



BAGI TAMÁS ZOLTÁN

A távvezetési sodronyok
jegesedésének kísérleti és
numerikus analízissel történő
vizsgálata

Témavezető: Dr. Morva György, c. egyetemi tanár

Szigorlati bizottság:

Elnök: Prof. Em. Dr. Berek Lajos egyetemi tanár, Óbudai Egyetem

Tagok: Dr. habil. Berek Tamás, egyetemi docens, NKE

Dr. habil. Kovács Tibor egyetemi docens, Óbudai Egyetem

Nyilvános védés teljes bizottsága:

Elnök: Prof. Em. Dr. Berek Lajos egyetemi tanár, Óbudai Egyetem

Titkár: Dr. Pálfi Judit, adjunktus, Óbudai Egyetem

Tagok: Prof. Em. Dr. Borbás Lajos c. egyetemi tanár, BME

Prof. Dr. Kádár Péter egyetemi tanár, Óbudai Egyetem

Dr. Zwierczyk Péter, tanszékvezető-helyettes, egyetemi adjunktus, BME

Opponensek:

Dr. Tóth Zoltán egyetemi docens, Óbudai Egyetem

Dr. Novothny Ferenc, c. egyetemi tanár, Óbudai Egyetem

Nyilvános védés időpontja: 2021.

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS.....	5
1. A KUTATÁSI TERÜLET.....	6
1.1. A magyarországi villamosenergia-rendszer áttekintése.....	6
1.2. A magyarországi és az európai villamosenergia-rendszerek kapcsolata.....	9
1.3. A távvezetékek jegesedése: nemzetközi kitekintés.....	12
2. A KUTATÁSI TERÜLET KIJELÖLÉSE. A TÉMAVÁLASZTÁS INDOKOLTSÁGA.....	17
3. A KUTATÓMUNKA TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEI A SZAKIRODALOMBAN.....	18
3.1. A jegesedés kialakulása, fajtái és előrejelzése.....	18
3.2. Jegesedés okozta káresemények bemutatása.....	23
3.3. Távvezetési sodronyok jégtelenítése.....	31
3.4. Távvezetési sodronyok hőmérsékletét befolyásoló tényezők, a hőmérséklet számítása különböző körülmények között.....	35
4. A KUTATÁSOKAT MEGALAPOZÓ ELŐZETES VIZSGÁLATOK.....	51
4.1. A fázisvezető kötegek árameloszlásának és a védővezetőbe indukált feszültség által áthajtott áram nagyságának mérése a Tiszai Hőerőmű – Sajószöged 400 kV-os távvezetőken.....	51
4.2. Meteorológiai paraméterek mérési lehetőségének kísérleti vizsgálata.....	57
5. A KUTATÁS CÉLJA, HIPOTÉZISEK.....	64
6. ALKALMAZOTT ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK.....	65
6.1. Az EMTP programrendszer ismertetése.....	65
6.2. A LabVIEW szoftver ismertetése.....	67
6.3. Véges elemes analízis.....	69
7. SZÁMÍTÓGÉPES VIZSGÁLATOK, NUMERIKUS ANALÍZIS.....	71
7.1. Zérus sorrendű áram indukciójának szimulációja védővezetőn.....	71
7.2. A védővezető villamos és hőtechnikai modellje, hőegyensúly számítása, hőmérséklet eloszlás a keresztmetszet mentén.....	75
7.3. Jégolvasztási számítások.....	93
8. A JÉGOLVASZTÁS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA.....	111
9. A SZÁMÍTÁSOK EREDMÉNYEINEK ÉS A LABORATÓRIUMI MÉRÉSEK EREDMÉNYEINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA, VALIDÁLÁS.....	117

10. JAVASLAT METEOROLÓGIAI ELŐREJELZŐ RENDSZER KIÉPÍTÉSÉRE	119
11. A KUTATÓMUNKA EREDMÉNYEINEK ÖSSZEFOGLALÁSA	126
12. Új tudományos eredmények, tézisek	127
13. Javaslatok a kutatás folytatására	129
IRODALOMJEGYZÉK	130
Bagi Tamás közleményei	136
JELÖLÉS- ÉS RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK	139
ÁBRAJEGYZÉK	141
MELLÉKLET	148
NYILATKOZAT	146
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	147

BEVEZETÉS

A villamos energia termelése, a villamos energiának a felhasználási helyre való eljuttatását biztosító átviteli és elosztó hálózatok, valamint a villamos energia felhasználási területei hatalmas fejlődésen mentek keresztül az elmúlt időszakban. Napjainkban már szinte mindenki természetesnek veszi, hogy a villamos energia rendelkezésükre áll szinte bárhol, bármikor és bármilyen mennyiségben. Ez társadalmi igény függetlenül attól, hogy a váltakozó áramú villamos energia nem tárolható; ezért minden pillanatban annyit kell termelni, amennyit a fogyasztók elfogyasztanak, illetve megfordítva: minden pillanatban csak annyi fogyasztható el, amennyit megtermelnek (teljesítmény egyensúlynak kell lennie). A magyar villamosenergia-rendszerben is ennek az egyensúlynak minden pillanatban fenn kell állnia.

A villamos energia jelentőségét elsősorban akkor vesszük észre, ha valamilyen okból, nem tervezetten, hosszabb-rövidebb időre megszűnik az ellátás. A rohamosan fejlődő világunkban kijelenthetjük, hogy szinte mindenhez szükséges villamos energia, gondoljunk itt az ipari termelésre, a robotikára, az informatikára, a hírközlésre, a telekommunikációra, az egészségügyben használt diagnosztikai eszközökre, a gyógyításban alkalmazott modern készülékekre, a közlekedésben egyre nagyobb teret hódító elektromos autókra, a háztartási gépekre, az okos otthonokra, ... stb.

Alapvető civilizációs szükséglet tehát a villamos energia. A modern fogyasztói társadalmak természetes igénye a folyamatos, egyenletesen magas színvonalú, és lehetőleg minél kedvezőbb árú, magas minőségi szintű villamos energia megléte, továbbá a villamosenergia-szolgáltatás minősége.

A Nemzeti Fejlesztési Minisztérium (NFM) által közzétett „Nemzeti Energiastratégia 2030” c. anyag ugyancsak hangsúlyozza a megbízható, modern és kiemelten jó minőségű energiaellátás biztosításának fontosságát [1].

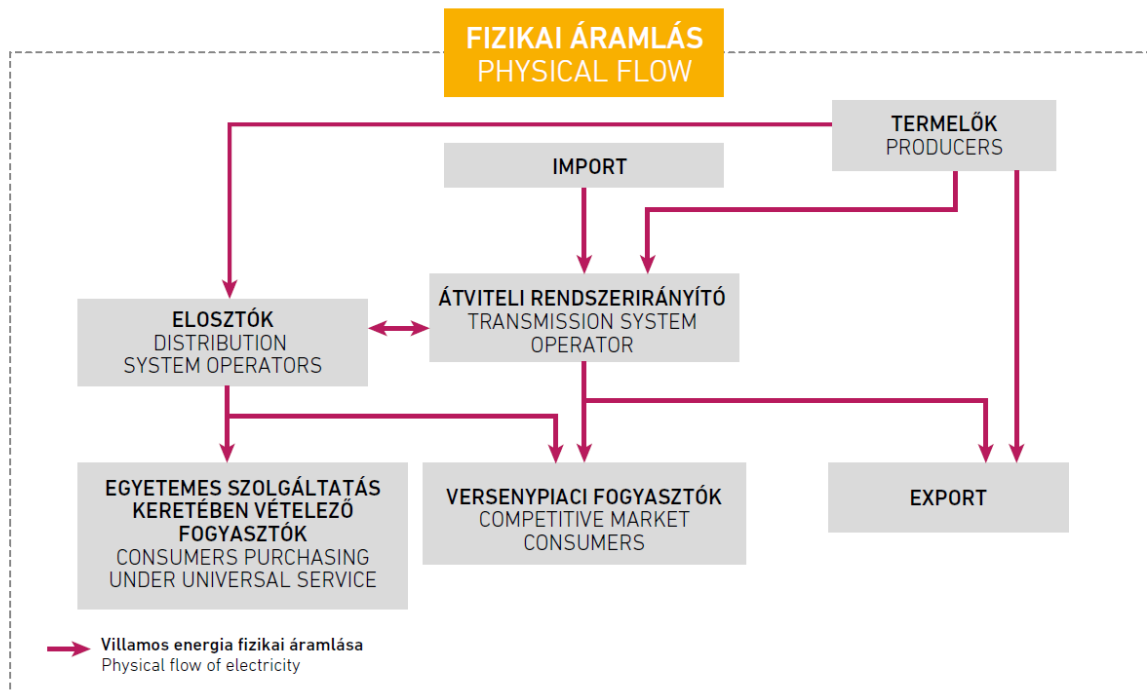
A villamos energia ellátásbiztonságának javításához kapcsolódik a kutatási témám. Vizsgálom, hogy a szélsőséges időjárási körülmények hogyan befolyásolják a villamosenergia-rendszer biztonságos üzemvitelét, a gyakran előforduló jegesedések (ónos esők) által előidézett távvezetési károsodások (nagyfeszültségű távvezetési oszlopok kidőlése, vezetékszakadások) milyen módszerekkel csökkenthetők, azaz extrém időjárási körülmények között milyen eljárásokkal lehet elkerülni a rendszer összeomlását, csökkenteni a károk mértékét, és elősegíteni a rendszerelemek minél gyorsabb helyreállítását.

1. A KUTATÁSI TERÜLET

1.1. A magyarországi villamosenergia-rendszer áttekintése

A magyarországi villamosenergia-rendszer (VER) az átviteli hálózattól (a rendszerirányítói felügyelet alá tartozó nagyfeszültségű hálózat és hálózati elemek összesége) és az elosztóhálózatokból (elosztói kezelésben lévő 132 kV-os, valamint kis- és közép feszültségű hálózatok) áll.

A villamosenergia-rendszer fizikai működési modelljét a 1. ábra mutatja be:

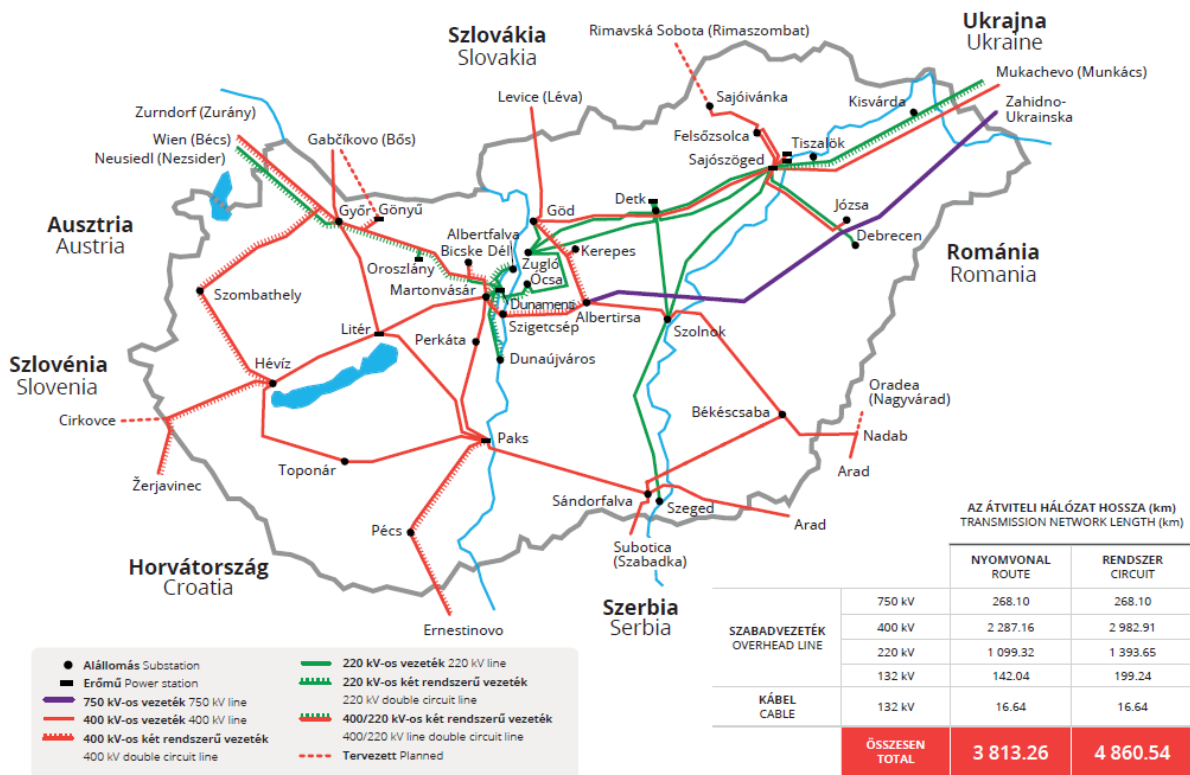


1. ábra. A villamosenergia-rendszer fizikai működési modellje [2]

A magyarországi átviteli hálózat bemutatása

A MAVIR Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt. (a továbbiakban MAVIR) felügyeli és működteti a hazai villamosenergia-ellátásban fontos szerepet játszó — együttesen mintegy 4000 km nyomvonal hosszúságú távvezetékét és 34 állomást magába foglaló — nagyfeszültségű villamos energia átviteli hálózatot és összehangolja a magyar villamosenergia-rendszer működését a szomszédos országok átviteli hálózataival, illetve az átviteli hálózathoz csatlakozó elosztóhálózatokkal.

Az alábbi ábra mutatja az átviteli hálózat távvezetékait és a hálózati hosszakat feszültségszintek szerint (2018. évi állapot) (2. ábra).



2. ábra. Az átviteli hálózat távvezetékei [2]

A MAVIR az ún. ITO (Independent Transmission Operator) modell szerint működik, azaz a vertikálisan integrált villamosenergia-ipari vállalkozáson belül az átviteli rendszerirányító az átviteli hálózat tulajdonosa és üzemeltetője. A MAVIR feladata az országos energiarendszer teljesítményegyensúlyának fenntartása, a mérlegkörök tervektől való eltéréseinek kiegyenlítése. Ehhez meg kell határozni a szükséges tartalékokat, a szabályozás számára lekötött teljesítményeket, és azt is figyelembe kell venni, hogy melyik erőmű milyen gyorsan, milyen határfokváltozással és mennyiért tudja követni az elrendelt változásokat. Mind ehhez tudni kell, hogy a hálózat alkalmas-e a zavartalan üzemhez szükséges teljesítmények szállítására.” [3]

A MAVIR az ellátás biztonsága és minősége érdekében figyelemmel kíséri a hazai átviteli hálózat és a nemzetközi távvezetékek állapotát, összehangolja az áramszolgáltatói hálózatok karbantartási terveit, eldönti, hogy melyik kikapcsolás engedélyezhető és melyik nem.

A MAVIR az átviteli hálózat fejlesztésén túlmenően együttműködik az elosztóhálózat fejlesztésében is.

Érdekességként megemlítem, hogy a Békéscsaba – Országhatár – (Nadab) – Arad magyar-román 400 kV-os összeköttetést a jelenlegi munkahelyem, az ELINOR Mérnökiroda tervezte és az MVM OVIT Zrt. volt a kivitelező.

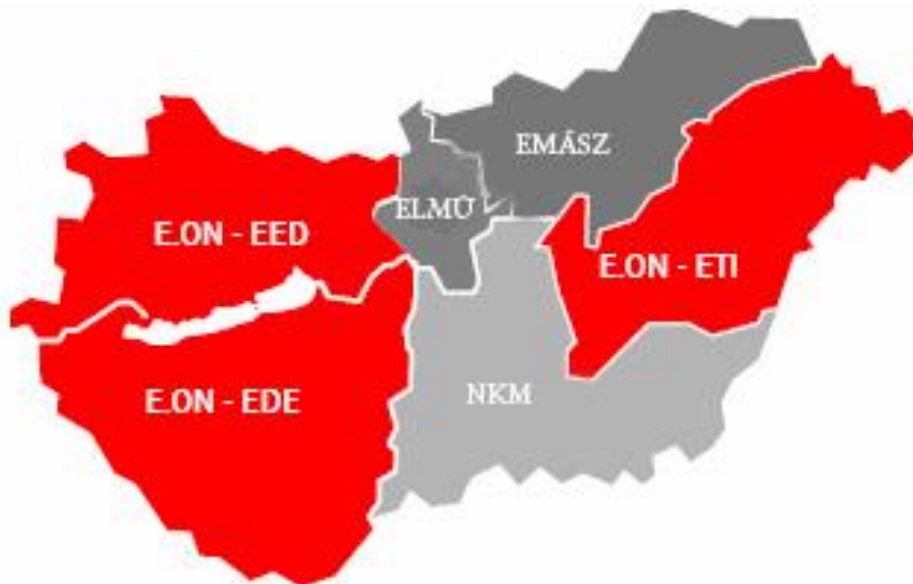
A magyarországi hálózati elosztók ismertetése

2019-ben Magyarországon az alábbi elosztók üzemeltették az elosztóhálózatokat:

- NKM Áramhálózati Kft.
- E.ON Dél-dunántúli Áramhálózati Zrt.
- E.ON Észak-dunántúli Áramhálózati Zrt.
- E.ON Tiszántúli Áramhálózati Zrt.
- ELMŰ Hálózati Kft.
- ÉMÁSZ Hálózati Kft.

(A magyarországi hálózati elosztók körének a közeljövőben várható átrendeződése a kutatási témát nem érinti, ezért nem foglalkozom vele)

Szolgáltatási terület szerint az elhelyezkedésüket az alábbi ábra mutatja (3. ábra).



3. ábra. A magyarországi hálózati elosztók ¹

Az elosztóhálózat nyomvonalhossza a 2018. évi állapotnak megfelelően: a szabadvezeték és kábelvezeték hálózat összesen 161 578 km.

Ebből

Nagyfeszültségű szabadvezeték- és kábelvezeték	6 377 km
Középfeszültségű szabad- és kábelvezeték	67 202 km
Kisfeszültségű szabad- és kábelvezeték	87 999 km

¹ https://rnr.hu/files/news_image/2009/image.html?091020aram_hataskor.JPG / Letöltés ideje: 2020.06.04.

Az együttesen mintegy 162.000 km nyomvonal hosszúságú elosztóhálózatot, de akár ebből a 6.400 km nagyfeszültségű szabadvezetékét és kábeles összeköttetést terjedelmi okok miatt egy lapon nem tudom bemutatni, ezért csak az EON Dél-dunántúli Áramhálózati Zrt. (EON DÉDÁH) hálózatának egy vázlatával mutatom be a témánkba vágó nagyfeszültségű szabadvezetéseket (4. ábra).



4. ábra. Az EON DÉDÁH hálózata

Az E.ON Dél-dunántúli Áramhálózati Zrt. ellátási területe Somogy, Baranya, Tolna, és Zala megye északi része, azaz a déli országhatártól egészen a Balatonig, a Dunától a nyugati határig terjed.

Ellátási területe 18 229 négyzetkilométer, amelyen 25 052 km hosszúságú hálózatot üzemeltet, és amelyen több mint hétszáz ezer otthonban és munkahelyen látja el ügyfeleit megbízhatóan.

Legfontosabb feladata: a területéhez tartozó nagy-, közép-, és települési kisméretű áramhálózat üzemeltetése, fejlesztése, karbantartása, a regionális hálózati ügyfélkapcsolatok ápolása, valamint a mérési feladatok, leolvasások, ellenőrzések elvégzése.

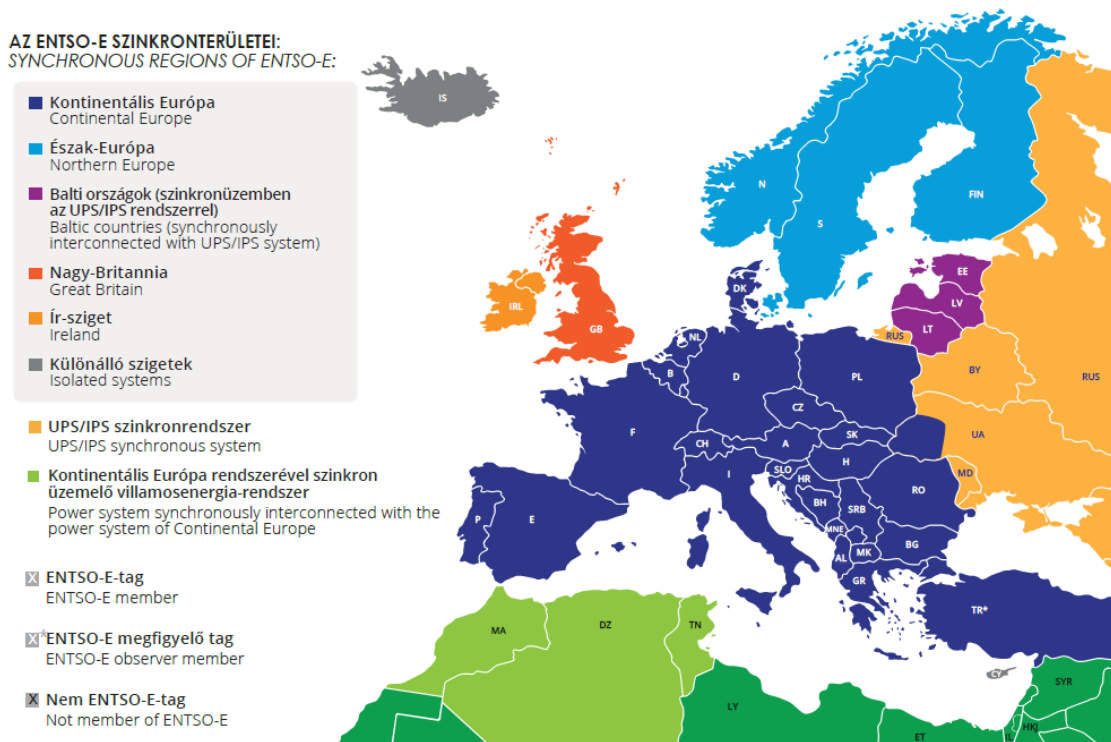
1.2. A magyarországi és az európai villamosenergia-rendszerek kapcsolata

A rendszerváltást követően Magyarország fokozatosan kapcsolódott az európai villamosenergia-rendszerekhez. 2004-ben a dél-kelet európai térség villamosenergia-rendszere (Union for the Coordination of Transmission of Electricity (UCTE) II. szinkronzóna) — Magyarországon keresztül — összekapcsolódott a nyugateurópai villamos energia rendszerrel.

Az európai uniós 3. energiacsomag elfogadását megelőzően 2008 végén megalakult az európai villamosenergia-rendszerirányítók önkéntes szövetsége, az ENTSO-E (European Network of

Transmission System Operators for Electricity). A szervezet fokozatosan készült fel a 2009. július 1-jén elkezdett tényleges működésre, az addigi ETSO szervezet és a szinkronterületi szövetségek (UCTE - Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity, NORDEL - The transmission system operators in Denmark, Finland, Iceland, Norway and Sweden , UKTSOA - UK Transmission System Operators Association, ATSOI - Association of the Transmission System Operators of Ireland, BALTSO - Baltic Transmission System Operators) 2009 közepéig fokozatosan átadták feladataikat az új szövetségnek, és 2009. július 1-jével megszűntek. 2011. március 3-án hatályba lépett az Európai Parlament és a Tanács 714/2009/EK rendelete, amely az addigi önkéntes ETSO-E együttműködést az EU-tagállamok átviteli rendszerirányítói (Transmission System Operators, TSO) számára kötelezővé tette. Az ETSO-E koordinálja a TSO-k műszaki, gazdasági, regulációs vonatkozású együttműködését a villamosenergia-rendszerek üzembiztonságának fenntartása és az egységes európai belső villamosenergia-piac kiszolgálása érdekében.

Tagja 43 TSO 36 európai országból: az EU tagjai Málta kivételével, valamint Bosznia-Hercegovina, Izland, Macedónia, Montenegró, Norvégia, Svájc, Szerbia, Törökország (2016 januártól megfigyelő tag), Albánia (2017 márciustól).



5. ábra. Az európai villamosenergia-rendszerek szinkronterületei [2]

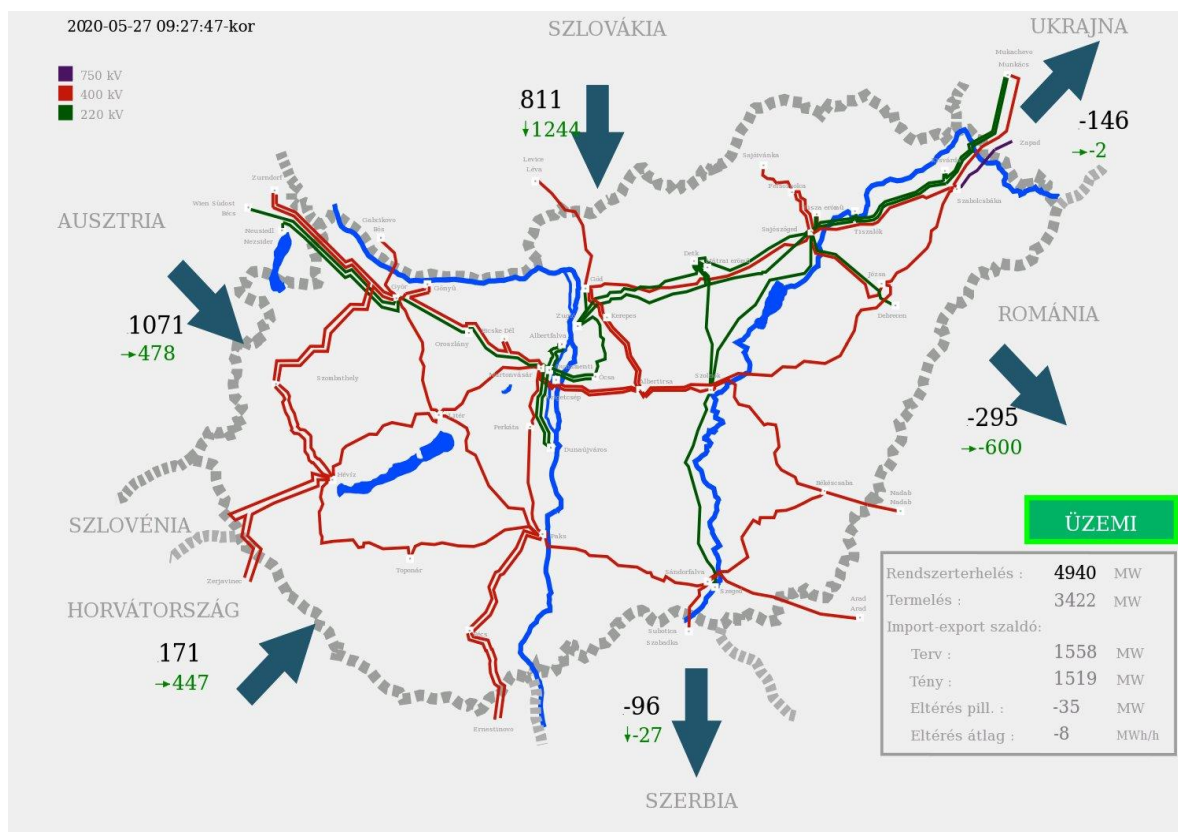
Az 5. ábra jelzi az azonos frekvenciával, szinkron üzemben párhuzamosan járó rendszeregyesüléseket, amelyek keretében a műszaki együttműködés történik. Legnagyobb közülük a Kontinentális Európa szinkronterület. Az észak-afrikai (marokkói-algériai-tunéziai) rendszerek és a

nyugat-ukrajnai részrendszer (Burstin-sziget) nem részei a szinkronterületnek, de azzal párhuzamosan üzemelnek.

Nagy Britannia és az Ír-sziget rendszere, illetve a skandináv rendszer egyenáramú, tenger alatti kábelekkel kapcsolódnak a Kontinentális Európa szinkronterületéhez. Az EU-tag balti országok a volt szovjet tagállamok villamosenergia-rendszereivel (UPS/IPS) szinkron üzemelnek, de keresik a Kontinentális Európa szinkronterülettel való párhuzamos együttműködés lehetőségét.

Mi ebben az együttműködésben a 6. ábrán látható nagyságrenddel veszünk részt.

A 6. ábra Magyarország villamosenergia-fogyasztását mutatja egy adott időpillanatban, a hazai termelés és az import nagyságának, valamint a szomszédos országokból érkező, vagy oda áramló teljesítmény tervezett és tényleges értékének feltüntetésével együtt.



6. ábra. Magyarország villamosenergia-fogyasztása és áramkereskedelme a szomszédos országokkal

[4]

Kutatási területem, amely a nagyfeszültségű szabadvezetékek témakörébe tartozik, és mintegy 10200 km nyomvonal hosszúságú hálózatot érint, a magyarországi villamosenergia-ellátás szempontjából kiemelt szakterület és az ellátás biztonsága és minősége érdekében szükségesnek tartom a sodronyok jegesedésének vizsgálatát.

1.3. A távvezetékek jegesedése: nemzetközi kitekintés

Ebben a fejezetben a három legnagyobb olyan ország villamosenergia-rendszerét mutatom be, melynek egyes térségei a földrajzi és éghajlati viszonyai miatt jelentősen érintettek a távvezetékek jegesedése szempontjából.

Kína

A kínai villamosenergia-iparban az ezredforduló első éveiben jelentős fejlesztéseket hajtottak végre. Nagy teljesítményű vízerőművi és atomerőművi beruházások és a hozzájuk kapcsolódó hálózati fejlesztések eredményeként a kínai villamos átviteli hálózat jelentősen fejlődött. Az atomerőművi fejlesztéseket illusztrálja az alábbi ábra (7. ábra).

Nuclear Power Plants in China

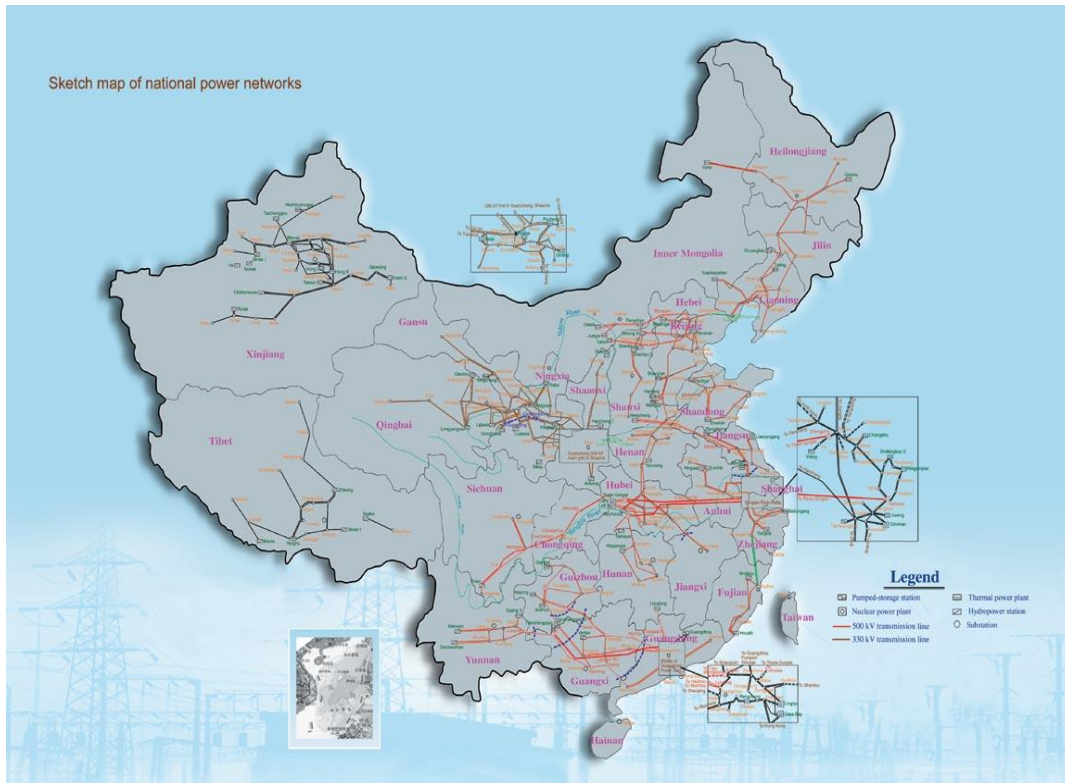


7. ábra. Atomerőművi fejlesztések Kínában [5]

A csökkenő súlyú hagyományos széntüzelésű erőművek mellett egyre nagyobb szerepet szánnak a megújuló energiaforrások felhasználásának is. Kína távlati célja a különböző energiahordozókat felhasználó, különböző tulajdoni formában működő erőműveket integráló egységes nemzeti villamosenergia-hálózat és modern energiapiac létrehozása.

Kínának jelenleg két igen nagyméretű szinkron hálózata van. Az egyik hálózat az északi területeket, a másik pedig a déli területeket fogja össze. A két, egyenként is jelentős méretű átviteli hálózatot nagyfeszültségű egyenáram (High Voltage Direct Current, HVDC) back-to-back csatlakozások kötik össze.

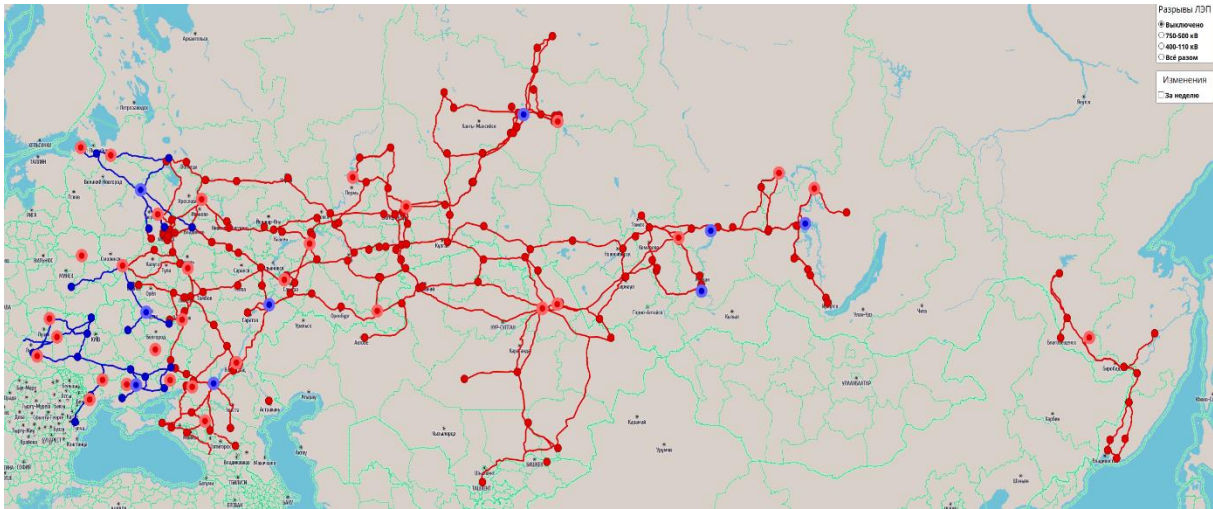
A hálózatok földrajzi elhelyezkedését mutatja az alábbi ábra (8. ábra).



8. ábra. A hálózatok földrajzi elhelyezkedése Kínában [6]

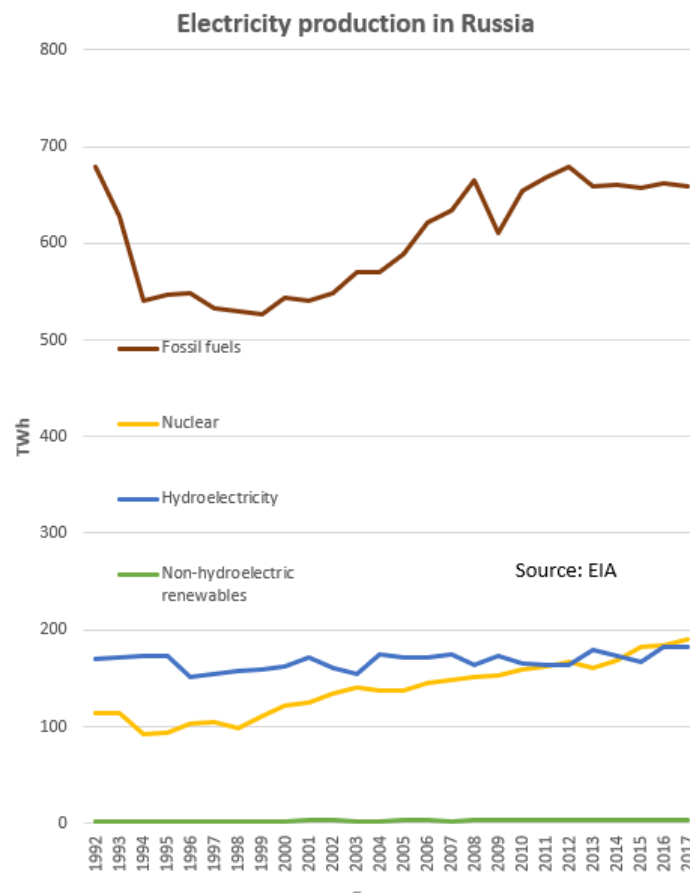
Oroszország

Oroszország a világ negyedik legnagyobb energiatermelő és fogyasztó országa, az USA, Kína és Japán után. A nagy kiterjedésű ország igen összetett, számtalan különböző feszültségű (110 kV-tól 1150 kV-ig) villamos átviteli hálózatát szemlélteti a 9. ábra.



9. ábra. Oroszország villamos átviteli hálózata [7]

Az orosz villamosenergia termelő kapacitást elsősorban a jelentős számú a fosszilis energiákat hasznosító hőerőművek, továbbá a vízierőművek, valamint atomerőművek biztosítják. A megújuló energiát hasznosító erőművek még nem játszanak jelentős szerepet. Az egyes erőmű típusok évi termelési kapacitását a 10. ábra mutatja.



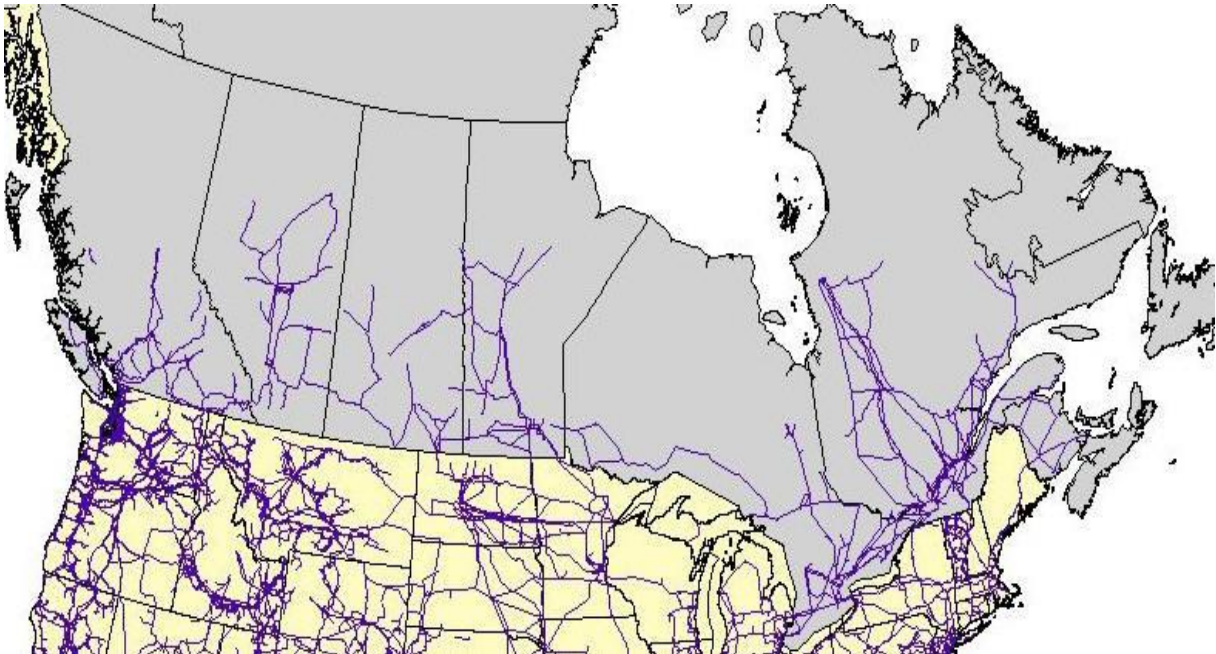
10. ábra. Erőmű típusok éves termelési kapacitása Oroszországban [8]

Kanada

Kanada szintén a világ legnagyobb energiatermelői közé tartozik. A megtermelt villamos energia jelentős részét exportálják elsősorban az Egyesült Államokba.

A kanadai villamosenergia-termelésben a környezetkímélő erőforrásokat részesítik előnyben. Ennek megfelelően a villamosenergia-termelés zömét (mintegy 60%-át) a vízerőművek biztosítják. A fennmaradó rész megoszlik a nukleáris erőművek és a fosszilis energiákat (olaj, gáz és szén) hasznosító erőművek között. A nem vízenergiát hasznosító megújuló energiaforrások felhasználása (szélenergia, PV naperenergia) csak az utóbbi időszakban kezdett elterjedni.

Az ország egyes térségeiben nagyon változatos időjárással rendelkező ország átviteli hálózatát és az Egyesült Államokkal való összeköttetéseit mutatja a 11. ábra.



