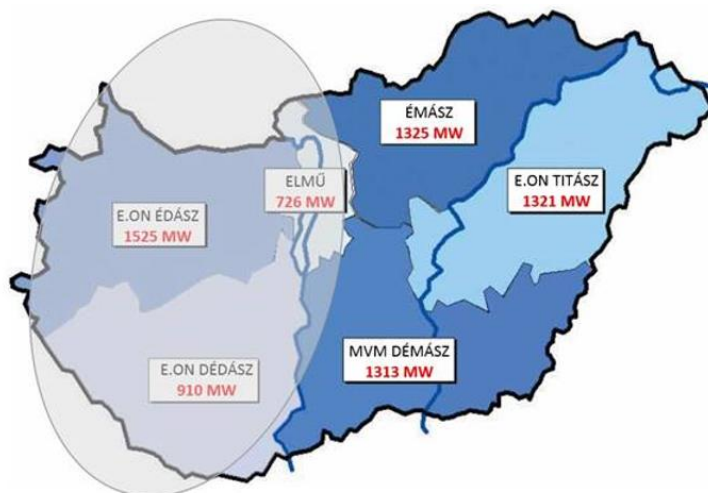
29. ábra A fogyasztói terhelés megoszlása a 2025. évre vonatkozó prognózis szerint, a felhasználás eloszlása az áramszolgáltatói ellátási területek szerint (saját szerkesztés) [94]



30. ábra A 2025-re prognosztizált maximális napfényes elterjedés eredményeképpen előálló beépített teljesítmények becsült területi eloszlás. (saját szerkesztés) [94]

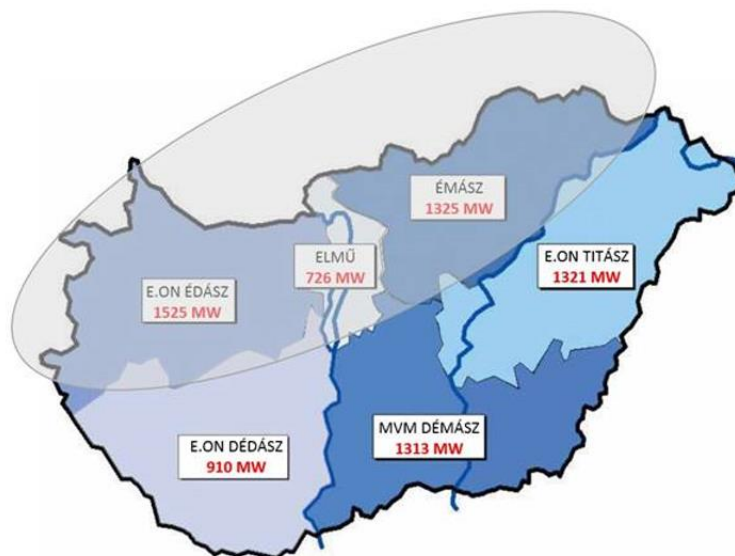
A vizsgálandó felhősödési állapotokat a hálózati engedélyesek ellátási területeire értelmezem. Meg kell jegyezni, hogy ez egy modell felállítására vonatkozó feltételezés, amelynek eredményéből valós helyzetekre tudok következtetéseket levonni.

Elsőként egy Nyugati országrészt érintő felhősödést vizsgáltam, amely a három érintett ellátási területen összesen 3161 MW napfényes erőmű termelésének korlátozását jelentette.



31. ábra A 2025-re prognosztizált maximális napelemes elterjedés eredményeképpen előálló beépített teljesítőképességek becsült területi eloszlását érintő Nyugati országrész felhősödése. (saját szerkesztés) [94]

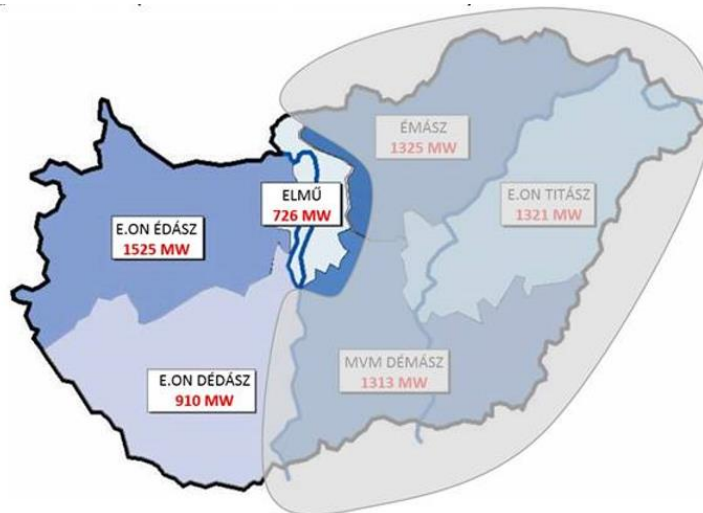
A másodikként vizsgált Északi felhősödési modell által letakart ellátási területen összesen 3578 MW teljesítőképességű fotovoltaikus erőmű üzemét korlátoztam a következő ábra szerint.



32. ábra A 2025-re prognosztizált maximális napelemes elterjedés eredményeképpen előálló beépített teljesítőképességek becsült területi eloszlását érintő Északi országrész felhősödése. (saját szerkesztés) [94]

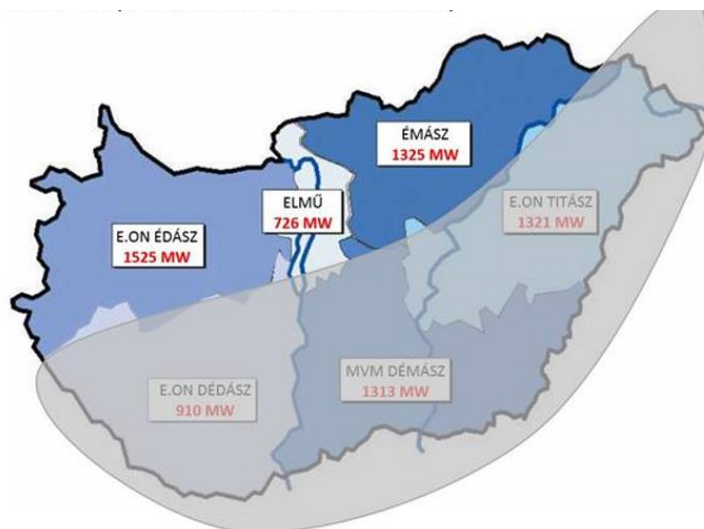
A harmadikként vizsgált Keleti felhősödési modell által letakart ellátási területen összesen 3959 MW teljesítőképességű fotovoltaikus erőmű üzemét korlátoztam a következő ábra szerint.





33. ábra A 2025-re prognosztizált maximális napelemes elterjedés eredményeképpen előálló beépített teljesítőképességek becsült területi eloszlását érintő Keleti országrész felhősödése. (saját szerkesztés) [94]

Végül egy Déli országrészt érintő felhősödést vizsgáltam, amely a három érintett ellátási területen összesen 3544 MW napelemes erőmű termelésének korlátozását jelentette.



34. ábra A 2025-re prognosztizált maximális napelemes elterjedés eredményeképpen előálló beépített teljesítőképességek becsült területi eloszlását érintő Déli országrész felhősödése. (saját szerkesztés) [94]

Megfigyelhető, hogy a négy felhősödési modell által érintett fotovoltaikus erőművek nagyságrendileg azonos beépített teljesítőképességet képviselnek.

Egy erőteljes felhősödés következtében a jelenleg rendelkezésünkre álló empirikus mért adatok szerint a napelemek termelése a névleges teljesítmény értékük közel 20 %-ra korlátozódik.

Az értekezés készítése során végzett villamos hálózat vizsgálatok a Siemens PTI cég PSS/E szoftverének v35-ös verziójával kerültek elvégzésre. A számítógépes modellező rendszer technikai és tervező szakértői támogatását a MAVIR biztosította számomra. Ez egyben azt is lehetővé tette, hogy a Hálózatfejlesztési Terv céljára készült modelleket

közvetlenül fel tudtam használni, formátumkonverzió vagy hangolás szükségszerűsége nélkül.

Egy jól kialakított, jól dokumentált számítógépes modellező rendszerben az alapmodell 2025. évre és 2030. évre lefuttatott állapotában változtattam meg a paraméterek egy részét az újonnan felállított modelleknek megfelelően. A paraméterek megváltoztatását követően azt vizsgáltam, hogy a paraméterek módosítása milyen hatással van a modellben található jellemzőkre és ezek esetleges megváltozása illetve annak mértéke hogyan befolyásolja a hálózat üzembiztonságát. Az esetleges változásoknak van-e olyan hatása, amelyet ellátásbiztonsági problémaként tudom értékelni. A hálózat tervezési munkakör része, hogy az esetleges határérték túllépések illetve üzembiztonsági problémák érzékelését követően az azonosított szűk keresztmetszeteket megfelelő beavatkozásokkal feloldja. A lehetséges beavatkozásokat minden esetben műszaki-gazdasági szempontok szerinti döntések előznek meg a legkisebb költség szem előtt tartásával.

Az újszerűként elvégzett négyféle felhősödési vizsgálat alapmodell szintű kiindulási feltételeként vettem, hogy minimumon üzemeltek a Dunamenti G3 és Gönyű CCGT-k, valamint 2/3 terheléssel üzemelt a Mátrai Erőmű meglévő 4-5-6-7. blokkja.

A befelhősődéssel érintett területeken modellezett fotovoltaikus betáplálásokat 80%-al csökkentettem így 20%-os termelési hányadot hagytam meg. A mért adatok szerint egy nagyon erős nyári felhőtakaró alatt 20 klux-ra csökken a szabadtéri fényerő, ami nagyjából 20%-os fotovoltaikus termelőképességet jelent a névleges értékhez képest. A felhősödés hatásának kiszabályozását egy kis részben a hazai felszabályozási tartalékból oldottam meg a Dunamenti G3, Gönyű CCGT-k és Mátrai Erőmű blokkjainak a technikai maximum közelébe történő felterhelésével összesen 532 MW teljesítmény értékén. A fennmaradó szabályozási energia igényt a szomszédos országokból az import növelésével oldottam meg Ukrajna kivételével.

A 2025. évre a négy felhősödési scenárió eredményét az alábbi táblázatban számszerűsíttem.

	Északi takarás	Keleti takarás	Déli takarás	Nyugati takarás
<b>Beépített fotovoltaikus teljesítőképesség (MW)</b>	<b>3576</b>	<b>3959</b>	<b>3544</b>	<b>3161</b>
<b>Kiesett fotovoltaikus teljesítőképesség (MW)</b>	<b>-2861</b>	<b>-3167</b>	<b>-2835</b>	<b>-2529</b>
<b>Hazai felszabályozási teljesítmény (MW)</b>	<b>532</b>	<b>532</b>	<b>532</b>	<b>532</b>
<b>Import felszabályozási teljesítmény (MW)</b>	<b>2329</b>	<b>2635</b>	<b>2303</b>	<b>1997</b>

1. táblázat A 2025. évre vonatkozó négy felhősödési scenárió eredménye számszerűsítve. (saját szerkesztés)

A négyféle modellezés lefuttatását követően a következő legnagyobb jellemző távvezetékszakasz terhelési értékek jelentkeztek.

Az Északi befelhősödés utáni állapotban a legnagyobb távvezetési kiterheltség 75% volt. A Keleti befelhősödés utáni állapotban a legnagyobb távvezetési kiterheltség 68,5%-ra adódott, ami azért érdekes, mert ez az érték alacsonyabb, mint a felhősödés előtt ugyanitt jelentkező érték. Ez azt jelenti, hogy a Keleti országrész hálózati szakaszok terhelésére nézve kifejezetten jótékony hatású volt a fotovoltaikus eredetű teljesítmény egy jelentős részének eltűnése.

A Déli befelhősödés utáni állapotban a legnagyobb távvezetési kiterheltség 67,6% volt. A Déli országrész esetében a hálózat terhelési viszonyaira a csökkenő tendencia volt megfigyelhető.

A vizsgálatok elvégzése előtt arra számítottam, hogy a terhelhetőségi határértékek közelében lesznek majd az áramlásnövekedésből adódó teljesítményértékek a napsütött és felhővel kitakart zónák határán vagy azokhoz közeli távvezetéseken. Az előzőek alapján megállapítható, hogy a normál kapcsolási állapotnak megfelelő, tehát nem hiányos hálózaton semmiféle üzembiztonság kockázat nem azonosítható be az elvégzett befelhősödési modellezések és számítások kapcsán. A változások nem jelentettek túlterhelés közeli állapotokat.

Az előzőekben modellezett állapotokhoz képest, tehát a 2021. évben hivatalosan elérhető kiindulási adatokat alapul véve a hálózat szempontjából erősebben kifizített állapot 2025-re nem feltételezhető. Ezen kiinduló adatokkal bármilyen más vizsgálat, amely kiindulási állapota a realitásokkal összhangban van az eddig feltártnál nagyobb kockázatot nem fog felszínre hozni.

Ezt követően elvégeztem az egyszeres N-1 kiesésvizsgálatokat, amelyek sehol sem okoztak túlterhelődéseket.

Mivel megbízható, validált elosztóhálózati modell csak 10 év előre tekintéssel készül, ezért a HFT 2020-as tervből 2030-as legtávolabbi megalapozott modellt tudtam felállítani.

A 2030-as évi Paks2-vel, Tisza CCGT-vel és további 1800 MW fotovoltaikus erőművel bővített modelleket is megvizsgáltam, amelyekben az alábbi terhelési és termelési teljesítmény értékeket vettem figyelembe.

Terhelési adatok (MW)	
E.ON Dédász	830
Démász	1062
ELMŰ	2788
E.ON Édász	1705
ÉMÁSZ	1252
E.ON Títász	943
<b>összesen:</b>	<b>8580</b>

2. táblázat 2030. évre prognosztizált terhelési értékek. (saját szerkesztés) [94]

Termelési adatok (MW)	
E.ON Dédász	1329
Démász	1587
ELMŰ	859
E.ON Édász	1981
ÉMÁSZ	1698
E.ON Títász	1514
<b>összesen:</b>	<b>8968</b>

3. táblázat 2030. évre prognosztizált fotovoltaikus termelési értékek, TSO és DSO együtt. (saját szerkesztés) [94]

A figyelembe vett hagyományos technológiájú nagyerőművi termelés az alábbi:  
4 db Paks1 és 1 db Paks2 blokk üzemel, maximálisához közeli teljesítménnyel mindegyik változatban, emellett a kiindulási modellben minimumon üzemeltek a Dunamenti G3, a Gönyű CCGT-k és a Tisza Erőmű CCGT-k.

A befelhősödési változatokban (észak, kelet, dél, nyugat) az adott területeken modellezett fotovoltaikus betáplálások 80%-át vettem el. Az elvett napelemes erőmű termelés kiszabályozását részben a hazai felszabályozási tartalékból oldottam meg (Dunamenti, Gönyű és Tisza Erőmű felküldésével a technikai maximum közelébe. Ez összesen 886 MW volt. A többi részt pedig a szomszédos országokból biztosítottam (Ukrajna kivételével).

A 2030. évre a négy felhősödési scenárió eredményét a 4. táblázatban számszerűsítettem.

	Északi takarás	Keleti takarás	Déli takarás	Nyugati takarás
<b>Beépített fotovoltaikus teljesítőképesség (MW)</b>	4538	4799	4430	4169
<b>Kiesett fotovoltaikus teljesítőképesség (MW)</b>	-3630	-3839	-3544	-3335
<b>Hazai felszabályozási teljesítmény (MW)</b>	886	886	886	886
<b>Import felszabályozási teljesítmény (MW)</b>	2744	2953	2658	2449

4. táblázat A 2030. évre vonatkozó négy felhősödési szcenárió eredménye számszerűsítve. (saját szerkesztés)

Az északi befelhősödés utáni állapotban a legnagyobb távvezeték kiterheltség 90,8 %.

A keleti befelhősödés utáni állapotban a legnagyobb távvezeték kiterheltség 85,8 %. Ez az érték alacsonyabb, mint a felhősödés előtt ugyanitt jelentkező érték. Ez azt jelenti, hogy a Keleti országrész hálózati szakaszok terhelésére nézve kifejezetten jótékony hatású volt a fotovoltaikus eredetű teljesítmény egy jelentős részének eltűnése.

A déli befelhősödés utáni állapotban a legnagyobb kiterheltség 85,5 % volt. A Déli országrész hálózati szakaszok terhelésére nézve kifejezetten jótékony hatású volt a fotovoltaikus eredetű teljesítmény egy jelentős részének eltűnése.

A nyugati befelhősödés utáni állapotban a legnagyobb kiterheltség 85,6 %-ra adódott. A fotovoltaikus termelés egy részének eltűnése jótékonyan hatna az elosztóhálózat terhelési viszonyaira.

A fentiek alapján az állapítható meg, hogy a normál kapcsolási állapotnak megfelelő, tehát nem hiányos hálózaton semmiféle üzembiztonság kockázat nem azonosítható be az elvégzett befelhősödési modellezések és számítások kapcsán, a vizsgált 2030-as nyári üzemállapotban sem.

Elvégeztem az N-1 kiesésvizsgálatokat is. Ebben sem láttam helyi strukturális problémákon túl egyéb, esetleg rendszerszintű kockázattal fenyegető problémát.

Az előzetes várakozásaim ellenére az általam eszközölt változások sehol sem okoztak túlterhelődést.

A modellezés eredményeként megállapítható, hogy a nagy területre eső letakarások viszonylag nagy homogenitást adtak a modellezéshez. A hálózat jelenlegi állapotában a csomópontok kiosztása, hálózat topológiája, a távvezetékek teljesítmény átvivő képessége következtében a hálózat ezzel a vizsgálati módszerrel le tudja kezelni az általam vizsgált 2030. évre vonatkozó állapotokat is.

A viszonylag nagy területet érintő homogenitás miatt nem tudja kezelni a szoftver a rendszerben szórványosan megtalálható lokális hálózati gyenge pontokat, amelyek a

kellően erős hálózati elemek terhelhetőségét is korlátozzák a maguk szűk keresztmetszetével. Hasonlóképpen nem tudja kezelni a jelenleg alkalmazott vizsgálati módszer az ipari nagyméretű fotovoltaikus erőművek betáplálásának helyi hatását sem. Célszerű a vizsgálati módszertan tovább fejlesztése oly módon, hogy lokális hálózati szűk keresztmetszeteket és a jelentős nagyságrendű betáplálási pontokat topológiai szempontból is figyelembe lehessen venni a rendszerszintű vizsgálatok során.

A következő azonosítható kockázat a rendszer megfeleléségi vizsgálat menetében az, hogy a hálózatfejlesztés tervezési folyamat kiinduló adatai egy éven belül is jelentős mértékben megváltozhatnak. Erre éppen a jelen értekezés készítésének időszaka is egy eklatáns példa a következők szerint. A MAVIR 10 évre kitekintő prognózisa 2020-ban 7835 MW fotovoltaikus teljesítőképességet tartalmazott 2030. évre.[94 p.28] Az előzőekben bemutatott modellezéshez 2021-ben ezek az adatok álltak rendelkezésemre. A 2022-ben elérhető MAVIR előrejelzés 2031-re már 11600 MW napelemes kapacitást vetít előre. [68 p.48] Ez azt jelenti, hogy egy év alatt a 2020-ban kiadott hivatalos prognózishoz képest közel 50% - al nőtt a 10 éves kitekintés végére szintén a MAVIR által kiadott napelemes kapacitás bővülési trend.

Ezen a ponton vissza kell, hogy utaljak a hálózatfejlesztés-tervezés folyamatának vizsgálatáról szóló 2. fejezet egyik legfontosabb megállapítására. Az MEKH elvárása, hogy a mindenképpen szükségesnek ítélt hálózati fejlesztések megvalósításához a műszakilag egyenértékű alternatívák közül a legkisebb költséggel járó műszaki megoldást kell választani. Az összehasonlítás az alternatívák CAPEX és OPEX költségeinek figyelembe vételével kell, hogy történjen. A legkisebb költségre törekvés elve nem írja felül a kötelezően alkalmazandó tervezési kritériumokat, hanem a hálózatfejlesztés tervezési folyamat kritérium rendszerén belül értelmezhető. Az előzőekben vizsgált fotovoltaikus erőmű technológia penetráció kiszámíthatatlanságának kezelésére a hálózatfejlesztési tervezés folyamatában kétféle módszert látok. Az egyik módszer a jelenleginél pontosabb modelleket, jóval több üzemállapokra kiterjedő szimulációkat, jóval pontosabb és hosszabb távú időjárási valamint termelési előrejelzést tartalmazhatna. Az előzőekben elvégzett felhősödési vizsgálat igazolta, hogy az általam elvégzettnél jóval részletesebb, komplexebb, bonyolultabb kritériumokra és feltételezhetően nagyságrendekkel nagyobb számítási volumenre lenne szükség, amelyhez sem a megfelelő kapacitás sem az ehhez szükséges bemenő adatok döntő többsége nem áll rendelkezésünkre. A rendszer szinten értelmezhető, összes szóba jöhető problémát okozó lehetséges üzemállapotot lehetetlen vállalkozás lenne felírni.

Az időjárásfüggő villamosenergia-termelés földrajzilag elosztottan jelentkezik. A rendszerbe integrált, várhatóan egyre nagyobb összkapacitású szabályozási tartalékok elosztott és koncentrált elhelyezkedésben lesznek jelen a hálózati topológiában. Azt biztosan ki lehet jelteni, hogy szabályozási tartalékok jelentős részének csatlakozási pontja nem fog egybe esni az időjárásfüggő termelők hálózati csatlakozási pontjaival, tehát folyamatosan és fokozatosan erősödni fog a hálózat kitétsége a véletlenszerű rendszerszintű hatásoknak.

Az előzőekben elemzett problémák kezelésére a hálózatfejlesztési tervezés folyamatába az összes eddigi kritérium megtartása mellett egy új kritérium bevezetését javaslom, amely a célzottan bevezetett tartalék képzést jelenti. Az eddigiekhez képest ez egy teljesen új módszertani megközelítés lenne. Az előre nem tervezhető hektikusan előforduló hálózati üzemállapotok megoldására ez a tartalék fog mozgásteret biztosítani a hálózati engedélyesek számára, amely a rendszerbiztonságot és ezen keresztül az ellátásbiztonságot fogja szolgálni. A jelenleg még fejlesztés alatt álló, teljesítményelektronikai megoldásokkal megvalósítható mesterséges inercia működéséhez szintén hálózati kapacitástartalék képzésre van szükség. A tartalék képzést a hálózatfejlesztési kritériumok közé emelve lehetőséget ad a hálózat tervezőnek arra, hogy a legkisebb költség elvének betartása ne befolyásolhassa a tartalék műszaki megvalósíthatóságának tervezhetőségét. A legkisebb költség elve ebben az esetben is a csak a műszaki alternatívák közötti választásban játszhat szerepet.

A célzott tartalékok hiánya esetén az időjárásfüggő fotovoltikus beépített kapacitások rövid idő alatt bekövetkező esetleges drasztikus növekedése azzal a kockázattal jár, hogy az előre nem jelezhető, dinamikus kialakuló hálózati állapotok üzembiztonsági problémáit nem minden esetben lehet majd operatív beavatkozásokkal megoldani. Illetve az operatív beavatkozásokkal való megoldhatóság (PV visszatérhelés szükségessége) egyre nagyobb mértékben a rendszerszintű szabályozási tartalékok növelését fogja igényelni, azok hiányában ellehetetlenül. Ennek jelei már megmutatkoznak a MAVIR által hivatalosan közzétett új napelemes erőművi igények korlátozási feltételeiben a következő, a hálózati engedélyesek által kiadott nyilatkozat tartalma szerint. „A villamosenergiáról szóló 2007. évi LXXXVI. törvény (Vet.) 35.§ (8) bekezdés alapján a hálózati engedélyesek 2022. május 2-án közzétették a nagyfeszültségű és a nagy/középfeszültségű transzformátorállomásokhoz rendelt aktuális szabad kapacitásokat 0 megavoltamper (MVA) mértékben. Az érvényes jogszabályi előírások alapján, az átviteli rendszerirányító, a villamosenergia-rendszer teljesítmény-

egyensúlyának és a kiegyenlítő szabályozási kapacitásoknak a biztosíthatósága szempontjából a villamosenergia-rendszerbe befogadható időjárásfüggő erőművi kapacitás mértékét (korlátját) ugyancsak 0 MVA-ban állapítja meg.” [95]

A teljesség kedvéért meg kell jegyezni, hogy a nyilatkozat tartalma a 2022. május 2-át követően beadandó csatlakozási igényekre vonatkozik. A fenti időpont előtt a hálózati engedélyesek által visszaigazolt napelemes erőmű fejlesztési kezdeményezések a visszaigazolt feltételekkel megvalósulhatnak.

Az elvégzett vizsgálatok eredményei azt igazolták vissza, hogy a hazai 400 kV-os többszörösen hurkolt átviteli hálózat a vártnál jobb eredményt produkált a rendszer megbízhatóság szempontjából. Ennek tükrében az is megállapítható, hogy az átviteli hálózat többszörösen hurkolt kialakítása mind a szélső terhelések eloszlása, mind az egyszeres hálózati elem kiesések esetére megfelelő rendszerbiztonságot nyújt az üzemeltető számára. Az időjárásfüggő termelő kapacitások nagy számban a közepesfeszültségű elosztó hálózatra illetve a 120 kV-os főelosztó hálózatra csatlakoznak, ezért lokális hatásuk az elosztó hálózatok üzemét érinti elsősorban. Mivel az elosztó és főelosztó hálózatok egy jóval alacsonyabb ellátásbiztonsági szintet képviselő sugaras kialakításúak, ezért a rendszerbiztonság növelése érdekében tudományos szempontból célszerű lenne a többszörösen hurkolt hálózati topológiára való folyamatos áttérés hatásait vizsgálni ezeken a feszültségszinteken is. Műszaki-üzemeltetési szempontból ilyenek nem létesülnek.

Másik fontos aspektus, hogy a jelen statikus vizsgálati módszer csak a villamos hálózati elemek rendszerszintű, állandósult állapotú teherbíró képességét vizsgálja, de nem terjed ki a villamos energia rendszer dinamikus vizsgálatára, amely a szabályozási feladat ellátásához szükséges rugalmas kapacitások rendszerszintű viselkedését hivatott modellezni.

További fejlesztési iránynak javaslom a felhő és a köd fedettség dinamikus változás hatásának vizsgálatát a villamos hálózat üzemére. Jelenleg a meteorológiai szolgáltatók adatbázisában nincs hozzáférhető információ a fedettség dinamikus változásaira. A MAVIR hálózat tervezési módszertanának kiegészítése érdekében célszerű egy újszerű adatgyűjtés bevezetése, amelyből a fedettség dinamikája előállítható. A teljes illetve részleges statikus fedettségi vizsgálatok kiegészítése dinamikus vizsgálatokkal a pontos és biztonságos hálózattervezést segíti elő.



## **1. tézis**

A vizsgálataim a várakozásaimat nem igazolták, tehát negatív eredménnyel zárultak. A jelenlegi hálózatfejlesztési eszköztár nem alkalmas a fotovoltaiikus erőművek villamos hálózatra gyakorolt szélsőséges hatásainak vizsgálatára. Nem alkalmas műszaki hiányosságok feltárására. Műszaki-gazdasági-politikai feltételek folyamatos korrekciójával a vizsgálat mindig megfelelő eredményt szolgáltat.

Új hálózatfejlesztési módszertant kell kidolgozni, amely kiterjed a részleges felhősödés vizsgálatokra és a hálózati kapacitás tartalékképzésre. A tartalékképzés a nagy rendszerzavartatások és az időjárási havária elviselési képességek javítását is szolgálja [MF1] [MF3] [MF4] [MF5] [MF6] [MF7] [MF8] [MF9] [MF10] [MF11] [MF12] [MF13] [MF14] [MF15] [MF16] [MF17] [MF18] [MF19] [MF20].

## 3 ÁTVITELI HÁLÓZAT ÜZEMBIZTONSÁGI VIZSGÁLATA

Ma minőségi követelmény villamosenergia-ellátás folyamatossága iránti igény kielégítése, azaz az üzembiztonság. Az üzembiztonságot az üzemképtelen állapotok gyakorisága és időtartama együttesen határozza meg. Habár az üzemképtelen állapotokat tervszerű kikapcsolások (karbantartás, bővítés, stb.) és véletlenszerű meghibásodások, üzemzavarok határozzák meg, jelen vizsgálatban, csak a véletlenszerű kiesésekre készítem el a modelleket, a tervszerű kikapcsolások figyelembe vétele további megfontolásokat igényel, amelyre a tovább fejlesztésben kerül majd sor.

A cél olyan új modell megalkotása, amely a hálózat két kiemelt pontja közötti villamosenergia-átvitel megbízhatóságára aránylag gyors és egyszerű becslést ad. Ehhez a halmazelmélet [81], a gráfelmélet [82], a valószínűség számítás [83], a matematikai statisztika [84] és a villamosmérnöki tudományok [85] együttes alkalmazására van szükség.

### 3.1 Üzemállapot, mint halmaz

A hálózat üzemképességének megítélése szempontjából minden hálózatelemnek az üzemállapota az üzemállapot halmaz halmazeleme. De hálózatelem alatt nem egy konkrét készülék, vezeték stb. értendő, hanem a hálózat adott pontján (pl.  $i$ ) lévő elem (pl.  $c_i$ ), ha tönkrement és cserélték, akkor az utóbbi. Azaz csak azt vizsgálom, hogy az adott helyen lévő hálózatelem „ $c_i$ ” hányszor üzemképes, vagy üzemképtelen a vizsgált időszakban. Megint további modellfinomítással az is figyelembe vehető, hogy mennyi ideig üzemképtelen. Az üzemzavari statisztika segítségével minden  $c_i$  hálózatelemhez hozzárendelhető egy üzemképességi esemény  $C_i$  és annak bekövetkezési valószínűsége  $0 \leq P(C_i) \leq 1$ . A gyakorlatban az adott típusú hálózatelemeket egyformának feltételezem és a megbízhatóság angol szó kezdőbetűjével  $R_C$  jelölöm,  $R_C = P(C_i)$ . Miután a hálózatelemek nagyon megbízhatóak, a megbízhatóságuk 1-hez igen közeli érték, így a gyakorlati számításokat az üzembizonytalanság halmazhoz ( $\bar{C}_i$ ) rendelt bekövetkezési valószínűség értékkel végezem  $Q_C$ , amelyre igaz, hogy  $Q_C = 1 - R_C$ .

Részletesebb halmazelméleti megfontolások ismertetése nélkül az általam használt összefüggésekre igaz, hogy [87]:

- Ha  $C$  és  $D$  egymást kizáró esemény, akkor  $C \cap D = 0$  ezért,  $P(C \cup D) = P(C) + P(D)$

- Ha C és D egymást nem kizáró esemény, akkor  $P(C \cup D) = P(C) + P(D) - P(C \cap D)$
- Ha C és D egymástól független esemény, akkor  $P(C \cap D) = P(C)P(D)$
- Ha C és D egymástól nem független esemény, akkor  $P(C \cap D) = P(C|D)P(D)$

### 3.2 Egyszerű (soros, párhuzamos) hálózat üzembizonytalansága

Miután egy helyen lévő elem vagy üzemel, vagy üzemlen kívül van, és így a két üzemi állapot modellemben a teljes eseményrendszert megvalósítja, valamint az együttes bekövetkezés valószínűsége 0, így

$$R_C + Q_C = 1$$

#### 3.2.1 Soros hálózat üzembizonytalansága

Vegyünk két soros hálózatelemet pl. megszakító (c) és szakaszoló (d). a soros hálózat üzemképes, ha mindkét elem üzemképes ( $C \cap D$ ). A megszakító és a szakaszoló üzemképessége egymástól független, így  $P(C \cap D) = P(C)P(D)$ , azaz a soros hálózat megbízhatósága:  $R_{\text{soros}} = R_C R_D$

De gyakorlati számításoknál a soros hálózat üzemképtelenségét, azaz annak valószínűségét számítjuk. Vagy a megszakító hibás ( $\bar{C}$ ), vagy a szakaszoló hibás ( $\bar{D}$ ), vagy mindkettő hibás ( $\bar{C} \cap \bar{D}$ ). Miután a szakaszoló meghibásodás és a megszakító meghibásodás egymást nem kizáró események, ezért:  $P(\bar{C} \cup \bar{D}) = P(\bar{C}) + P(\bar{D}) - P(\bar{C})P(\bar{D})$ .

Vizsgálatom során az üzembizonytalanság nagysága, azaz a valószínűség értéke mindig kisebb, mint  $10^{-3}$ , szorzatuk legalább három nagyságrenddel kisebb, mint az összeadandók nagyságrendje, ezért a  $P(\bar{C})P(\bar{D})$  szorzat elhagyható. Így a soros ág üzembizonytalansága a következő képpen számítható[87]:

$$Q_{\text{soros}} = Q_C + Q_D$$

Általánosítva n darab soros elemre:

$$Q_{\text{soros}} = \sum_{i=1}^n Q_i$$

### 3.2.2 Párhuzamos hálózat üzembizonytalansága

Vegyünk két párhuzamos hálózatelemet pl. egy szabadvezeték (c) és egy kábelt (d). a párhuzamos hálózat csak akkor üzemképtelen, ha mindkét elem egyszerre üzemképtelen ( $\bar{C} \cap \bar{D}$ ). A szabadvezeték és a kábel üzemképtelensége, üzemzavari kiesése egymástól független, ezért  $P(\bar{C} \cap \bar{D}) = P(\bar{C})P(\bar{D})$ . A párhuzamos elemek üzembizonytalanságának számítási összefüggése ezek szerint[87]:

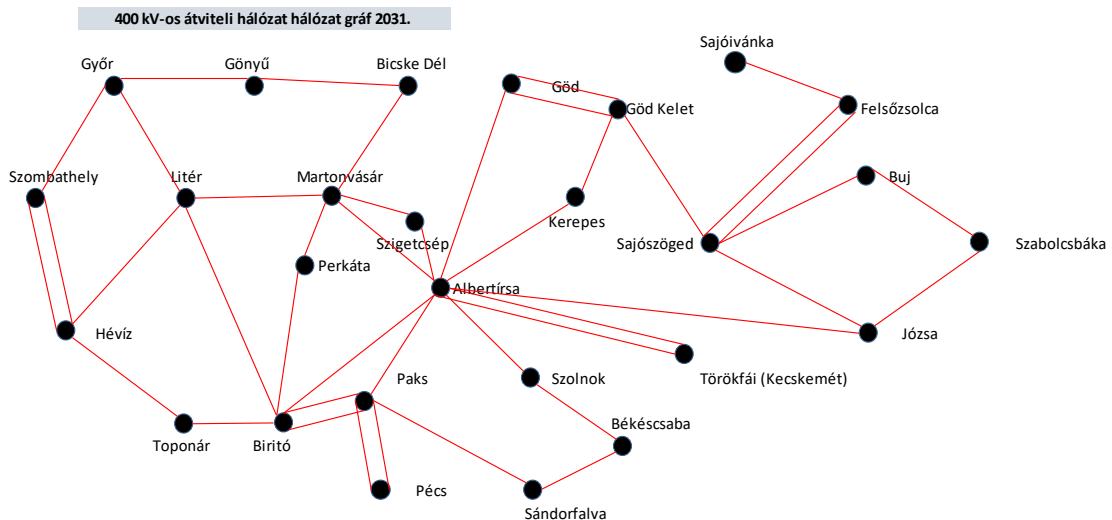
$$Q_{\text{párhuzamos}} = Q_C Q_D$$

Általánosítva n darab párhuzamos elemre:

$$Q_{\text{párhuzamos}} = \prod_{i=1}^n Q_i$$

### 3.3 Hurkolt hálózat üzembizonytalanság számítása vágat módszerrel

A háromfázisú átviteli hurkolt hálózat üzemzavarmentes állapotát vizsgálom, így mind a táplálásra, mind az átvitelre, mind a fogyasztásra teljes szimmetriát tételezek fel, azaz készíthető a hálózatra egyfázisú helyettesítő vázlat! Ha most eltekintünk a hálózat villamos jellemzőitől és az impedanciamentes visszavezetést egy csomópontba összevonom, akkor megkapom a hálózat fizikai jellemzőitől mentes geometriai alakzatát, a gráfját. Miután a csomópontok és az ágak kapcsolatát leíró teljes csomóponti mátrix nem reguláris, ezért a referencia pontot és a hozzá kapcsolódó ágakat elhagyva, (a mátrixot is így regulárisrá téve) megkapom — a 2031. évre tervezett topológia alapján (35. ábra) — a VER 440 kV-os hurkolt hálózat vizsgálandó gráfját. Az elhagyás azzal is indokolható, hogyha csak az impedanciamentes visszavezetővel (földdel) van a két csomópont összekötve villamosenergia-átvitel nem lehetséges.



