



ÓBUDAI EGYETEM

Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Villamosenergetikai Intézet

SZAKDOLGOZAT

ÓE-KVK

Hallgató neve:

Tolvaj Erika

2021.

Hallgató törzskönyvi száma:

T002065/FI38878/K

Kötelezően választható tantárgycsoport: Villamosenergia rendszerek



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Villamosenergetikai Intézet

SAKDOLOGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Tolvaj Erika

Szakdolgozat száma: SZD21022212249641

Törzskönyvi száma: T002065/FI38878/K

Neptun kódja: XXXXXXXXXX

Szak: Villamosmérnök BSc

Specializáció: Villamosenergia-rendszerek modul
Villamos-energetikai

A dolgozat címe: Napelemes energiatermelés esetén alkalmazható feszültség szabályozási lehetőségek kis- és közép feszültségű hálózatokon

A dolgozat címe angolul: Voltage control options on a low- and a medium voltage network in case of solar energy production

A feladat részletezése:

1. Ismertesse a naperőművek hálózatra csatlakozásával kapcsolatos magyarországi előírásokat, az engedélyeztetés menetét!
2. Ismertesse a kis- és közép feszültségű hálózatok feszültségminőségi viszonyaira vonatkozó szabványos előírásokat!
3. Melyek a napelemes energiatermelés hatására — a kis- és a közép feszültségű elosztóhálózaton — kialakuló feszültség problémák és adjon áttekintést a probléma megoldására alkalmazható módszerekről!
4. Modellezze a Neplan szoftver segítségével naperőművek kis- és közép feszültségű hálózatra történő csatlakozása esetén felmerülő feszültség problémákat és a javasolt megoldásokat!

Intézményi konzulens neve: Morva György Ádám

A kiadott téma elévülési határideje:

Beadási határidő: 2021. 12. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2021. 12. 03.

P.H

.....
Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom:

.....
belső konzulens

.....
külső konzulens



ÓBUDAI EGYETEM**Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar**

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott hallgató kijelentem, hogy a szakdolgozat saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült szakdolgozatban található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Budapest, 2021.12.13.

.....
hallgató aláírása

Napelemes energiatermelés esetén alkalmazható
feszültség szabályozási lehetőségek kis- és közép feszültségű hálózatokon

Tolvaj Erika

témavezető:

Dr. Morva György Ádám

Óbudai Egyetem, Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar

2021.12.13.

Tartalomjegyzék

1. Összefoglaló	7
2. Abstract.....	9
3. Napelemes energiatermelés	11
3.1. Napelemes energiatermelés leírása (röviden), előnyei, hátrányai [1.] [2.] [3.]	11
3.2. Napelemes rendszerek elemei [4.]	12
3.2.1. Napelemek típusai [5.] [6.] [7.].....	13
3.2.2. Inverterek [4.]	15
3.2.3. Tartószerkezetek [9.]	15
3.3. Naperőművek típusai (VET alapján) [8.].....	16
3.4. Helyszínválasztás, tájolás [2.].....	16
4. Elosztóhálózatok típusai.....	17
4.1. Hálózattípusok [10.].....	17
4.2. Hálózatalakzatok [10.]	17
4.2.1. Sugaras hálózat	18
4.2.2. Íves hálózat	19
4.2.3. Gyűrűs hálózat	19
4.2.4. Körvezeték	19
4.2.5. Párhuzamos vezeték.....	20
4.2.6. Hurkolt hálózat	21
5. Csatlakoztatás elosztóhálózatra.....	22
5.1. Elosztóhálózatra csatlakoztatás feltételei, a csatlakoztatás folyamata	22
5.1.1. HMKE csatlakoztatása [12.] [13.]	22
5.1.2. Kiserőművek csatlakoztatása [14.]	28
5.2. Csatlakoztatható inverterek.....	30
6. Az MSZ EN 50160:2021 szabvány ismertetése [15.].....	32
6.1. Fogalommeghatározások.....	33
6.2. A kiefeszültségű táplálás jellemzői	33
6.2.1. Folyamatos jelenségek.....	33
6.2.2. Feszültségesemények.....	36
6.3. A közepfeszültségű táplálás jellemzői	36
6.3.1. Folyamatos jelenségek.....	37
6.3.2. Feszültségesemények.....	39
7. Elosztóhálózatra csatlakozó naperőművek hatásai [16.] [17.]	40
7.1. Fordított teljesítményáramlás.....	40
7.2. Feszültségemelkedés	40
7.3. Veszteségek növekedése	42
7.4. Aszimmetria, energiaminőségi problémák.....	42
7.5. Növekvő meddőteljesítmény-áramlás.....	43
8. Feszültségszabályozási lehetőségek az elosztóhálózaton	44
8.1. Feszültségszabályozási lehetőségek kiefeszültségű hálózaton.....	44
8.1.1. Soros feszültségszabályozás – LVR [18.] [19.].....	44
8.1.2. Statikus kondenzátorok [11.]	46
8.1.3. Hálózat átrendezése [20.].....	47
8.1.3.1. Hálózatkép javítás	47

8.1.3.2.	Vezetékcseré, alátámasztás.....	48
8.1.3.3.	Új vezetékek létesítése	49
8.1.3.4.	Új Köf/Kif táppont létesítése, körzet átrendezése	50
8.2.	Feszültségszabályozási lehetőségek közepfeszültségű hálózaton[2.][4.]	50
8.2.1.	Szabályozható transzformátorok.....	50
8.2.2.	Szinkron generátorok gyors szabályozói [11.]	52
9.	Kisfeszültségű vizsgálat	54
9.1.	Modell	54
9.2.	Loadflow szimuláció	56
9.2.1.	Alapeset: 0%-os napelemes beépítettség	57
9.2.2.	2.eset: 25%-os PV penetráció:	60
9.2.3.	3.eset: 50%-os PV penetráció	62
9.2.4.	4.eset: 75%-os PV penetráció:	64
9.3.	Kisfeszültségű vizsgálat eredménye	66
10.	Közepfeszültségű vizsgálat.....	68
10.1.	A hálózat bemutatása.....	68
10.2.	Loadflow szimuláció	70
10.3.	A vizsgálat kiértékelése	71
11.	Összegzés.....	72
12.	Summary.....	73
13.	Források.....	73
14.	Ábrajegyzék.....	75
15.	Függelék.....	76

1. Összefoglaló

A 20. században főként fosszilis és nukleáris energiahordozókból állítottak elő villamos energiát, a villamosenergia-rendszer ezek szállítására lett tervezve. A villamosenergia-hálózat annak figyelembevételével lett kiépítve, hogy ezek az erőművek jellemzően nagy teljesítménnyel működnek és nagy fogyasztói körzeteket látnak el. Az energiaáramlás iránya ebből adódóan az erőművektől a fogyasztók irányába történt. A jelenleg használt eszközök is ennek megfelelően működnek.

Az utóbbi évtizedekben egyre inkább teret hódítanak a megújuló energiaforrást hasznosító rendszerek. Folyamatosan nő a lakossági fogyasztók igénye a fenntartható, környezetkímélőbb megoldások iránt. Az új típusú erőművek viszont új kihívások elé állítják a villamos hálózatot, hiszen többnyire a felhasználás helyén termelik a villamos energiát, ezáltal megváltozhat az energiaáramlás iránya, illetve a feszültségeloszlás is.

Szakdolgozatom elején röviden ismertetem a napelemes energiatermelés főbb jellemzőit, a napelemes rendszerek elemeit és a különböző napelem típusokat, majd bemutatom a hazánkban kialakult elosztóhálózat típusokat.

Ezután foglalkozom a háztartási méretű kiserőművek és a kiserőművek elosztóhálózatra való csatlakoztatásának műszaki feltételeivel és jogszabályi háttérével. Ismertetem az E.ON területére vonatkozóan az engedélyeztetés menetét.

Külön fejezetben foglalkozom az MSZ EN 50160:2021 A közcélú elosztóhálózatokon szolgáltatott villamos energia feszültségjellemzői szabvány értelmezésével, bemutatom a kis- és középfeszültségű hálózatokra vonatkozó feszültségminőségi előírásokat.

Dolgozatom nagyobb hányadát teszik ki a naperőművek nagymértékű elterjedésének következményeivel foglalkozó fejezetek. Ebben a részben bemutatom, milyen hatásai vannak a villamosenergia-rendszerre (kis- és középfeszültségű hálózat) a napelemes erőművek, majd a szakirodalom alapján ismertetem, milyen feszültségszabályozási lehetőségeink vannak jelenleg a kiefeszültségű és a középfeszültségű hálózatokon.

Ezután Neplanban elkészített hálózati modellek segítségével, Loadflow szimulációkon keresztül konkrét példákon prezentálom a feszültségeloszlási problémákat és javaslatot teszek azok megoldására is. Külön foglalkozom egy kiefeszültségű és külön egy közepfeszültségű modellel.

2. Abstract

In the 20th century the energy generation mainly used fossil and nuclear energy sources, the electricity system was planned according to this. The electricity distribution network has been built with in mind that these power plants typically operate at high capacity and supply large consumer areas. The direction of energy flow has therefore been from power plants to consumers. The currently used tools work accordingly.

In the recent decades renewable energy systems have become more widespread. The demand for sustainable, more environmentally friendly solutions for residential consumers is constantly growing. The new types of power plants bring new challenges to the electricity distribution network however, as they mostly generate electricity at the point of use, which can also change the direction of energy flow and voltage distribution.

At the beginning of my thesis, I briefly describe the main characteristics of solar energy production, the elements of solar systems and the different types of solar cells, then I present the types of distribution networks developed in Hungary.

Later I will deal with the technical conditions and legal background for the connection of household-sized small power plants and small power plants to the distribution network. I describe the licensing process in the supply area of E.ON.

In a separate chapter I deal with the interpretation of the MSZ EN 50160: 2021 Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, and the voltage quality regulations for low and medium voltage networks.

The major part of my thesis is the chapters dealing with the consequences of the large-scale spread of solar power plants. In this part I present the effects of solar power plants on the electricity system (low and medium voltage network) and then, based on the specialist literature, describe the voltage regulation options we currently have on low and medium voltage networks.

Then, with the help of network models made in Neplan, I present the voltage distribution problems through concrete examples through Loadflow simulations and I also propose solutions to them. I deal with a low voltage model and a medium voltage model separately.

3. Napelemes energiatermelés

3.1. Napelemes energiatermelés leírása (röviden), előnyei, hátrányai [1.] [2.] [3.]

Napjainkban egyre nagyobb népszerűségnek örvend a napelemes energiatermelés. A napelemes energiarendszerek száma évről évre növekedő tendenciát mutat, 2019-ben lakossági fogyasztók 14 448 darab napelemes háztartási méretű kiserőművet (HMKE) kapcsoltak be a hálózatra, 93MW összteljesítménnyel. A Magyar Energetikai és Közműszabályozási Hivatal (tov.: MEKH) által közzétett adatok alapján a 2019-es évben az ELMŰ területén volt a legnagyobb mértékű a növekedés.

A napelemes energiatermelő rendszerek népszerűségének oka számos előnyében rejlik. Nagy előnye, hogy a napenergia korlátlan mennyiségben rendelkezésünkre áll, megújuló energiaforrásként tekintünk rá. Nem csak napos időben termelhetünk vele villamos energiát, hanem felhős időben, vagy akár télen is üzemelnek, igaz, csökkentett kihasználtsággal (kb. 50-90 %-os)

A napelemes rendszerek telepítése hosszú távon jól tervezhető megtérülést jelent, hiszen miután megtermelte a bekerülési költségét, már bevételt termelünk vele. A rendszer telepítése ugyan nem olcsó, viszont számos pályázati támogatásra igényt tarthatunk, amelyekkel csökkenthetjük a kezdeti magas kiadásokat.

Az eddigi tapasztalatok, illetve a gyártók által vállalt garanciák alapján a napelemek rendkívül tartósak, akár 25 éven keresztül is alkalmasak funkciójuk betöltésére. A rendszer üzemeltetése nem igényel nagy figyelmet, minimális a karbantartási igénye. Elegendő évente egyszer ellenőrizni a készülékeket.

Kiemelt jelentőségű érv a napelemes rendszerek mellett a környezetbarát technológia, illetve a zajmentesség, ugyanis használatuk nem jár zajterheléssel. Működésük közben nem bocsátanak ki káros anyagot, üzemanyagukat, azaz a napenergiát nem kell előállítani és a felhasználás helyére szállítani, ami szintén csökkenti a környezeti terhelést.

Természetesen nem csak előnyökkel, hanem hátrányokkal is jár a napelemes energiatermelés. Tény, hogy felhős időben is üzemelnek, viszont az optimális működésük időjárásfüggő. Hátránya továbbá, hogy speciális a helyszükséglete ezeknek a rendszereknek. Megfelelő tájolású és dőlésszögű telepítés szükséges a megfelelő működésükhöz.

A hálózat szempontjából hátrányt jelent a nagy mértékű napelemes penetráció, ugyanis számos negatív hatást gyakorolhatnak, úgy, mint a feszültségemelkedés, veszteségek növekedése, energiaminőségi problémák, növekvő meddőteljesítmény-áramlás.

3.2. Napelemes rendszerek elemei [4.]

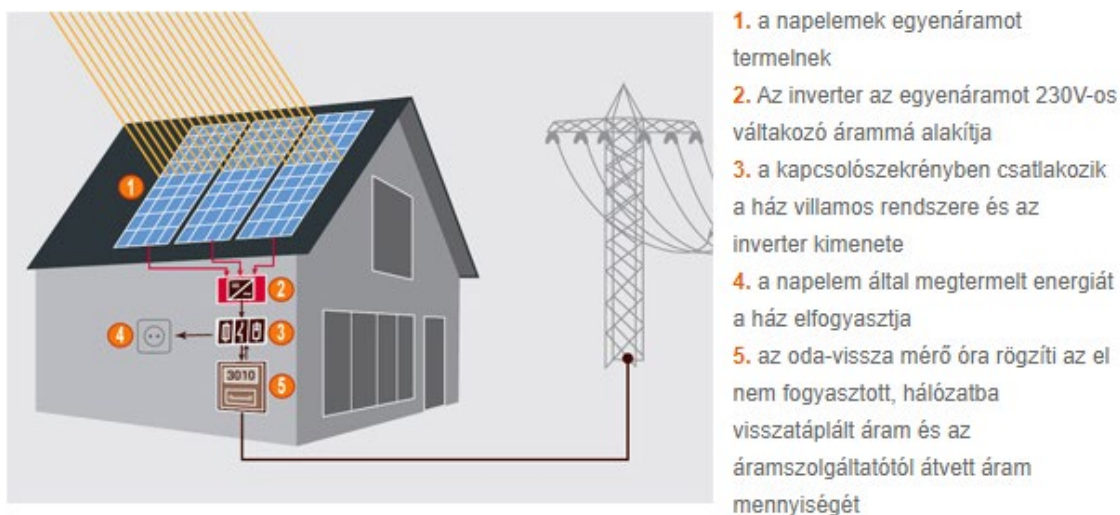
Ebben az alfejezetben röviden ismertetem a napelemes rendszerek elemeit.

Attól függően, hogy a napelemes rendszer csatlakozik-e a villamos hálózatra, kétféle rendszertípust különböztetünk meg: a szigetüzemben üzemelő és a hálózatra kapcsolt (szinkron üzemű) rendszert.

A szigetüzemben működő rendszerek akkumulátorral, tehát energiátároló kapacitással rendelkeznek, az elosztóhálózattól független, önálló egységek. Olyan területeken célszerű az alkalmazásuk, ahol nincs kiépített villamosenergia-hálózat. Az akkumulátorok viszonylag rövid élettartama miatt ennél a megoldásnál számolni kell azok cseréjének többletköltségével a megtérülés számításakor. Mivel a napelemes energiatermelés erősen időjárásfüggő, így a téli időszakban szükséges lehet egy generátor alkalmazása is.

Amennyiben van kiépített villamosenergia-hálózat a telepítés helyén, úgy gazdaságosabb és korszerűbb megoldást célszerű választani, a szinkron üzemet. Ha a pillanatnyi villamosenergia termelés meghaladja az éppen igényelt mennyiséget, akkor a többletnek a hálózatba történik a betáplálása. Az elosztói engedélyes biztosítja az ad-

vesz mérőt, és lehetőséget biztosítanak arra, hogy éves elszámolás keretében figyelembe vegyék a nyáron megtermelt többlet energiát a téli időszakban.



1. ábra A hálózatra kapcsolt napelemes rendszer felépítése és kapcsolódása

3.2.1. Napelemek típusai [5.] [6.] [7.]

A napelemek működésének alapja, hogy a félvezető anyagban szabad töltéshordozókat keltenek a napsugárzás fotonjai, majd az elektromos tér elvégzi ezek szétválasztását negatív és pozitív töltéshordozókká.

A napelemek egyik legfontosabb jellemzője a hatásfok, melyet a következő képlet alapján számíthatunk:

$$\eta = \frac{P_m}{E * A_c}$$

amely képletben a P_m a leadott maximális teljesítménye (W), E a napsugárzás felületi teljesítménysűrűsége (W/m^2), és A_c a napelem felülete (m^2).

A napelemek főbb csoportjai a technológiájuk alapján a kristályos és a vékonyfilm-rétegű napelem. Előbbi szintén felosztható két csoportra: mono- és polikristályos típusokra.

Jelenleg hazánkban a legelterjedtebbek a kristályos napelemek. Az alábbiakban röviden kívánom ismertetni az egyes napelem típusok legfőbb jellemzőit.

A kristályos napelemek fő alkotóelemei a nagy tisztaságú szilícium cellák, amelyeket sorba kötnek egymással és vízszintesen helyeznek el egy műanyag hátlap és egy üveg előlap közé.

A kristályos napelemek csoportján belül megkülönböztetünk monokristályos és polikristályos cellájú napelemeket, amelyek a szilícium tömbök előállítási módjában különböznek egymástól.

A monokristályos napelemek esetén a szilíciumot elektromos térbe helyezik és henger alakúra húzzák, majd a szilícium egy tömbben fog megdermedni. Utóbbi miatt nevezik ezt a típust monokristályosnak. A cellák éleit a henger alakú tömbökből levágják, mivel így könnyebben elhelyezhetők a napelem modulokon.

A polikristályos napelemek úgy készülnek, hogy a cellákat négyzet alakú tömbökbe öntik ki, mivel így a szilícium több kristályban fog megdermedni, innen a „poli” elnevezés.

A mono- és a polikristályos napelemek könnyen megkülönböztethetők egymástól, ugyanis a monokristályos cellák nyolcszögletűek, míg a polikristályosok négyzet alakúak.

A két napelemtípus között csekély különbség adódik, hatásfokuk közel azonos, 15% körül adódik.

A vékonyfilm-rétegű napelemek egyik előnye a rövidebb gyártási idő, mivel ebben az esetben a hordozórétegre kerül felgőzölésre a félvezető réteg. Másik nagy előnye éppen a gyártási technológiának köszönhetően, hogy hajlékony napelemek is készülhetnek, amely lehetővé tesz többretű felhasználást. Előállítási költségük alacsonyabb, mint a kristályos napelemeké, viszont hatásfokuk kisebb, körülbelül 5-8%-

os. Éppen a kisebb hatásfoknak köszönhetően nagyon területet is igényelnek, így családi házak esetében nem elterjedt technológia.

3.2.2. Inverterek [4.]

Napelemes energiatermelés esetén az inverterek segítségével alakítható át a megtermelt egyenáram váltakozó árammá. Ezt a váltakozó áramot tudják hasznosítani a háztartások elektromos eszközei, illetve ez táplálható vissza a hálózatba.

A hálózati invertereknek az áram átalakításán túl egyéb funkciói is vannak. Szinkronizálja a váltakozó áramot a villamos hálózaton előírt értékekhez, ezen túl védelmi szerepköre is van. Amennyiben az inverterek monitoring rendszerrel vannak ellátva, lehetőséget nyújtanak a mért értékek (pl. a termelt áram mennyisége) számítógépen vagy okos eszközön történő követésére, elemzésére.

3.2.3. Tartószerkezetek [9.]

A tartószerkezetek elsődleges feladata a napelemtáblák és a kapcsolódó tartozékok megfelelő és tartós rögzítése, illetve a tartószerkezetek segítségével állítható be a táblák lehető leghatékosabb dőlésszöge a minél magasabb hatásfok érdekében. A tartószerkezetek felé az egyik legfontosabb minőségi elvárás, hogy rozsdamentes anyagból készüljenek és hőtágulási tulajdonságaik is optimálisak legyenek, hiszen hosszú távon ellen kell álljanak az időjárás viszontagságainak.

Funkciójuk alapján megkülönböztetünk háromféle tartószerkezet típust: ferde tetőre szerelt, lapos tetőre szerelt és földre szerelt tartószerkezetet.