11. ábra. Kanada átviteli hálózata és az USA-val való összeköttetések [9]

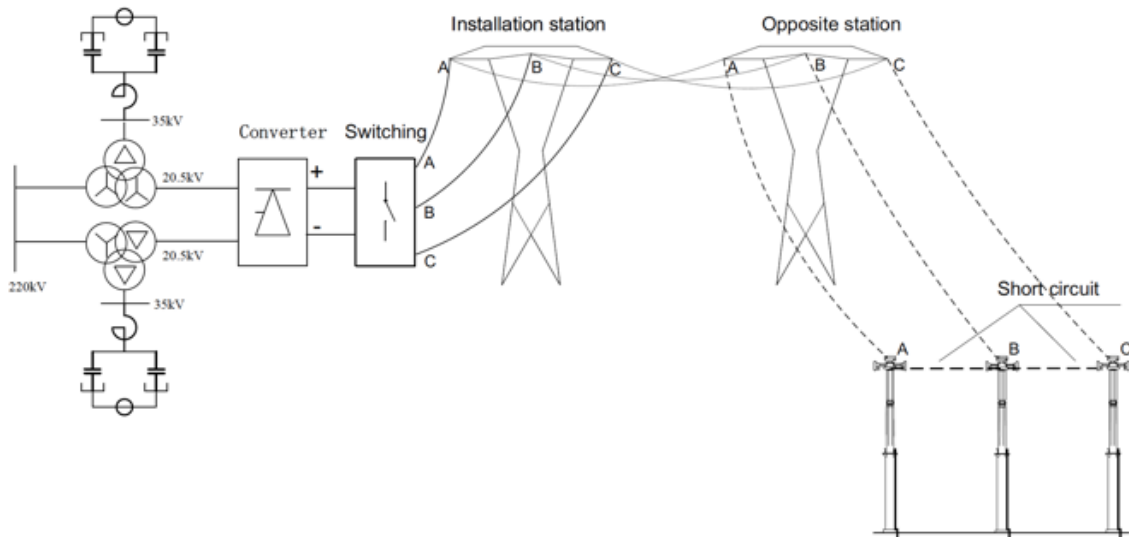
Az előbbieken bemutatott országokban a nagy földrajzi kiterjedés és a változatos éghajlati viszonyok miatt a jégtelenítésre mind Alternating Current (AC) mind Direct Current (DC) módszereket használnak.

Amennyiben rendelkeznek elég nagy kiterjedésű egyenáramú hálózattal, mint például Kína, Oroszország, Észak-Amerika stb. ott előnyben részesítik az AC-hez viszonyítva jobb hatásfokú egyenáramú jégtelenítési módszereket. ²

Alapvetően az alábbi módszereket használják:

² Szakmai konzultáció az NR Electric Co., Ltd., a MAVIR és az Óbudai Egyetem képviselőivel, 2016. március

- állandó, veszélyeztetett területen haladó hosszabb távvezetékek esetén az alállomási jégtelenítést, amely alállomási kapcsolással, Mvar kompenzációval ellátott megoldás (SVC, azaz Static Var Compensator),
- időszakosan előforduló, rövidebb szakaszokra mobil megoldással, kamionra szerelve vagy mozgatható konténerekbe telepített jégtelenítő berendezéssel, ilyenkor nincs meddő kompenzáció.



12. ábra. Az egyenáramú jégtelenítés tipikus elrendezése³

Bár ezek az egyenáramú jégtelenítési megoldások hatékonyak, de Magyarországon az átviteli és elosztóhálózatokon nem alkalmazhatóak, hiszen hazánkban nincs egyenáramú hálózat, nem áll rendelkezésre megfelelő teljesítményű egyenáramú megtáplálás a módszer alkalmazásához. Azonkívül a hálózati kialakítás sem támogatja ezt a módszert, mivel a magyarországi átviteli és elosztóhálózat védővezetői hatásosan földeltek.

³ Presentation: NR Electric Co., Ltd. – Direct Current Deicing Product, NR Slide-DC Deicer Solution-En.pdf, 2016.03.29.

2. A KUTATÁSI TERÜLET KIJELÖLÉSE. A TÉMAVÁLASZTÁS INDOKOLTSÁGA

Kutatási területem, amely a nagyfeszültségű szabadvezetéki hálózatok témakörébe tartozik, és mintegy 10200 km nyomvonal hosszúságú hálózatot érint, a magyarországi villamosenergia-ellátás szempontjából kiemelt szakterület.

A szélsőséges időjárási körülmények egyre gyakrabban veszélyeztetik a villamosenergia-rendszer biztonságos üzemvitelét az átviteli és az elosztóhálózatokon. Az utóbbi években jelentős károk és veszélyhelyzetek alakultak ki a sodronyok jegesedése által előidézett távvezetéki károsodások (nagyfeszültségű távvezetéki oszlopok kidőlése, vezetékszakadások) következtében. Ezek nemcsak a hazai villamosenergia-ellátás biztonságát veszélyeztetik, hanem a nemzetközi összeköttetések kiesését is jelenthetik.

A sodronyok jegesedése már évek óta foglalkoztatja a szakembereket, azonban az elméleti és laboratóriumi vizsgálatok, valamint a gyakorlatban megvalósított megoldások elsősorban a fázisvezető sodronyok jegesedésének elkerülésére, vagy a már kialakult jegesedés megszüntetésére irányulnak. A vizsgálatok ugyan utalnak a védővezetők jegesedésének veszélyeire is, de a kialakult jég lebontását célzó mechanikai eljárásokon kívül nincs kidolgozott, általánosan elfogadott módszer a védővezető sodronyok jégtelenítésére.

A hazai nagyfeszültségű hálózatok védővezetőit oszloponként földelik, ezért csak különleges eljárással lehet azokat jégteleníteni. Kutatásomban a védővezetőkben indukált feszültség által áthajtott áram melegítésének elvével, annak megvalósíthatóságával foglalkozom. A villamosenergia-ellátás biztonsága és minősége érdekében szükségesnek és fontosnak tartom a védővezető sodronyok jégtelenítésének a vizsgálatát.

A doktori témám kiválasztását az eddigi munkahelyeimen szerzett műszaki tapasztalataim és a jelenleg is a témához kapcsolódó fejlesztési igények is motiválták.

3. A KUTATÓMUNKA TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEI A SZAKIRODALOMBAN

3.1. A jegesedés kialakulása, fajtái és előrejelzése

A légköri jegesedés egy összetett meteorológiai jelenség, amely több alapvető légkörfizikai folyamat eredményeként alakul ki. Meghatározó meteorológiai paraméterei a hőmérséklet, a páratartalom, a szél (sebessége és iránya), valamint az esetlegesen hulló csapadék milyensége, halmazállapota. Mindezek térben és időben nagyon eltérőek lehetnek, de a folyamatra az adott terület domborzata is hatással van. Jég kiválása történhet lehűlés miatt a légköri vízpára kicsapódásából (túltelítődés) valamint negatív hőmérsékletek esetén hulló csapadékokból. A jegesedési fogalmakat a Nagy elektromos rendszerek nemzetközi tanácsának (International Council on Large Electric Systems, CIGRE) osztályozása alapján tárgyalom [10, 11].

Számos országban történtek olyan jegesedési események, amelyek súlyos károkat okoztak a szabadvezetési hálózatokon. Az utóbbi időszakban a globális éghajlatváltozás hatásai, a választott témát érintően bizonyos régiókra jellemzően a jégviharok esetleges megnövekedett gyakorisága és nagysága miatt foglalkozni kell az átviteli- és az elosztóhálózatok jegesedési kérdéseivel.

Az elmúlt évtizedekben világszerte jelentős erőfeszítéseket tettek a szabadvezetékek jegesedése miatt fellépő jégterhelésének tanulmányozására. Mivel a légköri jegesedést általában nem, vagy csak nagyon kevés helyen mérik a meteorológiai állomásokon, egy-egy adott térségre gyakran nem áll rendelkezésre elegendő információ, ezért a helyi időjárási viszonyokat mérő korszerű meteorológiai mérőrendszerek mellett meteorológiai modellekre és statisztikai módszerekre is szükség van a jégterhelés meghatározásához. A jegesedés kialakulását, illetve a már kialakult jegesedés megszüntetését célzó módszerek felhasznál(hat)ják az időjárás előrejelzési adatokat is.

A jegesedés miatt a távvezetékeken különféle típusú jégfelhalmozódások fordulhatnak elő. Ezeket különféle elnevezésekkel illetik jégpáncél, zúzmara (puha és kemény), hó (nedves és száraz) és a dér. A jégfelhalmozódás két vagy több jégtípus keveréke is lehet a jegesedés alatti meteorológiai paraméterek (szélesség, a levegő hőmérséklete, a relatív páratartalom stb.) változása miatt.

Hagyományosan a légköri jegesedést a Föld legészakibb régióihoz, például Kanadához, Japánhoz, Oroszországhoz, az északi országokhoz és Közép-Európához tartozó jelenségnek tekintik. A közhiedelemmel ellentétben számtalanszor figyeltek meg jegesedést Dél-Franciaországban, az Egyesült Királyságban, Spanyolországban, Algériában, Dél-Afrikában és Latin-Amerikában is. Ez utóbbi országok többségében a nedves hó és a zúsmaras jegesedés a leggyakoribb. Az ilyen jegesedés gyakorisága és intenzitása nagymértékben függ az adott térségnek az óceánhoz viszonyított földrajzi elhelyezkedésétől, valamint a helyi domborzattól.

A jég felhalmozódás típusai

Az alábbi táblázat a jégfelhalmozódás típusainak összefoglaló ismertetését mutatja be a jellemző sűrűségtartományok feltüntetésével (1. táblázat).

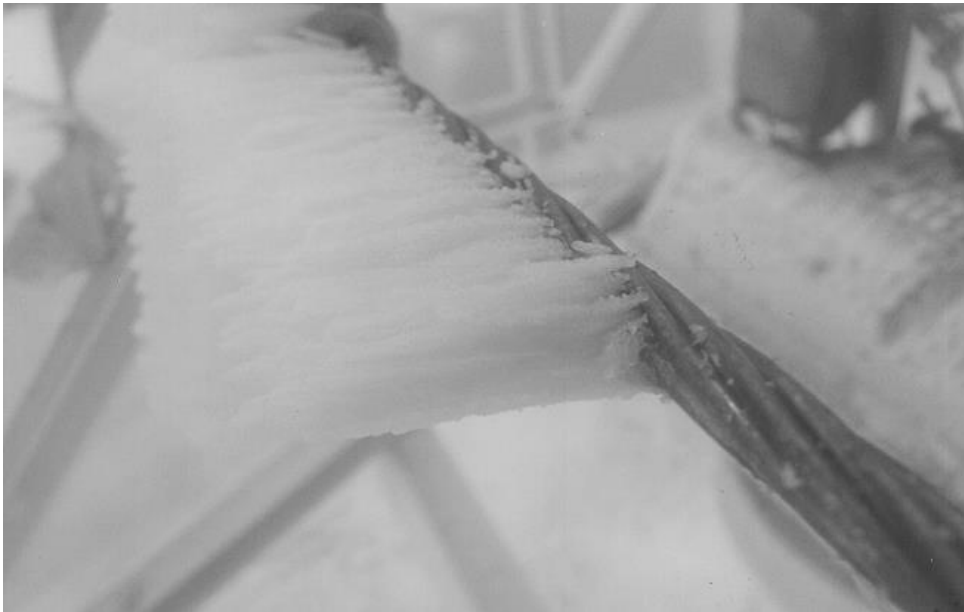
A jég vagy hó típusa	Sűrűség [kg/m ³]	Leírása
Jégpáncél (<i>Glaze ice</i>)	700-900	Tiszta szilárd jég, néha jégcsap formában a sodrony alsó részén. A sűrűsége a légbuborékok tartalmától függően változik. Nagyon erősen tapad és nehezen törhető le.
Kemény zúzmara (<i>Hard rime</i>)	300-700	Homogén szerkezetű, légbuborék zárványokkal. Alakja merev sodronyokon, mint a szél ellen alakított zászló, hajlékony sodronyokon többé-kevésbé kör alakú. Erősen tapad és többé-kevésbé nehéz leütni.
Lágy zúzmara (<i>Soft rime</i>)	150-300	Szemcsés szerkezetű. Alakja jellegzetesen „madártollszerű” vagy „karfiolszerű”. Rugalmas sodronyokon zászló szerűen is kialakulhat. Kézszel eltávolítható.
Nedves hó (<i>Wet snow</i>)	100-850	Különböző formájú és szerkezetű lehet, főként a szél sebességétől és a sodrony torziós merevségétől függően. Ha a hőmérséklet közel nulla, magas folyékony víztartalma lehet, ekkor lecsúszik a sodrony aljára és könnyen leeshet. Ha a felhalmozódás után a hőmérséklet lecsökken, a tapadási szilárdsága nagyon jelentős lehet.
Száraz hó (<i>Dry snow</i>)	50-100	Nagyon könnyű, rendes hó. Különböző formájú és szerkezetű lehet, a sodronyok mechanikus mozgatásával nagyon könnyen eltávolítható.
Dér (<i>Hoar frost</i>)	<100	Kristályszerkezetű (tűszerű). Gyenge a tapadása, „lefújható”.

1. táblázat

A jég vagy hó felhalmozódásának néhány jellemző képe:



13. ábra. Jégpáncél [10]



14. ábra. Zúzmarás "jég-zászló" [10]



15. ábra. Nedves hó szabadvezetési sodronyon [10]



16. ábra. Száraz hó szabadvezetési sodronyon [10]



17. ábra. Dér felhalmozódás kikötött portálon [10]

A szélsőséges időjárási körülmények modellezése és előrejelzése

A korszerű időjárás előrejelzést nagyteljesítményű számítógépeken futtatott numerikus időjárási modellek segítik. Ezek a modellek komplex egyenletrendszerekkel leírják a légkör dinamikáját és a benne zajló fizikai folyamatokat (olvadást, fagyást, párolgást stb.).

Világszerte a nagy meteorológiai központok különböző időjárási modelleket és az azokat realizáló bonyolult programrendszereket fejlesztettek ki, amelyek különböző térbeli és időbeli felbontásokkal futtathatók különböző időskálákra és tér tartományokra pl. az Európai Középtávú Időjárás Előrejelző Központ, ECMWF). Egyes, főként rövid és ultrarövid időtávú, meghatározott régióra vonatkozó modell típusokat maguk a meteorológiai szolgálatok is futtatnak.

Sajnos még a rövidtávú előrejelzések pontossága is korlátozott és már 1-2 fok eltérés is azt eredményezheti, hogy a valósághoz képest például más lesz a modellezett csapadék halmazállapota. A meteorológiai szolgálatok folyamatosan keresik a lehetőségeket az előrejelzések pontosságának növelésére, egyrészt az adatgyűjtés mennyiségének és minőségének a növelésével, és ezzel együtt a modellek finomításával, a felbontások növelésével, másrészt a kezdeti és peremfeltételek változtatásával ismételtelen lefutott előrejelzések statisztikai feldolgozásával (ensemble modellezés) [12].

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSZ) is többféle modellt alkalmaznak. A finomfelbontású (kb. 2,5 km) WRF - Weather Research and Forecasting model és AROME - Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle modellek a pontosabb domborzatnak köszönhetően a hegyi területeken jól alkalmazhatók és előnyük a részletes csapadék- és felhőfizika előrejelzése. Rövid- és középtávon az ALADIN - Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational és az ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts ensemble előrejelzéseit figyelik a meteorológusok – ezeknek a modelleknek a felbontása 8-9 km. Amennyiben ennek finomfelbontású változatát kifejlesztik, akkor ezzel nagyobb eséllyel lenne előre jelezhető a szélsőséges tapadóhavas vagy ónos esős helyzet kialakulása és annak helyszíne is.

A nagyfeszültségű villamos hálózatokat üzemeltető áramszolgáltatók munkáját nagyban segítené a légköri jegesedés területi eloszlását minél pontosabban leíró rövid- és középtávú előrejelzés.

Sajnos Magyarországon csak korlátozott számban üzemeltetnek meteorológiai állomásokat és azok sem mérnek mindenhol terepi jegesedést, ezért kívánatos lenne, ha az áramszolgáltatók a nagyobb veszélyeztetettségű helyeken lévő szabadvezetékeinek sodronyaira meteorológiai szenzorokat [pl. OTLM (Overhead Transmission Line Monitoring) szenzor] szerelnének, és ezek adatait, valamint az OMSZ előrejelzéseit felhasználva elkerülhetnék vagy mérsékelhetnék a károsodásokat.

3.2. Jegesedés okozta káresemények bemutatása

A közelmúlt két jelentősebb káreseményével illusztrálom a jegesedés hatását a nagyfeszültségű szabadvezetésekre.

2013. március közepén a rendkívüli időjárás az átviteli és elosztó hálózatokon rendkívül sok, és nagy kárt okozott. Ciklon érte el az országot, amelynek következtében előbb esőzés, majd erős havazás kezdődött. A sok helyen 100 km/h-nál is erősebb széllesek kíséretében a csapadék könnyen rá tudott fagyni a távvezetési sodronyokra. Az a tény, hogy a megszokottól eltérően előbb jött az eső, és csak utána a havazás, rendkívüli módon elősegítette a vastag jégtakaró kialakulását a vezetéseken. A sodronyok megnövekedett effektív felületéből, valamint az erős szél kombinációjából adódóan a tartószerkezetekre extrém többletterhelés hárult, melyet károsodás nélkül már nem voltak képesek elviselni.

A Kisvárdai-Sajószöged és Munkács-Tiszalök 220 kV-os, kétrendszerű távvezetéseken elsősorban a tartóoszlopok, de néhány feszítőoszlop is károsodott.

A Munkács-Sajószöged 400 kV-os vonalon alkalmazott kikötött portál típusú oszlopok közül 11 darab dőlt ki egymás után.

2014. december 1-jén a szélsőséges időjárási körülmények következtében az átviteli hálózat két távvezetéke az Albertirsa - Göd I.-II. 400 kV-os távvezeték és az Ócsa - Zugló 220 kV-os távvezeték jelentős mértékben megrongálódott. Ebben az esetben az ónos eső okozta jegesedés, valamint az erős szél következtében a két említett távvezeték súlyos károsodást szenvedett. Összesen mintegy 14 km hosszú nyomvonalszakaszon súlyosan megrongálódtak az acél tartószerkezetek, az áram-, és védővezető sodronyok, a szigetelőláncok, valamint egyes oszlophelyeken a beton alaptestek is. Ráadásul ezek a távvezetékek keresztezik az M31-es autópályát, sérülésük veszélyeztette az autópálya forgalmát az alábbi képek tanúsága szerint (18. - 20. ábra).



18. ábra. A sodronyokra rakódott rendkívül vastag jégréteg. [13]



19. ábra. A sodronyokra tapadó jég és hó. [14]



20. ábra Ónos eső után a megnövekedett belógás [15]

A károsodott távvezetési oszlopok és szerelvények

Az alábbi képeken bemutatom a jegesedés miatt károsodott távvezetési oszlopokat:



21. ábra. A Kisvárda-Sajószöged és Munkács-Tiszalök 220 kV-os, kéttrendszerű távvezetéken kidőlt oszlopok [13]



22. ábra. A Munkács-Sajószöged 400 kV-os kikötött portál oszlop károsodása [13]

Az Albertirsa - Göd I.-II. 400 kV-os távvezeték és az Ócsa - Zugló 220 kV-os távvezetékek károsodott elemei.



23. ábra. A leszakadt fázisvezető sodronyok [13]



24. ábra. Kidőlt oszlopok [16]



25. ábra. Kidőlt oszlop [16]



26. ábra. Az M31 autópályát keresztező oszlopközben a leszakadt sodronyok [16]



27. ábra. Az M31autópályát keresztező oszlopközben a leszakadt sodronyok [16]

3.3. Távezetési sodronyok jégtelenítése

Amint azt már az előző fejezetekben bemutattam, a távezetékek jegesedése az energiaszolgáltatás biztonságát veszélyezteti. Nagyon összetett témakör, mert vizsgálni kell a különböző hó- és jégtípusokat, különböző időjárási körülmények között a jegesedés kialakulását, az előrejelzési lehetőségeket, a megelőzési technológiákat, illetve a jégtelenítési módszereket.

Ebben a fejezetben a jegesedés kialakulásának megakadályozására - *anti-icing (AI)* – és a már kialakult jegesedés megszüntetésére - *de-icing (DI)* – szolgáló módszereket mutatom be [17]. Ezeket együttesen jégtelenítési módszereknek nevezem.

Előre kell bocsátani, hogy nem ismerünk olyan közös módszert, amely megvédené a szabadvezetékeket az erős jég és hó felhalmozódása által okozott károktól. Az egyes hideg éghajlatú régiókban az ottani távvezetékek üzemeltetői különféle jégmentesítő (**AI**) és/vagy jégtelenítő (**DI**) módszereket és stratégiákat fejlesztettek ki, a villamos hálózatok típusaitól, sajátosságaitól és a térségre jellemző meteorológiai viszonyoktól függően.

Általánosságban elmondható, hogy az **AI** módszereket a jég felhalmozódása előtt, vagy annak korai szakaszában alkalmazzák, míg a **DI** módszereket a jég felhalmozódása alatt és utána használják.

A már kialakult jegesedésnél a jégtelenítés azokat a fizikai folyamatokat jelenti, amelyek a sodronyokon felhalmozódott jégtömeg csökkenését eredményezi.

A jégtelenítés a következő mechanizmusokkal történhet:

Olvadás. A jég olvadása a jégfelület külső részén indul meg 0°C feletti hőmérsékleten. Ezt a folyamatot alacsony jégtömeg csökkenési arány jellemzi, amelyet elsősorban a levegő hőmérséklete, a napsugárzás és a szél sebessége befolyásol. Ezután rövid idő elteltével olvadás következik be a védővezető/fázisvezető - jég határfelületen, amelynek következtében a jégdarabok leesnek a szél és a gravitáció hatására.

Szublimáció. A jég szublimálását az jellemzi, hogy gőzmolekulák szabadulnak fel a jég felszínéről a környező levegőbe. A folyamat a telített körülmények közötti vízgőz-koncentráció és a nedves levegő közötti gradienstől függ. A szublimációt befolyásoló legfontosabb légköri paraméterek a levegő relatív páratartalma, a levegő hőmérséklete és a szél sebessége.

Mechanikai törés. Mechanikai behatásra létrejövő tapadási vagy kohéziós elválás következménye. A jégdarabok hirtelen leesése a sodronyok felcsapódását okozhatja, ez néha rövidzárlathoz vezet, különösen egyenes karú rácsos acélszerkezetű oszlopok ("függőleges elrendezés") esetén. A felcsapódás a sodronyokat és az oszlopszerkezeteket is károsíthatja.

Hó leesés. A védővezetők és a fázisvezetők hóvesztése elsősorban abban különbözik a jégdarabok leesésétől, hogy a jég és a hó felhalmozódásának folyamata és szerkezete eltér egymástól. A hó növekedésének elsődleges feltétele, hogy a tapadóerők a hó és a védővezető vagy fázisvezető felülete között, valamint a hópelyhek közötti kohéziós erők elég nagyok legyenek ahhoz, hogy a hópelyheket egyben tartsák a védővezetőn/fázisvezetőn. A hó akkor esik le a védővezetőről/fázisvezetőről, ha az aerodinamikai és a gravitációs erők meghaladják ezeket a tapadó és összetartó erőket.

A jégtelenítési módszerek csoportosítása

A szakirodalomban az AI és a DI módszereket általában a következő kategóriákba sorolják [17]:

1. Természetes hatásokon vagy fizikai kialakításon alapuló **passzív módszerek**;
2. **Aktív bevonatok** és eszközök;
3. **Mechanikai módszerek** a jég lebontására;
4. A jégolvadáson alapuló **termikus módszerek**.

Passzív módszerek

A passzív módszerek nem igényelnek külső energiaforrást, inkább olyan természeti tényezőket használnak fel, mint a szél, a gravitáció, a napsugárzás, vagy a sodronyok geometriája. Következésképpen mind feszültség alatt álló, mind feszültség alatt nem álló fázisvezetéken, valamint védővezetőkön működhetnek. A passzív módszerek magukban foglalják azokat a jegesedésgátló módszereket, amelyek megakadályozzák vagy csökkentik a nedves hó és jég képződését vagy felhalmozódását a fázisvezetőkön vagy a védővezetőkön.

Ennek elérése érdekében különböző eljárásokat alkalmaznak:

- I. a jég tapadási szilárdságának gyengítése,
- II. a túlhűtött vízcseppek fagyásának megakadályozása a sodronnyal való ütközéskor,
- III. speciális eszközöket, szerelvényeket alkalmaznak a sodronyok jegesedés miatti túlterhelésének korlátozására,
- IV. a természeti tényezők, például a szél, a gravitáció vagy a napsugárzás kiaknázása a jégterheléseknek a szabadvezetésekre gyakorolt káros hatásainak korlátozása érdekében.

Ezek a passzív módszerek zömmel nedves hó esetén hatékonyak, de jégpáncél kialakulása esetén kevésbé hatásosak.

Ebbe a csoportba sorolom azokat az új, egyelőre kutatási fázisban lévő anyagokat is, amelyeket jégtaszító (*icephobic*) anyagoknak hívunk. Ezek az anyagok az elméleti vizsgálatok szerint akadályozzák a jég kialakulását, illetve taszítják a jeget a felületük különleges mikroszerkezete miatt, az ilyen felületű anyag az érintkezésnél a jég tapadási szilárdságát jelentősen lecsökkenti. Ipari alkalmazása még várat magára.

Aktív módszerek

Az aktív bevonási módszerek hatékony működéséhez villamos energia szükséges. Az egyik módszer szerint a sodrony teljes felületét speciális dielektromos bevonattal látják el. Bevonatnak ferro-elektromos anyagot kell választani. Az átfolyó nagyfrekvenciás áram hatására keletkező veszteséget

hasznosítva lehetővé válik a sodrony hőmérsékletének fagypont fölött tartása, így a jég/szubsztrát határfelület megolvasztása.

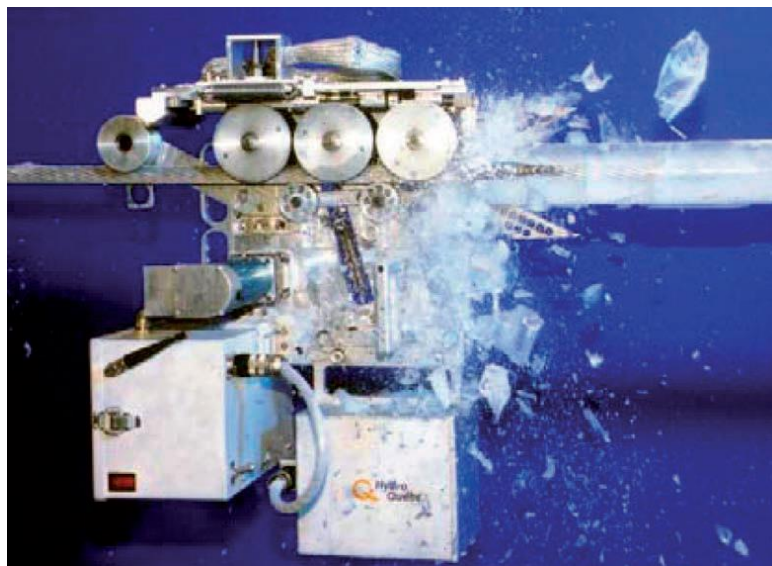
A módszer hátránya, hogy az alkalmazandó áram esetén a hagyományos 50 vagy 60 Hz-es üzemi frekvencia helyett nagyságrendekkel nagyobb, 60 kHz-es frekvencia használatára lenne szükség. Ez a megoldás azért problematikus, mivel ilyen magas frekvenciák használata elektromágneses zavarokhoz és egyéb kompatibilitási problémákhoz vezethet.

Egy másik módszer szerint ferromágneses bevonat alkalmazásával szeretnék a feszültség alatt álló sodrony fagypont feletti hőmérsékletét fenntartani. A sodrony ferromágneses bevonata az elektromos mező helyett a mágneses mező energiáját hasznosítaná, amelynek maximuma a sodrony felületén van. A sodronyok aktív bevonási módszereinek nagyüzemi hasznosítását jelenleg még vizsgálják, kiforrott technológia még nem áll rendelkezésre.

Mechanikai módszerek

A mechanikai módszerek különféle módon a sodronyokon lévő jégpáncélt törik össze, hogy a jég leesését felgyorsítsák, DI módszernek tekinthetők. A jég lehullás kikényszerítésére a mechanikus módszerek nagyságrendekkel kevesebb energiát igényelnek, mint a termikus módszerek.

A mechanikai módszerek többsége két különböző elven alapuló eljárás egyikét használja. Az egyik eljárás a jég megtörésével – ROV Remotely Operated Vehicle – (28. ábra), lekaparásával [18], a másik eljárás pedig gerjesztett rezgések, sokk hullámok, esetleg a védővezető/fázisvezető megfeszítéséből nyert rugalmas energiának a felszabadításával éri el a jégdarabok leesését, lerepülését.



28. ábra. A ROV típusú jégtörő [17]

A mechanikai módszerek egyik fő előnye, hogy a termikus módszerekhez képest egyszerűen alkalmazhatók. A gyakorlatban akkor részesítik előnyben a mechanikai módszereket, ha az adott távvezeték egy viszonylag rövid, eljegesedett szakaszának jégtelenítésére van csak szükség.

Az optikai szálakat is tartalmazó védővezetők (OPGW) esetében azonban el kell kerülni azokat a mechanikai módszereket, amelyek a sodronyok jelentős hajlításával járnának, hogy az optikai szálak ne károsodjanak.

Termikus módszerek

A termikus módszerek közé sorolunk minden olyan nem természetes módszert, amely a jég lerakódás legalább részleges megolvadását okozza, ezzel elősegítve a jégdarabok leesését a sodronyokról. Ezek a módszerek tehát a fázisvezető sodronyok vagy a védővezetők melegítésén alapulnak, hogy így megakadályozzák a jég felhalmozódását vagy a már kialakult jegesedést megszüntessék.

Világszerte a leghatékonyabbnak tartott módszer, amely minimalizálja a súlyos jégviharok következményeit a szabadvezetéseken. A termikus módszerek egy részét a jegesedés megakadályozására is használják, így elkerülhetik, hogy a túlhűtött vízcseppek ráfagyjanak a sodronyok felületére. Ebben az esetben a jégmentesítéshez kevesebb energia szükséges, mint a jégtelenítéshez.

A termikus módszereket két kategóriába lehet sorolni:

- (i) tiszta Joule-hatáson alapuló módszerek, (AC/DC)
- (ii) dielektromos veszteségeken, elektromágneses hullámokon és külső hőforrásokon alapuló módszerek.

A gyakorlatban egyelőre az első csoportba tartozó eljárások terjedtek el.

Kutatásom során én is az első csoportba sorolható alapelvet használó, de korábban még nem kidolgozott jégtelenítési módszer alkalmazhatóságát vizsgálom a védővezetők jégtelenítésére.

3.4. Távvezetési sodronyok hőmérsékletét befolyásoló tényezők, a hőmérséklet számítása különböző körülmények között

A távvezetési sodronyok vizsgálatainál, állandósult állapotban, a hőtechnikai számításokat az általánosan használt útmutatók alapján végezzük [19, 20]. Az ezekben az útmutatókban ismertetett összefüggések azonban csak viszonylag kis áramsűrűség ($< 1,5 \frac{A}{mm^2}$) és alacsony hőmérséklet ($< 100^\circ C$) mellett adtak jó eredményeket. Nem veszik figyelembe az időjárási körülmények és csak speciális esetekben a fázisvezetőben folyó áram időbeni változását.

Egyre nagyobb szerepet kapnak ezek a tényezők, ezért a távvezetési sodronyok hőmérsékletének és hőmérséklet-eloszlásának vizsgálatát a környezeti viszonyok és a tranziensek hatását is vizsgáló, a CIGRE által kibocsájtott útmutató felhasználásával és jelöléseivel ismertetem [21].

Az összefüggéseket az alábbi esetekben használhatjuk:

- a sodrony hőmérsékletének kiszámításához, abban az esetben, ha a villamos paramétereket és a környezeti viszonyokat ismerjük, vagy
- a sodronyban folyó áram maximális értékét akarjuk meghatározni, ha a legnagyobb megengedett sodrony hőmérsékletet és a környezeti viszonyokat ismerjük.

Az elmúlt időszakban tehát a távvezetési sodronyok (továbbiakban sodronyok) hőmodellezését olyan irányban fejlesztették, hogy lehetőség legyen az időjárási körülmények vagy a fázisvezetőben folyó áram időbeni változásának figyelembevételére.

Ezek nem elhanyagolható mértékben az átviteli kapacitás növelésével kaptak nagyobb hangsúlyt. A régebben létesített, de még üzemelő távvezetéseknél, amelyek a megnövekedett villamosenergia-igényeket már nem tudják kiszolgálni, szükségessé vált az átviteli kapacitás növelése. Új távvezetéseket létesíteni ugyanis manapság nem egyszerű, mert a jelentős költségeken túl, az új nyomvonalak kialakításánál az érintett ingatlan tulajdonosok érdekeit, a közmű szolgáltatók előírásait, a környezet és természetvédelmi előírásokat, a mezőgazdasági művelés adottságait, valamint a lakossági elfogadtatást is biztosítani kell, ezért az új összeköttetések létesítése bonyolult, időigényes és költséges.

Ezekben az esetekben vagy a hagyományos fázisvezető sodronyok cseréje jön szóba magas hőmérsékletű, alacsony belógású sodronyokra (*High Temperature Low Sag* (a továbbiakban **HTLS** sodronyok)), vagy az átviteli teljesítményt szabályozzák a változó időjárási körülményeknek megfelelően (*Dynamic Line Rating (DLR)*). Itt figyelembe kell venni, hogy a szabadvezetéseknél az átvihető maximális teljesítményt a sodrony maximálisan megengedett hőmérséklete korlátozza, amelyet nem szabad túllépni, mert az egyrészt a megengedettnél nagyobb belógást eredményezne (a biztonsági távolságokat be kell tartani), másrészt a sodrony és a szerelvények esetleges hőkárosodását kerülni kell.

A modellezésben az időjárási körülmények időbeni változásának figyelembevételét indokolják az utóbbi időszakban tapasztalható szélsőséges időjárási körülmények is, amelyek elsősorban a klímaváltozással függenek össze.

Azt is figyelembe kell venni, hogy az átviteli és az elosztóhálózatok fejlesztése, valamint a hálózatokra csatlakozó megújuló energiatermelési források (szélenergia parkok, PV naperőmű parkok) változó energiatermelése is arra motiválja a hálózatok tulajdonosait, üzemeltetőit, hogy lehetőség szerint minél pontosabban ellenőrizzék távvezetéseik viselkedését a változó környezetben. Ezért szükség van a valós idejű megfigyelő rendszerek minél szélesebb körű használatára is.

A sodronyok hőegyensúlya állandósult állapotban

A szabadvezetékek hőállapota a létesítési hely (nyomvonal) környezetében uralkodó környezeti időjárási paraméterektől, például a szél sebességétől és irányától, a környezeti hőmérséklettől vagy a napsugárzástól, valamint sodronyokon mérhető áramerősségtől függ.

Amennyiben ezek a paraméterek időben állandónak tekinthetők, akkor beszélünk állandósult állapotról. Ekkor az elsősorban a Joule-veszteségek és a napsugárzás által termelt hő megegyezik azzal a hőmennyiséggel, amelyet a konvekció és a hősugárzás vezet el a környező légkörbe.

Ha külön is figyelembe vesszük a szekunder hőforrásokat (koronaveszteségek, az acélmaggal felépített sodronyok (pl. ACSR – Aluminium Conductor Steel Reinforced – sodronyok) mágneses magvesztesége) és az időszaktól függően a párolgással fellépő hőveszteséget, akkor a hőegyensúly-egyenlet az alábbi formában írható fel:

$$P_J + P_S + P_M + P_i = P_C + P_r + P_W \quad (1)$$

ahol P_J a Joule-fűtés, P_S a napfűtés, P_M a mágneses fűtés, P_i a korona fűtés, P_C a konvektív hűtés, P_r a sugárzási hűtés és P_W a párolgási hűtés.

A korona fűtés elsősorban magas páratartalom és nagy szélesebbesség mellett jelentős, de a vizsgálatok szempontjából általában nem releváns, mivel ugyanilyen időjárási körülmények mellett a konvektív hatások nagyságrendekkel nagyobbak. A párolgás miatti hőveszteség is jelentős hatással lehet a sodronyok hőmérsékletére, de a legtöbb hőérték-számításnál azért hagyják figyelmen kívül, mert nagyon ritkán fordul elő, hogy a távvezeték teljes hosszban nedves lenne, és egyébként is a számításba vétele nehézséget okoz [22].

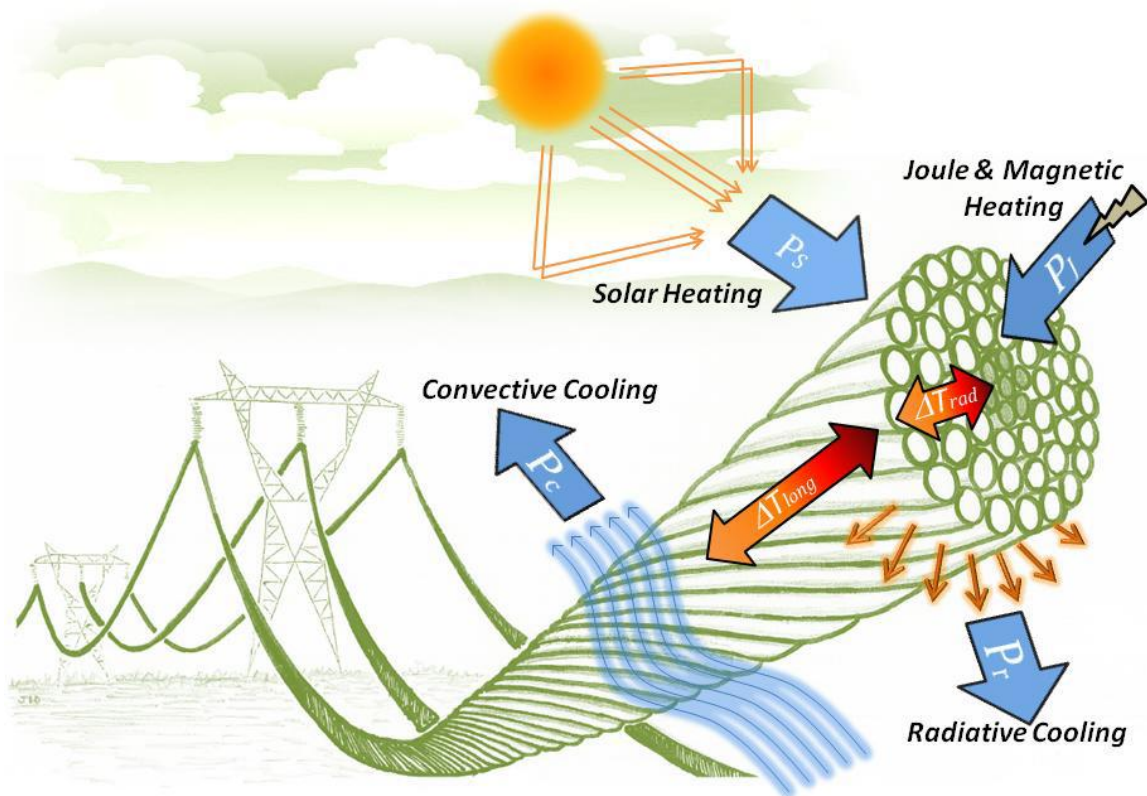
A biztonságos értékeket előnyben kell részesíteni ezen hatások figyelembevétele nélkül, ezért:

$$P_J + P_S + P_M = P_C + P_r \quad (2)$$

Meg kell jegyezni, hogy a P_M mágneses fűtést gyakran beépítik a Joule fűtési kifejezésbe, oly módon, hogy a tényleges sodrony ellenállást megnövelik.

Ez az egyszerűsítés adja az általánosan használt egyenletet:

$$P_J + P_S = P_C + P_r \quad (3)$$



29. ábra. Szabadvezeték melegedését és hűlését befolyásoló tényezők. [21]

Az időjárási paraméterek (szélsebesség és szélirány, környezeti hőmérséklet, napsugárzás) változásainak figyelembevételével tanulmányozható a sodronyok hőmérsékletének időbeli viselkedése (29. ábra). Ezeknek az időjárási paramétereknek a távvezeték mentén történő mérésével és az áram időbeli változásával így elméletileg egy adott időszakban nyomon követhető a sodronyok hőmérséklete.

Joule hő számítása

A Joule-hő a sodronyon folyó áram által keltett hőenergiára utal. Figyelembe veszi az egyenáramú ellenállást és a skin-hatást (váltakozó áram (AC) esetén az áram sűrűségének növekedését a sodrony felülete felé). Nem foglalkozom ugyanakkor a ciklikus mágneses fluxus következtében fellépő váltakozó áram által okozott mágneses hatásokkal, amelyek számottevő melegedést okozhatnak nagy áramsűrűség mellett egyes vasmagú vezetőkben. A mágneses eredetű melegedést azonban gyakran belefoglalják a Joule-melegítésbe oly módon, hogy megnövelik a sodrony tényleges ellenállását. Ezzel elkerülhető a mágneses melegítési hatás pontos meghatározásához szükséges számítások bonyolultsága. Az egy adott hőmérsékletre vonatkozó kombinált váltakozó áramú ellenállás mérésekből származtatható [23].