35. ábra A VER 400 kV-os átviteli hálózat gráfja a 2031. évre tervezett topológiára (saját szerkesztés)

A cél annak vizsgálata, hogy mi a valószínűsége annak, hogy a gráf két kiválasztott pontja között megszűnik a kapcsolat, azaz nem lehet villamos energiát átvinni? Ezt több esetben megvizsgálva jó becslést kaphatunk az átviteli változatok értékelésére.

### 3.3.1 A vágat

A vágat a gráf csúcsait összekötő olyan élek összessége, amelyek kiemelése az eredeti gráf rangját eggyel csökkenti. [86] Azaz a vágat [82] a gráf olyan metszése, hogy a gráf két (nem összefüggő) részgráfba esik szét. Ha ez úgy készül, hogy a két kiválasztott pont a két izolált részgráfba esik, akkor üzemképtelenségi vágatról beszélünk. Üzemképtelenségi vágatnak csak a redukált vágatokat nevezem, és veszem figyelembe, azaz az ágak minimális számával létrehozott szétválasztást. (Nem kellene feleslegesen eltávolított ágak)

A két kiválasztott pont közötti kapcsolat megszűnik, bármely üzemképtelenségi vágat ágainak eltávolításával, vagy üzemképtelenségi vágatok ágainak eltávolításával. [86]

Egy vágat üzemképtelenségének valószínűsége, a vágat ágainak együttes kiesésének valószínűsége. Legyen a vágatban három ág pl.: e;g;j, ezen ágak kiesési eseménye rendre  $(\bar{E});(\bar{G});(\bar{J})$ , üzembizonytalansága rendre  $Q_E;Q_G;Q_J$ . A vágat kiesési eseménye  $(\bar{V})$  a vágat ágainak együttes kiesése:

$$\bar{V} = \bar{E} \cap \bar{G} \cap \bar{J}$$

a vágat üzembizonytalansága pedig a vágat ágainak együttes kiesés valószínűsége:

$$Q_{\text{vágat}} = P(\bar{V}) = P(\bar{E} \cap \bar{G} \cap \bar{J}).$$

Miután az ágak kiesése, üzemzavari eseménye egymástól független, az egyes vágatok kiesési valószínűsége számítható a vágat ágainak kiesési valószínűségeinek szorzataként, az adott példában tehát [87]:

$$Q_{\text{vágat}} = Q_E * Q_G * Q_J$$

### 3.3.2 A két pont közötti kapcsolat, azaz az átvitel

A két kiválasztott pont közötti átvitel megszűnik, ha az üzemképtelenségi vágatok bármelyike kiesik vagy egyszerre több üzemképtelenségi vágat kiesik, azaz a nem kívánt esemény, ha „m” az üzemképtelenségi vágatok száma:

$$\bigcup_{j=1}^m \bar{V}_j$$

Az átvitel üzembizonytalansága — az unió valószínűségének számítása miatt — az eredmény igen sok tagból áll, amelyeknek mindegyike egy több tényezős szorzat. A páratlan számú tényezőkből állók pozitív előjelűek, a páros számú tényezőkből állók negatív előjelűek.

Ha példaként három üzemképtelenségi vágatunk van összesen akkor:

$$Q_{\text{átvitel}} = Q_{1V} + Q_{2V} + Q_{3V} - Q_{1V}Q_{2V} - Q_{1V}Q_{3V} - Q_{2V}Q_{3V} + Q_{1V}Q_{2V}Q_{3V}$$

De ha a két soros elemnél tett megfontolást itt is alkalmazzuk, akkor a különböző vágatok egyidejű kiesésének valószínűségét, azaz a több tényezős szorzatokat a nagyságrendekkel kisebb érték miatt elhanyagolom, akkor a következő egyszerű összefüggésre jutok:

$$Q_{\text{átvitel}} = \sum_{j=1}^m Q_{j\text{vágat}}$$

Összefoglalóan:

Minden üzemképtelenségi vágat üzembizonytalansága a vágat ágai üzembizonytalanságainak szorzataként számítható.

Az átvitel üzembizonytalansága pedig az üzemképtelenségi vágatok üzembizonytalanságainak összege.

### 3.4 Elemek megbízhatósága (üzembizonytalansága) az alapadat

A jelen vizsgálattal érintett 400 kV-os hurkolt hálózat a magyar villamosenergia-rendszer nagy távolságú teljesítmény-átviteli funkcióit ellátó átviteli hálózat része. A MAVIR Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zártkörűen Működő Részvénytársaság (MAVIR ZRt.) az átviteli hálózat tulajdonosa. Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal (MEKH) 2012. március 13-án hatályba lépett határozattal, az abban található tanúsítással az ITO (Independent Transmission Operator) modell szerint üzemelteti a hazai átviteli hálózatot.

A MAVIR Zrt. felelőssége az országos energiarendszer teljesítmény-egyensúlyának biztosítása. Ennek eléréséhez szükséges az elérhető legnagyobb üzembiztonság fenntartása. A MAVIR Zrt. operatív üzemeltetési tevékenységeken túlmenően tervezett felújításokkal, karbantartásokkal és fejlesztésekkel erősíti a rendszer biztonságát. Ezen tevékenységek támpontjául is szolgálnak a MAVIR Zrt. által évente előállított KPI (Key Performance Indicator) mutatók, magyarul kulcs teljesítménymutatók.

A 400 kV-os átviteli hálózati elem megbízhatósági vagy üzembizonytalansági vizsgálatához a MAVIR Zrt. által gyűjtött rendelkezésre nem állási adatokra van szükségem. Ezek közül is a 400 kV-os szabadvezetékek és nagykészülékek üzemzavari okokból történő rendelkezésre nem állására helyeztem a hangsúlyt.

A MAVIR Zrt. által rendelkezésre bocsátott adatokból a következőképpen jutottam a számomra releváns üzembizonytalansági mutatókhoz.

A 400 kV-os átviteli hálózat mind az 52 db szabadvezetékére vonatkoztatva az elmúlt 5 év üzemzavari okokból történő rendelkezésre nem állását, azaz a tényleges kiesési, illetve üzemzavari kikapcsolási időtartamokat az 5 táblázat tartalmazza:

év	kiesési idő (óra)
2017	186,533
2018	35,383
2019	79,700
2020	205,850
2021	62,167
<b>átlag</b>	<b>113,927</b>

5. táblázat: 400 kV-os átviteli hálózat szabadvezetékeinek rendelkezésre nem állása (saját szerkesztés) [37]

Az adatok 400 kV-os szabadvezetékek 3160,784 km összes hosszára vonatkoznak.

Az egy évre vonatkozó átlagos üzembizonytalansági mutató értéke:

$$Q_{\text{össz.szabadvezeték}} = 0,0130.$$

Az egyedi szabadvezeték szakaszok üzembizonytalansági mutatójának kiszámításához meghatároztam az 1 km-es szabadvezeték szakaszra eső, éves fajlagos üzembizonytalansági mutató értékét:

$$Q_{fajl.szabadvezeték} = 0,00000411.$$

A MAVIR hálózatfejlesztési terv alapján a 2031. évben figyelembe vehető 400 kV-os feszültségű szabadvezetékek üzembizonytalanságát a szabadvezetékek egyedi hosszainak és az egységnyi hosszra vonatkozó fajlagos üzembizonytalansági mutató értékének figyelembe vételével számítom ki. A számítás eredményét a 6. táblázat tartalmazza.



Távezeték indulási hely	Távezeték érkezési hely	Hossz (km)	Üzem-bizonytalanság
AISA B	GOD B	65	0,000268
AISA B	KERP B	43	0,000175
AISA B	TORF B	55	0,000226
AISA B	TORF B	55	0,000226
AISA B	MART B	67	0,000278
AISA B	PAKS B1	144	0,000593
AISA B	BIRT B	148	0,000609
AISA B	SZICSB	53	0,000216
AISA B	SZOL B	46	0,000190
AISA B	JOZS B	168	0,000691
BICSDB	GONYUB	108	0,000444
BICSDB	MART B	25	0,000101
BEKO B	SAFA B	92	0,000379
BEKO B	SZOL B	113	0,000466
PERK B	MART B	36	0,000150
PERK B	BIRT B	56	0,000231
FZSO B	SAJI B	29	0,000119
FZSO B	SAJO B	25	0,000104
FZSO B	SAJO B	25	0,000103
GOD B	GKEL	2	0,000009
GOD B	GKEL	2	0,000008
KERP B	GKEL	22	0,000088
GONYUB	GYOR B	15	0,000061
GYOR B	LITR B	74	0,000306
GYOR B	SZHO B	113	0,000464
HEVI B	LITR B	90	0,000369
HEVI B	SZHO B	78	0,000320
HEVI B	SZHO B	78	0,000320
HEVI B	TOPN B	104	0,000427
LITR B	MART B	71	0,000293
LITR B	BIRT B	93	0,000383
MART B	SZICSB	20	0,000080
PAKS B1	BIRT B	7	0,000027
PAKS B1	BIRT B	4	0,000016
PAKS B1	PECSOB	82	0,000336
PAKS B1	PECSOB	82	0,000336
PAKS B1	SAFA B	112	0,000462
BIRT B	TOPN B	89	0,000365
GKEL	SAJO B	145	0,000595
SAJO B	JOZS B	58	0,000239
SAJO B	BUJ B	55	0,000227
JOZS B	BAKA K	81	0,000335
BUJ B	BAKA K	44	0,000181

<b>400 kV-os alállomások megnevezésének rövidítései</b>	
Albertirsa	AISA
Békéscsaba	BEKO
Bicske Dél	BICSD
Biritó	BIRT
Buj	BUJ
Felsőszolca	FZSO
Göd	GOD
Göd Kelet	GKEL
Gönyű	GONYU
Győr	GYOR
Hévíz	HEVI
Józsa	JOZS
Kerepes	KERP
Litér	LITR
Martonvásár	MART
Paks	PAKS
Pécs	PECSO
Perkáta	PERK
Sajóivánka	SAJI
Sajószöged	SAJO
Sándorfalva	SAFA
Szabolcsbáka	BAKA
Szigetcsép	SZICS
Szolnok	SZOL
Szombathely	SZHO
Toponár	TOPN
Törökfái (Kecskemét)	TORF

6. táblázat: 2031. évben figyelembe vehető 400 kV-os távvezetékek hossza és üzembizonytalansági mutatói, Alállomások megnevezésének rövidítése (saját szerkesztés) [92]

A 400 kV-os primer nagykészülékek üzemzavari okokra visszavezethető üzembizonytalansági mutatóit a MAVIR Zrt. az általa vezetett kockázati lista alapján becsült értéként határozta meg.

<b>Készülék megnevezése</b>	<b>Üzem- bizonytalanság</b>
Megszakítók	0,000166
Szakaszolók	0,000027
Mérőváltók	0,000026
Túlfeszültség-korlátozók	0,000033

7. táblázat 400 kV-os primer nagykészülékek üzembizonytalansági mutatói (saját szerkesztés) [37]

A 400 kV-os hurkolt hálózat 50 db alállomási gyűjtősínt foglal magába. A gyűjtősínek üzemzavari okokra visszavezethető kiesésére több mint 10 éve nem került sor. A MAVIR Zrt. a lehetséges üzemzavari kockázatok mérlegelését követően az összes gyűjtősínre és 20 évre vonatkoztatott 8 órás becsült kiesést adott meg. Az elvégzett számítások alapján az egy gyűjtősínre eső éves üzembizonytalansági mutató,  $Q_{gyűjtősín} = 0,000000913$  értékre adódott.

### **3.5 Átviteli hálózat gráfjának egyszerűsítése minimális csomópont és minimális ág számra**

Az első fejezetben a szekunder kutatás eredményként megállapítottam, hogy mind globális, mind hazai szinten erőműveket kell építeni az előttünk álló évtizedek villamosenergia-ellátásbiztonságának fenntartása, ill. még inkább a növelése érdekében. Az Európai Unió klímavédelmi intézkedései az erre a célra figyelembe vehető technológiákat is determinálják. Hazánk szempontjából a karbonmentes villamosenergia-termelés céljára két meghatározó irány mutatkozik. A hazai adottságok szem előtt tartásával az egyik irány a fotovoltaikus erőművek létesítése teljes országos területi lefedettséggel. Egy villamosenergia-rendszer megbízható működéséhez az alaperőművi, menetrendtartó és csúcserőmű funkciókat ellátó energia átalakító technológiák arányos rendelkezésre állása szükséges. Magyarország primer energiahordozókban szegény ország, ezért az alaperőművi funkciók ellátására kézenfekvő megoldás a nukleáris alapú villamosenergia-termelés hosszú távú fenntartása. A jelenleg hivatalos ütemezés szerint a kapacitás fenntartását szolgáló új blokkok 2029-ben és 2030-ban kezdik meg a termelésüket. A meglévő négy blokk rendre 2032-, 2033-, 2036-, és 2037-ig rendelkezik üzemelési engedéllyel. Az előzőekből kitűnik, hogy a hat blokk együttes üzemének kiszolgálására is fel kell készíteni a villamos átviteli hálózatot. A jelenlegi nukleáris alapú villamosenergia-termeléshez képesti növekmény biztonságos kiszállítást is meg kell oldani. Kézenfekvőnek látszik, hogy a legnagyobb megtermelt energiasűrűségű Paks körzetből a legnagyobb felhasználói energiasűrűségű Budapest körzetbe kell, hogy kerüljön a többlet energia. Ehhez egy új nyomvonalú kétrendszerű távvezetéktervez a beruházó, amely Paks körzet nagyszültségsű alállomások és Albertirsa 400 kV-os alállomás között teremt majd átviteli útvonalat.

A hazai villamosenergia-ellátás biztonsága szempontjából kiemelt fontosságú az átviteli hálózat – ezen belül a nukleáris alapon megtermelt teljes villamosenergia-mennyiség kiszállításához nélkülözhetetlen – rendszerelemek megbízhatósága.

Kidolgoztam egy új eljárást, amelyet a következőkben mutatok be. Az eljárás célja egy többszörösen hurkolt hálózat két végpontja között az átviteli megbízhatósági mutató előállítása. Az eljárás újszerűsége a hálózat leképzése egy összetett gráffá majd ennek egyszerűsítése és a megbízhatósági mutatók kiszámításának módja. Valójában üzembizonytalanságot számítok, de megbízhatóságot vizsgálok. Az eddigi gyakorlatban vagy a matematika tudomány oldalról vagy villamosmérnöki tudományos oldalról vizsgálták a gráfot illetve használták fel a gráfelméletet. Együtt a két tudományág illetve szakterület eddig még nem kezelte ilyen komplex módon. Az új eljárásrend matematikai és villamosmérnöki komplex gondolkodás eredményeként született, amelynek célja egy sajátos gráf modell felépítése, amely további speciális gráfműveletekkel alakítható számítási céljainknak megfelelő állapotokra.

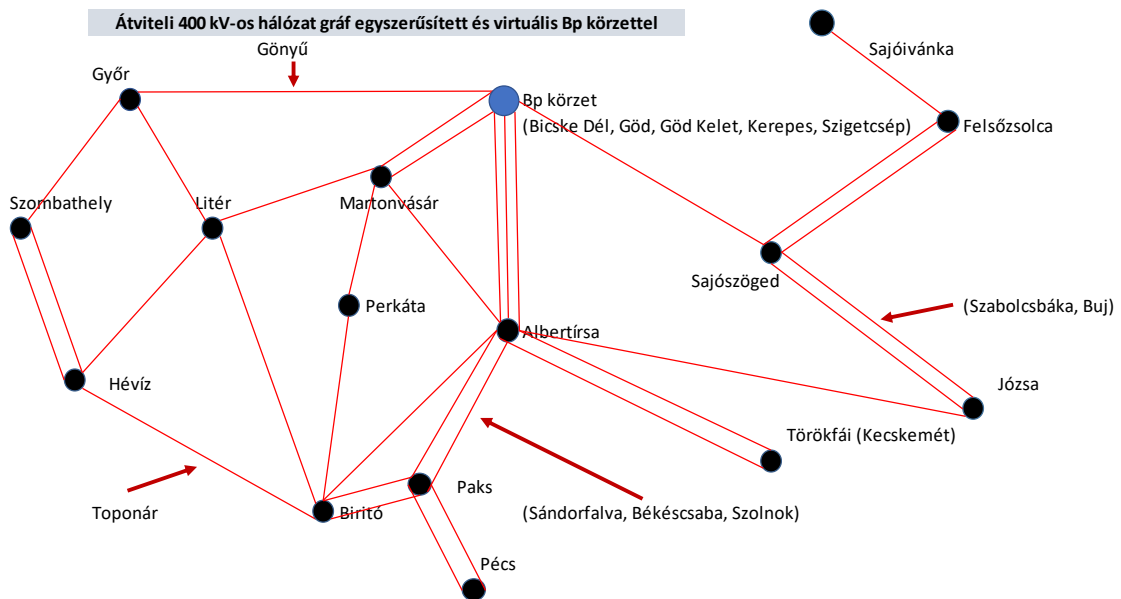
A hurkolt hálózat két pontja közötti átvitel megbízhatóságának számítására olyan új módszert dolgoztam ki, amely alkalmas arra, hogy 3 fázisú hurkolt hálózat 1 fázisú helyettesítő kapcsolásán alapuló gráfot minimális csomópontú gráffá egyszerűsítse. Újdonság a gráf egyszerűsítési eljárása. Ez az egyszerűsítés teszi lehetővé egy hurkolt hálózat megbízhatóság számítását újszerű módon. A gráfot olyan módon egyszerűsítem, hogy az összevonások megbízhatósági mutatóit ki tudjam számolni. Az új módszer megmutatja, hogy bonyolult hálózat két pontja között hogyan értelmezhető az üzembiztonság, illetve a gráf sérülései milyen hatással vannak a villamosenergia-átvitelre?

A gráf felépítése során fontos, a villamosságtanból ismert alapelv, amely szerint a teljes szimmetria miatt a soros és párhuzamos impedancia helyett fázis impedanciát használhatok. A háromfázisú rendszer egyfázisú helyettesítő kapcsolásának referencia pontját elhagyva, csak az átviteli ágakat használom fel a modell alkotásához.

A villamosság-tani és gráfelméleti megfontolásból, a csomópontok és ágak összevonásával keletkező, egyszerűsített - minimális számú csomópontot és ágot tartalmazó - gráf alkalmas arra is, hogy meghatározzam, mely ágak kiesésekor szűnik meg a villamosenergia-átvitel.

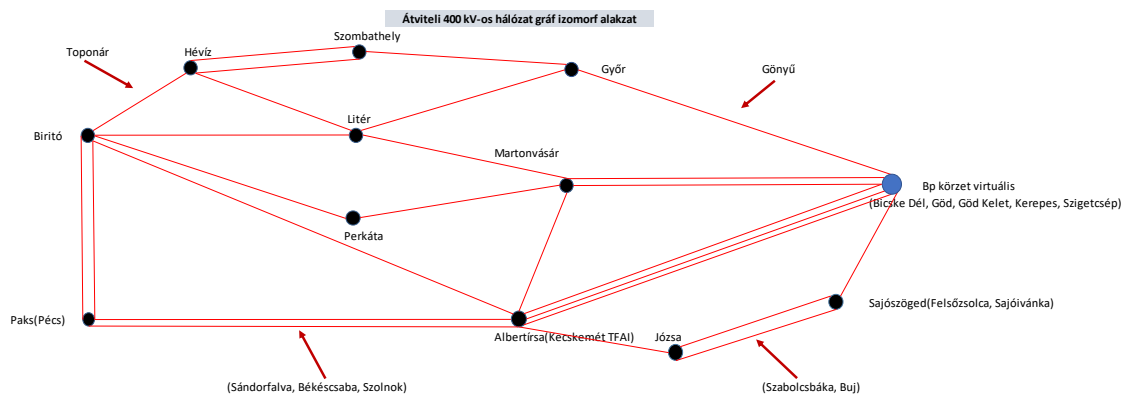
Az egyszerűsített, összevont csomópontokra és ágakra újszerűen meghatározott megbízhatósági mutatókat állítottam össze.





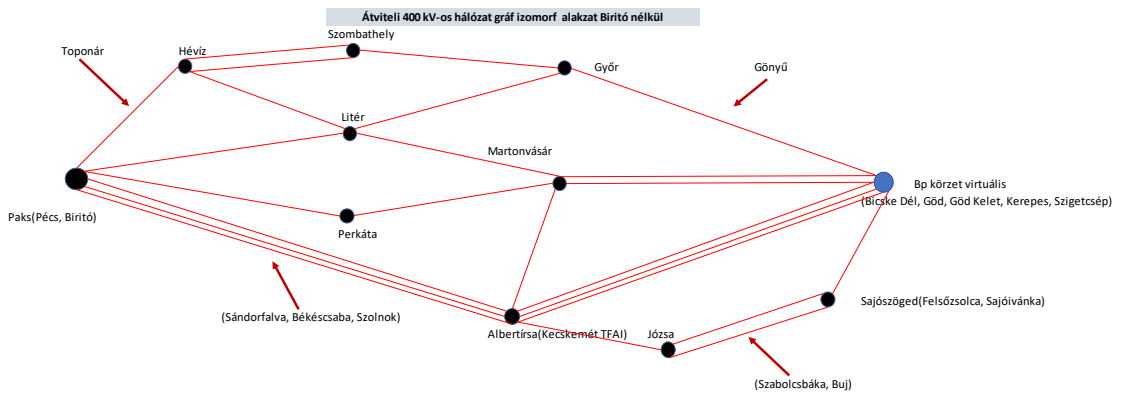
38. ábra A hazai 400 kV-os hálózati modell virtuális Budapest körzettel, tovább egyszerűsítve. (saját szerkesztés)

A sugaras ágak integrálásával létrejött a hurkolt hálózat izomorf gráfja. Ezzel együtt a gráf elrendezését 90 fokkal elfordítottam az óramutató járásával megegyező irányba, hogy az egyenes vágatok elkészítéséhez alkalmas helyzetbe hozzam.



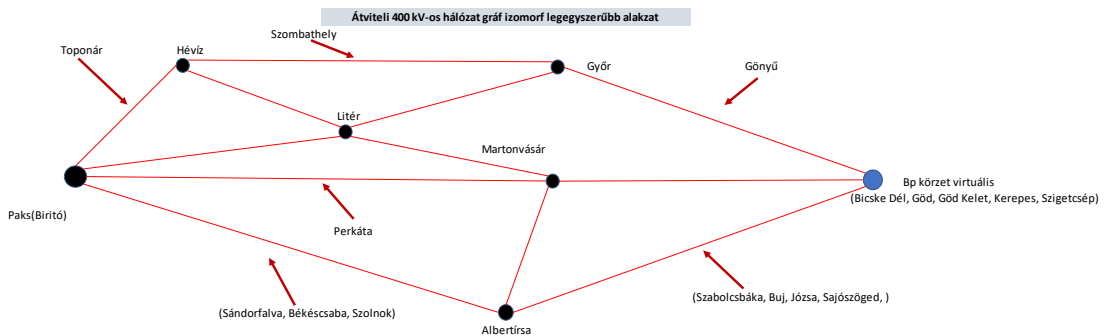
39. ábra A hazai 400 kV-os hurkolt hálózat izomorf gráfja. (saját szerkesztés)

A további egyszerűsítés jegyében Birtó, Pécs és Paks összevonásával létrehoztam a Paks virtuális körzetet, mint az energiaáramlás kiinduló pontját.



40. ábra A hazai 400 kV-os hurkolt hálózat izomorf gráfja Paks virtuális körzettel. (saját szerkesztés)

Az izomorf gráf legegyszerűbb alakjának kialakítását a párhuzamos ágak összevonásával folytattam, amely lehetővé tette, hogy az így létre jövő kétsarkú csomópontokat is a velük párhuzamosan elhelyezkedő, megmaradó hurok-ágakba egyesítsem. A számítások elvégzésére alkalmas modell nyilakkal jelölt feliratainak csak a beolvasztott hurokágakat tartalmazták a sugaras ágakat már nem. Ezzel lehetővé vált az üzemképtelenségi vágatok elkészítése és a megbízhatósági számítások elvégzése.



41. ábra: A hazai 400 kV-os hurkolt hálózat izomorf gráfjának legegyszerűbb alakja. (saját szerkesztés)

### 3.6 A minimalizált gráf ágainak üzembizonytalansága

A szabadvezeték 1 évre és 1 km-re eső üzembizonytalansága:

$$Q_{sz} = 4,11 \cdot 10^{-6} \text{ db/km/év}$$

A szabadvezeték egy megszakítóból két szakaszolóból és egy áramváltóból álló soros készülékpark csatlakoztatja a gyűjtősínhez.

E készülékpark üzembizonytalansága:

$$Q_k = Q_{megsz} + 2Q_{szak} + Q_{AV} = (166 + 2 \cdot 27 + 26)10^{-6} \text{ db/év}$$

$$Q_k = 246 \cdot 10^{-6} \text{ db/év}$$

Miután a legutóbbi tíz évben nem volt gyűjtősín meghibásodás, megbízhatóságát 1-nek veszem! Egyébként a 20 évre becsült üzembizonytalansági tényezője is kisebb mint a figyelembe vett nagyságrend 1 %-a, így a gyűjtősín üzembizonytalansága:

$$Q_{gy} = 0 \text{ db/év}$$

A távvezeték a szabadvezeték két végén lévő egy-egy készülékpark kapcsolja a gyűjtősínhez, így egy 1 km hosszúságú távvezeték üzembizonytalansága:

$$Q_t = l \cdot Q_{sz} + 2 \cdot Q_k \text{ db/év}$$

Miután a gyűjtősín üzembizonytalansága 0, így a távvezetékek soros, párhuzamos kapcsolása építi fel az egyszerűsített gráf ágát.

Ennek figyelembe vételével a 12 ág üzembizonytalansági tényezője:

A minimalizált gráf ágainak számozása alapján sorra veszem az ágakat, majd az összevonás lépéseit követve — azaz minden rész távvezeték üzembizonytalanságát alapul véve — a soros, ill. párhuzamos kapcsolás szabályainak megfelelően kiszámítom az ág üzembizonytalansági mutatóját.

A távvezetékek üzembizonytalansági mutatóit a következő táblázat tartalmazza:

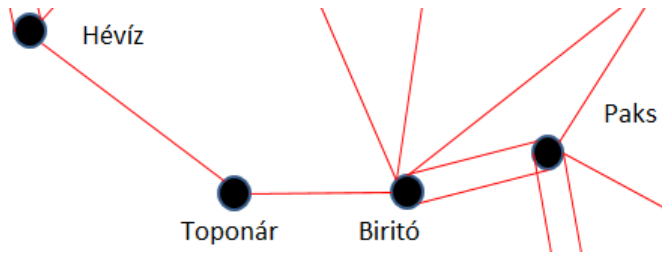
Távezeték indulási hely	Távezeték érkezési hely	Indító	Hossz (km)	Szabadvezeték üzembizonytalanság	Távezeték üzembizonytalanság
AISA B	GOD B	1	65	0,000268	0,000514
AISA B	KERP B	1	43	0,000175	0,000421
AISA B	TORF B	1	55	0,000226	0,000472
AISA B	TORF B	2	55	0,000226	0,000472
AISA B	MART B	1	67	0,000278	0,000524
AISA B	PAKS B1	1	144	0,000593	0,000839
AISA B	BIRT B	2	148	0,000609	0,000855
AISA B	SZICSB	1	53	0,000216	0,000462
AISA B	SZOL B	1	46	0,000190	0,000436



AISA B	JOZS B	1	168	0,000691	0,000937
BICSDB	GONYUB	1	108	0,000444	0,000690
BICSDB	MART B	1	25	0,000101	0,000347
BEKO B	SAFA B	1	92	0,000379	0,000625
BEKO B	SZOL B	1	113	0,000466	0,000712
PERK B	MART B	1	36	0,000150	0,000396
PERK B	BIRT B	1	56	0,000231	0,000477
FZSO B	SAJI B	1	29	0,000119	0,000365
FZSO B	SAJO B	1	25	0,000104	0,000350
FZSO B	SAJO B	2	25	0,000103	0,000349
GOD B	GKEL	1	2	0,000009	0,000255
GOD B	GKEL	2	2	0,000008	0,000254
KERP B	GKEL	1	22	0,000088	0,000334
GONYUB	GYOR B	1	15	0,000061	0,000307
GYOR B	LITR B	1	74	0,000306	0,000552
GYOR B	SZHO B	1	113	0,000464	0,000710
HEVI B	LITR B	1	90	0,000369	0,000615
HEVI B	SZHO B	1	78	0,000320	0,000566
HEVI B	SZHO B	2	78	0,000320	0,000566
HEVI B	TOPN B	1	104	0,000427	0,000673
LITR B	MART B	1	71	0,000293	0,000539
LITR B	BIRT B	1	93	0,000383	0,000629
MART B	SZICSB	1	20	0,000080	0,000326
PAKS B1	BIRT B	1	7	0,000027	0,000273
PAKS B1	BIRT B	2	4	0,000016	0,000262
PAKS B1	PECSOB	1	82	0,000336	0,000582
PAKS B1	PECSOB	2	82	0,000336	0,000582
PAKS B1	SAFA B	1	112	0,000462	0,000708
BIRT B	TOPN B	1	89	0,000365	0,000611
GKEL	SAJO B	1	145	0,000595	0,000841
SAJO B	JOZS B	1	58	0,000239	0,000485
SAJO B	BUJ B	1	55	0,000227	0,000473
JOZS B	BAKA K	1	81	0,000335	0,000581
BUJ B	BAKA K	1	44	0,000181	0,000427

8. táblázat A távvezetékek üzembizonytalansági mutatói. (saját szerkesztés)

### 1. ág üzembizonytalansága



42. ábra: 1. ág Paks körzet – Hévíz üzemképtelenségi vágat összetevői. (saját szerkesztés)

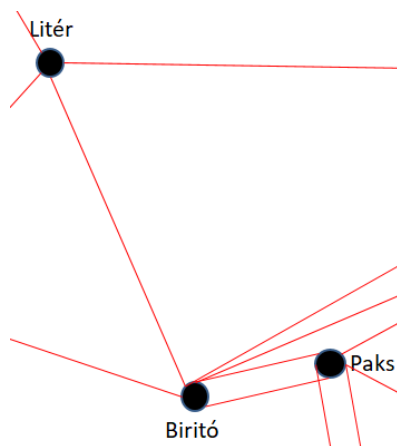
$$Q_1 = Q_{PAKS;HEVI}$$

$$Q_1 = Q_{PAKS;BIRT1} * Q_{PAKS;BIRT2} + Q_{BIRT;TOPN} + Q_{TOPN;HEVI}$$

$$Q_1 = 0,000273 * 0,000262 + 0,000611 + 0,000673$$

$$Q_1 = 0,001284$$

### 2. ág üzembizonytalansága



43. ábra: 2. ág Paks körzet – Litér üzemképtelenségi vágat összetevői. (saját szerkesztés)

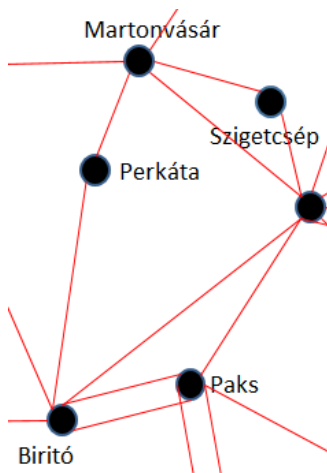
$$Q_2 = Q_{PAKS;LITR}$$

$$Q_2 = Q_{PAKS;BIRT1} * Q_{PAKS;BIRT2} + Q_{BIRI;LITR}$$

$$Q_2 = 0,000273 * 0,000262 + 0,000629$$

$$Q_2 = 0,000629$$

### 3. ág üzembizonytalansága



44. ábra: 3. ág Paks körzet – Martonvásár üzemképtelenségi vágat összetevői. (saját szerkesztés)

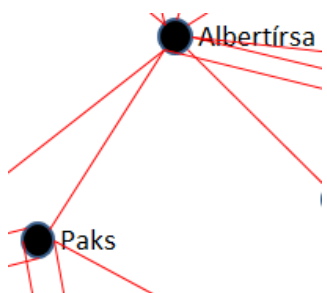
$$Q_3 = Q_{PAKS;MART}$$

$$Q_3 = Q_{PAKS;BIRT1} * Q_{PAKS;BIRI2} + Q_{BIRI;PERK} + Q_{PERK;MART}$$

$$Q_3 = 0,000273 * 0,000262 + 0,000477 + 0,000396$$

$$Q_3 = 0,000873$$

### 4. ág üzembizonytalansága



45. ábra: 4. ág Paks körzet – Albertirsa üzemképtelenségi vágat összetevői. (saját szerkesztés)

$$Q_4 = Q_{PAKS;AISA}$$

$$Q_4 = (Q_{PAKS;BIRT1} * Q_{PAKS;BIRI2} + Q_{BIRI;AISA}) * Q_{PAKS;AISA} * (Q_{PAKS;SAFA} + Q_{SAFA;BEKO} + Q_{BEKO;SZOL} + Q_{SZOL;AISA})$$

$$Q_4 = (0,000273 * 0,000262 + 0,000855) * 0,000839 * (0,000708 + 0,000625 + 0,000712 + 0,000436)$$

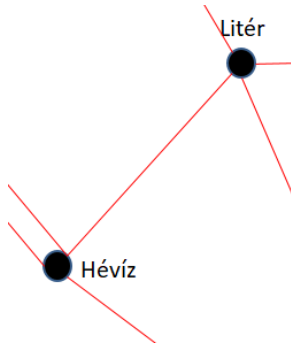
$$Q_4 = 0,000000001$$

#### MEGJEGYZÉS:

Az ágak üzembizonytalansági számításakor észlelhető, hogy a PAKS-BIRÍTÓ kétrendszerű távvezeték üzembizonytalansága a számításban — a három nagyságrenddel kisebb értéke miatt — elhanyagolható ezért indokolt a PAKS KÖRZET, mint PAKS és BIRÍTÓ egyesítése, mint ahogy az már a gráfban szerepel. Az ágak üzembizonytalansági

számításában szemléltetésként vettem figyelembe. Ezért a BUDAPEST KÖRZET-hez kapcsolódó ágak üzembizonytalanságának számításakor már csak a körzethez kapcsolódó ágak üzembizonytalanságát veszem figyelembe.