A ferde tetőre szerelt tartószerkezetek esetében alapvető elvárás a tető megfelelő állapota, hiszen hosszú távon el kell bírnia a rá szerelt napelemes rendszer elemeit, így érdemes még a tervezési fázisban bevizsgáltatni a tető állapotát.

Lapos tetők esetén két szerelési megoldást különböztetünk meg: a lesúlyozott- és a lehorganyzott szerkezetet. Előbbi esetben a tartószerkezetet betonsúlyokhoz rögzítik, míg az utóbbinál magához a lapos tetőhöz.

A földre szerelt tartószerkezetek lehetnek földre cölöpözött, horganyzott szerkezetek, talajcsavaros szerkezetek vagy napállást követő szerkezetek.

3.3. Naperőművek típusai (VET alapján) [8.]

A 2007. évi LXXXVI. törvény a villamos energiáról alapján megkülönböztetünk kiserőművet és háztartási méretű kiserőművet, melyekre szigorú előírások vonatkoznak.

A törvény alapján háztartási méretű kiserőmű „olyan, a kisfeszültségű hálózatra csatlakozó kiserőmű, melynek csatlakozási teljesítménye egy csatlakozási ponton nem haladja meg az 50 kVA-t.”

Kiserőmű pedig, az „50 MW-nál kisebb névleges teljesítőképességű erőmű.

3.4. Helyszínválasztás, tájolás [2.]

Napelemes rendszerek telepítése előtt nagy jelentőséggel bír a megfelelő helyszín kiválasztása. Mivel a napelemek akkor termelnek a legoptimálisabban, ha nem árnyékolja le őket semmilyen tereptárgy, így arra kell törekedni, hogy olyan helyszínt válasszunk, ahol a napelemtáblákra nem vetül semmilyen árnyék.

Magyarország földrajzi elhelyezkedéséből adódóan a legcélszerűbb a napelemtáblákat déli tájolással, 35°-os dőlésszöggel telepíteni.

4. Elosztóhálózatok típusai

4.1. Hálózattípusok [10.]

A villamos energia a különféle hálózatokon keresztül szállítható a termelés helyétől a fogyasztókhoz. Feszültség szint, illetve a villamosenergia-elosztásban betöltött szerepük alapján megkülönböztetjük az alábbi hálózattípusokat:

- Kisfeszültségű elosztóhálózat: feladata a villamos energia eljuttatása a végfelhasználókhoz, azaz a fogyasztókhoz, feszültség szintje 0,4 kV.
- Középfeszültségű elosztóhálózat: feszültség szintje közcélú hálózatoknál 11 ill. 22 kV, ipartelepek hálózatain 6 kV. Feladatuk eljuttatni a villamos energiát a fogyasztói transzformátorokig az állomások gyűjtő sínjeitől.
- Főelosztóhálózat: az országos alaphálózat csomópontjaitól szállítják a villamos energiát a középfeszültségű elosztóhálózatok táppontjaihoz. Feszültség szintje: 132 kV
- Országos alaphálózat: Összekapcsolja a csomóponti transzformátorállomásokat a termelő erőművekkel. Feszültség szintjei: 750 kV, 400 kV és 220 kV. Legnagyobb hányada 400 kV-os.

4.2. Hálózatalakzatok [10.]

A hálózatalakzatok a villamos hálózatok táppontjainak és fogyasztói pontjainak összeköttetése, eltérő üzemfolytonossági és üzembiztonsági lehetőségekkel. Megkülönböztetjük őket aszerint, hogy a táppontból a fogyasztókig hány különböző útvonalon, és irányban juthat el a villamos energia. Többnyire az adott hálózattípus rendeltetése szabja meg a hálózati alakzatot.

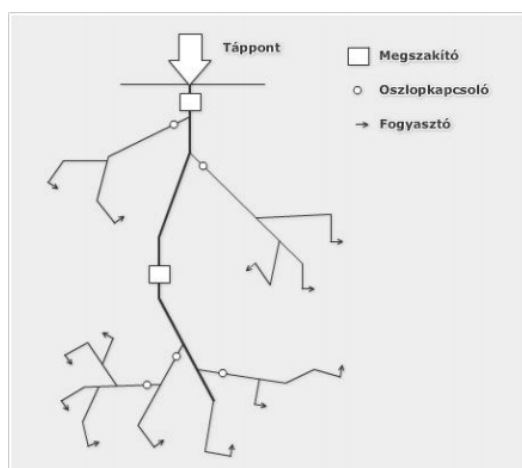
A tipikus hálózati alakzatok:

- sugaras hálózat;
- íves hálózat;

- gyűrűs hálózat;
- körvezeték;
- párhuzamos vezeték;
- hurkolt hálózat.

4.2.1. Sugaras hálózat

A sugaras hálózatok fő jellemzője, hogy a villamos energia egy-egy fogyasztóhoz csak egyetlen irányból, egyetlen úton juthat el. Ez egy többszörösen szétágazó hálózatalakzat, amelyet egy táppontból táplálnak meg. A sugaras hálózat egy gerincvezetékéből (a 2. ábrán vastag vonal jelöli) és a leágazó vezetékekből áll. A kis nyilak jelölik a fogyasztókat. Megszakítókkal és szakaszolókapcsolókkal bontható meg a hálózat, amennyiben azt karbantartás vagy meghibásodás indokoltá teszi. A 0,4 kV-os kiefeszűtsűgű elosztóhálózat jellegzetes hálózat alakzata, de használják ezen kívül még a 22 kV-os szabadvezetékes-, valamint a 10 kV-os kábelhálózatok esetén is. Nagy előnye, hogy könnyen áttekinthető, nagyon egyszerű a hibás vezeték szakasz meghatározása. Létesítése olcsó és egyszerű. Hátránya viszont, hogy egy a táppont közelében keletkező hiba esetén a teljes fogyasztói körzet kiesik a villamosenergia-szolgáltatásból.



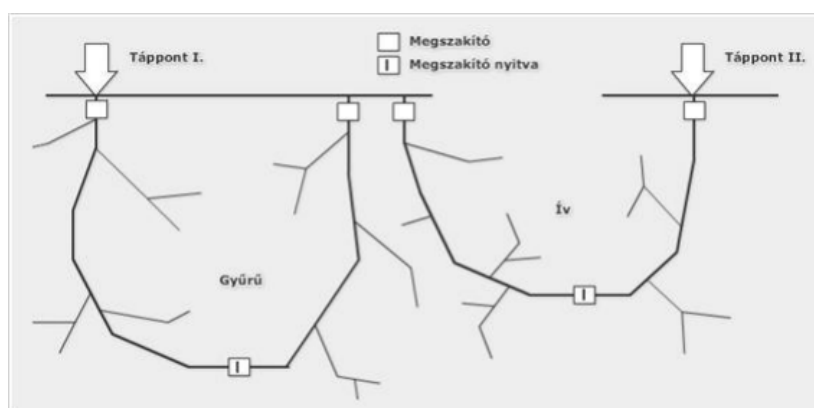
2. ábra Sugaras hálózat

4.2.2. Íves hálózat

Az íves hálózatok két, külön gyűjtősínen lévő táppontból induló gerincvezetékkel áll, amelyek találkozási pontjába megszakítót építenek be. Normál üzemállapotban a megszakító mindig nyitott, tehát a hálózat két részre van bontva, egymástól függetlenül üzemelnek. Így meghibásodás esetén a megszakító zárásával lehetőség van a hibás vezetékszakasz fogyasztóinak másik irányból történő ellátására a hiba elhárításáig.

4.2.3. Gyűrűs hálózat

A gyűrűs hálózatok főbb jellemzői megegyeznek az íves hálózatokéval, szintén sugarasan üzemelnek, de fővezetékei ugyanazon gyűjtősínről indulnak.

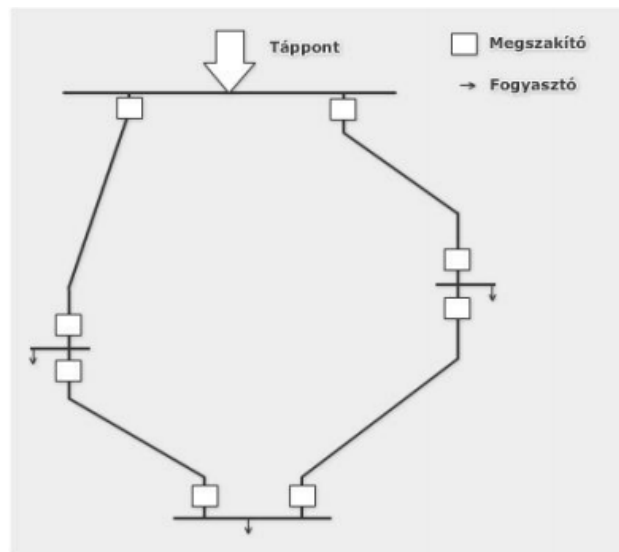


3. ábra Gyűrűs hálózat

4.2.4. Körvezeték

Olyan hálózatalakzat, amelynél a gerincvezeték egy táppontból indul ki, majd, miután érintette az összes fogyasztót, visszatér a táppontba. A fogyasztók gyűjtősínekre csatlakoznak.

Tehát a körvezetékek több fogyasztói gyűjtősínt kötnek össze, üzemszerűen mindig zártak. A fogyasztók két úton kapnak táplálást, ez növeli a villamosenergia-ellátás üzembiztonságát az érintett fogyasztók számára.

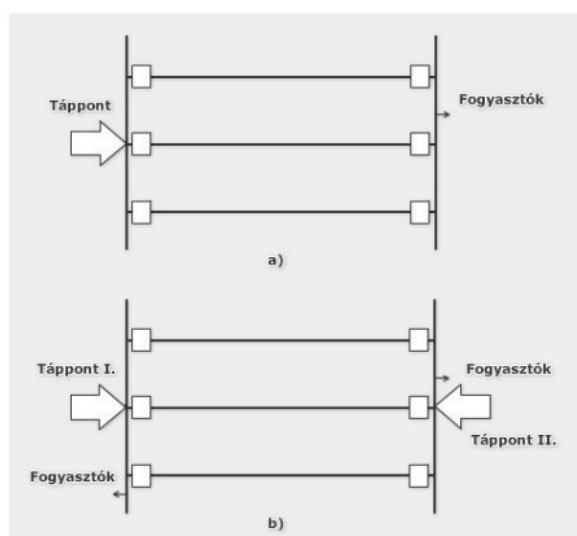


4. ábra Körvezeték

4.2.5. Párhuzamos vezeték

A párhuzamos vezeték alakzat két vagy több párhuzamos vezetékből áll, ezeket többnyire rövid távolságra, nagy teljesítményigényű villamosenergia-ellátás esetén használják, azaz főként ipari fogyasztók esetén.

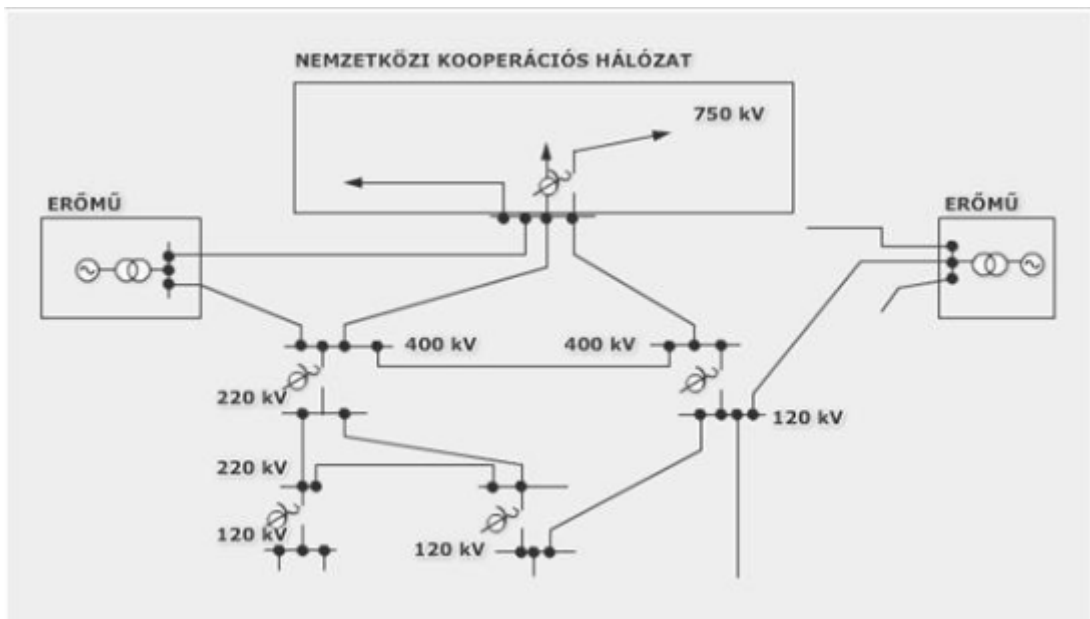
Lehetnek egyoldalról (5. ábra a) vagy két oldalról tápláltak (5. ábra b).



5. ábra Párhuzamos vezeték

4.2.6. Hurkolt hálózat

Hurkolt hálózat a magyarországi villamosenergia-rendszerben az országos alaphálózat. Hurkolt hálózat esetében a fogyasztók és a táppontok között több átviteli út is üzemel egyidejűleg, így üzemzavar esetén a fogyasztó több irányból is ellátható. Ez a hálózatalakzat a legnagyobb üzembiztonságú.



6. ábra Hurkolt hálózat

5. Csatlakoztatás elosztóhálózatra

5.1. Elosztóhálózatra csatlakoztatás feltételei, a csatlakoztatás folyamata

Az alábbiakban az EON hálózatára csatlakoztatni kívánt HMKE-k és kiserőművek csatlakoztatásának feltételeit és a csatlakozás folyamatát ismertetem.

5.1.1. HMKE csatlakoztatása [12.] [13.]

2008. január elsejével lépett hatályba a villamos energiáról szóló LXXXVI. törvény (VET), amely bevezette a háztartási méretű kiserőmű fogalmát (HMKE). A háztartási méretű kiserőművek telepítésének célja, hogy a villamos energiát a fogyasztó számára helyben állítsa elő. A HMKE-k körébe tartoznak azok a villamosenergia-termelő berendezések, amelyek csatlakozási teljesítménye kisebb, mint 50KVA és csatlakoznak a kiefeszültségű hálózatra.

A háztartási méretű kiserőműveknek több fontos műszaki feltételnek kell megfelelniük az engedélyeztetéshez.

A HMKE névleges teljesítőképessége nem lehet nagyobb, mint a fogyasztó rendelkezésre álló teljesítménye. Ellenkező esetben a 76/2011. (XII. 21.) NFM rendelet: A közcélú villamos hálózatra csatlakozás pénzügyi és műszaki feltételeiről alapján szükséges a teljesítménybővítés. A teljesítménybővítés igénye esetén A villamos energia rendszerhasználati díjak, csatlakozási díjak és külön díjak alkalmazási szabályairól, 10/2016. (XI. 14.) MEKH rendelet alapján kell eljárni.

A kiefeszültségű hálózatra 2,5 kVA-ig van lehetőség egyfázisú termelő berendezések csatlakoztatására. 5 kVA felett csakis háromfázisú csatlakoztatás lehetséges. Egyfázisú ellátás esetén megengedett több egyfázisú termelőegység csatlakoztatása, ha ezek összteljesítménye nem több 5 kVA-nél.

A csatlakozási igényeket minden esetben az Elosztói engedélyes bírálja el, figyelembe véve a meglévő hálózat paramétereit.

Közcélú hálózatra csak a 79/1997. (XII. 31.) IKIM rendeletben foglaltak alapján a megfelelő minősítésekkel rendelkező berendezések csatlakoztathatók. Az invertereknek meg kell felelniük az alábbi szabványoknak: MSZ-EN 62109-1: Fotovillamos (PV) energetikai rendszerek teljesítményátalakítóinak biztonsága 1. rész ; MSZ-EN 61727: Fotovillamos (PV) rendszerek. A közműinterfész jellemzői; MSZ-EN 61000-6: Elektromágneses összeférhetőség (EMC). 6-5. rész: Általános szabványok. Erőművi és alállomási környezetekben használt berendezések zavartűrése; IEC 62116: Közcélú hálózatra kapcsolt fotovillamos átalakítók. Szigetképződés-gátló intézkedések vizsgálati eljárása.

A villamos energia visszatáplálására alkalmas berendezésnek olyan védelemmel kell rendelkeznie, amely 200ms-on belül automatikusan biztosítja a közcélú kisfeszültségű hálózaton a hálózati feszültség kimaradásakor az automatikus galvanikus leválasztást. A hálózatra történő visszakapcsolás csak min. 5 perccel a hálózati feszültség tartós visszatérése után lehetséges.

A berendezést el kell látni a megfelelő védelmekkel: rövidzárlati, túlterhelési, földzárlati és érintésvédelemmel, túlfeszültség és frekvencia csökkenési és emelkedési védelemmel, és túlfeszültség és szigetüzem elleni védelemmel.

A háztartási méretű kiserőmű csatlakoztatási folyamatának főbb lépései az E.ON-nál a felelős személyek megjelölésével:

- Igénybejelentés (Ügyfél);
- Műszaki vizsgálat (E.ON))
- Csatlakozási dokumentáció (Ügyfél/tervező)
- Jóváhagyás (E.ON)
- Létesítés, készre jelentés (Ügyfél, kivitelező)
- Szerződés elküldése, üzembe helyezés (E.ON)
- A termelt és fogyasztott energia elszámolása (E.ON)

Az ügyfél által benyújtott igénybejelentő nyomtatványnak tartalmaznia kell többek között, hogy milyen energiaforrást használ majd a termelő berendezés (nap, szél, víz, egyéb), mi a tervezett csatlakozási módja a HMKE-nek (1 fázisú, 2 fázisú vagy 3

fázisú), várhatóan mekkora lesz a havi fogyasztás, fel kell tüntetni a termelő berendezés adatait (gyártó, típus, darabszám), a használni kívánt védelmi eszköz beállítási adatait, illetve a túlfeszültségvédelem szintjét.

Az E.ON-nál a HMKE rendszerek engedélyeztetése, valamint a hálózatra csatlakoztatásuk jelenleg díjmentes.

Az ügyfél által beadott igénybejelentő beérkezésétől számított 30 nap áll rendelkezésre az E.ON-nak, hogy megvizsgálja az adott HMKE csatlakoztatásának műszaki feltételeit, tudja-e a hálózat fogadni a tervezett rendszer által termelhető energiamennyiséget. Pozitív bírálat esetén erről tájékoztatót küld az ügyfélnek.

Az ügyfélnek ezután 90 napos határidőn belül kell elkészíttetnie a csatlakozási dokumentációt egy tervezői jogosultsággal rendelkező szakemberrel. A csatlakozási dokumentációnak tartalmaznia kell egyebek mellett az ügyfél és a tervező adatait, napelemes termelő berendezés esetén a termelőegységek általános bemutatását, a csatlakozás villamos jellemzőit, a termelő berendezés villamos jellemzőit (napelem modul, string és inverter adatait), a csatlakozási pontot (melyik fázisra kívánják csatlakoztatni), érintés- és túlfeszültségvédelmet, mérőhely kialakítását. A dokumentációhoz szükséges mellékletek: napelem modul adatai, az inverter adatlapja, egy egyvonalas csatlakozási rajz, fénykép a mérőhelyről, térképszelvény vagy tulajdoni lap másolata a telepítési helyről, tulajdonosi hozzájárulást idegen tulajdonon létesítendő HMKE esetén és egy termelői nyilatkozatot.

Nem szükséges a teljes csatlakozási dokumentációt beküldeni, ennek egy kivonatát kéri be az E.ON. A következő esetekben lehetőség van arra, hogy már az igénybejelentéskor beküldje az ügyfél a csatlakozási dokumentáció kivonatát:

- Ha a tervezett rendszer teljesítménye 1fázisú HMKE-nél kisebb 2,5kVA-nél, 2 fázisú esetben kisebb 5kVA-nél, valamint 3 fázisú esetén kisebb 15kVA-nél.
- Ha a felhasználás helye nem külterületi, vagy dűlő, illetve rendeltetése ennek nem nyaraló, pince, vagy üdülő.

A kivonat a beérkezését követő 15 napon belül elbírálásra kerül, a jóváhagyott terv 365 napig marad felhasználható. Ezt követően kezdődhet meg a HMKE rendszer

telepítése, ami után ellenőriztetni kell a mérőhelyet egy regisztrált szerelővel. Telepítést követően be kell nyújtania az ügyfélnek egy készre jelentési nyilatkozatot, az érintésvédelmi jegyzőkönyv másolatát, egy felhasználói nyilatkozatot, valamint egy termelési és üzemeltetési megállapodást.

Szerződéskötés és üzembe helyezés előtti ellenőrzést követően megtörténhet a HMKE rendszer üzembe helyezése.