Az egységnyi hosszúságra vonatkoztatott egyenáramú ellenállás:

$$P_J = I^2 \cdot R_{dc} \quad (4)$$

ahol I az áramerősség (A), R_{dc} az egységnyi hosszúságra számított egyenáramú ellenállás ($\frac{W}{m}$), amely azonban függ a sodrony anyagának az adott hőmérsékleten vett ellenállásától ρ (Wm), A keresztmetszeti terület (m^2) és $T_{a\vartheta}$ a sodrony középhőmérséklete ($^{\circ}C$).

Egy adott anyag ellenállását a vizsgált hőmérsékleten az alábbi kifejezéssel adhatjuk meg:

$$\rho = \rho_{20} \cdot [1 + \alpha_{20} \cdot (T_{a\vartheta} - 20) + \xi_{20} \cdot (T_{a\vartheta} - 20)^2] \quad (5)$$

ahol ρ_{20} , az ellenállás $20^{\circ}C$ -on, valamint annak lineáris α_{20} , és másodfokú ξ_{20} hőmérsékleti együtthatói ($\frac{1}{K}$ és $\frac{1}{K^2}$).

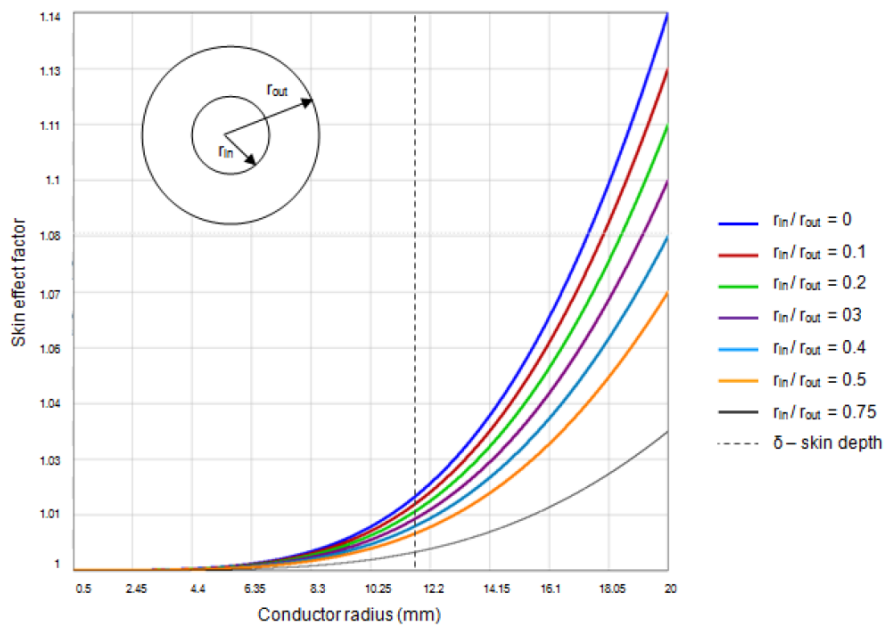
Az (5) összefüggésben a másodfokú tag csak körülbelül $130^{\circ}C$ -nál magasabb hőmérsékleten válik jelentőssé, ezért a jégtelenítési vizsgálatokban el lehet hanyagolni. Az R_{dc} számszerű értékeit különböző típusú sodronyokra gyártói bizonylatokban, illetve irodalmi adatok alapján vehetjük fel. A különböző típusú sodronyok ellenállása jelentős eltéréseket mutathatnak.

Váltakozó áram esetén a sodrony ellenállása növekszik az áramnak a sodrony felszíne felé történő vándorlása miatt (skin-hatás). A Joule-hő így:

$$P_J = k_{sk} \cdot I^2 \cdot R_{dc} \quad (6)$$

ahol a k_{sk} a skin-hatás tényezője, amely növekszik a sodrony átmérő és a frekvencia növekedésével. Értéke 50 Hz-es frekvencia és a szokásos sodrony átmérőknél általában kisebb, mint 1,02, de 45 mm-nél nagyobb sodrony átmérők esetén akár 1,08 is lehet [24].

A jelenséget az alábbi ábra mutatja be (30. ábra).



30. ábra. A skin-hatás-tényezőjének változása adott sodronyméreteknél [24]

A sodronyok váltakozó áramú ellenállásának értékeit (adott hőmérsékleten) a gyártók általában megadják vagy a kézikönyvekből kivehető, és az ettől eltérő hőmérsékleten lineáris interpolációval meghatározható.

Napenergiás melegítés számítása

Az egységnyi hosszúságú sodronyra jutó napenergia-melegedés, P_S ($\frac{W}{m}$), egyenesen arányos a sodrony külső átmérőjével (D (m)), a sodrony felületének abszorpciós képességével (α_S) és a globális sugárzás intenzitásával. I_T ($\frac{W}{m^2}$) [25]:

$$P_S = \alpha_S \cdot I_T \cdot D \quad (7)$$

Az α_S értéke 0,2 – 0,9 között változik, a kisebb érték fényes, új sodronyra, míg a nagyobb érték hosszabb üzemelés, és valós időjárási körülmények esetén jellemző.

A különböző típusú sodronyok eltérő felületkezelése ezektől eltérő értékeket adhatnak.

Egy adott időszakban az I_T globális sugárzási intenzitást mérésekkel határozzák meg. Azonban meg kell jegyezni, hogy a sodronyt ért globális sugárzás nem feltétlenül azonos a távvezeték minden pontján. Jelentős eltérések mutatkozhatnak a különböző tájolás, a növényzet, a talajról való visszaverődés stb. miatt.

A számítások során gyakran a „legrosszabb esetet” veszik figyelembe, amikor az I_T globális sugárzás maximális.

Az I_T globális sugárzási intenzitás a felület normálisára jutó közvetlen napsugárzásból (I_B), az égbolt egy vízszintes felületig történő diffúz sugárzásából (I_d) és abból a beeső sugárzásból tevődik össze, amelyet a föld vagy az F albedo (azaz egy felületre érkező elektromágneses sugarak visszaverődési képességének mérőszáma) tükröz. A sodrony egységnyi hosszára kapott P_S ($\frac{W}{m}$) teljes napenergia képletét a következő képlet adja [26]:

$$P_S = \alpha_S \cdot D \cdot \left[I_B \cdot \left(\sin(\eta) + \frac{\pi}{2} \cdot F \cdot \sin(H_S) \right) + I_d \cdot \left(1 + \frac{\pi}{2} \cdot F \right) \right] \quad (8)$$

ahol:

α_S = a sodrony felületének abszorpciós képessége

D = a vezető átmérője (m)

I_B = a közvetlen napsugárzás intenzitása ($\frac{W}{m^2}$).

A közvetlen napsugárzás $I_{B(0)}$ tengerszintre történő kiszámításának egyenlete [27]:

$$I_{B(0)} = N_S \cdot \frac{1280 \cdot \sin(H_S)}{\sin(H_S) + 0,314} \quad (9)$$

ahol az N_S a tisztasági arány, amelynek értéke a standard légkörben 1,0 , a tiszta égbolt esetén kevés por- és aeroszol mennyiség mellett 0,8 – 1,2 , ipari légkör esetén 0,5 , felhős vagy borult égbolt esetében kevesebb, mint 0,5. Vastag felhő esetén $N_S = 0$. Az I_B közvetlen sugárzás növekszik a tengerszint feletti y magasság növekedésével, a következő egyenlet szerint [28]

$$I_{B(y)} = I_{B(0)} \cdot \left[1 + 1,4 \cdot 10^{-4} \cdot y \cdot \left(\frac{1367}{I_{B(0)}} - 1 \right) \right] \quad (10)$$

H_S a nap magassága, amelyet a következőképpen adhatjuk meg:

$$H_S = \arcsin(\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta_S) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta_S) \cdot \cos(Z)) \quad (11)$$

ahol:

φ = a földrajzi szélesség

és az elhajlás (deklináció)

$$\delta_S = \text{elhajlás} = 23,3 \cdot \sin \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot (284 + N^*)}{365} \right] \quad (12)$$

A nap elhajlása meghatározható az Egyenlítő és egy olyan vonal közötti szögeként, amelyet a Föld közepétől a Nap közepéig húzunk.

N^* = az év egy napja (január 1. = 1)

Z = a Nap óraszöge = $15 \cdot (12 - \text{Idő})$, fokban, az órákban megadott Idő 0-tól 24-ig. A Nap óraszög minden órában 15 fokkal csökken nullától a Nap dél idejéig. A napidő megszerzéséhez adjunk hozzá 4 percet hosszúsági fokként a normál időtől keletre, vagy vonjunk le 4 percet fokként a standard időtől nyugatra. Van egy kis egyéb idő-korrekción is, amely nem haladja meg a 16 percet, a föld forgásának zavarai miatt.

I_d a diffúz napsugárzás intenzitása ($\frac{W}{m^2}$). A közvetlen I_B sugárzás és a diffúz sugárzás I_d összefüggést mutat, mivel a felhők mind az I_B csökkenését, mind az I_d növekedését okozzák. Az égbolt teljes diffúz sugárzásának kiszámítására szolgáló egyenlet [29]:

$$I_d = (430,5 - 0,3288 \cdot I_B) \cdot \sin(H_S) \quad (13)$$

η a napsugár szöge a sodrony tengelyéhez viszonyítva. Ezt a szöget az alábbi összefüggés adja meg:

$$\eta = \arccos[\cos(H_S) \cdot \cos(\gamma_S - \gamma_C)] \quad (14)$$

γ_C = a sodrony irányszöge.

A Nap irányszöge pedig

$$\gamma_S = \arcsin \left[\frac{\cos(\delta_S) \cdot \sin(Z)}{\cos(H_S)} \right] \quad (15)$$

F az albedó vagy a talaj reflexiója. Az albedó (F) vízfelületnél ($H_S > 30^\circ$) körülbelül 0,05, erdők esetében 0,1, városi területeken 0,15, talaj, fű és növények esetében 0,2, homok esetében 0,3, jég esetén 0,4 és 0,6 között, hó esetén 0,6 és 0,8 között. Az albedó általában növekszik, amikor a H_S nap magasság emelkedik.

A sodrony hőmérsékletének eloszlása

Ha a sodronyok hőmérsékletét, és ezzel összefüggésben a talajszint feletti magasságokat (belógás) részletesen vizsgálni szeretnénk, akkor nagyobb áramsűrűségnél (nagyobb, mint $2 - 3 \frac{\text{A}}{\text{mm}^2}$) a sugárirányú és az axiális hőmérsékletváltozásokat is figyelembe kell venni.

Bármely sodrony esetében a belsejében keletkező hőt át kell vezetni a környezettel érintkező külső felületre, amely így sugárirányú hőmérséklet csökkenést eredményez.

Kísérleti és analitikai vizsgálatok azt is kimutatták, hogy többrétegű sodrott vezetőknél ez a sugárirányú hőmérséklet-változás jelentős lehet még $1-2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ szélesség és $20-90^\circ$ szélirány változása mellett is, miközben az axiális hőmérsékletváltozás elhanyagolható volt [30].

a.) Sugárirányú hőmérséklet-változás

A sodrony belső rétegeiben keletkező hő egyrészt hővezetés, másrészt konvekció és sugárzás útján kerül a legkülső rétegbe. Ez a hőátadás számos olyan tényezőtől függ, amelyeket nagyon nehéz pontosan felmérni: az elemi szálak érintkezési felülete, érintkezési nyomás az elemi szálak és a rétegek között, a szálak korróziós foka, a szálak közötti légrések, kábelzsír hatása stb.

Sodronyok sugárirányú hőmérséklet-eloszlásának számításához V.T. Morgan 1990-ben megjelent tanulmánya ad útmutatót [31].

Egyenletes hőtermelést feltételezve az acélmagú sodronyok hőmérséklet különbsége a következő egyszerűsített összefüggéssel írható fel [26]:

$$T_C - T_S = \frac{P_T}{2 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{D_1^2}{D^2 - D_1^2} \cdot \left(\ln \frac{D}{D_1} \right) \right] \quad (16)$$

ahol

λ = effektív sugárirányú hővezető képesség $\left(\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right)$,

P_T = teljes hőnövekedés egységnyi hosszúságra $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}} \right)$,

D = a vezető teljes átmérője (m),

D_1 = az acélmag átmérője (m).

A λ effektív sugárirányú hővezető képesség értéke a hagyományos sodronyok esetén $0,5 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ és $7 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ tartományban van. Más konstrukciójú sodronyok pl. zsírozott sodronyok, tömörített sodronyok stb. esetén ezektől eltérő értékeket kaphatunk. Meg kell jegyezni, hogy az λ értékének a nagyságában az alumíniumszálak hosszirányú mechanikai feszültsége játszik jelentős szerepet, mert a húzófeszültség

befolyásolja a szálak közötti nyomást, így a fém-fém érintkezést és a légrések méretét is. A hagyományos ACSR sodronyoknál leggyakrabban $1,5 \frac{W}{mK}$ értéket javasolják [30].

b.) A sodronyok hosszirányú hőmérséklet-változása

Tapasztalat szerint, még akkor is, ha a sodrony hőmérséklete a szél változó hűtőhatása miatt helyenként nagyon változik, a távvezeték mentén kevésbé figyelhető meg a hőmérséklet-kiegyenlítődés. Azaz viszonylag nagy áramsűrűség mellett a sodrony lokális hőmérséklete jelentősen változhat a szabadvezeték mentén a helyi időjárási viszonyok változása miatt, szinte nincs axiális irányú hőmérséklet kiegyenlítés, annak ellenére, hogy az effektív axiális hővezető képesség nagyságrenddel nagyobb, mint az effektív sugárirányú hővezető képesség. Ennek oka, hogy ebben az esetben az alumínium szálak hővezetése dominál.

Konvektív hűtés számítása

A konvekció szinte mindig a sodrony hűtésének legfontosabb tényezője, még alacsony szélesség esetén is. Kétféle konvekciót veszünk figyelembe: természetes konvekciót, amely akkor fordul elő, amikor a szél sebessége nulla vagy nagyon alacsony; és kényszerített konvekciót, amely a szél sebességétől és a távvezeteki sodronyhoz viszonyított irányától függ. Mérsékelt vagy nagy szélesség mellett a kényszerített konvekció a meghatározó, és a természetes konvekció figyelmen kívül hagyható, míg alacsony szélesség mellett fordítva, a természetes konvekció az uralkodó konvekciós mechanizmus.

A szél változékonysága a távvezeték mentén, de akár még egyetlen feszítőközön belül is, nagyon megnehezíti a szabadvezetékek hőviszonyainak felmérését, különösen alacsony szélességek és nagy áramsűrűség esetén. Ezért vezették be a „tényleges szélesség” fogalmát, mint merőleges, lamináris szélességet, amely ugyanazt a hűtési hatást váltja ki a teljes távvezeteki szakaszon.

A csupasz sodronyokból a környező légkörbe történő hőátadás a konvekciós hőátadás együtthatójától, $h_c \left(\frac{W}{Km^2} \right)$ függ. Ez a hővesztés az áramlástanból ismert Nusselt-szám függvényében fejezhető ki.

$$P_C = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_S - T_a) \cdot N_u \quad (17)$$

ahol λ_f a levegő hővezetési tényezője $\left(\frac{W}{Km} \right)$ Γ_f -nél, T_f a sodrony felületével érintkező légréteg hőmérséklete, T_S és T_a pedig a sodrony felületének és a levegőnek a hőmérséklete.

Legfeljebb 300°C réteg hőmérsékletig a levegő hővezetési tényezője kifejezhető [32]:

$$\lambda_f = 2,368 \cdot 10^{-2} + 7,23 \cdot 10^{-5} \cdot T_f - 2,763 \cdot 10^{-8} \cdot T_f^2 \quad (18)$$

ahol feltételezzük, hogy a réteg hőmérséklete

$$T_f = 0,5 \cdot (T_S + T_a) \quad (19)$$

Kényszerített konvekció számítása

a.) Merőleges áramlás esetén

Hengeres csupasz sodrony és merőleges légáram esetén esetében több kutató kimutatta, hogy összefüggés van a dimenzió nélküli Nusselt-szám és a Reynolds-szám között.

A Reynolds-szám $Re = V \cdot \frac{D}{\nu_f}$ (20)

ahol V a szélesség ($\frac{m}{s}$), D a vezető átmérője (m), ν_f a levegő kinematikai viszkozitása ($\frac{m^2}{s}$) a réteg T_f hőmérsékletén. A levegő kinematikai viszkozitása ν_f , függ a sodrony tengerszint feletti magasságától, és kifejezhető: $\nu_f = \frac{\mu_f}{\gamma}$, amely μ_f a levegő dinamikus viszkozitása a réteg hőmérsékletén és a levegő sűrűsége γ ($\frac{kg}{m^3}$) a sodrony magasságában. A μ_f kifejezés 300°C-ig érvényes:

$$\mu_f = (17,239 + 4,635 \cdot 10^{-2} \cdot T_f - 2,03 \cdot 10^{-5} \cdot T_f^2) \cdot 10^{-6} \quad (21)$$

A levegő sűrűségének kiszámítására szolgáló képlet adott réteg hőmérsékleten és magasságban kifejezhető [33]:

$$\gamma = \frac{1,293 - 1,525 \cdot 10^{-4} \cdot y + 6,379 \cdot 10^{-9} \cdot y^2}{1 + 0,00367 \cdot T_f} \quad (22)$$

A javasolt összefüggések közül kiemelik a következő Morgan által adott egyenletet [34], amelyet más szerzők számos cikkében referenciaként használtak és több száz kísérleti eredményen alapulnak:

$$Nu_{90} = B \cdot Re^n \quad (23)$$

ahol a B és n együtthatók a 2. táblázatban megadott értékek. Ezek a Reynolds-számtól és a sodrony felületének R_S érdességétől függenek

$$R_S = d/[2 \cdot (D - d)] \quad (24)$$

ahol d a legkülső rétegben lévő szálak átmérője, és D a teljes átmérő. Ennek a D sodrony átmérőnek a teljes átmérőnek kell lennie, annak ellenére, hogy a sodrony felülete 40-45% -kal nagyobb lehet, mint az azonos átmérőjű sima vezetőé. Ennek az áramlási oka a határréteg viselkedése: leválik az egyik külső szárlól, és a következőn újra rögzül, így stagnáló zónákat képez a szomszédos szálak közötti szakaszokon.

Sima vezető			Sodrott vezető $R_S \leq 0.05$			Sodrott vezető $R_S > 0.05$		
Re	B	n	Re	B	n	Re	B	n
35 - 5,000	0.583	0.471	100 - 2,650	0.641	0.471	100 - 2,650	0.641	0.471
5,000 - 50,000	0.148	0.633	2,650 - 50,000	0.178	0.633	2,650 - 50,000	0.048	0.633
50,000 - 200,000	0.0208	0.814	-	-	-	-	-	-

2. táblázat

b.) A szélirány hatása a konvekció számítására

A fenti egyenletek csak a sodronyra merőleges légáramra érvényesek. A szélirány azonban fontos szerepet játszik a kényszerített konvektív hűtés hatékonyságában [35].

Az alábbiakban a korábban említett Morgan által javasolt következő egyenleteket mutatjuk be, ahol δ a szél és a távvezetési vonal iránya közötti szög:

$$\frac{Nu_\delta}{Nu_{\delta 90}} = (\sin^2(\delta) + 0.0169 \cdot \cos^2(\delta))^{0.225}; \text{ sima vezetőre}$$

$$\frac{Nu_\delta}{Nu_{\delta 90}} = 0.42 + 0.68 \cdot (\sin(\delta))^{1.08}; \text{ sodrott vezetőre ha } \delta \leq 24^\circ$$

$$\frac{Nu_\delta}{Nu_{\delta 90}} = 0.42 + 0.68 \cdot (\sin(\delta))^{0.90}; \text{ sodrott vezetőre ha } \delta > 24^\circ$$

(25)

Ezek az egyenletek $Re < 4000$ -re érvényesek.

A fenti egyenletekből kiolvasható, hogy a párhuzamos széláramlás által okozott hűtés a merőleges szél által termeltnek csak a 40% -a. De a szélirány változékonysága gyakran nagyon jelentős, különösen alacsony szélesség mellett. Amint azt korábban említettük, dinamikus teljesítmény szabályozási (DLR) célokból kifejlesztették a „tényleges szélesség” fogalmát, ennek a szélirány változásnak a kezelésére.

Azonban azt is meg kell jegyezni, hogy általában egy sodrony horizontális irányváltozásának nincs jelentős hatása a kényszerített konvekciós hővesztésre, feltéve, hogy a levegő áramlása keresztirányban van a sodrony tengelyével.

c.) Turbulencia

A turbulencia jelentős hatással van a sodrony konvekciós hűtésére, különösen nagy szélesség esetén. Ezt a hatást tényleges szabadvezetéken azonban nagyon nehéz értékelni annak térbeli és időbeli változékonysága miatt [32].

Szabadtéri környezetben a turbulencia intenzitás, amelyet a szórás és az átlagsebesség arányaként határoznak meg, meghaladhatja a 0,3-ot, amely érték jóval magasabb, mint a szélcsatorna teszteken kapott értékek. Ezenkívül a szabadtéri turbulencia változékonysága sokkal nagyobb, mint amelyeket a szélcsatornában lévő rácsokkal állítunk elő, ezért nem könnyű a szélcsatornában turbulens áramlásban elért hőátadás-növekedés eredményeit szabadtéri körülményekre lefordítani [36]. A kritikus értéknél kisebb Reynolds-számoknál a turbulencia nincs hatással a helyi vagy a teljes hőátadásra, míg Re kritikus értéke felett a turbulencia a sodrony határrétegében okoz változást [37].

Ezért a számítások végrehajtása során - különösen viszonylag nagy szélesség esetén - jelentős eltérések adódhatnak, mivel az áramlások pontos értékelése nem lehetséges (környezeti változékonyság, a terepi akadályok hatása, a kötegelt vezetők hatása stb.).

Természetes konvekció

Szélcsend esetén a különböző kutatásokból kiderült, hogy a Nusselt-szám, a Nu_{nat} , a dimenzió nélküli Grashof- és Prandtl-számok szorzatától függ:

$$Nu_{nat} = A \cdot (Gr \cdot Pr)^m \quad (26)$$

A Reynolds-számhoz hasonlóan (lásd: Kényszerített konvekció szakasz) a sodronyok D átmérőjének meg kell egyeznie a teljes átmérővel. A Morgan által a $Gr \cdot Pr$ különböző tartományaihoz javasolt A és m együtthatók értékeit a 3. táblázat tartalmazza [26]. Ezek az értékek több száz kísérleti mérés eredményein alapulnak, és referenciaértékként használják őket.

$G_r \cdot P_r$ tartománya		A	m
-tól	-ig		
10^{-1}	10^2	1.02	0.148
10^2	10^4	0.850	0.188
10^4	10^7	0.480	0.250
10^7	10^{12}	0.125	0.333

3. táblázat

A sodronynak a vízszintes irányba történő β dőlése csökkenti a természetes konvekciós hőveszteséget. A Nu_β/Nu_0 arány megtalálható a Morgan VT 1991-ben megjelent tanulmányában [36]:

$$\frac{Nu_\beta}{Nu_0} = 1 - 1.58 \cdot 10^{-4} \cdot \beta^{1.5}; \text{ sima vezetőre, } \beta < 60^\circ$$

$$\frac{Nu_\beta}{Nu_0} = 1 - 1.76 \cdot 10^{-6} \cdot \beta^{2.5}; \text{ sodrott vezetőre, } \beta < 80^\circ$$

(27)

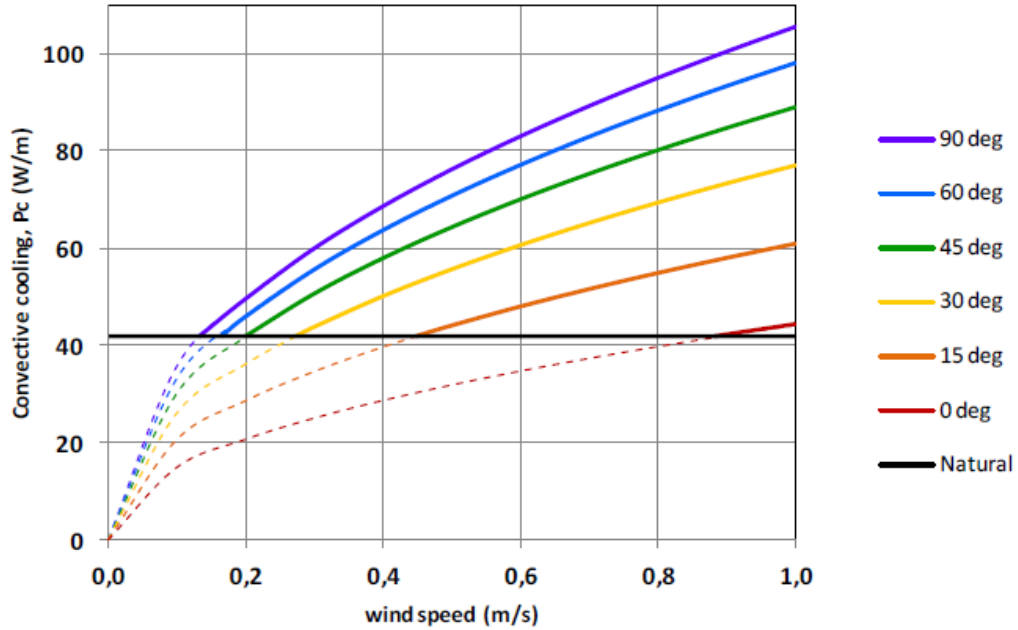
Számítások alacsony szélesség esetén

Ha alacsony a szélesség, akkor a hőátadás fizikája bonyolultabb lehet a sodronyt körülvevő levegőben fellépő felhajtóerő miatt. Egyes szerzők különböző modelleket javasoltak ezeknek a hatásoknak a mérlegelésére, és sima átmenetet biztosítanak a kényszerített és a természetes konvekció között. Azonban nagyon bonyolult ezeket a modelleket összevetni és valós helyzetekben használni a szélesség és -irány nagy változékonysága miatt, mind időben, mind térben [38].

Ezért olyan modellek kidolgozására van szükség, amelyek biztosítják a lokális időjárási mérések értékeinek megfelelő kiigazítását, hogy felhasználhatók legyenek egy egész távvezetéki vonal hőmérsékleti értékeinek meghatározásához.

Általában a konzervatív megközelítést javasolják, azaz minden esetben a természetes és a kényszerített konvekciós összefüggések közül az előzőekben már ismertetett egyenleteket kell használni.

A 31. ábrán látható esetben a hűtést úgy kell feltételezni, hogy a megfelelő színű görbét követjük lefelé, egészen addig, ahol az metszi a természetes hűtvonalat. E pont alatt a természetes konvekciós értéket kell használni.



31. ábra. Konvekciós hűtés alacsony szélesség esetén [21]

Sugárzási hűtés számítása

A sodrony sugárzási hővesztesége a felületéről kibocsájtott teljes sugárzási energia két részre osztható: a földre és a környezetre, illetve a közvetlenül az égbolt felé sugárzott hő [39].

A Stefan-Boltzmann-törvényt alkalmazva a vezető sugárzásból eredő hővesztesége kifejezhető [40]:

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot F_{c-g} \cdot \varepsilon_S \cdot \left[(T_S + 273)^4 - (T_g + 273)^4 \right] + \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot F_{c-sky} \cdot \varepsilon_S \cdot \left[(T_S + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4 \right] \quad (28)$$

ahol D a vezető külső átmérője (m), σ_B a Stefan-Boltzmann-állandó, ε_S a sodrony felületének emissziós képessége, T_S a sodrony felületi hőmérséklete, T_g a föld hőmérséklete a sodrony alatt T_{sky} az ég hőmérséklete a sodrony felett, F_{c-g} a sodrony sugárzott energiájának azon része, amely eléri a földet és a környezetet, és az F_{c-sky} a sodrony sugárzott energiájának azon része, amely az égbolt felé megy.

A számításoknál gyakran elegendő pontosságot biztosít, ha a T_g -t, és a T_{sky} -t a T_a környezeti hőmérséklettel azonosnak vesszük. A környezeti hőmérsékletet ugyanis sokkal könnyebb mérni, mint a többi említettet. Ezzel az egyszerűsítéssel és felhasználva azt, hogy F_{c-g} és F_{c-sky} összege egyenlő a sodrony felületéről kilépő összes kisugárzott energiával, az előző egyenlet a következőképpen írható fel:

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot \varepsilon_S \cdot \left[(T_S + 273)^4 - (T_a + 273)^4 \right] \quad (29)$$

Az üzemelő nagyfeszültségű távvezetési sodronyok emissziós képessége az életkor előrehaladtával gyorsan növekszik.

Az új sodronyok emissziós tényezője 0,2 – 0,3 , egy-két év múlva, különösen szennyezett környezetben 0,8 – 0,9 [41]. Természetesen a felületkezelt sodronyok ettől különböző értékeket mutathatnak.

A fenti összefüggések alapján látható, hogy a sugárzó hűtés inkább a magas hőmérsékletű sodronyok (HTLS) alkalmazása esetén jelentős, mint a hagyományos ACSR sodronyoknál, amelyeket magas hőmérsékleten nem üzemeltetünk, mert ez a mechanikai tulajdonságok romlását okozná. Ugyanakkor az is világos, hogy a sodronyok sugárzás általi hővesztesége azonban általában jóval alacsonyabb, mint a konvekcióval bekövetkező hőveszteség, ezért hatása a hőegyensúlyra korlátozott.

Az időbeni változások figyelembevétele

Amennyiben a hőtechnikai számításoknál a nagyon gyors áramváltozások hatását is szeretnénk figyelembe venni, akkor az általánosan használt

$$P_J + P_S = P_C + P_r \quad (3)$$

egyenletet módosíthatjuk úgy, hogy az összefüggésbe a sodrony belső energiájának időbeni változását is bele vesszük, ez függ a sodrony fajlagos tömegétől és a fajlagos hőkapacitásától.

$$P_J + P_S = m_C \cdot c_C \frac{dT_C}{dt} + P_C + P_r \quad (30)$$

ACSR sodronyok esetében a hőkapacitásnál figyelembe kell venni, hogy az anyagjellemzők a két anyagra különbözőek, ezért az alumínium és acél sodrat jellemzőivel

$$m_C \cdot c_C = c_{Al} \cdot \rho_{Al} \cdot A_{Al} + c_{Fe} \cdot \rho_{Fe} \cdot A_{Fe} \quad (31)$$

A hőkapacitás ugyan függ a sodrony hőmérsékletétől, de a működési tartományban ez a változás elhanyagolható.

A tranziensek vizsgálata elsősorban a dinamikus távvezeték terhelhetőség (DLR) meghatározásánál fontos, így tudjuk viszonylag nagy pontossággal meghatározni a sodrony aktuális hőmérsékletét. Jelen dolgozatban nem foglalkozom a távvezetékek dinamikus terhelhetőségének vizsgálatával.

4. A KUTATÁSOKAT MEGALAPOZÓ ELŐZETES VIZSGÁLATOK

4.1. A fázisvezető kötegek árameloszlásának és a védővezetőbe indukált feszültség által áthajtott áram nagyságának mérése a Tiszai Hőerőmű – Sajószöged 400 kV-os távvezetéken

Két különböző típusú mérésorozatot végeztünk: az első mérésorozat alkalmával a fázisvezető kettőskötegekben mértük az árameloszlást a távvezeték elején, közepén, és a végén az adott fázis két sodronya között. A második típusú mérésorozat esetén pedig egy speciális „áramkör” kialakításával vizsgáltuk, mértük ugyanazokon a helyszíneken a védővezetőkben létrejövő áram nagyságát.

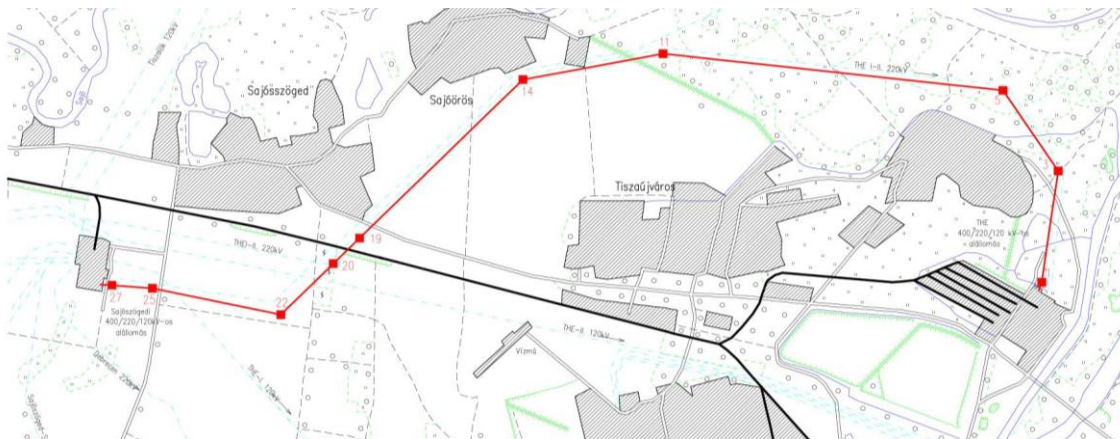
Ez utóbbi esetet azért tartom egyedinek és nagyon fontosnak, mert az előzetes várakozásaim szerint a fenti áramkör kialakítása esetén egy nagyfeszültségű távvezeték védővezetőjében feszültség indukálódik és áram folyik, így a sodrony melegeződése hozzájárulhat a védővezető jégtelenítéséhez.

Ennek a feltételezésnek az igazolására és az áram nagyságának megállapítására is elvégeztük a távvezeteki méréseket.

A mérésekre a MAVIR Zrt. engedélyével és segítségével az átviteli hálózat részét képező **Tiszai Hőerőmű (THE) – Sajószöged 400 kV-os távvezetéken** kerítettünk sort.

Az adott távvezeték kiválasztását az indokolta, hogy az a vizsgálat időszakában üzemben kívül volt, így nem kellett kivenni az üzemből, nem okozott kiesést.

A Tiszai Hőerőmű – Sajószöged 400 kV-os távvezeték elhelyezkedését az alábbi ábrán vázolt átnézeti helyszínrajz mutatja (32. ábra).



32. ábra. Tiszai Hőerőmű – Sajószöged 400 kV-os távvezetékek átnézeti helyszínrajza

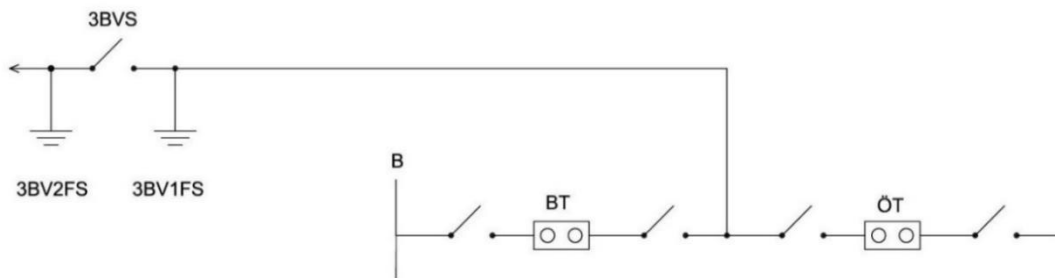
Az egyrendszerű kötegvezetős THE – Sajószöged 400 kV-os távvezeték főbb jellemzői [42]:

- Távvezeték hossza: 11.072 m
- Fázisvezető sodrony típusa: 3x2x500/65 mm², ACSR
- Védővezető sodrony típusa: 2x95/55 mm², ACSR

A távvezeték különböző magassítású és típusú tartó, vonali feszítő, sarokfeszítő és vég sarokfeszítő oszlopokkal építették. A beépített típusok: Generátor típusú OT tartó és Generátor típusú OSF (150-175°), OVSF (150-180°) feszítő oszlopok.

4.1.1. A fázisvezető kötegek árameloszlásának mérése.

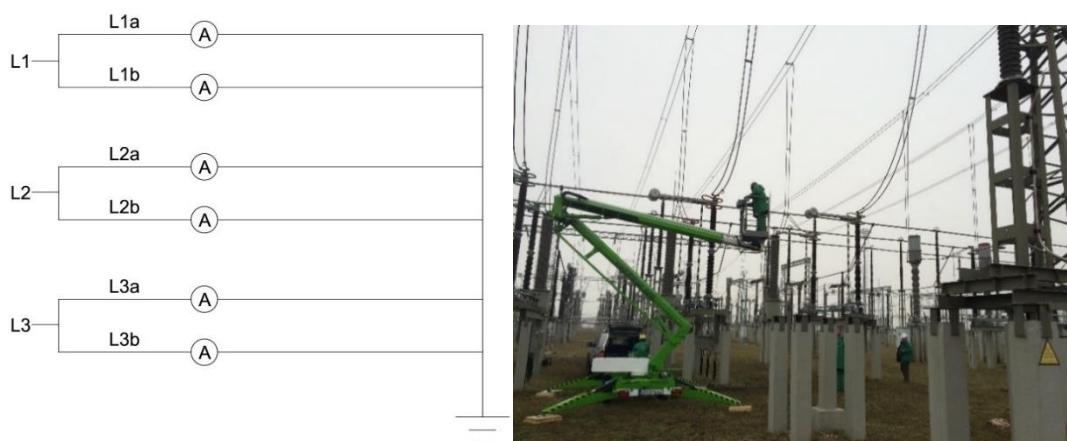
A mérések előkészítése:



33. ábra. A távvezeteki modell a kiinduló állapotban

A MAVIR Zrt. munkatársai a mérés előkészítése során az oszlop szerkezetén keresztül leföldelték a THE – Sajószöged 400 kV-os távvezeték 2.sz. oszlop fázisvezetőit, valamint a Sajószögedi 400/220/120 kV-os alállomás 3B mezőjében előkészítették a méréshez szükséges 0,4 kV-os tápellátást a 2-es számú transzformátor segédüzeméről, valamint tájékoztatták az érintett alállomási mező, a távvezeték, és a szakaszoló állapotáról, az előkészítést személyesen is ellenőriztük (33-34. ábra).

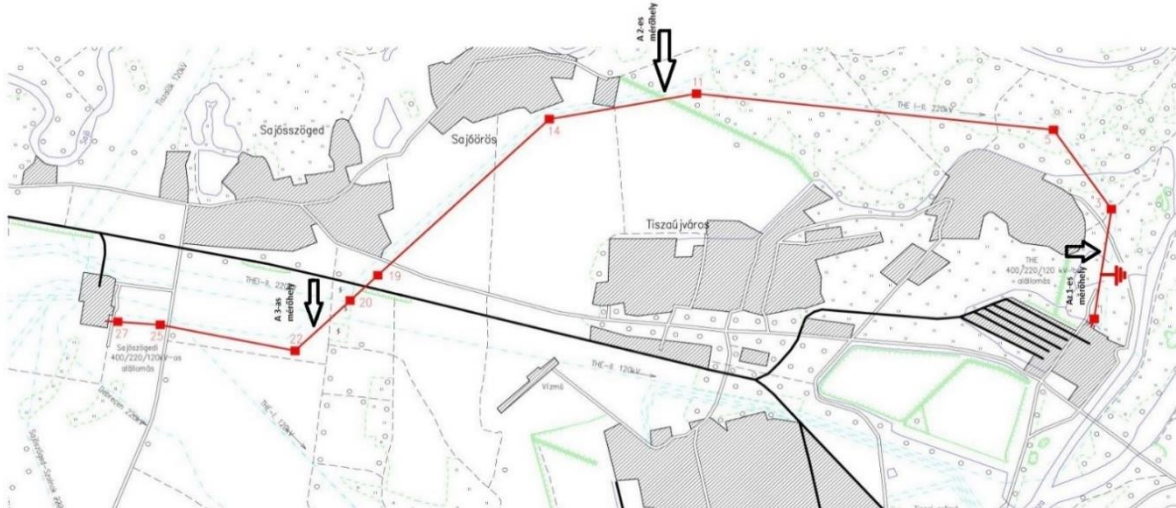
A mérés végrehajtása:



34. ábra. A 3F 0,4 kV-os megtáplálás kapcsolási vázlata és a megtáplálás megvalósítása

A mérés sikeres és biztonságos elvégzéséhez a közreműködő munkatársakat két csoportra osztottuk. Az első csoport az alállomáson maradt, és végrehajtotta a megfelelő kapcsolásokat, a tápfeszültség kiadását, valamint tájékoztatta a második (a távvezetéken mérő) csoportba tartozókat a kitáplált áramerősségről.

Előzetes egyeztetések alapján, ahol figyelembe vettük az oszlopok kosaras kocsival történő megközelíthetőségét is, 3 mérési helyet határoztunk meg. A mérési helyeket a mintegy 11 km hosszú távvezeték nyomvonalának az elején (2.-3. oszlopközben), a közepén (11.-12. oszlopközben) és a távvezetéknek a sajószögedi állomáshoz közeli végén (21.-22. oszlopköz) jelöltük ki (35. ábra) [43, 44].