### 5. ág üzembizonytalansága

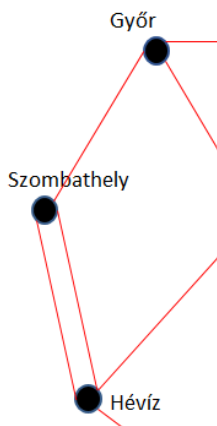


46. ábra: 5. ág Hévíz – Litér üzembizonytalansági vágat. (saját szerkesztés)

$$Q_5 = Q_{HEVI;LITR}$$

$$Q_5 = 0,000615$$

### 6. ág üzembizonytalansága



47. ábra: 6. ág Hévíz – Győr üzembizonytalansági vágat összetevői. (saját szerkesztés)

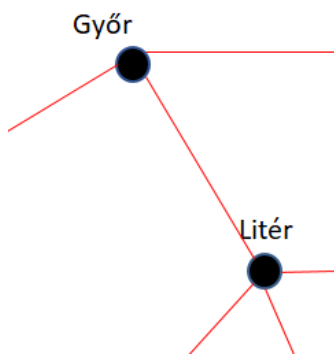
$$Q_6 = Q_{HEVI;GYOR}$$

$$Q_6 = Q_{HEVI;SZHO1} * Q_{HEVI;SZHO2} + Q_{SZHO;GYOR}$$

$$Q_6 = 0,000566 * 0,000566 + 0,000710$$

$$Q_6 = 0,000710$$

### 7. ág üzembizonytalansága

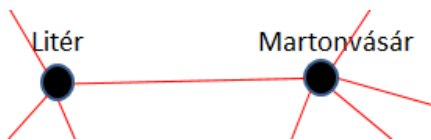


48. ábra:7. ág Litér - Győr üzembizonytalansági vágat. (saját szerkesztés)

$$Q_7 = Q_{LITR;GYOR}$$

$$Q_7 = 0,000552$$

### 8. ág üzembizonytalansága

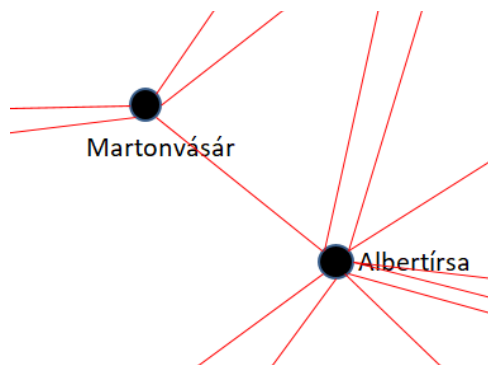


49. ábra:8. ág Litér - Martonvásár üzembizonytalansági vágat. (saját szerkesztés)

$$Q_8 = Q_{LITR;MART}$$

$$Q_8 = 0,000539$$

### 9. ág üzembizonytalansága

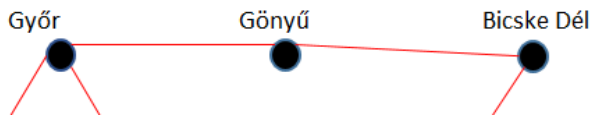


50. ábra:9. ág Albertírsa - Martonvásár üzembizonytalansági vágat. (saját szerkesztés)

$$Q_9 = Q_{AISA;MART}$$

$$Q_9 = 0,000524$$

### 10. ág üzembizonytalansága



51. ábra: 10. ág Győr – Budapest körzet üzembizonytalansági vágat összetevői. (saját szerkesztés)

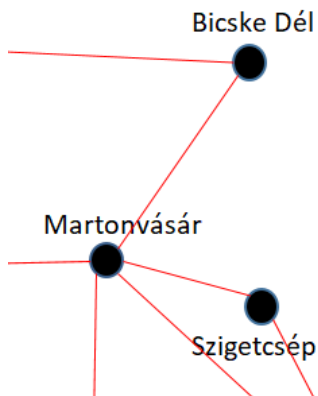
$$Q_{10} = Q_{GYOR;BPKR}$$

$$Q_{10} = Q_{GYOR;GONYU} + Q_{GONYU;BICSD}$$

$$Q_{10} = 0,000307 + 0,000690$$

$$Q_{10} = 0,000997$$

### 11. ág üzembizonytalansága



52. ábra: 11. ág Martonvásár – Budapest körzet üzembizonytalansági vágat. (saját szerkesztés)

$$Q_{11} = Q_{MART;BPKR}$$

$$Q_{11} = Q_{MART;BICSD} * Q_{MART;SZICS}$$

$$Q_{11} = 0,000347 * 0,000326$$

$$Q_{11} = 0,000000113$$

### 12. ág üzembizonytalansága



53. ábra: 12. ág Albertírsa – Budapest körzet üzembizonytalansági vágat összetevői. (saját szerkesztés)

$$Q_{12} = Q_{AISA;BPKR}$$

$$Q_{12} = Q_{AISA;SZICS} * Q_{AISA;GOD} * Q_{AISA;KERP} * [Q_{AISA;JOZS} + Q_{JOZS;SAJO} * (Q_{JOZS;BAKA} + Q_{BAKA;BUJ} + Q_{BUJ;SAJO}) + Q_{SAJO;GODK}]$$

$$Q_{12} = Q_{AISA;SZICS} * Q_{AISA;GOD} * Q_{AISA;KERP} * [Q_{AISA;JOZS} + Q_{JOZS;SAJO}^* + Q_{SAJO;GODK}]$$

$$Q_{JOZS;SAJO}^* = 0,000485 * (0,000581 + 0,000427 + 0,000473) = 0,718 * 10^{-6}$$

$$Q_{JOZS;SAJO}^* \sim 1 * 10^{-6}$$

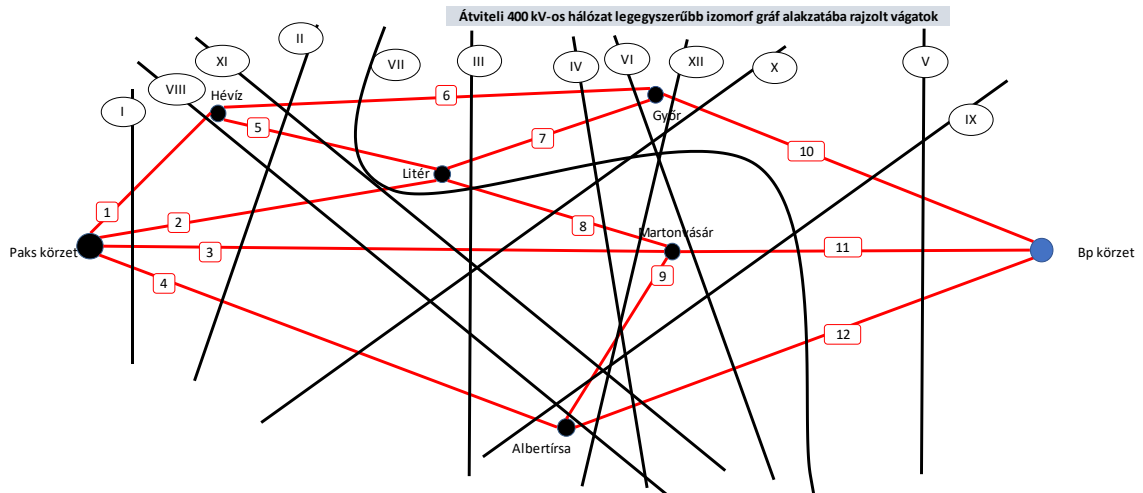
$$Q_{12} = 0,000462 * 0,000514 * 0,000421 * [0,000937 + 0,000001 + 0,000841]$$

$$Q_{12} = 0,000462 * 0,000514 * 0,000421 * 0,001779$$

$$Q_{12} = 0,1779 * 10^{-12}$$

### 3.7 A PAKS-körzet Budapest –körzet átvitel üzemképtelenségi vágatai

Az előzőekben létrehozott izomorf gráf legegyszerűbb alakja alkalmas arra is, hogy meghatározzam a minimális üzemképtelenségi vágatok számát. Az üzemképtelenségi vágat olyan módon metszi ketté a gráfot, hogy a vágattal egyidejűleg érintett ágak kiesésével a gráf két végpontja között megszakad a folytonosság, vagyis a villamos energia áramlása nem lehetséges. A legegyszerűbb állapotra hozott gráfba rajzolható összes üzemképtelenségi vágatot tartalmazza az 54. ábra. Az 54. ábrán nyomon követhető, hogy a VII vágat nem egyenes, de a gráf egy izomorf síkgráfján Litér és Martonvásár geometriai elrendezése lehetővé tenné a VII. üzemképtelenségi vágat berajzolhatóságát egyenes vonallal. Ezt jól példázza a 67. ábra.



54. ábra A hazai 400 kV-os átviteli hálózat legegyszerűbb izomorf gráf alakzatának összes üzemképtelenségi vágata. (saját szerkesztés)

#### 3.7.1 Az üzemképtelenségi vágat mátrix

Elkészítettem egy üzemképtelenségi vágat mátrixot annak ellenőrzésére, hogy az 54. ábrán található hazai 400 kV-os átviteli hálózat legegyszerűbb izomorf gráf alakzatának összes üzemképtelenségi vágatát berajzoltam és nincs ismételt vágat.

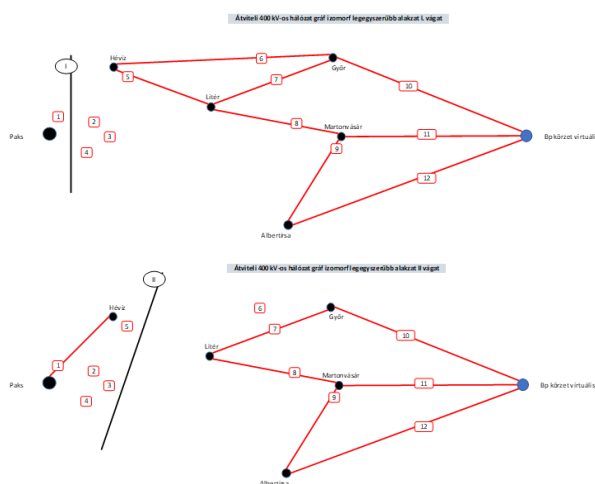


	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I	X	X	X	X								
II		X	X	X	X	X						
III			X	X		X	X	X				
IV			X			X	X	X	X			X
V										X	X	X
VI						X	X				X	X
VII		X			X	X		X			X	X
VIII	X	X	X						X			X
IX				X					X	X	X	
X			X	X				X		X		
XI		X	X		X	X			X			X
XII			X					X	X	X		X

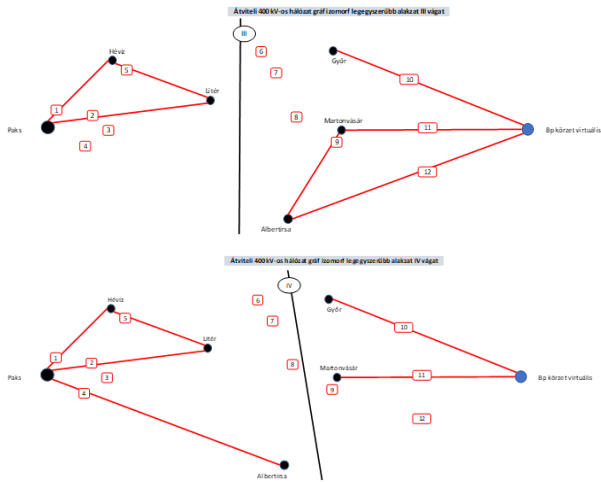
9. táblázat Az üzemképtelenségi vágatmátrix. (saját szerkesztés)

Az üzemképtelenségi vágatmátrix jó, mert nincs két azonos sora, és teljesíti Dr. Pálfi Judith sejtését, hogy a hazai 400 kV-os átviteli hálózat legegyszerűbb izomorf gráf alakzatának összes üzemképtelenségi vágatok száma a két kiválasztott csomópont (jelen esetben Paks körzet és Budapest körzet) fokszámainak szorzata. Egy csomópont fokszáma a hozzá kapcsolódó élek száma. Példámban Paks körzet fokszáma 4 Budapest körzet fokszáma 3, azaz az üzemképtelenségi vágatok száma 12, tehát a mátrixnak 12 különböző sora kell, hogy legyen.

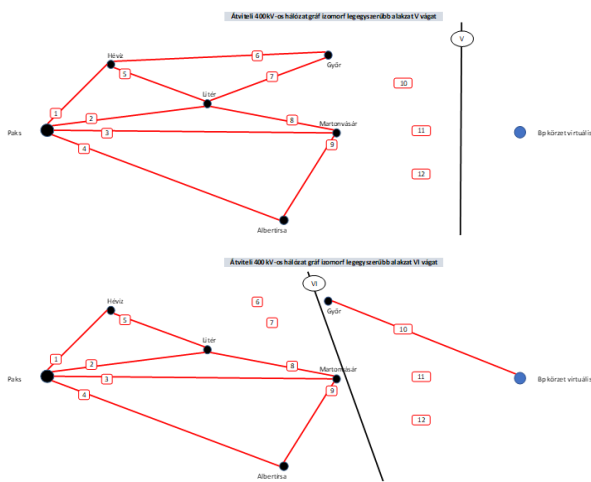
A szemléletesebb megjelenítés érdekében az üzemképtelenségi vágatok hatását és tényleges jelentését fogom érzékeltetni a következő „vágat” ábrákon.



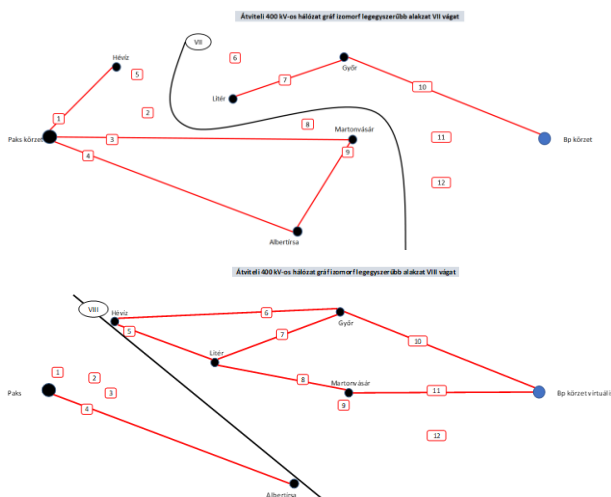
55. ábra A hazai 400 kV-os átviteli hálózat legegyszerűbb izomorf gráf alakzatának I. és II. számú vágata. (saját szerkesztés)



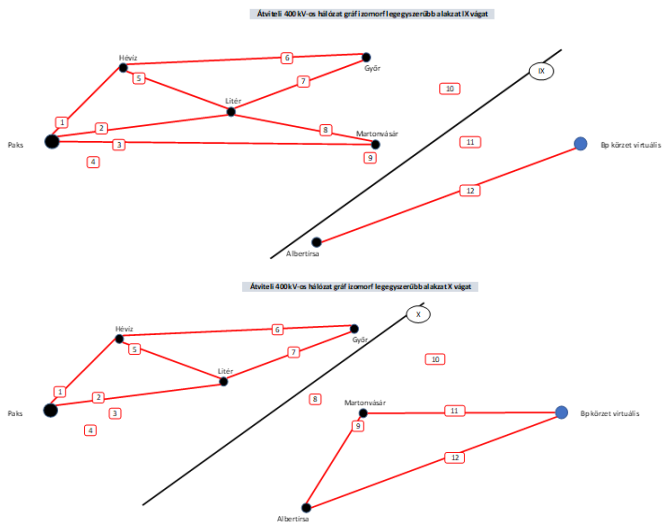
56. ábra: A hazai 400 kV-os átviteli hálózat legegyszerűbb izomorf gráf alakzatának III. és IV. számú vágata. (saját szerkesztés)



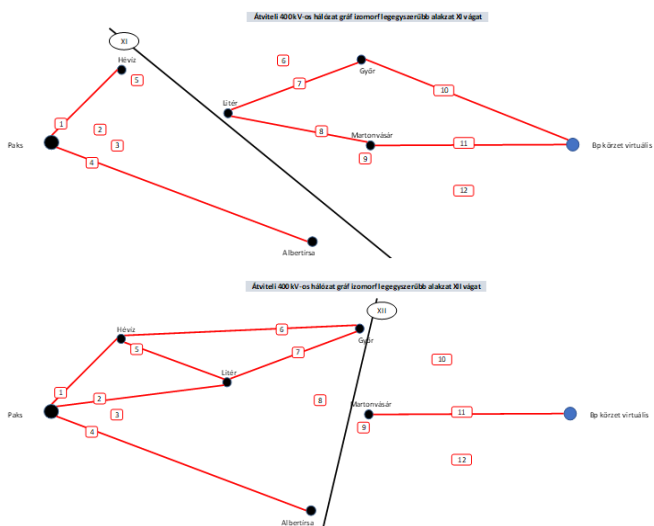
57. ábra: A hazai 400 kV-os átviteli hálózat legegyszerűbb izomorf gráf alakzatának V. és VI. számú vágata. (saját szerkesztés)



58. ábra: A hazai 400 kV-os átviteli hálózat legegyszerűbb izomorf gráf alakzatának VII. és VIII. számú vágata. (saját szerkesztés)



59. ábra: A hazai 400 kV-os átviteli hálózat legegyszerűbb izomorf gráf alakzatának IX. és X. számú vágata. (saját szerkesztés)



60. ábra: A hazai 400 kV-os átviteli hálózat legegyszerűbb izomorf gráf alakzatának XI. és XII. számú vágata. (saját szerkesztés)

### 3.7.2 Az üzemképtelenségi vágatok üzembizonytalanságának számítása

$(Q_{i;\text{vágat}})$  számítása, példánkban  $i = 1 \dots 12$

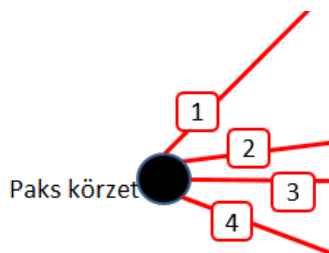
Ha az  $i$ -edik vágatban  $k$  db. ág van, és a  $j$ . ág üzembizonytalansága  $Q_j$  akkor az  $i$ -edik vágat üzembizonytalansága:

$$Q_{i;\text{vágat}} = \prod_{j=1}^k Q_j.$$

ág sorszám	ág üzembizonytalanság
1	0,001284
2	0,000629
3	0,000997
4	0,000000001
5	0,000615
6	0,000710
7	0,000552
8	0,000539
9	0,000524
10	0,000997
11	0,000000113
12	$0,1779 * 10^{-12}$

10. táblázat Az ágak üzembizonytalansága. (saját szerkesztés)

#### I. üzemképtelenségi vágat üzembizonytalansága



61. ábra Az I. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzatból. (saját szerkesztés)

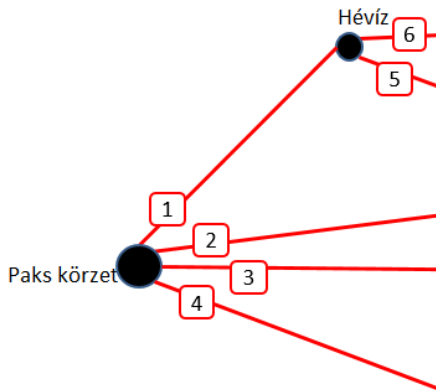
$$Q_I = Q_1 * Q_2 * Q_3 * Q_4$$

$$Q_I = 0,001284 * 0,000629 * 0,000997 * 0,000000001$$

$$Q_I = 1,284 * 0,629 * 0,997 * 1 * 10^{-18}$$

$$Q_I = 0,805 * 10^{-18}$$

## II. üzemképtelenségi vágat üzembizonytalansága



62. ábra A II. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzatból. (saját szerkesztés)

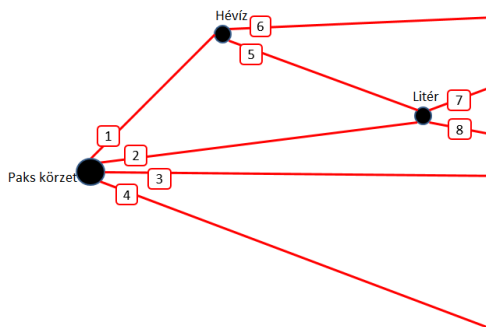
$$Q_{II} = Q_2 * Q_3 * Q_4 * Q_5 * Q_6$$

$$Q_{II} = 0,000629 * 0,000997 * 0,000000001 * 0,000615 * 0,000710$$

$$Q_{II} = 0,629 * 0,997 * 0,000001 * 0,615 * 0,710 * 10^{-15}$$

$$Q_{II} = 2,73 * 10^{-22}$$

## III. üzemképtelenségi vágat üzembizonytalansága



63. ábra A III. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzatból. (saját szerkesztés)

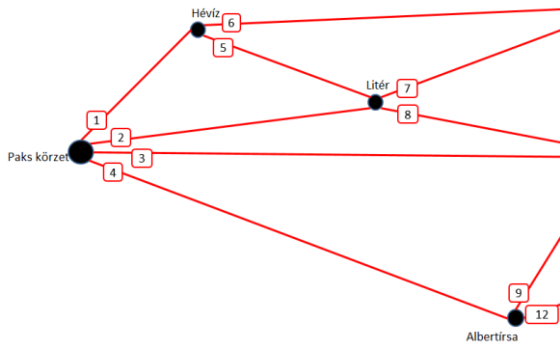
$$Q_{III} = Q_3 * Q_4 * Q_6 * Q_7 * Q_8$$

$$Q_{III} = 0,000997 * 0,000000001 * 0,000710 * 0,000552 * 0,000539$$

$$Q_{III} = 0,997 * 0,000001 * 0,710 * 0,552 * 0,539 * 10^{-15}$$

$$Q_{III} = 2,1 * 10^{-22}$$

#### IV. üzemképteléségi vágat üzembizonytalansága



64. ábra A IV. üzemképteléségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzatból. (saját szerkesztés)

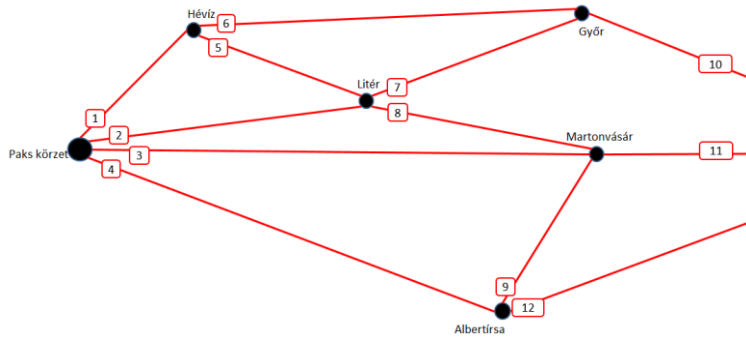
$$Q_{IV} = Q_6 * Q_7 * Q_8 * Q_9 * Q_{12}$$

$$Q_{IV} = 0,000710 * 0,000552 * 0,000539 * 0,000524 * 0,1779 * 10^{-12}$$

$$Q_{IV} = 0,710 * 0,552 * 0,539 * 0,524 * 0,1779 * 10^{-24}$$

$$Q_{IV} = 1,97 * 10^{-26}$$

#### V. üzemképteléségi vágat üzembizonytalansága



65. ábra Az V. üzemképteléségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzatból. (saját szerkesztés)

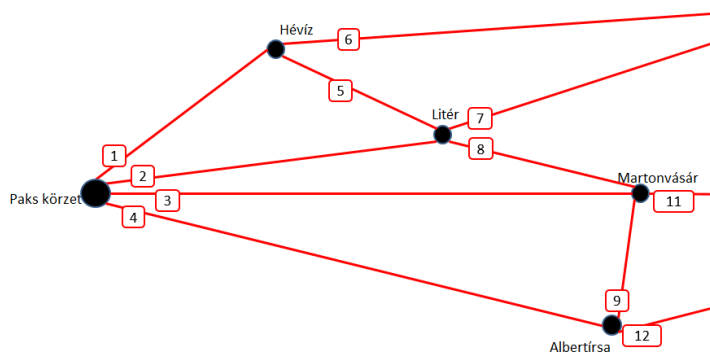
$$Q_V = Q_{10} * Q_{11} * Q_{12}$$

$$Q_V = 0,000997 * 0,000000113 * 0,1779 * 10^{-12}$$

$$Q_V = 0,997 * 0,113 * 0,1779 * 10^{-21}$$

$$Q_V = 1,97 * 10^{-23}$$

## VI. üzemképtelenségi vágat üzembizonytalansága



66. ábra A VI. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzatból. (saját szerkesztés)

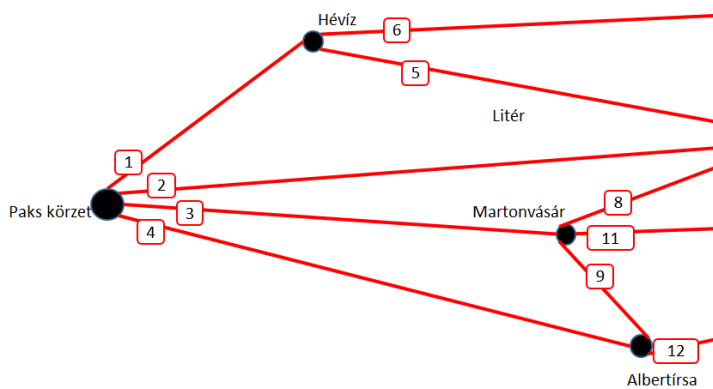
$$Q_{VI} = Q_6 * Q_7 * Q_{11} * Q_{12}$$

$$Q_{VI} = 0,000710 * 0,000552 * 0,000000113 * 0,1779 * 10^{-12}$$

$$Q_{VI} = 0,710 * 0,552 * 0,113 * 0,1779 * 10^{-24}$$

$$Q_{VI} = 0,8 * 10^{-26}$$

## VII. üzemképtelenségi vágat üzembizonytalansága



67. ábra A VII. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzatból. (saját szerkesztés)

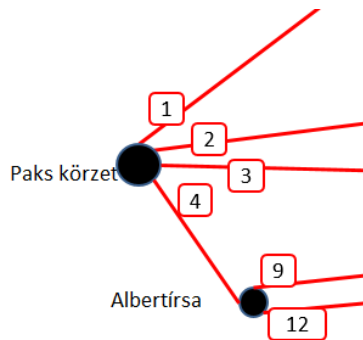
$$Q_{VII} = Q_2 * Q_5 * Q_6 * Q_8 * Q_{11} * Q_{12}$$

$$Q_{VII} = 0,000629 * 0,000615 * 0,000710 * 0,000539 * 0,113 * 10^{-6} * 0,1779 * 10^{-12}$$

$$Q_{VII} = 0,629 * 0,615 * 0,710 * 0,539 * 0,113 * 0,1779 * 10^{-30}$$

$$Q_{VII} = 0,3 * 10^{-32}$$

### VIII. üzemképtelenségi vágat üzembizonytalansága



68. ábra A VIII. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzatból. (saját szerkesztés)

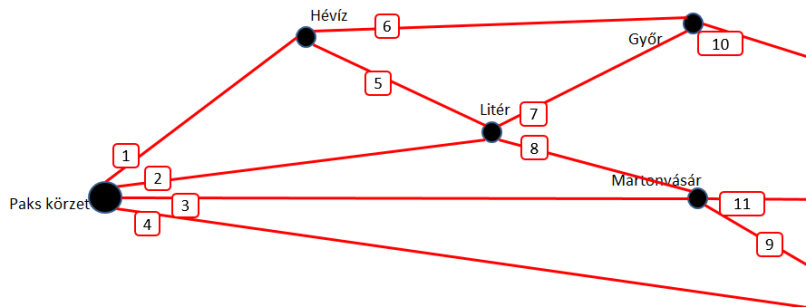
$$Q_{VIII} = Q_1 * Q_2 * Q_3 * Q_9 * Q_{12}$$

$$Q_{VIII} = 0,001284 * 0,000629 * 0,000997 * 0,000524 * 0,1779 * 10^{-12}$$

$$Q_{VIII} = 1,284 * 0,629 * 0,997 * 0,524 * 0,1779 * 10^{-24}$$

$$Q_{VIII} = 7,5 * 10^{-26}$$

### IX. üzemképtelenségi vágat üzembizonytalansága



69. ábra A IX. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzatból. (saját szerkesztés)

$$Q_{IX} = Q_4 * Q_9 * Q_{10} * Q_{11}$$

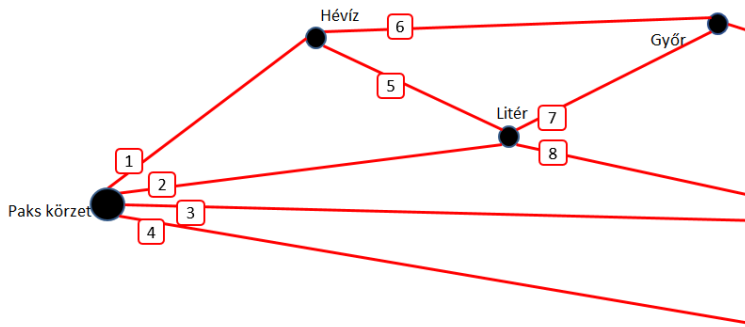
$$Q_{IX} = 0,000000001 * 0,000524 * 0,000997 * 0,000000113$$

$$Q_{IX} = 1 * 0,524 * 0,997 * 0,113 * 10^{-21}$$

$$Q_{IX} = 0,59 * 10^{-22}$$



### X. üzemképtelenségi vágat üzembizonytalansága



70. ábra A X. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzatból. (saját szerkesztés)

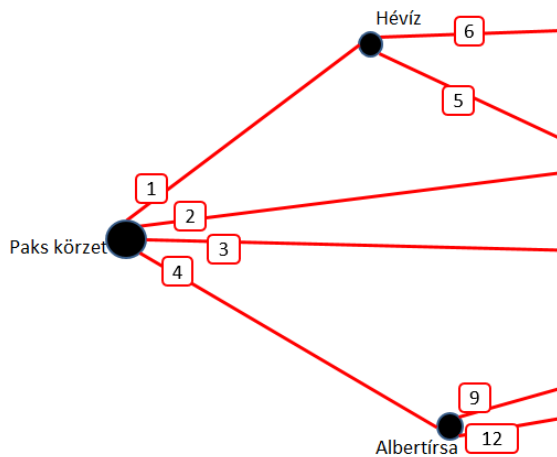
$$Q_X = Q_3 * Q_4 * Q_8 * Q_{10}$$

$$Q_X = 0,000997 * 0,000000001 * 0,000539 * 0,000997$$

$$Q_X = 0,997 * 1 * 0,539 * 0,997 * 10^{-15}$$

$$Q_X = 0,59 * 10^{-22}$$

### XI. üzemképtelenségi vágat üzembizonytalansága



71. ábra A XI. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzatból. (saját szerkesztés)

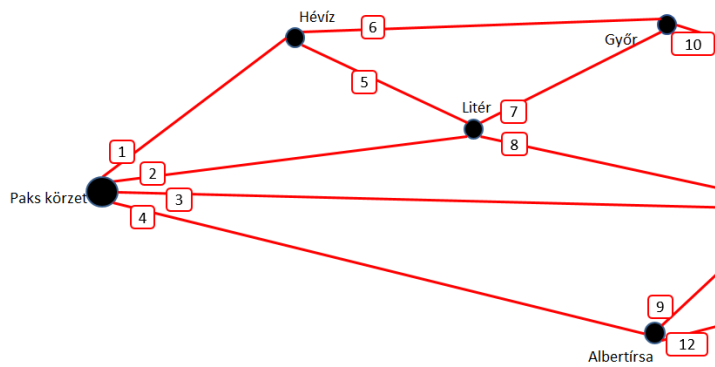
$$Q_{XI} = Q_2 * Q_3 * Q_6 * Q_7 * Q_9 * Q_{12}$$

$$Q_{XI} = 0,000629 * 0,000997 * 0,000710 * 0,000552 * 0,000524 * 0,1779 * 10^{-12}$$

$$Q_{XI} = 0,629 * 0,997 * 0,710 * 0,552 * 0,524 * 0,1779 * 10^{-27}$$

$$Q_{XI} = 2,3 * 10^{-29}$$

## XII. üzemképtelenségi vágat üzembizonytalansága



72. ábra A XII. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzatból. (saját szerkesztés)

$$Q_{XII} = Q_3 * Q_8 * Q_9 * Q_{10} * Q_{12}$$

$$Q_{XII} = 0,000997 * 0,000539 * 0,000524 * 0,000997 * 0,1779 * 10^{-12}$$

$$Q_{XII} = 0,997 * 0,539 * 0,524 * 0,997 * 0,1779 * 10^{-24}$$

$$Q_{XII} = 5 * 10^{-26}$$

### 3.8 A PAKS-körzet Budapest –körzet átvitel üzembizonytalanság számítás

#### A vágatok üzembizonytalansága $Q_j$

$$Q_{\text{átvitel}} = \sum_{j=1}^{12} Q_j$$

$$Q_{PAKS;BPKR} = 0,805 * 10^{-18} + 2,73 * 10^{-22} + 2,1 * 10^{-22} + 1,97 * 10^{-26} + 1,97 * 10^{-23} + 0,8 * 10^{-26} + 0,3 * 10^{-32} + 7,5 * 10^{-26} + 0,59 * 10^{-22} + 0,59 * 10^{-22} + 2,3 * 10^{-29} + 5 * 10^{-26}$$

$$Q_{\text{ÁTVITEL}} = 0,805 * 10^{-18}$$

#### KONKLÚZIÓ

Az átvitel megbízhatóságát az első vágat határozza meg:

$$R_{PAKS;BPKR} = 1 - Q_{PAKS;BPKR}$$

Az átvitel megbízhatósága az egyes helyiértéken levő 0-át követő 18 db 9-est tartalmazó szám.

A kapott eredmény igazolta a megbízhatóság, vagyis az üzembiztonság komplementereként újszerűen bevezetett üzembizonytalanság fogalom bevezetését. A Paks – Budapest körzet átvitel üzembizonytalansági mutatójának 0,00000000000000000000805 értékének bármilyen irányú esetleges változása egyértelműen érzékelhető különbséget eredményez szemben a megbízhatóság 0,99999999999999999999 értékével.

#### A tézishez vezető út

Kidolgoztam egy új eljárást, amelynek célja egy többszörösen hurkolt hálózat két végpontja között az átviteli megbízhatósági mutató előállítását. Az eljárás újszerűsége a hálózat leképzése egy összetett gráffá majd ennek egyszerűsítése és a megbízhatósági mutatók kiszámításának módja. Valójában üzembizonytalanságot számítok, de megbízhatóságot vizsgálok. Az eddigi gyakorlatban vagy a matematika tudomány oldalról vagy villamosmérnöki tudományos oldalról vizsgálták a gráfot illetve használták

fel a gráfelméletet. Együtt a két tudományág illetve szakterület eddig még nem kezelte ilyen komplex módon. Az új eljárásrend matematikai és villamosmérnöki komplex gondolkodás eredményeként született, amelynek célja egy sajátos gráf modell felépítése, amely további speciális gráfműveletekkel alakítható számítási céljainknak megfelelő állapotokra.

A hurkolt hálózat két pontja közötti átvitel megbízhatóságának számítására olyan új módszert dolgoztam ki, amely alkalmas arra, hogy 3 fázisú hurkolt hálózat 1 fázisú helyettesítő kapcsolásán alapuló gráfot minimális csomópontú gráffá egyszerűsítse. Újdonság a gráf egyszerűsítési eljárása. Ez az egyszerűsítés teszi lehetővé egy hurkolt hálózat megbízhatóság számítását újszerű módon. A gráfot olyan módon egyszerűsíttem, hogy az összevonások megbízhatósági mutatóit ki tudjam számolni. Az új módszer megmutatja, hogy bonyolult hálózat két pontja között hogyan értelmezhető az üzembiztonság, illetve a gráf sérülései milyen hatással vannak a villamosenergia-átvitelre.

A gráf felépítése során fontos, a villamosságtanból ismert alapelv, amely szerint a teljes szimmetria miatt az ön és kölcsönös impedancia helyett fázis impedanciát használhatok. A háromfázisú rendszer egyfázisú helyettesítő kapcsolásának referencia pontját elhagyva, csak az átviteli ágakat használom fel a modell alkotáshoz.