A HMKE telepítéshez vonatkozó jogszabályok a következők:

„VET a villamos energiáról szóló 2007. évi LXXXVI. törvény

76/2011. NFM a közcélú villamos hálózatra csatlakozás pénzügyi és műszaki feltételeiről szóló rendelet

64/2011. NFM a villamos energia rendszerhasználati díjak megállapításának és alkalmazásának szabályairól szóló rendelet

VET 63. § (3) A villamosenergia-kereskedő és felhasználó közötti villamosenergia-vásárlási szerződésből eredő polgári jogi igények három év alatt évülnek el. Az elévülés a követelés esedékességének napján kezdődik. VET 3. § 15. Erőmű névleges teljesítőképesség: a beépített villamosenergia-termelő egységek generátorkapcsos, tervezési körülmények között mért névleges aktív (wattos) teljesítményeinek összege.

VET 3. § 24. Háztartási méretű kiserőmű: olyan, a kisfeszültségű hálózatra csatlakozó kiserőmű, melynek csatlakozási teljesítménye egy csatlakozási ponton nem haladja meg az 50 kVA-t.

VET 3. § 44. Magánvezeték: közcélúnak, termelői vezetékeknek vagy közvetlen vezetékeknek nem minősülő, a csatlakozási pont után elhelyezkedő hálózati elem, vezetékek, vagy átalakító- és kapcsolóberendezés, amely az átviteli vagy elosztó hálózathoz közvetlenül vagy közvetve kapcsolódó felhasználó vagy a vételező ellátására szolgál.

VET 3. § 49. Összekötő berendezés: több felhasználó által használt ingatlan belső vezetékhálózatának nem az elosztó tulajdonában álló, a csatlakozási pont után lévő méretlen szakasza.

VET 7. § (1) Saját üzleti kockázatára – a (2) bekezdésben foglalt eltéréssel – bárki létesíthet új termelő kapacitást a jelen törvényben és a külön jogszabályokban meghatározottak szerint.

VET 7. § (2) A villamosenergia-rendszer szabályozhatósága és biztonságos működése érdekében, valamint a műszakilag korlátozott lehetőségekre való tekintettel – a háztartási méretű kiserőművek és a villamosműhöz nem csatlakozó kiserőművek kivételével – szél erőművek, illetve szél erőmű parkok létesítése a szél erőmű kapacitás létesítésére irányuló pályázati kiírás feltételeiről, a pályázat minimális tartalmi követelményeiről, valamint a pályázati eljárás szabályairól szóló miniszteri rendeletben meghatározott feltételek szerint meghirdetett pályázat alapján lehetséges.

VET 13. § (2) A háztartási méretű kiserőművek üzemeltetői által termelt villamos energiát az adott csatlakozási ponton értékesítő villamosenergia-kereskedő külön jogszabály szerint köteles átvenni.

VET 35. § (4) Az elosztó a csatlakozási és hálózathasználati szerződés megkötése során – a háztartási méretű kiserőmű hálózathoz való csatlakozásának gyorsított biztosítása érdekében – a közcélú villamos hálózatra csatlakozás pénzügyi és műszaki feltételeiről szóló jogszabályban meghatározott teljesítményhatárig a Vhr. felhasználókra vonatkozó előírásai szerint jár el.

VET 35. § (5) Háztartási méretű kiserőmű felhasználási helyenként csak egy csatlakozási pontra létesíthető.

VET 41. § (3) Az elosztó hálózati engedélyes köteles a külön jogszabály és az elosztói szabályzat alapján a háztartási méretű kiserőművek méréséről gondoskodni.

Vhr. 4. § A háztartási méretű kiserőmű üzemeltetője által termelt villamos energiát az üzemeltető kérésére az adott csatlakozási ponton értékesítő villamosenergia-kereskedő vagy egyetemes szolgáltató köteles átvenni.

Vhr. 5. § (1) A háztartási méretű kiserőmű rendelkezésre állási teljesítménye alatt a kVA mértékegységben kifejezett erőművi teljesítőképességet kell érteni.

Vhr. 5. § (2) Egy adott csatlakozási ponton háztartási méretű kiserőművet létesíteni, illetve üzemeltetni a felhasználóként ugyanazon csatlakozási ponton rendelkezésre álló teljesítmény határáig a csatlakozási szerződés módosítása nélkül, a rendelkezésre álló teljesítményt meghaladó, de legfeljebb a VET 3. § 24. pontjában meghatározott teljesítményig a csatlakozási szerződés megfelelő módosítása mellett, a hálózathoz való csatlakozásra vonatkozó külön jogszabály, továbbá az elosztói szabályzatban, és az elosztó üzletszabályzatában meghatározott részletes szabályok szerint lehet.

Vhr. 5. § (3) A felhasználó a háztartási kiserőmű üzembe helyezésére vonatkozó szándékáról a háztartási méretű kiserőmű alapvető műszaki adatait tartalmazó írásbeli vagy elektronikus igénybejelentésben tájékoztatja a vele jogviszonyban álló elosztót.

Vhr. 5. § (4) A felhasználó a háztartási méretű kiserőmű létesítésére, illetve üzemeltetésére vonatkozó igénybejelentésében köteles nyilatkozni arról, hogy kíván-e villamos energiát betáplálni a közcélú hálózatba, vagy kizárólag saját villamos energia fogyasztásának kielégítése érdekében kíván villamos energiát termelni. A hálózati csatlakozás műszaki jellemzőit ezen nyilatkozat figyelembevételével kell kialakítani.

Vhr. 5. § (5) Ha a háztartási méretű kiserőmű a csatlakozási ponton a közcélú hálózatba villamos energiát betáplál, akkor a háztartási méretű kiserőmű üzemeltetőjével, mint felhasználóval jogviszonyban álló villamosenergia-kereskedő, illetve egyetemes szolgáltató elszámolási időszakonként a hálózatba összesen betáplált és vételezett villamos energia vonatkozásában a felek megállapodása szerint havi, féléves vagy éves szaldó elszámolást alkalmaz.

Vhr. 5. § (6) Amennyiben az elszámolási időszak során vételezett és betáplált villamosenergia-mennyiségek szaldója alapján az elosztó hálózatba történő villamos energia betáplálás áll fenn, a betáplált villamosenergia-teljesítményt a háztartási méretű kiserőmű üzemeltetőjével jogviszonyban álló villamosenergia-kereskedő által a részére

– mint felhasználó részére – a villamosenergia-vásárlási szerződés alapján értékesített villamos energia átlagos termékárán kell elszámolni.

Vhr. 5. § (7) A fogyasztásmérő berendezés költségeinek viselésére 3 x 16 A teljesítmény határig a felhasználókra, a felett az erőművekre vonatkozó szabályok alkalmazandók.

Vhr. 5. § (8) A háztartási kiserőművek csatlakoztatásával és üzemeltetésével kapcsolatos további szabályokat az ellátási szabályzatok és a hálózati engedélyesek üzletszabályzatai, a villamos energia értékesítés elszámolásával kapcsolatos további szabályokat a kereskedők üzletszabályzatai tartalmazzák.

10/2016. (XI. 14.) MEKH rendelet 9. § (2) Kétirányú mérés esetében az elszámolás alapját képező villamosenergia-mennyiségeket az adott mérési ponton a kereskedelmi szabályzatban rögzített elszámolási mérési intervallumokban irányonként kell megállapítani, és a forgalomarányos - kWh-ra vetített - rendszerhasználati díjakat elszámolási időszakonként a háztartási méretű kiserőművek esetében a mérési intervallumokban mért, irányonként elkülönített és összegzett mennyiségek különbsége alapján, minden más esetben az irányonként elkülönített és összegzett villamosenergia-mennyiségek alapján, irányonként kell megfizetni.”

Az fenti jogszabályokban nem szabályozott kérdésekben a területileg illetékes áramhálózati cég Elosztói szabályzata az irányadó.

5.1.2. Kiserőművek csatlakoztatása [14.]

Kiserőműnek tekintünk minden 50 MW-nál kisebb névleges teljesítőképességű erőművet.

A kiserőművek hálózatra csatlakoztatásának folyamata az EON esetében:

- Igénybejelentés (Ügyfél);
- Műszaki-gazdasági terv készítése (Elosztó) 3 hónap;

- Igénybejelentésre vonatkozó díj kiszámlázása (Elosztó);
- Csatlakozási terv készítése (Ügyfél);
- Csatlakozási terv elbírálása - 6 hónap, elbírálási díj számlázása (Elosztó);
- Engedélyek beszerzése (Ügyfél);
- Szerződéskötés
- Mérési terv készítése (Ügyfél);
- Mérési terv elbírálása (Elosztó);
- Kiviteli terv készítése (Ügyfél);
- Kiviteli terv elbírálása (Elosztó);
- Kivitelezési munkák (Ügyfél);
- Kereskedelmi szerződés kötése segédüzemi vételezésre (Ügyfél és Kereskedő között);
- Hálózathasználati szerződés megkötése (Ügyfél és Elosztó között);
- Üzemviteli megállapodás (Ügyfél és Elosztó között);
- Kereskedelmi szerződés kötése megtermelt energiára (Ügyfél és Kereskedő között);
- Üzembe helyezési terv készítése (Ügyfél);
- Üzembe helyezési terv elbírálása (Elosztó);
- Üzembe helyezés (Ügyfél/Elosztó).

Első lépésben az Elosztói engedélyes honlapján található igénybejelentő nyomtatványt szükséges kitölteni, illetve az ahhoz tartozó mellékleteket. Az igénybejelentőnek tartalmaznia kell többek között az igénybejelentő és az általa megbízott villamos tervező adatait, a kiserőmű főbb adatait (típusa, felhasználási forma, mekkora az igényelt rendelkezésre álló teljesítmény a közcélú csatlakozási ponton), a kiserőmű telephely adatait, illetve szükségesek mellékletek is. Kötelező csatolni egy térképmásolatot, amin beazonosítható a kiserőmű telephelye, egyvonalas kapcsolási rajzot, tulajdoni lapokat (nem saját tulajdonú terület esetén a tulajdonos hozzájárulását is. Opcionálisan csatolható mellékletként a szinkrongenerátor, az aszinkrongenerátor, az inverter, a transzformátor adatlapja is, illetve egyéb, a bejelentő által lényegesnek tartott dokumentumok is.

Ezután az Elosztói engedélyes elvégzi a szükséges hatásvizsgálatokat és elkészíti a kiserőmű csatlakoztatásának műszaki-, gazdasági feltételeit meghatározó tájékoztató levelet, amelyet továbbít az igénybejelentő részére.

Ezek elküldése után az igénybejelentő részére díjbekérőt állítanak ki a 10/2016 (XI. 14) MEKH rendelet 35 § (2) pontja és a 15/2016 (XII. 20) MEKH rendeletben leírtak alapján.

A következő lépésben az ügyfél elkészíti a csatlakozási tervet, melynek elbírálására 6 hónap áll rendelkezésre az Elosztói engedélyesnek, ehhez kiszámláznak az ügyfél részére egy csatlakozási terv elbírálási díjat. Pozitív elbírálás esetén az ügyfélnek be kell szereznie különböző engedélyeket: jogerős építési engedélyt, valamint bizonyos erőműtípusoknál jogerős környezetvédelmi határozatot.

A csatlakozási terv jóváhagyása után két év áll rendelkezésre a hálózatsatlakozási szerződés megkötésére.

Ezt követően előbb mérési tervet kell készítenie az ügyfélnek, majd kiviteli tervet, melyeket külön-külön el kell bíraltatnia az Elosztói engedéllyessel. Ezután kezdődhet meg a közcélú eszközök és az erőművi egységek kivitelezése, majd az ügyfélnek szerződést kell kötnie valamelyik energiakereskedővel. Ha ez teljesült, akkor Hálózathasználati szerződés, majd Üzemviteli megállapodás szükséges az ügyfél és az elosztó között. Az ügyfélnek a kereskedővel a megtermelt energiára vonatkozó Kereskedelmi szerződést is kell kötnie.

A tervezett üzembe helyezés előtt minimum 3 héttel az ügyfélnek be kell nyújtania az Üzembe helyezési programot, amelynek az elosztó általi pozitív elbírálását követően megtörténhet az üzembe helyezés.

5.2. Csatlakoztatható inverterek

Közcélú hálózatra csak olyan inverter csatlakoztatható, amely megfelel a nemzetközi szabványok előírásainak és rendelkezik az Elosztói engedélyesek által

megkövetelt tanúsítvánnyal. Az aktuálisan engedélyezett inverterek listája megtalálható a területileg illetékes Elosztói engedélyesek weboldalán.

6. Az MSZ EN 50160:2021 szabvány ismertetése [15.]

Ebben a fejezetben bemutatom a kis- és közepfeszültségű hálózatok feszültségminőségi viszonyaira vonatkozó szabványos előírásokat az MSZ 50160:2021 szabvány alapján.

E szabvány alkalmazási területe a kis-, közép- és nagyfeszültségű közcélú váltakozó áramú hálózatok, viszont jelen dolgozat tárgyát nem képezik a nagyfeszültségű hálózatok, így a szabvány erre vonatkozó előírásait nem ismertetem.

Az MSZ EN 50160:2021 A közcélú elosztóhálózatokon szolgáltatott villamos energia feszültségjellemzői szabvány normál üzemi körülmények esetére írja elő a feszültségminőségi jellemzőket. Olyan határértékeket szolgáltat, amelyeket a közcélú hálózatra csatlakozó hálózatok használói észlelnek. A szabvány nem tér ki „a rendellenes üzemi viszonyokra”, nem taglalja többek között az ideiglenesen kialakított táphálózatokkal szembeni elvárásokat, nem veszi figyelembe a rendkívüli időjárási események, természeti katasztrófák eseteit, külső behatás által keletkezett zavarokat, vis major eseteket.

A szabvány tárgykörébe tartozik a tápfeszültség jellemzőinek normál üzemi körülményekre vonatkozó meghatározása és azok leírása.

Ezek:

- a frekvencia;
- a feszültség nagysága;
- a hullámalakja;
- a fázisfeszültségek szimmetriája.

6.1. Fogalommeghatározások

Mint minden szabvány, így az MSZ 50160:2021 is tartalmazza a benne foglalt témakörre vonatkozó fogalmak leírását.

6.2. A kisfeszültségű táplálás jellemzői

A szabvány e fejezete leírja a „közcélú kisfeszültségű hálózatokon szolgáltatott villamos energia feszültségjellemzőit”. Megkülönböztetünk folyamatos jelenségeket és feszültségeseményeket, illetve a szabvány megemlíti egyéb jelenségeket is. A folyamatos jelenségek alatt értjük azokat az eseményeket, amelyeknél az időben folyamatosan megy végbe a névleges értéktől vagy az elvárt hullámalaktól való eltérés. Feszültségesemények esetén hirtelen megy végbe a névleges értékektől való eltérés, ezek többnyire valamilyen hiba, vagy külső behatás folytán történnek.

A szabvány előírja a névleges feszültség értékét, ez közcélú, kisfeszültségű hálózat esetén $U_n=230V$ a fázis és a nulla vagy a fázisok között.

6.2.1. Folyamatos jelenségek

A szabvány meghatározza a folyamatos jelenségek esetére a hálózati frekvencia értékét és határértékeit.

„A tápfeszültség névleges frekvenciája 50 Hz legyen. Normálüzemi körülmények között az alapharmonikus frekvencia átlagértéke 10 s-on keresztül mérve a következő tartományban legyen:

- az együttműködő hálózathoz szinkroncsatlakoztatású hálózat esetén:

$50 \text{ Hz} \pm 1\%$ (azaz 49,5–50,5 Hz) az év 99,5%-ában,

50 Hz + 4%/- 6% (azaz 47–52 Hz) az idő 100%-ában.

– az együttműködő hálózathoz nem szinkroncsatlakoztatású hálózat esetén (pl. egyes szigetek táphálózata):

50 Hz $\pm$ 2% (azaz 49–51 Hz) a hét 95%-ában,

50 Hz $\pm$ 15% (azaz 42,5–57,5 Hz) az idő 100%-ában.”

Az MSZ 50160:2021 meghatározza, hogy normál üzemben a tápfeszültség változása nem haladhatja meg a névleges feszültség értékének ± 10 %-át, kivételt képez ez alól a feszültségkimaradások időtartama, illetve olyan hálózatok esetén, amelyek nem csatlakoznak az átviteli hálózathoz vagy távoli hálózatot használnak, ez az érték +10 %/ -15 % alatt kell maradjon. A névleges feszültség megfelelő határértékek között maradásának vizsgálati eljárása normál üzemi körülmények esetén:

„– a tápfeszültség 10 perces átlagos effektív értékeinek 95%-a bármely egyhetes időszakban $U_n \pm 10\%$ tartományban legyen, és

– a tápfeszültség minden 10 perces átlagos effektív értéke $U_n + 10\%$ /– 15% tartományban legyen.”

A szabvány taglalja a gyors feszültségváltozás esetét is, azaz a feszültségnek két érték közötti egyszeri gyors változását. A gyors feszültségváltozás okai lehetnek a hálózaton lévő berendezések hirtelen bekövetkező terhelésváltozásai, vagy hálózaton előforduló hibák. Egészen addig beszélhetünk gyors feszültségváltozásról, ameddig a feszültség át nem lépi a feszültségletörés és/vagy -túllendülés határértékét. A gyors feszültségváltozás okozta villogásmértékre megszabott határérték egy heti időtartam 95%-ában $Plt \leq 1$ lehet. A tápfeszültség negatív sorrendű összetevőjének 10 perces átlagos effektív értékének 95%-a bármely egy hetes vizsgált időszakban a pozitív sorrendű 0-2%-os értéke közé kell, hogy essen.

Normál üzemi körülményeket feltételezve minden egyes harmonikus feszültség 10 perces átlagos effektív értékének 95%-a bármely egy hetes vizsgált időszakban nem mehet az 1. táblázatban foglalt értékek fölé. A teljes harmonikus torzítási tényező kisebb kell legyen 8 %-nál.

Páratlan harmonikusok				Páros harmonikusok	
Nem 3 többszöröse		3 többszöröse			
Rendszám h	Relatív feszültség U_h	Rendszám h	Relatív feszültség U_h	Rendszám h	Relatív feszültség U_h
5	6,0%	3	5,0%	2	2,0%
7	5,0%	9	1,5%	4	1,0%
11	3,5%	15	0,5%	6-24	0,5%
13	3,0%	21	0,5%		
17	2,0%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

1. táblázat Az egyes harmonikus feszültségek u_1 alapharmonikus feszültség %-osan megadott értékei

A frekvenciaváltók és más vezérlőkészülékek folyamatos fejlődése magával hozta a közbenső harmonikus feszültségek növekedését. Jelenleg kidolgozás alatt vannak ennek szintjei.

6.2.2. Feszültségesemények

A szabvány a feszültségesemények közé sorolja a feszültség kimaradásokat, a tápfeszültség letörését vagy -túllendülését és a tranziens túlfeszültségeket.

A tápfeszültség kimaradásokra jellemző, hogy időben és helyileg nem kiszámíthatóak, ennek okán pillanatnyilag nem rendelkezünk reprezentatív adatokkal ezek időbeni és helyi sűrűségéről.

A tápfeszültség letörések leggyakoribb kiváltó okai a közcélú hálózatokon lévő, vagy a hálózatot használó fogyasztók villamos berendezései által okozott hibák, míg a tápfeszültség túllendülését többnyire terhelések lekapcsolása, vagy a különböző kapcsolási műveletek eredményezik. E két jelenség gyakorisága nagyban függ a táphálózat típusától. Mérésüket és észlelésüket a névleges tápfeszültséghez viszonyítva az EN 61000-4-30 szabvány szabályozza. Tápfeszültség letörésre a kezdő küszöbérték az U_n 90 %-a, míg feszültség túllendülésre az U_n 110 %-a.

A tranziens túlfeszültségek olyan túlfeszültségek, amelyek rövid ideig tartanak, többnyire néhány ms időtartamig, és periodikusan vagy nem periodikusan, erősen csillapodnak. Kiváltó okai többnyire a villámlás vagy a rendszerben végrehajtott különböző kapcsolási műveletek.

6.3. A középvezetési táplálás jellemzői

A szabvány e fejezete leírja a „közcélú középvezetési hálózatokon szolgáltatott villamos energia feszültségjellemzőit”. Ahogy kisműködésben, úgy itt is megkülönböztetünk folyamatos jelenségeket és feszültségeseményeket, illetve a szabvány megemlíti egyéb jelenségeket is.

Itt a feszültség mértéke U_c megegyező tápfeszültségként van megadva.

6.3.1. Folyamatos jelenségek

A szabvány meghatározza a folyamatos jelenségek esetére a hálózati frekvencia értékét és határértékeit.