35. ábra. Mérési helyek a távvezeték átnézeti helyszínrajzán

Mérési eredmények:

a.) 2.-3. oszlopközben

	I _{L1a}	I _{L1b}	I _{L2a}	I _{L2b}	I _{L3a}	I _{L4b}
Mért érték (A)	25,4	40,6	39,2	32,3	36,8	27,6
Mért érték (%)	37,9%	60,6%	54,4%	44,9%	56,6%	42,5%
Kiadott érték (A)	67		72		65	

4. táblázat

b.) 11.-12. oszlopközben

	I _{L1a}	I _{L1b}	I _{L2a}	I _{L2b}	I _{L3a}	I _{L4b}
Mért érték (A)	32,0	32,5	35,4	34,9	32,0	31,4
Mért érték (%)	47,8%	48,5%	49,2%	48,5%	49,2%	48,3%
Kiadott érték (A)	67		72		65	

5. táblázat

c.) 21.-22. oszlopközben

	I _{L1a}	I _{L1b}	I _{L2a}	I _{L2b}	I _{L3a}	I _{L4b}
Mért érték (A)	32,6	32,3	35,2	35,2	31,9	31,4
Mért érték (%)	48,7%	48,2%	48,9%	48,9%	49,1%	48,3%
Kiadott érték (A)	67		72		65	

6. táblázat

A fázisvezetőkön a méréseket MW 3500 típusú 2000 A méréshatárú lakatfogóval végeztük kosaras kocsi igénybevételével, amelyet a MAVIR Zrt. biztosított (36-37. ábra).



36. ábra. A méréshez használt MW 3500 típusú lakatfogó



37. ábra. A méréshez használt kosaras kocsi

Az 1. mérés értékelése:

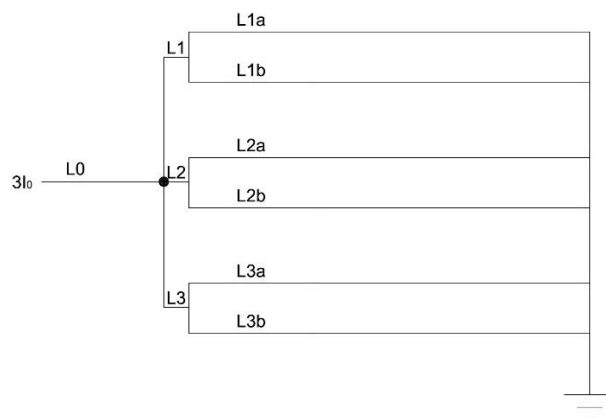
Az első mérés eredményei alapján elmondhatjuk, hogy a fázisvezető kötegeiben kialakult árameloszlás megközelítőleg szimmetrikus, a fázisvezetőkön folyó áramok közel egyenletesen oszlanak meg a kötegvezetők között, a különbségek nem jelentősek.

A legnagyobb eltérést a 67A betáplálású L1 fázis esetén tapasztaltuk, ahol a kötegben 33,5A - 33,5A helyett az egyik vezetőkön 40,6A-t mértünk, míg a másik vezetőkön 25,37A-t, és az átlagtól adódó eltérés ~8,1A (~12%) volt. Ennek okát a 2.sz. oszlop fázisvezetőinek földelésével magyarázhatjuk (az oszlopon lévő fázisvezetőket az oszlop testéhez kötötték fémesen, de a kontaktus valószínűleg nem mindegyik esetben volt megfelelő (nagy átmeneti ellenállás)).

4.1.2. A THE-Sajószöged 400 kV-os távvezeték védővezetőiben indukált feszültség által áthajtott áram mérése zérussorrendű megtáplálás esetén.

A kiinduló állapot, a vizsgálandó távvezeték, a földelési hely és a mérési helyek is megegyeznek az előzőekben ismertetett első mérésnél leírtakkal, csupán a megtáplálási mód változott.

Az 1F 0,4 kV-os megtáplálás vázlatát az alábbi ábra mutatja (38. ábra).



38. ábra. 1F 0,4 kV-os megtáplálás kapcsolási vázlata

Mérési eredmények:

a.) 2.-3. oszlopközben

	I_{v1}	I_{v2}
Mért érték (I [A])	46,8	6,2
Mért érték (I0 [%])	159,7%	21,1%
Kiadott érték (3I0 [A])	88	

7. táblázat

b.) 11.-12. oszlopköz

	IVV1	IVV2
Mért érték (I [A])	19,9	16,6
Mért érték (I0 [%])	67,9%	56,6%
Kiadott érték (3I0 [A])	88	

8. táblázat

c.) 21.-22. oszlopköz

	IVV1	IVV2
Mért érték (I [A])	15,1	13,9
Mért érték (I0 [%])	51,5%	47,4%
Kiadott érték (3I0 [A])	88	

9. táblázat

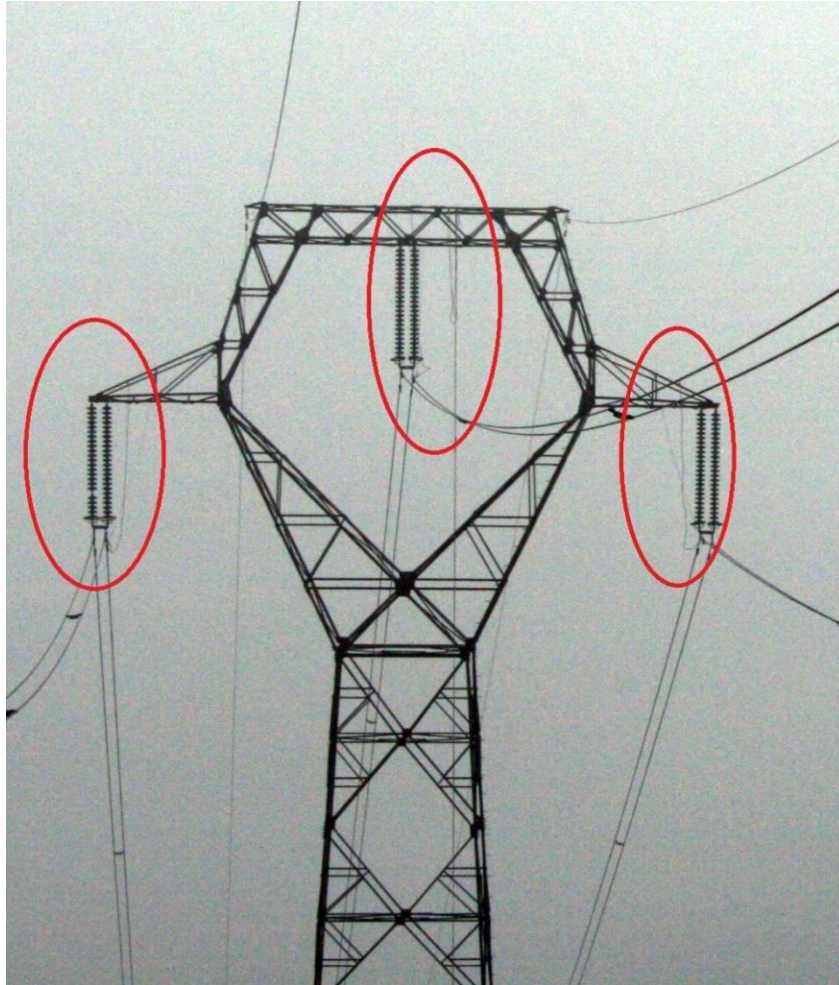
A védővezetőkön a méréseket szintén az MW 3500 típusú 2000 A méréshatárú lakatfogóval végeztük a MAVIR Zrt. által biztosított kosaraskocsi segítségével.

A 2. mérés értékelése:

A mérési eredményekből megállapítható, hogy az előzetes várakozásoknak megfelelően a $3I_0$ (zérussorrendű) táplálás esetén a védővezetőben az áram nagysága a betáplált I_0 áram 50-60%-a körül alakul.

Az eredmények azt is mutatják, hogy több védővezető esetén, mindegyik védővezetőben létrejön az előzetesen feltételezett áram, és ezek értéke megközelítőleg azonos, az oszlop kialakításából adódóan szimmetrikus elrendezésben.

Eltérést ettől egyedül a speciálisan az oszlop fémszerkezetéhez földelt 2.sz. oszlop közelében tapasztaltunk (a mesterségesen kialakított „hibahelyhez” közel), az előző mérésnél leírtakkal egyezően. A 2. sz. oszlop fázisvezetőinek földelését az alábbi ábra mutatja (39. ábra).



39. ábra. A 2. sz. oszlop fázisvezetőinek földelése

A másik két mérési helyszínen az áramok a várt értékeknek megfelelően alakultak, a legkisebb érték 47%, míg a legnagyobb pedig 68%.

A kutatómunkám során a távvezeteki méréseknél kialakított $3I_0$ (zérussorrendű) fázisáram esetén a védővezetőben létrejövő áram nagyságát numerikus szimuláció segítségével is megvizsgáltam.

4.2. Meteorológiai paraméterek mérési lehetőségének kísérleti vizsgálata

A távvezetékek jegesedésének vizsgálatához, a meteorológiai paraméterek „real-time” mérésére a témavezetőm irányításával elkészítettük egy olyan mérőberendezés prototípusát, amely képes mérni a környezeti hőmérsékletet, a páratartalmat, a szélesebességet, valamint a távvezeték sodronyainak hőmérsékletét, ezzel mutatva a távvezeték tényleges terhelését [45].

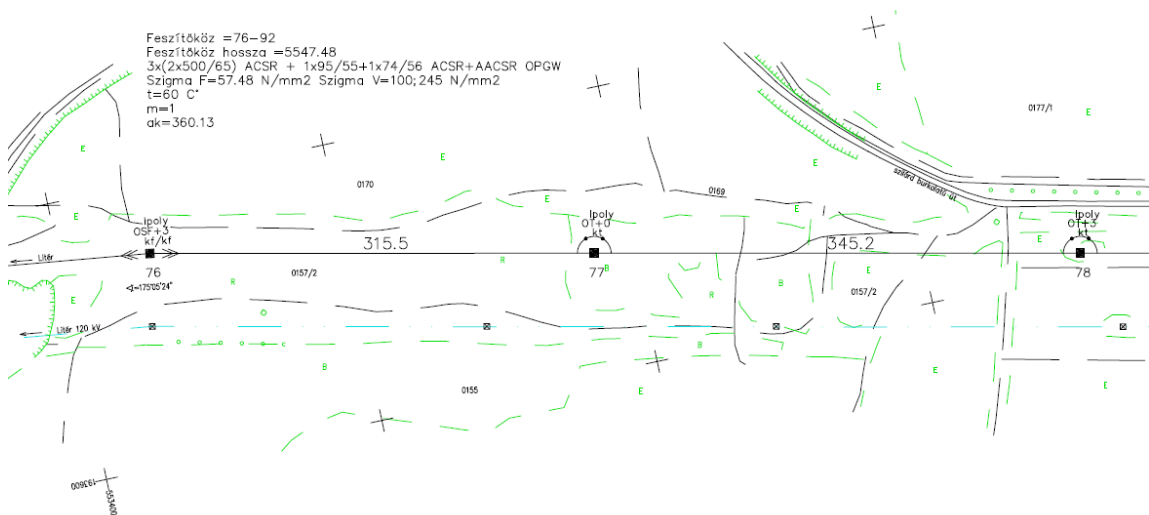
A mérések helyszínéül a Bakonyban található Litér – Hévíz távvezetékét, illetve annak egy kiválasztott feszítőközét választottuk, mert változatos terepi és meteorológiai viszonyokkal rendelkezik.

Litér-Hévíz 400 kV-os távvezeték főbb jellemzői: rendszerhossz 90 km, a jellemző oszloptípus Ipoly, a fázisvezető sodronyok 3x2x500/65 ACSR.

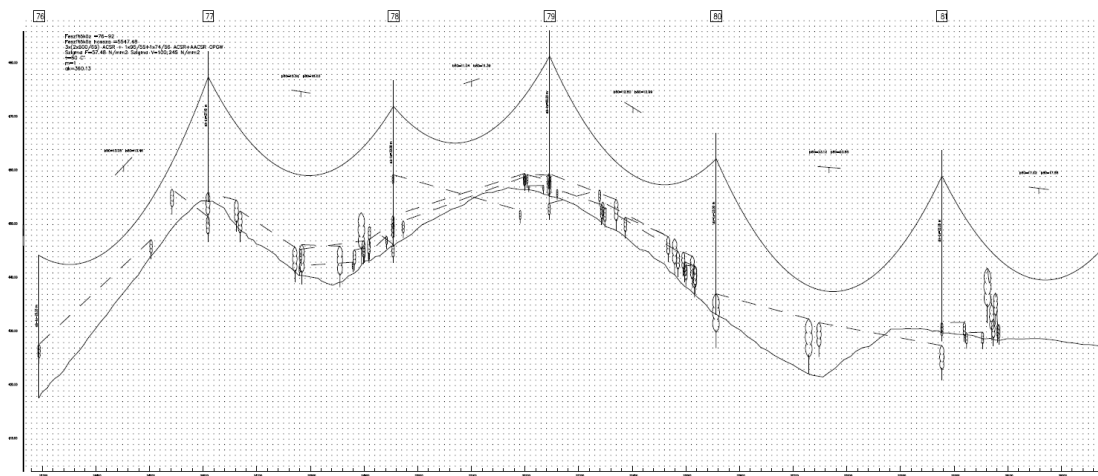
A vizsgálat helyszínét az alábbi ábrák segítségével mutatom be (40.-42. ábra).



40. ábra. Átnézeti helyszínrajz

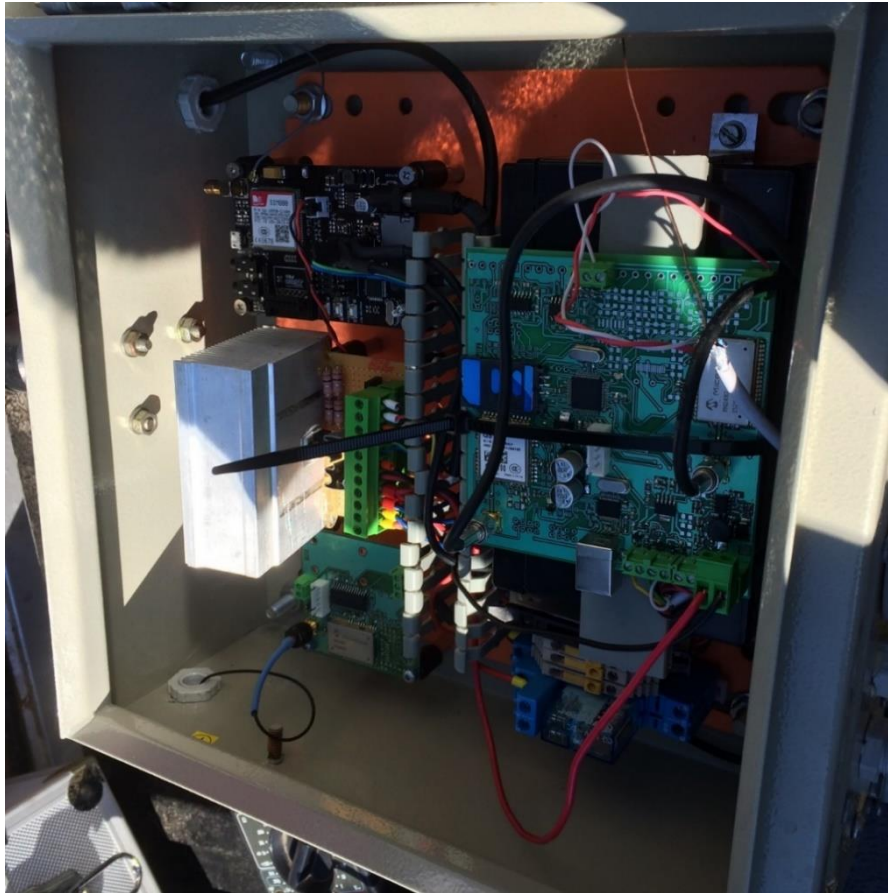


41. ábra. Nyomvonalrajz részlet



42. ábra. Hosszelvényrajz részlet

A MAVIR Zrt., az Óbudai Egyetem EKI Kutatólabor és az ELINOR Mérnökiroda Kft. –vel együttműködve lehetőségünk volt a LITÉR - HÉVÍZ 400 kV-os távvezeték 77-es és 83-as számú oszlopán elhelyezni a mérőberendezéseinket. A mérőberendezést az alábbi ábra mutatja (43. ábra).



43. ábra. A mérőberendezés [46]

A mérőberendezés elektronikai boltokban megtalálható részekeségekből (Töltésvezérlő, GSM adó, nyomtatott áramköri panel, ellenállás stb.) került kialakításra, "költséghatékonyan". A sodrony hőmérsékletének mérésére szolgáló érzékelő a kettősköteg távtartójában került elhelyezésre. A mérőberendezés a mérési eredményeket GSM alapon továbbította az Óbudai Egyetem egyik szerverére. A mérőberendezés felszerelését a 77. sz. Ipoly OT+0 tartóoszlopra az alábbi ábra mutatja (44. ábra).



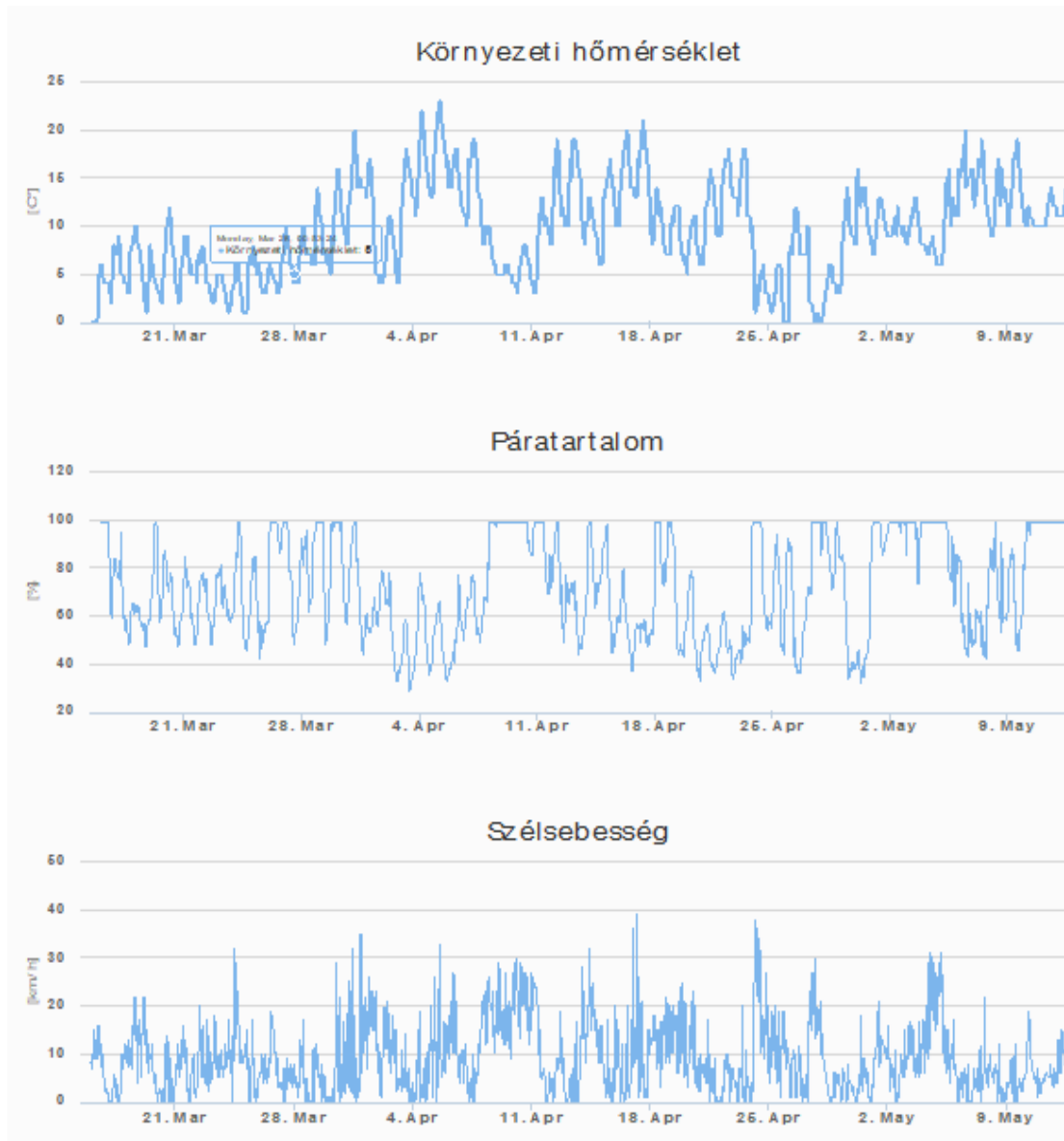
44. ábra. Mérőberendezés elhelyezése a távvezetéki oszlopon

A beépített mérőáramkörök negyedórás bontásban mérték az említett paramétereket, és a mért adatokat óránként küldték el GSM alapon az Óbudai Egyetem szerverére, ahol az információkat mentettük és feldolgoztuk.

A mérőberendezés használata során mintegy 2 hónapnyi mérési eredmény, adathalmaz gyűlt össze. Az adatokat Excel táblázatban rendezve kb. 4000 soros adatbázist kaptunk (a hiányos vagy sérült adatokat leszámítva). Az adatok feldolgozása során regresszió számításokat végeztem a sodronyok hőmérséklete és a pillanatnyi terhelési adatok közötti kapcsolatok felderítésére.

Az általunk mért meteorológiai adatokat csak az OMSZ-től kaptuk, az adott térségre vonatkozó (átlagosnak tekinthető) adatokkal tudtuk összehasonlítani, mivel pont ott, a mérés helyén, nem volt meteorológiai mérőállomás. Ezekkel összevetve a mérési adataink elfogadhatók voltak.

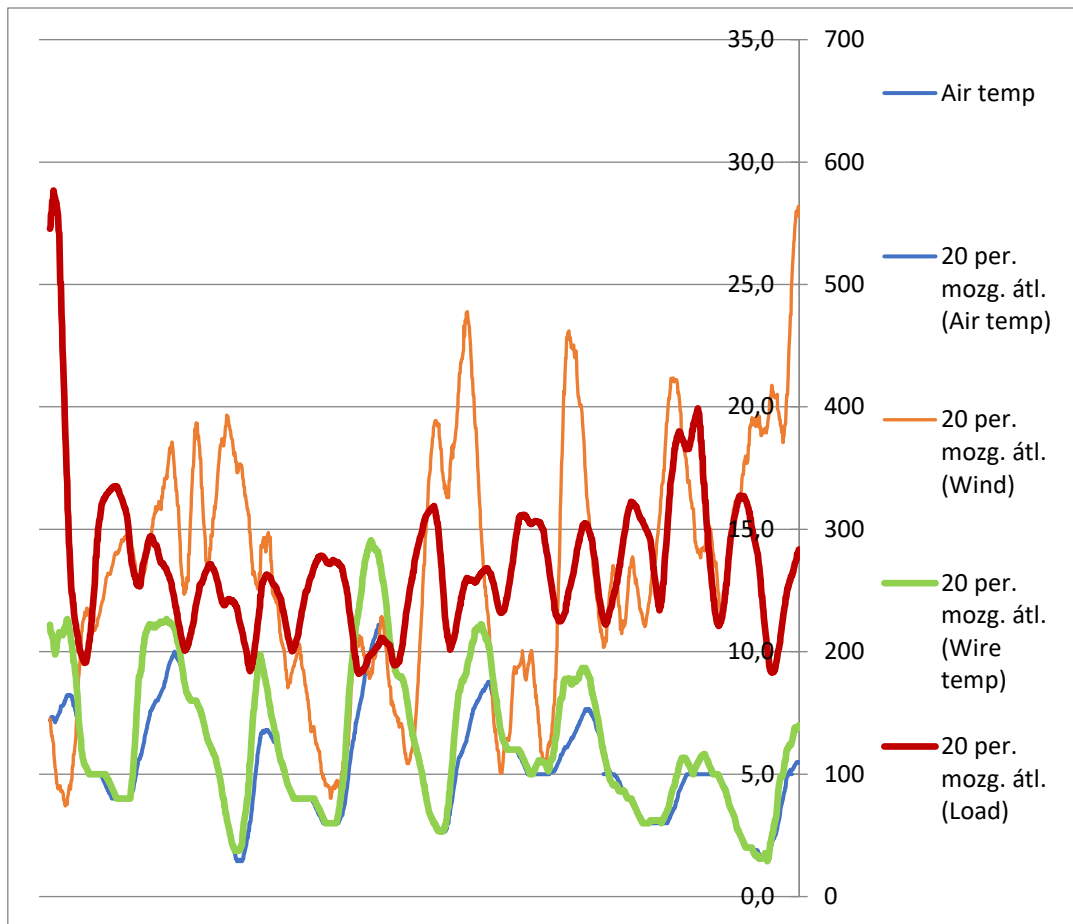
Ezeket illusztrálja az alábbi ábra (45. ábra).



45. ábra. Regisztrált meteorológiai adatok

Az adatok további feldolgozásánál viszont azt tapasztaltuk, hogy a fázisvezetősodrony hőmérsékleti adatai nem korrelálnak a MAVIR Zrt. terhelési/SCADA adataival.

Előzetes feltételezéseink szerint ugyanis a távvezeték fázisvezető sodronyának hőmérséklete jelentős összefüggésben kellene, hogy legyen az éppen aktuális terhelési adatokkal. Ez az összefüggés nem mutatható ki, a mért értékek inkább a környezeti hőmérséklet változását követik, mintsem a terhelési értékeket (46. ábra).



46. ábra. A sodrony hőmérséklet és a terhelési adatok összehasonlítása

Az eredmények értékelése

A mérőberendezés energiaellátását akkumulátorral oldottuk meg, ennek az időszakos cseréje/feltöltése nagyon körülményes, mert a MAVIR Zrt. és a távvezeték üzemeltetője az MVM Xpert Zrt. (korábban OVIT Zrt.) szabályzatai csak a távvezeték feszültségmentes állapotában és csak magassági vizsgával rendelkező személynek engedi az oszlopon való munkavégzést.

A mérőberendezések energiaellátását át kell alakítani "önellátó" módra, amely azt jelenti, hogy vagy vezeték nélküli töltéssel (a távvezeték környezetében kialakuló elektromágneses térből nyerné ki a működéshez szükséges energiát egy erre a célra kifejlesztett egység segítségével), vagy a berendezés közelébe telepített PV napelem segítségével kell az energiaellátást megoldani.

A fázisvezető sodronyok hőmérsékletének pontosabb mérésére az érzékelőt nem a kettősköteg távtartójában kell elhelyezni, hanem magára a sodronyra kell felszerelni, hogy a környezeti hatások ne zavarják a mért eredményeket.

Tehát a jelenlegi mérési elrendezés, kialakítás és mérési metódus nem felel meg maradéktalanul a kívánalmaknak, jelentős mértékben át kell alakítani a koncepciót, precízebb, pontosabb mérést kell kialakítani ahhoz, hogy az így kinyert információhalmaz az adott célra az iparágban hasznosítható legyen.

Megfontolandó továbbá, hogy a kifejezetten ilyen célokra kifejlesztett és megvásárolható professzionális elemekből (szenzorok, adatgyűjtő és továbbító egységek, energiaellátás stb.) állítsunk össze mérőberendezést, vagy akár egy komplett mérőállomást telepítsünk a távvezetésekre.

5. A KUTATÁS CÉLJA, HIPOTÉZISEK

A szélsőséges időjárási körülmények egyre gyakrabban veszélyeztetik a villamosenergia-rendszer biztonságos üzemvitelét a hálózatokon. A sodronyok jegesedése által előidézett üzemzavarok veszélyeztetik a hazai villamosenergia-ellátás biztonságát és a nemzetközi összeköttetéseket. Az általam végzett kutatómunka célja olyan eljárás kidolgozása a védővezető sodronyok jégtelenítésére, amellyel csökkenteni lehet a károk mértékét, és elősegíteni a rendszerelemek minél gyorsabb helyreállítását. A vonatkozó hazai és nemzetközi szakirodalom áttanulmányozása után az alábbi hipotéziseket állítottam fel.

HIPOTÉZIS I.

Létrehozható egy távvezeték modell, amelynek alkalmazásával lehetővé válik a villamosenergia-átviteli és –elosztóhálózati rendszer villamos és termikus modellezése az átviteli kapacitás, rétegáramok és teljesítmények, valamint a kialakuló sodronyhőmérsékletek tekintetében.

HIPOTÉZIS II.

Kidolgozható egy új eljárás, amely az átviteli és elosztóhálózatokon alkalmazott távvezetési oszlopok védővezetőinek jégmentesítésére szolgál. Az eljárás kidolgozásánál figyelembe kell venni, hogy Magyarországon, a nagyfeszültségű hálózatokon alkalmazott védővezetők hatásosan földelt rendszerűek, így normál üzemállapot esetén a védővezetőben nem folyik áram. Az eljárás fogja meghatározni a jégolvasztáshoz szükséges áramot, az áramátfolyás időtartamát és azt a folyamatot, amellyel a szükséges áramerősség létrehozható a védővezetőkből. Az eljáráshoz ki kell dolgozni egy univerzális egyenletrendszert, amellyel tetszőleges oszlopok és tetszőleges oszlopközök esetén kiszámítható a védővezetőben folyó áram nagysága.

HIPOTÉZIS III.

Kidolgozható egy új jégolvasztási algoritmus, amely a célirányosan elhelyezett smart meteorológiai érzékelők adataira és az átviteli rendszerirányítók SCADA csatornákon beérkező valós terhelési adataira, valamint az adott összeköttetés fizikai paramétereire épülhet. Az algoritmus tegye lehetővé, hogy az átviteli és elosztóhálózatokon fellépő üzemzavar (jegesedés) elkerülhető legyen, illetve a már bekövetkezett hiba rövid időn belül elhárítható legyen.

HIPOTÉZIS IV.

Új szimulációs szoftver fejleszthető ki, amely alkalmas a tetszőleges ACSR sodrony melegedésének, és rétegáramainak meghatározására a ráadott terhelés és az adott környezeti paraméterek figyelembevételével. Az eredmények grafikus és analitikus módon is legyenek megjeleníthetőek.

6. ALKALMAZOTT ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK

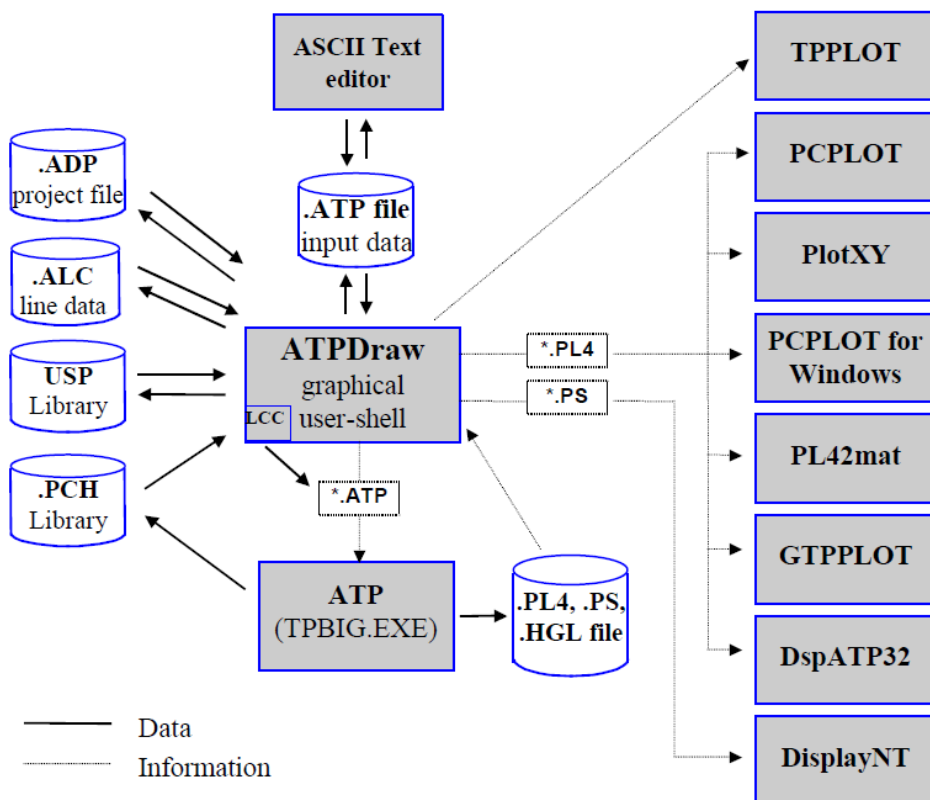
6.1. Az EMTP programrendszer ismertetése

Az EMTP (Electromagnetic Transients Program), illetve annak ATP (Alternative Transient Program) verziója olyan univerzális programrendszer, amelyet az elektromágneses és az elektromechanikus jellegű tranziens jelenségek digitális szimulációjára fejlesztettek ki [47]. Ezzel a digitális programmal összetett hálózatok és tetszőleges felépítésű vezérlőrendszerek szimulálhatók. Az ATP-EMTP széleskörű modellezési képességekkel és a tranziensek kiszámításán kívül további fontos funkciókkal rendelkezik.

Az ATP-EMTP szimulációs rendszer különálló segédprogramokból (pre- és post processors), adat inicializáló fájlokból és a megoldó programból (TPBIG.EXE) áll.

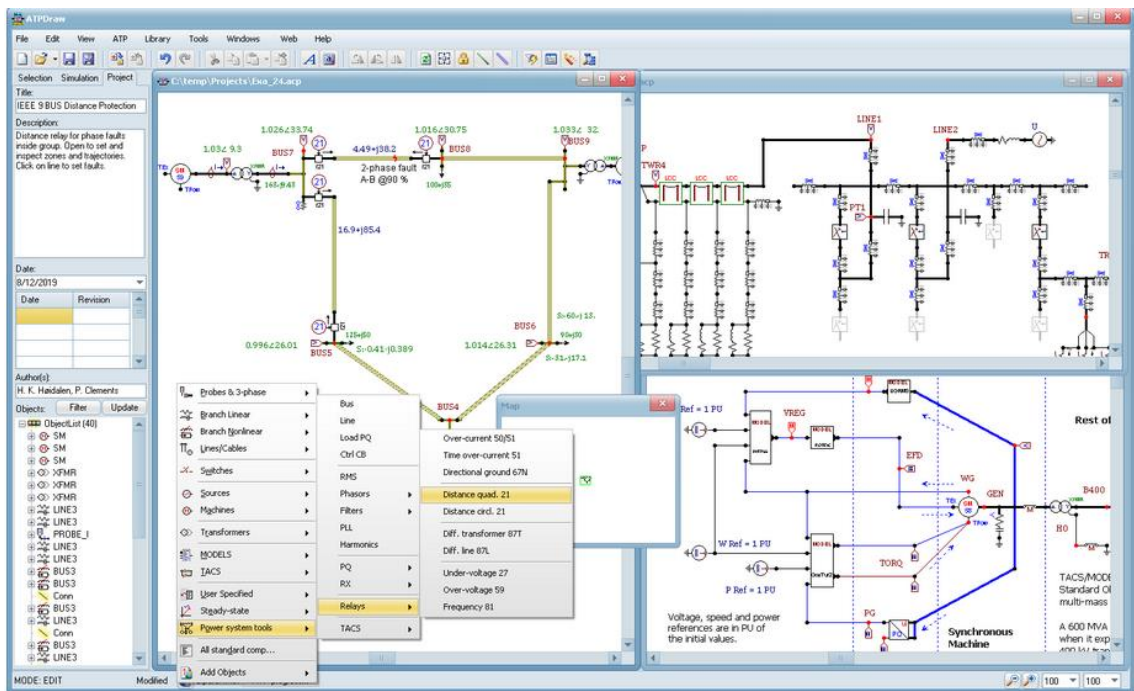
A programrendszer használatát megkönnyíti az ATPDraw, amely egy egérrel vezérelt grafikus pre-processor az elektromágneses tranziens program ATP-EMTP verziójához kifejlesztve, MS-Windows platformon.

Az ATPDraw szimulációs központként használható, amely kapcsolatot és működési felületet biztosít más ATP-EMTP összetevők számára. A rendszer sematikus vázlatát az alábbi ábra szemlélteti (47. ábra).



47. ábra. Az ATP-EMTP szimulációs rendszer sematikus vázlatát [48].

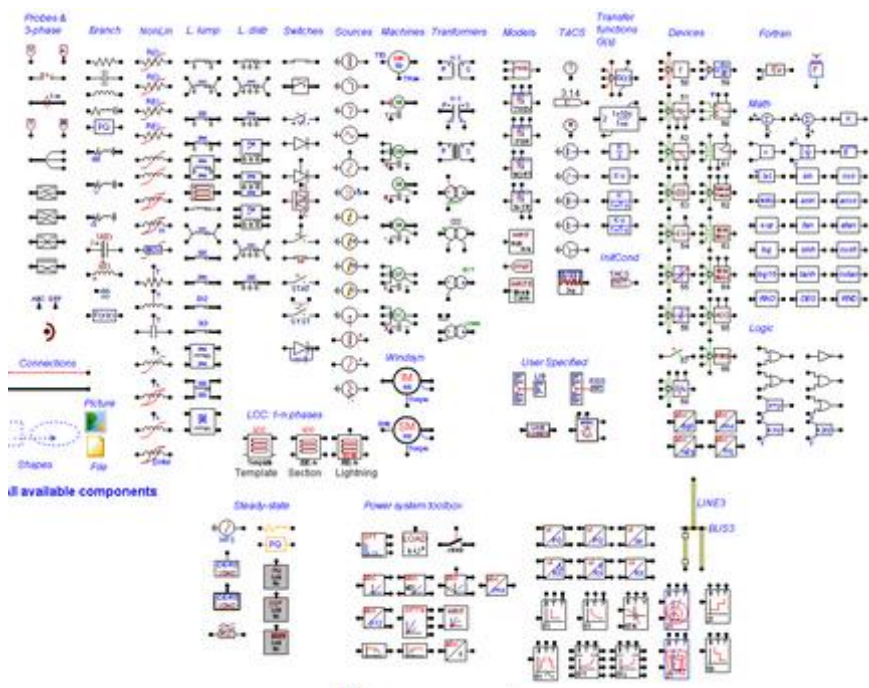
Az ATPDraw-ban a felhasználó elkészítheti a villamos áramkört, és a menüből kiválaszthatja az összetevőket, majd az ATPDraw létrehozza az ATP bemeneti fájlt a megfelelő formátumban, az "amit látsz, azt kapsz" elv alapján (48. ábra).



48.

ábra. Az ATPDraw Windows platformon [49]

Az áramköri elemek széles választéka áll rendelkezésre (49. ábra).



49. ábra. Az ATPDraw menüből elérhető áramköri elemek [49]

Az ATP szimulációs program és a rajzoló, nyomtató programok integrálhatók az ATPDraw programba.

Jelenleg már az ATPDraw 7.2 verziója is elérhető.

A programrendszer alkalmas elosztott paraméterű távvezetékek és kábelhálózatok vizsgálatára a LINE CONSTANTS, CABLE CONSTANTS és CABLE PARAMETERS modulok segítségével.

Az eredmények megjelenítése táblázatosan, diagrammokban vagy vektoros ábrákon is lehetséges különálló interaktív grafikai programok, TPLOT, PCPLOT, PlotXY segítségével.

6.2. A LabVIEW szoftver ismertetése



A LabVIEW szoftver a **National Instruments** terméke. A szoftver neve a **L**aboratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbench rövidítéséből ered. LabVIEW környezetben egy úgynevezett virtuális műszer (**Virtual Instrument, VI**) megvalósítására van lehetőség grafikus programozási környezetben, de természetesen általános célú programok fejlesztésére is felhasználható [50].

A grafikus programozási környezet annyit jelent, hogy a programozás során nem szöveges kód készül, hanem különböző függvényeket/utasításokat reprezentáló elemek összekapcsolásával épül fel a program. LabVIEW környezetben folyamatvezérelt, adatfolyam elvű programozásra van lehetőség, a program végrehajtási sorrendjét az utasítások kapcsolódási rendszere határozza meg.

Ezekkel a virtuális eszközökkel olyan mérési rendszerek építhetők fel, amelyek megfelelnek a felhasználói igényeknek, ellentétben a hagyományos, a gyártó által definiált, rögzített funkciójú eszközökkel.