A villamosságtani és gráfelméleti megfontolásból, a csomópontok és ágak összevonásával keletkező, egyszerűsített — minimális számú csomópontot és ágat tartalmazó — gráf alkalmas arra is, hogy meghatározzam, mely ágak kiesésekor szűnik meg a villamosenergia-átvitel.

Az egyszerűsített, összevont csomópontokra és ágakra újszerűen meghatározott üzembizonytalansági mutatókat állítottam össze, segítségével meghatároztam az átvitel megbízhatóságát.

A 2. tézis

Villamos és matematikai megfontolások alapján új módszert dolgoztam ki a hazai 400 kV-os nagyfeszültségű hurkolt hálózat gráfjának egyszerűsítésére, amelyen véges számú üzembizonytalansági vágatokkal meg lehet határozni az átvitel üzembizonytalanságát, megbízhatóságát [MF1] [MF3] [MF5] [MF8] [MF9] [MF10] [MF11] [MF12] [MF15] [MF16].

## **4 A HAZAI ÁTVITELI HÁLÓZAT SZABÁLYOZÁSI TARTALÉKIGÉNYÉNEK VIZSGÁLATA A RENDSZERBIZTONSÁG FENNTARTHATÓSÁG SZEMPONTJÁBÓL**

A hazai energiastratégia kiemelt célkitűzése, hogy az Európai Unió klímavédelmi intézkedéseire igazodva biztosítsa a nukleáris alapú villamos energia kapacitás fenntartását valamint elősegítse az új megújuló energiaforrások minél magasabb arányú térnyerését a villamosenergia-termelésben. A hazai földrajzi adottságokat figyelembe véve a megújuló bázisú villamosenergia termelés bővülése a fotovoltaikus erőművek további gyarapodását jelenti. [48]

Ahhoz, hogy a kormányzati szándékok teljesülhessenek, megoldást kell találni azokra a műszaki jellegű kihívásokra, amelyek az időjárásfüggő megújuló és az alaperőművi feladatokat ellátó atomerőmű együttes termelése mellett jelentkeznek.

Azért is kiemelt feladat az ezzel való foglalkozás, mert nemcsak a széles közvélemény, de még az energetikában jártas szakemberek ismeretei is hiányosak ezen a téren.

Az időjárásfüggő termelés térnyerésével arányosan kell növelni a szabályozási tartalék kapacitások mennyiségét is. Ez elkerülhetetlen intézkedés a véletlenszerű termelési karakterisztikát produkáló fotovoltaikus technológiák villamosenergia-rendszerbe integrálásához. Ezzel együtt jelentős hálózatfejlesztési igénnyel is találkozunk a decentralizált termelésre való átállás folyamatában.

A rugalmas rendszerszintű kapacitások fejlesztése mellett szól az is, hogy a villamosenergia rendszerben üzemelő legnagyobb blokk méretével megegyező összes tartalék kapacitásnak rendelkezésre kell állni a legnagyobb egységteljesítmény kiesése esetén, annak rövid időn belüli pótlására. Ezt a legnagyobb blokk teljesítményt jelenleg a paksi atomerőmű egy blokkjához kell igazítani, azonban a hivatalos ütemezés szerint, 2029 – től tervezetten a Paks II egy blokkjának mérete lesz az irányadó tartalék teljesítmény igény ebből a szempontból.

Az értekezés ezen fejezetében, a fentiekben említett újonnan megjelenő feladatok vizsgálatát tűztem ki magam elé. Bemutatom a probléma egyértelmű, azonosítását szolgáló elemzési eljárásokat.

Célként fogalmaztam meg annak vizsgálatát, hogy az előttünk álló évtizedekben várható energiaátmenetben tervezett technológiák, úgymint a meglévő és megépítendő atomerőművek valamint a fotovoltaikus kapacitásbővülés maximális teljesítmény kihasználás mellett üzemelhessenek. Ez akkor teljesülhet, ha kikapcsolások és visszatérhelések nélkül minden karbonmentesen megtermelhető villamos energiát hasznosítani tudunk. Ez nem csak klímavédelmi célokat szolgál, hanem az erőművi beruházások tervezett megtérülése is így biztosítható.

Az értekezés terjedelmi korlátai a problémakör egy aspektusának vizsgálatát teszik lehetővé.

#### **4.1 A frekvencia stabilitásának rendszerszintű biztosítása**

Az előrevetített műszaki jellegű problémák megértéséhez a villamosenergia-ellátással szemben támasztott fő műszaki követelmények ismerete szükséges. Ezeknek négy alapvető besorolása létezik. Mennyiségi, a minőségi, a megbízhatósági és a szolgáltatásba kapcsolhatóság lehetősége.

A terjedelmi korlátok miatt a következő elemzések során a minőségi kategóriába sorolható hálózati frekvencia állandó értéken tartására szorítkoztam. Az állandó érték ebben az értelmezésben egy szűk frekvencia tartományon belül tartást jelent.

Az összekapcsolt, tehát együtt járó villamosenergia-rendszerek azonos frekvencián, tehát egymással szinkronban üzemelnek. A hazai ellátó rendszernek az európai villamosenergia-rendszer részeként kell szolgáltatni a szinkron frekvencián biztosítható energia áramokat. A hálózati frekvencia megtartásához a rendszerben jelentkező energia igényt minden időpillanatban tudni kell biztosítani az energia betáplálási oldalról.

Amennyiben a rendszerben energia hiány keletkezik ez a frekvencia csökkenéséhez vezet. A rendszer szinten jelentkező energia többlet emeli a frekvenciát. A hálózati frekvencia minden időpillanatban történő pontos megtartása az úgynevezett rendszer dinamikus egyensúlytartás a rendszerirányító feladata, amely folyamatos kontrollt és beavatkozások sorozatát jelenti.

#### **4.2 A forrásoldal és a fogyasztói oldal közötti rendszerszintű teljesítmény-egyensúly vesztese**

A matematikai valószínűségelméleti folyamat segítségével vizsgáltam az egymástól független tényezőket, amelyek különböző hatások előidézői. A rendszer

egyensúlyvesztéshez vezető folyamatok függvényei is különböznek egymástól, úgymint diszkrét valószínűségi eloszlások, eloszlásfüggvények és p-kvantilisek.

A következőkben azt vizsgálom, hogy a rendszer egyensúly megbomlásához vezető betáplálás és fogyasztói igények adott pillanatban való eltéréseinek milyen kiváltó okai lehetnek.

#### **4.2.1 Fogyasztói igények véletlenszerű változása**

A rendszerszintű fogyasztói teljesítmény-igények minden időpillanatra történő sztochasztikus azaz véletlenszerű változása és ennek a forrásoldali követéséből adódó eltérések okozzák az egyensúlyi állapot elvesztését. Ezen rendszerszintű egyensúlyzavarok oka az, hogy a forrásoldalon nem áll rendelkezésre pontos, valós idejű adat a rendszerszintű energia igények pillanatnyi változásáról. A forrásoldal mindig csak a már bekövetkezett eltérések alapján képes a terhelési igény követésére. Ebből az következik, hogy ezen okokból bekövetkező egyensúlyzavarok az adott idő tartományban teljesen véletlenszerűen alakuló fogyasztói igények egyaránt okozhatnak energia többletet, illetve hiányt a rendszerben. Ennek a kijelentésnek nem mond ellen az, hogy jellemző időszakokban, például a reggeli csúcsidezőszak alatti teljesítményigény-növekedés a teljesítményhiányt okozó eltérések okozója, amíg a jellemzően teljesítményigény-csökkenéssel járó időszakokban, például az esti csúcsidezőszakot követően a teljesítmény-többletet előidéző eltérésekkel találkozhatunk. Egy teljes időperiódust vizsgálva, akár egy naptári napra gondolok, a pozitív és a negatív irányú eltérések kiegyenlítik egymást. Természetesen ez akkor igaz, ha a nagyobb periódusú időszakban, jelesül egy naptári hét folyamán a napi energiateljesítmény felhasználás jellege nem változik meg drasztikusan.

#### **4.2.2 Forrásoldali véletlenszerű teljesítményvesztés, ami az energiatermelő egységek véletlenszerű meghibásodásának a következménye**

A forrásoldalon betáplált teljesítmény hirtelen csökkenését idézheti elő egy villamosenergia-termelő létesítmény részleges, vagy teljes teljesítmény termelés kimaradása, illetve hálózati kapcsolatának elvesztése. Ezen véletlenszerű változás a rendszert alkotó elemek, például erőművek, távvezeték szakaszok, hálózati csomópontok

rendszerszintű megbízhatóságával függ össze. A rendszerszintű teljesítmény-egyensúly elvesztését ebben az esetben a forrásoldali teljesítmény hiány okozza. Ilyen helyzetben a rendszerirányító feladata a kiesett teljesítmény pótlása.

#### **4.2.3 Az időjárásfüggő villamosenergia-termelő egységek véletlenszerű teljesítmény-betáplálása**

Az időjárásfüggő megújuló energia alapú villamosenergia-termelő erőművekre jellemző, hogy az általuk megtermelt és a hálózatra táplált villamos energia mennyisége véletlenszerűen alakul. Ez a jelenség is komoly kockázatot jelent a rendszerszintű teljesítmény-egyensúly biztosítása szempontjából. Az új megújuló energiaforrások véletlenszerű energiatermelése által okozott hálózat stabilitási problémát ma még nem ismeri a lakosság, de a műszaki részletekkel - az energetikával foglalkozó szakemberek közül is - csak kevesen találkoztak.

A rendszerirányítás számára ez a probléma nap, mint nap menetrendezési nehézségeket jelent. A menetrendezési bizonytalanságokból adódó egyensúlybomlások, a villamosenergia-termelés előre jelzésének hibáiból adódnak. Ezzel megérkeztem a rendszerszintű egyensúly bomlások harmadik csoportjához, amelynek felelősei az időjárásfüggő megújuló bázisú villamosenergia-termelő erőművek. Menetrendezési hibák a hagyományos technológiák körében is előfordulhatnak, azonban a szabályozható és irányítható energiatermelő egységek esetében ezek valószínűsége jelentősen kisebb. Ezen technológiák esetében is előfordulhat menetrendezési hibából eredő eltérés.

A betáplálás és a fogyasztói igények közötti rendszerszintű dinamikus teljesítmény-egyensúly biztosítása a rendszerszintű szabályozási célú tartalék kapacitások igénybe vételével történhet.

#### **4.2.4 A rendszerszintű szabályozási célú tartalék kapacitások új definíciói**

A frekvencia- és teljesítményszabályozással összefüggő, jelen vizsgálat szempontjából releváns kérdésekkel, a különböző funkciójú, szabályozási célú tartalék kapacitásokkal kapcsolatos kérdéseket a Guideline on Electricity Transmission System Operation (továbbiakban GL TSO) [63] tartalmazza. A témakört eredetileg a Network Code on Load Frequency Control and Reserves (NC LFC&R) üzemi és kereskedelmi szabályzat



tárgyalta. Jelenleg a két anyag összevonásából keletkezett iránymutatásokat veszik alapul az energetika szakma képviselői.

A 11. táblázat tartalmazza a GL TSO által meghatározott, a korábban alkalmazott terminológiákhoz képest új megnevezéseket és azok magyarázatait.

Rövidítés	MEGNEVEZÉS
FCR	Frequency Containment Reserves (Frekvencia Megtartó Tartalék Kapacitás)
FRR	Frequency Restoration Reserves (Frekvencia Helyreállító Tartalék Kapacitás)
aFRR	Automatic Frequency Restoration Reserves (Automatikus Frekvencia Helyreállító Tartalék Kapacitás)
mFRR	Manual Frequency Restoration Reserves (Kézi vezérlésű Frekvencia Helyreállító Tartalék Kapacitás)
RR	Replacement Reserves (Helyettesítő Tartalék Kapacitás)

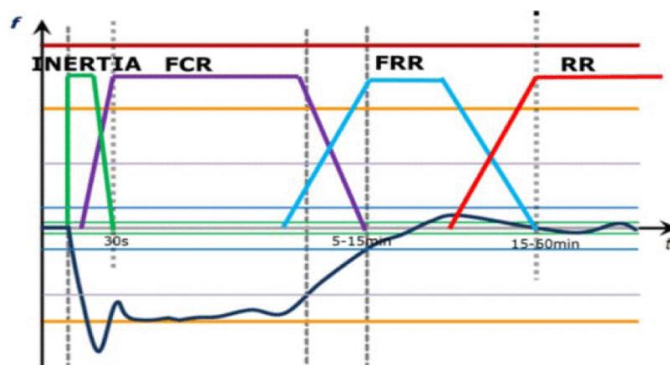
11. táblázat A szabályozási célú tartalék kapacitások új besorolási rendszere. (saját szerkesztés) [64]

Jelen vizsgálat keretében a terjedelmi korlátok miatt, nincs mód a táblázatban szereplő fogalmak tartalmának, illetve a szabályozás módozatok részletes ismertetésére.

A rendszerszintű teljesítmény- és frekvenciaszabályozás rövid áttekintése viszont hozzájárul a továbbiakban taglalt vizsgálatokhoz.

#### 4.2.5 A különböző funkciójú szabályozási célú tartalék kapacitások

Az FRC szabályozási célú tartalék kapacitások, amelyeket a korábbi terminológia szerint primer tartalékként azonosítottak, elsődleges rendeltetése a frekvencia változásának megállítása, ilyen módon a rendszerszintű teljesítményegyensúly helyreállítása. A minőségi paraméter változás megnyilvánulhat a rendszer frekvenciájának csökkenéseként, vagy növekedéseként. A rendszerszintű teljesítmény-egyensúly ilyen esetekben nem a szabványos frekvencián, hanem attól eltérő tartományban áll be a megváltozott a terhelési viszonyok következtében, amint az a 73. ábrán nyomon követhető.



73. ábra A különböző szabályozási tartalékok működésének időbeli lefutása [65]

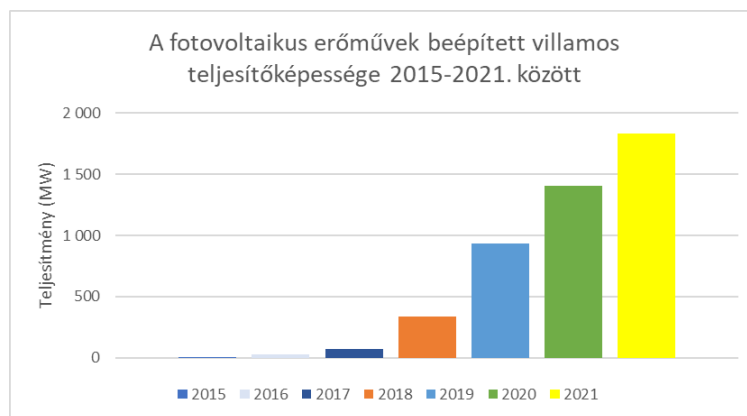
Az FRR tartalékok, vagyis a szekunder tartalékok feladata a névleges frekvencia értékének a helyreállítása, amelyet többlet teljesítmény betáplálásával érnek el. Az RR tartalékok, amelyeket manapság is gyakran csak terciér tartalékoknak nevezünk, visszaállítják az FCR és FRR tartalékok szabályozási képességét, ha az egyensúlyi állapottól való eltérés ezt indokolja. Erre a feladatra az elérhető leggazdaságosabb termelő erőműveket illetve erőművi blokkokat hívja be a rendszerirányító.

### 4.3 Az időjárásfüggő megújuló bázisú erőművek és energiatermelésük alakulása a közelmúltban

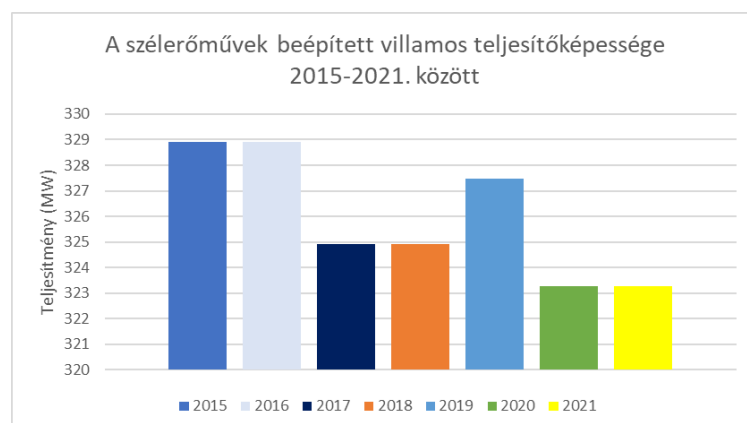
A hazai villamosenergia-rendszer erőművi alrendszerében nagymértékű változások történtek az elmúlt hét évben. Jelentősen megnövekedett az időjárásfüggő megújuló bázisú erőművek összes beépített teljesítőképessége, valamint jelentős hatással bírnak a hazai összes villamosenergia-termelés szerkezetének változására. Az alábbi ábrák és hozzájuk tartozó táblázatok a fotovoltaikus kapacitások valamint a szélerőművek beépített villamos teljesítőképességének, éves energiatermelésének és az általuk betáplált maximális teljesítmény rendszerszintű aggregált értékének alakulását mutatják a 2015-2021. közötti időszakra, abszolút értékben.

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Fotovoltaikus (MW)	6	29	70	336	936	1 407	1 829
Szél (MW)	329	329	325	325	327	323	323

12. táblázat A fotovoltaikus és szélerőmű beépített teljesítőképesség változása 2015-2021. között. (saját szerkesztés) [37]



74. ábra: A fotovoltaikus erőművek beépített teljesítőképesség változása 2015-2021. között. (saját szerkesztés) [37]

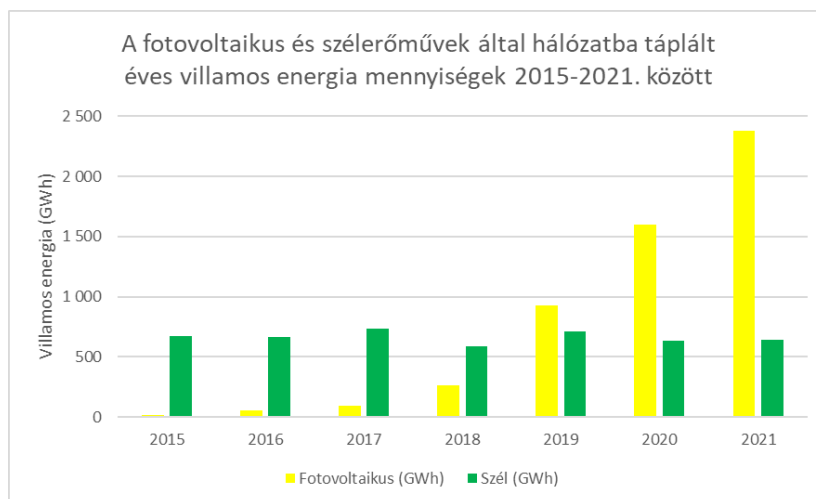


75. ábra: A fotovoltaikus erőművek beépített teljesítőképesség változása 2015-2021. között. (saját szerkesztés) [37]

A fotovoltaikus termelő kapacitások 2021-re több, mint 300 szoros beépített teljesítőképesség növekedés produkáltak a 2015. évi értékekhez képest és több, mint 30%-os növekedést a megelőző év adataihoz viszonyítva.

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Fotovoltaikus (GWh)	14	58	91	267	926	1 601	2 377
Szél (GWh)	671	665	737	590	711	638	644

13. táblázat A fotovoltaikus és szélerőművek által hálózatra táplált éves villamos energia mennyisége 2015-2021. között. (saját szerkesztés) [37]

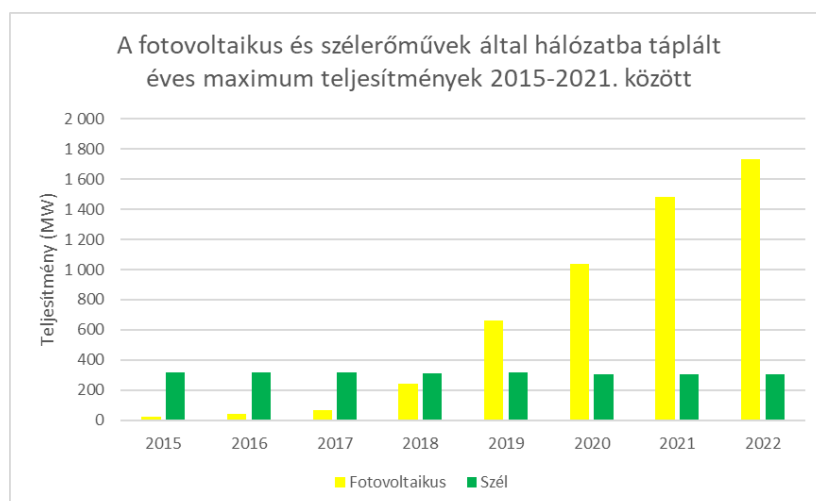


76. ábra: A fotovoltaikus és szélenergia-termelési mennyiségek 2015-2021. között. (saját szerkesztés) [37]

A napelemes erőművek által megtermelt villamos energia mennyisége a teljes referencia időszakban több mint 150-szeresére növekedett és csaknem 50%-os bővülést jelentett 2021-ben az előző évhez képest.

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Fotovoltaikus (MW)	22	43	68	239	662	1 038	1 485	1 732
Szél (MW)	315	315	317	310	317	306	302	303

14. táblázat A fotovoltaikus és szélenergia-termelési maximum teljesítmény értékek 2015-2021. között. (saját szerkesztés) [37]



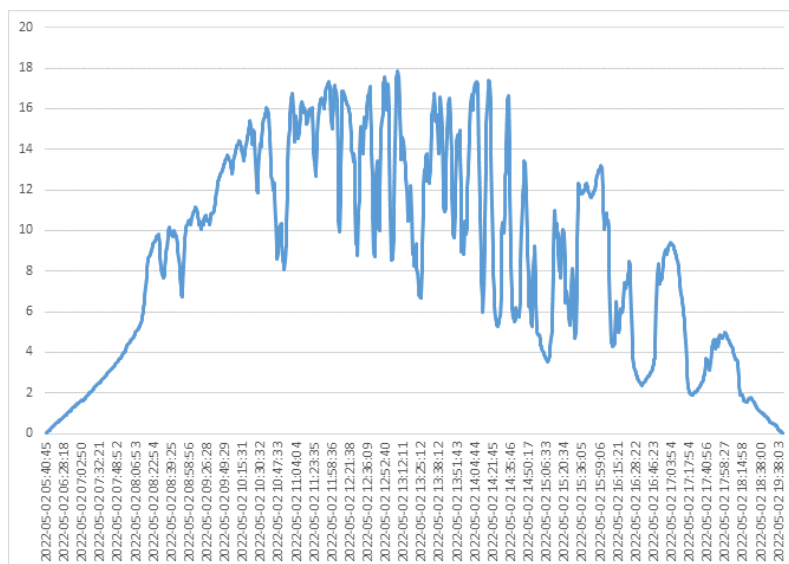
77. ábra A fotovoltaikus és szélenergia-termelési maximum teljesítmény értékek 2015-2021. között. (saját szerkesztés) [37]

Az is kiemelt figyelmet érdemel, hogy a fotovoltaikus erőművek által a hálózatba táplált maximum teljesítmény értéke 2021. évben csaknem 70-szer volt magasabb, mint 2015-ben, míg az előző évhez képes közel 50 %-os volt a növekedés mértéke. A fentiekben kimutatott értékek messze meghaladták a hazai villamosenergia-rendszer beépített teljesítőképességének valamint a hazai villamosenergia-igények és a rendszerszintű csúcsteljesítmények relatív változását, relatív növekedését. A korábbiakban kifejtetteknek megfelelően ez egyben azt is jelenti, hogy a termelő szerkezeten belül jelentősen megnövekedett a nem irányítható és nem szabályozható, tehát véletlenszerűen termelő erőművi kapacitások részaránya, ezzel a sztochasztikus teljesítmény-betáplálásának részesedése is.

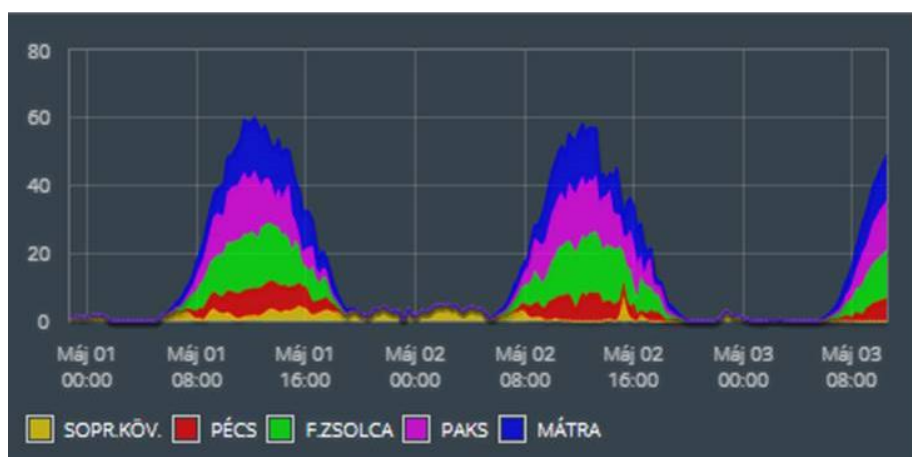


78. ábra Az ipari és HMKE méretű fotovoltaikus erőművek teljesítőképesség arányának változása a hazai termelő szerkezeten belül. (saját szerkesztés) [37]

A következő ábra jól példázza, hogy miképpen alakult a Paksi 20,6 MW-os naperőmű rendszerbe táplált teljesítménye a 2022.05.02. nap folyamán, illetve hogyan alakult negyedórás bontásban az MVM Csoport nagyméretű megújuló portfólió (szélerőmű és fotovoltaikus erőművek) rendszerbe táplált aggregált teljesítménye ugyanezen a napon. Nem szorul magyarázatra, hogy ez a teljes hazai beépített időjárásfüggő teljesítőképességre értelmezhető, sztochasztikus jellegű teljesítmény-betáplálási arány növekedés komoly kihívás elé állítja a hazai villamosenergia-rendszer szabályozási feladatait ellátó hálózati engedélyeseket.



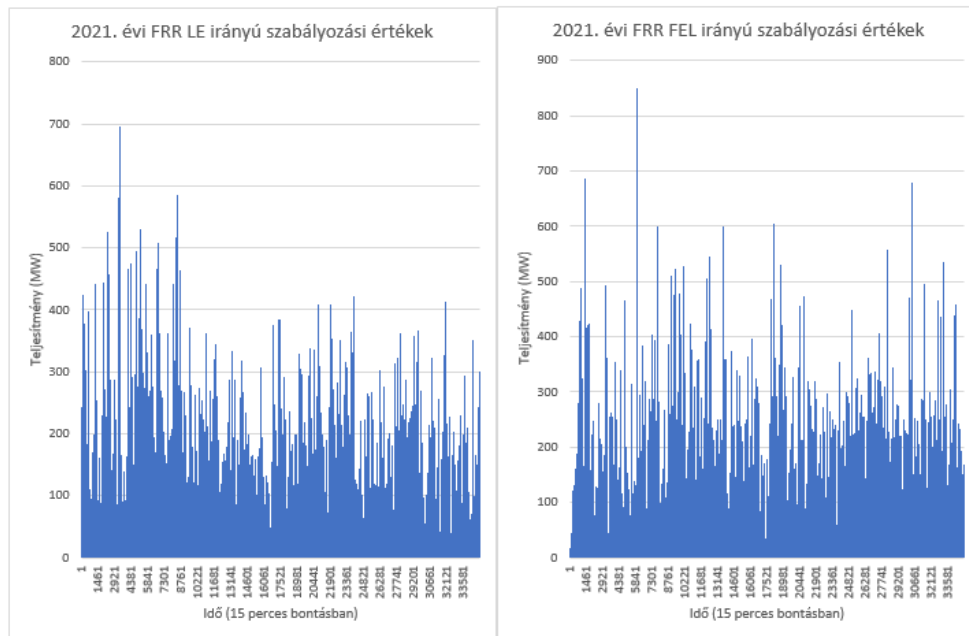
79. ábra: A Paks 20,6 MW-os naperőmű termelési görbéje 2022.05.02-án. (saját szerkesztés) [45]



80. ábra: Az MVM Zrt. nagyméretű megújuló portfólió 2022.05.01. és 2022.05.02. közötti kumulált termelési görbéje. [45]

## 4.4 Az FRR le- és felszabályozási teljesítményigények vizsgálata 2015 - 2021. évben

A következő ábrák az FRR le- és felszabályozási rendszerszintű negyedórás átlag teljesítmények éves alakulását szemléltetik a 2021. évi feldolgozott adatok alapján.



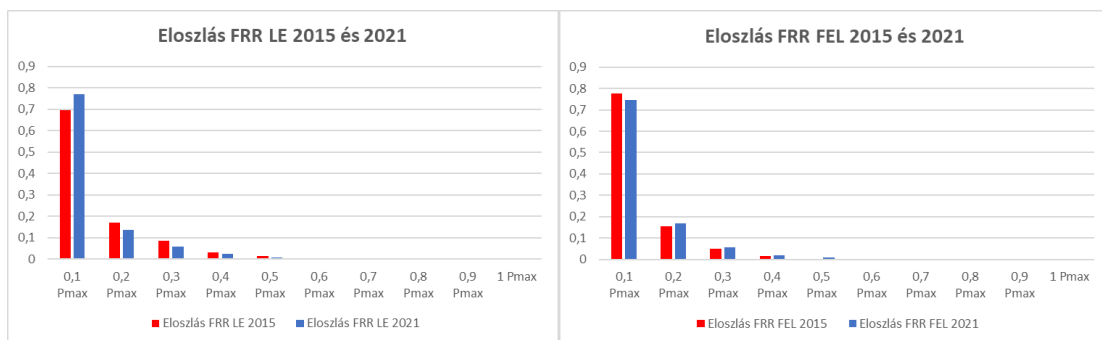
81. ábra: A 2021. évi FRR le- és felszabályozási rendszerszintű negyedórás átlag teljesítmények éves alakulása (saját szerkesztés) [37]

Tekintettel arra, hogy igen nagy volumenű adat ( $4 \times 24 \times 365 = 35040$ ) megjelenítéséről van szó, így csak szemléltetésképpen mutatom egyetlen év adatait annak érzékeltetésére, hogy milyen erősen véletlenszerű folyamatról van szó. Az adatokat feldolgoztam, azaz képeztem a sztochasztikus folyamat diszkrét valószínűségi eloszlását és diszkrét valószínűségi eloszlásfüggvényét az alábbiak szerint és meghatároztam az eloszlások és eloszlásfüggvények más valószínűségelméleti jellemzőit is.

### 4.4.1 A folyamatot leíró függvények generálása

A rendszerszintű FRR le- és felszabályozási teljesítmény diszkrét valószínűség eloszlásának a meghatározását az alábbiak szerint végeztem. Az első lépésben az éves adatok (35040 negyedórás adat) növekvő nagyság szerint sorba rendezését végeztem el. Ezt követően a teljesítményigények által lefedett értéktartományt tíz egyenlő teljesítmény csomagra osztottam fel. Az osztások számának, azaz az egyes értéktartományoknak a meghatározása teljességgel önkényes, értelemszerűen minél több értéktartományt

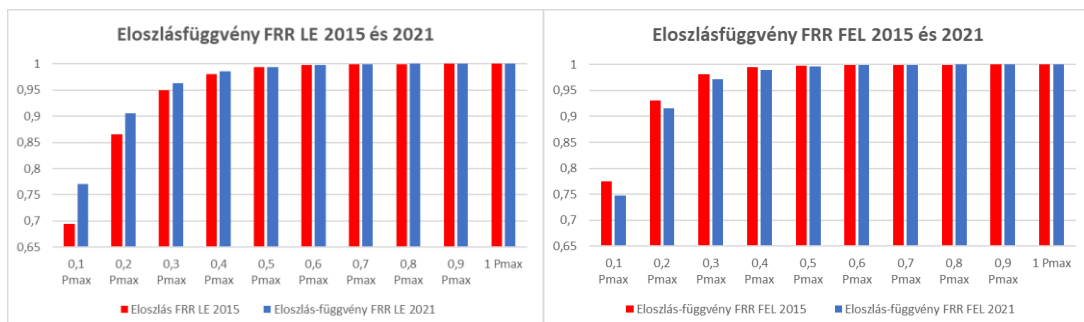
definiálok, annál részletesebb függvény adódik. Az osztások számát tehát a minimális és a maximális teljesítményigény által definiált értéktartomány nagysága, és a vizsgálattal szemben támasztott pontosság igény határozza meg. Harmadik lépésben kimutattam, hogy az egyes teljesítménytartományokba hány darab teljesítményérték esik. Az egyes teljesítmény tartományokba eső negyedórák száma értelemszerűen megegyezik a tartománybeli teljesítményértékek számával. Ezt a számértéket az összes időosztás számához viszonyítva, adódik az adott teljesítmény-tartományba eső teljesítményigények relatív gyakorisága. Tekintettel a nagyszámú feldolgozott adatra, ez gyakorlatilag megegyezik az adott teljesítmény-tartományba eső szabályozási igények előfordulási valószínűségével.



82. ábra: A 2015. és 2021. évi FRR le és felszabályozás értékek diszkrét valószínűségi eloszlása. (saját szerkesztés) [37]

Következő lépésként meghatároztam a rendszerszintű fel-, illetve leszabályozási teljesítményigények diszkrét valószínűségi eloszlásfüggvényeit.

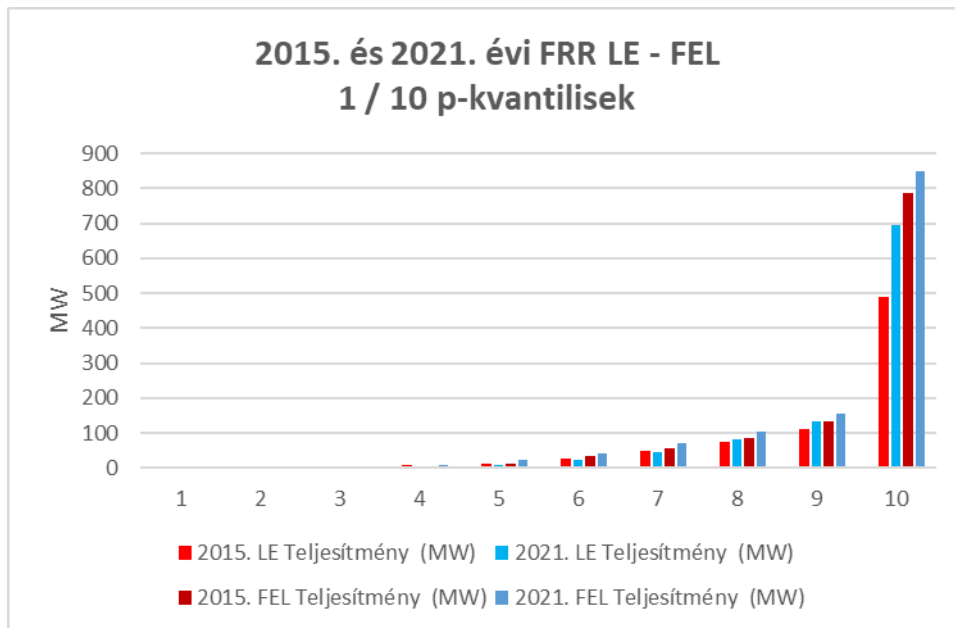
Az így kapott függvény azonban a vizsgálat szempontjából még nem használható fel közvetlenül, mert nem arra a kérdésre ad választ, hogy milyen valószínűséggel lép fel egy adott teljesítményértéknél nagyobb teljesítményhiány a rendszerben, hanem arra, hogy mi a valószínűsége annak, hogy a rendszerszintű teljesítményhiányok egy adott tetszőleges értéknél kisebbek lesznek



83. ábra: A 2015. és 2021. évi FRR le és felszabályozás értékek diszkrét valószínűségi eloszlásfüggvénye. (saját szerkesztés) [37]



Az eddigiekben mindig diszkrét eloszlások meghatározásáról, vizsgálatáról volt szó, hiszen véges számú diszkrét adat alapján történtek a számítások, mert ezek állnak rendelkezésre. Nincs azonban elvi akadály annak, hogy kellően nagy adatbázis esetén folytonos eloszlásfüggvények kerüljenek meghatározásra.