„A tápfeszültség névleges frekvenciája 50 Hz legyen. Normálüzemi körülmények között az alapharmonikus frekvencia átlagértéke 10 s-on keresztül mérve a következő tartományban legyen:

- az együttműködő hálózathoz szinkroncsatlakoztatású hálózat esetén:

50 Hz $\pm$ 1% (azaz 49,5–50,5 Hz) az év 99,5%-ában,

50 Hz + 4%/- 6% (azaz 47–52 Hz) az idő 100%-ában.

- az együttműködő hálózathoz nem szinkroncsatlakoztatású hálózat esetén (pl. egyes szigetek táphálózatai):

50 Hz $\pm$ 2% (azaz 49–51 Hz) a hét 95%-ában,

50 Hz $\pm$ 15% (azaz 42,5–57,5 Hz) az idő 100%-ában.”

Az MSZ 50160:2021 közép feszültség esetén is meghatározza, hogy normál üzemben a tápfeszültség változása nem haladhatja meg a névleges feszültség értékének ± 10 %-át, kivételt képez ez alól a feszültségkimaradások időtartama, illetve olyan hálózatok esetén, amelyek nem csatlakoznak az átviteli hálózathoz vagy távoli hálózatot használnak, ez az érték +10 %/ -15 % alatt kell maradjon.

Az U_c megegyezéssel tápfeszültség vizsgálatában a következő határértékek érvényesek:

- a tápfeszültség 10 perces átlagos effektív értékeinek 99%-a az előzőekben megadott +10%-os felső határérték alatt legyen; és
- a tápfeszültség 10 perces átlagos effektív értékeinek 99%-a előzőekben megadott -10%-os alsó határérték felett legyen; és

- a tápfeszültség 10 perces átlagoseffektív értékeinek egyike sem térhet el az U_c megegyezéssel tápfeszültségtől $\pm 15\%$ -nál nagyobb mértékben.

A szabványban a középvezetési hálózatok esetén a gyors feszültségváltozások részletei megegyeznek a kisfeszültségnél már ismertekkel, kivéve az egyes harmonikus feszültségek u_1 alapharmonikus feszültség irányadó értékeiben, melyet a 2. táblázat tartalmaz százalékos értékben a csatlakozási pontokban:

Páratlan harmonikusok				Páros harmonikusok	
Nem 3 többszöröse		3 többszöröse			
Rendszám h	Relatív feszültség U_h	Rendszám h	Relatív feszültség U_h	Rendszám h	Relatív feszültség U_h
5	5%	3	3%	2	1,9%
7	4%	9	1,3%	4	1%
11	3%	15	0,5%	6-24	0,5%
13	2,5%	21	0,5%		
17	kidolg.alatt				
19	kidolg.alatt				
23	kidolg.alatt				
25	kidolg.alatt				

2. táblázat Az egyes harmonikus feszültségek u_1 alapharmonikus feszültség %-osan megadott értékei

6.3.2. Feszültségesemények

Ahogy kismérsékleten, úgy közepesmérséklet esetén is megkülönböztet a szabvány feszültség kimaradásokat, a tápfeszültség letörését vagy -túllendülését és a tranziens túlfeszültségeket.

A tápfeszültség kimaradások jellemzően nem kiszámíthatóan következnek be helyben és időben, így nem állnak rendelkezésre reprezentatív adatok ezek gyakoriságáról.

A tápfeszültség letörését leggyakrabban a hálózatokon lévő, vagy a hálózatot használók villamos berendezéseinek hibája okozza, ezzel szemben a tápfeszültség túllendülésének kiváltó oka általában a kapcsolási műveletek vagy a terhelések hirtelen lekapcsolása. Mérésüket és észlelésüket a névleges tápfeszültséghez viszonyítva az EN 61000-4-30 szabvány szabályozza. Tápfeszültség letörésre a kezdő küszöbérték az U_n 90 %-a, míg feszültség túllendülésre az U_n 110 %-a.

A tranziens túlfeszültségek olyan túlfeszültségek, amelyek rövid ideig tartanak, többnyire néhány ms időtartamig, és periodikusan vagy nem periodikusan, erősen csillapodnak. Kiváltó okai többnyire a villámlás vagy a rendszerben végrehajtott különböző kapcsolási műveletek.

7. Elosztóhálózatra csatlakozó naperőművek hatásai [16.] [17.]

7.1. Fordított teljesítményáramlás

Hagyományosan a teljesítményáramlás az elosztóhálózatokon egyirányú folyamatként megy végbe, mindig a nagyobb feszültségű hálózatrész felől a kisebb feszültségű felé történik az áramlás. Viszont nagymértékű napelemes penetráció esetén adódhatnak olyan esetek, amikor megfordulhat a teljesítményáramlás iránya. Főként nyári, meleg napokon történik meg, hogy a megtermelt villamos energia nem kerül közvetlenül a termelés helyén felhasználásra, ekkor a napelemes rendszerek visszatáplálják a többletenergiát a hálózatba. Előfordulhat, hogy a visszatáplált villamos energia akkora mértékű, amely már az adott transzformátorkörzet igényét is meghaladja és a keletkezett többlet teljesítmény a KÖF/KIF transzformátoron keresztül fordított irányban – a kiefeszültségű hálózatból a középvezetési feszültségű felé – áramlik el.

A fordított teljesítményáramlás számos káros hatással bír. Veszteségek keletkezhetnek az elosztóhálózaton, túlterhelődhetnek a kábelek és a szabadvezetékek, befolyásolhatja az automatikus fokozatszabályozású transzformátorok működését. A védelmi berendezések esetében téves működtetést eredményezhet, ugyanis a védelmek lekapcsolhatnak olyan hálózatrészeket, ahol valójában nem áll fenn hibás működés. Így szükséges a védelmi rendszerek beállításainak módosítása is a megfelelő működtetéshez.

7.2. Feszültségemelkedés

A kiefeszültségű elosztóhálózatok tipikusan úgy lettek kialakítva, hogy a feszültség értéke folyamatosan csökkenő értékű a betáplálási pontoktól az egyes fogyasztói végpontokig. Ahhoz, hogy a hálózat mentén mindenhol megfelelő nagyságú legyen a feszültség, gyakori, hogy az adott hálózatot tápláló transzformátoroknál a névleges értéknél nagyobb feszültséget állítanak be.

A nagyfokú napelemes energiatermelés által okozott egyik jelentős probléma a feszültségemelkedés jelensége. A fotovoltaikus rendszerek által az elosztóhálózatba táplált teljesítmény hatására megnő a feszültség a csatlakozás helyén és a kapcsolódó vezetéken is. Ez a jelenség – hasonlóan az előző pontban ismertetett fordított teljesítményáramláshoz –, főként a déli, kora délutáni időszakban alakulhat ki, amikor a fogyasztók által igénybe vett villamosenergia fogyasztási igény alacsony, ellenben a napelemek termelése nagyfokú, így jelentős mennyiségű teljesítményt táplálnak be az elosztóhálózatba.

Értelemszerűen, minél inkább elterjedt az adott hálózatrészen a napelemes energiatermelés, annál koncentráltabban jelentkezik a feszültségemelkedés jelensége.

Egy napelemes rendszer által az elosztóhálózaton okozott feszültségemelkedés mértéke kiszámítható az alábbi képlet segítségével:

$$\Delta U = \frac{(P_{PV} - P_L) * R + (Q_{PV} - Q_L) * X}{U_{CP}}$$

ahol

ΔU az elosztóhálózaton tapasztalható feszültségemelkedés

P_{PV} a napelemes rendszer által termelt hatásos teljesítmény

P_L a fogyasztó által felvett hatásos teljesítmény

Q_{PV} a napelemes rendszer által termelt meddő teljesítmény

Q_L a fogyasztó által felvett meddő teljesítmény

R a vezeték ellenállása

X a vezeték reaktanciája

U_{CP} a csatlakozási ponton mérhető feszültség

A feszültségemelkedés hatásának kiküszöbölésére különböző megoldásokat alkalmaznak mind közép-, mind kisfeszültségű elosztóhálózatok esetén.

Középfeszültségen elterjedt módszer a működés közben változtatható áttételű transzformátorok alkalmazása és a szinkrongenerátorok gyors szabályozása. Kisfeszültségű elosztóhálózatokon alkalmazott megoldás a soros feszültség szabályozás (LVR), a meddőszabályozás statikus kondenzátortelekkel, valamint a hálózat átrendezése akár vezetékcserével, a körzet átrendezésével, új táppont létesítésével vagy új vezeték létesítésével.

7.3. Veszteségek növekedése

Az elosztott energiatermelő-rendszerek kismértékű elterjedtsége esetén csökkennek a villamosenergia-rendszer hálózati veszteségei, mivel a fogyasztás helyén történik a villamosenergia-termelés, így nem merülnek fel a szállítással járó többlet veszteségek.

Viszont, ha a hálózaton nagymértékű a napelemes energiatermelő-rendszerek jelenléte, úgy a fordított teljesítményáramlás hatása megnöveli a hálózaton fellépő teljesítményvesztéseket is.

7.4. Aszimmetria, energiaminőségi problémák

Fontos feladat a háromfázisú villamosenergia-rendszer szimmetriájának fenntartása, mivel hálózati aszimmetria a háromfázisú fogyasztók esetében melegeedéshez, hosszú távon meghibásodáshoz vezethet. Ha a hálózaton nagymértékű aszimmetria áll fenn, annak következtében a nullavezetőben megnövekednek az áramok, aminek hatására a fogyasztási helyen nem egyezik majd meg a nullavezető és a hálózati transzformátor csillagpontjának potenciálja. Ez okozhat alacsony, illetve magas feszültségeltéréseket, ami az egyfázisú fogyasztók működésében okozhat zavarokat.

A napelemes energiatermelő egységeknél alkalmazott inverterek többségében egyfázisúak, így, ha ezeket nem egyenletesen osztják ki a fázisok között, aszimmetria alakulhat ki.

7.5. Növekvő meddőteljesítmény-áramlás

A napelemes rendszer által megtermelt hatásos teljesítménnyel fedezhető a fogyasztók által igényelt hatásos teljesítmény egy része, viszont meddő teljesítmény igényüket teljes mértékben a hálózatról fedezik. Ezáltal a hálózaton eljuttatni kívánt hatásos teljesítmény mértéke csökken, míg a meddő teljesítmény igény nem fog csökkenni.

Nem célszerű a fogyasztókat a hálózaton keresztül ellátni meddő teljesítménnyel, mert a transzformátorok esetében kis teljesítménytényezőhöz vezetne, így más megoldásokat szükséges alkalmazni.

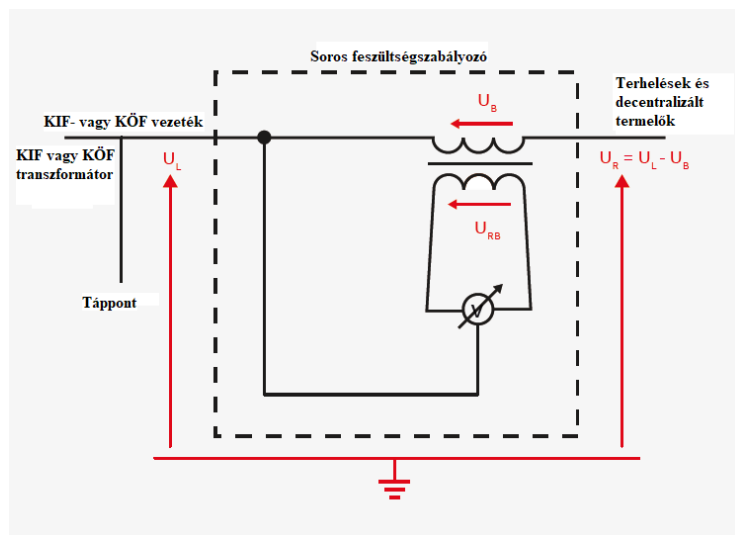
8. Feszültségszabályozási lehetőségek az elosztóhálózaton

8.1. Feszültségszabályozási lehetőségek kisfeszültségű hálózaton

8.1.1. Soros feszültségszabályozás – LVR [18.] [19.]

Kis- és közép feszültségen egyaránt alkalmazható megoldás a soros feszültségszabályozás (Line voltage regulator – LVR). Legfőbb feladata a hálózat adott pontjának feszültségszabályozása egy szabályozó transzformátornak a hálózatba történő beépítésével.

A transzformátor szekunder tekercsét sorosan kötik a hálózat érintett leágazásának elejére, primer tekercsét pedig egy erre a célra kialakított söntágba kapcsoljuk az LVR előtti szakaszban. A soros feszültségszabályozó transzformátor akkora feszültséggel tudja szabályozni a hálózatot, amekkora a primer oldalán megjelenik.



7. ábra Line voltage regulator – LVR

Ennek a megoldásnak számos előnye van:

- rövid távú megoldásként gazdaságosabb lehetőség a feszültségszabályozásra, mint ha a hálózatot kellene bővítenünk;

- telepítése egyszerű és gyors;
- helyi szabályozási megoldásként alkalmazható;
- alkalmasak a feszültség csökkentésére és növelésére egyaránt.

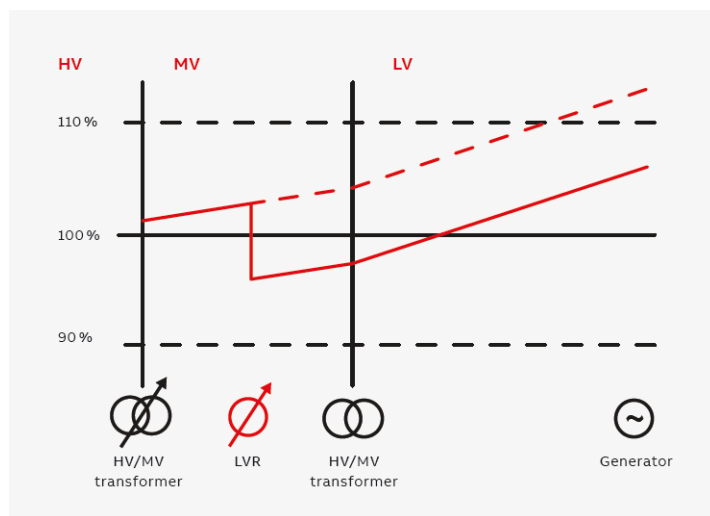
Az LVR használatának hátrányai:

- a söntág miatt vezeték elején csökken a feszültség, míg a vezeték további részén emelkedni fog;
- növekedni fog a hálózaton a veszteség

Főként ideiglenes megoldásként alkalmazzák, rövid távú lehetőségként, amíg az áramszolgáltató megvizsgálja az érintett hálózatrészt és fejleszti azt. Hosszú távú megoldásként azért nem alkalmazzák elterjedten, mert a kis feszültség valós okát nem tudják hosszú távon megszüntetni. Leginkább olyan helyeken alkalmazzák, ahol egy-egy érintett vonal vége közelében néhány fogyasztót érintő feszültségpanasz áll fenn.

Alkalmasak a feszültségszint növelésére és csökkentésére egyaránt, akkor lépnek működésbe, ha a feszültség átlépi az előre beállított értéket.

Érdemes vizsgálni használatukat napelemes rendszerek esetén, mivel segítségükkel megvizsgálhatjuk, mennyivel csökkenthetjük adott ponton a feszültséget.



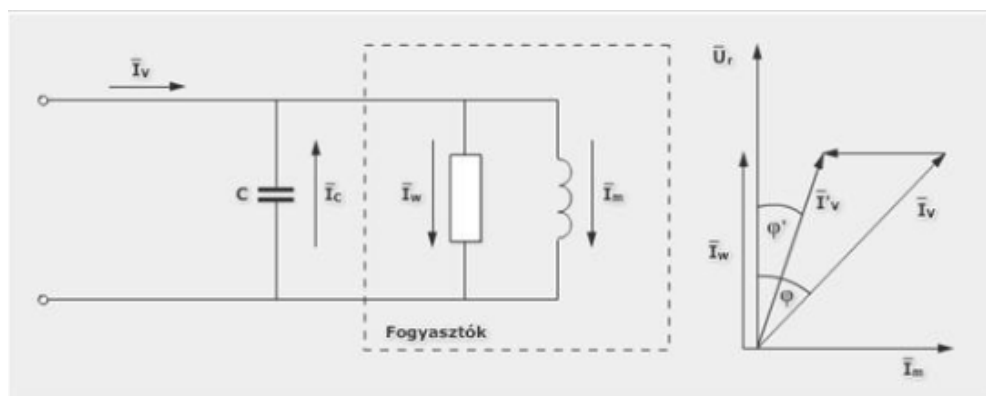
8. ábra LVR működése

8.1.2. Statikus kondenzátorok [11.]

Annak, ha a fogyasztók által igényelt meddő teljesítményt a hálózaton keresztül szállítjuk az erőművektől, több kedvezőtlen hatása van:

- megnövekszik a hálózatokon az áramterhelés és nagy mértékű wattos veszteséghez vezet;
- megnő a feszültségesés, ami miatt nagyobb mértékben szükséges a szabályozós transzformátorokat szabályozni;
- minél inkább ingadozik időben a meddő terhelés mértéke, annál nagyobb mértékben fog ingadozni a feszültség a hálózaton.

A fenti negatív hatások mérséklése, megszüntetése érdekében a fogyasztók közelében statikus kondenzátortelepeket helyeznek el. Ezeket a kondenzátortelepeket nevezik fázisjavító kondenzátoroknak is. Így nem kell a teljes hálózaton végig szállítani a meddő teljesítményt, hanem megtermelhetjük a fogyasztás helyén, csökkentve a fentebb említett, a hálózatot negatívan terhelő hatásokat.



9. ábra Kompenzálás statikus kondenzátorteleppel

A 9. ábrán látható egyfázisú helyettesítő vázlaton és fázorábrán láthatjuk, milyen mértékben kompenzálják a statikus kondenzátortelepek a meddő áramot.

Kisfeszültségű hálózaton megkülönböztethetünk három különböző kompenzációs módot, lehet egyedi, csoportos vagy központi a kompenzáció.

Egyedi kompenzálás alkalmazásakor közvetlenül a fogyasztók közelében helyezik el a kondenzátorokat, aminek nagy előnye, hogy csak a fogyasztói készülékek használatakor üzemelnek. Főbb alkalmazási területük az induktív motorok és a fénycsöves világítóberendezések.

Csoportos kompenzáció esetén a kondenzátortepeket valamely összefüggő nagyobb egység közelében helyezik el, jellemzően költséghatékonyabb megoldás. Használják például folyosók megvilágítása esetén.

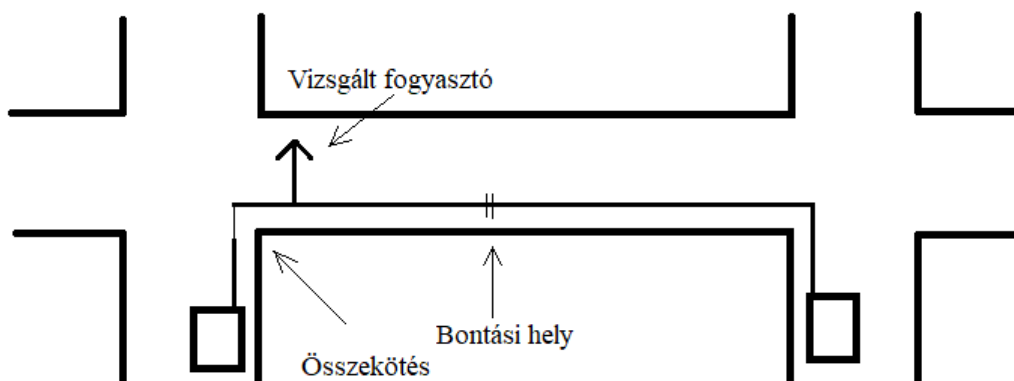
Központi kompenzáció alkalmazására olyan esetekben van szükség, ha változó meddő teljesítmény igényt szeretnénk kielégíteni. Ez a technológia a csatlakozási ponton méri a szükséges meddő teljesítményt, és ennek függvényében kapcsolja be a kondenzátorokat.

8.1.3. Hálózat átrendezése [20.]

8.1.3.1. Hálózatkép javítás

Egy meglévő hálózat vizsgálatakor először elemeznünk szükséges az adott hálózatképet, hogy az a legoptimálisabban lett-e kialakítva. Tanulmányozni kell, hogy az adott fogyasztók a hozzájuk legközelebb eső transzformátorról vannak-e ellátva. Ha nem a legközelebbiről, akkor célszerű az érintett fogyasztóknál a hálózatot megbontani és a közelebbi transzformátor hálózatára átkötni azokat.

Ennek megvalósítására mutat példát a 10. ábra.