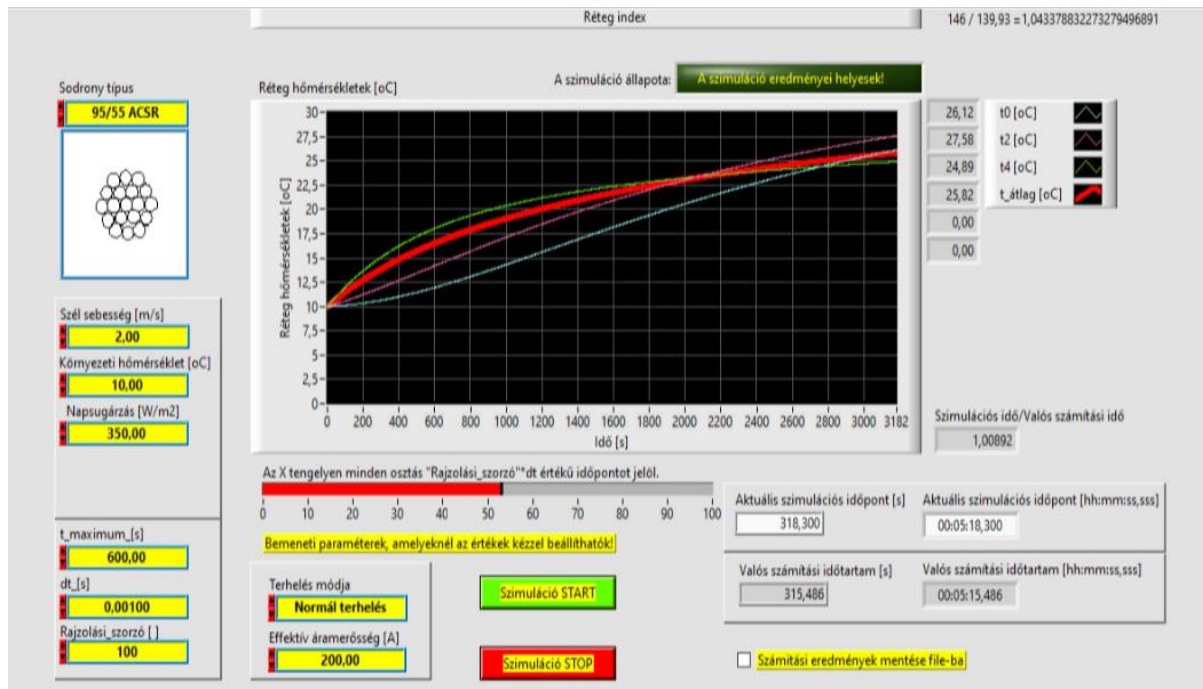
A számítógép képernyőjén létrehozott grafikus felhasználói felület segítségével:

- működtethető a virtuális műszer program
- vezérelhető a kiválasztott hardver
- elemezhetőek a kapott adatok
- megjeleníthetőek az eredmények

A Front Panelt testre szabhatjuk gombokkal, tárcsákkal és grafikonokkal a hagyományos eszközök vezérlőpultjainak emulálására, egyedi tesztpanelek létrehozására vagy a folyamatok vezérlésének és működésének vizuális megjelenítésére.

A LabVIEW-ban – mint már említettem - a programokat „virtuális műszernek” (Virtual Instrument), vagyis VI-nek nevezik. Ha megnyitunk egy .vi kiterjesztésű VI fájlt a LabVIEW-val, akkor megjelenik a virtuális műszer előlapja (Front Panel).

Az 50. ábra példaként egy sodronymelegedés vizsgálatára létrehozott virtuális műszer Front Paneljét, a 51. ábra pedig a Blokkdiagramjának részletét mutatja [51].

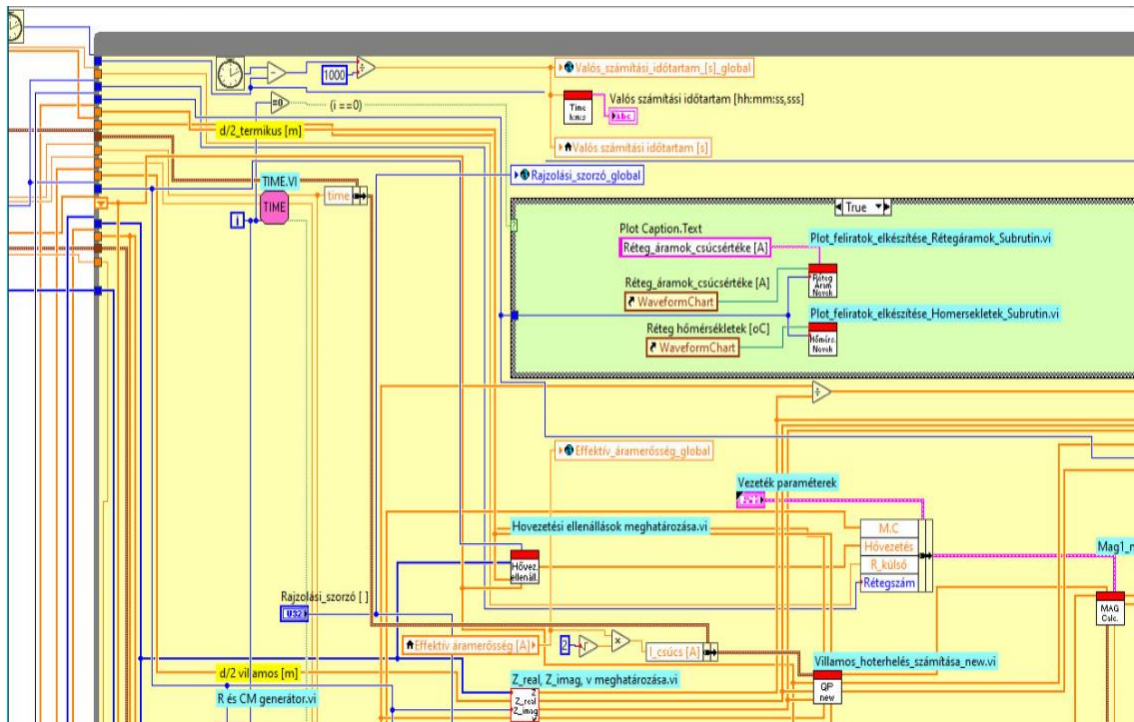


50. ábra. Front Panel (részlet)

A LabVIEW terminológiájában a bemenetet vezérlőnek (Control) nevezik, a kimenetet megjelenítőnek (Indicator). Ezen kívül vannak még konstansok (Constant), melyek értéke értelemszerűen nem változik a futás közben.

Blokkdiagram

A bemeneti és kimeneti egységek (vezérlő és megjelenítő blokkok; Control, Indicator) valamint a köztük kapcsolatot teremtő funkcionális egységek a blokkdiagramon össze vannak „huzalozva”. A huzalozás jelenti a végrehajtás menetét, lényegében a programot. Minden bemeneti és kimeneti egységnek kétféle megjelenési formája van: a Front Panelen látható és a Block Diagrammon látható forma.



51. ábra. Blokkdiagram (részlet)

Adatfolyam-programozás

Minden egyes vezérlőtől (a bemenetektől) a huzalok vagy vonalak mentén egy-egy adatút alakul ki a megjelenítőig (kimenetelig). A blokkdiagram (program) végrehajtását az adatfolyam határozza meg. Egy adott funkcionális egység akkor végzi el a feladatot, ha az összes bemenetén rendelkezésre állnak az adatok. A funkcionális egység a végrehajtás után az összes kimenetére kiadja a megfelelő adatot.

6.3. Végeselemes analízis

A jegesedési problémák, ezen belül a sodronyok melegítésével történő jégolvasztásának számítógépes szimulációjával kapcsolatos vizsgálatokat végeselemes módszerrel végeztem.

A végeselemes módszer (VEM) elvi alapjait számos szakkönyv és egyetemi jegyzet tárgyalja, ennek a témának a részletes bemutatása túlmutat ezen dolgozat terjedelmén.

Az ilyen témájú szakkönyvek (pl. O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor: *Finite Element Method, 6th Edition, Elsevier Butterworth-Heinemann 2005*) mellett az egyetemi jegyzetek is könnyen hozzáférhetők, ez utóbbiak már az interneten is: pl.

- https://www.mm.bme.hu/~gyebro/files/vem/kovacs-szekrenyes_vegeselem_modszer.pdf
- [Páczelt István, Szabó Tamás, Baksa Attila: A végeselem-módszer alapjai.](#)
- https://www.matektanarok.hu/media/oktatasi_anyagok/a_vegeselem_modszer_alapjai_forberger_voros-bme.pdf

- [Bojtár Imre – Gáspár Zsolt: A végeelem módszer matematikai alapjai. BME Tartószerkezetek Mechanikája Tanszék Budapest, 2009.](#)

A VEM számításoknál szinte az összes napjainkban hozzáférhető professzionális kereskedelmi szoftver (ABAQUS, ADINA, COMSOL, MARC, NASTRAN, LS-DYNA, FEAP, COSMOS, ALGOR, ANSYS, stb.) mellett találkozhatunk olyan CAD - Computer Aided Design programokkal, amelyek már tartalmaznak végeelemes modult (pl. [CATIA V5](#), [Autodesk Inventor Professional](#), [SolidWorks, Pro/Engineer](#), stb.), de esetenként egy-egy kutatócsoport sajátfejlesztésű célszoftvert is használ egy adott célra.

A kapcsolt feladatok (hőtani, villamosságtani, áramlástan, szilárdságtani stb.) megoldására szolgáló programokrendszerek lehetnek alkalmasak a távvezetéki sodronyok jégolvasztásának számítógépes szimulációjára.

Kutatásaimban a villamos és hőtani modell bonyolultsága, a nagy számítási kapacitásigényű vizsgálatok (összetett geometriai modelleknél a pontosság miatt megkövetelt finomított háló, az anyagtörvények stb.) miatt az ANSYS 2020 R2 végeelemes szoftvert használtam [52, 53].

Ismeretes, hogy egy és ugyanazon valóságos sodronyszerkezethez – különféle elhanyagolásokkal – különféle számítási modelleket rendelhetünk hozzá annak függvényében, hogy a valóságos szerkezetben lejátszódó folyamatok melyik oldala érdekes számunkra, azt milyen pontossággal szeretnénk elérni.

A számítási modell megalkotását két, ellentétes kívánalom teljesítése befolyásolja:

- a modell minél jobban helyettesítse a valóságos testet és annak körülményeit;
- a fizikai jellemzők lehetőleg kevés időráfordítással jó közelítéssel meghatározhatók legyenek.

A modellezés során nagyon sok mindent kell mérlegelni: a környezeti hatásokat (a hőhatás térbeli megoszlását, időbeli lefolyását, időjárási hatásokat), a testek kölcsönhatását (az érintkezést, a szilárdtest és folyadék által alkotott rendszerek együttes vizsgálatának lehetőségét), az anyag szerkezetét, (anyagegyenleteteket, homogénitást, izotropitást), a kialakuló alakváltozást stb.

Az eredeti probléma bonyolultságától függően előfordulhat, hogy a matematikai megformálás egyszerűsítésére kerül sor. Ekkor a valóság helyett egy idealizált - már hibákat hordozó modellt állítunk elő. A matematikai kezdeti-peremértékfeladat számítógépes megoldása, további, ún. számítási hibát okoz, amit röviden diszkretizálási hibának szokás nevezni.

Az elvégzett kísérletek és a számítási-szimulációs-eredmények összevetése világossá teszi a számítási kritériumok és az egész modell megalapozottságát, illetve a pontosítások szükségességét. Ez utóbbi esetben újabb számításokkal élve juthatunk el a kívánt pontosságú modellhez.

7. SZÁMÍTÓGÉPES VIZSGÁLATOK, NUMERIKUS ANALÍZIS

7.1. Zérus sorrendű áram indukciójának szimulációja védővezetőn

A számítógépes szimulációt az EMTP programrendszer segítségével végeztem, amelynek rövid ismertetése a 6.1. fejezetben található. Az EMTP olyan univerzális programrendszer, amelyet az elektromágneses és az elektromechanikus jellegű transziens jelenségek digitális szimulációjára fejlesztettek ki. Ezzel a digitális programmal összetett hálózatok szimulálhatók.

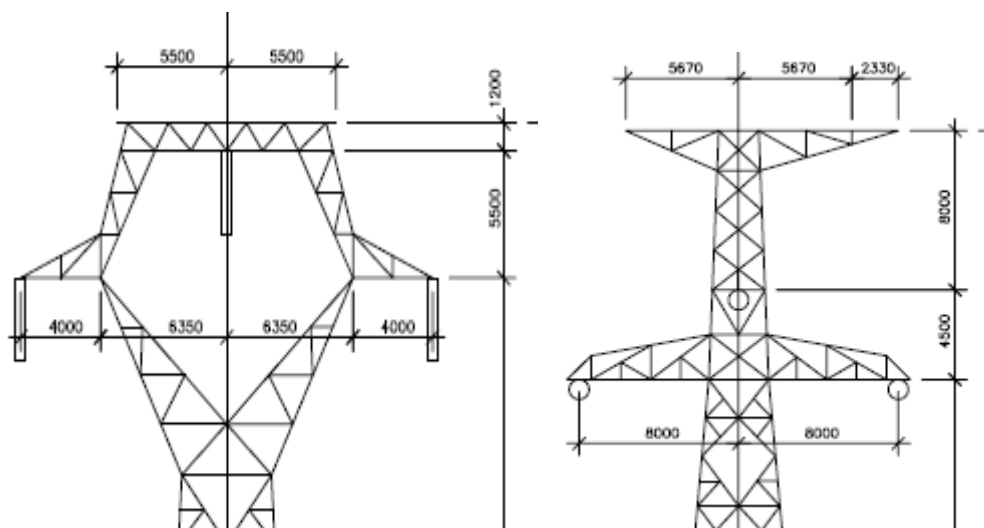
A futtatásokhoz a BME Villamosmérnöki és Informatikai Kar [Villamos Energetika Tanszék](#) biztosított technikai háttérrel.

7.1.1 A ZSCiGW modell kialakítása:

Egy olyan távvezetési modellt (Zero Sequence Component in Ground Wire) alakítottam ki, amely alapját képezheti az 4.1. pontban ismertetett egyrendszerű kötegvezetős THE – Sajószöged 400 kV-os távvezeték EMTP programrendszerrel történő vizsgálatának [43, 44]. Az ezen a valóságos távvezetéken mért - védővezetőbe indukálódó - áram nagyságát összevetve a szimulációs eredményekkel, ellenőrizhető a modell jósága és értékelhetőek lesznek az eredmények.

A felvett modellben a távvezeték hossza 11.072 m, a fázisvezető sodrony $3 \times 2 \times 500/65 \text{ mm}^2$, ACSR, a védővezető sodrony $2 \times 95/55 \text{ mm}^2$, ACSR.

A távvezeték a 400 kV-os Generátor oszlopcsalád⁴ különböző magassítású OT és OSF (OVSF) oszlopaival építették meg. A jellemző oszlop felsőrészeket és a főbb méreteket az alábbi ábra mutatja (52. ábra).



52. ábra. Generátor OT+0 és Generátor OVSF+0 oszlopok felső része

⁴ A 400 kV-os Generátor oszlopcsalád nem tévesztendő össze a kétrendszerű 220 kV-os Generátor oszlopcsaláddal

Ebben a modellben az oszlopfejeket egyformának tételeztem fel, a tartóoszlop geometriájával közelítve azt. A vezetőmagasságok x-y koordinátáit a 10. táblázatban foglaltam össze.

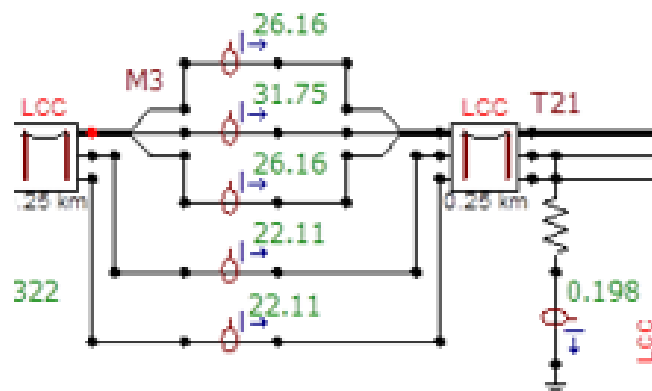
Model Data Nodes										
#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.65	1.553	0.057	-7.5	30.3	12	40	0	2
2	2	0.65	1.553	0.057	0	35.3	17	40	0	2
3	3	0.65	1.553	0.057	7.5	30.3	12	40	0	2
4	4	0.58	0.8	0.304	-4	38	21	0	0	0
5	5	0.58	0.8	0.304	4	38	21	0	0	0

10. táblázat. A sodronyok magassági koordinátái

A távvezetési modellben az oszlopköz távolságokat egyformára, átlagos értékűre vettem (430 m), kivéve a 4.1. fejezetben definiált mérési helyeknél (M1, M2, M3), ahol 500m oszlopközzel, illetve az oszlopköz közepén történő vizsgálattal számoltam.

A modellezésnél a 2 fő-transzformátor segédüzemi 400 V-os elosztószekrénye mögötti hálózat esetén egy 21/0,42 kV-os 400 kVA-es transzformátort tételeztem fel, amit egy 5 km-es 20 kV-os vezetékről táplálnak egy közeli 120/20 kV-os állomásból.

A modell egy részletét, a mérésre is kiválasztott 21. – 22. sz oszlopközt az alábbi ábra mutatja (53. ábra).



53. ábra. A távvezetési modell egy részlete

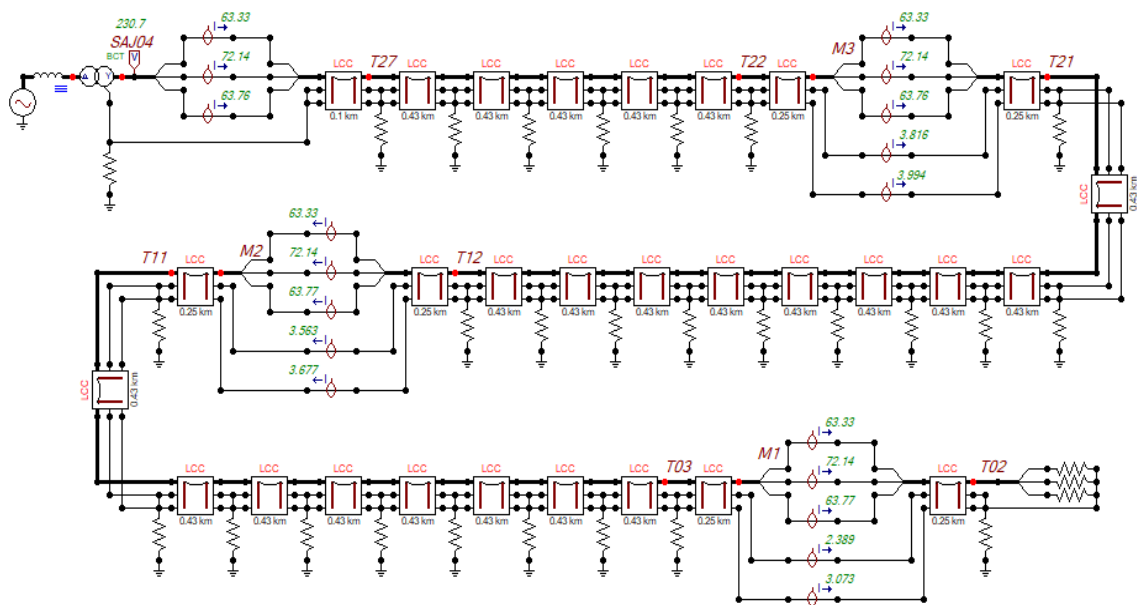
A távvezeték vizsgálatánál a LINE CONSTANTS, CABLE CONSTANTS és CABLE PARAMETERS modulok segítségével építtem fel a modellt.

A modellalkotásnál az előzőekben ismertetett hálózati jellemzőket vettem figyelembe, csupán annyi eltérést tettem, hogy a kettős kötegű fázisvezető sodronyokat helyettesítettem egy, a kettős köteget alkotó sodronynak megfelelő keresztmetszetű vezetővel.

7.1.2. Pozitív sorrendű áram indukciójának szimulációja védővezetőn

Első lépésként a 4.1. fejezetben ismertetett mérés (A fázisvezető kötegek árameloszlásának mérése a Tiszai Hőerőmű – Sajószöged 400 kV-os távvezetéken) eredményeinek felhasználásával ellenőriztem a modell jóságát. A modellezésnél figyelembe vettem a mérésnél tapasztalt földelési problémát (a 2.sz. oszlopon lévő fázisvezetőket az oszlop testéhez kötötték fémesen, de a kontaktusnál nagy volt az átmeneti ellenállás), de a T02 oszlophoz ideális rövidzárlatot feltételeztem.

Ez a mérés pozitív sorrendű megtáplálással történt, ezért a modellt is így építtem fel (54. ábra).



54. ábra. A távvezeték pozitív sorrendű modellje

A szimuláció során az egyes fázisvezetőkben folyó áramértékek a kijelölt helyeken mért értékekkel nagyon jó egyezést mutattak. Az eltérés kevesebb, mint 1%.

Megállapítható tehát, a szimulációs modell alkalmas a vizsgálatokra.

A szimuláció során a pozitív sorrendű megtáplálással a védővezetőben indukálódó áramokat is meghatároztam. Az 54. ábrán (az alul található) zöld színnel jelölve, az egyes mérési helyeken a védővezetőkben indukált áramok:

- a 02. – 03. oszlopközben 2,389 A és 3,073 A,
- a 11. – 12. oszlopközben 3,563 A és 3,677 A,
- a 21. – 22. oszlopközben 3,816 A és 3,994 A.

A kapott eredmények jól jellemzik a vizsgált valóságos hálózat sajátosságait. Általánosságban elmondható, hogy a Tiszai Hőerőmű – Sajószöged 400 kV-os távvezeték védővezetőiben pozitív sorrendű megtáplálás esetén a fázisvezetőkben folyó áram mintegy 5%-a keletkezik [54].

A kapott eredményeket analitikus számítással is ellenőriztem.

A számítások elméleti háttérét és a számítások eredményeit az M1 melléklet részletesen tartalmazza.

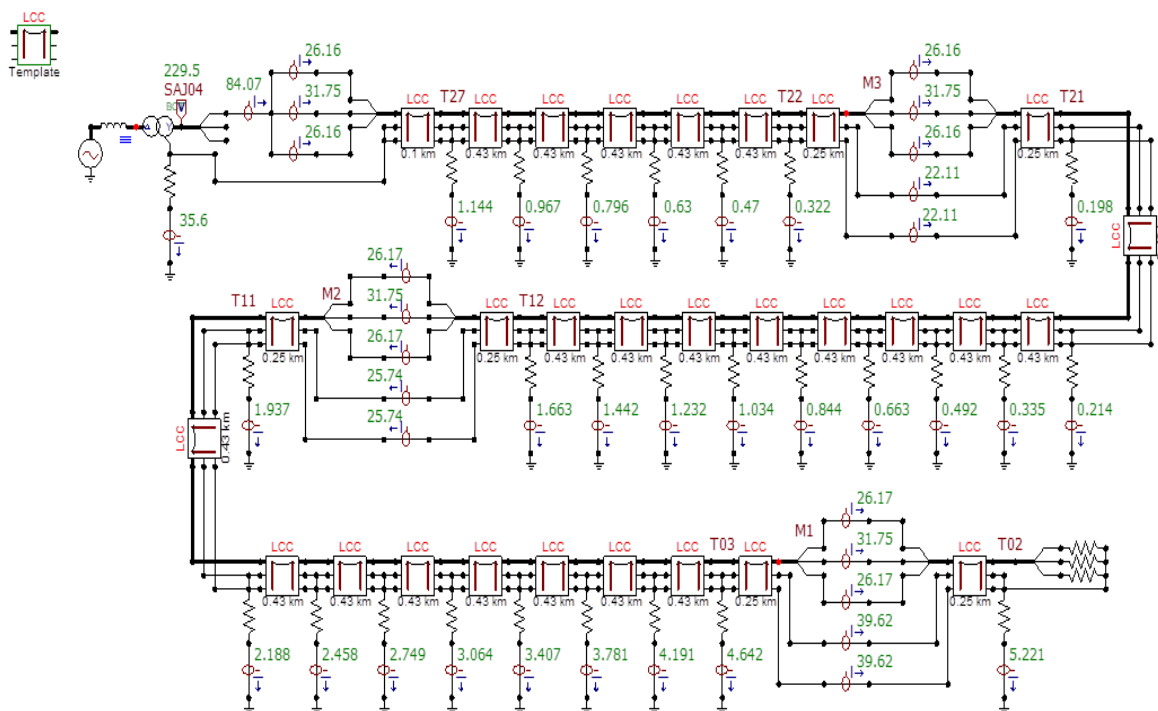
A számítások szerint az egyes védővezetőben indukált feszültség által áthajtott áram nagysága $I_{V(ABS)} = 4.334 \text{ A}$.

Az analitikus számítások — amelynek során több az alapadatok bizonytalansága mellett elhanyagolást és egyszerűsítést kellett tenni az analitikus megoldhatóság érdekében — és a szimuláció közötti eltérés átlagosan 12,6%. Ez is azt igazolja, hogy a modell jól alkalmazható a szimulációs vizsgálatokra.

A védővezetőben a zérus sorrendű gerjesztés keltette indukció szimulációja

A zérus sorrendű áram indukciójának szimulációjához a távvezeték teljes modelljét az 55. ábra mutatja. A modellen természetesen figyelembe vettem a zérus sorrendű betáplálás sajátosságait. A betáplálás fázisonként a mérésnél megfigyelt arányoknak megfelelő volt.

A futtatási eredményeket, az egyes vezetőkben folyó áramok értékét zöld szín jelöli.



55. ábra. A távvezeték zérus sorrendű modellje

A zérus sorrendű modell mutatja a védővezető és a föld közötti folyamatosan változó, áramarányt is. A záratképzés helyén - a 2.sz. oszlop közelében mesterségesen kialakított „hibahelynél” - az áram nagyrésze a védővezetőkben folyik vissza a táppont felé, majd a védővezetők árama a 20-21. oszlopig folyamatosan csökken, utána kismértékben ismét nő, az állomási véghatás miatt.

A 21-22. oszlopközben végzett vizsgálatból a „k tényező” (a földben és a védővezetőben folyó $3I_0$ áram arány) jól becsülhető.

A szimuláció során a zérus sorrendű megtáplálással is meghatároztam a védővezetőben folyó áramot. Az 55. ábrán zöld színnel jelölve, az egyes mérési helyeken a védővezetőkben az áramok:

- a 02. – 03. oszlopközben 39,62 A
- a 11. – 12. oszlopközben 25,74 A,
- a 21. – 22. oszlopközben 22,11 A.

A kapott eredmények jól jellemzik a vizsgált valóságos hálózat sajátosságait. Általánosságban elmondható, hogy a Tiszai Hőerőmű – Sajószöged 400 kV-os távvezeték fázisvezetőinek zérus sorrendű megtáplálása esetén a fázisvezetőkben folyó áram mintegy 60%-a védővezetőben folyik [43, 44].

A kapott eredményeket analitikus számítással is ellenőriztem.

A számítások elméleti háttérét és a számítások eredményeit az M1 melléklet részletesen tartalmazza.

A számítások szerint az egyes védővezetőben folyó áram nagysága $I_{V(ABS)} = 22,643 \text{ A}$

Az analitikus számítások - amelynek során több elhanyagolást és egyszerűsítést kellett tenni az analitikus megoldhatóság érdekében - és a szimuláció közötti eltérés átlagosan 5,8%. Ez is azt igazolja, hogy a modell jól alkalmazható a szimulációs vizsgálatokra.

7.2. A védővezető villamos és hőtechnikai modellje, hőegyensúly számítása, hőmérséklet eloszlás a keresztmetszet mentén

A sodronyok hőegyensúlyának számítására, a keresztmetszet mentén a hőmérséklet eloszlásának vizsgálatára szolgáló szimulációs programot a LabVIEW programrendszerben készítettem el. A programrendszert a 6.2. fejezetben mutattam be.

A szimulációs modell létrehozása

Olyan TDN_W (Transmission and Distribution Network Warming algorithm) modell kialakítására törekedtem, amely a lehetőségek szerint minden olyan tényezőt számításba vesz, amely a melegedési folyamatot befolyásolhatja.

A kialakított számítógépes modell a sodronyt két megközelítésben is tárgyalja. Ennek során megalkottam a sodronyok villamos, illetve a hőtani viselkedését leíró villamos és hőtani modellt [55, 56].

A sodronyok villamos modellje

A sodrony villamos modellje - összhangban a védővezetők sodrott szerkezetével – réteges felépítésű, hengersizmetrikus elrendezésű modell. Minden réteghez hozzárendelhető egy-egy hőáram-generátor, ennek megfelelően minden villamos eredetű melegedést is rétegenként kell meghatározni.

A hőfejlődés számítása

Az egyes rétegekben fejlődő hő meghatározásához az adott rétegben folyó áramot, illetve az ellenállást kell kiszámítani. Az egyes rétegeket alkotó sodronyok ellenállásának számításakor az MSZ 149/1 szabványban megadott ρ fajlagos ellenállásértékekből indultam ki.

Az i. réteg egyenáramú ellenállása:

$$R_i = \rho_i \cdot \frac{l_i}{A_i} \quad (32)$$

ahol

ρ_i a vezeték fajlagos ellenállása

A_i vezeték keresztmetszete => $A_i = \pi \cdot r_i^2$

l_i egységnyi hosszúságú vezeték.

Ebből meg kell határozni a váltakozó áramú R_i ellenállást.

A hőfejlődést, a villamos teljesítményt az alábbiak szerint kapjuk:

$$P_i = I_i^2 R_i \quad (33)$$

Váltakozó áramú ellenállás

A skin-hatás miatt a sodronynak nem a teljes keresztmetszete vesz részt az áramvezetésben, „összeszűkül” a hasznos keresztmetszet, ezzel a váltakozó áramú ellenállás R_{AC} értéke megnő az egyenáramon mért ellenálláshoz képest.

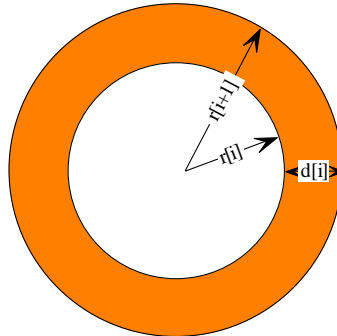
A δ szkin-mélység értéke alumíniumra 12,03 mm, trafólemezsre ($\mu=500$) 1,01 mm, a kisebb ($\mu \approx 252$) relatív permeabilitású acél elemi szátra 2,26 mm, ha a frekvencia 50 Hz.

Az egyes rétegek gyűrűs hengerrel közelíthetők, ahol a henger d falvastagsága azonos az elemi szál átmérőjével, a mag esetében a falvastagság azonos az elemi szál sugarával.

Egy $r[i+1]$ külső sugarú d vastagságú henger falának relatív vastagsága (v) (56. ábra)

$$v = \frac{d[i]}{r[i+1]}$$

(34)



56. ábra. A henger falának relatív vastagsága

Az i . réteg R_{0i} egyenáramú ellenállását meghatározva a váltakozó áramú impedancia elemei:

$$Z = Z_{real} + j \cdot Z_{imag}$$

(35)

ahol

Z_{real} a váltakozó áramú impedancia valós része (ohmos)

Z_{imag} az induktív reaktancia ($j \cdot \omega \cdot L$)

$$Z_{real\ i} = R_{0i} v \left[\frac{\text{sh}(2v) + \sin(2v)}{\text{ch}(2v) - \cos(2v)} + \frac{d}{2r} \right]$$

(36)

$$Z_{imag\ i} = R_{0i} v \left[\frac{\text{sh}(2v) - \sin(2v)}{\text{ch}(2v) - \cos(2v)} \right]$$

(37)

Az acél maghuzal Z_{real0} váltakozó áramú ellenállása számítható az előző esetből $d=r$ helyettesítéssel

Árameloszlás számítása

A sodrongyártók által szolgáltatott adatok alapján elmondható, hogy az áram eloszlása acél-alumínium (St-Al) között kb. 99-1 % a vastagabb sodronyok esetén, míg 98-2 % a vékonyabb sodronyoknál az Al javára.

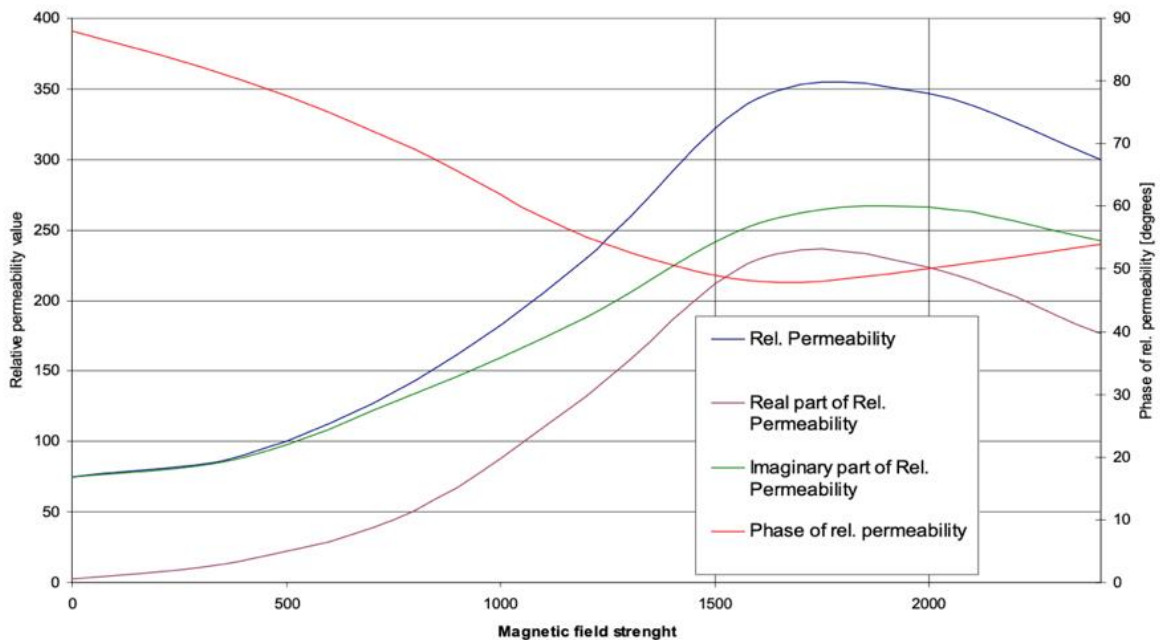
Az árameloszláshoz a hengeres modellben két réteget vehetünk számításba: acél, illetve alumínium (a modellezés során az acélszálaknál az esetleges horganyozást elhanyagoljuk), mivel viszonylag egyszerű módon a két réteg közötti eloszlás fejezhető ki. Először e két rétegben határozzuk meg az áramokat, majd ezeket tovább bontjuk a szkin-hatást is figyelembe véve.

A szkin-mélységek:

$$\delta_{St}=2,26 \text{ mm}$$

$$\delta_{Al}=12,03 \text{ mm}$$

A számításoknál figyelembe kell venni, hogy a $\mu = \mu_0 \cdot \mu_R$ permeabilitás nem állandó, hanem a gerjesztés mértékétől függően változik a relatív permeabilitás. Az acél mag-sodratra a $\mu_R(H)$ kapcsolatot jellegét az alábbi. ábra mutatja (57. ábra).



57. ábra. Az acél-mag-sodrat permeabilitása a mágneses térerősség függvényében [57]

A számításoknál töréspontos közelítéssel, iterációval vehetjük figyelembe:

$$\mu_R = -10^{-7} \cdot X^3 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot X^2 - 0,1084 \cdot X + 78,19$$

$$\varphi = 7 \cdot 10^{-9} \cdot X^3 - 2 \cdot 10^{-5} \cdot X^2 - 0,0174 \cdot X + 88,467$$

$$\mu_{R_real} = -9 \cdot 10^{-8} \cdot X^3 + 3 \cdot 10^{-4} \cdot X^2 - 0,1105 \cdot X + 6,2951$$

$$\mu_{R_imag} = -6 \cdot 10^{-8} \cdot X^3 + 2 \cdot 10^{-4} \cdot X^2 - 0,0351 \cdot X + 75,644$$

A váltakozó áramú ellenállás (R_{AC}) áramfüggő és emiatt a R_{AC}/R_{DC} is áramfüggő lesz. Komplex számként kell kezelni.

A továbbiakban az alábbi értékekkel számolunk:

A szkin-mélységek:

$$\delta_{St}=2,26 \text{ mm}$$

$$\delta_{Al}=12,03 \text{ mm}$$

A relatív permeabilitások

$$\mu_{St}=252$$

$$\mu_{Al}=1$$

Ekkor

$$\alpha = \sqrt{\frac{m_{St} \cdot \rho_{St}}{m_{Al} \cdot \rho_{Al}}} \quad (38)$$

ahol

m_{St} az acél réteg tömege

m_{Al} az alumínium réteg tömege

ρ_{St} az acél vezeték fajlagos ellenállása

ρ_{Al} az alumínium vezeték fajlagos ellenállása

$$v = \frac{d_{Al}}{\delta_{Al}} \quad (39)$$

ahol

d_{Al} az alumínium réteg vastagsága [mm]

δ_{Al} az alumínium réteg szkin-mélysége [mm]

így az acél rétegek árama az összáramhoz képest:

$$\frac{I_{St}}{I} = \frac{1}{(\text{ch}(v) + \alpha \cdot \text{sh}(v))\cos(v) + j(\text{sh}(v) + \alpha \cdot \text{ch}(v))\sin(v)} \quad (40)$$

Az alumínium rétegek árama:

$$I_{Al} = I - I_{St} \quad (41)$$

Ez komplex számmal való számítást követel meg, ahol viszont a végeredménynek az abszolút értéke és fázisszöge, illetve valós és képzetes része is szükséges.

Kimutathatóan más az áram fázishelyzete az alumíniumban, illetve az acélban.

Megjegyzendő, hogy az áramosztás fenti összefüggése eredetileg kétrétegű feltételre lett meghatározva. A hengerre vonatkozóan ennél jóval bonyolultabb, Bessel-függvényes megoldás adna pontosabb értéket. A közelítéssel elkövetett hiba az alumíniumra nem jelentős, a középpont környékén, tehát az acél maghuzal esetében nagyobb, kb. 10- 20 %, de szerencsére a szkin-hatás és az anyagjellemzők miatt itt csak kis áramok folynak, ezért ez a közelítés elfogadható.

A modell továbbá nem veszi figyelembe, hogy a d vastagságú koncentrikus hengerek nem tömörök, hanem kör keresztmetszetű elemi szálakból épülnek fel. Ez utóbbi tény csak az egyen- illetve az ebből származtatott váltakozó áramú ellenállásnál tudom a programrendszerben figyelembe venni.

Az acélon, illetve alumíniumon belül már nem jelentős a fáziseltolás, ezért közvetlenül az abszolút értékekkel számolhatjuk az áramosztást. A J áramsűrűség a felületi J_0 értékhez képest z mélységben:

$$J(Z) = J_0 \cdot e^{-Z/\delta} \quad (42)$$

ahol

δ a szkin-mélység az adott anyagra és frekvenciára

A fenti összefüggéssel, iterációval meghatározható a rétegenkénti áram, külön az acélrétegekre és külön az alumíniumon belül.

Miután minden i . rétegre kiszámoltuk a komplex számmal jellemzett áramot, annak abszolút értékét véve a rétegenkénti hőteljesítmény:

$$P = |I_i|^2 \cdot R_i \quad (43)$$

vagy pontosabban pillanatértékkel:

$$P = i_i^2(t) \cdot R_i(t) \quad (44)$$

Az $R_i(t)$ időfüggvényénél figyelembe kell venni, hogy az idő függvényében változó hőmérséklettel az ellenállás is változik az ismert összefüggéssel

$$R_i = R_{20i} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\tau) \quad (45)$$

ahol

R_{20i}	a 20 °C-on mért egyenáramú ellenállás
α	az ellenállás anyagfüggő hőfoktényezője
$\Delta\tau$	a hőmérséklet változása 20 °C-hoz képest

Örvényáram és hiszterézis veszteség

Az ohmos ellenálláson fejlődő hő mellett az acélmagban a keletkező örvényáramok is hőt fejlesztenek. Hasonlóan hőfejlődéssel jár az acélban a váltakozó áram periódusával történő átmágneseződés is.

Örvényáram veszteség

Az örvényáramoknál a modellt célszerű úgy felépíteni, hogy az acél maghuzalra csak az 1. réteg (acél) áramát vesszük figyelembe, az 1. acélrétegnél pedig csak a körülötte lévő összes alumínium réteget együtt. Ez azért tehető meg, mert az egyes acélrétegek egymást viszonylag jól árnyékolják. Az örvényáram veszteséget csak az acél esetében vesszük figyelembe, mert az alumínium esetében az 2-3 nagyságrenddel kisebb, mint az acél esetén, a hiszterézis veszteség pedig a diamágneses alumínium esetében gyakorlatilag nem létezik.

Az örvényáram veszteség r sugarú acél hengerben térfogategységre számítva:

$$\frac{P}{V} = \frac{n^2 \cdot I_{csúcs}^2}{\delta^2 \cdot \gamma} \frac{1}{\xi^2} f(\xi) \left[\frac{W}{m^3} \right]$$

(46)

ahol

$n = \frac{N}{l}$ a hosszegységre eső menetszám
(sodrasi tényezőtől, ha $l=1$ m akkor $N=n$)

$I_{csúcs}$ az áram csúcserőértéke, a maghuzalra ez a 0. réteg acél árama, a 0. réteg acélra pedig az alumíniumréteg(ek) áramának eredője, tekintettel az egyes acélrétegek egymást árnyékoló hatására

γ a fajlagos vezetőképesség ($=1/\rho$)

$\xi = r/\delta$ paraméter

r a réteg külső sugara

δ skin-mélység

$$f(\xi) = \xi \left(1 - \frac{1}{2\xi} - \frac{1}{16\xi} \right) \quad \text{ha } \xi > 1 \quad (47)$$

$$f(\xi) = \frac{1}{4} \xi^4 \quad \text{ha } \xi < 1 \quad (48)$$

A térfogatot természetesen csak a ténylegesen vizsgált acélréteg tényleges térfogatával kell figyelembe venni.

Az adott rétegben keletkező összes veszteséget a rétegre ható összes elemi szál áramából származó hatás összegzésével kapjuk a következőképpen:

- Az acél maghuzalra l és $n = \frac{N}{l}$ az első acélréteg áramát és menetemelkedését jelenti
- Az 1. acélrétegre egy réteg alumínium esetén l és $n = \frac{N}{l}$ az alumíniumréteg áramát és menetemelkedését jelenti
- Az 1. acélrétegre több réteg alumínium esetén l és $n=N/l$ értelmezése a következő:

$$n \cdot I = n_1 \cdot I_1 - n_2 \cdot I_2 + n_3 \cdot I_3 - \dots + \dots - \dots, \quad (49)$$

mert az egyes rétegek sodrásiránya ellentétes, ezért csökkentik egymás hatását.