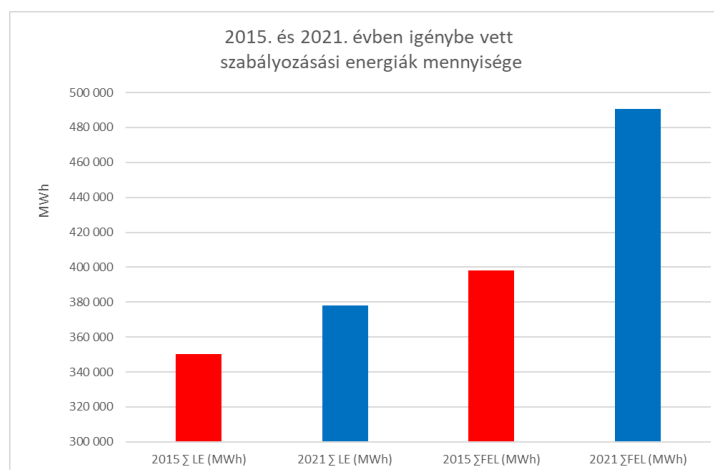
84. ábra FRR LE – FEL 1/10 p-kvantilisek alakulása 2015. és 2021. közötti időszakban. (saját szerkesztés) [37]

A szabályozási teljesítmények matematikai statisztikai elemző feldolgozásának másik szemléletes eszköze a p-kvantilisek kimutatása. Az éves negyedórás teljesítmény átlag adatokat növekvő sorrendbe rendeztem. Ezt követően 10 egyenlő darabszámú intervallumra osztottam fel a 35040 adatból álló teljes éves tartományt. A rendszerezést elvégezve azt vizsgáltam, hogy az egy tartományba eső negyedórás átlagos teljesítményértékek mely teljesítmény értéknél biztosan nem nagyobbak. A kapott eredményt jól szemlélteti a 84. ábra.

Az eddigiekben ismertetettek alapján tehát egzakt módon meghatározható, hogy adott rendszerszintű teljesítmény-hiányok, vagy éppenséggel teljesítmény-többletek kiszabályozásához milyen volumenű FRR kapacitásra van szükség

#### 4.4.2 A 2015. évi és a 2021. évi FRR rendszerszintű kiszabályozási (fel- és leszabályozási teljesítményigények összehasonlítása

Összevettem a 2015. évi FRR le- és felszabályozási teljesítményigények diszkrét valószínűségi eloszlását és diszkrét valószínűség eloszlásfüggvényeit egyértelműen megállapítottam, hogy a jelentősen megnövekedett a szükséges FRR teljesítményigények maximális értéke, diszkrét valószínűségi eloszlása és diszkrét valószínűségi eloszlásfüggvénye is, sőt a rendszerszintű kiegyenlítő energia rendszerszintű mennyisége is. Ezek a változások egyértelműen az időjárásfüggő megújuló kapacitások adott tárgyidőszakban bekövetkezett megnövekedett termelési részarányával és értelemszerűen beépített teljesítőképességük megnövekedésével hozhatók összefüggésbe.



85. ábra: A 2015. és 2021. évben igénybe vett különböző típusú szabályozási energia mennyiségek. (saját szerkesztés) [37]

#### 4.5 Az atomerőművi és az időjárásfüggő megújuló kapacitások jövőbeli párhuzamos üzemének vizsgálata

A villamosenergia-rendszerek jövőbeli üzemének tervezése szempontjából alapvető fontosságú kérdés az, hogy várhatóan miképpen alakulnak a rendszerszintű terhelések egy adott jövőbeli időszakban. Közismert, hogy a hazai villamosenergia-rendszerre hozzávetőlegesen több mint 5 és félmillió fogyasztó csatlakozik, és ezek abszolút többsége teljességgel véletlenszerűen alakuló pillanatnyi teljesítmény-igényt jelent a hálózatra. [66] Ugyanakkor a teljességgel sztochasztikus folyamaton belül megfigyelhetők trendek, periodicitások így napi, heti és szezonális értelmezésben is.

Azonban ezek a hasonló jellegek abszolút értékeit tekintve folyamatosan (napi, heti, szezonális időszakokban) változnak az energiaigények, a maximális és pillanatnyi teljesítmény igények a felhasználói igények növekedésével illetve csökkenésével arányosan.

A rendszer közép- vagy hosszú távú üzemállapotainak, a rendszerszintű terhelés alakulásának becslésekor általános gyakorlatot követve, a 2015. és 2021. év közötti 7 éves időszakra vonatkozóan a MAVIR adatpublikációban meglévő adatok feldolgozásával felvettem a vizsgált időszak relatív terhelési görbéit. A vizsgálathoz szükséges adatgyűjtést az éves szezonális időszakok jellemző naptári hetek szerda, szombat és vasárnap jellemző napjaira végeztem el a következő irányelvek szem előtt tartásával.

A VER rendszerszintű napi és heti energiaigények alakulása és az ugyanarra az időszakra vonatkozó középhőmérsékletek, valamint a megvilágítottság (nappalok hossza) alakulása között szoros korreláció mutatható ki. A hazai klimatikus viszonyok között kielégítő pontosságú közelítést ad a teljes év négy különböző átlaghőmérsékletű és megvilágítottságú időszakra történő osztása. Ez tehát a jellemző szezonális időszakok képzésének elméleti alapja.

A kellő reprezentativitást biztosító éves tipikus időszakokat vizsgálom, hogy a gazdaságosan tervezhető időszakokkal készíthessek újszerű modelleket a döntéshozók részére. A szélsőséges jelleget mutató egyéb napokat egyedi intézkedésekkel és beavatkozásokkal kell költséghatékonyan kezelni.

A 2015. és 2021. év között eltelt 7 évben a magyar villamosenergia-rendszerszintű terhelési adatokat, negyedórás átlagértékekkel az alábbi szabály szerint gyűjtöttem ki:

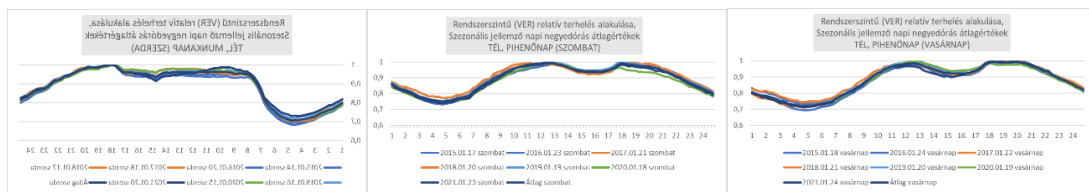
1. január 3. hetében, szerda 0:00-24:00, szombat 0:00-24:00, vasárnap 0:00-24:00,
2. április 2. hetében, szerda 0:00-24:00, szombat 0:00-24:00, vasárnap 0:00-24:00,
3. július 3. hetében, szerda 0:00-24:00, szombat 0:00-24:00, vasárnap 0:00-24:00,
4. október 2. hetében, szerda 0:00-24:00, szombat 0:00-24:00, vasárnap 0:00-24:00.

Az adatgyűjtés heti időszakainak kiválasztása során még figyelembe vettem, hogy amennyiben a fenti napok hosszú hétvégére vagy munkaszünettel járó ünnepnap közelébe esnének, akkor az előző vagy a következő hét ugyanezen jellemző napjaira vonatkozott az adatgyűjtés a reprezentativitás biztosítása érdekében. Gyakorlatban a minden kiválasztott szerda, szombat és vasárnap előtt, illetve után nem lehet ünnepnap, vagy pihenőnap ez a körülmény ugyanis jelentősen megváltoztatja a referenciaként figyelembe vett napi felhasználói igény mértékét és jellegét is. A rendszerszintű terhelési adatok

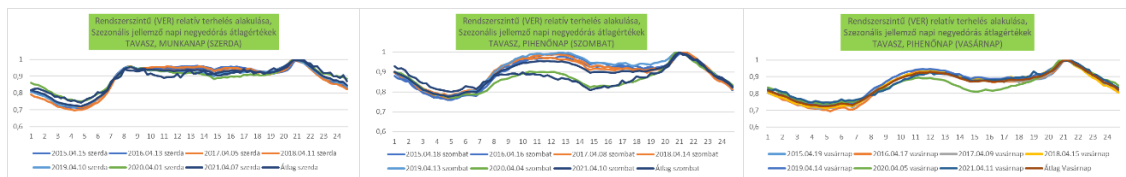
mellett ugyan ezekre a jellemző napokra felvettem a fotovoltaikus és széltermelő termelés negyedórás átlagértékeit is.

A 7 éves időszakra összegyűjtött adatokból szezonálisan a jellemző azonos naptári napokra (szerda, szombat, vasárnap) külön csoportosítva kiszámítottam a negyedórás terhelési adatok relatív értékeit. A relatív értékek viszonyítási pontja mindig a vizsgált adatsor legmagasabb értéke volt. A jellemző napok adataiból kiszámítottam azok 7 évre vonatkozó átlagát, majd az átlagokból is relatív értékeket képeztem.

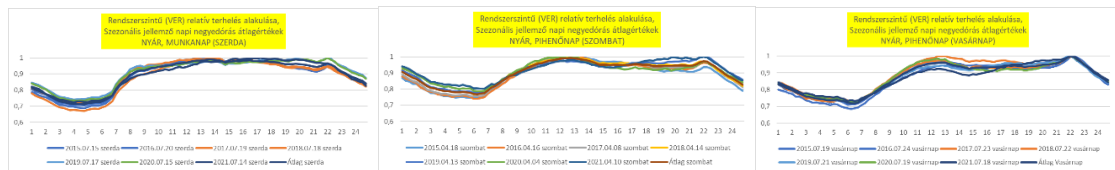
Az így nyert adatbázisok felhasználásával a jellemző napok 8-8 relatív terhelési görbét egy-egy grafikonban ábrázoltam, de szezonális csoportosításban az alábbiak szerint.



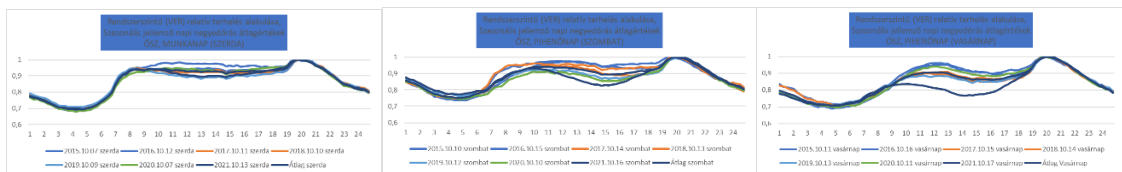
86. ábra: Rendszerszintű relatív terhelési görbék alakulása 2015. és 2021. között, téli időszak jellemző napok negyedórás átlagértékei alapján. (saját szerkesztés) [67]



87. ábra: Rendszerszintű relatív terhelési görbék alakulása 2015. és 2021. között, tavaszi időszak jellemző napok negyedórás átlagértékei alapján. (saját szerkesztés) [67]



88. ábra: Rendszerszintű relatív terhelési görbék alakulása 2015. és 2021. között, nyári időszak jellemző napok negyedórás átlagértékei alapján. (saját szerkesztés) [67]



89. ábra: Rendszerszintű relatív terhelési görbék alakulása 2015. és 2021. között, őszi időszak jellemző napok negyedórás átlagértékei alapján. (saját szerkesztés) [67]

Nincsen arra gyakorlati lehetőség és nem is szükséges az év minden napjára vonatkozóan elkészíteni a jövőbeli rendszerszintű terhelési görbéket. A bemutatott ábrák alapján igazolható a felvett relatív terhelési görbék nagyfokú alak állandósága. Ennek alapján igazoltam, hogy az elkövetkező tíz éves időszakra is figyelembe vehető ez az alak állandóság, ahogy ezt bizonyítottam az elmúlt 7 éves időtávra vonatkozóan.

A bázis görbék képzésével ezek után jó közelítéssel meg tudom becsülni, hogy egy adott évben hogyan alakulhatnak majd a rendszerszintű jellemző szezonális napi terhelések.

Hasonló módon jó közelítéssel tudom prognosztizálni a napelemes erőművek és a szélenergia-termelési teljesítmény-betáplálások rendszerszintű alakulását is.

A következő vizsgálatot egy extrém kritikus időszakra végeztem el, azaz feltételes valószínűséget vizsgáltam. A jelenlegi tervezési gyakorlathoz képest ez is egy újszerű megközelítést jelent. Kritikus időszakoknak tekintem azokat az időszakokat, amikor a kiválasztott jellemző nap terhelési jellegét alapul véve, minimális rendszerszintű terhelés mellett a kitekintés időszakára a MAVIR által hivatalosan prognosztizált ambiciózus teljesítőképesség bővüléssel arányos termelési extrapolációt alkalmazok.

A vizsgált 2015. és 2021. év közötti időszak MAVIR feldolgozott adatai alapján az összes jellemző nap 7 éves időtartamra vonatkozó adatait leszűrtem, hogy a vizsgált időszak minimális terhelési értékét megtaláljam. Ez a nap 2016.04.17-re adódott, tehát egy tavaszi időszak vasárnapi napjára.

Az értekezésem szekunder kutatásának konklúziójaként igazoltam, hogy a hazai erőmű fejlesztések iránya valamint az előttünk álló időszak várható villamos energia termelői szerkezet karbonmentes meghatározó elemei a nukleáris és időjárásfüggő megújuló technológiák lesznek, ezért a 2031-re vonatkozó terhelési-termelési szerkezetben is csak ezeket a technológiákat szerepeltetem a teljesség igénye nélkül. Az ábrázolás csak modellezési tehát kutatási célt szolgál és nem a teljes várható termelési szerkezet megjelenítése volt a célom.

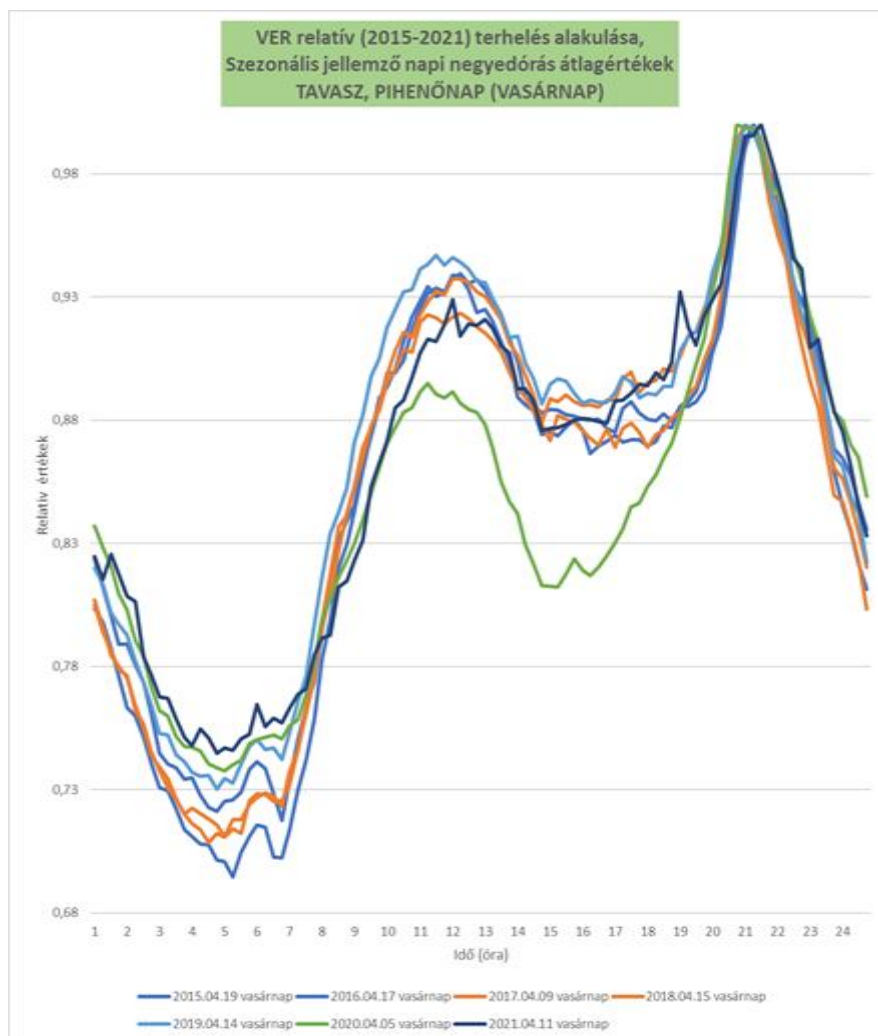
Ennek megfelelően a MAVIR 2021. évi feldolgozott adatait és 2031. évre vonatkozó hivatalosan közzétett prognózisát alapul véve kiszámítottam a 2021-es évhez képesti növekedési arányt a szél-, és fotovoltaikus erőművek beépített teljesítőképességek vonatkozásában a 2031. évre vonatkozóan. Azt feltételezem, hogy a 2031-re becsülhető termelésnövekedés, a beépített termelőképesség előre jelzett növekedésével arányosan fog változni, a prognózis teljesülése esetén. A nukleáris alapú teljesítőképesség 2031. évre vonatkozó, jelenleg hivatalos álláspontját vettem figyelembe, amely szerint a

kapacitás fenntartását szolgáló új blokkok 2029-ben és 2030-ban kezdik meg a termelésüket. A meglévő négy blokk rendre 2032-, 2033-, 2036-, és 2037-ig rendelkezik üzemelési engedéllyel. Az előzőekből kitűnik, hogy a hat blokk együttes üzemére fel kell készíteni a villamos energia rendszert.

	Szerda	Szombat	Vasárnap
<b>Tél</b>	4236	4095	3800
<b>Tavasz</b>	3917	3767	3437
<b>Nyár</b>	3890	3841	3478
<b>Ősz</b>	4061	3973	3674

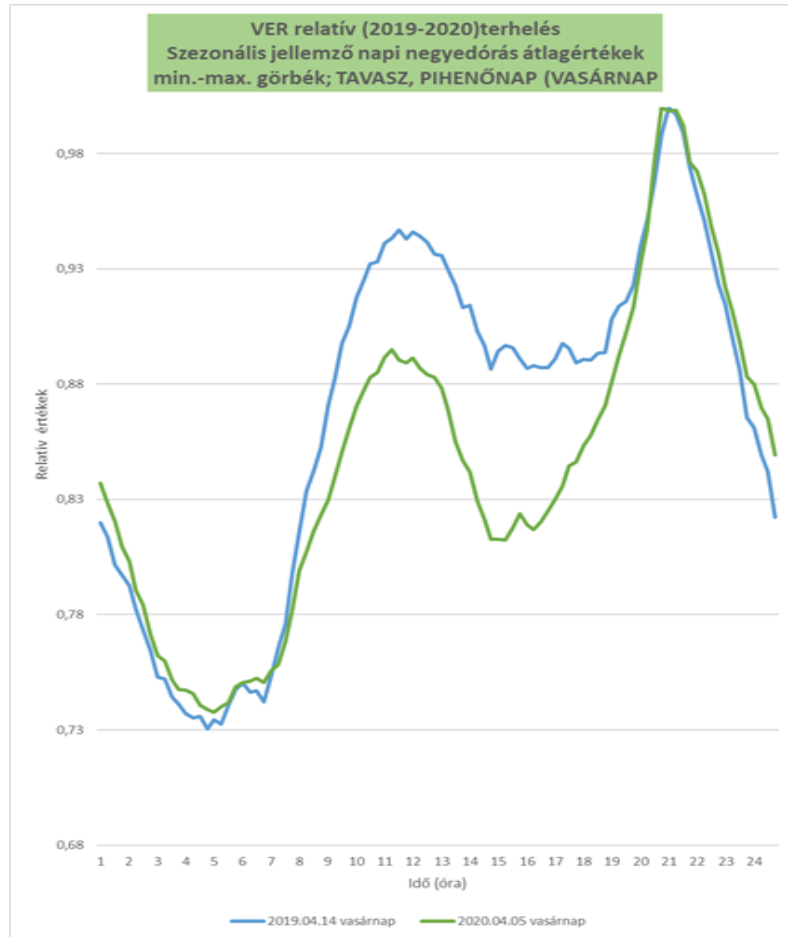
15. táblázat A 2015. és 2021. év közötti időszak minimális terhelési értékei. (saját szerkesztés) [67]

Ismételten felvettem a kiválasztott 2015-2021. között eltelt 7 éves időszak, tavaszi szezonális jellemző napok közül a vasárnapi napok relatív terhelési értékeire vonatkozó görbesereget, de már az átlagos érték nélkül.



90. ábra Rendszerszintű relatív terhelési görbék alakulása 2015. és 2021. között, tavaszi időszak jellemző vasárnapok negyedórás átlagértékei alapján. (saját szerkesztés) [67]

A relatív görbék közül kiválasztottam a jellemzően legmagasabb és legalacsonyabb értéken futó egy-egy görbét. A legmagasabb a 2019.04.14-i a legalacsonyabb a 2020.04.05-i napokhoz tartozik.



91. ábra A 2015. és 2021. közötti tavaszi időszak jellemző vasárnapi napok relatív görbéi közül a legmagasabb és legalacsonyabb értéken futó egy-egy görbe. (saját szerkesztés) [67]

Ezzel, erre a vizsgált 7 éves időszak, tavaszi jellemző vasárnapi napokra meghatározom a két görbe közötti közre zárt területre definiálható tipikus rendszerszintű fogyasztót.

A MAVIR által hivatalosan megjelentetett dokumentum, amely a hálózatvezetési folyamathoz is alap adatokat biztosít „A magyar VER természetviselkedései 2021.” konzervatív és ambiciózus előrejelzéseket tartalmaz 2031. évre a nukleáris, a szél és a fotovoltaiikus erőművek várható beépített teljesítőképességére vonatkozóan [68].

A jelenleg hivatalos álláspont szerint a Paks II. atomerőmű mind a 2 új blokkja 2031-ben már termelni fog, a meglévő 4 blokk üzemideje pedig még nem fog lejárni, tehát a 6 blokk együttes üzemével kell számolni. A MAVIR adatpublikációjában, feldolgozott adatként az erőművek 2021. évben beépített teljesítőképessége is megtalálható. A nukleáris, a szél

és a fotovoltaikus erőművek teljesítőképességek 2021. évi adataihoz képesti 2031-re prognosztizált növekedési arányokat kiszámítottam a konzervatív(min.) és az ambiciózus(max.) változatokra is.

<b>Technológia</b>	<b>2021. tény (MW)</b>
<b>Nukleáris</b>	2 027
<b>Szél</b>	323
<b>Fotovoltaikus</b>	1 829

16. táblázat A karbonmentesen termelő erőművi kapacitások 2021. évi beépített teljesítőképesség értékei. (saját szerkesztés) [68] [67]

<b>Technológia</b>	<b>2031. max. (MW)</b>	<b>2031. min. (MW)</b>
<b>Nukleáris</b>	4 260	4 260
<b>Szél</b>	390	310
<b>Fotovoltaikus</b>	11 600	6 400

17. táblázat A karbonmentesen termelő erőművi kapacitások 2031. évre becsültbeépített teljesítőképesség értékei. (saját szerkesztés) [68] [67]

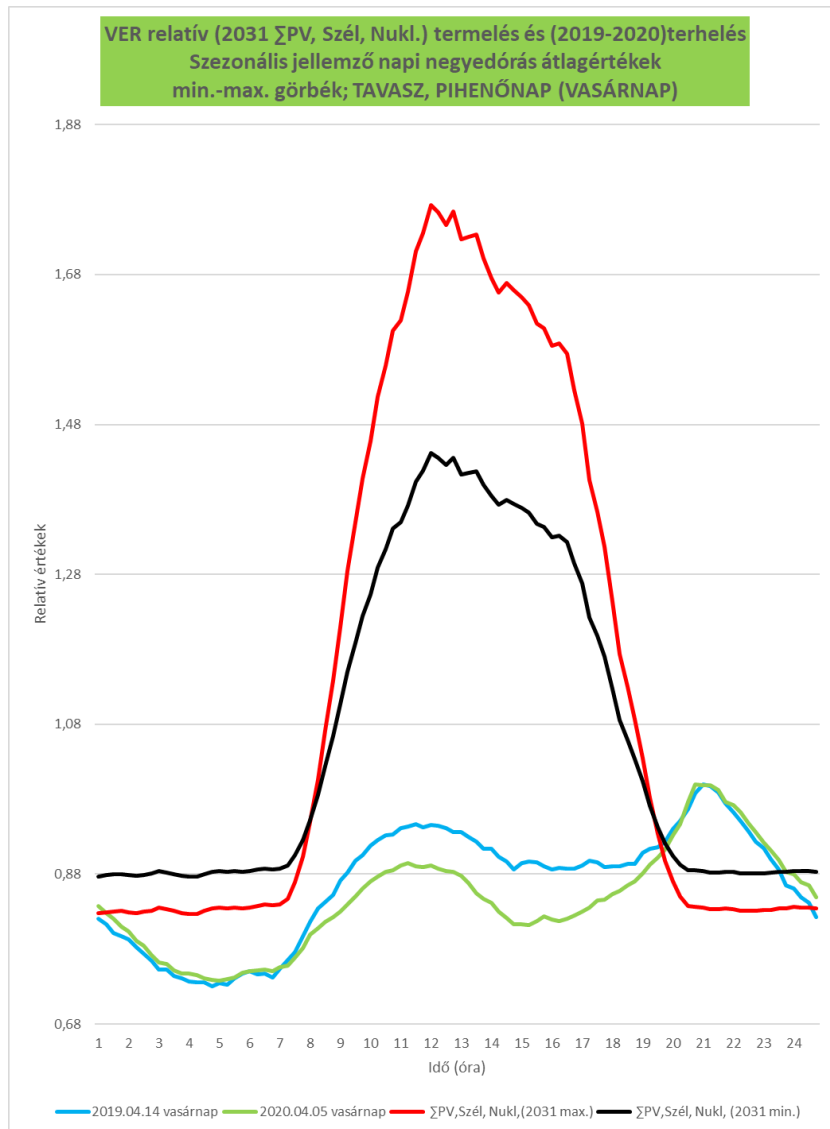
<b>Technológia</b>	<b>2031. max. (%)</b>	<b>2031. min. (%)</b>
<b>Nukleáris</b>	210%	210%
<b>Szél</b>	121%	96%
<b>Fotovoltaikus</b>	634%	350%

18. táblázat A nukleáris, a szél és a fotovoltaikus erőművek teljesítőképességek 2021. évi adataihoz képesti 2031-re prognosztizált növekedési arányai. (saját szerkesztés) [68] [67]

A tipikus karbonmentes termelő sáv meghatározásához a következetesség érdekében a hazai szél és fotovoltaikus erőművek termelési görbéit is a tavaszi időszak jellemző vasárnapjai közül választottam. A választásom azért esett 2021.04.11-re, mert a fotovoltaikus termelők hazai elterjedtsége számosságban, földrajzi elhelyezkedésben és beépített összes teljesítőképességben már kellően reprezentatív alpnak tekinthető prognózisok készítéséhez. A 2021. 04. 11-i valós szél és fotovoltaikus termelési negyedórás adatokból a 2031. évi előre jelzett beépített teljesítőképesség adatok viszonylatában kapott arányok szorzataival képeztem egy konzervatív és egy ambiciózus termelési adatsort 2031-re. Aránypárként a 2021. évi tény és a 2031-re a MAVIR által prognosztizált beépített kapacitásokat vettem alapul [94].

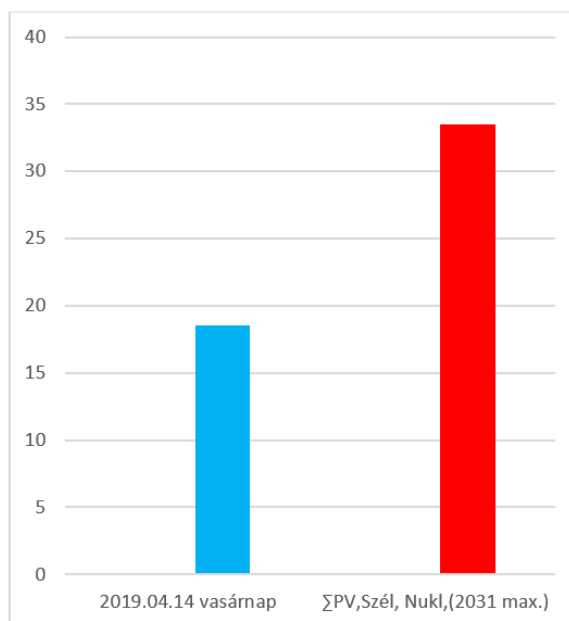


Az elemzés elsődleges célja a még figyelembe vehető valószínűséggel rendelkező, de extrém szélső állapot vizsgálata. Például egy esetleges válság hatása vagy erőteljes energiahatékonyság növekedés okozhat ilyen jelenséget. Ebben az esetben az első összevetésben azt néztem meg, hogy a 2021. évi felhasználással közel azonos mértékű felhasználói igény esetén 2031. évben a tipikus fogyasztó és tipikus termelő sáv egy grafikonban együtt ábrázolva, hogyan helyezkedik el egymáshoz képest. A nukleáris, a szél és a napelemes erőművek relatív értékeinek kiszámításához a tipikus fogyasztóhoz tartozó 2019.04.14. és 2020.04.05. termelési adatsorok közül mindegyikhez kiválasztottam az adatsorokhoz tartozó legnagyobb negyedórás értékeket, amely 5411 MW-ra és 5053 MW-ra adódott. A nukleáris, a szél és a naperőművek összetartozó negyedórás adatait kumulálva hoztam létre a konzervatív és ambiciózus szumma termelői adatsorokat. A relatív termelői adatsorok kiszámításához a magasabban futó görbe referencia értéknek az 5411 MW, míg az alacsonyabban futó görbe esetén az 5053 MW terhelési csúcsteljesítmény értékeket vettem alapul.



92. ábra VER relatív (2031  $\Sigma$ PV, Szél, Nukl.) termelés és (2019-2020)terhelés Szezonális jellemző napi negyedórás átlagértékek min.-max. görbék; TAVASZ, PIHENŐNAP (VASÁRNAP) (saját szerkesztés) [68] [67]

A 2031-re vonatkoztatott két relatív termelési adatsort egy grafikonban ábrázoltam a tipikus rendszerszintű (2019-2020) fogyasztóval. A 92. ábrán található grafikon nagyon szemléletesen érzékelteti, hogy amennyiben bizonyos időszakokban számottevően nem fog növekedni a hazai villamosenergia-felhasználás, akkor a fogyasztási igényeket jóval meghaladó nukleáris és időjárásfüggő hazai termelés adódhat a hektikusan termelő erőművek hálózatba táplált teljesítményén keresztül.

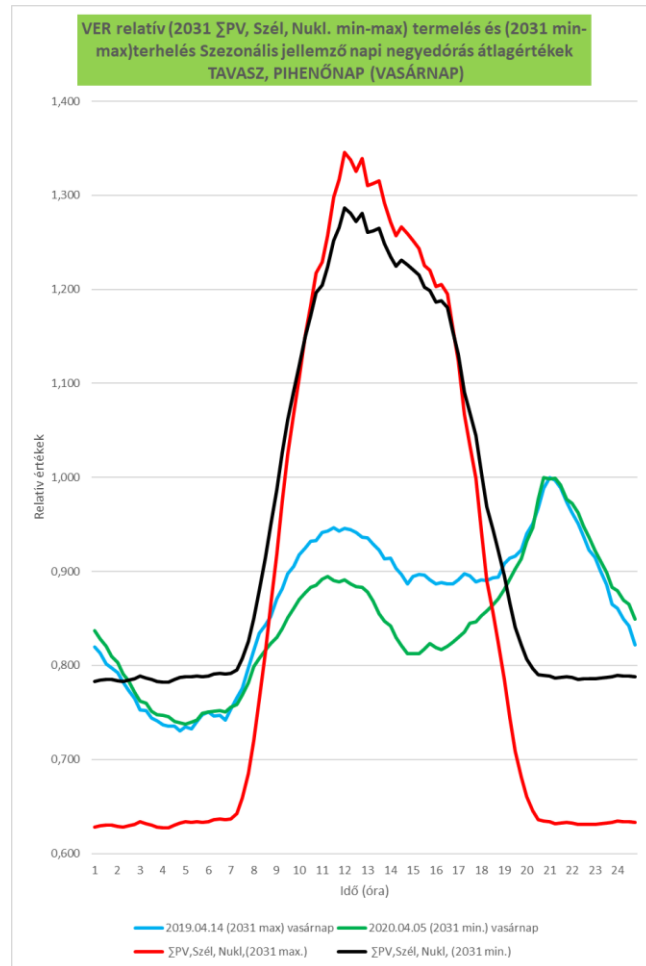


93. ábra VER relatív (2031  $\Sigma$ PV, Szél, Nukl.) termelés és (2019-2020) terhelés Szezonális jellemző napi negyedórás átlagértékek 10 és 14 óra közötti maximum görbék alatti területek; TAVASZ, PIHENŐNAP (VASÁRNAP) (saját szerkesztés) [68] [67]

A 93. ábrán a tipikus termelő (piros színnel jelölve) és tipikus fogyasztó (kék színnel jelölve) relatív görbék alatti területek meghatározásával is nyomon követhető, hogy a vizsgált jellemző napon belüli 10 és 14 óra közötti napszakban, a nukleáris és időjárásfüggő hazai termelés önmagában is jelentősen meghaladhatja a feltételezett tipikus fogyasztói igényeket. A relatív görbe jellegéből adódóan a 10 és 14 óra közötti időszakban feltételezhető a fotovoltaikus erőművek legnagyobb termelési volumene.

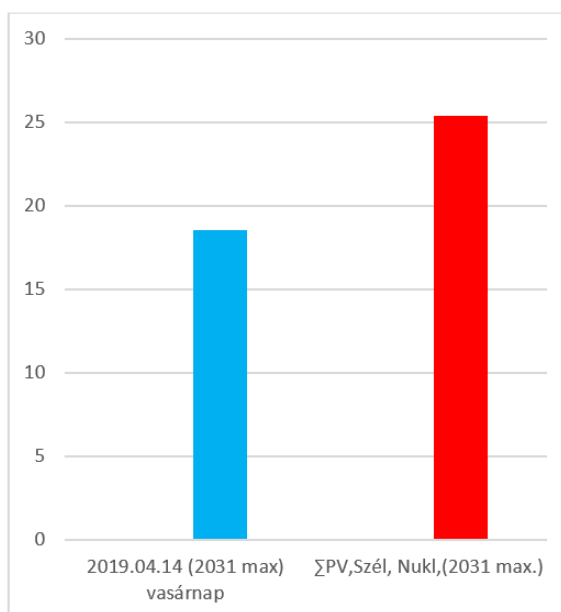
A 2031. évi adatokkal arányosan extrapolált termelési görbéket az előzőnél kedvezőtlenebb, vagyis jóval magasabb termelési forgatókönyv helyzetben is ábrázoltam. A „A magyar VER természetviselkedései 2021.” MAVIR kiadvány által közzétett legmagasabb konzervatív és ambiciózus felhasználói igény bővüléssel arányosan képeztem a tipikus rendszerszintű (2019-2020.) fogyasztóból, tipikus rendszerszintű (2031.) fogyasztót [94]. A MAVIR 2021. évi adatszolgáltatása alapján meghatároztam a 2021. éves csúcsterhelés értékét, amely december 9-én jelentkezett 7361 MW értékkel. A 7361 MW valamint a 2031-re a MAVIR által prognosztizált konzervatív 8250MW és az ambiciózus 9700 MW éves fogyasztói csúcsok segítségével növekedési arányokat képeztem. A tipikus rendszerszintű (2019-2020) fogyasztó alsó határoló görbáját a konzervatív növekedési aránnyal a felső terhelési görbe értékét az ambiciózus növekedési aránnyal szoroztam fel. A relatív értékeket az előzőhöz hasonlóan csak a 2031-re

kiszámított, képzett fogyasztói csúcsteljesítményekkel számítottam. Tehát a felső fogyasztói és termelői görbéket rendre 7130 MW, míg az alsó fogyasztói és termelői görbéket következetesen 5663 MW képzett fogyasztói csúcserőértékhez viszonyítottam. Az így kapott görbéket szintén egy grafikonban ábrázoltam.