10. ábra Hálózatkép javítás

8.1.3.2. Vezetékcseré, alátámasztás

Amennyiben a hálózatkép javításának folyamata nem vezetett megfelelő eredményre, úgy szükséges lecserélni 95 mm^2 -es vezetékre a hálózaton található összes, 70 mm^2 -nél kisebb keresztmetszetű vezetékét, mivel a megfelelő vezetékkeresztmetszet megválasztással lehet hatékonyan befolyásolni a hálózaton uralkodó feszültségviszonyokat.

Ha az érintett hálózaton már nem növelhető tovább a vezetékkeresztmetszet a feszültségviszonyok javításának érdekében, akkor az alátámasztás módszerét célszerű alkalmazni.

Ebben az esetben egy arra alkalmas pontban megbontjuk a hálózatot, majd az így létrejövő új hálózatrészt összekötjük a tápláló transzformátorral, egy új áramkört hozva létre ezzel.

Az 3. táblázat tartalmazza az alátámasztási hossz ($L1$) és megengedett legtávolabbi áramkörü pont távolságának ($L1+L2$) függvényében az áramkörre felvehető fogyasztók számát és a fázisonkénti terhelő áramot:

L1+L2 [m]	L1 [m]	L2 [m]	F [db]	I _t [A]
550	300	250	44	88
650	300	350	39	78
650	400	250	37	74
700	400	300	35	70
750	500	250	31	62
800	500	300	30	60
850	500	350	28	56

3. táblázat Az áramkörre felvehető fogyasztók száma és a fázisonkénti terhelő áram

Ahol:

L – a hálózat hossza méterben

F – a fogyasztók száma

I_t – a terhelő áram értéke Amperben

8.1.3.3. Új vezeték létesítése

Új vezeték létesítését főként olyan utcák kereszteződésében alkalmazzák, ahol két különböző áramkör helyezkedik el egymáshoz képest viszonylag közel, akár közös oszlopsoron. Ilyen esetben megoldható az érintett szakaszok átkötése új vezeték létesítésével.

Ekkor a létesített új vezeték szabadvezetékes hálózaton szigetelt, 4*95 mm² keresztmetszetű szabadvezetéket, illetve zsákutcában 4*50 mm²-eset alkalmaznak, míg városi kábelhálózatoknál 240 mm²-es, külterületen 95-240 mm²-es kábelek alkalmazandóak. Új vezeték létesítése esetén fontos követelmény, hogy a későbbiekben könnyen át lehessen alakítani a hálózatot.

8.1.3.4. Új Kőf/Kif táppont létesítése, körzet átrendezése

Az utóbb megemlített két lehetőség (alátámasztás, új vezeték létesítése) csak rövid távú megoldásnak tekinthető, mivel egy adott hálózaton folyamatosan újabb fogyasztói igények jelentkeznek, illetve a meglévő fogyasztók is mind nagyobb teljesítményeket igényelnek a technológiák fejlődésével.

Hosszú távú megoldásként sokkal gazdaságosabb egy új KÖF/KIF táppont létesítése, majd ezzel együtt az érintett körzetek átrendezése. Ahhoz, hogy egy, az alaptervezésben még nem szereplő új transzformátorkörzetet tudjunk létesíteni, muszáj rendszerszinten gondolkozni. Új transzformátor telepítése előtt meg kell találni a legoptimálisabb helyet, ahonnan a legtöbb áramkör indítható lesz, célszerű új parcellázások helyén elhelyezni. Ha az új körzet áramkörei érintkeznek, keresztezik korábban már meglévő áramkörök vezetékeit, úgy felül kell vizsgálni, hogy nem célszerűbb-e az érintett vezetékeket az új transzformátorról ellátni.

Ha több lehetséges helyszín is rendelkezésre áll az új táppont kiépítéséhez, úgy előbb hatástanulmányt szükséges készíteni, ebben megvizsgálva táppontonként a lehetséges műszaki-gazdasági lehetőségeket, következményeket és az optimálisabbat választani.

8.2. Feszültségszabályozási lehetőségek közepfeszültségű hálózaton[2.][4.]

8.2.1. Szabályozható transzformátorok

Mind közép-, mind kisfeszültségű hálózaton szükségessé teszi a feszültségszabályozást a fogyasztók teljesítményének időbeni ingadozása. A hálózati elemeken eső feszültség változó a terhelés függvényében, amit kompenzálni szükséges a csatlakozási pontokra illetőleg.

Annak ellenére, hogy az alaphálózaton alkalmaznak különböző szabályozásokat, a változó rendszerterhelés, valamint a fent említett teljesítményingadozás miatt a 132

kV-os hálózati táppontok esetében változni fog a feszültség szint. Ennek KÖF oldalra vonatkoztatott kiküszöbölése rendkívül fontos feladat.

Ennek egyik megoldási módszere a terhelés alatt változtatható áttételű 132 kV/22 kV-os transzformátorok alkalmazása.

A szabályozási tevékenységnek meg kell felelnie az alábbi három kritériumnak:

- kismértékű hálózati terheltség esetén a tápponthoz legközelebb eső fogyasztóknál nem lehet túl nagy a feszültség szint;
- nagymértékű terhelés esetén a tápponttól távolabb eső fogyasztóknál nem lehet túl alacsony szintű a feszültség
- völgyterhelési időszakban az első feltétel betartását – csökkenteni kellene a 22 kV-os táppontban a feszültséget – korlátozza a második feltétel, míg a második feltétel betartását – csúcsterhelés idejére növelni kellene a feszültséget – az első feltétel akadályozza.

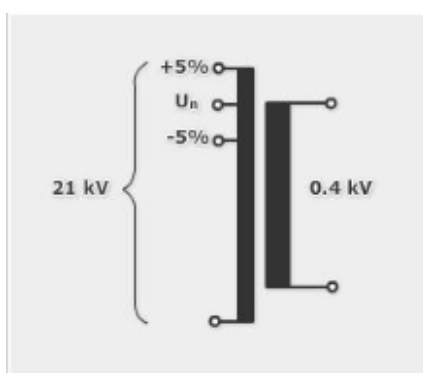
Sugaras hálózatok esetén a 132 kV/22 kV -os transzformátorok KÖF oldali gyűjtősinjének feszültségének automatikus szabályozását kétféle megoldás szerint végezhetjük el:

- állandó értéken tartott feszültség értékre szabályozunk, amely független a terheléstől, vagy
- kompenzáljuk a terhelésváltozás által okozott feszültségváltozást, ügyelve arra, hogy a névleges feszültség mindvégig a megengedett tűrési határon belül maradjon.

A feszültségváltozás megengedett értéke $\pm 5\%$ lehet (max $\pm 10\%$). A transzformátor áttételének megválasztásakor fontos figyelembe vennünk a tápláló hálózatban elfoglalt helyzetét, valamint szükséges, hogy tudjuk változtatni a transzformátor áttételét.

A 0,4 kV-os fogyasztói transzformátorokat városi hálózat esetén 10 kV-os kábelhálózat, vidéki területen pedig 22 kV-os vagy 35 kV-os szabadvezetékes hálózat táplálja meg, többnyire 120/22, 120/35 vagy 120/10 kV-os alállomásokról.

Középfeszültségű hálózatok esetében elmondható, hogy a táppontok közelében magasabb feszültség szintet mérhetünk, mint a tápponttól távolabb eső, illetve végpontoknál. Emiatt a táppont közelében lévő transzformátorokat nagyobb, míg a távolabb esőket kisebb áttételűnek választják. Ebből adódóan a 0,4 kV-os transzformátorok nagyobb feszültségű tekercsét három kivezetéssel készítik, úgynevezett nagy megcsapolásúak.



11. ábra Transzformátor megcsapolás

Ezt a megoldást üzemben kívül tudják csak alkalmazni, ugyanis ekkor lehetséges a megcsapolást beállítani.

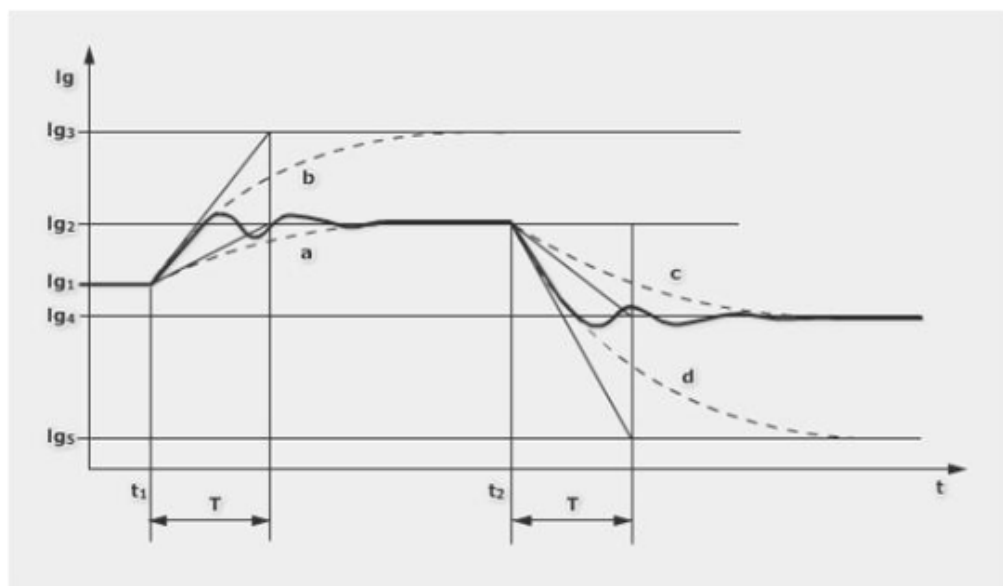
A közép/kisfeszültségű transzformátorok megcsapolásos beállításával küszöbölhető ki a hálózaton való eltérő elhelyezkedésből adódó feszültségváltozás. Viszont mivel időben változik a terhelés, így szükséges a 120/KÖF transzformátorok áttételének terhelés közbeni szabályozása is. Ennek korszerű megoldásai már automatikusan működnek.

8.2.2. Szinkron generátorok gyorsszabályozói [11.]

Elterjedt módja a feszültség szabályozásnak a hálózaton található szinkron generátorok gerjesztő áramának változtatása, ami magával vonja a kapocsfeszültség gyors változását is.

A rendszerbe beépítenek egy gyors szabályozót, amely figyeli, hogy az előírt értéken belül található-e még a generátor kapocsfeszültségének értéke. Amennyiben kisebb az előírt értéknél a kapocsfeszültség, úgy a gyors szabályozó növeli a gerjesztő áramot. Ellenkező esetben csökkenti azt. A kompaundálás módszere abban áll, hogy előírhatjuk a terhelési áram függvényében is az elvárt feszültséget.

A gerjesztő áram exponenciális görbe mentén követi a szabályozást, ezt láthatjuk a 12. ábrán is.



12. ábra I_g gerjesztőáram szabályozása

Ahhoz, hogy megfelelően gyors szabályozást érhesünk el, szükséges, hogy a gyors szabályozók erősen túlszabályozottak legyenek, illetve főbb jellemzőik a csillapítás és a rugalmas visszavezetés legyenek.

A kompaundálás módszerének alkalmazásakor a gyors szabályozókhöz nem a teljes kapocsfeszültséget vezetjük, hanem előbb csökkentjük annak értékét a terheléssel arányosan és csak ezt a csökkentett értéket vezetjük a szabályozóhoz. Ha megnő a terhelés, a gép kapcsain lecsökken a feszültség és a szabályozó növelni fogja a gerjesztő áramot, hogy ezzel kompenzálja a feszültségkülönbséget. Fordított esetben csökkenti a gerjesztő áramot.

9. Kisfeszültségű vizsgálat

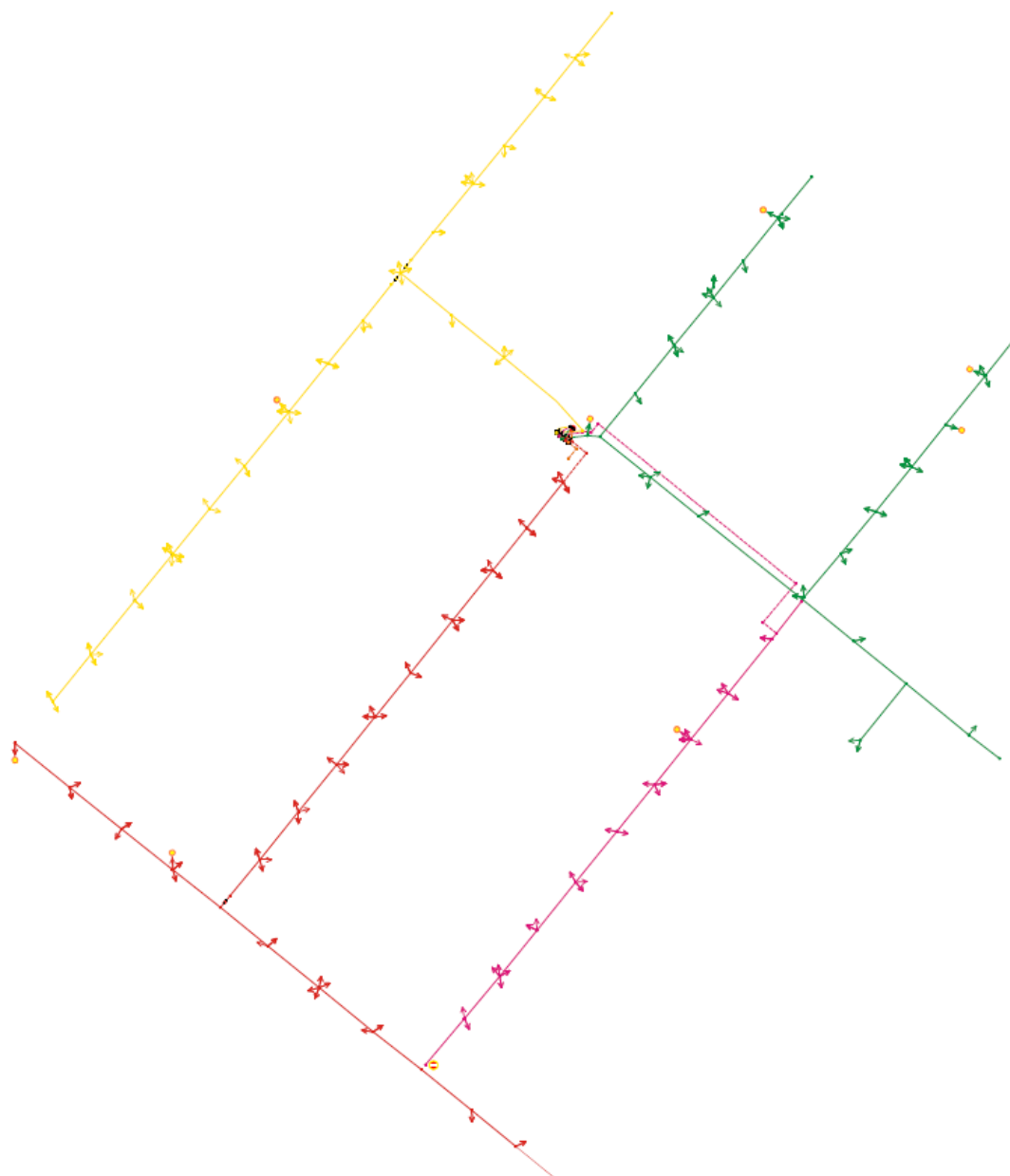
Ahhoz, hogy a rendkívül összetett, nagyszámú adattal rendelkező villamosenergia-rendszerekben gyorsan, eredményesen tudjunk akár számításokat, szimulációkat elvégezni, akár tervezni, vagy különböző eseteket megvizsgálni, manapság számos hálózatanalizáló szoftver áll rendelkezésünkre. A modern technika segítségével már nem szükséges kézzel végeznünk számításokat, sokkal gyorsabb és pontosabb megoldást jelentenek ezek a programok és akár valós idejű vizsgálatok elvégzésére is lehetőséget kínálnak.

Jelen dolgozatban a svájci fejlesztésű, Magyarországon az ABB által forgalmazott Neplan szoftvert használtam, annak is az 5.5.4-es verzióját. A Neplan szoftvert a 2000-es évek eleje óta alkalmazza a hazai elosztói engedélyesek közül az E.ON és az ELMŰ.

Ez egy könnyen kezelhető, felhasználóbarát szoftver, amely használható elektromos-, gáz-, víz- és távfűtési hálózatok tervezéséhez, vizsgálatához, különböző szimulációs és számítási folyamatok elvégzéséhez. Könnyedén építhető Neplan segítségével hálózati modell, amellyel különböző vizsgálatokat tudunk elvégezni. Mivel időbeli változást nem tudunk követni Neplannal, így vizsgálataim során az óránkénti szimulációt alkalmaztam.

9.1. Modell

A hálózati modell elkészítésénél arra törekedtem, hogy a vizsgálat a valóságot minél inkább leképezze, valamint valószínűsíthető legyen rajta a hibalehetőség is nagymértékű napelemes beépítés esetére. Egy falu egy lehetséges transzformátor körzetét készítettem el, mely összesen öt áramkört tartalmaz, ebből az egyik a közvilágításért felel. Vizsgálataimat a hálózat egy áramkörén végeztem el, ezt az áramkört piros színnel jelöltem a modell villamos hálózatának sémarajzán, a 13. ábrán.



13. ábra Kisfeszültségű hálózat Neplan modellje

A hálózat betáplálása egy háromfázisú KÖF/KIF transzformátoron keresztül történik. A transzformátor 250 kVA névleges teljesítményű, 22kV/0,4kV áttételű, a vasvesztesége 650W. Kapcsolási csoportja: Dy5.

A vizsgált áramkör a hálózatot tápláló transzformátor 0,4kV-os gyűjtősínjére csatlakozik.

Összesen 94 db terhelés található a vizsgált áramkörön. A fogyasztók modellezéséhez valós idejű, mért adatokat használtam.

9.2. Loadflow szimuláció

A kisfeszültségű hálózati modellen végzett szimulációim célja az volt, hogy megfigyeljem a feszültség értékeinek alakulását különböző mértékű napelemes penetráció esetén. Napelemes penetráció alatt a hálózaton előforduló napelemes HMKE-k mennyiségi elterjedtségét értem. Azt, hogy a különböző esetekben, hogy alakulnak a feszültségviszonyok, a Neplan Loadflow számítási funkciójának használatával elemeztem. Ezzel a számítási módszerrel vizsgálható, hogy az egyes elemeken hogyan változnak a terhelések.

A szimuláció során lehetőségünk van több különböző mennyiség számítására és a számított értékének megjelenítésére. A megjeleníthető mennyiségek többek között a feszültség, a feszültség névleges értékéhez viszonyított érték, a hatásos, a meddő és a látszólagos teljesítmény, az áram.

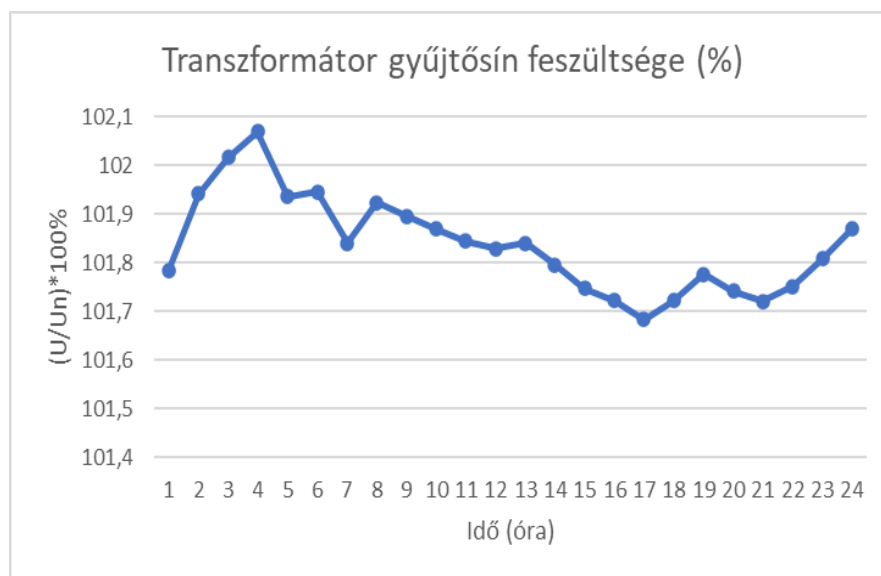
Különböző napelemes penetrációk esetén vizsgáltam, hogy a feszültség megfelel-e az MSZ EN 50160 szabványban meghatározott értékeknek, a megengedhető intervallumon belül esnek-e a szimulációs eredmények. Napjainkban egyre elterjedtebb a napelemes energiatermelés, számos különböző pályázati lehetőség is kínálkozik, akár egyénileg, akár települési szinten. Vannak kezdeményezések energiaközösségek kialakítására is, amelyek célja minél inkább kiaknázni a megújuló energiatermelésben adódó lehetőségeket. Emiatt kisfeszültségű vizsgálataim során több különböző esetet vizsgáltam, annak megállapítására, mekkora mértékű napelemes elterjedtség mellett van már szükség a hálózaton beavatkozásra. Négy különböző esetet vizsgáltam meg. Az alapesetnek azt vettem, amikor a vizsgált áramkörön egyetlen napelemes erőmű sem található. Ezen kívül vizsgáltam a 25%-os, az 50%-os és a 75%-os PV penetráció eseteit. 25%-os gyakoriság esetén minden negyedik terheléshez csatlakoztattam HMKE-t, 50%-os esetben minden másodikhoz.