Hiszterézis veszteség

A hiszterézis veszteség szintén térfogategységre számítható, az örvényáram-veszteséghez képest az alábbi módon arányosítható:

$$P_h = P_{\delta} \frac{\rho \cdot \eta \cdot v^2 (\text{sh}(v) + \sin(v))}{f \cdot \pi^2 \cdot d^2 (\text{sh}(v) - \sin(v))} [\text{W}] \quad (50)$$

ahol

$$\eta \approx 250 [\text{Am/Vs}]$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

ρ a fajlagos ellenállás [$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$]

d az adott acél réteg vastagsága (nem egyenlő a réteg átmérővel [mm])

δ az acél szkin-mélysége

$$v = \frac{d}{\delta}$$

Az adott rétegben keletkező összes hiszterézis veszteséget a már kiszámolt örvényáram veszteségből és a fenti arányszámból lehet meghatározni.

A sodronyok hőtani modellje

A hőtani modell a villamos modellhez hasonló módon koncentrikus hengerek rendszereként írja le a sodrony viselkedését, azonban eltér attól, mivel a rendszer valamennyi hőtehetetlenséggel rendelkező elemét súlyának megfelelő mértékben figyelembe kell venni, a villamos szempontoktól függetlenül.

Ennek megfelelően a sodrony elemi szálai által közrefogott különböző szabálytalan légréseket a rendszer egy-egy réteg levegőnek a közbeiktatásával veszi figyelembe. Miután az elemi szájakat helyettesítő vezető rétegek (hengerek) hőkapacitásának azonosnak kell lennie az elemi szájak hőkapacitásával, ugyanakkor az elemi szájakból álló réteg a valóságban nem a modellben használt tömör hengerpalást, így szükségszerűen eltérés van a villamos modellben, illetve a hőtani modellben használt rétegvastagságokban. Konkrétan a villamos modell rétegvastagsága, amely a rétegben levő valós elemi szájak átmérőjével egyezik meg, egyenlő a hőtani modellben a vezető réteget helyettesítő henger és az attól a sodrony magja felé eső levegőréteg rétegvastagságának összegével.

A modell az egyes rétegeket paramétereikben homogén eloszlásúnak tekinti, tehát egy rétegen belül nem változik a hőmérséklet a hely függvényében és ezért az egyes rétegekben az anyagjellemzők (fajhő, sűrűség, fajlagos ellenállás stb.) is homogének.

A modellben a rétegek közti hőcsere hővezetéssel történik. Bármely két réteg között a hővezetés az egyes rétegek félvastagságának figyelembevételével kerül meghatározásra. Azaz, mintha a rétegek középvonalai között zajlana le hővezetés a rétegek hőmérsékletei, mint hajtóerő, által megszabott intenzitással.

A két réteg közötti hőáramot a (16.) egyenletből származtatva kaphatjuk meg:

$$\dot{Q}_{i, i+1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot L}{\frac{1}{\lambda_i} \cdot \ln \frac{r_i}{r_{i,k}} + \frac{1}{\lambda_{i+1}} \cdot \ln \frac{r_{i+1,k}}{r_i}} \cdot (t_i - t_{i+1}) \quad (52)$$

ahol

λ_i, λ_{i+1}	az i. és az i+1. réteg hővezetési tényezője,
$r_{i,k}, r_{i+1,k}$	az i. és az i+1. réteg középvonalának sugara
r_i	az i. réteg külső sugara
t_i, t_{i+1}	az i. és az i+1. réteg hőmérséklete

L a vezeték hosszúsága

(A hőtani modellben szereplő r sugarakat a programban $d/2$ termikus szimbólummal jelöltem.)

Egy réteg hőmérsékletváltozását a következő differenciálegyenlet írja le:

$$\sum \dot{Q}_i = c_i \cdot m_i \cdot \frac{d t_i}{d\tau} \quad (53)$$

ahol

$\sum \dot{Q}_i$ az i. rétegek hőáramainak előjeles összege,
 $\frac{d t_i}{d\tau}$ az i. réteg hőmérsékletváltozása
 $c_{i,}$ az i. réteg fajhője
 $m_{i,}$ az i. réteg tömege

Hőforrásként elsődlegesen az ohmos ellenállások hőtermelése, másodlagosan az acélhuzalok vasvesztései, valamint a sodrony felszínén a napsütés és a hőátadás szolgálnak.

Kábelzsír szerepe és eloszlása

A kábelzsír szerepe a korrózió elleni védelem és a megmunkáláskor, csévéléskor keletkező sérülések megelőzése. Hatására az elemi szálak közötti hőátadás megváltozik. A felületi egyenetlenségek miatt mindig meglévő közvetlen fémes érintkezést kiegészíti egy hőálló ipari zsírréteg, ami megnöveli a hőátadás szempontjából érintkező levegő közbeiktatása nélküli felületek nagyságát.

A kábelzsír mennyisége kb. 8 g/m egy 500/65 ACSR sodrony 7 db acélszálára egyenletesen elosztva. Ebből számítható a zsírréteg vastagsága: ~0,09 mm. Emellett az is megállapítható, hogy a zsír hőkapacitását meghatározó $\rho \cdot c$ szorzat kb. 50-60%-a az alumínium és az acél anyagjellemzőinek, így a zsírréteg hőtani szempontból elhanyagolható hőkapacitást jelent. Ugyanakkor mivel kicsi a hővezetési tényezője (a fémekhez viszonyítva 3 nagyságrenddel kisebb), azaz nagy a hőellenállása, gátolja a valóságban pontszerű, ezért elhanyagolható arányban szerepet játszó fém-fém érintkezési pontban kialakuló hővezetést. A modell számára ezeket a pontokat is közelebb hozva a feltételezett fém-levegő-fém hőáramhoz.

Horganyréteg szerepe és vastagsága

A horganyréteg szerepe szintén a korrózióvédelem, éppen ezért csak az acélszálaknál van jelen. A vastagsága számítható az alábbiakból:

2 mm átmérőjű elemi szálig a bevonat	200 g/m ²
2 mm átmérő felett a bevonat	240 g/m ²

Például a kábelzsírál már vizsgált 500/65 ACSR sodrony esetében ez 0,034 mm. Ugyanakkor a hőtani szempontból lényeges anyagjellemzői közel állnak az acélhoz, így nem szükséges külön foglalkozni a horganyréteggel, beleszámítható az acélrétegekbe.

Hőcsere a sodrony felszínén

A sodrony felszínén lejátszódó hőcsere folyamat két részből áll: a sugárzásos és a konvektív hőcseréből. A sugárzásos hőcsere vonatkozóan a modell a [58] rögzített környezeti paraméterekből származó számítási módot használ. Ennek lényege, hogy a különböző méretezési állapotokra és időjárásra megadja ($\frac{W}{m^2}$ -ben kifejezve, 0 - 1000), milyen intenzitású a sodronynak a napsugárzásból származó hőterhelése.

A konvektív hőcsere esetében a modell az egyedül álló henger és a rá merőlegesen áramló levegő közötti hőcsere kapcsán, hasonlóságelméleti alapokon levezetett összefüggéseket alkalmazza. Ennek lényege röviden a következő:

A környezet felé konvektív úton leadott hőmennyiség meghatározása az alábbi összefüggéssel lehetséges

$$\dot{Q} = A \cdot \alpha \cdot (t_f - t_k) \quad (54)$$

ahol

A	a hőleadó felület,
t_f	a felület hőmérséklete
t_k	a környezeti levegő hőmérséklete (alap feltételezés 20 °C)
α	a felületnél lévő fém hőátadási tényezője

Ezen paraméterek közül a hőátadási tényező értéke függ a körül áramlás módjától, a levegő sebességétől és a hőmérsékleti viszonyoktól egyaránt. Ez a függvénykapcsolat nem írható le egzakt módon mérési eredmények felhasználása nélkül, viszont az összes lehetséges esetet lehetetlen kimérni. Ezért van szükség a hasonlóságelmélet alkalmazására, amely alapján:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{L} \quad (55)$$

ahol

- λ a levegő hővezetési tényezője,
- L a jellemző méret, esetünkben a henger külső sugara,
- Nu a Nusselt-szám a hasonlósági kritérium.

A Nusselt féle szám meghatározása a mérések eredményei alapján lehetséges:

$$Nu = B \cdot Re^n \quad (56)$$

ahol

Re Reynolds-szám:

$$Re = \frac{2 \cdot R_{henger} \cdot v_{szél}}{\nu_{levegő}}$$

(57)

- R_{henger} a henger külső átmérője,
- $v_{szél}$ a szélesebesség [m/s],
- $\nu_{levegő}$ a levegő viszkozitása,
- B, n konstansok.

B, n konstansok értékeit a 11. táblázatban foglaltam össze:

Re	n	B
1-4	0,330	0,891
4-40	0,385	0,821
40-4.000	0,466	0,615
4.000-40.000	0,618	0,174
40.000-250.000	0,805	0,0239

11. táblázat

A LabVIEW programrendszerrel végzett számítások

A szimulációs programot a LabVIEW programrendszerben készítettem el. A virtuális műszert úgy terveztem, és "építettem" meg, hogy azok a legjobban közelítsék a valóságot.

A kitűzött feladatot, a sodronyok hőegyensúlyának számítását, a keresztmetszet mentén a hőmérséklet eloszlásának vizsgálatát tehát a LabVIEW-ban kifejlesztett szimulációs keretrendszer alkalmazásával oldottam meg. A 6.2. fejezetben bemutatott keretrendszer azért alkalmas a kitűzött feladat megoldására, mert tetszőleges differenciál-egyenletekkel leírható modell elkészítését, illetve irányítási feladat megoldását lehet megvalósítani. Nem jelent problémát a differenciálegyenlet együtthatóinak idő és paraméterfüggősége, amely azt jelenti, hogy tetszőleges koncentrált, illetve felosztott paraméterű szimulációs modell vizsgálatát lehetővé teszi.

A szimulációs program elkészítéséhez a főbb fejlesztői lépései:

- **A paraméterek meghatározása**

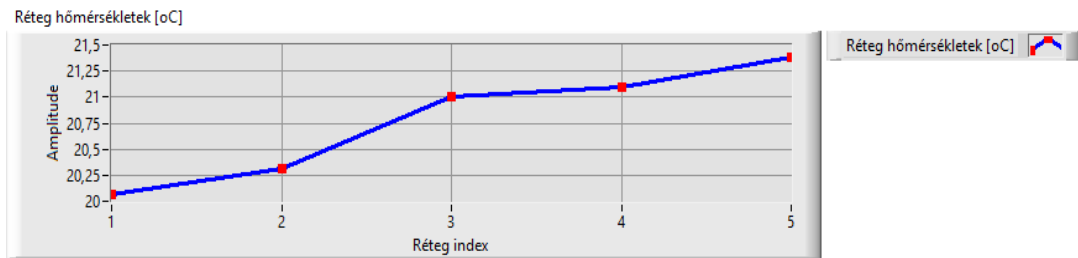
A paraméterek meghatározását C++ Formula Node-ban végeztem. Ugyanakkor a számítások során mivel nagy számú indexes változóval számol a program, amelynek nincs a Formula Node-ban megfelelő helyettesítése, így csak index nélküli változókat képes alkalmazni! Így a számítást végző eljárások (vi.-ok) Front Paneljének változó elnevezéséhez (érthetőbb változónevek alkalmazásához), valamint az eljárások Diagram Paneljén az algoritmus nyomon követhetőségéhez nagy számú kommentet hoztam létre. Hasonlóan nagy gondot fordítottam az egyes jelvezetékek névvel történő jelölésére, hogy nyomkövetés során lehetőség legyen az egyes rész-számítások követésére.

- **Bemenő paraméterek objektumokkal történő megadása.** (User Defined Cable Parameters)

- **Réteg áramok**, egyen és váltakozó áramú ellenállások grafikonon történő **megjelenítése**.

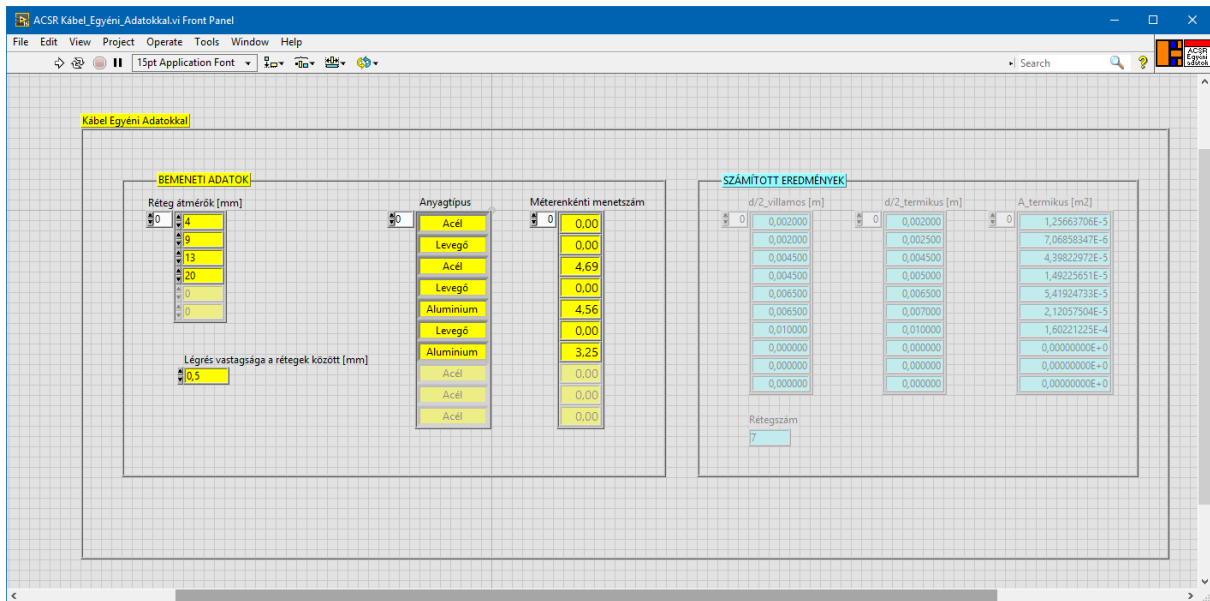
- **Menü létrehozása.** A program működése közben a szimulációval meghatározott paraméterek közül menüből lehet kiválasztani és azonnal megjeleníteni a kívánt paraméter időbeni (rétegenként) / Z_{abs} (rétegenként).

- **Hőmérsékleti grafikon.** Létrehoztam a réteg hőmérsékletek időbeni változását bemutató grafikonot, amely térben mutatja az egyes rétegek hőmérsékletét (58. ábra).



58. ábra. A réteg hőmérsékletek időbeni változását bemutató diagram

- A „**Környezeti paraméterek**” és a „**Vezeték paraméterek**” clusterok (rekord struktúra) segítségével adtam meg az eljárások bemenő paramétereit, így jobban olvashatóvá és tesztelhetővé váltak a clusterben szereplő mennyiségek.
- A szimulációhoz **eljárásokat** dolgoztam ki.
 - Hővezetési ellenállások meghatározása.vi
 - Örvényáram-, és hiszterézis veszteség meghatározása.vi
 - R és CM generátor.vi
 - Szimulációs modell alapadatok file-ba írása.vi
 - Villamos_hőterhelés_számítása.vi
- **Az eredmények tárolása.** Kidolgoztam a szimulációs eredmények adott formátumban történő tárolásának eljárását, hogy az minden lényeges bemeneti paramétert is tartalmazzon.
- **Ellenőrző modul.** A szimulációs eredmények helyességének ellenőrzésére beépítettem a programba a hőmérsékletek változásának (időbeni differenciál értékének) folyamatos figyelemmel kísérését.
- **Sodrony modul.** Létrehoztam egy olyan eljárást, amellyel a tetszőleges sodrony (kábel) topológiát (rétegszám és az egyes rétegek átmérői) valamint a kábel egyes rétegeinek anyagát meg lehet választani a rendelkezésre álló acél és alumínium paraméterekkel. Az eljárás Front Panel-jén a következő adatokat kell megadnunk, mert a többi adatot az eljárás határozza meg: Réteg átmérők [mm], Légrés vastagsága a rétegek között [mm], Anyagtípus, Méterenkénti menetszám. (59. ábra)

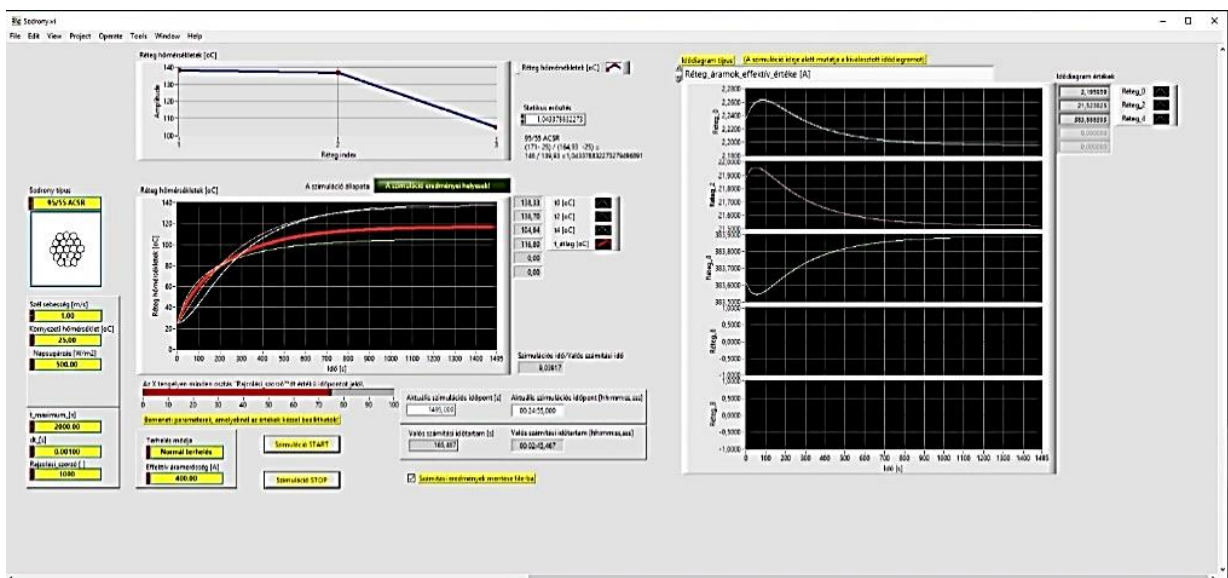


59. ábra. Az „ACSR Kábel Egyéni Adatokkal.vi” Front Panelja

Az alábbiakban bemutatom az így elkészített program **kezelői felületét**:

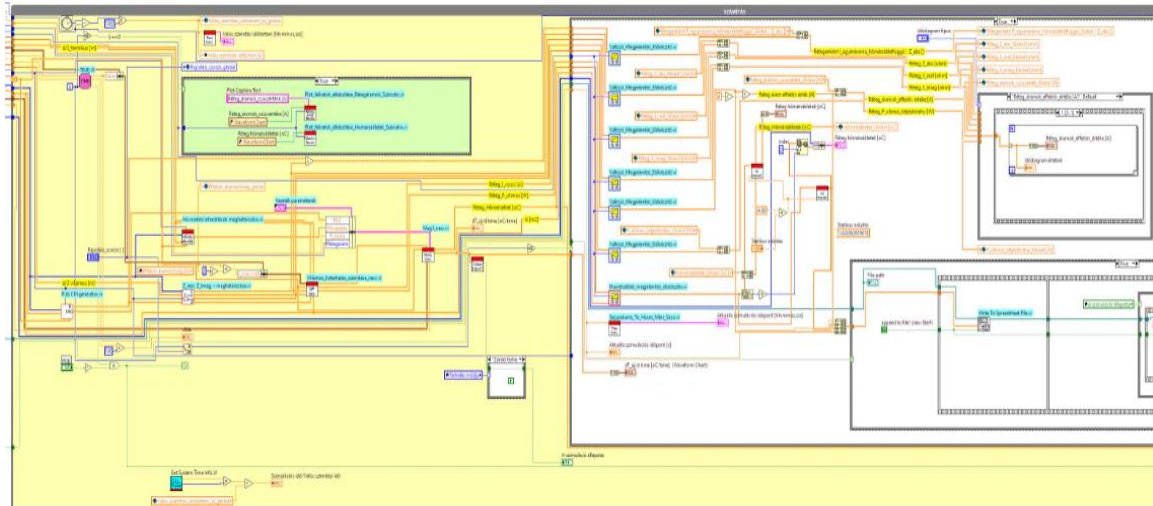
A feladat bonyolultsága miatt a program terjedelmes Front Panel-jét és Diagram Panel-jét csak részletekben tudom bemutatni.

A Front Panel egy részletét az alábbi ábrán mutatom be (60. ábra).



60. ábra. A Front Panel egy részlete

A Blokkdiagram részleteit pedig az alábbi ábra mutatja (61. ábra).



61. ábra. A Blokkdiagram részletei

A számítási eredmények

Többféle sodronytípus és terhelőáram, valamint meteorológiai paraméter mellett vizsgáltam a sodronyok hőegyensúlyát.

A sodronyoknál - egy adott terhelésnél - a hőmérsékletek beállításáig futtattam a programot. A különféle paraméterekkel végzett szimulációk eredményeit nem csak táblázatosan, hanem grafikusan is megadhatjuk [55, 56].

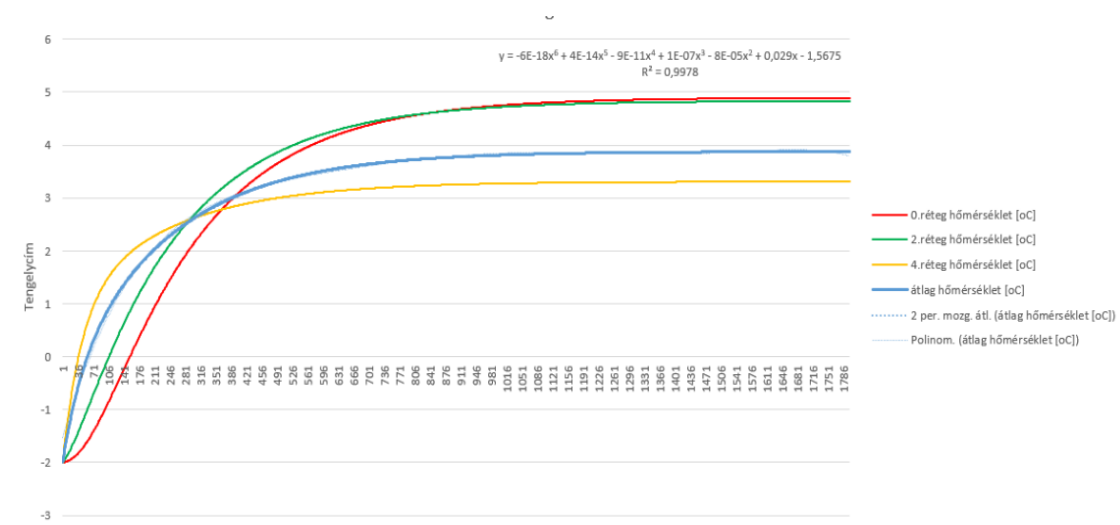
Az ACSR sodronyoknak a keresztmetszet mentén a hőmérséklet eloszlását az egyes rétegek hőmérsékletével jellemezhetjük. Erre mutat példát egy 95/55 mm² ACSR sodrony esetén a 62. ábra. Futtatási paraméterek:

Külső kezdeti hőmérséklet: -2°C

Szélesebbség: 3,5 m/s

Napsugárzás: 350 W/m²

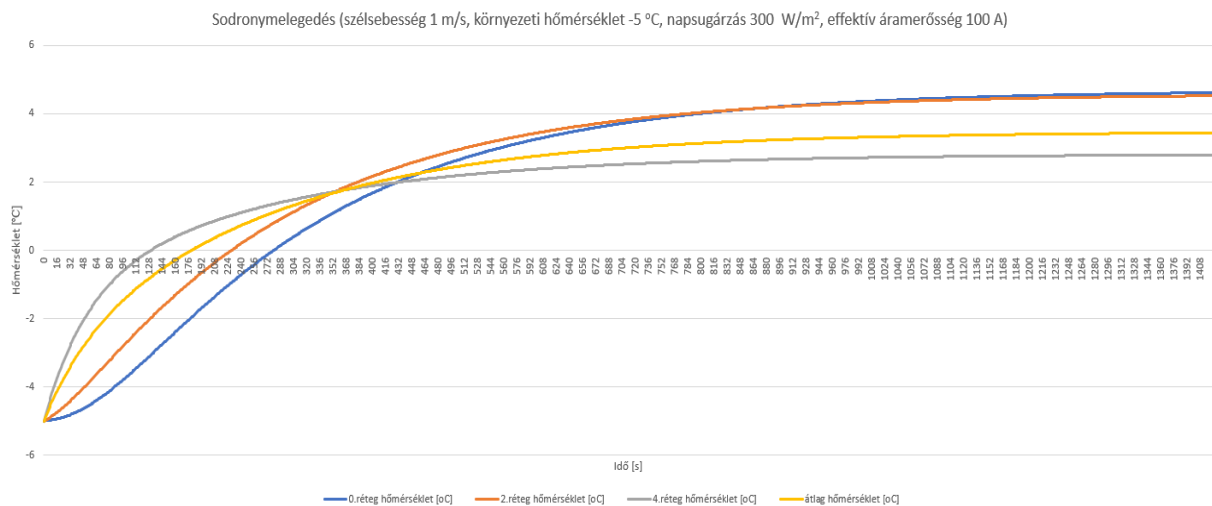
Terhelő áram: 200 A



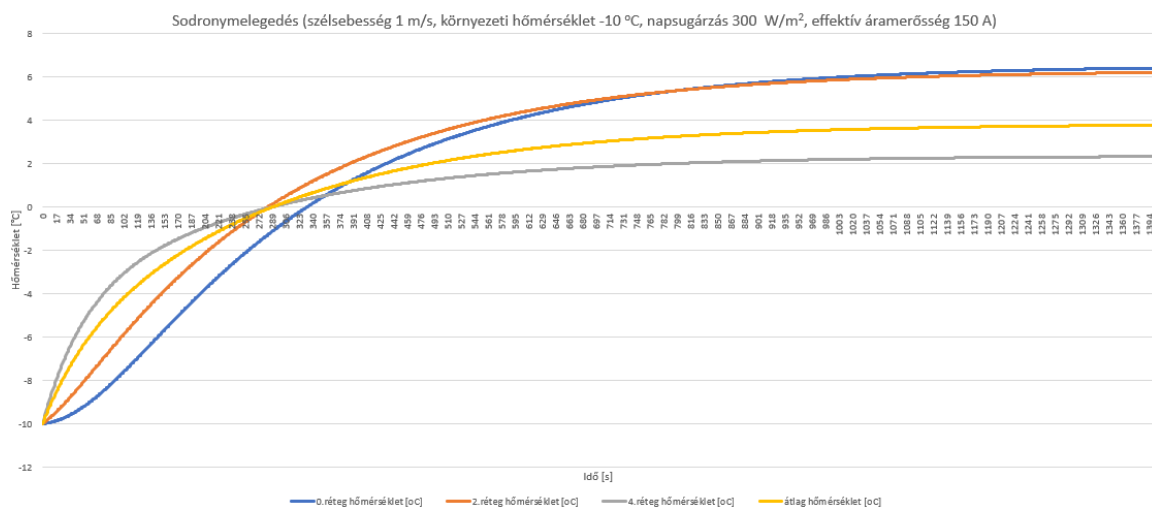
62. ábra. A rétegek hőmérséklete

A rétegek indexe minden modellnél belülről kifelé haladva növekszik és a páratlan számú rétegek a sodratok közötti légréteget jelentik. A sodrony középhőmérsékletét a kék színű görbe mutatja. A görbe egyenletét az ábrán feltüntetett hatod fokú polinommal írhatjuk le.

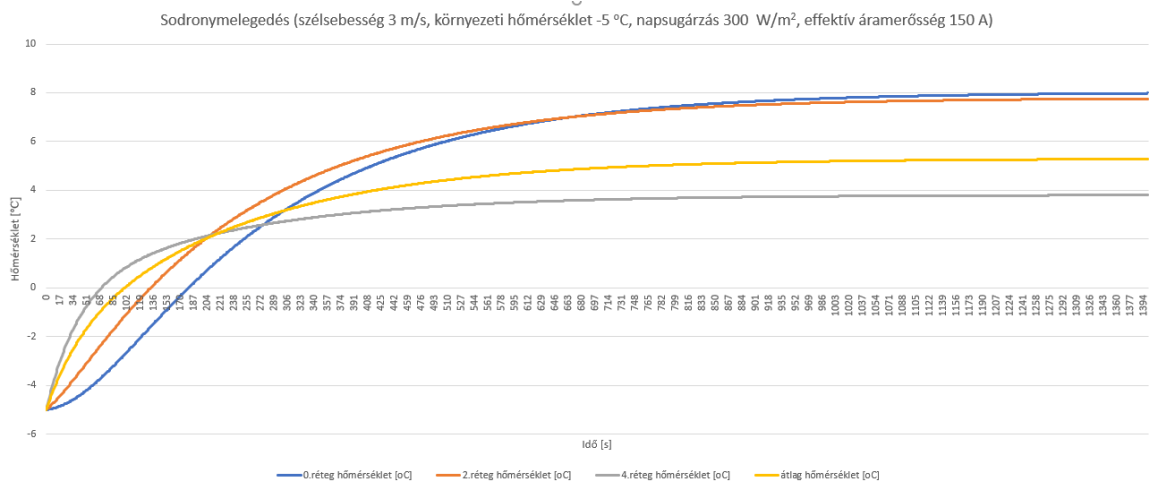
A továbbiakban a jégtelenítéshez alkalmas feltételeket feltételezve vizsgáltam a védővezető sodronyok melegedését különböző meteorológiai és terhelési viszonyok mellett. Ezekből mutatok be jellegzetes eseteket az alábbi ábrákon (63. - 66. ábra).



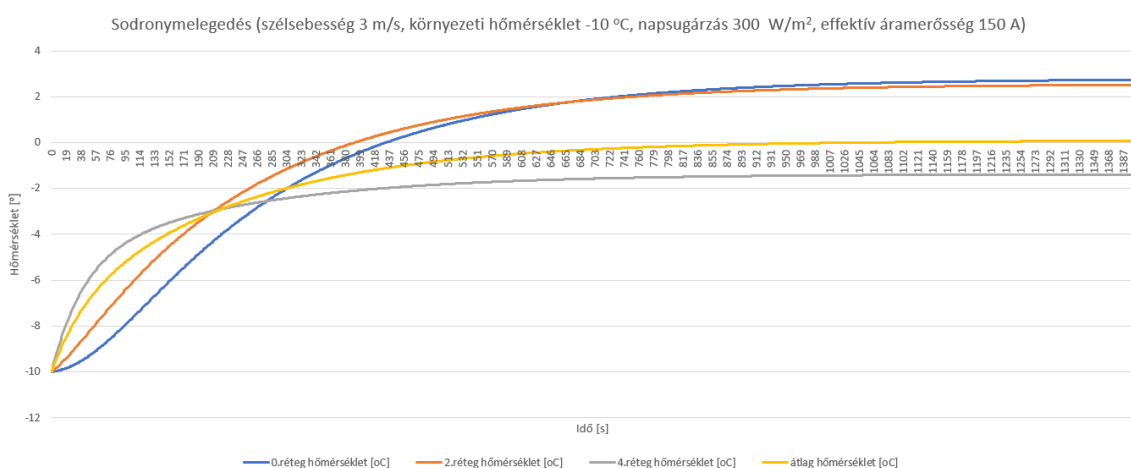
63. ábra. Sodronyemelegedés (szélsebesség 1 m/s, környezeti hőmérséklet -5 °C, napsugárzás 300 W/m², effektív áramerősség 100 A)



64. ábra. Sodronyemelegedés (szélsebesség 1 m/s, környezeti hőmérséklet -10 °C, napsugárzás 300 W/m², effektív áramerősség 150 A)



65. ábra. Sodronymelegedés (szélsebesség 3 m/s, környezeti hőmérséklet -5 °C, napsugárzás 300 W/m², effektív áramerősség 150 A)



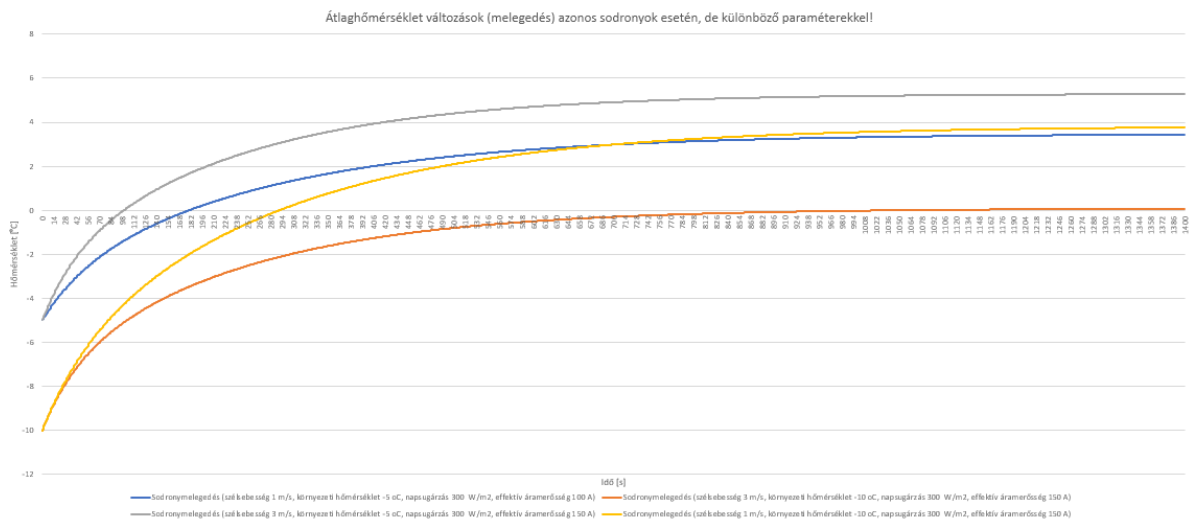
66. ábra. Sodronymelegedés (szélsebesség 3 m/s, környezeti hőmérséklet -10 °C, napsugárzás 300 W/m², effektív áramerősség 150 A)

Az eredmények értékelése

A szimulációs vizsgálatok eredményei alapján megállapíthatjuk, hogy a létrehozott modell képes tetszőleges időben változó (a vezetéken átfolyó) áramérték és különböző meteorológiai mellett az egyes vezeték rétegek hőmérsékletének, valamint a sodronyok átlaghőmérsékletének időbeni alakulását meghatározni.

A melegedési görbék jól reprezentálják az egyes paraméterek (szélsebesség, környezeti hőmérséklet, napsugárzás, terhelő áram) hatását a sodrony hőmérsékletének és az állandósult állapot időbeni kialakulását.

A kifejlesztett szimulációs program segítségével meghatározhatjuk a távvezeték aktuális környezeti, meteorológiai paramétereinek esetén a védővezető sodronyoknál a jegesedés kialakulásának megakadályozásához (*anti-icing*) szükséges terhelőáram nagyságát. Erre mutat példát az alábbi ábra (67. ábra).



67. ábra. Sodrony átlaghőmérséklete különféle körülmények között

Az ábráról leolvasható az állandósult állapot kialakulásához szükséges időtartam is. A terhelő áram nagyságának gyors meghatározásához ki lehet dolgozni olyan görbeseregeket, amelyek egy-egy paraméter egységnyi változásához tartozó értékeket mutatja, és ezekből a szükséges nomogram⁵ elkészíthető.

Megjegyzés: Tapasztalatom szerint a szimulációs modell futási idejét jelentősen befolyásolja, hogy a modellben szereplő nonlinearitások miatt csak 0,0001 s (szimulációs) lépésközzel (vagy ennél kisebbel) biztosítható gyakorlatilag a numerikus hibáktól mentes számítás. Ez viszont jelentősen megnöveli a számításokhoz szükséges időt.

7.3. Jégolvasztási számítások

Első lépésben olyan egyszerűsített vizsgálatokat végeztem, amelyek alkalmasak lehetnek egy jeges védővezető sodrony felmelegedési és jégmentesítési eljárásának szimulációjára. Az egyszerűsített vizsgálatok eredményei alapján egyrészt a sodrony modelljét finomítottam, közelítve a tényleges sodronyszerkezethez, másrészt a sodronyra rakódó jég különböző alakjaival és azok olvadásának szimulációjával foglalkoztam.

⁵ A nomogram több változós függvények síkbeli ábrázolására és az egymáshoz tartozó értékek meghatározására szolgáló ábra.

A végeelemes vizsgálatokhoz ezért több különböző VEM modellt készítettem elő. A modellek paramétereit a korábban ismertetett valós laboratóriumi méréseknek megfelelően választottam, hogy a szimulációs eredményeket össze lehessen hasonlítani a mérési eredményekkel.

Modellalkotás

Az első FEa (Finite Element deicing Analysis) modell a sodronynak egy olyan egyszerűsített szerkezetű modellje, amely még nem veszi figyelembe a sodrony minden jellemzőjét (az acélsodrony és alumíniumkoszorú tömör rúdként van modellezve) (68. ábra).



68. ábra. A sodrony egyszerűsített modellje

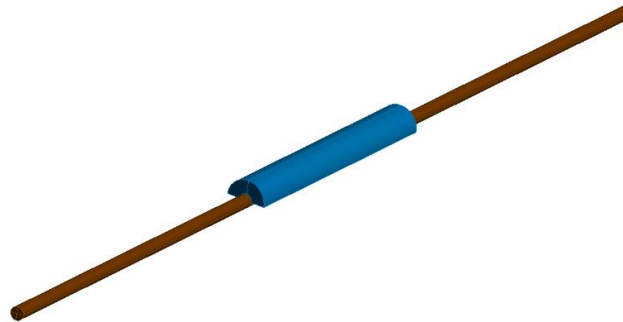
A modell hossza 2500 mm, a keresztmetszet méretei pedig a 95/55 ACSR sodronynak felelnek meg (12. táblázat).

Terület Area Querschnittsfläche				Megfelelő rézkároszt-metszet Equivalent copper area Entsprechende Kupferoberfläche	Sodrat és huzaltérmetrő Stranding and wire diameter Durchmesser der Leitung und der Drähte		Teljes átmérő Overall diameter Gesamtdurchm.	Tömeg Weight Gewicht			Névtleges szakítóerő Nominal breaking load Nominale Bruchkraft	Max. ellenállás 20°C-on Maximum DC resistance at 20°C Widerstand bei 20°C
Névtleges Nominal Nenn-	Tényleges Actual Effekt.				Alumínium Aluminium Aluminium	Acél Steel Stahl		Alumínium Aluminium Aluminium	Acél Steel Stahl	Összesen Total Total		
Alu/Acél Alu/Steel Alu/Stahl	Alu	Acél Steel Stahl	Összesen Total Total	mm			mm				Kg/Km	Kg/Km
mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm	mm	mm	Kg/Km	Kg/Km	Kg/Km	daN	Ohm/Km
16/2,5	15,3	2,5	17,8	9,6	6/1,80	1/1,80	5,4	42	20	62	595	1,8780
25/4,0	23,8	4,0	27,8	17,5	6/2,25	1/2,25	6,8	65	32	97	920	1,2002
35/6,0	34,3	5,7	40,0	21,6	6/2,70	1/2,70	8,1	94	46	140	1265	0,8352
44/32,0	44,0	31,7	75,7	27,7	14/2,00	7/2,40	11,2	122	250	372	4500	0,6573
50/8,0	48,3	8,0	56,3	30,4	6/3,20	1/3,20	9,6	132	64	196	1710	0,5946
50/30	51,2	29,8	81,0	32,2	12/2,33	7/2,33	11,7	141	237	378	4380	0,5643
70/12	69,9	11,4	81,3	44,0	26/1,85	7/1,44	11,7	193	91	284	2680	0,4130
95/15	94,4	15,3	109,7	59,4	26/2,15	7/1,67	13,6	260	123	383	3575	0,3058
95/55	96,5	56,3	152,8	60,7	12/3,20	7/3,20	16,0	266	446	712	7935	0,2992
105/75	105,7	75,5	181,5	66,5	14/3,10	19/2,25	17,5	292	599	891	10845	0,2735
120/20	121,6	19,8	141,4	76,5	26/2,44	7/1,90	15,5	336	158	494	4565	0,2374
120/70	122,0	71,3	193,3	76,7	12/3,60	7/3,60	18,0	337	564	901	10000	0,2364

12. táblázat. ACSR sodronyok paramétereit (részlet) [59]

Ezzel a modellel történő szimulációval a sodrony melegegését vizsgáltam, az eredményeket összehasonlítottam a korábbi mérési eredményekkel.

Létrehoztam egy második, kiterjesztett modellt is, amely a sodrony jegesedésének egyszerűsített modelljét is tartalmazta a laboratóriumi vizsgálat elrendezése szerint.



69. ábra. A jeges sodrony egyszerűsített modellje

A fenti ábrán láthatóan a jéggyűrű átmérője kb. a sodrony átmérőjének a kétszerese (a jéggyűrű ekvivalens külső átmérője 96 mm (69. ábra). A jéggyűrű hossza 625 mm volt.