94. ábra VER relatív (2031  $\Sigma$ PV, Szél, Nukl.) termelés és tipikus 2031. terhelés Szezonális jellemző napi negyedórás átlagértékek min.-max. görbék növelt referencia értékkel; TAVASZ, PIHENŐNAP (VASÁRNAP) (saját szerkesztés) [68] [67]

A 94. ábra grafikonja alapján megállapítható, hogy a nukleáris és időjárásfüggő erőművek együttes termelése még ebben az esetben is szignifikánsan meghaladja a várható fogyasztói igényeket ezen időszakban. Ebben a kontextusban is egyértelműen azonosítható, hogy még a konzervatív mértékű termelési görbe is határozottan felülmúlja az ambiciózus fogyasztói határt.



95. ábra VER relatív (2031  $\Sigma$ PV, Szél, Nukl.) termelés és tipikus 2031. terhelés Szezonális jellemző napi negyedórás átlagértékek 10 és 14 óra közötti maximum görbék alatti területek; TAVASZ, PIHENŐNAP (VASÁRNAP) (saját szerkesztés) [68] [67]

A 93. ábrához hasonlóan a 95. ábrán a tipikus termelő (piros színnel jelölve) és tipikus fogyasztó (kék színnel jelölve) relatív görbék alatti területek meghatározásával is kimutatható, hogy a vizsgált jellemző napon belüli 10 és 14 óra közötti napszakban, a nukleáris és időjárásfüggő hazai termelés önmagában többlet termelést eredményezhet az erre az időszakra feltételezett tipikus fogyasztói igényekhez képes.

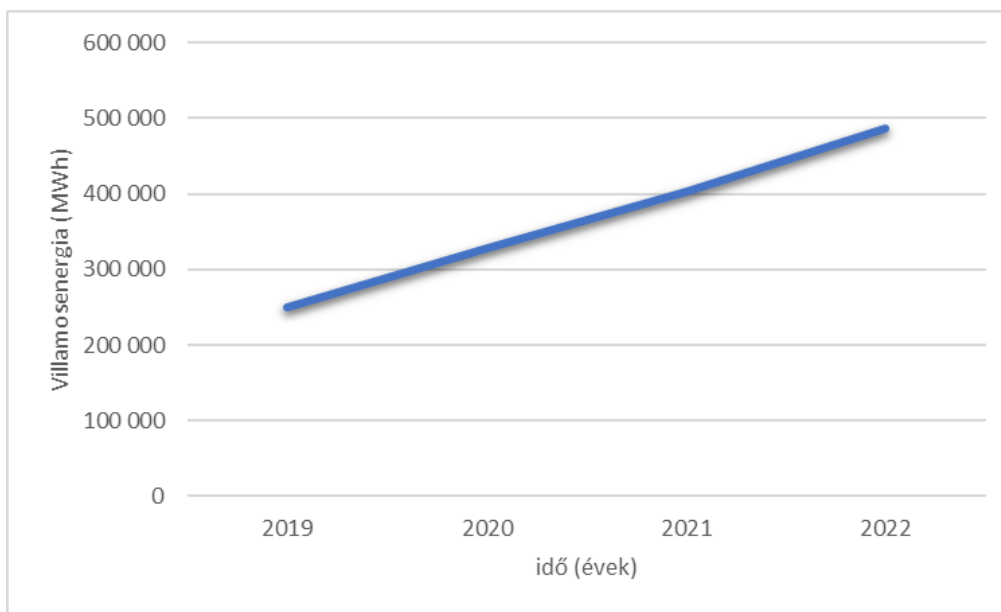
A görbék részletes vizsgálata során egyértelműen megállapítható, hogy az időjárásfüggő napelemes erőművek véletlenszerű termelése következtében a tipikus rendszerszintű fogyasztói igényt a napnak csak egy adott időszakában haladja meg a karbonmentes termelés kumulált értéke. Az ettől eltérő időszakok egy jelentős részében teljesítmény hiány lép fel. Az ábrázolás szemléletessége egyben a megoldást is determinálja, azaz a többlet energiát tárolni kell és az energiahányos időszakban vissza kell táplálni a villamos energia rendszerbe. Hangsúlyozni kívánom, hogy a figyelembe vett tipikus termelő jellegsáv nem tartalmazza a teljes termelési szerkezetet, azaz a hagyományos és az import összetevők is még ezen felüli termelési potenciált jelentenek.

### **A 3. tézis**

Statisztikai és villamosmérnöki módszerek komplex alkalmazásával megalkottam egy új fogyasztási- és termelési jellegsáv modellt, amely alkalmas a jövőbeli szabályozási igények nagyságának és időbeliségének meghatározására [MF1] [MF2] [MF3] [MF4] [MF5] [MF6] [MF7] [MF8] [MF9] [MF10] [MF11] [MF12] [MF13] [MF14] [MF15] [MF16] [MF17] [MF18] [MF19] [MF20].

### **4.6 A szükséges szabályozási célú kapacitások biztosításának lehetőségei**

Az előzőekben bemutatott számítások és modellezések eredményeként arra a megállapításra jutottam, hogy megítélhető az előttünk álló évtized végére becsülhető rendszerszintű teljesítmény igények nagyságrendje. Ennek igazolását egy másik megközelítésből is elvégeztem. A MAVIR internetes honlapján hozzáférhető ipari méretű fotovoltaikus bázisú termelési adatokat alapul véve a „Naperőművek nettó üzemirányítás mérés” és a „Naperőművek becsült termelése (dayahead)” adatsorok különbségeiből soronként kiszámítottam az eltéréseket és évenként összegeztem a negyedórás adatokat. Az előre becsült termelés és a mért tényadatok közötti különbség éppen az ipari méretű napelemes termelés időjárásfüggő jellegéből fakadó kiszabályozási energiaigényt adja meg. A becsült adatok 2019. január 1-től elérhetőek, ezért az évenkénti összesítések kezdő időpontját is ez az időpont határozta meg. A 96. ábra a MAVIR által közzétett ipari méretű napelemes termelés becsült és tény adatai közötti eltérést mutatja be évenkénti bontásban [96].



96. ábra A MAVIR által közzétett ipari méretű napelemes termelés becsült és tény adatai közötti eltérés évenkénti bontásban (saját szerkesztés)

Fontos megjegyezni, hogy a „Naperőművek nettó kereskedelmi elszámolási mérés” adatai csak 2020. július 01-től elérhetőek, ezért az ennél pontatlanabb üzemirányítási méréseket vettem tény adatként alapul a hosszabb távú összehasonlíthatóság érdekében. A kutatás lezárásáig elérhető 2022. évi adatokból arányosítással képeztem egész évi összesített adatot a nagyságrendi összehasonlíthatóság érdekében. A kétféle tény adatsorok évenkénti összege között nincs nagyságrendi eltérés, ezért az éves szabályozási igény nagyságrendjének megítélését a választott módszer nem befolyásolja.

A 96. ábra jól szemlélteti, hogy az ipari méretű napelemes beépített termelőképeség növekedésével arányosan növekszik a becslési hibából eredő szabályozási teljesítményigény is. A 96. ábra grafikonjából levonható másik következtetés, hogy a jelenleg alkalmazott szabályozási módszertan és technológiákon felül új megközelítés vált szükségessé. A megjelenített szabályozási energia igény nagyságrendileg a 97. ábrán azonosítható szivattyús-tározós erőmű (SZET) nagyságrendjébe tartozik, ezért egy vagy több ilyen blokk hazai létesítése célszerű.

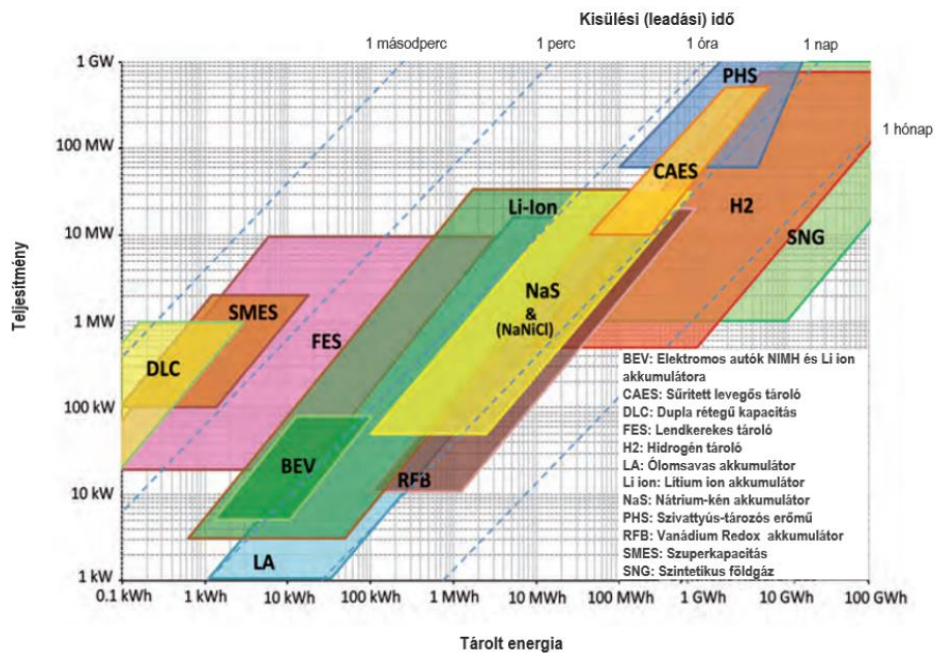
Ezen várható szabályozási igény kiszolgálására a jelenleg ismert és alkalmazott intézkedések és technológiák közül több is rendelkezésünkre áll. A következőkben a teljesség igénye nélkül ezek közül soroltam fel néhány lehetséges megoldási lehetőséget.

- 1) Import szabályozási célú tartalék kapacitások biztosítása;
- 2) Gázturbinák létesítése;
- 3) Forgótartalékok növelése;
- 4) Imbalance Netting;
- 5) Villamos energia tárolási technológiák.

Az Imbalance Netting és az import kapacitások a jelenleg is magas hazai import függőséget erősítik. A határon átívelő megoldási lehetőségeket nehezíti, hogy az ENTSO-E területén a szolgáltatók és az áramkereskedők azonos időben ugyanazokkal a feladatokkal találják szembe magukat, vagyis a hektikus termelési jelleggel előállított egyre nagyobb volumenű megújuló bázisú villamos energia miatt növekvő kiszabályozási igényekkel.

A gázturbinák, mint rugalmas kapacitások nem kínálnak teljes megoldást a fotovoltaikus termelés térnyerésével együtt jelentkező probléma megoldására, mert csak termelésére alkalmasak, de tárolásra nem és a primer energiahordozó szempontjából növelik a mindenkori import kitettséget.

A fenti lehetséges megoldási lehetőségek közül a kétirányú szabályozási irány, a hosszú távú fenntarthatóság és az energiafüggetlenség fő szempontokat alapul véve a villamos energia tárolási technológiák előtérbe helyezését választom. A 96. ábra lehetőséget nyújt számomra ahhoz, hogy rendszer szemlélettel választhassak ki egy megfelelő lehetséges technológiát a várható tárolási – szabályozási igények kielégítésére.



97. ábra A villamos energia tárolási technológiák rendszerező összehasonlítása [69]



Az elektrokémiai elven működő akkumulátorok legfeljebb néhány 10 MW nagyságrendben vehetők figyelembe emellett egyik hátrányuk, hogy legfeljebb 10 éves élettartamukat követően veszélyes hulladékká válnak. A kémiai energiatárolás egyik legígéretesebb formája a Hidrogén előállítás, szállítás, tárolás ipari léptékben még a fejlesztések korai szakaszában áll. A hazánkban, több időszakban is vizsgált szivattyús energiatároló megfelelő megoldást jelenthet az előttünk álló feladatok megoldására. 10 MW-tól akár 3 GW teljesítmény határig bővíthető és akár több 100 GWh villamos energia tárolására alkalmas környezetbarát módon és hosszú tárolási időszakra. Az előző fejezet ábráiból megítélhető, hogy 2031-re becsülhetően a szivattyús energiatároló üzemi méret tartományába eső villamos energia tárolási és szabályozási igények fognak jelentkezni. A szivattyús energiatároló 80 évet meghaladó tervezett élettartamra létesül ebből következően a beruházási költsége és megtérülési ideje is nagyobb, mint például az akkumulátoroknak. Mivel mind a két technológia más célt szolgál, ezért közvetlenül nem összehasonlíthatók. Európában figyelemre méltó műszaki kultúrája van a szivattyús energiatároló létesítményeknek. A kontinensek között Európában van a második legnagyobb beépített teljesítőképesség ezen technológiából, amely 2017-ben több mint 50 GW értéket jelentett. Az ENTSO-E előrejelzése szerint kontinensünkön 2040-re közel 80 GW beépített SZET kapacitás szolgálhatja a sztochasztikusan termelő megújuló alapú erőművek további térnyerését. [70]

Azt mindenképpen meg kívánom jegyezni, hogy rendszer szinten az energiatárolás és szabályozási igények kiszolgálására nem értelmezhető egyetlen jó megoldás. Minden esetben több technológia, több módozatú komplex használata nyújt a rendszerbiztonság szempontjából felvállalható kockázatu szerkezeti és forrás összetételt.

A SZET technológia sokrétű felhasználási lehetőséget nyújt a villamos inercia rendszerszintű növelésén túlmenően. Az energiatárolási funkciójában a termelési többlettel rendelkező időszakokban feltöltés, míg villamos energia többlet igény esetén kisütés üzemmódban áll a rendszerirányító rendelkezésére.

Kiegyenlítő szabályozás céljára, mint primer-, szekunder-, tercier szabályozás és tartalékképzés vehető figyelembe. Megvalósítható vele üzembiztonsági szolgáltatásként forgó tartalékképzés és black-start képesség is. Igény szerint részt vehet feszültség-, és meddőteljesítmény szabályozásban is a rendszerszintű szolgáltatások piacán. [71]

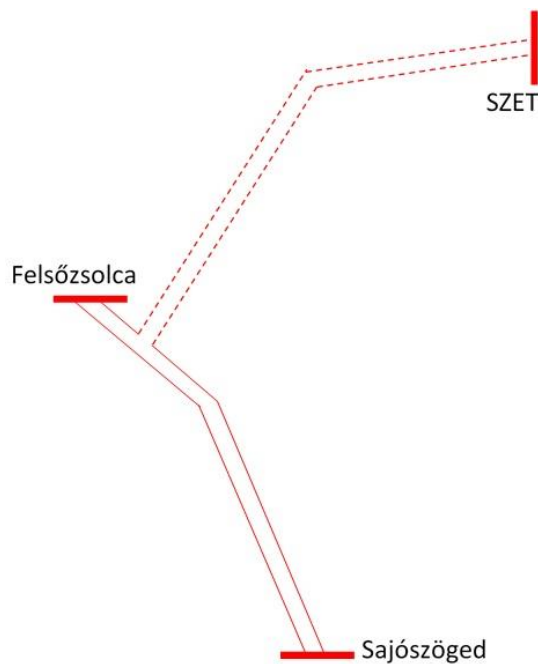
Az értekezés célkitűzése és tartalmi korlátai nem teszik lehetővé a SZET technológia részletes ismertetését, ezért ettől eltekintve a következő fejezetben az egyik lehetséges hazai lokációra vizsgáltam meg egy 600 MW beépített teljesítőképességű és 3600 MWh energiatároló képességű létesítmény villamos energia rendszerbe illesztését. Korábban felmérték a hazai SZET telepítési lehetőségeket. Az elmúlt évtizedek során több, mint 20 lehetséges telephely közül az egyik legalkalmasabb földrajzi adottság a Zemplén megyei Sima település környezetében található. A korábbi vizsgálatok tartalmazták a helyszínek geológiai adottságok előzetes felmérését valamint a műszaki és kereskedelmi szempontok alapján számított méret optimalizálását is [72] [73].

Az eddigiek során előttem még senki nem vizsgálta egyetlen lehetséges telephely vonatkozásában sem a villamosenergia-rendszerbe integrálás műszaki vonatkozásait a villamos hálózat szempontjából. A következő fejezetben az általam kiválasztott Sima település környezetében feltételezett létesítményre végeztem el ezt az újszerű villamos hálózati modellezést.

## **4.7 A Sima település környezetébe feltételezett SZET villamosenergia-rendszerbe integrálásának vizsgálata villamos hálózati szempontból**

### **4.7.1 A hálózati csatlakozás modellezése**

A SZET villamos főberendezései és az átviteli hálózat között 400 kV-os kétrendszerű távvezetési kapcsolat megvalósítását tételeztem fel, közel 41 km vezeték hosszban. Az újonnan létesítendő távvezetési szakaszt szaggatott vonallal ábrázoltam a 97. ábrán.



98. ábra A SZET csatlakozása a 400 kV-os átviteli hálózathoz. (saját szerkesztés)

A kiinduláshoz feltételezem, hogy az újonnan létesítendő 400 kV-os távvezetékszakasz a Sajószöged–Felsőzsolca kétrendszerű 400 kV-os távvezeték I. rendszerének felhasításába csatlakozik, ezzel az állomási 400 kV-os kapcsolóberendezés bővítése elkerülhető.

A hálózatvizsgálatokhoz szükséges alapmodelleket a MAVIR által készített 2021. évi Hálózatfejlesztési Terv 2031-es sarokévi hálózatmodelljeiből alakítottam ki a fenti hálózati csatlakozási módozat hozzáadásával, valamint a SZET mindkét szélső üzemállapotának (600 MW termelés, 600 MW szivattyúzás) leképezésével.

A 2021. évi Hálózatfejlesztési Terv 2031-es sarokéve összesen 32 hálózatmodellváltozatot tartalmazott, ezen belül 2 természetviselkedés (hálózathasználati prognózis), 4 jellemző időszak és 4 nagyerőműves fejlesztési scenárió összes kombinációját.

A természetviselkedések a MAVIR által bevezetett rövidítéseket alkalmazva az alábbiak voltak:

- TV1: magasabb fogyasztói terhelés és fotovoltaikus termelőkapacitás-bővülés (az utóbbi összesen 11600 MW beépített teljesítőképességet jelent),
- TV2: alacsonyabb fogyasztói terhelés és fotovoltaikus termelőkapacitás-bővülés (az utóbbi összesen 6400 MW beépített teljesítőképességet jelent).

A jellemző időszakok az alábbiak voltak a MAVIR terminológiáit és rövidítéseit felhasználva:

- SB: nyári munkanapi délutáni csúcsterhelés maximális fotovoltaikus betáplálással,

- SN: tavaszi munkaszüneti napi alacsony terhelés maximális fotovoltaikus betáplálással,
- SP: nyári munkanapi esti csúcsterhelés (fotovoltaikus betáplálás nélkül),
- WP: téli munkanapi esti csúcsterhelés (fotovoltaikus betáplálás nélkül).

A nagyerműves fejlesztési scenáriók az alábbiak voltak:

- atomerőművi kapacitásbővítés és egy új nagy CCGT termelőegység üzembe lépése (alpváltozat),
- az atomerőművi kapacitásbővítés késik (az egységek még nem termelnek), de egy új nagy CCGT termelőegység üzembe lép,
- az atomerőművi kapacitásbővítés megvalósul, de az új nagy CCGT termelőegység még nem üzemel,
- az atomerőművi kapacitásbővítés késik és az új nagy CCGT termelőegység sem üzemel még.

Ezt a 32 modellváltozatot bővítettem ki a SZET csatlakoztatásához feltételezett hálózati alakzattal és leképeztem a SZET mindkét szélső üzemállapotát (600 MW termelés, 600 MW szivattyúzás), amely ezáltal összesen 64 vizsgálandó modellváltozatot eredményezett. A SZET termelt vagy vételezett teljesítményének kiegyenlítését első közelítésben külföldi forrásokból (szomszédos külföldi TSO-kra egyenletesen szétosztva) valósítottam meg. A vizsgálatok folyamán ellenőrzésképpen létrehoztam olyan modelleket is, ahol a SZET termelt vagy vételezett teljesítményének kiegyenlítését részben vagy egészben a hazai nagy CCGT egységeken rendelkezésre álló szabályozási tartalék terhére valósítottam meg.

A Hálózatfejlesztési Terv készítése során a MAVIR az Üzemi Szabályzat [89] hálózatfejlesztés-tervezésre vonatkozó irányelve alapján a következő állandósult állapotú hálózatvizsgálatokat végzi el és értékeli ki az üzembiztonsági kritériumok teljesülése (ágtelhelhetőségi és csomóponti feszültség határértékek betartása) szempontjából:

- váltakozó áramú teljesítményáramlás (load flow) számítás
- váltakozó áramú kiesésvizsgálat (load flow sorozatvizsgálat) bármely – hazai vagy szomszédos külföldi – hurkolt hálózati ág egyszeres hiányállapotára (N-1 kritérium),
- váltakozó áramú kiesésvizsgálat bármely hazai termelőegység egyszeres hiányállapotára (G-1 kritérium),

- váltakozó áramú kiesésvizsgálat két eltérő engedélyesi típusú terület (hazai TSO + DSO vagy hazai TSO + külföldi TSO) hálózati ágainak egyidejű egyszeres hiányállapotára (N-1-1 kritérium),
- váltakozó áramú kiesésvizsgálat bármely hazai termelőegység és bármely – hazai vagy szomszédos külföldi – hurkolt hálózati ág egyidejű egyszeres hiányállapotára (G-1/N-1 kritérium).

Jelen vizsgálat részeként nem állt rendelkezésre idő és erőforrás a fenti állandósult állapotú vizsgálat-típusok teljes körének elvégzésére. A SZET csatlakoztatási módozatának megfelelőségét ellenőrző számításokat az N-1 és N-1-1 kritériumok teljesülésének vizsgálatára korlátoztam.

A vizsgálatok a Siemens PTI cég PSS/E szoftverének v35-ös verziójával kerültek elvégzésre. A számítógépes modellező rendszer technikai és tervező szakértői támogatását a MAVIR biztosította számomra. Ez egyben azt is lehetővé tette, hogy a Hálózatfejlesztési Terv céljára készült modelleket közvetlenül fel tudjam használni, formátumkonverzió vagy hangolás szükségszerűsége nélkül.

#### **4.7.2 Hálózatvizsgálatok eredményének értékelése**

A csatlakozási módozat megfelelőségének ellenőrzésére elvégzett váltakozó áramú kiesésvizsgálatok arra a kérdésre adnak választ, hogy az előzetes megfontolások alapján kiválasztott SZET egységteljesítmény (beépített teljesítőképesség) kihasználható-e maximálisan mind termelés, mind vételezés irányban, illetve arra, hogy ez esetlegesen milyen hálózati korlátokba ütközhet, amelyeket a csatlakozás folyamata során fel kell oldani hálózatfejlesztési beavatkozásokkal. Nem alkalmas a választott vizsgálati megközelítés érzékenységi vizsgálatok elvégzésére.

A kiesésvizsgálatokból adódó nyers eredményeket (határérték-túllépési listák) előzetes értékeléseként összevettem a hálózatmodellek forrásaként szolgáló Hálózatfejlesztési Terv célállapotú futtatási eredményeivel. Ez azért bizonyult hasznosnak, mert a hálózatfejlesztés-tervezési célú modellek is tartalmazzák a tervezési célállapotban maradó kismértékű túlterhelődéseket. Ezeket a hálózat tulajdonos engedélyes vállalható kockázatnak (üzemirányítási időben operatív beavatkozással megoldhatónak) tart. A hálózati ágak esetében a tervezési modellekben fennmaradt túllépések kismértékű növekedését nem tekintettem a SZET üzembekerülésével kapcsolatos további fejlesztéseket igénylő problémának.

Az eredmények kiértékeléséhez olyan táblázatos összefoglaló formátumot választottam, amelyben láthatók az egyes üzembiztonsági problémák fellépésének körülményei. A táblázat felépítése tartalmazza a természetviselkedést, a SZET üzemmódját, és a teljesítménykiegyenlítés módját, illetve a cellákba írt tartalom részeként az üzembiztonsági problémákra jellemző előfordulási időszakokat.

### 4.7.3 Az átviteli hálózaton jelentkező szűk keresztmetszetek

Az átviteli hálózaton jelentkező szűk keresztmetszetek előfordulási körülményeit és hálózatfejlesztési beavatkozások révén lehetséges feloldási módját tartalmazza az 19. számú táblázat.

Átviteli hálózat	vételezés, 600 MW				betáplálás, 600 MW			
	TV1		TV2		TV1		TV2	
	import	import+ hazai GT fel	import	import+ hazai GT fel	export	export+ hazai GT le	export	export+ hazai GT le
<b>Békéscsaba</b> , harmadik 400/132 kV-os transzformátor beépítése szükséges (TV1 alapváltozat már tartalmazza)			SP, WP					
<b>Kisvárdá–Munkács 220 kV tv.</b> , speciális aktív teljesítmény-terelő (FACTS) berendezés felszerelése					SB, SN		SN	
<b>Sajóivánka–Rimaszombat 400 kV tv.</b> , speciális aktív teljesítményterelő (FACTS) berendezés felszerelése					SN			
<b>Sajószög–Mezőcsát 220 kV tv.</b> , speciális magas hőmérsékletű áramvezető sodrony felszerelése szükséges	SB	SB						
<b>Sándorfalva–Szeged III. 132 kV tv.</b> , terhelhetőségnövelő rekonstrukció (szabványosítás) szükséges	SB	SB	SP					

19. táblázat Az átviteli hálózaton előforduló szűk keresztmetszetek. (saját szerkesztés)

A Békéscsaba állomásban üzemelő 400/132 kV-os transzformáció a Hálózatfejlesztési Terv célállapotú modelljeiben is erős kiterheltséggel üzemel. A magasabb fogyasztói igénynövekedést tartalmazó prognózis (TV1 természetviselkedés) esetén már be lett tervezve a bővítése egy 3. transzformátor beépítésével. Az alacsonyabb igényfelfutási prognózis megvalósulása esetén ez a fejlesztés rendszerérdekből nem szükséges. A vizsgálat eredménye alapján válik szükségessé a koncentrált 600 MW-os fogyasztói terhelés (a SZET szivattyúzási üzemmódjának) megjelenése miatt a fotovoltaikus termelés nélküli időszakokban.

A Kisvárdá–Munkács 220 kV-os és a Sajóivánka–Rimaszombat 400 kV-os határkereszteső távvezetékek túlterhelődése a maximális fotovoltaikus termeléssel jellemzett időszakok hálózatmodelljeiben lép fel, amennyiben egyidejűleg a SZET is maximális termelt teljesítményt táplál be a hálózatba. Mivel a két távvezeték a magyar oldalon megvalósítható maximális tartós terhelhetőséggel van figyelembe véve, azaz további terhelhetőség-növelés csak az érintett külföldi TSO-k által végrehajtott fejlesztés révén lenne elérhető, magyar oldali beavatkozásként teljesítményterelésre alkalmas fejlett elektronikus berendezés (FACTS) telepítése jöhet szóba.

A Sajószöged–Mezőcsát 220 kV-os távvezetéknek és a Sándorfalva–Szeged 132 kV-os átviteli távvezeték III. rendszerének túlterhelődése a maximális fotovoltaikus termeléssel modellezett nyári munkanapi csúcsterhelési időszakban következik be, amikor a SZET a maximális teljesítménnyel szivattyúz, azaz feltételezhetően a megújuló forrásokból termelt villamos energiát tárolja be. A 220 kV-os távvezeték terhelhetősége a jelenlegi áramvezető sodronnyal nem növelhető a modellekben figyelembe vett tartós terhelhetőség fölé; a sodrony cseréjére lesz szükség, melynek alkalmával magas üzemi hőmérsékletet lehetővé tevő, kis belógású (HTLS – high temperature, low sag) sodronytípust érdemes választani. A 132 kV-os távvezeték terhelhetősége a jelenlegi sodrony cseréje nélkül is növelhető szabványosítással, beszabályozással.

#### 4.7.4 A 132 kV-os elosztóhálózaton jelentkező szűk keresztmetszetek

A 132 kV-os elosztóhálózaton jelentkező szűk keresztmetszetek előfordulási körülményeit és hálózatfejlesztési beavatkozások révén lehetséges feloldási módját tartalmazza az 20. számú táblázat.

	vételezés, 600 MW				betáplálás, 600 MW			
	TV1		TV2		TV1		TV2	
<b>132 kV-os elosztóhálózat</b>	import	import+ hazai GT	import	import+ hazai GT	export	export+ hazai GT	export	export+ hazai GT
<b>Békéscsaba–Békés tv.</b> , speciális magas hőmérsékletű áramvezető sodrony felszerelése szükséges (TV1 alapváltozat már tartalmazza)							SN	
<b>Békéscsaba–Szarvas tv.</b> , speciális magas hőmérsékletű áramvezető sodrony felszerelése szükséges					SN			
<b>BVK–Sajószentpéter tv.</b> , terhelhetőségnövelő rekonstrukció (kábelszakasz cseréje) szükséges					SN			
<b>Felsőzsolca–Sajószentpéter tv.</b> , terhelhetőségnövelő rekonstrukció (szabványosítás) szükséges					SN			
<b>Sajóivánka–Dusnokpuszta tv.</b> , terhelhetőségnövelő rekonstrukció (szabványosítás) szükséges							SN	
<b>Felsőzsolca–Nyékládháza ÉMÁSZ tv.</b> , terhelhetőségnövelő rekonstrukció (szabványosítás)			SN	SN				
<b>Felsőzsolca–Sajóivánka tv.</b> , terhelhetőségnövelő rekonstrukció (szabványosítás) szükséges					SB, SN			
<b>Gödöllő–Kerepes I-II. tv.</b> , speciális magas hőmérsékletű áramvezető sodrony felszerelése szükséges (TV1 alapváltozat már tartalmazza)			SP					
<b>Lőrinci–Nagybátony tv.</b> , terhelhetőségnövelő rekonstrukció (szabványosítás) szükséges					SN			
<b>Nyékládháza ÉMÁSZ–Sajószöged tv.</b> , terhelhetőségnövelő rekonstrukció (szabványosítás)	SB	SB						
<b>Nyékládháza MÁV–Sajószöged tv.</b> , terhelhetőségnövelő rekonstrukció (szabványosítás) szükséges	SB	SB						

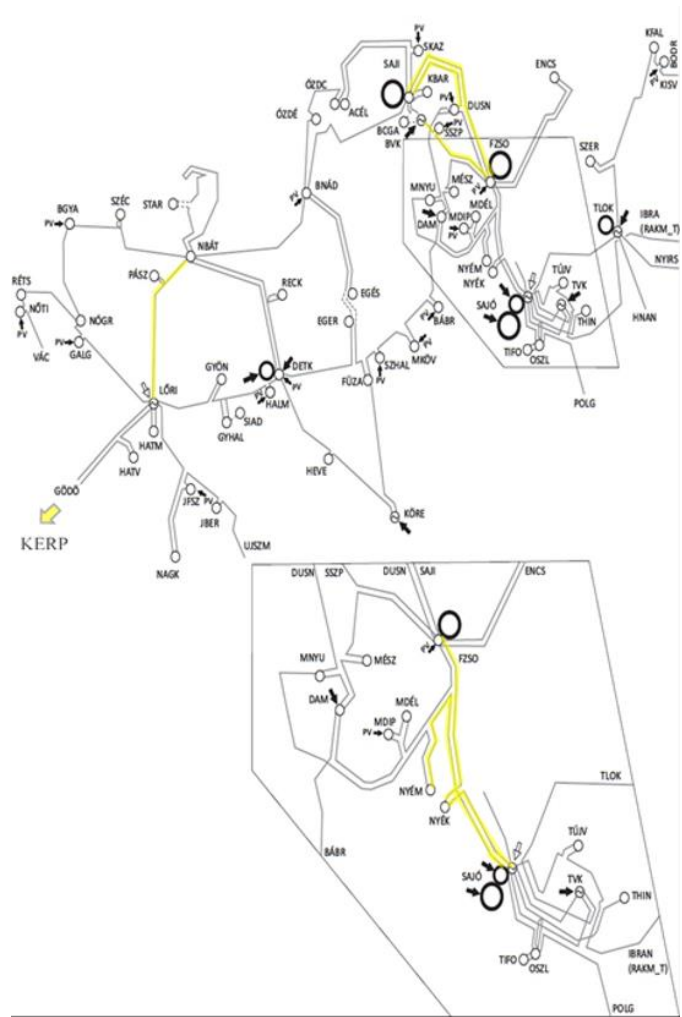
20. táblázat A 132 kV-os elosztóhálózaton előforduló szűk keresztmetszetek. (saját szerkesztés)

A 132 kV-os elosztóhálózati problémák két elosztói engedélyes, az ÉMÁSZ és a DÉMÁSZ ellátási területén jelentkeznek. Egy probléma az ELMŰ területére esik, de ezt az egyszerűbb tárgyalás érdekében az ÉMÁSZ halmaz részeként fogom bemutatni. Az ÉMÁSZ területe földrajzilag és villamosan is közel van a SZET csatlakozási pontjához, ezért az érintettsége a SZET által létrehozott áramlásokban nagyobb. A DÉMÁSZ ellátási





üzemállapotokban a Sajószöged és Felsőzsolca közötti 132 kV-os távvezetékíveken (Felsőzsolca–Nyékládháza ÉMÁSZ, Nyékládháza ÉMÁSZ–Sajószöged, Nyékládháza MÁV–Sajószöged) jelentkeznek túlterhelődések, mivel a Felsőzsolca 400 kV-hoz villamosan közeli SZET szivattyúzási üzeme a Felsőzsolca 400/132 kV-os transzformáció irányába folyó elosztóhálózati áramlásokat megnöveli. A távvezetékek terhelhetősége a jelenlegi sodrony cseréje nélkül is növelhető szabványosítással, besabályozással. Ezt a SZET üzembe kerülése előtt meg kell valósítani. A 20. számú táblázatban szereplő többi, az ÉMÁSZ 132 kV-os elosztóhálózatát érintő probléma más rendszer-üzemállapotban jelentkezik. A SZET esti időszak maximális teljesítményű vételezése túlterheli a Gödöllő–Kerepes kétrendszerű 132 kV-os távvezetékét abban az erőművi alváltozatban, amelyikben új nagy CCGT egység Északkelet-Magyarországon nem létesül. A maximális fotovoltaikus termeléssel egyidejűleg történő maximális SZET-betáplálás pedig túlterheli az elosztóhálózati távvezetékíveken alapesetben is Felsőzsolcától távolodó irányú áramlásokkal terhelt távvezeték-szakaszokat (pl. Sajóivánka irányába: BVK–Sajószentpéter, Felsőzsolca–Sajószentpéter, Sajóivánka–Dusnokpuszta, Felsőzsolca–Sajóivánka, illetve beleesik ebbe a körbe nagyon alacsony jelenlegi terhelhetősége miatt a jóval távolabbi Lőrinci–Nagybátony távvezeték). A szabadvezetékek terhelhetősége a jelenlegi sodrony cseréje nélkül is növelhető szabványosítással, besabályozással, azonban a BVK–Sajószentpéter távvezeték esetén földkábeles szakasz jelenti a szűk keresztmetszetet, ezt csak cserével lehet feloldani.