Különösen figyelemmel voltam a transzformátor gyűjtősinjének, illetve a hálózati végpontok feszültségére. A szimulációk megkezdése előtt több mérési pontot állítottam be, egyet-egyet a gerincvezeték végén, illetve felénél, továbbá a leágazások végpontjához és felezési pontjához. Ezeken kívül minden esetben mértem a transzformátor gyűjtősinjének feszültségét. A mérési pontokat az alábbi ábrán látható módon láttam el jelöléssel. A gerincvezeték A betűvel, a két leágazást B-vel és C-vel jelöltem, a végpontokat 1-es, míg a felezési pontokat 2-es indexszel. A transzformátor kisfeszültségű gyűjtősinjén mért értékeket gysín feszültségeként jeleztem. A szimuláció során olyan nyári napot vizsgáltam, amelyen nagy volt a napsütéses órák száma. Méréseimet óránként végeztem el, és a függelékben található táblázatokban látható módon rögzítettem. A négy eset mérési eredményeit a Függelék 27-30. táblázata tartalmazza.

9.2.1. Alapeset: 0%-os napelemes beépítettség

Azért volt szükséges alapesetként napelemes rendszerek nélkül vizsgálnom a feszültségviszonyokat a hálózaton, mert így lehetőségem volt megállapítani, megfelelő módon lettek-e kiosztva a terhelések, megfelelő-e a vizsgálatokhoz a felépített rendszer.

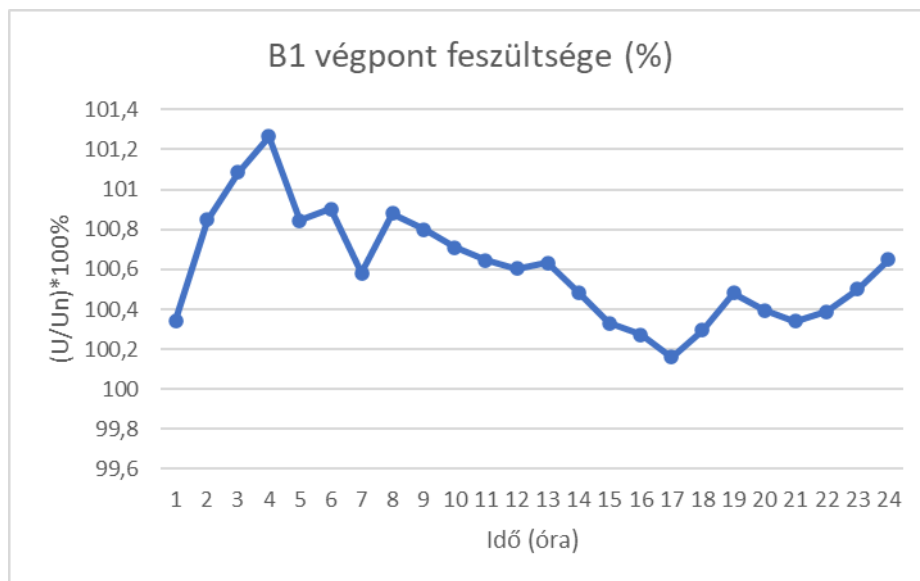
Elemeztem, hogy szükséges-e a transzformátor üzem alatti szabályozása. A mérés eredményeképpen megállapítottam, hogy nem szükséges szabályozni jelen esetben a transzformátort, ugyanis a mért feszültségértékek megfelelnek a szabványban leírt határértékeknek.



14. ábra Transzformátor KIF gyűjtősin feszültsége 0%-os PV penetráció esetére

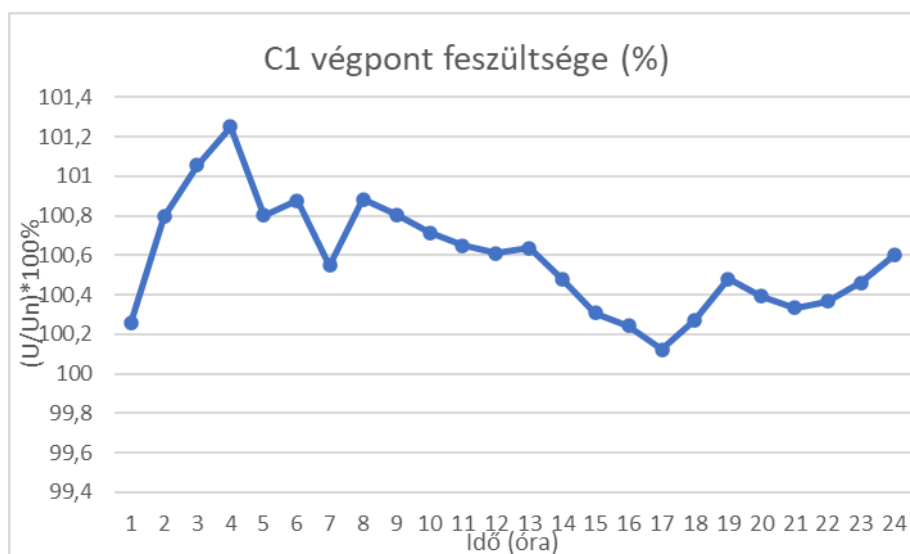
A 14. ábrán jól látható, hogy kisebb csúcsok különíthetők el a fogyasztásban. Az első ilyen csúcs a reggeli órákban látható, a legkisebb feszültség 7 órakor mérhető, 407,361V, a következő csúcs pedig délután 17 órakor látható, az utolsó 21 óra környékén tapasztalható. A legkisebb teljesítményfelvételt hajnali 3-4 óra magasságában észleltem, tehát ekkor volt a legnagyobb értékű a kisfeszültségű gyűjtősin feszültsége, 408,278V-ot mértem. A 17 órakor mért csúcs idején a feszültség értéke 406,733V-nak adódott, míg a másik csúcs (21 órakor) nagyon kis mértékű eltérést mutatott 406,884V-ot mértem. A grafikon alapján megállapítottam, hogy napelemes termelőegységek nélkül a gyűjtősin feszültsége minimális mértékben változik a terhelés ingadozása során.

A hálózati végpontokon nagyobb feszültségesések adódtak.



15. ábra B1 végpont feszültsége 0%-os PV penetráció esetére

A B1-essel jelölt végpont feszültségét vizsgálva megállapítható, hogy a legkisebb terhelés hajnali 4 órakor adódott, ekkor volt a legmagasabb a mérési pont feszültsége (405,055V). A reggeli csúcs a terhelésben 7 órakor volt tapasztalható, a feszültség itt lecsökkent 402,325V-ra. A legnagyobb terhelés délután 17 órakor volt mérhető, ekkor volt a feszültség a nap folyamán a legalacsonyabb értéken (400,639V). Érzékelhető még egy kisebb csúcs a terhelésben 21-22 óra környékén, a legkisebb feszültség itt 401,363V volt.



16. ábra C1 végpont feszültsége 0%-os PV penetráció esetére

A C1-es végpontot vizsgálva láthatóak az előzőekben ismertetett időpontokban a kiugró értékek. A legmagasabb értékű feszültséget szintén 4 órakor mértem, 404,999V-ot, ugyanis ekkor volt a legalacsonyabb értékű a fogyasztás. A legalacsonyabb értéknek feszültség szempontjából a 17 órai mérési adat, 400,492V adódott, amikor is a legnagyobb a terhelés a hálózaton.

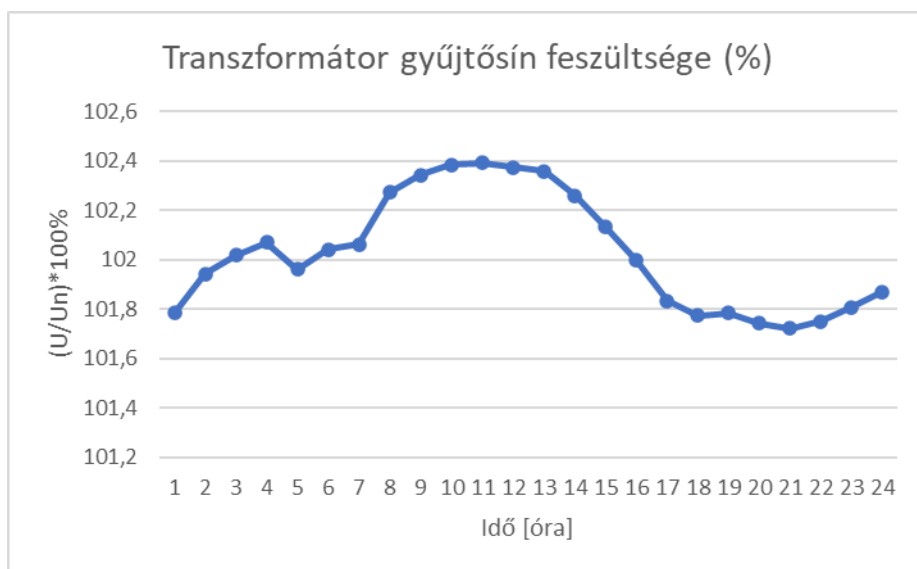
Az alapeset, azaz a 0%-os PV penetráció vizsgálata során a mért értékek alapján megállapítottam, hogy a vizsgált hálózat alkalmas egy valós kisfeszültségű transzformátorkörzet áramkörének modellezésére.

9.2.2. 2.eset: 25%-os PV penetráció:

Miután az első mérések során bizonyítást nyert, hogy a vizsgált hálózati modell megfelel a szimulációs elvárásaimnak, az áramkörön 25%-os PV penetrációt modelleztem. Úgy alakítottam ki a 25%-os napelemes elterjedést, hogy minden negyedik terheléshez csatlakoztattam egy napelemes HMKE-t a hálózatra. A rendszerek méretét az adott fogyasztók terhelés értékeihez megfelelően állítottam be, úgy, hogy várhatóan fedezze a fogyasztók terhelés értékeit.

Vizsgálataimat reggel 6 és este 19 óra között végeztem, mivel ezen időszakon kívül nem történik jelentős változás az értékekben.

Grafikonon vizsgálva a feszültségértékek változásait, jól látható, hogy emelkedett az egész hálózaton a feszültség értéke. Ennek oka a hálózaton megjelenő napelemes termelés. Míg napelemes betáplálás nélkül a gyűjtősínen 407,785V-ot mértem reggel 6 órakor, addig 25% mellett 408,162V-ot. A gyűjtősín feszültségének grafikonon ábrázolt képéből látható, hogy a legnagyobb feszültségértékek a 10-13 óra közötti időszakban voltak mérhetőek. A legmagasabb értéket ebben a mérési változatban 11 órakor kaptam, ez 409,565V lett, ami jóval magasabb, mint az alapesetben mért 407,379V-os érték. A gyűjtősínen a feszültség a déli órákban éri el a maximális értéket, ugyanis ekkor táplálják be az inverterek a legmagasabb értékű teljesítményt.

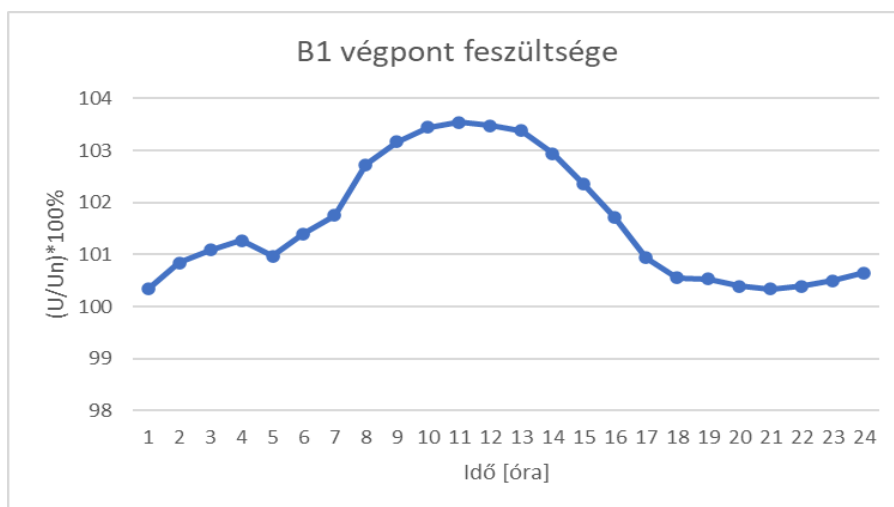


17. ábra Transzformátor KIF gyűjtősin feszültsége 25%-os PV penetráció esetére

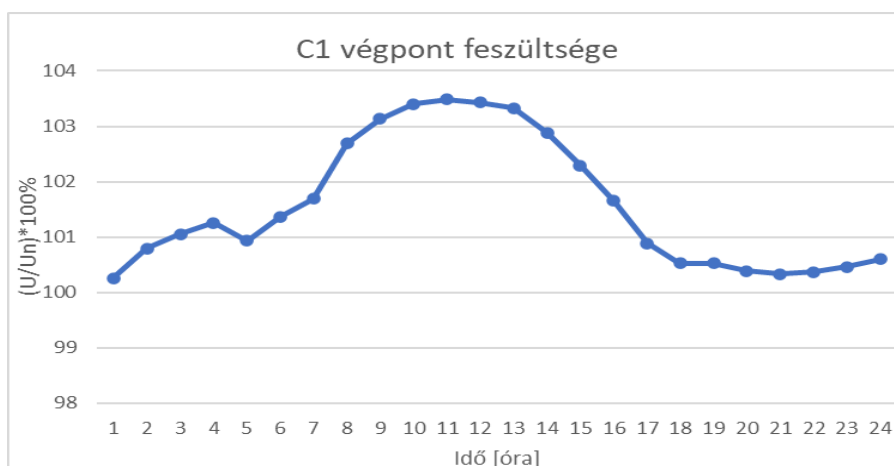
Összehasonlítva a 0 és a 25%-os penetráció esetén mért gyűjtősin feszültségeket, megállapítható, hogy utóbbi esetben, tehát napelemekkel rendelkező hálózaton sokkal egyenletesebb görbét kaptam, kiegyenlítettebben változik a feszültség értéke, nincsenek a görbén kiugró értékek. A délelőtti órákban egyenletesen emelkedik a feszültség, ahogy egyre több a napsütés, míg a délutáni órákban egyenletes csökkenés látható.

Napelemes termelés esetén megállapítható, hogy a rendszer kisebb mennyiségű áramot vesz fel a középvezettségű hálózatról, helyben kerül felhasználásra a termelt energia. Azokban az időszakokban, amikor többlet teljesítményt táplálnak vissza a napelemes rendszerek a hálózatba, meg fog fordulni a teljesítmény áramlási irány és a középvezettségű hálózat felé áramlik a többlet.

Elemeztem a hálózati végpontokon mért értékeket is, amelyekből jól kitűnik, hogy az alapesethez képest, amikor nem termeltek napelemek a hálózaton, csökkent a feszültségesés mértéke a gyűjtősinhez viszonyítva.



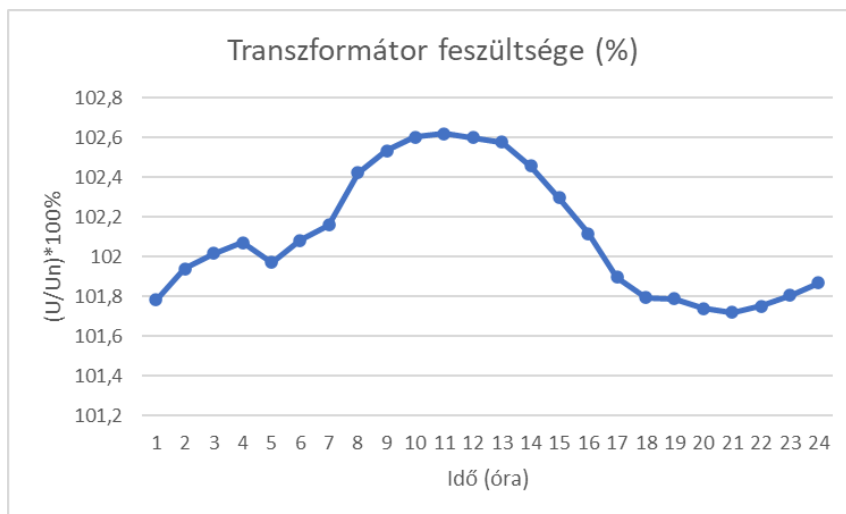
18. ábra B1 végpont feszültsége 25%-os PV penetráció esetére



19. ábra C1 végpont feszültsége 25%-os PV penetráció esetére

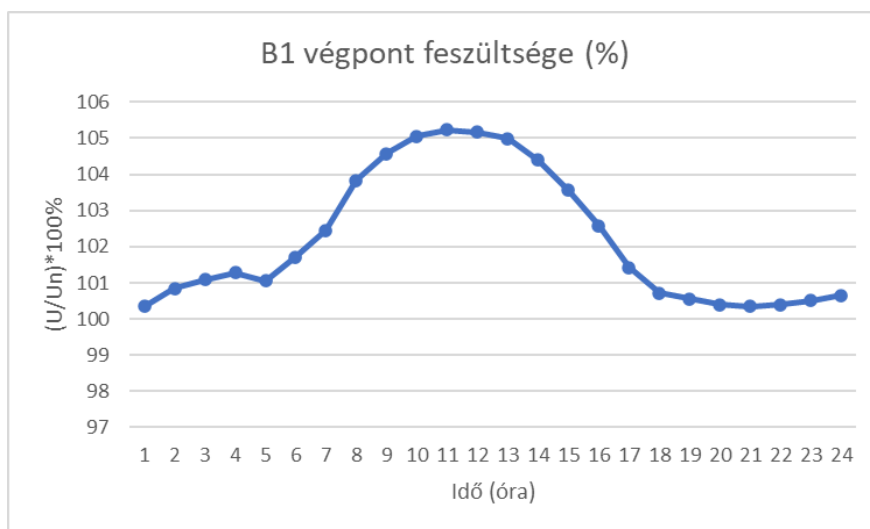
9.2.3. 3.eset: 50%-os PV penetráció

Az 50%-os PV penetráció szimulálásakor hasonlóképpen jártam el, mint a 25%-os esetben. Itt minden második terheléshez csatlakoztattam napelemes HMKE-t a hálózatra. A grafikonon továbbra is egy, a délelőtti órákban egyenletesen növekvő, majd a 10-13 órás csúcs időszak után egyenletesen csökkenő görbét látunk. Megállapítottam, hogy tovább emelkedett a gyűjtősin feszültsége a 25%-os PV beépítettség esetén mért értékekhez képest. A 11 órás csúcs idején mért érték 25% mellett 409,565V volt, míg jelen esetben 420,948V-ot mértem a szimuláció során.

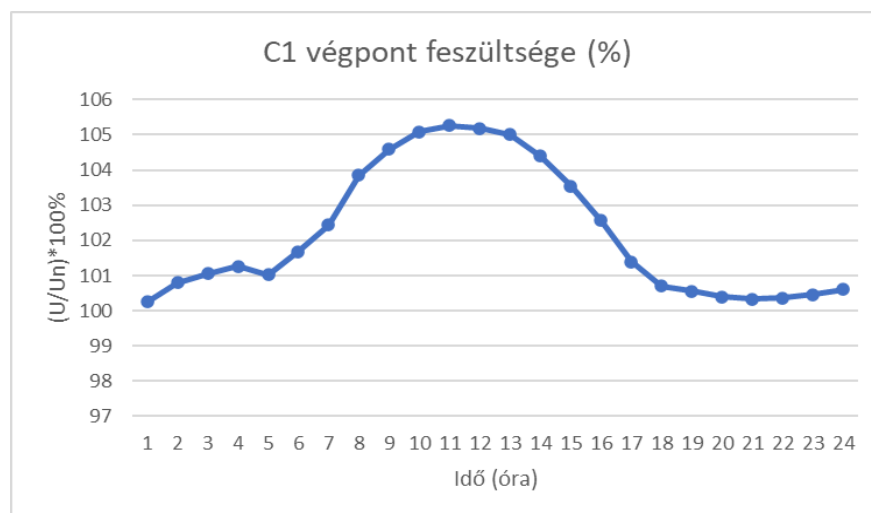


20. ábra Transzformátor KIF gyűjtősin feszültsége 50%-os PV penetráció esetére

A hálózati végpontok feszültsége is emelkedett, A B1-es mérési ponton az előző eset 414,15V-jához képest már 420,948V-ra növekedett a feszültség, míg a C1-es végpontra ez az érték 413,958V-ról 421,032V-ig emelkedett.