A sodrony melegedésének és jégtelenítésének vizsgálatára kapcsolt tranziens termikus-villamos szimulációkat végeztem az ANSYS 2020R2 Workbench programrendszer segítségével. A szimuláció során 20 csomópontú hexaéder elemeket használtam. Az elem mérete 4 mm volt a sodronyon és 2 mm a jégen. A két test közötti érintkezés típusát MPC (MultiPoint Constraint) formulázással oldottam meg [60, 61]. Ez a módszer alkalmas a szilárd – szilárd felületek közötti érintkezés és a kényszerek kezelésére.

200 A terhelőáramot vittem fel a sodrony alumínium gyűrűjének egyik végére, hogy biztosítsam az áram hőhatását. A környezeti hőmérséklet 22 °C, a jég (és a jég alatt lévő sodronyszakasz) hőmérsékletét -5°C-ra választottam. A környezet sugárzási hűtési és fűtési hatásának modellezéséhez a hőszugárzást 0,09-re állítottam, a hőkonvekció pedig 0,5 W/m² volt az elemzések során. Az értékek az elemzés során állandóak voltak.

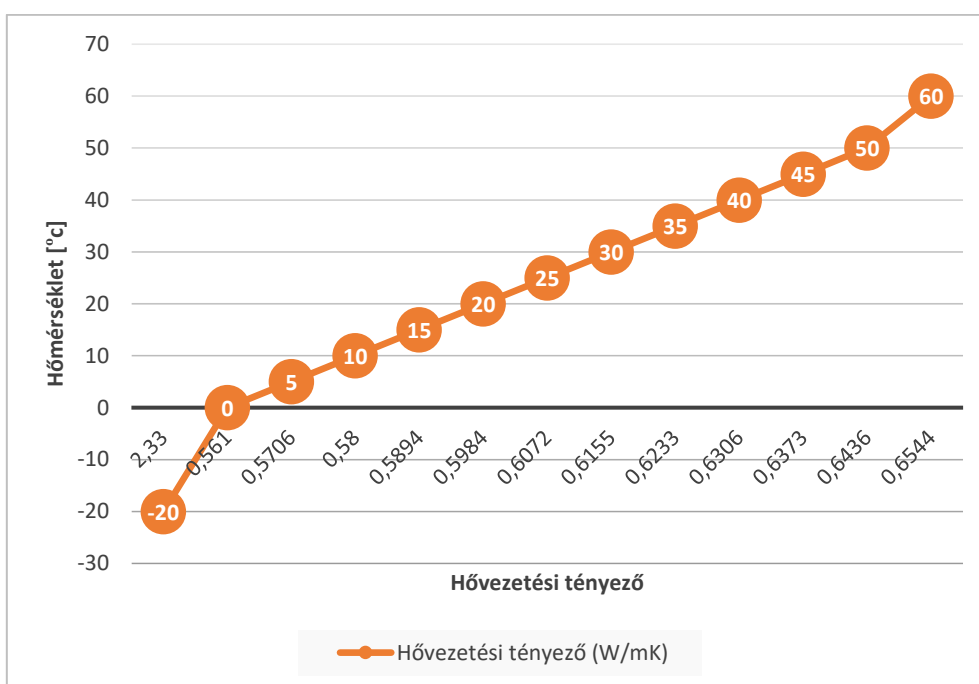
Az összetett sodrony – jég félggyűrű egyenértékű termikus paramétereit a 13. táblázatban tüntettem fel.

A sodrony egyenértékű anyagi tulajdonságai	
Hőmérséklet [°C]	Hővezetés [W/m K]
-100	114
0	144
100	165
Fajhő [J/kg K]: 875	

Hőmérséklet [°C]	Ellenállás [ohm m]
-10	3,023e-8
0	3,253e-8
20	3,46e-8
100	4.43e-8

13. táblázat. A sodrony termikus paramétereit

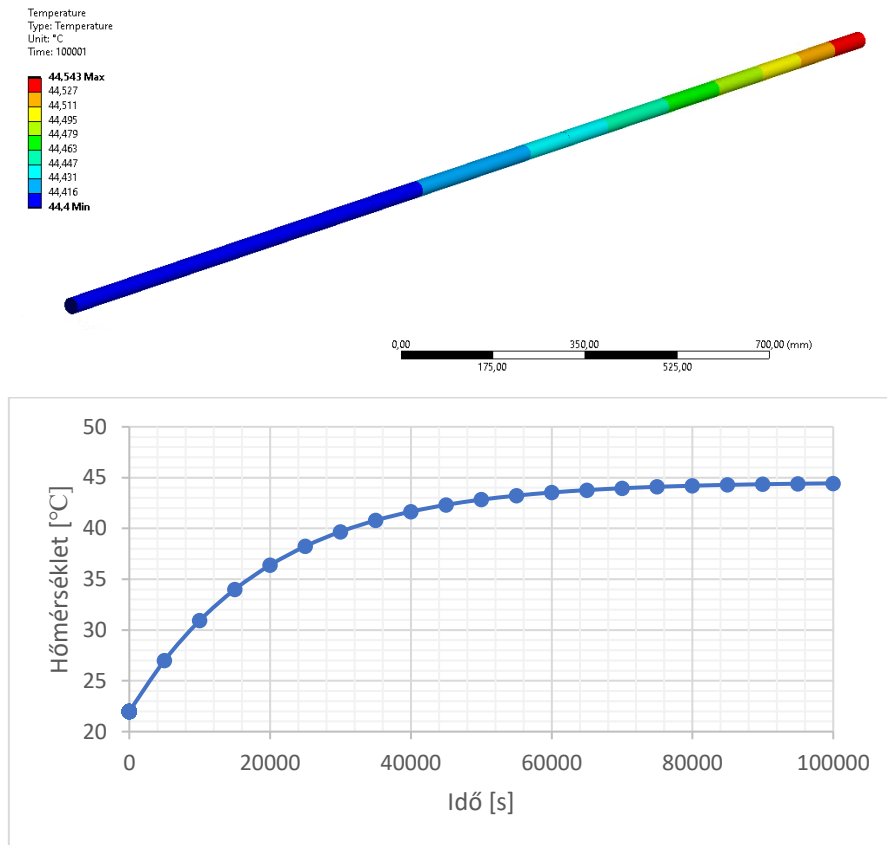
A jég hővezetési tényezőjét a hőmérséklet függvényében az alábbi ábra mutatja, a fajhője pedig 4211 [J/kg K] [62].



70. ábra. A jég hővezetési tényezője a hőmérséklet függvényében

Az egyszerűsített modellel kapott szimulációs eredmények

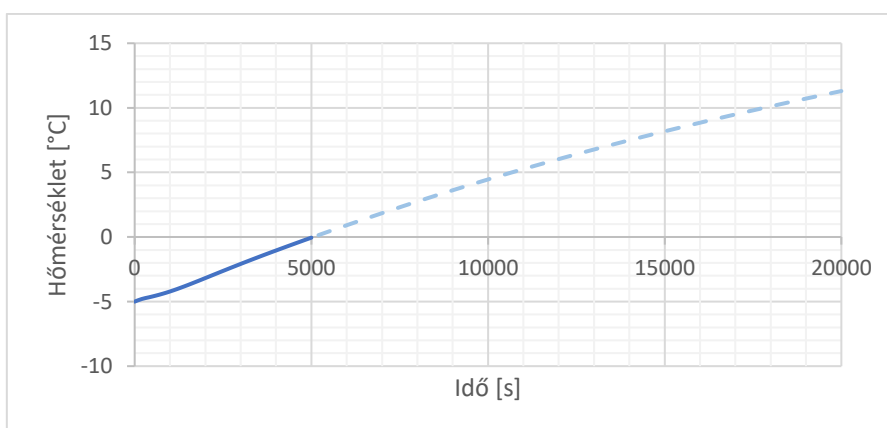
A 71. ábra a sodrony felmelegedési folyamatát mutatja a terhelőáram rákapcsolása után, kapcsolt tranziens termikus-villamos szimulációval (jég nélkül). A VEM modellezéssel kapott eredmény 44,5 °C.



71. ábra. A sodrony melegedése az idő függvényében

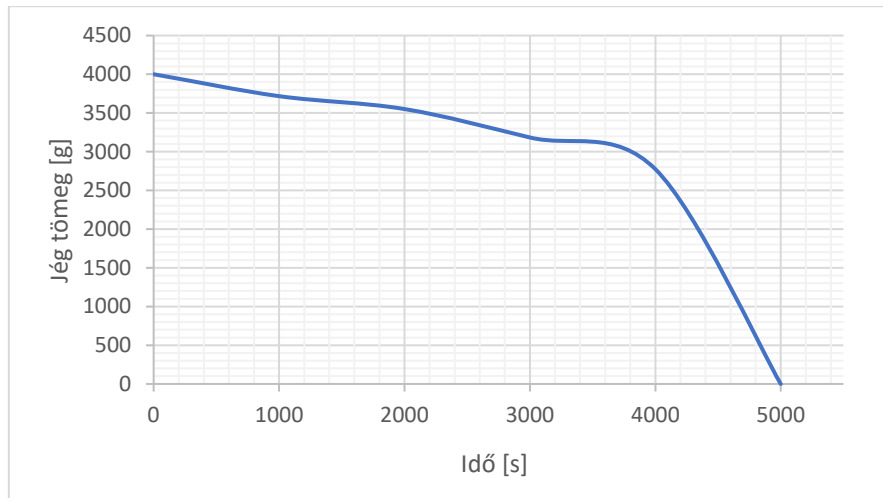
A sodrony jég-félgűrű modellel végzett szimuláció során a jég kezdeti tömegét 4000 g-nak vettem. Az egyszerűsített elemzés során a jég egyenletes olvadását tételeztem fel. Ez a közelítés azonban nem veszi figyelembe, hogy a jég a valóságban az egyenetlenül olvad, azonban jó közelítést ad arra, hogy mennyi időre van szükségünk a sodrony olyan mértékű felmelegítésére, hogy elérjük a burkoló jég teljes olvadását [63, 64].

Kritériumnak azt a tömegvesztéséget választottam, amely a „jég” hőmérsékletének nem negatív tartományának eléréséig bekövetkezik. A jég melegedésének időbeni folyamatát mutatja a 72. ábra. (0 °C felett a görbe fizikailag nem értelmezhető, csak a trendet mutatja).



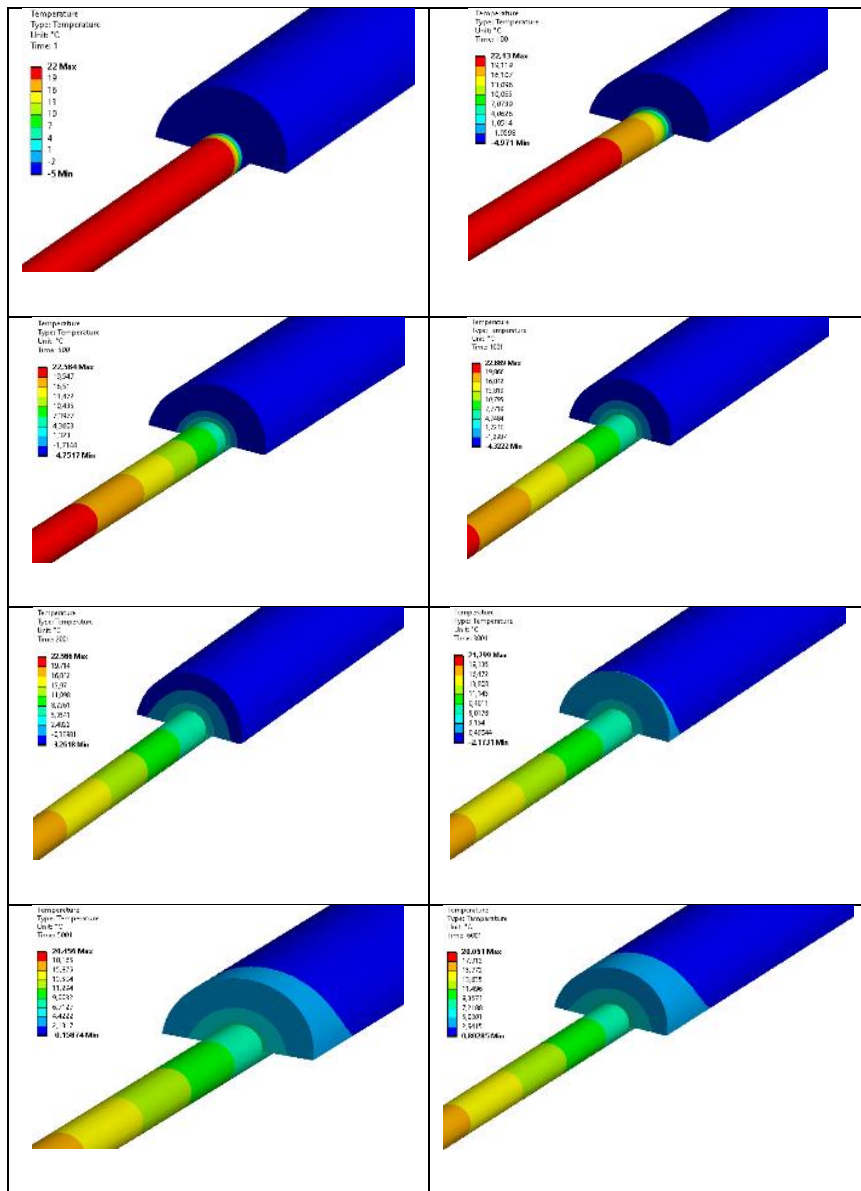
72. ábra. A jég melegedése az idő függvényében

A melegítési folyamat során a jég tömegének változása az idő függvényében az alábbi. ábrán látható (73. ábra).



73. ábra. A jég tömege az idő függvényében

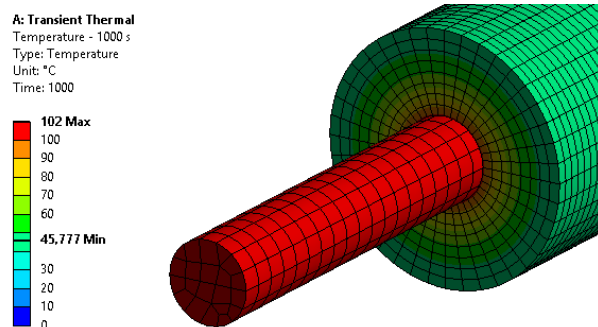
A görbét vizsgálva láthatjuk, hogy a teljes olvadás kb. 5000 másodperccel a melegítési folyamat megkezdése után következik be (74. ábra).



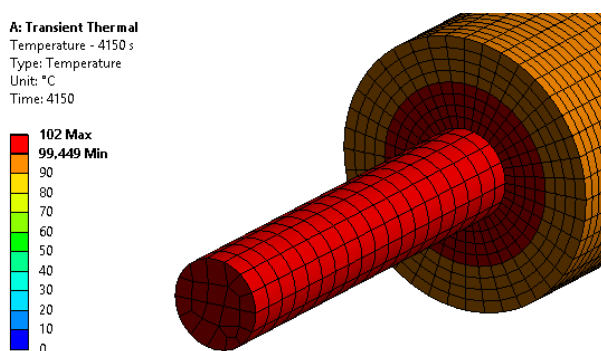
74. ábra. A jég fél-gyűrű melegedési folyamatának ábrázolása

Egy további szimulációnál azt vizsgáltam, hogy $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű jeges sodrony hogyan melegedett fel és olvasztotta fel a jeget. A jégtömeg elolvadása kb. 4200 s alatt következett be [55, 56].

A melegedési folyamat vizuálisan a következő két ábrán látható (75., 76. ábra). Ezeken az ábrákon a jég melegedését a 72. ábrán látható trendnek megfelelően tüntettem fel.

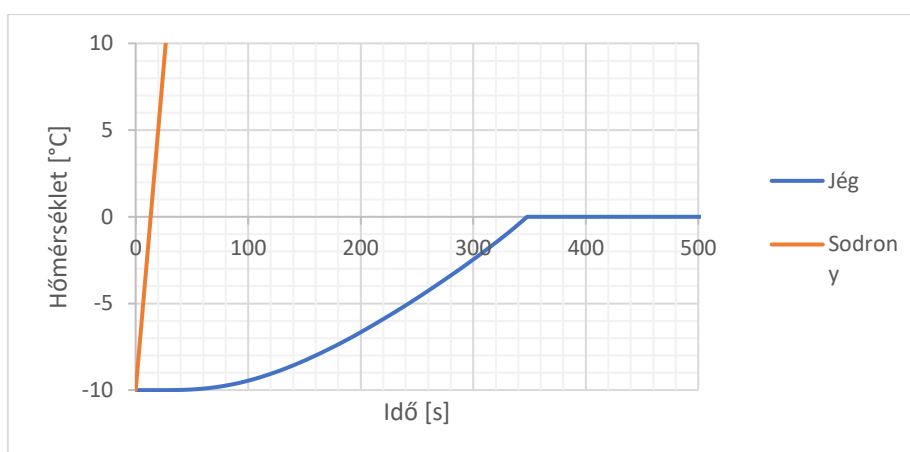


75. ábra. A hőmérsékletek 1000 s után



76. ábra. A hőmérsékletek 4150 s után

A következő ábra a sodrony és a jég külső felületének hőmérsékletváltozását mutatja az idő függvényében (77. ábra).



77. ábra. Hőmérsékletek az idő függvényében

A melegedési görbét vizsgálva láthatjuk, hogy az olvadás kb. 350 másodperccel a melegítési folyamat megkezdése után következett be.

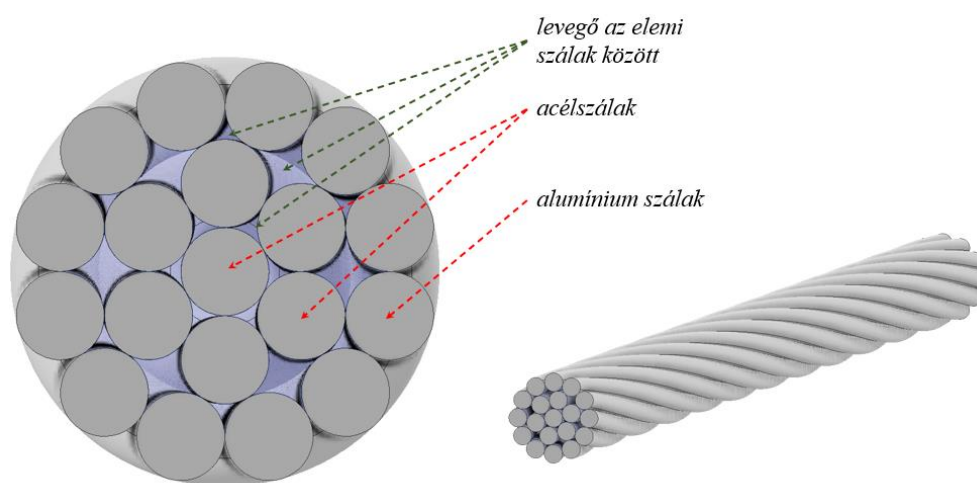
Az eredmények értékelése

Az egyszerűsített modellekkel végzett szimulációk eredménye alapján megállapíthatjuk, hogy a sodrony és a jég felmelegedésének trendjei követik a mérési eredményeket. Az egyes mérések és számítógépes szimulációk eredményei elfogadható összhangban vannak, a kisebb különbségek a mérési bizonytalanságnak és a modellezés egyszerűsítésének köszönhetőek. A még pontosabb eredmények érdekében szükséges a modell termikus és mechanikai finomítása (a sodronyokat nem tömör rúdként, hanem az acélsodrony és alumíniumkoszorú tényleges kialakítása mellett figyelembe veszem az olvadás miatti súly- és geometriai változást).

Vezetéksodrony melegítési folyamatának végesselemes vizsgálata

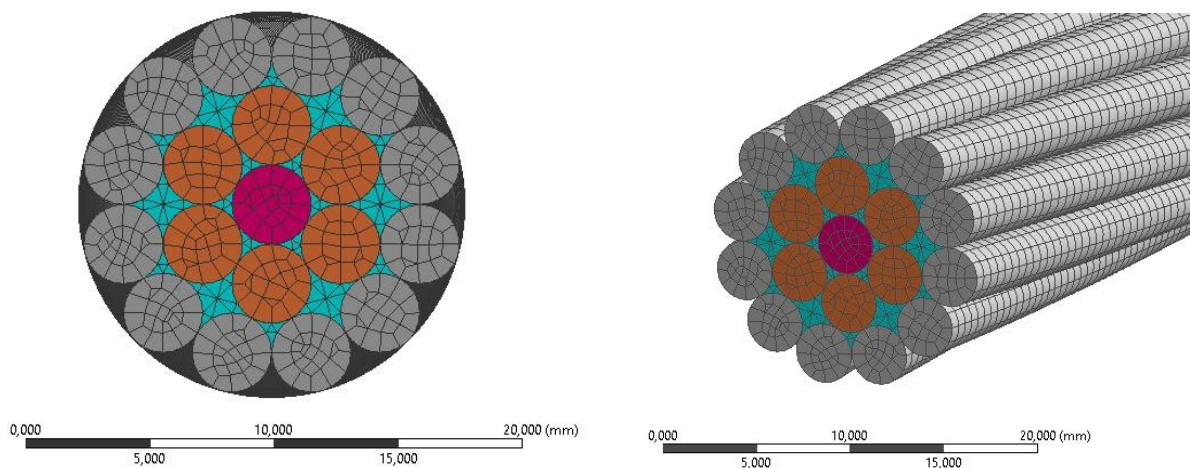
Ennek a vizsgálatnak a célja a DIN48204-es szabvány szerinti 95/55 mm² névleges keresztmetszetű sodrony melegítési folyamatának végesselemes vizsgálata. A számítások az ANSYS 2020 R2-es verziójával készültek.

A vizsgálatok során alkalmazott geometria felépítését az alábbi ábra mutatja be (78. ábra). A 13. táblázatban (ACSR sodronyok paraméterei) között keresztmetszeti méretek mellett a vizsgált sodrony hossza 500 mm volt.



78. ábra. A vizsgálat során alkalmazott vezetéksodrony geometria

A vizsgálatok során a végesselemes háló 1 mm-es, túlnyomórészt másodrendű hexaéder elemekből épült fel. A geometria jellegére való tekintettel, azokon a helyeken, ahol hexaéder elemekből nem volt felépíthető, másodrendű tetraéder elemekből épült fel a végesselemes háló. A háló felépítését a keresztmetszeten az alábbiábra szemlélteti, amely 370 679 elemet és 1 358 231 csomópontot tartalmazott (79. ábra).



79. ábra. Végeelemes háló felépítése a vezetéksodrony keresztmetszetén és palástfelületén szemléltetve

A sodronyt két különböző alapanyagú szál alkotja. A belső 1+6 szál anyaga acél, míg a külső szálak alumíniumból készülnek. A szálak közötti légrést modellező részek (79. ábra, türkiz színnel jelölt részek) a programon belül található levegőre vonatkozó anyagjellemzőkkel kerültek figyelembevételre. A számítások során használt, az ANSYS anyagadatbázisából kivett anyagjellemzőket a 13. táblázat tartalmazza.

Aluminum Alloy

General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.

Density	2,77e-06 kg/mm ³
Structural	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	71000 MPa
Poisson's Ratio	0,33000
Bulk Modulus	69608 MPa
Shear Modulus	26692 MPa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	2,3e-05 1/°C
Compressive Ultimate Strength	0 MPa
Compressive Yield Strength	280,00 MPa
S-N Curve	
Tensile Ultimate Strength	310,00 MPa
Tensile Yield Strength	280,00 MPa

Thermal	
Isotropic Thermal Conductivity	
Specific Heat Constant Pressure	8,75e+05 mJ/kg·°C

Electric	
Isotropic Resistivity	

Structural Steel

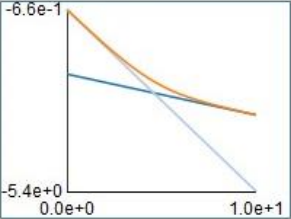
Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

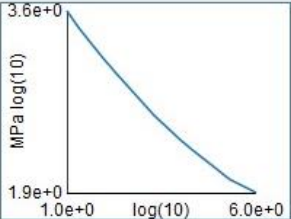
Density	7,85e-06 kg/mm ³
---------	-----------------------------

Structural

▼ Isotropic Elasticity

Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2e+05 MPa
Poisson's Ratio	0,30000
Bulk Modulus	1,6667e+05 MPa
Shear Modulus	76923 MPa
Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion	1,2e-05 1/°C
Compressive Ultimate Strength	0 MPa
Compressive Yield Strength	250,00 MPa

Strain-Life Parameters	
------------------------	--

S-N Curve	
-----------	--

Tensile Ultimate Strength	460,00 MPa
Tensile Yield Strength	250,00 MPa

Thermal	
Isotropic Thermal Conductivity	0,060500 W/mm·°C
Specific Heat Constant Pressure	4,34e+05 MJ/kg·°C

Electric	
Isotropic Resistivity	0,00017000 ohm-mm

Air

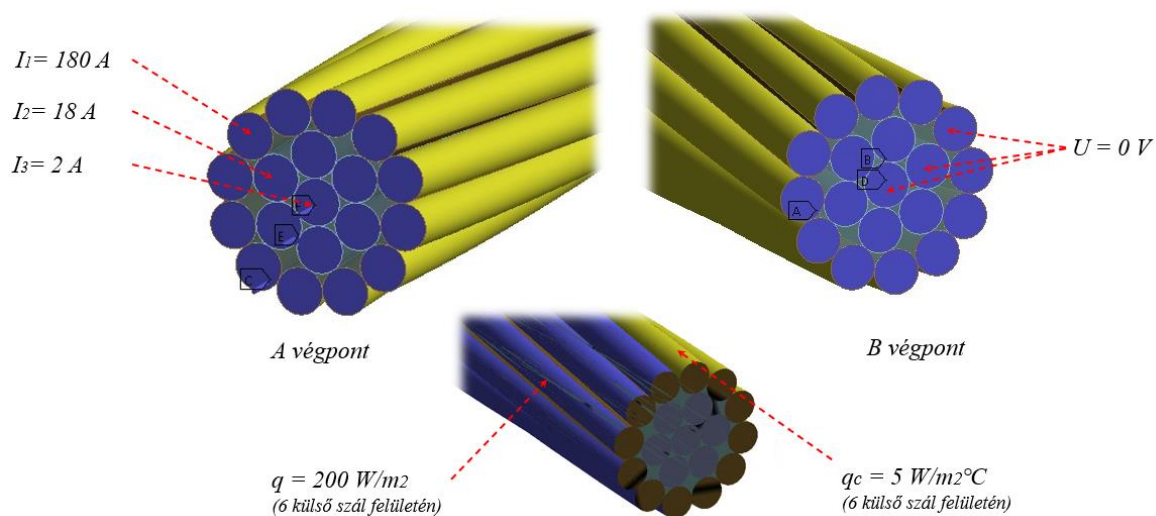
Thermal Properties for Air

Density	1,1614e-09 kg/mm ³
---------	-------------------------------

Thermal	
Isotropic Thermal Conductivity	2,6e-05 W/mm·°C
Specific Heat Constant Pressure	1,007e+06 MJ/kg·°C

13. táblázat. A vizsgálatok során alkalmazott anyagjellemzők

A kapcsolt hőtani-villamos számítás során alkalmazott terheléseket és peremfeltételeket az alábbi ábra szemlélteti (80. ábra).



80. ábra. A végelelemes vizsgálat során alkalmazott terhelések és peremfeltételek

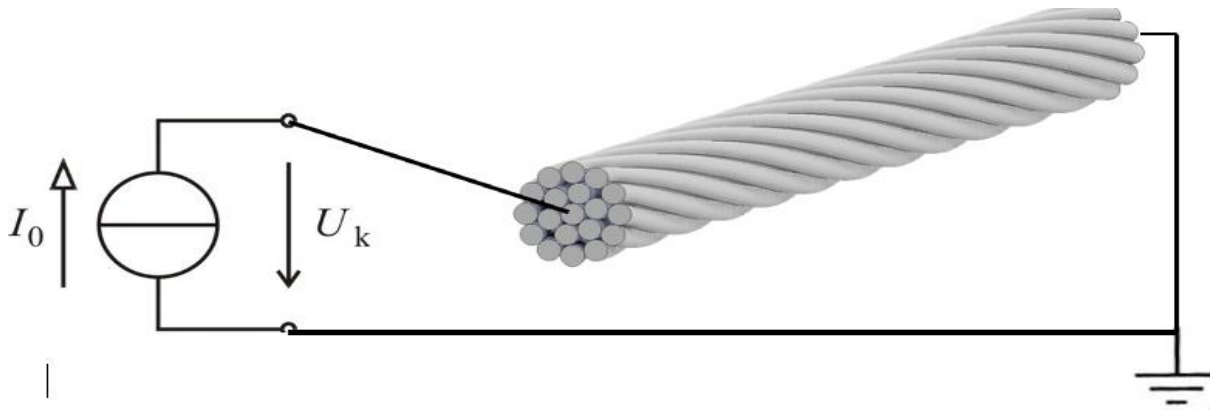
A sodrony vizsgált szakaszát villamos szempont úgy modelleztem, hogy a sodrony egyes rétegeire - a korábbi vizsgálatok eredményeit felhasználva - változó nagyságú áramerősséget kapcsoltam, ideális áramgenerátoros meghajtásban.

Az egyes rétegekre a sodrony „A” jelű végpontján az alábbi áramerősségeket kapcsoltam:

- belső acél elemi szátra (mag= $I_3 = 2 A$),
- a középső réteget alkotó 6 elemi szátra ($I_2 = 18 A$),
- míg a külső alumínium „burkoló réteget” alkotó 12 elemi szátra ($I_1 = 180 A$).

A sodrony „B” jelű végpontján az ideális áramgenerátor meghajtás miatt nem esik feszültség, így ezt mindhárom réteg esetén 0 V-os feszültséggel definiáltam.

Az így kialakított elrendezéssel modelleztem a sodronyon folyó áram által keltett Joule-hő hatására bekövetkező fűtő hatást (81. ábra).



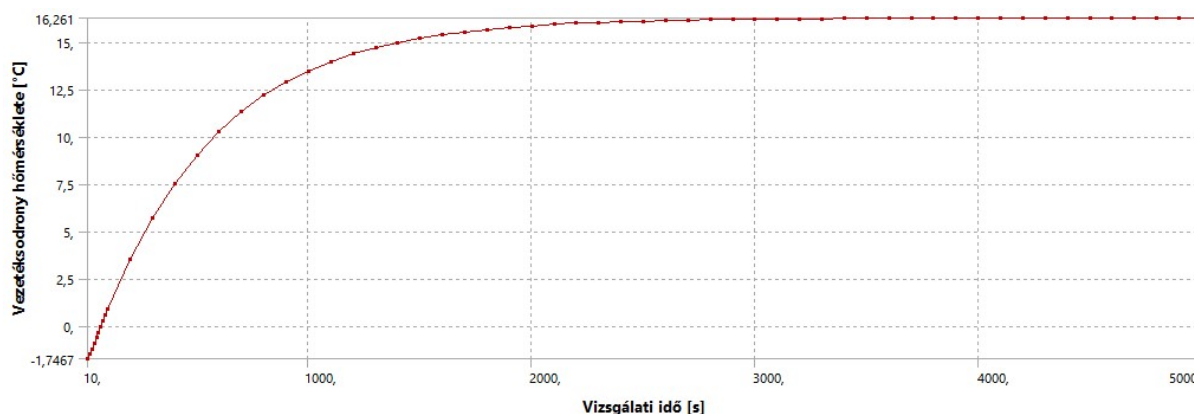
81. ábra. A sodronymelegítés villamos elrendezése

A vizsgálatok során két környezeti tényezőt is figyelembe vettem. Az egyik a Q -val jelölt, a sodrony külső felületén működő 200 W/m^2 teljesítményű fűtés, amely napsugárzás hatására jelentkező melegítő hatást modellezi, valamint a Q_c -vel jelölt, úgyszintén a külső palástfelületen működő $20 \text{ W/m}^2\text{°C}$, 2 m/s sebességű szél általi hűtőhatás [74]. A környezeti hőmérséklet -2 °C volt. Ennek hűtőhatása hőszugárzással került figyelembevételre.

A vizsgálat teljes hossza 5000 másodperc volt. Az első szakasz során (első 100 másodperc), lineárisan felterhelésre került az összes, korábban tárgyalt terhelés és aktívvá váltak a peremfeltételek. A második szakaszban, 4900 másodperc időtartamban, a korábban bemutatott terhelések konstans működtek a modellen.

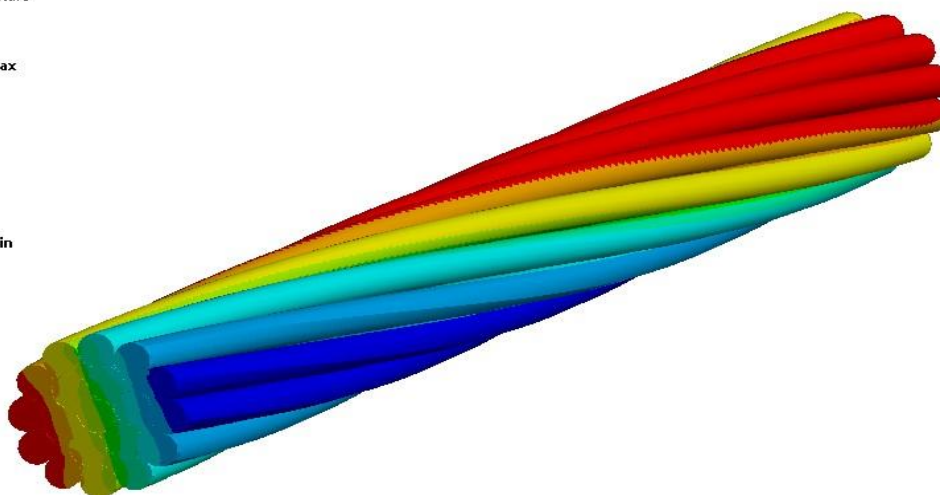
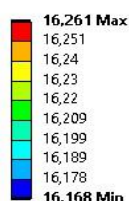
A vizsgálat eredményei

A melegítési folyamat során a vezetéssodrony maximális hőmérsékletének alakulását a 82. ábra szemlélteti. A 83. ábra a hőmérsékleteloszlást mutatja a modellen.



82. ábra. A vezetéksodrony maximális hőmérsékletének felfutása a vizsgálat során

M: 5000sec-radiation-heatflux_6szalon_convection6_szalon_2ms_szel
 Temperature
 Type: Temperature
 Unit: °C
 Time: 5000



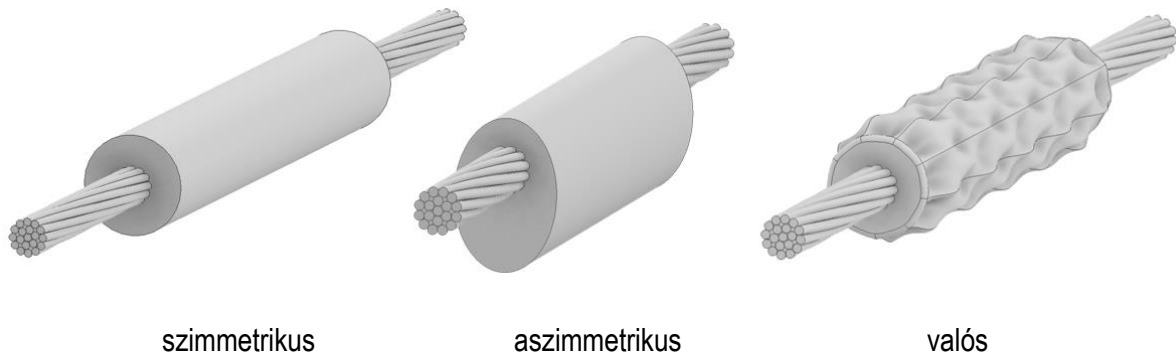
83. ábra. A vezetéksodrony hőmérsékleteloszlás a modellen szemléltetve a vizsgálat utolsó időpillanatában

Vezetéksodrony melegítési folyamatának, valamint a ráfagyott jég oladási folyamatának végeselemes vizsgálata

Ennél a vizsgálatnál a korábban már tárgyalt DIN48204-es szabvány szerinti 95/55 mm² sodrony melegítési folyamatának, valamint a ráfagyott jég oladási folyamatának együttes végeselemes vizsgálatát a finomított / tovább pontosított modell segítségével végeztem. Ezek a számítások is az ANSYS 2020 R2-es verziójával készültek.

A vizsgálatok során alkalmazott sodrony geometria felépítése megegyezik a korábbi, csak a sodrony melegedését elemző vizsgálatok során alkalmazott geometriával. A sodronyon található jeget három különböző alakban modelleztem. Egy szimmetrikus körgyűrű alakú jég (külső átmérő: 48 mm), egy aszimmetrikus kialakítású jég, valamint egy, a valós jéghez hasonló komplex geometriai kialakítású jég alakját modelleztem, amely térfogata közel azonos a szimmetrikus és az aszimmetrikus jég térfogatával

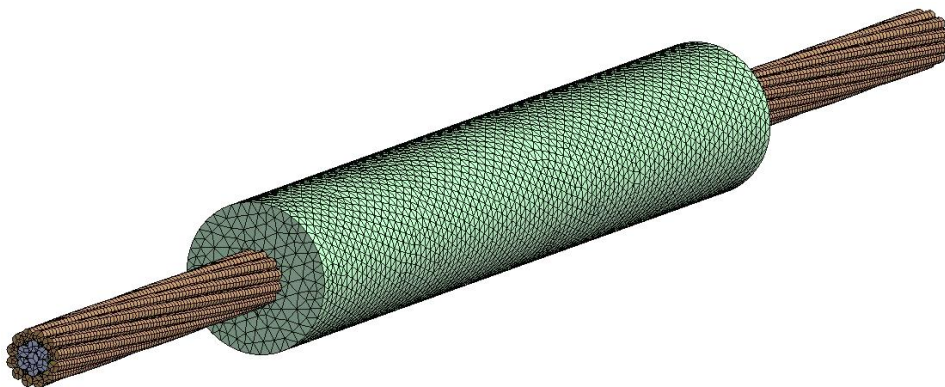
(az eltérés cca. 6%). Mind a három esetben a jég vizsgálati hossza 250 mm volt (sodrony hossza 500 mm volt). Az egyes kialakításokat az alábbi ábra szemlélteti (84. ábra).



84. ábra. A vizsgálat során alkalmazott jegesedett vezetéksodrony geometriai variánsok

A vizsgálatok során a végeselemes háló felépítése a sodrony esetében megegyezett a korábbi beállításokkal. A jég esetében, a sodronyhoz kapcsolódás helyén található bonyolult geometria miatt 3 mm-es másodrendű (10 csomópontos), tetraéderelemekből építettem fel a modellt.

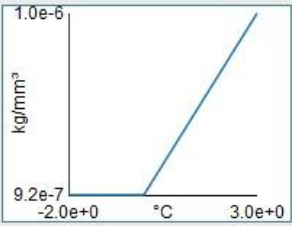
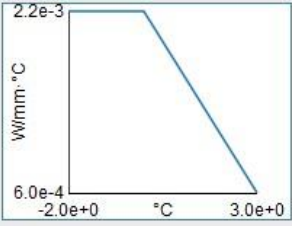
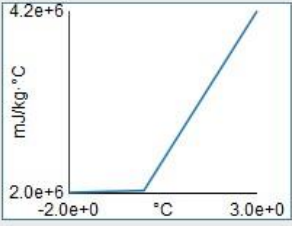
A háló felépítését a szimmetrikus jég esetében az alábbi ábra szemlélteti (85. ábra).



85. ábra. Végeselemes háló felépítése a szimmetrikus jéggel terhelt vezetéksodronyon

A számítások során a 13. táblázatban szereplő anyagjellemzőket ki kellett egészíteni a jég/víz anyagjellemzőivel, amelyeket a 14. táblázat tartalmazza. A halmazállapotváltozás miatt 0 °C-on jelentősen változik egyes jellemzők értéke, ez megfigyelhető az 14. táblázat diagrammjaiban.