100. ábra Az ÉMÁSZ 132 kV-os elosztóhálózatának beavatkozást igénylő távvezetékei [75]

A 100. ábrán sárga színezéssel láthatók a beavatkozást igénylő távvezetékek. A Gödöllő – Kerepes kétrendszerű 132 kV-os távvezeték már az ELMŰ ellátási területére esik, ezért ezt csak egy tömör sárga nyíl szimbólummal jeleztük. Az ábra alapjául szolgáló hálózati séma az MVM ÉMÁSZ Áramhálózati Kft szellemi tulajdona.

# ÖSSZEGZETT KÖVETKEZTETÉSEK

## A kutatómunka összefoglalása

Az emberiség történelmét végigkíséri az energia jelenléte. A civilizált ember életének minden szegmensében meghatározó az energia használata. A ma élő urbanizált ember életfeltételei szünnének meg az energia hiányában. Villamos energia nélkül nem működnének az irányító rendszerek, leállna a víz-, gázellátás. Leállna a közlekedés, az ipari és mezőgazdasági termelés. Nem működnének a kommunikációs és biztonsági rendszerek. Az ország-, és rendvédelem sem tudná ellátni a feladatát. Az energia hiánya gazdasági és társadalmi katasztrófához vezetne. A csaknem 8 milliárdnyi populáció folyamatosan növekvő energiaigényének következménye a Föld készleteinek mérhetetlen kizsákmányolása és a bolygónk légkörének veszélyes felmelegedése a globális éghajlatváltozás.

Kutatómunkám célja volt egy olyan hazai villamosenergia-termelő szerkezet kialakításának támogatása, amely hosszú távon, fenntartható módon a klímavédelmi és ellátásbiztonsági szempontok figyelembe vételével, megbízhatóan és biztonságosan kielégíti a hazai felhasználói igényeket.

Az első fő fejezetben tanulmányoztam a korábbi tudományos eredményeket, a hazai és nemzetközi szakirodalmat, és terjedelmes személyesen beszerzett adatot dolgoztam fel. A szekunder kutatás során megvizsgáltam az emberiség jelenlegi és várható energiafelhasználásának hatásait klímavédelmi és fenntarthatósági szempontok alapján. Megvizsgáltam azokat az intézkedéseket és technológiákat, amelyek megoldást jelenthetnek az emberiség életfeltételeinek megőrzésére oly módon, hogy a globális populáció életszínvonala tovább fejlődhessen. A nemzetközi kitekintés analógiájára a hazai viszonyokra szűkítettem a további kutatást. A kutatás eredményeként megállapítottam, hogy a hazai villamosenergia termelő szerkezet két karbonmentesen termelő meghatározó pillére a nukleáris és a fotovoltaiikus technológiák térnyerése lehet. A két technológia előre törésének feltétele a magyar villamosenergia-rendszer felkészítése a villamos hálózat és rugalmas kapacitások fejlesztésével az új rendszerszintű hatásokra.

A második fő fejezetben megvizsgáltam a magyar villamosenergia-rendszer hálózatfejlesztési tervezési folyamatát és elvégeztem egy újszerű villamos hálózati modellezés sorozatot a 2030-ra hivatalosan prognosztizált napelemes erőművi bővülés adatainak alapul vételével. A vizsgálat eredményeként megállapítottam, hogy a jelenlegi hálózatfejlesztési módszertan további finomításra szorul, továbbá a 400 kV-os átviteli hálózat többszörösen hurkolt kialakítása az előzetesen vártnál jóval nagyobb rendszerbiztonságot nyújt. Javaslom a 120 kV-os főelosztó és közép feszültségű elosztó hálózat hurkolt kialakításának vizsgálatát elvégezni.

A harmadik fejezetben a 400 kV-os átviteli hálózat megbízhatósági vizsgálatára dolgoztam ki új módszert, amelynek célja egy többszörösen hurkolt hálózat két végpontja között az átviteli megbízhatósági mutató előállítás. Az eljárás újszerűsége a hálózat leképzése egy összetett gráffá majd ennek egyszerűsítése és a megbízhatósági mutatók kiszámításának módja. Az eddigi gyakorlatban vagy a matematika tudomány oldalról vagy villamosmérnöki tudományos oldalról vizsgálták a gráfot illetve használták fel a gráfelméletet. Együtt a két tudományág illetve szakterület eddig még nem kezelte ilyen komplex módon. Az új eljárásrend matematikai és villamosmérnöki komplex gondolkodás eredményeként született, amelynek célja egy sajátos gráf modell felépítése, amely további speciális gráfműveletekkel alakítható számítási céljainknak megfelelő állapotokra. Az új módszer megmutatja, hogy bonyolult hálózat két pontja között hogyan értelmezhető az üzembiztonság, illetve a gráf sérülései milyen hatással vannak a villamosenergia-átvitelre. Az egyszerűsített, összevont csomópontokra és ágakra újszerűen meghatározott üzembizonytalansági mutatókat állítottam össze, segítségével meghatároztam az átvitel megbízhatóságát.

A negyedik fejezetben a hazai átviteli hálózat szabályozási tartalékigényének meghatározását végeztem el új módszertan megalkotásával. Matematikai valószínűségelméleti módszerek felhasználásával, hatalmas adatmennyiség feldolgozásával vizsgáltam a rendszer egyensúlyvesztéshez vezető folyamatok függvényeit, az egymástól független tényezőket, amelyek különböző hatások előidézői. A matematika és a villamosmérnöki tudományok komplex alkalmazásával olyan új fogyasztói és termelési jelleggörbe modellt alkottam meg, amely a döntéshozás szemléletes eszköze lehet, a szabályozási igény nagyságának, jellegének és időbeliségének meghatározására. 2031. évre kifejezetten kutatási célokat szolgáló

termelési és terhelési modellt hoztam létre, amelynek eredményeként a várható szabályozási igényekre adható egyik lehetséges válaszként egy szivattyús-tározó erőmű villamos rendszerbe illesztési vizsgálatát végeztem el.

A kutatás eredményeinek értékelését követően végeztem el a hipotézisek vizsgálatát és fogalmaztam meg a téziseket valamint az ajánlásokat.

## **Új tudományos eredmények**

### **Tézisek**

### **ÚJSZERŰ FELHŐSÖDÉSI VIZSGÁLAT. A 2030-RA PROGNOSTIZÁLT HAZAI FOTOVOLTAIKUS ERŐMŰVI TELJESÍTMÉNYVÁLTOZÁS HATÁSA AZ ÁTVITELI HÁLÓZAT ÜZEMÉRE**

#### **Az 1. tézis megfogalmazása**

A viszonylag nagy területet érintő homogenitás miatt nem tudja kezelni a szoftver a rendszerben szórványosan megtalálható lokális hálózati gyenge pontokat, amelyek a kellően erős hálózati elemek terhelhetőségét is korlátozzák a maguk szűk keresztmetszetével. Hasonlóképpen nem tudja kezelni a jelenleg alkalmazott vizsgálati módszer az ipari nagyméretű fotovoltaiikus erőművek betáplálásának helyi hatását sem. Célszerű a vizsgálati módszertan tovább fejlesztése oly módon, hogy lokális hálózati szűk keresztmetszeteket és a jelentős nagyságrendű betáplálási pontokat topológiai szempontból is figyelembe lehessen venni a rendszerszintű vizsgálatok során.

A hálózatfejlesztés tervezési folyamat kiinduló adatai egy éven belül is jelentős mértékben megváltozhatnak. A MAVIR 10 évre kitekintő prognózisa 2020-ban 7835 MW fotovoltaiikus teljesítőképességet tartalmazott 2030. évre.[94 p.28] A 2022-ben elérhető MAVIR előrejelzés 2031-re már 11600 MW napelemes kapacitást vetít előre. [68 p.48] Ez azt jelenti, hogy egy év alatt a 2020-ban kiadott hivatalos prognózishoz képest közel 50% - al nőtt a 10 éves kitekintés végére szintén a MAVIR által kiadott napelemes kapacitás bővülési trend.

Az MEKH elvárása, hogy a mindenképpen szükségesnek ítélt hálózati fejlesztések megvalósításához a műszakilag egyenértékű alternatívák közül a legkisebb költséggel járó műszaki megoldást kell választani. Az összehasonlítás az alternatívák CAPEX és OPEX költségeinek figyelembevételével kell, hogy történjen. A legkisebb költségre törekvés elve nem írja felül a kötelezően alkalmazandó tervezési kritériumokat, hanem a

hálózatfejlesztés tervezési folyamat kritérium rendszerén belül értelmezhető. Az előzőekben vizsgált fotovoltaiikus erőmű technológia penetráció kiszámíthatatlanságának kezelésére a hálózatfejlesztési tervezés folyamatában kétféle módszert látok. Az egyik módszer a jelenleginél pontosabb modelleket, jóval több üzemállapotra kiterjedő szimulációkat, jóval pontosabb és hosszabb távú időjárás- és termelési előrejelzést tartalmazhatna. Az előzőekben elvégzett felhősödési vizsgálat igazolta, hogy az általam elvégzettnél jóval részletesebb, komplexebb, bonyolultabb kritériumokra és feltételezhetően nagyságrendekkel nagyobb számítási volumenre lenne szükség, amelyhez sem a megfelelő kapacitás sem az ehhez szükséges bemenő adatok döntő többsége nem áll rendelkezésünkre. A rendszer szinten értelmezhető, összes szóba jöhető problémát okozó lehetséges üzemállapotot lehetetlen vállalkozás lenne felírni.

Az időjárásfüggő villamosenergia-termelés földrajzilag elosztottan jelentkezik. A rendszerbe integrált, várhatóan egyre nagyobb összkapacitású szabályozási tartalékok elosztott és koncentrált elhelyezkedésben lesznek jelen a hálózati topológiában. Azt biztosan ki lehet jelenteni, hogy szabályozási tartalékok jelentős részének csatlakozási pontja nem fog egybe esni az időjárásfüggő termelők hálózati csatlakozási pontjaival, tehát folyamatosan és fokozatosan erősödni fog a hálózat kitétsége a véletlenszerű rendszerszintű hatásoknak.

Az előzőekben elemzett problémák kezelésére a hálózatfejlesztési tervezés folyamatába az összes eddigi kritérium megtartása mellett egy új kritérium bevezetését javaslom, amely a célzottan bevezetett tartalék képzést jelenti. Az eddigiekhez képest ez egy teljesen új módszertani megközelítés lenne. Az előre nem tervezhető hektikusan előforduló hálózati üzemállapotok megoldására ez a tartalék fog mozgásteret biztosítani a hálózati engedélyesek számára, amely a rendszerbiztonságot és ezen keresztül az ellátásbiztonságot fogja szolgálni. A jelenleg még fejlesztés alatt álló, teljesítményelektronikai megoldásokkal megvalósítható mesterséges inercia működéséhez szintén hálózati kapacitástartalék képzésre van szükség. A tartalék képzést a hálózatfejlesztési kritériumok közé emelve lehetőséget ad a hálózat tervezőnek arra, hogy a legkisebb költség elvének betartása ne befolyásolhassa a tartalék műszaki megvalósíthatóságának tervezhetőségét. A legkisebb költség elve ebben az esetben is csak a műszaki alternatívák közötti választásban játszhat szerepet.

A célzott tartalékok hiánya esetén az időjárásfüggő fotovoltaiikus beépített kapacitások rövid idő alatt bekövetkező esetleges drasztikus növekedése azzal a kockázattal jár, hogy az előre nem jelezhető, dinamikus kialakuló hálózati állapotok üzembiztonsági

problémáit nem minden esetben lehet majd operatív beavatkozásokkal megoldani. Illetve az operatív beavatkozásokkal való megoldhatóság (PV visszaterhelés szükségessége) egyre nagyobb mértékben a rendszerszintű szabályozási tartalékok növelését fogja igényelni, azok hiányában ellehetetlenül.

Az elvégzett vizsgálatok eredményei azt igazolták vissza, hogy a hazai 400 kV-os többszörösen hurkolt átviteli hálózat a vártnál jobb eredményt produkált a rendszer megbízhatóság szempontjából.

Másik fontos aspektus, hogy a jelen statikus vizsgálati módszer csak a villamos hálózati elemek rendszerszintű, állandósult állapotú teherbíró képességét vizsgálja, de nem terjed ki a villamos energia rendszer dinamikus vizsgálatára, amely a szabályozási feladat ellátásához szükséges rugalmas kapacitások rendszerszintű viselkedését hivatott modellezni.

### **1. tézis**

*A vizsgálataim a várakozásaimat nem igazolták, tehát negatív eredménnyel zárultak. A jelenlegi hálózatfejlesztési eszköztár nem alkalmas a fotovoltaikus erőművek villamos hálózatra gyakorolt szélsőséges hatásainak vizsgálatára. Nem alkalmas műszaki hiányosságok feltárására. Műszaki-gazdasági-politikai feltételek folyamatos korrekciójával a vizsgálat mindig megfelelő eredményt szolgáltat.*

*Új hálózatfejlesztési módszertant kell kidolgozni, amely kiterjed a részleges felhősödés vizsgálatokra és a hálózati kapacitás tartalékképzésre. A tartalékképzés a nagy rendszerzavartatások és az időjárási havária elviselési képességek javítását is szolgálja.*

*[MF1] [MF3] [MF4] [MF5] [MF6] [MF7] [MF8] [MF9] [MF10] [MF11] [MF12] [MF13] [MF14] [MF15] [MF16] [MF17] [MF18] [MF19] [MF20]*

## **ÁTVITELI HÁLÓZAT ÜZEMBIZTONSÁGI VIZSGÁLATA**

### **A 2. tézis megfogalmazása**

Kidolgoztam egy új eljárást, amelynek célja egy többszörösen hurkolt hálózat két végpontja között az átviteli megbízhatósági mutató előállítás. Az eljárás újszerűsége a hálózat leképzése egy összetett gráffá majd ennek egyszerűsítése és a megbízhatósági mutatók kiszámításának módja. Valójában üzembizonytalanságot számítok, de megbízhatóságot vizsgálok. Az eddigi gyakorlatban vagy a matematika tudomány oldalról vagy villamosmérnöki tudományos oldalról vizsgálták a gráfot illetve használták

fel a gráfelméletet. Együtt a két tudományág illetve szakterület eddig még nem kezelte ilyen komplex módon. Az új eljárásrend matematikai és villamosmérnöki komplex gondolkodás eredményeként született, amelynek célja egy sajátos gráf modell felépítése, amely további speciális gráfműveletekkel alakítható számítási céljainknak megfelelő állapotokra.

A hurkolt hálózat két pontja közötti átvitel megbízhatóságának számítására olyan új módszert dolgoztam ki, amely alkalmas arra, hogy 3 fázisú hurkolt hálózat 1 fázisú helyettesítő kapcsolásán alapuló gráfot minimális csomópontú gráffá egyszerűsítse. Újdonság a gráf egyszerűsítési eljárása. Ez az egyszerűsítés teszi lehetővé egy hurkolt hálózat megbízhatóság számítását újszerű módon. A gráfot olyan módon egyszerűsíttem, hogy az összevonások megbízhatósági mutatóit ki tudjam számolni. Az új módszer megmutatja, hogy bonyolult hálózat két pontja között hogyan értelmezhető az üzembiztonság, illetve a gráf sérülései milyen hatással vannak a villamosenergia-átvitelre.

A gráf felépítése során fontos, a villamosságtanból ismert alapelv, amely szerint a teljes szimmetria miatt az ön és kölcsönös impedancia helyett fázis impedanciát használhatok. A háromfázisú rendszer egyfázisú helyettesítő kapcsolásának referencia pontját elhagyva, csak az átviteli ágakat használom fel a modell alkotáshoz.

A villamosságtani és gráfelméleti megfontolásból, a csomópontok és ágak összevonásával keletkező, egyszerűsített — minimális számú csomópontot és ágat tartalmazó — gráf alkalmas arra is, hogy meghatározzam, mely ágak kiesésekor szűnik meg a villamosenergia-átvitel.

Az egyszerűsített, összevont csomópontokra és ágakra újszerűen meghatározott üzembizonytalansági mutatókat állítottam össze, segítségével meghatároztam az átvitel megbízhatóságát.

## 2. tézis

*Villamos és matematikai megfontolások alapján új módszert dolgoztam ki a hazai 400 kV-os nagyfeszültségű hurkolt hálózat gráffjának egyszerűsítésére, amelyen véges számú üzembizonytalansági vágatokkal meg lehet határozni az átvitel üzembizonytalanságát, megbízhatóságát. [MF1] [MF3] [MF5] [MF8] [MF9] [MF10] [MF11] [MF12] [MF15] [MF16]*



## **A HAZAI ÁTVITELI HÁLÓZAT SZABÁLYOZÁSI TARTALÉKIGÉNYÉNEK VIZSGÁLATA A RENDSZERBIZTONSÁG FENNTARTHATÓSÁG SZEMPONTJÁBÓL**

### **A 3. tézis megfogalmazása**

Megalkottam egy tipikus fogyasztói és tipikus karbonmentes termelői sávot, amelyek a döntéshozók munkáját segíthetik az ellátásbiztonság megőrzésében. A tipikus karbonmentes termelői sávot a hazai szél és fotovoltaikus erőművek termelési görbéinek felhasználásával vettem fel, amelyeket a tavaszi időszak jellemző vasárnapjai közül választottam. A választásom azért esett 2021.04.11-re, mert a fotovoltaikus termelők hazai elterjedtsége számosságban, földrajzi elhelyezkedésben és beépített összes teljesítőképességben már kellően reprezentatív alapnak tekinthető prognózisok készítéséhez. A 2021. 04. 11-i valós szél és fotovoltaikus termelési negyedórás adatokból a 2031. évi előre jelzett beépített teljesítőképesség adatok viszonylatában kapott arányok szorzataival képeztem egy konzervatív és egy ambiciózus termelési adatsort 2031-re. Aránypárként a 2021. évi tény és a 2031-re a MAVIR által prognosztizált beépített kapacitásokat vettem alapul [94].

Az elemzés elsődleges célja a még figyelembe vehető valószínűséggel rendelkező, de extrém szélső állapot vizsgálata. Például egy esetleges válság hatása vagy erőteljes energiahatékonyság növekedés okozhat ilyen jelenséget. Ebben az esetben az első összevetésben azt néztem meg, hogy a 2021. évi felhasználással közel azonos mértékű felhasználói igény esetén 2031. évben a tipikus fogyasztó és tipikus termelő sáv egy grafikonban együtt ábrázolva, hogyan helyezkedik el egymáshoz képest. A nukleáris, a szél és a napelemes erőművek relatív értékeinek kiszámításához a tipikus fogyasztóhoz tartozó 2019.04.14. és 2020.04.05. termelési adatsorok közül mindegyikhez kiválasztottam az adatsorokhoz tartozó legnagyobb negyedórás értékeket, amely 5411 MW-ra és 5053 MW-ra adódott. A nukleáris, a szél és a naperőművek összetartozó negyedórás adatait kumulálva hoztam létre a konzervatív és ambiciózus szumma termelői adatsorokat. A relatív termelői adatsorok kiszámításához a magasabban futó görbe referencia értéknek az 5411 MW, míg az alacsonyabban futó görbe esetén az 5053 MW terhelési csúcsteljesítmény értékeket vettem alapul.

### 3. tézis

*Statisztikai és villamosmérnöki módszerek komplex alkalmazásával megalkottam egy új fogyasztási- és termelési jellegsáv modellt, amely alkalmas a jövőbeli szabályozási igények nagyságának és időbeliségének meghatározására. [MF1] [MF2] [MF3] [MF4] [MF5] [MF6] [MF7] [MF8] [MF9] [MF10] [MF11] [MF12] [MF13] [MF14] [MF15] [MF16] [MF17] [MF18] [MF19] [MF20]*

## **Ajánlások**

**A kutatás tovább fejlesztési lehetőségei** között javaslom az 1.5.5 fejezetben kifejtett „Kiváltható-e az atomerőmű napelemekkel?” témakört gazdaságossági aspektusú vizsgálatokkal kiegészíteni.

Javaslom a hazai hálózatfejlesztési módszertan felülvizsgálatát és szükség szerinti további finomítását.

További fejlesztési iránynak javaslom a felhő és a köd fedettség dinamikus változás hatásának vizsgálatát a villamos hálózat üzemére.

Javaslom az egyszerűsített gráf modell kiterjesztését, és alkalmazását a nemzetközi környezetbe illesztett magyar átviteli hálózat vizsgálatára.

A gráf modell további fejlesztési lehetőségeihez javaslom egy értékelési kritériumrendszer kidolgozását.

Javaslom a 120 kV-os főelosztó és középfeszültségű elosztó hálózat hurkolt kialakításának vizsgálatát elvégezni és a vizsgálat eredményétől függően a szükséges topológiai átalakítások tervezését, előkészítését elkezdeni.

A hálózatfejlesztési tervezés módszertanának és eszköztárának felhasználásával javaslom megvizsgálni a Paks II. erőmű megépítéséhez szervesen kapcsolódó Paks – Albertirsa új nyomvonalú 400 kV-os kétrendszerű távvezeték létesítés esetleges elmaradásának esetére alternatív megoldások vizsgálatát.

## IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Molnár F. (2020.): A karbonmentes energiák térnyerése hazai és globális szinten, Diplomamunka 2019 p. 8; p. 9.
- [2] Molnár F. (2020.): Protection of Critical Infrastructures for Energy Supply, Belügyi Szemle Vol 68. 2020/Special Issue 1., ISSN 2062-9494 (Printed), ISSN 2677-1632 (Online) pp. 63-64.
- [3] Molnár F. (2020.) Az új Nemzeti Energiastratégia vizsgálata a nukleáris energiatermelés szempontjából, Szakdolgozat p. 5-21.
- [4] Bognár B. – Bonnyai T.(2019.): Kritikus infrastruktúrák védelme I. Dialóg Campus Kiadó Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Budapest, ISBN 978-615-5920-36-3 (nyomtatott), ISBN 978-615-5945-28-1 (PDF), ISBN978-615-5945-29-8 (EPUB) pp.15-16.
- [5] Bukovics, I., Csonka, E. (2013): Minőség, fenntarthatóság, biztonság. MŰSZAKI KATONAI KÖZLÖNY (ONLINE) 23:(1), ISSN 2063-4986 (online) p. 303.
- [6] Számadó R. (2018.): Önkormányzatok kiberbiztonságának és online képességének vizsgálata, figyelemmel az emberi tényező fejlesztésének kérdéseire, Doktori értekezés, p. 11.
- [7] Muha L., (2007.): A Magyar Köztársaság Kritikus Információs Infrastruktúráinak védelme, Doktori értekezés, p. 12.
- [8] Munk, S., (2008.): Információbiztonság vs. informatikai biztonság, HADMÉRNÖK különszám , ISSN 1788-1929, pp. 2-3.
- [9] Saáry R., (2021.): A vállalati Biztonság a stakeholder elmélet tükrében, Doktori értekezés, p. 14.
- [10] Bognár B. – Bonnyai (2019.): Kritikus infrastruktúrák védelme I. Dialóg Campus Kiadó Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Budapest, ISBN 978-615-5920-36-3 (nyomtatott), ISBN 978-615-5945-28-1 (PDF), ISBN978-615-5945-29-8 (EPUB) p. 26.
- [11] Molnár F. (2020.): Protection of Critical Infrastructures for Energy Supply, Belügyi Szemle Vol 68. 2020/Special Issue 1., ISSN 2062-9494 (Printed), ISSN 2677-1632 (Online) pp. 67-68.
- [12] Bonnyai T., (2014.): A kritikus infrastruktúra védelem elemzése a lakosságfelkészítés tükrében, Doktori értekezés, Budapest, Nemzeti Közszolgálati Egyetem p. 13.
- [13] Green Paper on an European programme for critical infrastructure protection – COM (2005) 576 final.
- [14] 2011. évi CXXVIII. törvény végrehajtásáról szóló 234/2011. (XI. 10.) kormányrendelet 1. § 25.
- [15] BM Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság (2022.) <https://www.katasztrofavedelem.hu/109/kritikus-infrastrukturak-vedelmevel-osszefuggo-hatosagi-feladatok-jogszabalyok>, Letöltés ideje 04.24. 20:51.
- [16] Sibalin, I., (2017.): Energy Significant Systems and Regulation Relating to the Protection of Facilities Presentation. National Energy and Climate Plan of Hungary, pp.15-25.
- [17] Molnár, F., (2020.): Jövőnk energiája., Biztonságtudományi Szemle, 2. szám 4. ISSN 2676-9042, 106.
- [18] International Energy Agency, World Energy Outlook, (2018), ISSN: 2072-5302; ISBN: 978-92-64-30677-6; OECD/IEA 2018.p.23.
- [19] Hejazi R. (2017.): International Journal of Sustainable Built Environment, Nuclear Energy: Sense or nonsense for environmental challenges. Science Direct 2017. július 08. p.694.
- [20] EPA United States Environmental Protection Agency (2020.):<https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>. Letöltés: 2022.04.24. 22:06.
- [21] Európai Bizottság (2018): A Bizottság közleménye az Európai Parlamentnek, az Európai Tanácsnak, az Európai Gazdasági Szociális Bizottságnak, a Régiók Bizottságának, az Európai Beruházási Banknak, Tiszta bolygót mindenkinek, Európa hosszútávú stratégiai jövőkép egy virágzó, modern, versenyképes és klímasemleges gazdaságról, Brüsszel, 11.28. (COM 2018) 773 Final Center For Climate And Energy Solutions <https://www.c2es.org/content/international-emissions/>.

- [22] British Petrol Energy Outlook, 2020, <https://www.bp.com/en/global/corporate/energyeconomics/energy-outlook.html>.
- [23] Molnár, F., (2020.): A nap és szélenergia integrálása a Villamos Energia Rendszerbe., Energiagazdálkodás, 61. évfolyam. 5-6 szám. ISSN 0021-0757, pp. 8-15.
- [24] International Energy Agency, World Energy Outlook 2019, ISBN 978-92-64-97300-8; ISSN 2072-5302; 2020.p.38-91.
- [25] Molnár, F., (2020.): Ellátásbiztonság a biztonságért, Biztonságtudományi Szemle, 2. szám 3. ISSN 2676-9042, pp. 91-95.
- [26] Csiszárík-Kocsir, Á. (2016a): A nemzetközi és az európai projektfinanszírozási piac átalakulása a válság hatására, Hitelintézeti Szemle, 15. évf. 1. szám, 2016. március, pp. 51–69.
- [27] Csiszárík-Kocsir, Á. (2016b): A megújuló energiaforrások projektfinanszírozása a 2005 és 2015 között végrehajtott tranzakciók alapján, Journal of Central European Green Innovation 4. évf. 3. szám, pp. 127.-141.
- [28] Csiszárík-Kocsir, Á. – Molnár, F. (2019): Energiaigény és projektfinanszírozás – prioritások a múltban és most, Hazai és külföldi modellek a projektoktatásban: Nemzetközi Tudományos Konferencia tanulmánykötete (szerk.: Dr. habil. Koltai László), Budapest, Magyarország, Óbudai Egyetem Rejtő Sándor Könnyűipari és Környezetmérnöki Kar, pp. 415-422. A folyamatosan növekvő.
- [29] Molnár, F., (2020.): Erőművi kapacitás pótlás az ellátásbiztonság és a gazdasági növekedés érdekében, In: Csiszárík-Kocsir, Ágnes; Garai-Fodor, Mónika (szerk.) Vállalkozásfejlesztés a XXI. században X./2. : A környezeti változások és az új kihívások hatásai a szervezetek működésére, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem, Keleti Károly Gazdasági Kar, ISBN 978-963-449-212-2, 354 p., pp. 150-157.
- [30] MAVIR (2020.), A Magyar Villamosenergia- rendszer közép - és hosszútávú forrásoldali kapacitásfejlesztése 2019.; MAVIR-RTO-DOK-0020-00-2019-10-07; p. 10.
- [31] Európai Bizottság (2018.): A Bizottság közleménye az Európai Parlamentnek, az Európai Tanácsnak, az Európai Gazdasági Szociális Bizottságnak, a Régiók Bizottságának, az Európai Beruházási Banknak, Tiszta bolygót mindenkinek, Európa hosszútávú stratégiai jövőkép egy virágzó, modern, versenyképes és klímasemleges gazdaságról, Brüsszel, 11.28. (COM 2018) 773 Final Center For Climate And Energy Solutions <https://www.c2es.org/content/international-emissions/>.
- [32] Rajnai Z., Fregan B. (2016); Kritikus infrastruktúras védelme (jogi szabályozás), Műszaki tudományos közlemények, URI: <http://hdl.handle.net/10598/29102>, XXI. Fialat Műszakiak Tudományos Ülésszaka, Kolozsvár, pp. 349–352; p. 350; DOI: 10.33895/mtk-2016.05. 78.
- [33] A MAGYAR VILLAMOSENERGIA-RENDSZER ADATAI 2019. p. 26. MAVIR (2020.).
- [34] Elemző percek évkönyv (2020.), Paks II. Zrt. ISSN 2786-1961; pp.122-123.
- [35] Paul Dvorak (2017.); An owner’s guide to wind turbine lifetime extensions; Windpower Engineering & Development; An owner’s guide to wind turbine lifetime extensions ([windpowerengineering.com](http://windpowerengineering.com)).
- [37] MAVIR (2022) A magyar villamosenergia rendszer adatai 2021, pp. 12-36.
- [38] Brundtland Commission of the United Nations, (1987.).
- [39] Csiszárík-Kocsir Á. (2016a): A nemzetközi és az európai projektfinanszírozási piac átalakulása a válság hatására, Hitelintézeti Szemle, 15. évf. 1. szám, 2016. március, pp. 51–69.
- [40] Csiszárík-Kocsir Á. (2016b): A megújuló energiaforrások projektfinanszírozása a 2005 és 2015 között végrehajtott tranzakciók alapján, Journal of Central European Green Innovation 4. évf. 3. szám, 127.-141.
- [41] Szigeti C. at. all. (2013): An Analysis of the Time – and Location Related Aspects of the Ecological Footprint Index, International Journal of Business and Management Studies, Volume 02, Number 02, ,pp. 111-118.

- [42] Fazekas A. I. (2005.); Villamosenergia-termelési technológiák jellemzői, Magyar Atomfórum Egyesület ISBN 963 218 8004; p.32.
- [43] Molnár F. (2018.): Az MVM Zrt. szerepvállalása a napenergia hasznosításban - A Felsőzsolcai 20MW-os naperőmű-létesítés tapasztalatai, Energiaforrás, Az MVM Csoport szakmai lapja LIV. évfolyam, 1-2. szám, ISSN1216-4992; HU ISSN 1786-674X(online); p.6.
- [44] Molnár F. (2019.): Túlélésünk záloga a klímavédelem, Az MVM Zrt. szerepvállalása alapvető a Magyar Energiastratégia megvalósításában, Energiaforrás, Az MVM Csoport szakmai lapja LV. évfolyam, 1. szám, ISSN1216-4992, HU ISSN 1786-674X(online); p.17.
- [45] MVM Balance Zrt. Erőmű Távfelügyeleti Rendszer (ETR), (2022.), adatszolgáltatás
- [46] Akkumulátoros Energiatároló Rendszerek Alkalmazása a Mikrogrid Rendszerekben, Védelem Irányítástechnikai Fórum (2020.) november, Infoware zrt. előadás 1.2 dia
- [47] Nemzeti Energiastratégia 2030 dokumentum (2011.).
- [48] Nemzeti Energiastratégia 2030 dokumentum (2020.).
- [49] Aszódi, A.; Boros I., (2015.): Fizikai Szemle 2015 / 11 szám.
- [50] Aszódi A., (2017.): Láncreakció; [https://aszodiattila.blog.hu/2017/09/25/miert\\_a\\_vver-1200\\_technologia\\_t\\_valasztotta\\_magyarorszag\\_a\\_paks\\_ii\\_projekt\\_megvalositasakor](https://aszodiattila.blog.hu/2017/09/25/miert_a_vver-1200_technologia_t_valasztotta_magyarorszag_a_paks_ii_projekt_megvalositasakor).
- [51] Molnár, F. (2021.), Energy security in the context of sustainability at global and domestic level In: IEEE, , (szerk.) 2021 IEEE 25th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES) New York (NY), Amerikai Egyesült Államok : IEEE (2021) pp. 000103-000108. , 6 p. p. 000105.
- [52] A MAGYAR VILLAMOSENERGIA-RENDSZER ADATAI (2018.) pp. 22-25. MAVIR 2019.
- [53] Molnár F. (2020.): Security of Energy Supply with Knowledge of Expected Production and Consumption Trends BELÜGYI SZEMLE: A BELÜGYMINISZTERIUM SZAKMAI TUDOMÁNYOS FOLYÓIRATA , ISSN 2062-9494 (Nyomtatott) ISSN 2677-1632 (Online) DOI: 10.38146/BSZ.SPEC.2020.3.5 68 : 3 SPECIAL ISSUE p. 73.
- [54] International Energy Agency, World Energy Outlook 2020, (2021.), pp.108-199.
- [55] Molnár F. (2022.): A hazai vízenergia hasznosítás legnagyobb blokkjai, Energiaforrás, Az MVM Csoport szakmai lapja LVIII. évfolyam, 2022. 2. szám, ISSN1216-4992; HU ISSN 1786-674X(online); p.6.
- [56] The world's most used renewable power sources. Power Technology (2020.), <https://www.power-technology.com/features/featurethe-worlds-most-used-renewable-power-sources-4160168/>, Letöltés időpontja: 11.17.
- [57] Fáy Árpád (2014.): A vízenergia hasznosításának nemzetközi helyzete, Magyar tudomány - 175. évf. 7. sz. (július)
- [58] 190/(2011.) (IX. 19.) Korm. rendelet az atomenergia alkalmazása körében a fizikai védelemről és a kapcsolódó engedélyezési, jelentési és ellenőrzési rendszerről, p.61.
- [59] British Petrol Statistical Review of World Energy (2021.) 70th edition pp.56-65.
- [60] Gilles at. all. (2017.): Operation of a photovoltaic-wind plant with a hydro pumping-storage for electricity peak-shaving in an island context, Solar Energy 0038-092X ISSN; Volume 157; november 15. p. 21.
- [61] International Energy Agency (2021.), World Energy Outlook 2021.; OECD/IEA p.126.
- [62] Molnár F. (2020.): A hatékonyság növelése a jövő energiaellátásában, Energiaforrás, Az MVM Csoport szakmai lapja LVI. évfolyam, 2. szám, ISSN1216-4992, HU ISSN 1786-674X(online); pp.88-95.
- [63] Guideline for Transmission System Operation (2013 ), (GL TSO). (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32017R1485>)tartalmazza. Korábban a Network Code on Load Frequency Control and Reserves (NC LFC&R) [64] ((Network Code on Load Frequency Control and Reserves (NC LFC&R) [https://documents.acer.europa.eu/Official\\_documents/Acts\\_of\\_the\\_Agency/Annexes/The%20Net](https://documents.acer.europa.eu/Official_documents/Acts_of_the_Agency/Annexes/The%20Net)

- work%20Code%20on%20Load-Frequency%20Control%20and%20Reserves%20submitted%20on%2028%20June%20.pdf.
- [64] Röben F. (2018.): Comparison of European power balancing markets – Barriers to integration, IEEE Xplore: 24 September 2018.; Electronic ISBN:978-1-5386-1488-4; Print on Demand(PoD) ISBN:978-1-5386-1489-1; Electronic ISSN: DOI: 2165-4093; 10.1109/EEM.2018.8469897; pp.3-4; <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8469897>.
- [65] Kádár P. (2019.): Role of the battery storage in the operation of the power system; International IEEE Conference and Workshop: Óbuda on Electrical and Power Engineering (CANDO-EPE); ISBN Information: Electronic ISBN:978-1-7281-4358-3; USB ISBN:978-1-7281-4357-6; Print on Demand(PoD) ISBN:978-1-7281-4359-0; <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9110951> Letöltés ideje 05.22.
- [66] KSH [https://www.ksh.hu/docs/hun/xtabla/infrastruk/tablti10\\_03a.html](https://www.ksh.hu/docs/hun/xtabla/infrastruk/tablti10_03a.html); letöltés 2022.05.28.
- [67] MAVIR (2022): Energia MIX - Erőművi termelés primer források szerinti megoszlása és az import-export szaldó - Bruttó üzemirányítási mérések alapján; <https://www.mavir.hu/web/mavir/energia-mix-eromuvi-termeles-primer-forrasok-szerinti-megoszlasa-es-az-import-export-szaldo-brutto-uzemiranyitasi-meresek-alapjan>.
- [68] MAVIR (2021.) A magyar VER természetviselkedései, pp 48 - 50; [https://www.mavir.hu/documents/10258/239341965/HFT2021\\_A+magyar+VER+term%C3%A9szetviselked%C3%A9sei.pdf](https://www.mavir.hu/documents/10258/239341965/HFT2021_A+magyar+VER+term%C3%A9szetviselked%C3%A9sei.pdf)
- [69] Egado, I. at. all. (2015): Energy storage systems for frequency stability enhancement in small-isolated power systems, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'15) La Coruña (Spain), 25th to 27th March, ISSN 2172-038 X, No.13; p.822.
- [70] Zsiborács H. (2019.): Intermittent Renewable Energy Sources: The Role of Energy Storage in the European Power System of 2040; Electronics 2019,8,729; doi:10.3390/electronics8070729; p.6; <https://www.mdpi.com/2079-9292/8/7/729/htm> letöltés ideje: 05.28.
- [71] MAVIR (2022.) A magyar villamosenergia-rendszer Kereskedelmi Szabályzata, [https://www.mavir.hu/documents/10258/240616343/KSZ\\_t%C3%B6rzssz%C3%B6veg\\_0407t%C5%911.pdf/37495476-d755-b182-f649-b4a06486b84d?t=1652873681527](https://www.mavir.hu/documents/10258/240616343/KSZ_t%C3%B6rzssz%C3%B6veg_0407t%C5%911.pdf/37495476-d755-b182-f649-b4a06486b84d?t=1652873681527) letöltés ideje: 05.28.
- [72] Szeredi I. (2007.) Szivattyús energiatároló (SZET) létesítésének kérdései, RENEXPO 04.20. előadás, 34. dia [http://www.sze.hu/~tothp/Renexpo\\_eloadasok/Szeredi\\_Istvan.pdf](http://www.sze.hu/~tothp/Renexpo_eloadasok/Szeredi_Istvan.pdf)
- [73] Szeredi I. (2009.) Szivattyús energiatárolók helyzete Magyarországon, BME Energetikai Szakkollégium 09.10.; pp.57-84.  
[https://www.eszk.org/attachments/172/ea/SZET\\_helyzete\\_Magyarorszagon\\_2009\\_szeptember\\_10\\_MIN.pdf](https://www.eszk.org/attachments/172/ea/SZET_helyzete_Magyarorszagon_2009_szeptember_10_MIN.pdf).
- [74] MVM DÉMÁSZ adatszolgáltatás (2022).
- [75] MVM ÉMÁSZ adatszolgáltatás (2022).
- [76] EASE, (2020.) European Association for Storage of Energy, <https://ease-storage.eu/energy-storage/technologies/>.
- [77] Bloomberg, NEO (2017.) Bloomberg New Energy Finance, New Energy Outlook.
- [78] World Energy Council, (2018) World Energy Council, (2019.) World Energy Issues Monitor, Global and Regional Perspectives
- [79] Az energetikai létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról (2013), kijelöléséről és védelméről szóló 360/. (X. 11.) Kormányrendelet).
- [80] Európai Tanács szakpolitikák (2022), Az európai zöld megállapodás, <https://www.consilium.europa.eu/hu/policies/green-deal/>; Letöltés ideje: 05.01.
- [81] Hajnal A., Hamburger P.: Halmazelmélet (1989), Tankönyvkiadó Vállalat, Budapest, ISBN 9631823105.
- [82] Vágó I. és Hollós E.: A gráfelmélet alkalmazása villamos hálózatok számítására (1971), Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest, pp.16-19.