21. ábra B1 végpont feszültsége 50%-os PV penetráció esetére

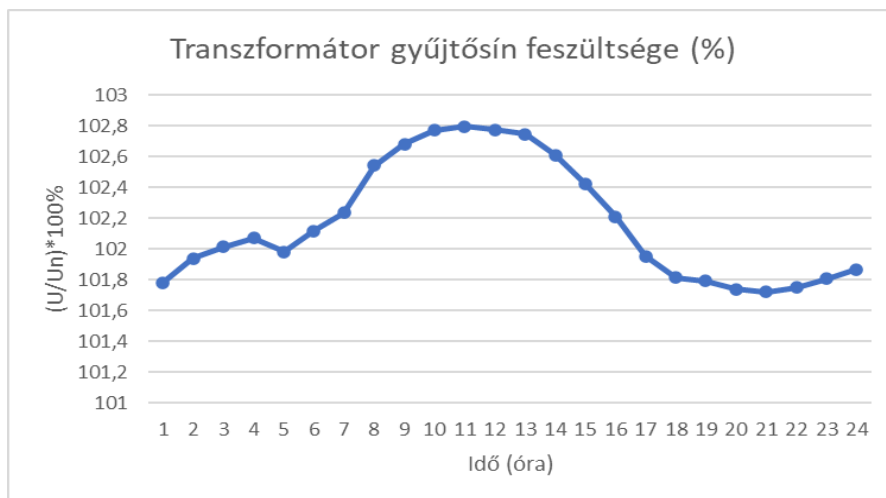


22. ábra C1 végpont feszültsége 50%-os PV penetráció esetére

9.2.4. 4.eset: 75%-os PV penetráció:

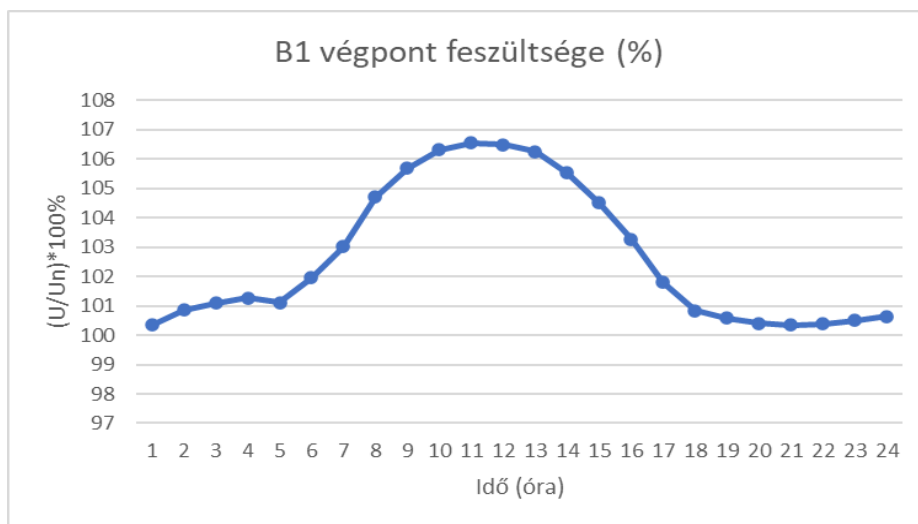
Utolsó esetként vizsgáltam a 75%-os napelemes beépítettséget. A terhelések háromnegyedére telepítettem napelemes HMKE rendszert, és vizsgáltam Loadflow szimuláció segítségével a feszültségviszonyokat. Ilyen mértékű napelemes penetráció már annyival növelte az adott hálózaton a feszültséget, hogy bizonyos időpontokban már meghaladta a megengedhető feszültségesés értékeit, ugyanis HMKE betáplálási pontjain nem haladhatja meg a 3%-ot a feszültségesés értéke.

A transzformátor kisfeszültségű gyűjtősínjének feszültségváltozásait vizsgálva megállapítottam, hogy a kezdeti, azaz napelemek nélküli vizsgálatok során 11 órakor mért 407,379V-hoz képest, itt már 411,183V-ot mértem. A feszültség, a 25%-os és az 50%-os esethez hasonlóan továbbra is a 10-14 órás időszakban a legmagasabb, ezen időszakban többlet teljesítményt tápláltak vissza a hálózatba a napelemes rendszerek, ugyanis a megtermelt teljesítményük nem került felhasználásra teljes egészében. Ezáltal azt tapasztaltam, hogy megfordult a teljesítmény áramlás iránya, a többlet a közép-feszültségű hálózat irányába áramlott.

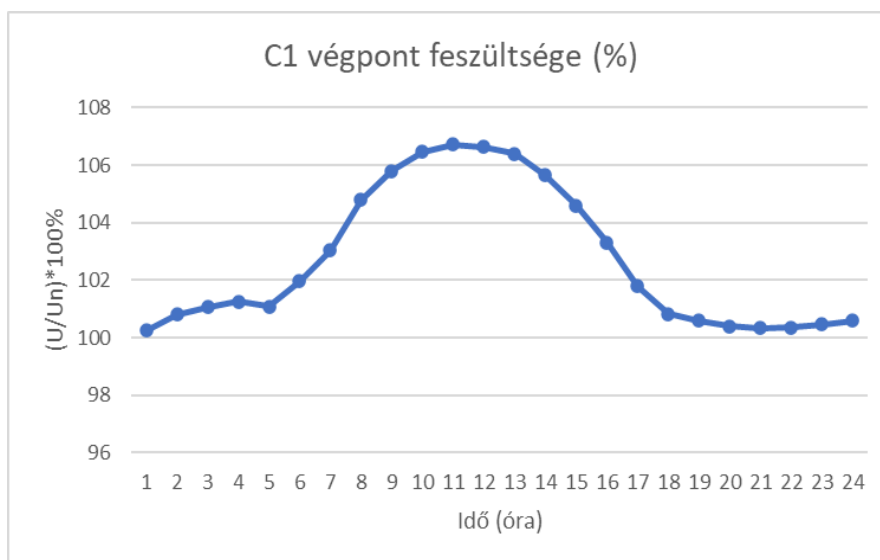


23. ábra Transzformátor KIF gyűjtősin feszültsége 75%-os PV penetráció esetére

A hálózati végpontok feszültségértékeit vizsgálva megállapítottam, hogy nőtt a feszültségesés, a leginkább napsütéses időszakban, azaz amikor a napelemes rendszerek a legtöbb teljesítményt táplálják vissza a hálózatba, már kiugróan magas értékeket kaptam, amelyek nem felelnek meg a szabványos értékeknek.



24. ábra B1 végpont feszültsége 75%-os PV penetráció esetére



25. ábra C1 végpont feszültsége 75%-os PV penetráció esetére

9.3. Kisfeszültségű vizsgálat eredménye

Szakdolgozatom kisfeszültségű vizsgálati részében maximum 75%-os napelemes penetrációra végeztem szimulációkat Neplan szoftver segítségével. Ennél magasabb fokú napelemes elterjedtség nem valószínűsíthető a közeljövőben a kisfeszültségű hálózatainkon.

A méréseim első felében, azaz az alapesetben (0%-os) és a második esetben (25%-os PV penetráció) megállapítható, hogy nem volt szükség beavatkozásra a hálózaton, ugyanis megfelelőek voltak a mért feszültségértékek. A mért értékekből kitűnik, hogy 25%-os beépítettség mellett csökkentek a feszültségkülönbségek a transzformátor kisfeszültségű gyűjtősinje és a hálózati végpontok között.

Az 50%-os napelemes penetrációs vizsgálatok során megállapítottam, hogy jelentősen megnőtt a feszültségkülönbség a transzformátor KIF gyűjtősin és a végpontok között, a napsütéses órák alatt ez már helyenként 10V-ot is meghaladó értéket adott. Itt már szükséges lehet egy terhelés közben szabályozható transzformátor használata. Ez lehetőséget adna arra, hogy egy választott csomópontban adott értékre szabályozhassuk a feszültség értékét. Érdeemes arra a végpontra beállítani a

szabályozást, ahol napelemes rendszerek nélkül a legnagyobb feszültségkülönbség adódott a gyűjtősin és az adott hálózati végpont között.

75%-os napelemes penetráció esetén már jóval kiugróbb értékeket tapasztaltam, ezért arra a következtetésre jutottam, hogy 75% -os vagy a fölötti napelemes beépítettség esetén már nem lesz elegendő egy terhelés alatt szabályozható transzformátor beépítése a hálózatba és annak használata, mindenképpen szükséges lenne megvizsgálni a teljes hálózatot, és egy átfogó hatásvizsgálat alapján javítani a feszültségviszonyokat, hiszen a szabályozható transzformátorok csak kisebb feszültségemelkedés esetén használhatóak. Először meg kell vizsgálni azt, hogy az adott hálózat a legoptimálisabb módon került-e kialakításra, az érintett fogyasztók a legközelebbi transzformátorról kerülnek-e ellátásra? Amennyiben ez nem vezetne eredményre, úgy a vezetékek keresztmetszetének változtatása is egy elérhető megoldás lehet. Az általam vizsgált hálózatban már eleve 95mm²-es vezetékek vannak, így a keresztmetszet növelése nem opció.

Érdemes megvizsgálni, hogy a hálózaton kialakítva egy új áramkört, javulnának-e a feszültségviszonyok.

A jelenlegi tendenciákat elemezve nem valószínűsíthető a 75%-os vagy azt meghaladó PV penetráció a kisheszültségű hálózaton. A jövőben változhatnak a fogyasztói szokások, illetve elterjedhetnek az energiatárolós rendszerek is, ezek mind-mind jelentősen befolyásolják a feszültségviszonyokat a hálózaton.

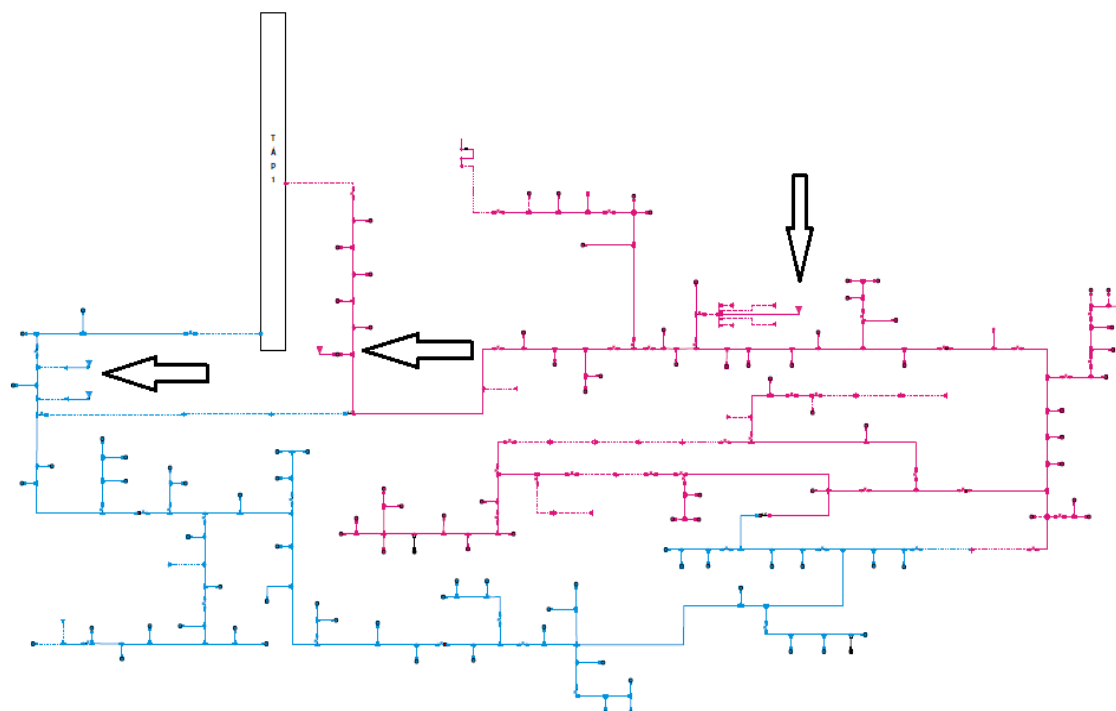
10. Középfeszültségű vizsgálat

A kiserőművek középfeszültségű hálózatokra gyakorolt hatásait egy alállomásból (TÁP1) és két, alapvetően bontva üzemelő, de egymással hurkoltan kapcsolódó hálózaton (Vonal2 és Vonal6) vizsgáltam. A kék színnel jelölt Vonal 2-ön két 499kW-os erőmű található, míg a rózsaszínnel jelölt Vonal 6 hálózatán egy 150kW-os és egy 4*499kW-os kiserőmű található.

Annak vizsgálatára, hogy milyen hatást gyakorolnak a napelemes kiserőművek a középfeszültségű hálózat feszültségviszonyaira, először a kiserőművek nélkül végeztem Loadflow szimulációkat a Neplan segítségével, majd pedig a naperőművek hálózatra csatlakoztatásával elemeztem a Loadflow futtatás eredményeit.

10.1. A hálózat bemutatása

Az elkészített hálózat Neplan modellje az 26. ábrán látható. A nyilak segítségével jelöltem a hálózatba beépített napelemes kiserőművek telepítési helyeit. A Vonal 2 hálózatának elején helyezkedik el a két db, egyenként 499kW-os erőmű. A Vonal 6-os hálózaton (rózsaszínnel jelölve) a hálózat elején található a 150kW-os, míg a hálózat második negyedében a 4*499kW-os kiserőmű. A két hálózat egymással három helyen van összekapcsolva egy-egy TMOK segítségével, illetve az egyik pontban transzformátoron keresztül.



26. ábra Középfeszültségű hálózati Neplan modell

A nagyfeszültségű oldalt mögöttes hálózattal képeztem le. Az állomásban két NAF/KÖF transzformátor található. Az egyik (ez látja el a Vonal 6-ot), egy 120/22kV áttételű, 25MVA-es, háromfázisú transzformátor, amelynek kapcsolási csoportja Yy6, vasvesztése: 25,56kW, dropja 10,1% és üzem alatt szabályozható. A másik transzformátor szintén 120/22kV-os háromfázisú gép, 25MVA-es, Yy6 kapcsolási csoportú, vasvesztése 26,35kW, dropja pedig 10,75%, valamint szintén üzem alatt szabályozható.

Mivel nem rendelkezem a KÖF/KIF transzformátorok esetében valós értékekkel, így ezeket általános értékek alapján választottam. Kapcsolási csoportjukat Dyn5-re állítottam, vasvesztésüket a névleges teljesítmény 1%-ára, valamint 5%-os drop értékeket vettem figyelembe.

Annak érdekében, hogy a napelemes kiserőművek a termelési idő minél nagyobb hányadában tudjanak névleges teljesítményüket termelni, nagyobb beépített teljesítménnyel vettem őket figyelembe a névleges értéknél.

A felépített hálózat teljes hossza 99 km, ebből 11 km kábeles hálózat, a többi szabadvezetékes. A Vonal 2 hossza 47 km, míg a Vonal 6 hossza 52 km.

10.2. Loadflow szimuláció

Alapesetként vizsgáltam napelemes kiserőművek nélkül a hálózatot Neplan szoftver segítségével. Loadflow szimulációt futtatva megvizsgáltam Vonal 2 és Vonal 6 esetében is az áram-és feszültségviszonyokat.

Kiserőművek nélkül a Vonal 2 indulóárama a hálózat elején 132,438A volt, feszültsége – ami megfelel a NAF/KÖF transzformátor középfeszültségű gyűjtősín feszültségének –, 21,873kV-ra adódott. Vonal 6 esetén az indulóáram a hálózat elején 165,028A volt, a transzformátor középfeszültségű gyűjtősín feszültsége pedig 21,707kV. A fent leírt jellemzőkkel rendelkező napelemes kiserőművek hálózatra csatlakoztatásával már jelentősen csökkentek az induló áramok. Vonal 2 esetében 105,379A-re, míg Vonal 6-on 104,443A-re változott az induló áram. Ennek okai a mindkét hálózat elejéhez közel található napelemes kiserőmű. Ilyenkor a rendszer kisebb mennyiségű áramot fog felvenni a nagyfeszültségű hálózathoz, mivel helyben kerül felhasználásra a naperőművek által megtermelt energia.

A mért feszültség és áramértékek alapján elmondható, hogy a nagyobb terhelések jelentős hányada a vonalak elején található.

Vonal 6 esetében naperőműves betáplálás mellett már az 5%-os határ közelében mozgott a feszültségesés értéke a hálózati végpontokon. Valószínűsíthető, hogy más időpontokban, más terhelési profilok mellett végzett mérések esetén már átlépné a feszültségesés a határértéket.

10.3. A vizsgálat kiértékelése

A közép feszültségű hálózati modellen végzett Loadflow szimulációk alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a jövőben szükséges lenne a hálózat fejlesztése, mivel nagyobb fokú naperőműves beépítettség esetén a feszültségesés értékek átlépnék a megengedett határértéket. Üzemzavar esetére képesnek kellene lennie az egyik hálózatnak ellátnia a másikat, ekkor 10%-os feszültségesés értékek a megengedhetőek. Vizsgálataim alapján Vonal2 kiesése esetén ez a hálózat jelen helyzetében is megoldott lenne, viszont Vonal 6 kiesésével már túllépné a feszültségesés a határértéket.

Ugyan több naperőmű a hálózatba való beépítésével csökken a hálózati táppontok felé haladva a feszültség értéke, viszont ez nem jelenti azt, hogy valójában felhasználásra kerülne a növekvő energia a hálózaton. A napelemes kiserőművek termelési csúcsidejében megfordult a teljesítmény áramlás iránya, és így a táppontok felé nagyobb mértékű teljesítmény áramlott. Viszont, mivel egy közép feszültségű alállomásról egyidejűleg többnyire nem kettő, hanem jóval több vonal is indulhat, így lehetséges, hogy a többlet teljesítmény szétoszlik a többi vonal között.

11.Összegzés

Egyre nagyobb törekvés mutatkozik a minél környezetkímélőbb – vagy annak feltételezett – energiatermelő megoldások iránt. Folyamatosan nő a háztartási méretű kiserőművek aránya a hálózaton, számos pályázati lehetőség is ösztönzi a fogyasztókat a napelemek telepítésére. Jelenleg még nem ér el olyan jelentős hányadot a hálózaton a HMKE-k részaránya, de a jövőben, bizonyos transzformátorkörzetekben akár 50%-os is lehet az arányuk. Illetve vannak már törekvések kisebb energiaközösségek kialakítására is, ez esetben jóval meghaladhatná az 50%-os telítettséget a hálózat.

Mind a kis-, mind a nagyfeszültségű hálózati modelleken végzett vizsgálatok bizonyították, hogy napelemes rendszerekkel rendelkező hálózatokon a penetráció növekedésével együtt nőtt a hálózati végpontokon a feszültség értéke. Attól függően, hogy hol helyezkednek el a hálózaton ezek a napelemes rendszerek, eltérő eredményeket kapunk. Hálózat veszteség szempontjából kedvező hatással vannak a hálózatra a napelemes rendszerek.

Úgy gondolom, érdemes lenne későbbiekben eltérő fogyasztói profilok mellett is elvégezni a vizsgálatokat.

A jövőben az egyre inkább elterjedő napelemes energiatermelés miatt szükséges lesz véleményem szerint akár új táppontok, akár új hálózatok kialakítására. Megoldást jelenthetne a nap közben termelődő többletenergia tárolása azon időszakokra, amikor a rendszerek kevesebb energiát tudnak termelni, ezáltal kevesebb lenne a táppont felé visszaáramló energia is.

12. Summary

There is an increasing pursuit after the more environment friendly - or believed - energy generation solutions. The ratio of household-sized small power plants growing continuously, there are also a number of tendering encourages consumers to install solar panels. Now the ratio of the HSSPP is not significant, however in the future in the area of some transformers it could reach even 50%. There are intentions to create small energy communities where the ratio could exceed the 50% saturation of the network.

In my thesis examining the low voltage networks part, I showed the effect of the different ratio of solar panel penetration to the voltage quality. I have demonstrated that the voltage at the network endpoints increased with the increase in penetration in networks with solar systems. Depending on where these solar systems are located on the network, we get different results. In terms of network loss, solar systems have a positive effect on the network.

I examined the effects of small-scale solar power plants installed near the supply point on medium voltage networks. Based on my research, it can be said that, as I experienced at low voltage, the voltage increased with the solar power supply, and the direction of the power flow was reversed during the peak periods.