- [83] Obádovics J. Gy.: Valószínűségszámítás és matematikai statisztika, Scolar Kiadó, ISBN 9639534005
- [84] Kolcun, M. at. all.: Mathematical Analysis of electrical Networks, Praha (2004), ISBN 80 7300 098 9
- [85] Vágó I: Villamos hálózatok számítása a gráfelmélet alkalmazásával (2014), Akadémia Kiadó, Budapest, , ISBN 978 963 05 9541 4
- [86] Geszti P.O. at. all.(1974.): Villamos Hálózatok I., Budapesti Műszaki Egyetem Villamosmérnöki kar, pp.33-34.
- [87] Benkó I. at. all.(1974.): Villamos Hálózatok II., Budapesti Műszaki Egyetem Villamosmérnöki kar, pp.41-77.
- [88] (2007.) évi LXXXVI. törvény a villamos energiáról, <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0700086.tv> letöltés ideje: 05.28.
- [89] MAVIR (2022.) Üzemi Szabályzat, MEKH H 1140/2022, M27. kiadás:02.23. pp. 236. [https://www.mavir.hu/documents/10258/240509015/USz\\_M27.+kiad%C3%A1s\\_20220430\\_clean.pdf/cac22029-218e-dc3e-80e6-7fd8a255f3e9?t=1648651047100](https://www.mavir.hu/documents/10258/240509015/USz_M27.+kiad%C3%A1s_20220430_clean.pdf/cac22029-218e-dc3e-80e6-7fd8a255f3e9?t=1648651047100) Letöltés ideje: 05.28.
- [90] 273/2007. (X. 19.) Korm. rendelet a villamos energiáról szóló 2007. évi LXXXVI. törvény egyes rendelkezéseinek végrehajtásáról, <https://njt.hu/jogszabaly/>, letöltés ideje: 2022.05.28.
- [91] MAVIR (2021.) Üzemi szabályzat Üzemi szabályzat Irányelvek, Irányelv a 132 kV-os és nagyobb feszültségű hálózatok fejlesztésének tervezésére, Minimális Műszaki Követelmények 5. Változat pp.22) (a MEKH H 2382/2021 sz. határozata szerint); [https://www.mavir.hu/documents/10258/239956514/H%C3%A11%C3%B3zatfejleszt%C3%A9si\\_Irelv\\_+09.02\\_clean.pdf](https://www.mavir.hu/documents/10258/239956514/H%C3%A11%C3%B3zatfejleszt%C3%A9si_Irelv_+09.02_clean.pdf).
- [92] MAVIR (2022.) Üzemi Szabályzat MELLÉKLETEK MEKH H 1140/2022; M27. kiadás / 2022.02.23., [https://www.mavir.hu/documents/10258/240509015/USz\\_M27.+kiad%C3%A1s\\_Mell%C3%A9kletek\\_20220401\\_clean.pdf/d3df8c58-a1fe-ca5c-fdd4-0f6ce44d9d90?t=1645778672398](https://www.mavir.hu/documents/10258/240509015/USz_M27.+kiad%C3%A1s_Mell%C3%A9kletek_20220401_clean.pdf/d3df8c58-a1fe-ca5c-fdd4-0f6ce44d9d90?t=1645778672398).
- [93] Nemzeti Energia- és Klímaterv, Innovációs és Technológiai Minisztérium, [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/hu\\_final\\_necp\\_main\\_hu.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/hu_final_necp_main_hu.pdf)
- [94] MAVIR (2021.): A magyar VER természetviselkedései 2020., MAVIR-RTO-TRV-0043-00-14, p.36.
- [95] MAVIR (2022.): Közlemény A 2022. május 2-i szabad kapacitások publikálásához kapcsolódóan, <https://www.mavir.hu/web/mavir/-/a-2022.-m%C3%A1jus-2-i-szabad-kapacit%C3%A1sok-publik%C3%A11%C3%A1s%C3%A1hoz-kapcsol%C3%B3d%C3%B3an?returnPlid=237657540>.
- [96] MAVIR (2022.): Naptermelés becslés és tény adatok - MAVIR - Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt.; <https://www.mavir.hu/web/mavir/naptermeles-becsles-es-teny-adatok>.

## **ÉRTEKEZÉSSSEL KAPCSOLATOS PUBLIKÁCIÓIM**

- [MF1] Molnár F. (2022): Smart solutions for securing the power supply of smart cities, INTERDISCIPLINARY DESCRIPTION OF COMPLEX SYSTEMS
- [MF2] Molnár F. (2022): A hazai vízenergia-hasznosítás legnagyobb blokkjai, MAGYAR VILLAMOS MŰVEK RT KÖZLEMÉNYEI 58 : 1 pp. 4-18. , 15 p. (2022)
- [MF3] Molnár F. (2021):Energy security in the context of sustainability at global and domestic level, In: IEEE, (szerk.) 2021 IEEE 25th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES); New York, Amerikai Egyesült Államok : IEEE (2021) pp. 000103-000108. , 6 p.; DOI Scopus
- [MF4] Molnár F. (2021):A szemléletformálás jegyében solar parabolákat adományozott az MVM Zrt., MAGYAR VILLAMOS MŰVEK RT KÖZLEMÉNYEI 57 : 1 pp. 46-51. , 6 p. (2021)
- [MF5] Molnár F. (2020):Replenishment of power plant capacity for security of supply and economic growth, MACROTHEME REVIEW: A MULTIDISCIPLINARY JOURNAL OF GLOBAL MACRO TRENDS 9 : 1 pp. 85-108. , 24 p.



- [MF6] Molnár F. (2020):Jövők energiája, BIZTONSÁGTUDOMÁNYI SZEMLE 2 : 4 pp. 105-121. , 17 p.
- [MF7] Molnár F. (2022):A hatékonyság növelése a jövő energiaellátásában, MAGYAR VILLAMOS MŰVEK RT KÖZLEMÉNYEI 56 : 2 pp. 88-96. , 9 p.
- [MF8] Molnár F. (2020):A nap és szél erőművek integrálása a Villamos Energia Rendszerbe, ENERGIAGAZDÁLKODÁS 61 : 5-6 pp. 8-15. , 8 p.
- [MF9] Molnár F. (2020):Erőművi kapacitás pótlás az ellátásbiztonság és a gazdasági növekedés érdekében  
In: Csiszárík-Kocsir, Ágnes; Garai-Fodor, Mónika (szerk.) Vállalkozásfejlesztés a XXI. században X./2. : A környezeti változások és az új kihívások hatásai a szervezetek működésére, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem, Keleti Károly Gazdasági Kar (2020) 354 p. pp. 148-173. , 26 p.
- [MF10] Molnár F. (2020):Security of Energy Supply with Knowledge of Expected Production and Consumption Trends, BELÜGYI SZEMLE: A BELÜGYMINISZTERIUM SZAKMAI TUDOMÁNYOS FOLYÓIRATA (2010-) 68 : 3 SPECIAL ISSUE pp. 67-76. , 10 p., DOI REAL
- [MF11] Molnár F. (2020):Ellátásbiztonság a biztonságért, BIZTONSÁGTUDOMÁNYI SZEMLE 2 : 3 pp. 89-106. , 18 p.
- [MF12] Molnár F. (2020):Protection of Critical Infrastructures for Energy Supply, BELÜGYI SZEMLE: A BELÜGYMINISZTERIUM SZAKMAI TUDOMÁNYOS FOLYÓIRATA (2010-) 68 : 1 SPECIAL ISSUE pp. 63-78. , 16 p., DOI REAL
- [MF13] Molnár F. (2019):Reasons for carbon-free resources and viewing conventional energy supply on the results of a research, In: Fehér-Polgár, Pál; Garai-Fodor, Mónika (szerk.) FIKUSZ 2018 - Symposium for Young Researchers Proceedings, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem, Keleti Károly Gazdasági Kar (2019) 514 p. pp. 289-298. , 10 p.
- [MF14] Molnár F. (2019):The Role of Electricity in Sustainable Energy Supply, POLGÁRI SZEMLE: GAZDASÁGI ÉS TÁRSADALMI FOLYÓIRAT 15 : Special Issue pp. 363-384. , 22 p.,DOI REAL
- [MF15] Molnár F. (2019):Túlélésünk záloga a klímavédelem, az MVM Zrt. Szerepvállalása alapvető a magyar energiastratégia megvalósításában, MAGYAR VILLAMOS MŰVEK RT KÖZLEMÉNYEI 55 : 1 pp. 9-18. , 10 p.
- [MF16] Molnár F. (2019):Tiszta energia a klímaváltozás mérséklésére, In: Csiszárík-Kocsir, Ágnes; Varga, János (szerk.) Vállalkozásfejlesztés a XXI. században – IX/1. tanulmánykötet, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem, Keleti Károly Gazdasági Kar (2019) 259 p. pp. 102-128. , 27 p.
- [MF17] Molnár F. (2019):A hagyományos energia ellátás megítélése egy kutatás eredménye alapján, In: Gubáňová, Monika (szerk.) Legal, Economic, Managerial and Environmental Aspects of Performance Competencies by Local Authorities : 6 th international scientific correspondence conference, Nyitra, Szlovákia : Slovak University of Agriculture in Nitra (2019) 286 p. pp. 170-178. , 9 p.
- [MF18] Molnár F. (2018):Carbon free electricity, In: Fehér-Polgár, Pál; Garai-Fodor, Mónika (szerk.) FIKUSZ 2018 - Symposium for Young Researchers. Abstract Booklet, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem, Keleti Károly Gazdasági Kar (2018) 72 p. p. 49 , 1 p.
- [MF19] Molnár F. (2018):Az MVM Zrt. Szerepvállalása a napenergia hasznosításában: A felsőszolcái 20 mw-os naperőmű-létesítés tapasztala, MAGYAR VILLAMOS MŰVEK RT KÖZLEMÉNYEI 54 : 1-2 pp. 6-19. , 14 p.
- [MF20] Molnár F. (2018):Magyarország biztonságos villamos energia ellátása a hagyományos és a megújuló erőforrásokkal, In: Csiszárík-Kocsir, Ágnes; Garai-Fodor, Mónika (szerk.) Vállalkozásfejlesztés a XXI. században VIII./2. : Makro- és mikrokörnyezeti trendek és kihívások a vállalkozásfejlesztésben, Budapest, Magyarország : Óbudai Egyetem, Keleti Károly Gazdasági Kar (2018) 349 p. pp. 172-186. , 15 p.

## RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

Rövidítések	
1FN	1 fázis - nulla
3F	3 fázis - nulla
aFRR	Automatic Frequency Restoration Reserves
BM	Belügyminisztérium
BVK	Borsodi Vegyi Kombinát
BWR	Boiling Water Reactor
CAPEX	Capital expenditure
CCUS	Carbon Capture, Utilization, and Storage
DÉMÁSZ	Délmagyarországi Áramszolgáltató
DSO	Distribution Network Operator
EASE	European Association for Storage of Energy
EB	Európai Bizottság
EDF	Électricité de France
ELMŰ	Budapesti Elektromos Művek
ÉMÁSZ	Észak-magyarországi Áramszolgáltató
ENSZ	Egyesült Nemzetek Szervezete
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity
EPA	Environmental Protection Agency
EU	Európai Unió
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System
FCR	Frequency Containment Reserves
FORATOM	European Atomic Forum
FP	Fejlesztés Politika
FRR	Frequency Restoration Reserves
GDP	gross domestic product
GE	General Electric
GL TSO	Guideline on Electricity Transmission System Operation
HFT	Hálózatfejlesztési Terv
HTLS	high temperature low sag
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ITO	Independent Transmission Operator
KPI	Key Performance Indicator
MAVIR	MAVIR Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zártkörűen Működő Részvénytársaság
MEKH	Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal
mFRR	Manual Frequency Restoration Reserves
MVM	Magyar Villamos Művek
NBSZ	Nukleáris Biztonsági Szabályzatok
NEKT	Nemzeti Energia- és Klímaterv

OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
P2G	Power to Gas
Prosumer	producers - consumers
PV	photovoltaic
PWR	Pressurized Water Reactor
RR	Replacement Reserves
SB	nyári nappali csúcs
SN	tavaszi ünnepnapai alacsony terhelés
SP	nyári esti csúcs
SZET	szivattyús energia tározós erőmű
TSO	Transmission System Operator
TV	természetviselkedés
tv.	távvezeték
TYNDP	Ten Year Network Development Plan
ÜSZ	Üzemi Szabályzat
VER	magyar villamos energia rendszer
Vhr	végrehajtási rendelet
WEO	World Energy Outlook
WP	téli esti csúcs

## TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat A 2025. évre vonatkozó négy felhősödési scenárió eredménye számszerűsítve. (saját szerkesztés) .....	66
2. táblázat 2030. évre prognosztizált terhelési értékek. (saját szerkesztés) [94].....	68
3. táblázat 2030. évre prognosztizált fotovoltaikus termelési értékek, TSO és DSO együtt. (saját szerkesztés) [94].....	68
4. táblázat A 2030. évre vonatkozó négy felhősödési scenárió eredménye számszerűsítve. (saját szerkesztés) .....	69
5. táblázat: 400 kV-os átviteli hálózat szabadvezetékeinek rendelkezésre nem állása (saját szerkesztés) [37].....	79
6. táblázat: 2031. évben figyelembe vehető 400 kV-os távvezetékek hossza és üzembizonytalansági mutatói, Alállomások megnevezésének rövidítése (saját szerkesztés) [92] .....	82
7. táblázat 400 kV-os primer nagykészülékek üzembizonytalansági mutatói (saját szerkesztés) [37] .....	82
8. táblázat A távvezetékek üzembizonytalansági mutatói. (saját szerkesztés) .....	89
9. táblázat Az üzemképtelenségi vágatmátrix. (saját szerkesztés) .....	97
10. táblázat Az ágak üzembizonytalansága. (saját szerkesztés) .....	100
11. táblázat A szabályozási célú tartalék kapacitások új besorolási rendszere. (saját szerkesztés) [64] .....	113
12. táblázat A fotovoltaikus és szélerőmű beépített teljesítőképesség változása 2015-2021. között. (saját szerkesztés) [37].....	114
13. táblázat A fotovoltaikus és szélerőművek által hálózatba táplált éves villamos energia mennyisége 2015-2021. között. (saját szerkesztés) [37].....	115
14. táblázat A fotovoltaikus és szélerőművek által hálózatba táplált éves maximum teljesítmény értékek 2015-2021. között. (saját szerkesztés) [37] .....	116
15. táblázat A 2015. és 2021. év közötti időszak minimális terhelési értékei. (saját szerkesztés) [67] .....	126
16. táblázat A karbonmentesen termelő erőművi kapacitások 2021. évi beépített teljesítőképesség értékei. (saját szerkesztés) [68] [67] .....	128
17. táblázat A karbonmentesen termelő erőművi kapacitások 2031. évre becsültbeépített teljesítőképesség értékei. (saját szerkesztés) [68] [67] .....	128

18. táblázat A nukleáris, a szél és a fotovoltaikus erőművek teljesítőképességek 2021. évi adataihoz képesti 2031-re prognosztizált növekedési arányai. (saját szerkesztés) [68] [67].....	128
19. táblázat Az átviteli hálózaton előforduló szűk keresztmetszetek. (saját szerkesztés) .....	142
20. táblázat A 132 kV-os elosztóhálózaton előforduló szűk keresztmetszetek. (saját szerkesztés) .....	143

## ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A globális üvegház hatású gázkibocsátás összetétele 2014-ben. (saját szerkesztés EPA, 2020 alapján) [20] .....	17
2. ábra. A globális üvegházhatású gázkibocsátás primer források szerinti összetétele 2013-ban [21] .....	18
3. ábra: A globális szén-dioxid-kibocsátás összetétele 2017-ben (saját szerkesztés WEO 2018 alapján) [18] .....	18
4. ábra A globális szén-dioxid kibocsátás megoszlása és mértéke tüzelőanyagokénti bontásban, 2017-ben és 2040-ben megatonnában megjelenítve (saját szerkesztés WEO 2018 alapján) [18 p.46] .....	19
5. ábra: A globális szén-dioxid kibocsátás összetétele és mértéke ágazatonkénti bontásban, 2017-ben és 2040-ben Mega tonnában megjelenítve (saját szerkesztés WEO 2018 alapján) [18 p.90] .....	20
6. ábra: A globális energiafogyasztás ágazatonkénti megoszlása [22] .....	21
7. ábra: A globális energiafogyasztás régiókénti megoszlása [22] .....	22
8. ábra: Az energiaigény szerkezete a primer források szerint [22] .....	23
9. ábra: A globális primer energia felhasználás arányai 2018-ban (saját szerkesztés WEO 2019 alapján) [24] .....	24
10. ábra A fenntartható fejlődésben a villamosenergia részaránya a végső fogyasztáshoz képest %-ban megadva. (saját szerkesztés WEO 2019 alapján) [24] .....	24
11. ábra: A fenntartható fejlődésben a villamosenergia-termelés primer forrásainak részesedése a teljes előállításon belül TWh-ban megadva. (saját szerkesztés WEO 2019 alapján) [24] .....	25
12. ábra A globális erőműpark kiöregedése és bővítése. (WEO, 2018) [18 p.346] .....	26
13. ábra. Világviszonylatban beépített szélenergia teljesítmények 2001. és 2016. között [35] .....	27
14. ábra Az EU-28 legnagyobb szélenergia kapacitással rendelkező országai 2020-ban [34] .....	28
15. ábra A Villamos Energia Rendszerben maradó források és a várható csúcsterhelés [33] .....	29
16. ábra Az üvegházhatású gázkibocsátási elvárás szerkezeti összetétele a 1,5 °C globális átlaghőmérséklet-növekedés megtartásához [31] .....	32

17. ábra A fejlett és fejlődő gazdaságok trendje a zéró karbon kibocsátás felé a villamosenergia-termelésben [24] .....	35
18. ábra A jelenleg üzemelő atomenergia kapacitások jövője a fejlett gazdaságokban további beruházások nélkül [24 p.91] .....	36
19. ábra A magyar átviteli hálózat [37 p.12] .....	37
20. ábra A rendszerszintű koordinációban résztvevő erőművek 2021. december 31-én [37 p.29] .....	38
21. ábra A Paksi 20,6 MW-os Naperőmű napi termelési diagramja 2020.05.24-én [44] .....	39
22. ábra Az MVM Zrt. tulajdonú nagy megújuló erőművek össztermelése 2020. május 24. és 26. között [44] .....	40
23. ábra Hagyományos és új struktúra a VER-ben [46] .....	41
24. ábra A 2021. év nyári és téli csúcsterhelések [37p.21] .....	44
25. ábra A hazai ipari méretű beépített teljesítőképesség arányai primer energiaforrás szerint 2020. és 2021. december 31-én [37 p.28] .....	45
26. ábra A termelt hazai villamos energia megoszlása 2020. és 2021. években [37 pp.30-31] .....	46
27. ábra A tárolási technológiák csoportosítása [76] [62 p.94] .....	52
28. ábra A globális villamosenergia-termelési szerkezet összetétele 2016-ban és a 2040-es előrejelzés [77] [62 p.95] .....	53
29. ábra A fogyasztói terhelés megoszlása a 2025. évre vonatkozó prognózis szerint, a felhasználás eloszlása az áramszolgáltatói ellátási területek szerint (saját szerkesztés) [94] .....	63
30. ábra A 2025-re prognosztizált maximális napelemes elterjedés eredményeképpen előálló beépített teljesítmények becsült területi eloszlás. (saját szerkesztés) [94] .....	63
31. ábra A 2025-re prognosztizált maximális napelemes elterjedés eredményeképpen előálló beépített teljesítőképességek becsült területi eloszlását érintő Nyugati országrész felhősödése. (saját szerkesztés) [94] .....	64
32. ábra A 2025-re prognosztizált maximális napelemes elterjedés eredményeképpen előálló beépített teljesítőképességek becsült területi eloszlását érintő Északi országrész felhősödése. (saját szerkesztés) [94] .....	64
33. ábra A 2025-re prognosztizált maximális napelemes elterjedés eredményeképpen előálló beépített teljesítőképességek becsült területi eloszlását érintő Keleti országrész felhősödése. (saját szerkesztés) [94] .....	65

34. ábra A 2025-re prognosztizált maximális napelemes elterjedés eredményeképpen előálló beépített teljesítőképességek becsült területi eloszlását érintő Déli országrész felhősödése. (saját szerkesztés) [94] .....	65
35. ábra A VER 400 kV-os átviteli hálózat gráfja a 2031. évre tervezett topológiára (saját szerkesztés) .....	77
36. ábra Hazai 400 kV-os átviteli hálózat gráf modellje 2031. évi tervezett állapotra. (saját szerkesztés) .....	85
37. ábra A hazai 400 kV-os hálózati modell virtuális Budapest körzettel. (saját szerkesztés) .....	85
38. ábra A hazai 400 kV-os hálózati modell virtuális Budapest körzettel, tovább egyszerűsítve. (saját szerkesztés).....	86
39. ábra A hazai 400 kV-os hurkolt hálózat izomorf gráfja. (saját szerkesztés) .....	86
40. ábra A hazai 400 kV-os hurkolt hálózat izomorf gráfja Paks virtuális körzettel. (saját szerkesztés).....	87
41. ábra: A hazai 400 kV-os hurkolt hálózat izomorf gráfjának legegyszerűbb alakja. (saját szerkesztés) .....	87
42. ábra: 1. ág Paks körzet – Hévíz üzemképtelenségi vágat összetevői. (saját szerkesztés).....	90
43. ábra: 2. ág Paks körzet – Litér üzemképtelenségi vágat összetevői. (saját szerkesztés).....	90
44. ábra: 3. ág Paks körzet – Martonvásár üzemképtelenségi vágat összetevői. (saját szerkesztés).....	91
45. ábra: 4. ág Paks körzet – Albertirsa üzemképtelenségi vágat összetevői. (saját szerkesztés).....	91
46. ábra: 5. ág Hévíz – Litér üzemképtelenségi vágat. (saját szerkesztés).....	92
47. ábra:6. ág Hévíz – Győr üzemképtelenségi vágat összetevői. (saját szerkesztés) ....	92
48. ábra:7. ág Litér - Győr üzemképtelenségi vágat. (saját szerkesztés) .....	93
49. ábra:8. ág Litér - Martonvásár üzemképtelenségi vágat. (saját szerkesztés).....	93
50. ábra:9. ág Albertirsa - Martonvásár üzemképtelenségi vágat. (saját szerkesztés) ..	93
51. ábra: 10. ág Győr – Budapest körzet üzemképtelenségi vágat összetevői. (saját szerkesztés).....	94
52. ábra: 11. ág Martonvásár – Budapest körzet üzemképtelenségi vágat. (saját szerkesztés).....	94



53. ábra: 12. ág Albertirsa – Budapest körzet üzemképtelenségi vágat összetevői. (saját szerkesztés).....	94
54. ábra A hazai 400 kV-os átviteli hálózat legegyszerűbb izomorf gráf alakzatának összes üzemképtelenségi vágata. (saját szerkesztés).....	96
55. ábra A hazai 400 kV-os átviteli hálózat legegyszerűbb izomorf gráf alakzatának I. és II. számú vágata. (saját szerkesztés) .....	97
56. ábra: A hazai 400 kV-os átviteli hálózat legegyszerűbb izomorf gráf alakzatának III. és IV. számú vágata. (saját szerkesztés) .....	98
57. ábra: A hazai 400 kV-os átviteli hálózat legegyszerűbb izomorf gráf alakzatának V. és VI. számú vágata. (saját szerkesztés) .....	98
58. ábra: A hazai 400 kV-os átviteli hálózat legegyszerűbb izomorf gráf alakzatának VII. és VIII. számú vágata. (saját szerkesztés).....	98
59. ábra: A hazai 400 kV-os átviteli hálózat legegyszerűbb izomorf gráf alakzatának IX. és X. számú vágata. (saját szerkesztés).....	99
60. ábra: A hazai 400 kV-os átviteli hálózat legegyszerűbb izomorf gráf alakzatának XI. és XII. számú vágata. (saját szerkesztés) .....	99
61. ábra Az I. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzathoz. (saját szerkesztés) .....	100
62. ábra A II. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzathoz. (saját szerkesztés) .....	101
63. ábra A III. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzathoz. (saját szerkesztés) .....	101
64. ábra A IV. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzathoz. (saját szerkesztés) .....	102
65. ábra Az V. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzathoz. (saját szerkesztés) .....	102
66. ábra A VI. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzathoz. (saját szerkesztés) .....	103
67. ábra A VII. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzathoz. (saját szerkesztés) .....	103
68. ábra A VIII. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzathoz. (saját szerkesztés) .....	104
69. ábra A IX. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzathoz. (saját szerkesztés) .....	104

70. ábra A X. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzatból. (saját szerkesztés) .....	105
71. ábra A XI. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzatból. (saját szerkesztés) .....	105
72. ábra A XII. üzemképtelenségi vágat ágai a legegyszerűbb izomorf gráf alakzatból. (saját szerkesztés) .....	106
73. ábra A különböző szabályozási tartalékok működésének időbeli lefutása [65] .....	114
74. ábra: A fotovoltaikus erőművek beépített teljesítőképesség változása 2015-2021. között. (saját szerkesztés) [37].....	115
75. ábra: A fotovoltaikus erőművek beépített teljesítőképesség változása 2015-2021. között. (saját szerkesztés) [37].....	115
76. ábra: A fotovoltaikus és szél erőművek által hálózatba táplált éves villamos energia mennyisége 2015-2021. között. (saját szerkesztés) [37] .....	116
77. ábra A fotovoltaikus és szél erőművek által hálózatba táplált éves maximum teljesítmény értékek 2015-2021. között. (saját szerkesztés) [37] .....	116
78. ábra Az ipari és HMKE méretű fotovoltaikus erőművek teljesítőképesség arányának változása a hazai termelő szerkezetben belül. (saját szerkesztés) [37].....	117
79. ábra: A Paksi 20,6 MW-os naperőmű termelési görbéje 2022.05.02-án. (saját szerkesztés) [45] .....	118
80. ábra: Az MVM Zrt. nagyméretű megújuló portfólió 2022.05.01. és 2022.05.02. közötti kumulált termelési görbéje. [45].....	118
81. ábra: A 2021. évi FRR le- és felszabályozási rendszerszintű negyedórás átlag teljesítmények éves alakulása (saját szerkesztés) [37].....	119
82. ábra: A 2015. és 2021. évi FRR le és felszabályozás értékek diszkrét valószínűségi eloszlása. (saját szerkesztés) [37] .....	120
83. ábra: A 2015. és 2021. évi FRR le és felszabályozás értékek diszkrét valószínűségi eloszlásfüggvénye. (saját szerkesztés) [37] .....	120
84. ábra FRR LE – FEL 1/10 p-kvantilisek alakulása 2015. és 2021. közötti időszakban. (saját szerkesztés) [37].....	121
85. ábra: A 2015. és 2021. évben igénybe vett különböző típusú szabályozási energia mennyiségek. (saját szerkesztés) [37].....	122
86. ábra: Rendszerszintű relatív terhelési görbék alakulása 2015. és 2021. között, téli időszak jellemző napok negyedórás átlagértékei alapján. (saját szerkesztés) [67].....	124

87. ábra: Rendszerszintű relatív terhelési görbék alakulása 2015. és 2021. között, tavaszi időszak jellemző napok negyedórás átlagértékei alapján. (saját szerkesztés) [67].....	124
88. ábra: Rendszerszintű relatív terhelési görbék alakulása 2015. és 2021. között, nyári időszak jellemző napok negyedórás átlagértékei alapján. (saját szerkesztés) [67].....	124
89. ábra: Rendszerszintű relatív terhelési görbék alakulása 2015. és 2021. között, őszi időszak jellemző napok negyedórás átlagértékei alapján. (saját szerkesztés) [67].....	124
90. ábra Rendszerszintű relatív terhelési görbék alakulása 2015. és 2021. között, tavaszi időszak jellemző vasárnapok negyedórás átlagértékei alapján. (saját szerkesztés) [67]	126
91. ábra A 2015. és 2021. közötti tavaszi időszak jellemző vasárnapok relatív görbéi közül a legmagasabb és legalacsonyabb értéken futó egy-egy görbe. (saját szerkesztés) [67].....	127
92. ábra VER relatív (2031 $\Sigma$ PV, Szél, Nukl.) termelés és (2019-2020)terhelés Szezonális jellemző napi negyedórás átlagértékek min.-max. görbék; TAVASZ, PIHENŐNAP (VASÁRNAP) (saját szerkesztés) [68] [67] .....	130
93. ábra VER relatív (2031 $\Sigma$ PV, Szél, Nukl.) termelés és (2019-2020) terhelés Szezonális jellemző napi negyedórás átlagértékek 10 és 14 óra közötti maximum görbék alatti területek; TAVASZ, PIHENŐNAP (VASÁRNAP) (saját szerkesztés) [68] [67]	131
94. ábra VER relatív (2031 $\Sigma$ PV, Szél, Nukl.) termelés és tipikus 2031. terhelés Szezonális jellemző napi negyedórás átlagértékek min.-max. görbék növelt referencia értékkel; TAVASZ, PIHENŐNAP (VASÁRNAP) (saját szerkesztés) [68] [67] .....	132
95. ábra VER relatív (2031 $\Sigma$ PV, Szél, Nukl.) termelés és tipikus 2031. terhelés Szezonális jellemző napi negyedórás átlagértékek 10 és 14 óra közötti maximum görbék alatti területek; TAVASZ, PIHENŐNAP (VASÁRNAP) (saját szerkesztés) [68] [67]	133
96. ábra A MAVIR által közzétett ipari méretű napelemes termelés becslült és tény adatai közötti eltérés évenkénti bontásban (saját szerkesztés).....	135
97. ábra A villamos energia tárolási technológiák rendszerező összehasonlítása [69]	136
98. ábra A SZET csatlakozása a 400 kV-os átviteli hálózathoz. (saját szerkesztés) ....	139
99. ábra A DÉMÁSZ 132 kV-os elosztóhálózatának beavatkozást igénylő távvezetékei. MVM DÉMÁSZ adatszolgáltatás [74] .....	144
100. ábra Az ÉMÁSZ 132 kV-os elosztóhálózatának beavatkozást igénylő távvezetékei [75].....	146

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretnék köszönetet mondani Prof. Dr. Rajnai Zoltán témavezetőmnek, akire minden körülmények között számíthattam.

Köszönetet kell mondanom Dr. Csiszárík-Kocsir Ágnesnek, aki kezdeményezte felém a doktori képzésben való részvételt.

Megköszönöm az Óbudai Egyetem Biztonságtudományi Doktori Iskola és a Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Villamosenergetikai Intézet együttműködő oktatóinak és támogató munkatársainak minden segítségét.

Köszönöm a komplex vizsgabizottság tagjainak Prof. Em. Dr. Berek Lajos, Prof. Dr. Kovács Tibor, Dr. Kiss Sándor maximálisan szakmai, emberi és kollegiális hozzáállását. Köszönöm a magas színvonalú szakértői együttműködést dr. Bürger Lászlónak, Dr. Fazekas András Istvánnak, Dr. Tihanyi Zoltánnak, Romhányi Zoltánnak és Prof. Dr. Imre Attilának.

Köszönöm az opponensi és a szakmai támogatást Dr. Velencei Jolánnak, Dr. Pálfi Judithnak, Prof. Dr. Novothny Ferencnek, Prof. Dr. Kádár Péternek és Dr. Szűcs Endrének.

Szeretném megköszönni minden együttműködő doktorandusz társam csapatmunkáját.

Köszönöm Dr. Kiss Csaba, Csorba Sándor és Fáber Dániel kollégáimnak a munkahelyi támogatást és együttműködést.

Szeretném nagyon megköszönni kislányomnak Molnár Emese Lillának és a nagylányomnak Molnár Mária Flóranak a türelmét és a megértését, amelyet a tanulmányaimra fordított szabadidő alatt tanúsítottak.