In the future, due to the increasing use of solar energy production, in my opinion it will be necessary to create either new supply points or new networks. A solution could be to store the extra energy produced during the day for periods when the systems can produce less energy, thereby reducing the amount of energy flowing back to the supply point.

Források

- [1.] <https://www.enhat.mekh.hu/dinamikusan-no-a-napelemek-szama>
- [2.] <https://www.eon.hu/hu/blog/napenergia/napelem-rendszer-haztartasban-jelen-nem-pedig-vizio.html>
- [3.] <https://www.eon.hu/hu/blog/napenergia/18-napelem-rendszer-tevhit-ami-sokakat-elriaszt.html>
- [4.] http://napelem.net/napelemes_rendszer/index.php
- [5.] L. El Chaar, L. A. Iamont, N. El Zein: Review of photovoltaic technologies (Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019 november)
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032111000050>
- [6.] Mahmood H. Shubbak: Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends (Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019 november)
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S136403211930591X>
- [7.] <https://hu.wikipedia.org/wiki/Napelem>
- [8.] 2007. évi LXXXVI törvény a villamos energiáról
- [9.] <https://www.mnnsz.hu/napelem-tartoszerkezet-tipusok/>
- [10.] Dr. Novothny Ferenc: Villamos energetika I. (ÓE-KVK 2050, Budapest 2010.)
- [11.] Dr. Morva György, Villamosenergetika, 2012.
- [12.] <https://www.eon.hu/hu/hmke/tudnivalok.html>
- [13.] <https://www.eon.hu/hu/hmke/folyamat.html>
- [14.] <https://www.eon.hu/hu/lakossagi/ugyintezes/muszaki-ugyek/kiseromuvek-csatlakozasi-lehetsegei.html>
- [15.] MSZ EN 50160:2021 A közcélú elosztóhálózatokon szolgáltatott villamos energia feszültségjellemzői szabvány
- [16.] Davud Mostafa Tobnaghi and Rahim Vafaei: „The impacts of grid-connected photovoltaic system on distribution networks- a review”
Department of Electrical Engineering, Parsabad Moghan Branch, Islamic Azad University, Parsabad Moghan, Iran, (March 2016)
http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2016/jeas_0316_3845.pdf
- [17.] K. Pantziris: *Voltage support strategies in a rural low voltage network with high photovoltaic penetration,*

Department of Electrical Sustainable Energy, Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science (2014.)

<https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Af03268f7-ab7c-4bdd-96e6-c9f7d1c4ced1>

[18.] <https://new.abb.com/events/cired/line-voltage-regulator>

[19.] Dr. Dán András, Hartmann Bálint és Kiss Péter, Hálózati áramellátás és feszültségminőség, 2012.

[20.] D_U-010 Középfeszültségű és kiefeszültségű hálózatfejlesztési irányelvek (VU-246) (ELMŰ-ÉMÁSZ, 2013.04.01.)

Ábrajegyzék

1. ábra: A hálózatra kapcsolt napelemes rendszer felépítése és kapcsolódása [4.]
2. ábra: Sugaras hálózat [10.]
3. ábra: Gyűrűs hálózat [10.]
4. ábra: Körvezeték [10.]
5. ábra: Párhuzamos vezeték [10.]
6. ábra: Hurkolt hálózat [11.]
7. ábra: Line voltage regulator – LVR [16.]
8. ábra: LVR működése [16.]
9. ábra: Kompenzálás statikus kondenzátorteleppel [11.]
10. ábra: Hálózatkép javítás
11. ábra: Transzformátor megcsapolás [11.]
12. ábra: I_g gerjesztőáram szabályozása [17.]
13. ábra: Kisfeszültségű hálózat Neplan modellje
14. ábra: Transzformátor KIF gyűjtősin feszültsége 0%-os PV penetráció esetére
15. ábra: B1 végpont feszültsége 0%-os PV penetráció esetére
16. ábra: C1 végpont feszültsége 0%-os PV penetráció esetére
17. ábra: Transzformátor KIF gyűjtősin feszültsége 25%-os PV penetráció esetére
18. ábra: B1 végpont feszültsége 25%-os PV penetráció esetére
19. ábra: C1 végpont feszültsége 25%-os PV penetráció esetére
20. ábra: Transzformátor KIF gyűjtősin feszültsége 50%-os PV penetráció esetére
21. ábra: B1 végpont feszültsége 50%-os PV penetráció esetére
22. ábra: C1 végpont feszültsége 5%-os PV penetráció esetére
23. ábra: Transzformátor KIF gyűjtősin feszültsége 75%-os PV penetráció esetére
24. ábra: B1 végpont feszültsége 75%-os PV penetráció esetére
25. ábra: C1 végpont feszültsége 75%-os PV penetráció esetére
26. ábra: Középfeszültségű hálózati Neplan modell
27. ábra: 0%-os penetráció mért értékei
28. ábra: 25%-os penetráció mért értékei
29. ábra: 50%-os penetráció mért értékei
30. ábra: 75%-os penetráció mért értékei

Függelék

Idő [óra]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
Gyűjtés	U _n [V]	407,132	407,768	408,068	408,278	407,746	407,785	407,361	407,696	407,584	407,475	407,379	407,32	407,361	407,183	406,986	406,89	406,733	406,891	407,103	406,97	406,884	407,004	407,231	407,475
Feszültség	(U/U _n)*	101,783	101,942	102,017	102,07	101,936	101,946	101,84	101,924	101,896	101,869	101,845	101,83	101,84	101,796	101,747	101,723	101,683	101,723	101,776	101,742	101,721	101,751	101,808	101,869
e	100%	401,687	403,639	404,564	405,252	403,634	403,857	402,629	403,795	403,49	403,142	402,891	402,74	402,847	402,275	401,673	401,449	401,014	401,528	402,258	401,924	401,709	401,889	402,317	402,881
A/1	U _n [V]	400,422	400,909	101,141	101,313	100,909	100,964	100,657	100,949	100,873	100,785	100,723	100,685	100,712	100,569	100,418	100,362	100,253	100,382	100,564	100,481	100,427	100,472	100,579	100,72
	(U/U _n)*	100,422	100,909	101,141	101,313	100,909	100,964	100,657	100,949	100,873	100,785	100,723	100,685	100,712	100,569	100,418	100,362	100,253	100,382	100,564	100,481	100,427	100,472	100,579	100,72
A/2	e[%]	-1,361	-1,033	-0,876	-0,757	-1,028	-0,982	-1,183	-0,975	-1,023	-1,083	-1,122	-1,145	-1,129	-1,227	-1,328	-1,36	-1,43	-1,341	-1,211	-1,261	-1,294	-1,279	-1,228	-1,149
	(U/U _n)*	403,913	405,312	405,976	406,46	405,296	405,435	404,543	405,375	405,151	404,887	404,697	404,581	404,662	404,256	403,822	403,66	403,331	403,891	404,168	403,908	403,74	403,914	404,286	404,736
B/1	U _n [V]	100,978	101,328	101,494	101,615	101,324	101,39	101,136	101,344	101,288	101,222	101,174	101,145	101,165	101,064	100,955	100,915	100,833	100,917	101,042	100,977	100,935	100,978	101,072	101,184
	e[%]	-0,805	-0,614	-0,523	-0,455	-0,613	-0,587	-0,704	-0,58	-0,608	-0,647	-0,67	-0,685	-0,675	-0,732	-0,791	-0,808	-0,851	-0,806	-0,734	-0,765	-0,786	-0,772	-0,736	-0,685
B/2	U _n [V]	401,371	403,387	404,346	405,055	403,381	403,603	402,325	403,518	403,197	402,836	402,575	402,418	402,53	401,94	401,319	401,087	400,639	401,176	401,93	401,585	401,363	401,557	402,009	402,599
	(U/U _n)*	100,343	100,847	101,086	101,264	100,845	100,901	100,581	100,88	100,799	100,709	100,644	100,605	100,632	100,485	100,33	100,272	100,16	100,294	100,483	100,396	100,341	100,389	100,502	100,65
C/1	e[%]	-1,44	-1,095	-0,931	-0,806	-1,091	-1,045	-1,259	-1,045	-1,097	-1,16	-1,201	-1,226	-1,208	-1,311	-1,417	-1,451	-1,526	-1,429	-1,293	-1,346	-1,38	-1,362	-1,305	-1,219
	(U/U _n)*	401,431	403,439	404,394	405,102	403,436	403,662	402,392	403,585	403,267	402,909	402,651	402,496	402,606	402,018	401,399	401,17	400,726	401,264	402,019	401,678	401,459	401,644	402,083	402,662
C/2	U _n [V]	100,358	100,86	101,098	101,276	100,859	100,915	100,598	100,896	100,817	100,727	100,663	100,624	100,652	100,504	100,35	100,292	100,182	100,316	100,505	100,42	100,365	100,411	100,521	100,665
	e[%]	-1,425	-1,082	-0,918	-0,794	-1,078	-1,031	-1,242	-1,028	-1,079	-1,41	-1,182	-1,206	-1,189	-1,291	-1,397	-1,43	-1,502	-1,407	-1,271	-1,323	-1,356	-1,34	-1,287	-1,203
C/1	U _n [V]	401,027	403,189	404,22	404,999	403,214	403,511	402,193	403,531	403,219	402,861	402,6	402,441	402,553	401,906	401,233	400,974	400,492	401,087	401,916	401,564	401,336	401,467	401,845	402,404
	(U/U _n)*	100,257	100,797	101,055	101,25	100,803	100,878	100,548	100,883	100,805	100,715	100,65	100,61	100,638	100,476	100,308	100,243	100,123	100,272	100,479	100,391	100,334	100,367	100,461	100,601
C/2	e[%]	-1,526	-1,145	-0,962	-0,82	-1,133	-1,068	-1,292	-1,041	-1,091	-1,153	-1,195	-1,22	-1,202	-1,319	-1,438	-1,479	-1,56	-1,451	-1,297	-1,352	-1,387	-1,384	-1,347	-1,268
	(U/U _n)*	401,094	403,234	404,255	405,023	403,256	403,545	402,236	403,555	403,245	402,888	402,627	402,469	402,58	401,941	401,276	401,02	400,543	401,129	401,947	401,597	401,371	401,507	401,891	402,452
C/2	U _n [V]	100,274	100,809	101,064	101,256	100,814	100,886	100,559	100,889	100,811	100,722	100,657	100,617	100,645	100,485	100,319	100,255	100,136	100,282	100,487	100,399	100,343	100,377	100,473	100,613
	e[%]	-1,51	-1,133	-0,953	-0,814	-1,123	-1,06	-1,281	-1,035	-1,085	-1,147	-1,188	-1,213	-1,195	-1,31	-1,428	-1,467	-1,548	-1,441	-1,289	-1,343	-1,378	-1,374	-1,335	-1,256

27. ábra 0%-os penetráció mért értékei

		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Idő [óra]															
Gyűjtési feszültség	U _n [V]	408,162	408,246	409,09	409,374	409,541	409,565	409,494	409,436	409,04	408,523	407,985	407,329	407,091	407,141
	(U/U _n)*100%	102,04	102,061	102,273	102,344	102,385	102,391	102,373	102,359	102,26	102,131	101,996	101,832	101,773	101,785
	U _n [V]	405,699	406,94	410,619	412,257	413,262	413,591	413,372	412,995	411,339	409,155	406,769	403,899	402,493	402,444
A/1	(U/U _n)*100%	101,426	101,735	102,655	103,064	103,315	103,398	103,343	103,249	102,835	102,289	101,692	100,975	100,623	100,611
	e[%]	-0,616	-0,326	0,382	0,721	0,93	1,006	0,97	0,89	0,575	0,158	-0,304	-0,857	-1,149	-1,174
	U _n [V]	406,643	407,372	409,847	410,896	411,518	411,709	411,549	411,313	410,2	408,731	407,153	405,226	404,302	404,291
A/2	(U/U _n)*100%	101,661	101,843	102,462	102,724	102,88	102,927	102,887	102,828	102,55	102,183	101,788	101,307	101,076	101,073
	e[%]	-0,38	-0,218	0,189	0,38	0,494	0,536	0,514	0,469	0,29	0,052	-0,208	-0,526	-0,697	-0,713
	U _n [V]	405,595	406,986	410,9	412,681	413,784	414,15	413,919	413,508	411,743	409,409	406,839	403,758	402,219	402,132
B/1	(U/U _n)*100%	101,399	101,747	102,725	103,17	103,446	103,537	103,48	103,377	102,936	102,352	101,71	100,94	100,555	100,533
	e[%]	-0,642	-0,315	0,452	0,827	1,061	1,146	1,106	1,018	0,676	0,222	-0,287	-0,893	-1,218	-1,252
	U _n [V]	405,611	406,953	410,806	412,545	413,618	413,973	413,747	413,345	411,608	409,314	406,798	403,778	402,284	402,216
B/2	(U/U _n)*100%	101,403	101,738	102,701	103,136	103,405	103,493	103,437	103,336	102,902	102,329	101,699	100,944	100,571	100,554
	e[%]	-0,638	-0,323	0,429	0,793	1,019	1,102	1,063	0,977	0,642	0,198	-0,297	-0,888	-1,202	-1,231
	U _n [V]	405,467	406,769	410,774	412,526	413,604	413,958	413,727	413,325	411,527	409,175	406,621	403,554	402,111	402,114
C/1	(U/U _n)*100%	101,367	101,692	102,693	103,131	103,401	103,49	103,432	103,331	102,882	102,294	101,655	100,889	100,528	100,528
	e[%]	-0,674	-0,369	0,421	0,788	1,016	1,098	1,058	0,972	0,622	0,163	-0,341	-0,944	-1,245	-1,257
	U _n [V]	405,493	406,764	410,769	412,514	413,587	413,94	413,709	413,309	411,524	409,186	406,645	403,593	402,149	402,145
C/2	(U/U _n)*100%	101,373	101,699	102,769	103,128	103,397	103,485	103,427	103,327	102,881	102,296	101,661	100,898	100,537	100,536
	e[%]	-0,667	-0,363	0,42	0,785	1,011	1,094	1,054	0,968	0,621	0,166	-0,335	-0,934	-1,235	-1,249

28. ábra 25%-os penetráció mért értékei

	Idő [óra]	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Gyűjtési feszültség	U _n [V]	408,33	408,64	409,69	410,14	410,41	410,48	410,4	410,31	409,83	409,19	408,47	407,6	407,18	407,16
	(U/U _n)*100%	102,08	102,16	102,42	102,53	102,6	102,62	102,6	102,58	102,46	102,3	102,12	101,9	101,8	101,79
A/1	U _n [V]	406,86	409,63	414,82	417,61	419,39	420,05	419,8	419,14	416,86	413,75	410,07	405,71	403,11	402,56
	(U/U _n)*100%	101,72	102,41	103,71	104,4	104,85	105,01	104,95	104,79	104,21	103,44	102,52	101,43	100,78	100,64
A/2	e[%]	-0,367	0,248	1,282	1,867	2,245	2,393	2,348	2,208	1,757	1,14	0,401	-0,471	-1,019	-1,149
	U _n [V]	407,39	409,1	412,54	414,31	415,43	415,83	415,65	415,24	413,73	411,67	409,27	406,39	404,7	404,37
B/1	(U/U _n)*100%	101,85	102,27	103,13	103,58	103,86	103,96	103,91	103,81	103,43	102,92	102,32	101,6	101,17	101,09
	e[%]	-0,235	0,115	0,71	1,044	1,255	1,338	1,311	1,232	0,975	0,621	0,2	-0,302	-0,621	-0,698
B/2	U _n [V]	406,82	409,82	415,32	418,31	420,23	420,95	420,68	419,97	417,55	414,24	410,31	405,67	402,86	402,26
	(U/U _n)*100%	101,71	102,45	103,83	104,58	105,06	105,24	105,17	104,99	104,39	103,56	102,58	101,42	100,72	100,56
C/1	e[%]	-0,378	0,294	1,407	2,043	2,456	2,617	2,568	2,416	1,93	1,263	0,461	-0,483	-1,08	-1,226
	U _n [V]	406,83	409,76	415,2	418,13	420,02	420,73	420,46	419,77	417,37	414,11	410,25	405,67	402,93	402,34
C/2	(U/U _n)*100%	101,71	102,44	103,8	104,53	105,01	105,18	105,11	104,94	104,34	103,53	102,56	101,42	100,73	100,59
	e[%]	-0,376	0,281	1,376	1,999	2,403	2,561	2,513	2,365	1,886	1,231	0,445	-0,481	-1,064	-1,205
C/1	U _n [V]	406,74	409,71	415,37	418,38	420,31	421,03	420,76	420,05	417,57	414,2	410,23	405,54	402,78	402,24
	(U/U _n)*100%	101,69	102,43	103,84	104,59	105,08	105,26	105,19	105,01	104,39	103,55	102,56	101,38	100,7	100,56
C/2	e[%]	-0,398	0,268	1,42	2,06	2,476	2,638	2,588	2,436	1,934	1,253	0,441	-0,515	-1,1	-1,229
	U _n [V]	406,75	409,69	415,3	418,27	420,19	420,9	420,63	419,93	417,47	414,13	410,2	405,55	402,81	402,27
C/2	(U/U _n)*100%	101,69	102,42	103,82	104,57	105,05	105,23	105,16	104,98	104,37	103,53	102,55	101,39	100,7	100,57
	e[%]	-0,397	0,263	1,401	2,034	2,445	2,605	2,556	2,406	1,91	1,236	0,433	-0,513	-1,093	-1,221

29. ábra 50%-os penetráció mért értékei

Idő [óra]	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
Gyűjtési feszültsége	U _n [V]	408,472	408,952	410,169	410,729	411,081	411,183	411,104	410,981	410,443	409,707	408,851	407,814	407,256	407,173
	(U/U _n)*100%	102,118	102,238	105,542	102,682	102,77	102,796	102,776	102,745	102,611	102,427	102,213	101,953	101,814	101,793
A/1	U _n [V]	407,828	411,837	418,241	421,925	424,324	425,242	424,953	424,085	421,312	417,471	412,769	407,207	403,615	402,662
	(U/U _n)*100%	101,957	102,959	104,56	105,481	106,081	106,311	106,238	106,021	105,328	104,368	103,192	101,802	100,904	100,666
	e[%]	-0,161	0,721	2,018	2,799	3,311	3,515	3,462	3,276	2,717	1,941	0,979	-0,152	-0,91	-1,128
A/2	U _n [V]	408,022	410,538	414,761	417,12	418,634	419,201	418,997	418,447	416,624	414,097	411,03	407,369	405,03	404,432
	(U/U _n)*100%	102,005	102,634	103,69	104,28	104,658	104,8	104,749	104,612	104,156	103,524	102,758	101,842	101,258	101,108
	e[%]	-0,113	0,396	1,148	1,598	1,888	2,004	1,973	1,687	1,545	1,097	0,545	-0,111	-0,557	-0,685
B/1	U _n [V]	407,802	412,063	418,8	422,702	425,249	426,226	425,923	425,001	422,079	418,029	413,057	407,188	403,382	402,357
	(U/U _n)*100%	101,951	103,016	104,7	105,675	106,312	106,556	106,481	106,25	105,52	104,507	103,264	101,797	100,845	100,585
	e[%]	-0,167	0,778	2,158	2,993	3,542	3,761	3,705	3,505	2,909	2,08	1,052	-0,156	-0,969	-1,204
B/2	U _n [V]	407,806	412,002	418,665	522,514	425,024	425,988	425,689	424,78	421,891	417,889	412,983	407,189	403,441	402,441
	(U/U _n)*100%	101,952	103,001	104,666	105,628	106,256	106,497	106,422	106,195	105,473	104,472	103,246	101,797	100,86	100,61
	e[%]	-0,166	0,763	2,124	2,946	3,486	3,701	3,646	3,45	2,862	2,045	1,033	-0,156	-0,954	-1,183
C/1	U _n [V]	407,817	412,177	419,195	423,212	425,835	426,842	426,533	425,586	422,55	418,363	413,245	407,205	403,348	402,354
	(U/U _n)*100%	101,954	103,044	104,799	105,803	106,459	106,711	106,633	106,396	105,638	104,591	103,311	101,801	100,837	100,585
	e[%]	-0,164	0,806	2,256	3,121	3,689	3,915	3,857	3,651	3,027	2,164	1,098	-0,152	-0,977	-1,205
C/2	U _n [V]	407,817	412,142	419,097	423,081	425,682	426,68	426,373	425,433	422,424	418,272	413,196	407,204	403,373	402,383
	(U/U _n)*100%	101,954	103,035	104,774	105,77	106,42	106,67	106,593	106,358	105,606	104,568	103,299	101,801	100,843	100,599
	e[%]	-0,164	0,797	2,232	3,088	3,65	3,874	3,817	3,613	2,995	2,141	1,086	-0,152	-0,971	-1,198

30. ábra 75%-os penetráció mért értékei