Ice/Water

Density	
Thermal	
Isotropic Thermal Conductivity	
Specific Heat Constant Pressure	
Electric	
Isotropic Resistivity	2e+08 ohm-mm
Magnetic	
Isotropic Relative Permeability	0,99999

14. táblázat. A vizsgálatok során alkalmazott jég/víz anyagjellemzők

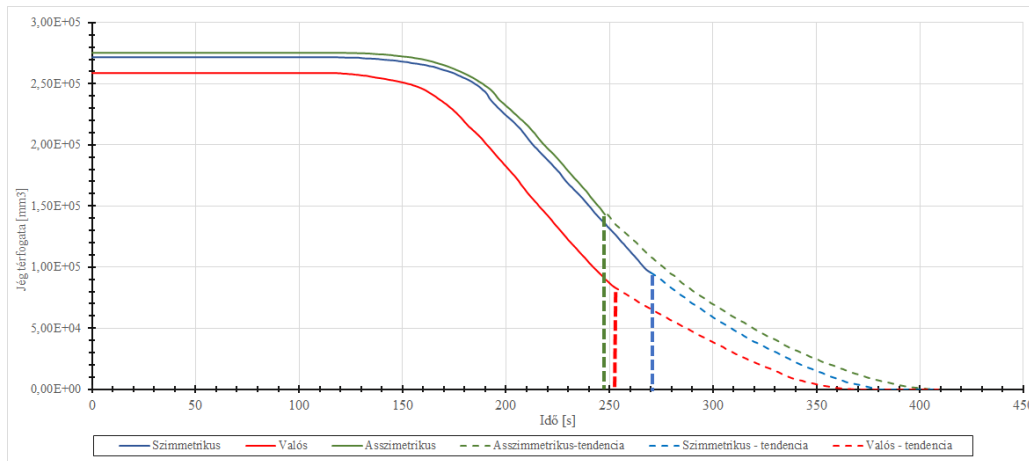
A vizsgálat három részből épült fel. A jég nélküli sodrony számításához hasonlóan a vizsgálat váza ebben az esetben is egy kapcsolt hőtani-villamos számítás. Ennek eredményeire épült egy újabb, hőtani számítás, amely során a korábbi eredmények újra ráolvasásra kerültek a geometriára, mint peremfeltétel, azonban egy kritériumrendszer is megfogalmazás került, amelynek a hatására a végeselemes jég geometriáját alkotó végeselemek közül lekapcsolásra kerültek azok (merevségük nullázásra került), amelyek hőmérséklete elérte a 0 °C-t, amellyel a jég olvadási folyamata modellezhető volt.

A terhelések és peremfeltételek felépítése, megegyezett mind a három esetben a sodrony korábbi vizsgálata esetében alkalmazottakkal, azzal a különbséggel, hogy a hűtő/fűtő hatás a jég felületén is működésbe lépett, a hőszugárzás mellett.

A vizsgálat teljes hossza megegyezett a korábbi vizsgálatok hosszával, azonban az eredmények csak addig a pontig kerültek kiértékelésre, ameddig a jég minden egyes pontja el nem érte a 0 °C-t. Az eredmények 1 másodpercenként kerültek kiértékelésre.

A vizsgálat eredményei

A jégolvadás folyamatának elemzése a jég térfogatának változása segítségével vizsgálható a legegyszerűbben. A 86. ábra összesítve mutatja a melegítés során a jég térfogatának változását az idő függvényében.



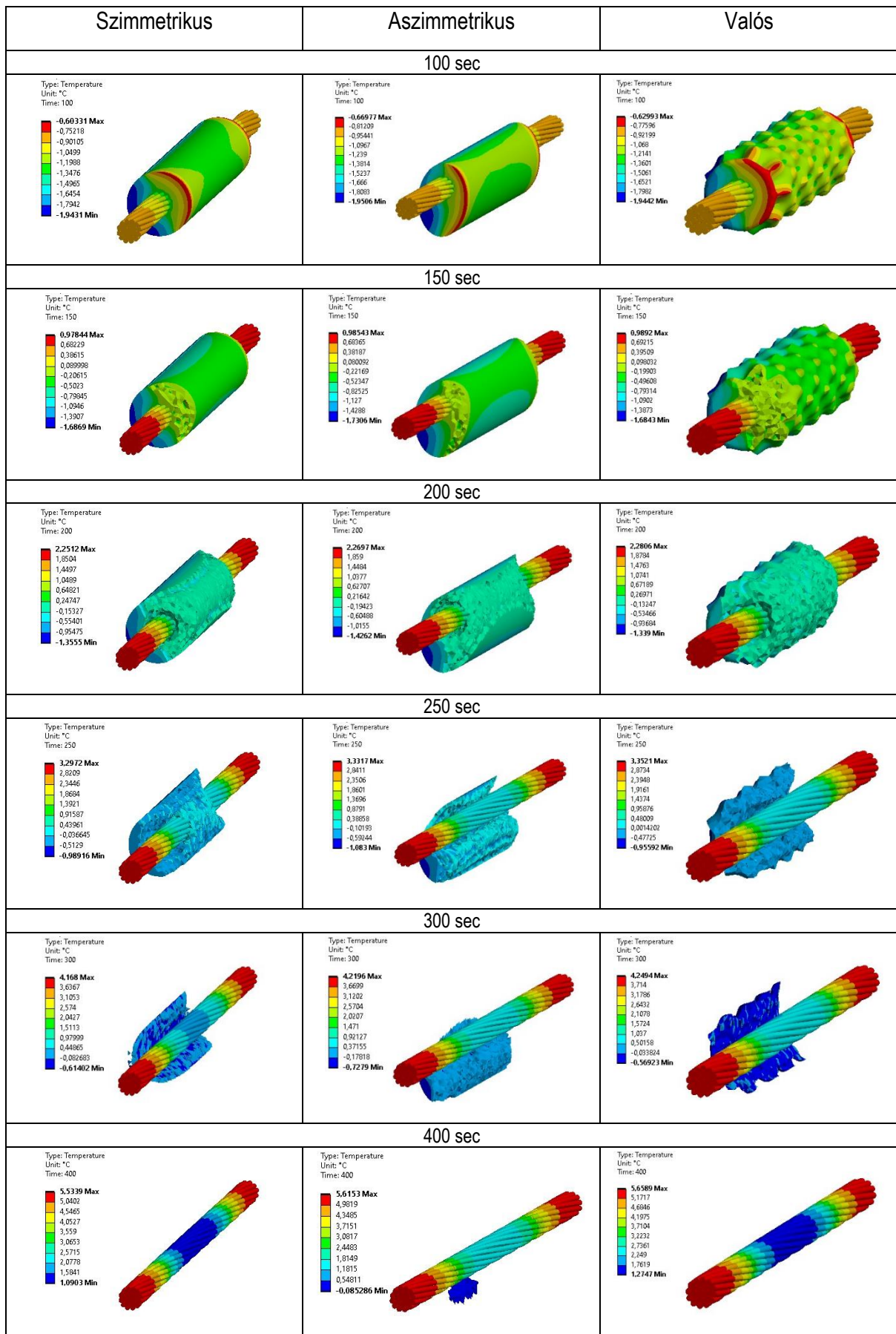
86. ábra. A jég térfogatának változása az olvadás folyamán az idő függvényében

A 86. ábrán látható, hogy a valós alakú jég esetében annak térfogata egy picivel eltért a másik két geometriai kialakítástól, azonban a görbe párhuzamosan fut a másik két verzióval. Így kijelenthető, hogyha csak az elemek hőmérsékletváltozását vizsgáljuk (aminek következtében az olvadás bekövetkezik), akkor mind a három verzió esetében közel azonos olvadási görbét kapunk.

Fontos azonban kiemelni, hogy a vége-selemes modell azokat az eseteket nem tudja kezelni, amikor a sodrony felületén a jég megolvad, és a fizikai érintkezés a modell a sodrony és a jég között megszűnik, valamint, ha a jég nagyobb darabokban leesik a sodronyról. Ezért a kiértékelés során ellenőriztem, hogy melyik időpillanatban kerül a sodronyon még megtalálható jég abba az állapotba, amikor megszűnik a teljes kapcsolata sodronnyal, azaz a valóságban a jég leesne. Ezeket az eredményeket szemléltetik a 86. ábrán látható szaggatott vonalak.

Az eredményekből látható, hogy a közel azonos felépítésű valós és szimmetrikus jegesedés esetén, arányosan tekintve az eredményekre, közel azonos módon következik be az olvadás. Az aszimmetrikus geometria esetén az olvadás elsősorban a sodrony környezetében valósul meg, az alsó részek, ahol a térfogat egy jelentős része koncentrálnak egyszerűen leesik egy idő után.

Mind a három esetben elmondható, hogy a jég kb. 250 másodperc eltelte után esik le a sodronyról. Az alábbi ábrán vizuálisan követhető végig az olvadás folyamata az egyes jég-geometriák esetében (87. ábra).



87. ábra. A vezetékcsodronyra ráfagyott jég oladási folyamata

8. A JÉGOLVASZTÁS KÍSÉRLETI VIZSGÁLATA

A vizsgálatokkal azt kívántam ellenőrizni, hogy a sodrony modellekkel végzett szimulációs vizsgálatok eredményei milyen mértékben egyeznek a laboratóriumi mérésekkel.

A számításoknál és a méréseknél egyaránt 200 A-es terhelőárammal vizsgáltam az ACSR 95/55mm² -es védővezető sodronyt, ennek során mértem a hőmérséklet időbeni változását és azt, hogy milyen hőmérsékletre áll be állandó terhelésnél [55, 56].

A kísérlet során a hőmérsékleteket 2 köpenyhőmérséklet érzékelővel mértem, valamint hőkamerával ellenőriztem. A mérésekhez felhasznált eszközök: érzékelők, 2 db egycsatornás multiméter, és 1 db hőkamera.

A sodronyok téli jeges, zúzmarás állapotának előállításához szárazjeget használtam. A jégképzés előkísérletéhez vizsgálati darabként olyan méretű sodronyt készítettem elő, amely belefért a szárazjeges tárolóládába (60 cm).

A vizsgálat során a Messer Hungarogáz Kft. által biztosított szárazjeges tárolóba helyeztem a sodronyt, és kb. 10-15 perc hűtés után elkezdtem rá vizet permetezni, befedtem szárazjéggel, és így több lépcsőben fokozatosan kialakítva a szükséges jégréteget (88. ábra).



88. ábra. Hőszigetelt tároló láda sodronnyal és szárazjéggel

A jégréteg növekedési üteme viszonylag lassú volt, 1 óra alatt kb. 1 cm átmérő növekedést tudtam elérni. A jégképzési eljárást addig folytattam, amíg legalább a sodrony átmérőjével megegyező vastagságú jeget nem kaptam.

A jégolvasztási vizsgálatoknál a 3 m hosszú sodronynak a bemutatott eljárással csak a tároló láda mérete által meghatározott szakaszán lehetett jégréteget kialakítani. Ezt a műveletet nyitott ablaknál végeztem, mert a szárazjég párolgásakor széndioxid gáz keletkezett (89. ábra).



89. ábra. Jég képzés a sodrony egy szakaszán

Az ismertett módszerrel kialakított jégképzéssel természetesen nem kaptam egyenletes vastagságú, sima jég-gyűrűt a sodronyon. Megjegyzem, hogy a valóságban is nagyon változatos formában találkozhatunk a jégképződéssel (ld. 3.1. fejezet).

A különféleképpen jegesedett sodronyokra mutat példákat az alábbi ábra (90. ábra).



90. ábra. Jeges sodronyok a kísérletben [45]

A sodronymelegedési és jégolvasztási vizsgálatokat a BME VIK Villamos Energetika Tanszék nagyáramú-kisfeszültségű laboratóriumában végeztem.

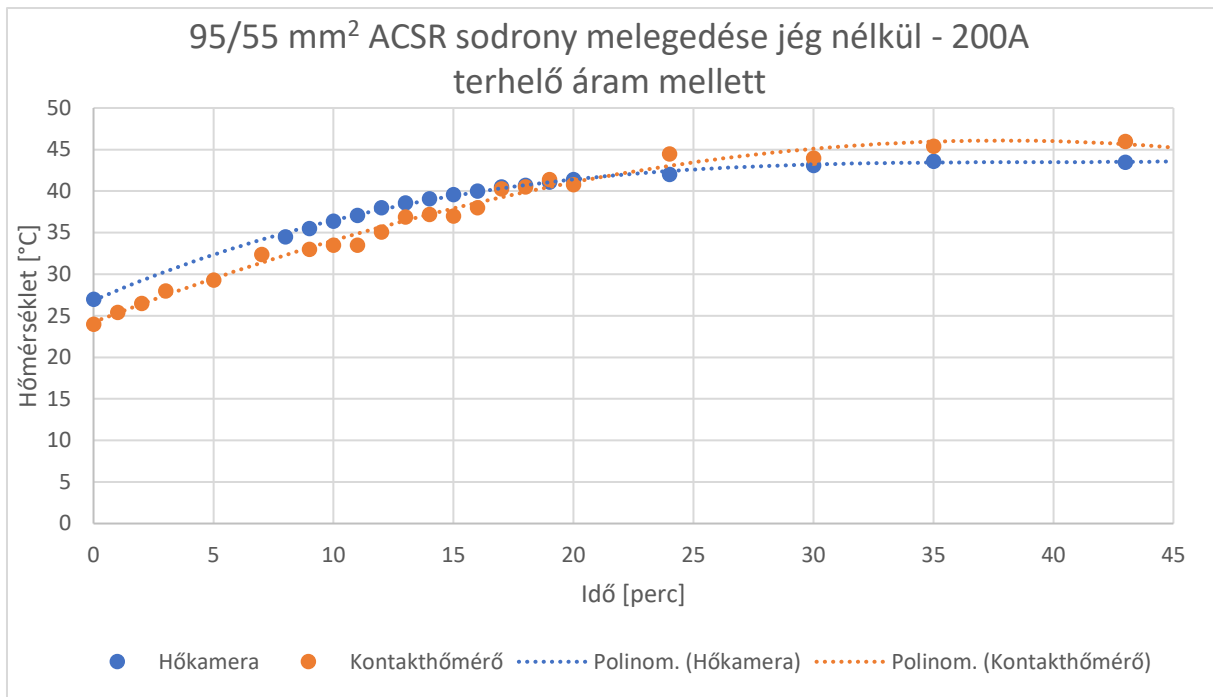
A mérőrendszer összeállításának egy-egy részletét az alábbi ábrán mutatom be (91. ábra).



91. ábra. A sodrony megtáplálása és a hőmérséklet érzékelők

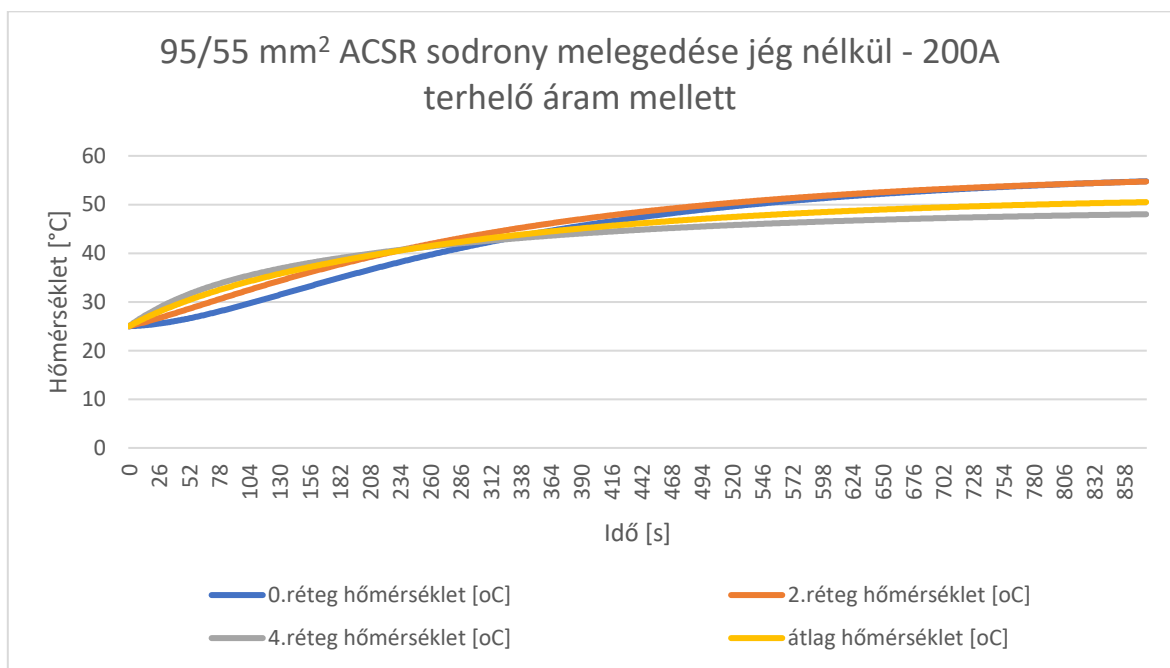
A sodronyt tartó szigetelőket a FCI Furukawa Kompozit Szigetelő Kft. biztosította, a tartóállványok tervezését és elkészíttetését én végeztem.

A jeges sodronyok méréséhez először a mérőrendszert ellenőriztem. Elsőként a csupasz sodrony melegedését mértem 200 A terhelőárammal (92. ábra).



92. ábra. A védővezető sodrony melegedése jég nélkül [63]

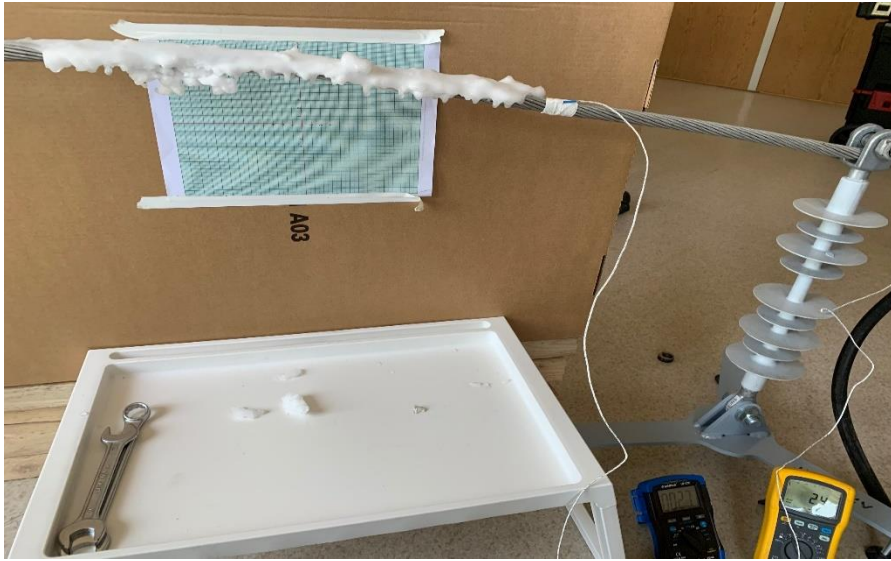
A következő lépésben ugyanilyen paraméterek mellett LabVIEW szoftver segítségével, numerikus szimulációval vizsgáltam a sodrony melegedését (93. ábra).



93. ábra. A védővezető sodrony melegedése szimulációval

Az eredményeket összevetve megállapíthatjuk, hogy a kétféle vizsgálattal kapott melegedési görbe jó egyezést mutat, ezért az elrendezés a további jégolvasztási vizsgálatokra alkalmas [55].

Második lépésben a jégolvást vizsgáltam, az előzőekben ismertetett eszközökkel és elrendezéssel (94. ábra).



94. ábra. A jeges sodrony vizsgálata

A jeges sodronyokat ugyancsak 200 A terhelőárammal melegítve a jégolvás kezdeti és a jégdarabok leesése előtti pillanatát mutatják az alábbi ábrák (95. – 96. ábra).

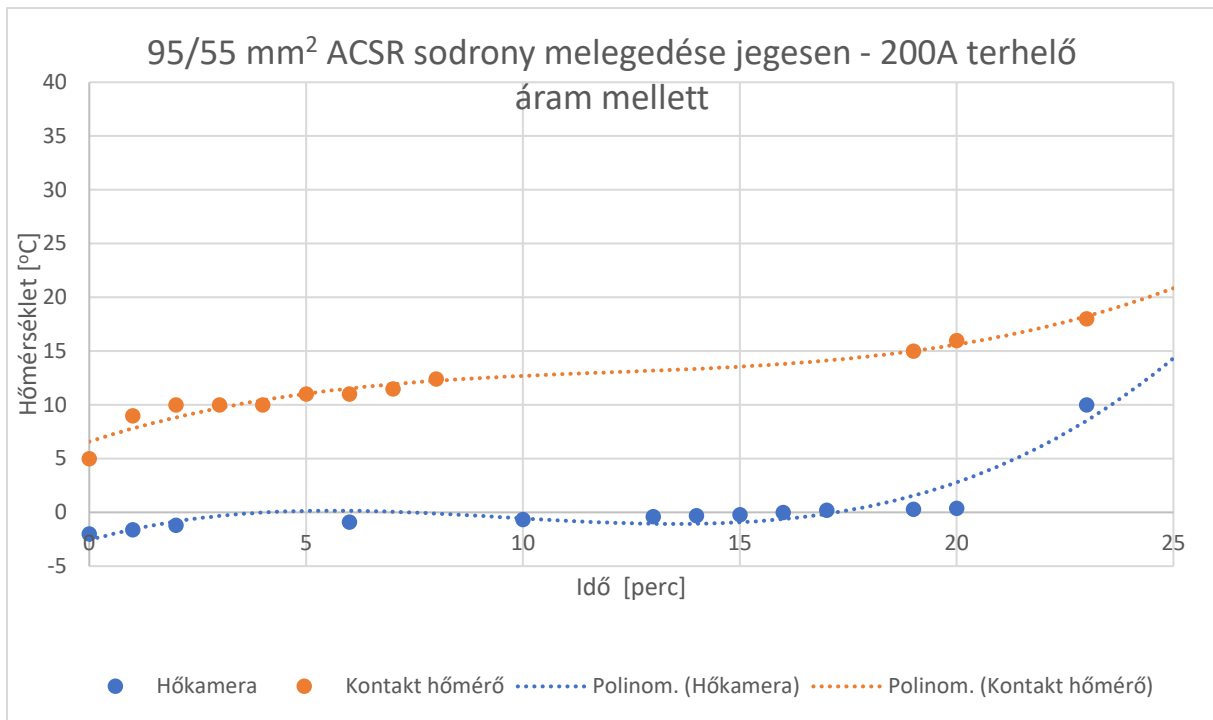


95. ábra. A jégolvadás kezdeti szakasza



96. ábra. A jégolvadás végső szakasza

A jeges sodrony felületi hőmérsékletének változását az alábbi grafikon szemlélteti (97. ábra).



97. ábra. A jeges sodrony hőmérséklete az idő függvényében.

Az eredmények értékelése

A jeges sodronyok melegedésének folyamatát a hőkamera által szolgáltatott eredmények mutatják helyesen, a kontakthőmérő a jég-gyűrű "rúcskös" felületén a bizonytalan érintkezés miatt a valóságosnál magasabb értéket mutatott. A rövid vizsgálati sodronydarabon az egyenetlen jég kb. 20 perc alatt olvadt le.

9. A SZÁMÍTÁSOK EREDMÉNYEINEK ÉS A LABORATÓRIUMI MÉRÉSEK EREDMÉNYEINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA, VALIDÁLÁS

A fázisvezető kötegek árameloszlásának mérése:

A mérés eredményei alapján elmondhatjuk, hogy a fázisvezető kötegeiben kialakult árameloszlás megközelítőleg szimmetrikus, a fázisvezetőkön folyó áramok közel egyenletesen oszlanak meg a kötegvezetők között, a különbségek nem jelentősek. Ezek alapján kötegvezetők esetén a további vizsgálatoknál szimmetrikus árameloszlással számolunk.

A védővezetőkben folyó áram mérése zérussorrendű megtáplálás esetén

A mérési eredményekből megállapítható, hogy a $3I_0$ (zérussorrendű) táplálás esetén a védővezetőben folyó áram nagysága a betáplált I_0 áram 50-60%-a körül alakul.

Az eredmények azt is mutatják, hogy több védővezető esetén, mindegyik védővezetőben létrejön az előzetesen feltételezett áram, és ezek értéke megközelítőleg azonos, az oszlop kialakításából adódóan szimmetrikus elrendezésben.

Zérus sorrendű áram indukciójának szimulációja védővezetőn

A ZSCiGW (Zero Sequence Component in Ground Wire) modellel végzett szimuláció a Tiszai Hőerőmű – Sajószöged 400 kV-os távvezeték védővezetőiben — a zérus sorrendű megtáplálás esetén — a fázisvezetőkben folyó áram (I_0) mintegy 60 %-a mérhető.

Analitikus számításokat is végeztem - amelynek során több elhanyagolást és egyszerűsítést kellett tenni az analitikus megoldhatóság érdekében – ezek eredménye és a szimuláció közötti eltérés átlagosan 5,8%. Ez is azt igazolja, hogy a ZSCiGW modell jól alkalmazható a szimulációs vizsgálatokra.

A sodronyok hőegyensúlyának számítása a LabVIEW programrendszerrel

A szimulációs vizsgálatok eredményei alapján megállapíthatjuk, hogy a létrehozott TDNwa (Transmission and Distribution Network Warming algorithm) modell képes tetszőleges időben változó (a vezetéken átfolyó) áramérték és különböző meteorológiai mellett az egyes vezetékretek hőmérsékletének, valamint a sodronyok átlaghőmérsékletének időbeni alakulását meghatározni.

A melegedési görbék jól reprezentálják az egyes paraméterek (szélsebesség, környezeti hőmérséklet, napsugárzás, terhelő áram) hatását a sodrony hőmérsékletének és az állandósult állapotnak időbeni kialakulását.

A kifejlesztett TDNwa szimulációs program segítségével meghatározhatjuk a távvezeték aktuális környezeti meteorológiai paraméterei esetén a védővezető sodronyok a jegesedés kialakulásának

megakadályozásához (*anti-icing*), illetve a már kialakult jégréteg leolvasztásához (*de-icing*) szükséges terhelőáram nagyságát.

A jégolvasztás végelelemes szimulációja

A FEdA (Finite Element deicing Analysis) végelelemes szimulációs vizsgálatokat több különböző VEM modellel végeztem. A modellek paramétereit a valós laboratóriumi méréseknek megfelelően választottam, hogy a szimulációs eredményeket össze lehessen hasonlítani a mérési eredményekkel.

Az egyszerűsített modellekkel végzett szimulációk eredménye alapján megállapíthatjuk, hogy a sodrony és a jég felmelegedésének trendjei követik a mérési eredményeket. Az egyes mérések és számítógépes szimulációk eredményei elfogadható összhangban vannak, a kisebb különbségek a mérési bizonytalanságnak és a modellezés egyszerűsítésének köszönhetők.

A még pontosabb eredmények érdekében finomítottam a FEdA modellt termikus és mechanikai szempontból is. A sodronyokat nem tömör rúdként, hanem az acélsodrony és alumíniumkoszorú tényleges kialakításával vettem figyelembe, hőtani szempontból egy kapcsolt hőtani-villamos számítást végeztem, a jegesedést három különböző jégalakkkal modelleztem (szimmetrikus körgyűrű alakú jég, aszimmetrikus kialakítású jég, valamint a valóságos esetekhez hasonló komplex geometriai kialakítású jég). A szimuláció során figyelembe vettem az olvadás miatti tömeg- és geometriai változást).

A jégolvadás folyamatának elemzését a jég térfogatának változása segítségével vizsgáltam. A FEdA modellek hőmérsékletváltozását vizsgálva (amelynek során az olvadás bekövetkezik) megállapíthatjuk, hogy mind a három modell esetében közel azonos olvadási görbét kapunk, tehát a jég alakjának nincs jelentős befolyása a jégolvasztás folyamatára. Megállapíthatjuk továbbá, hogy az olvadási folyamatnál az aszimmetrikus alakú jég alsó része, ahol a térfogat egy jelentős része koncentrálódik 8%-kal előbb leesik, mint a szimmetrikus alakú jég hasonló része.

A jégolvasztás kísérleti vizsgálata

Laboratóriumi körülmények között létrehozott jeges sodronyok melegedésének folyamatát hőkamerával és kontakthőmérővel vizsgálva megállapíthatjuk, hogy a hőkamera által szolgáltatott eredmények jó egyezést mutattak az azonos áramterheléseket és időjárási viszonyokat feltételező szimulációs vizsgálatok eredményeivel.

10. JAVASLAT METEOROLÓGIAI ELŐREJELZŐ RENDSZER KIÉPÍTÉSÉRE

A 4.2. fejezetben ismertetett előzetes vizsgálatok alapján, ahol a távvezetékek jegesedésének vizsgálatához a meteorológiai paramétereket (környezeti hőmérséklet, páratartalom, szélsébség) és a sodronyok hőmérsékletét valós időben mértük, a kereskedelmi alkatrészekből összeállított mérőrendszer nem felelt meg maradéktalanul a kívánalmaknak. (A fázisvezető sodronyok hőmérséklet érzékelője nem a sodronyon volt, hanem a kettősköteg távtartójában, ezért környezeti hatások zavarták, a mérőberendezés folyamatos energiaellátása nem volt biztosított, hanem az akkumulátor időszakos töltésére/cseréjére volt szükség, az adatkommunikációnál utólagos feldolgozásra volt szükség.)

Az előzetes vizsgálatok alapján az a javaslatom, hogy professzionális elemekből (szenzorok, adatgyűjtő és továbbító egységek, energiaellátás, kommunikációs rendszer) kifejlesztett mérőberendezést, mérőállomást kell telepíteni a felügyelet alá vont távvezetésekre. A mérési eredményeket pedig az eszközökkel kompatibilis szoftver segítségével egy szabványosított IEC protokollon keresztül kell továbbítani a kiválasztott szerverre és az irányító központba (SCADA).

Az időjárás egyes paramétereit megbízhatóan, precízen mérő szenzorokat általában az adott felhasználási terület (meteorológiai állomások, mezőgazdaság, vízügy stb.) igényeinek megfelelően fejlesztették ki. Ezek nem csak a mérési tartomány, a felbontás, a pontosság szempontjából különböznek, hanem az adatok tárolása, továbbítása, távfelügyeleti lehetőség, valamint rendszerbe integrálhatósága szempontjából is.

Ezért nem tartom szerencsésnek a különféle gyártóktól és esetleg eltérő célokra kifejlesztett szenzorokból egyedileg összeállítani például egy meteorológiai mérőállomást, hiszen kompatibilitási problémákkal találkozhatunk.

Hasonló a helyzet a kifejezetten a nagyfeszültségű távvezetési alkalmazásokra kifejlesztett, a sodronyban folyó áram és a sodrony hőmérsékletének mérésére való szenzorokkal is.

Ezek a szenzorok, bár alapvetően hasonló célokra fejlesztették őket –méri a sodrony hőmérsékletét, a sodronyban folyó áram pillanatnyi értékét, esetleg a sodrony helyzetét és egy típus kivételével nem igényelnek külön energiaellátást – az adatok tárolása, továbbítása, az előrejelző rendszer kialakíthatósága szempontjából jelentősen különböznek.

Különböznek továbbá a mérési tartományukban, pontosságukban, az adattárolás idejében (Battery back-up), a súlyukban, szerelhetőségükben is.

Az iparágban a leggyakrabban használt érzékelőket mutatja a 98. ábra, a 15. táblázatban pedig az ugyanezen érzékelők által mért paramétereket tüntettem fel.



98. ábra. Sodronyokra szerelt érzékelők [65]

	Sodrony hőmérséklet	Sodronyban folyó áram	Sodrongörbe érintő szöge	Belógás
Power Donut	x	x	x	
SMT	x	x		
OTLM	x	x	x	
TLM	x		x	x
FMC-T6	x	x		
emo	x			
Ritherm	x			

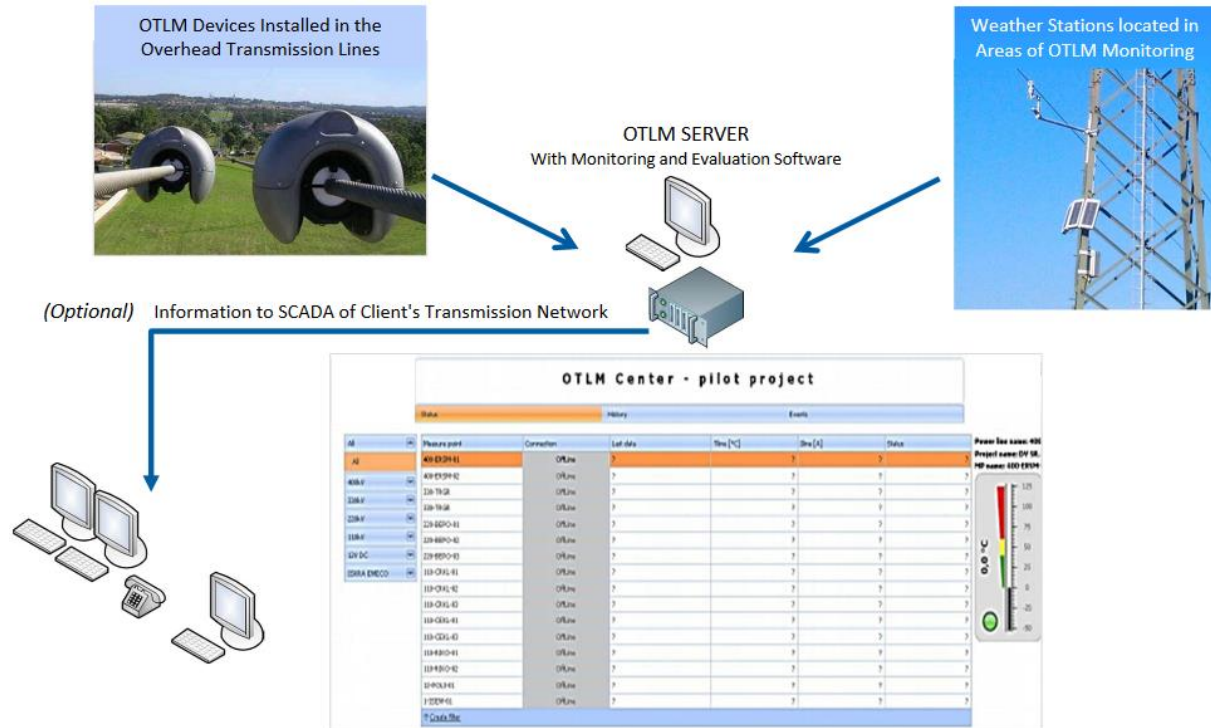
15. táblázat A mért paraméterek

Megjegyzés: A nagyfeszültségű távvezetékek környezeti hatásait vagy speciális tulajdonságait is felügyelő rendszerek érzékelőivel, mint például a sodronyok rezgései, a vezeték környezetében az elektromágneses tér, a sodronyok húzófeszültsége, a belógás és a sodronyok terepszint feletti magassága stb. nem foglalkozom, a kutatásom szempontjából nem relevánsak.

A monitoring rendszer

A számtalan lehetőség közül az OTLM (**O**verhead **T**ransmission **L**ine **M**onitoring) rendszert választottam. (Az eredetileg szlovén OTLM d.o.o. többségi tulajdonosa a Mosdorfer GmbH (Knill Gruppe).)

A rendszer alapvető egységei az OTLM szenzor(ok), a meteorológiai állomás(ok), kommunikáció a szerverrel, az OTLM szerver, az adatfeldolgozó és értékelő szoftver, kommunikáció a SCADA-val (99. ábra).

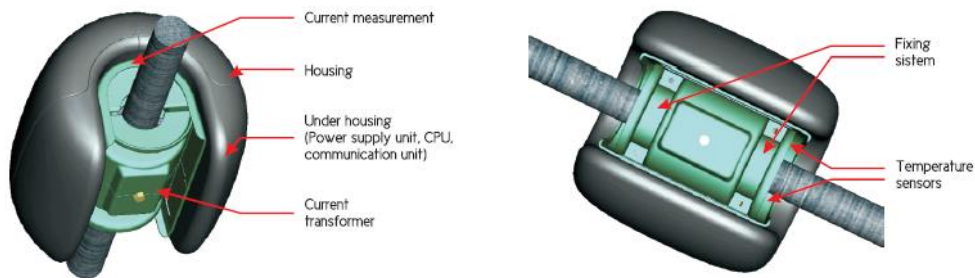


99. ábra. Az OTLM rendszer felépítése [66]

OTLM szenzor

Az érzékelő egyidejűleg méri a sodronyban folyó áramot, a sodrony hőmérsékletét, a sodrony kötélgörbe érintőszögét a felszerelés helyén (belógáshoz, föld feletti magasság számításához, jegesedéshez és jégtelenítéshez). A hőmérsékletet közvetlenül a fázisvezető érzékelőjének rögzítési pontjain méri (100. ábra). A méréseket a rendelkezésre álló kommunikációs csatornán (mobil kapcsolat, LoRa, WiFi vagy műholdas kapcsolat) továbbítja az OTLM szerverre, pontos GPS időbélyegzővel. Az érzékelőben levő áramátalakító biztosítja az áramellátást minden külső áramforrás nélkül. A tokozás tűzálló anyagból készül, nehéz környezeti feltételeknek megfelelően. Kommunikációs hiba esetén a mérési eredmények az érzékelőben tárolódnak (az utolsó 10 000 mérés). Az érzékelő felszerelhető a 15,00 mm és 45,00 mm közötti átmérőjű és legfeljebb 500 kV feszültségű sodronyokra. Az érzékelő

beépített GPS-érzékelővel rendelkezik, amely a telepített érzékelő felkutatására, valamint az idő szinkronizálására szolgál.



100. ábra. A szenzor felépítése [67]

Az OTLM eszköz telepítése a rezgés csillapító eszközök után javasolt. A szenzorokat sík területen, ahol nincsenek erdők, a távvezetési szakasz két végére elegendő telepíteni. Változatos terepen, hegyvidéken, időjárási szempontból kritikus szakaszokon legalább 4-5 érzékelő szükséges.

OTLM meteorológiai állomás

Az OTLM meteorológiai állomást a távvezeték mentén az időjárási körülmények precíz mérésére használják. A meteorológiai állomás és az OTLM szenzorok méréseit használják a távvezeték felügyeletére, az extrém időjárási viszonyok előrejelzésére (101. ábra).



101. ábra. Távvezetési oszlopra szerelt OTLM meteorológiai állomás [68]

Főbb jellemzői:

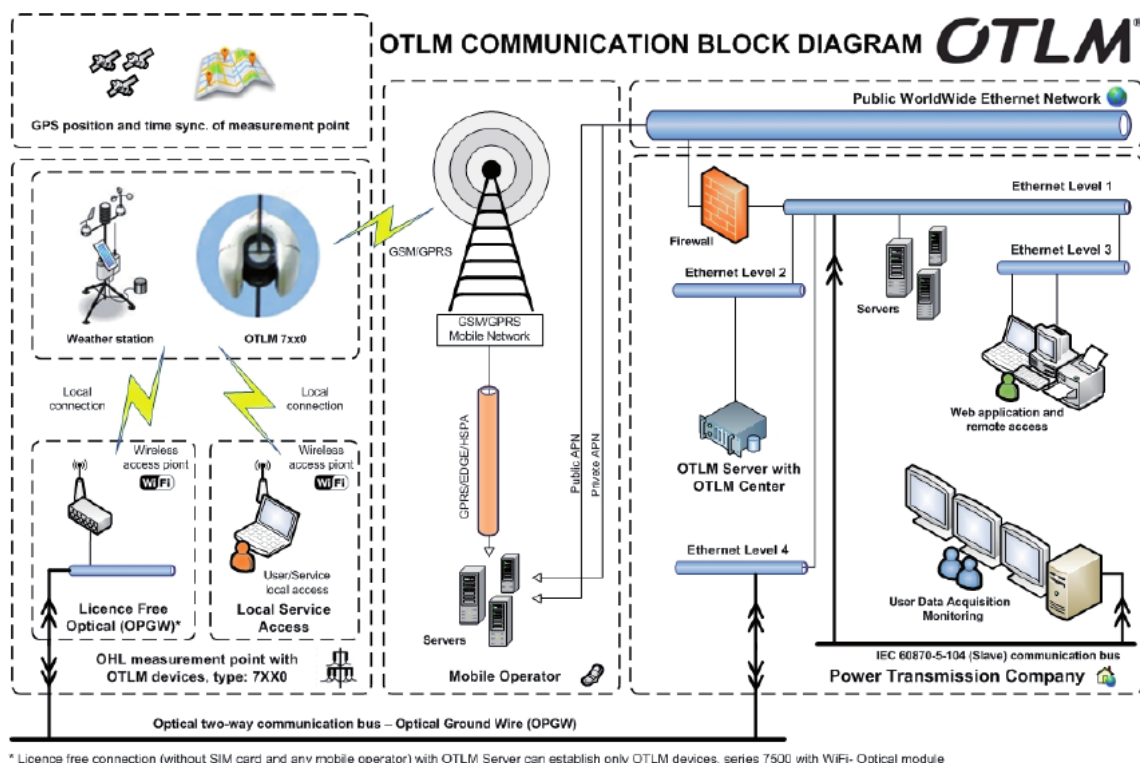
- Automatikus adatgyűjtés
- Konfigurálható mintavétel csomag-intervallum (3-30 perc)
- Automatikus adatátvitel a kommunikációs csatornán
- Helyi adatok archiválása kommunikációs hiba esetén
- Távoli újra konfigurálás, frissítés
- Riasztások beállítása

Az OTLM állomás méri a szélesebbeséget, a szélirányt, a levegő hőmérsékletét, a relatív páratartalmat, a légköri nyomást, és a napsugárzást.

Az állomás energiaellátását napelemek (ET M56620 20Wp, ET Solar, 3 panel), akkumulátor (Sonnenschein Gel 12V, 17Ah), vezérlő (Steca Solstum) biztosítja. Az autonóm működés (napelem nélkül) legfeljebb 25 napig biztosított.

Kommunikáció

A kommunikációs rendszer az elérhető kommunikációs csatornán keresztül továbbítja a mért értékeket az OTLM központba. Minden adat titkosítva van. Az OTLM rendszer mobil, nyilvános/privát csatornán vagy optikai szálon (OPGW) keresztül biztosít kommunikációt GPS időbélyegzővel (102. ábra). A méréseket és az eseményeket egy szabványosított IEC protokollon keresztül továbbítja a kiválasztott OTLM szerverre és az irányító központba (SCADA).



102. ábra. A kommunikációs rendszer blokkdiagramja [69]

A Magyarországon is elérhető kommunikációs csatornák:

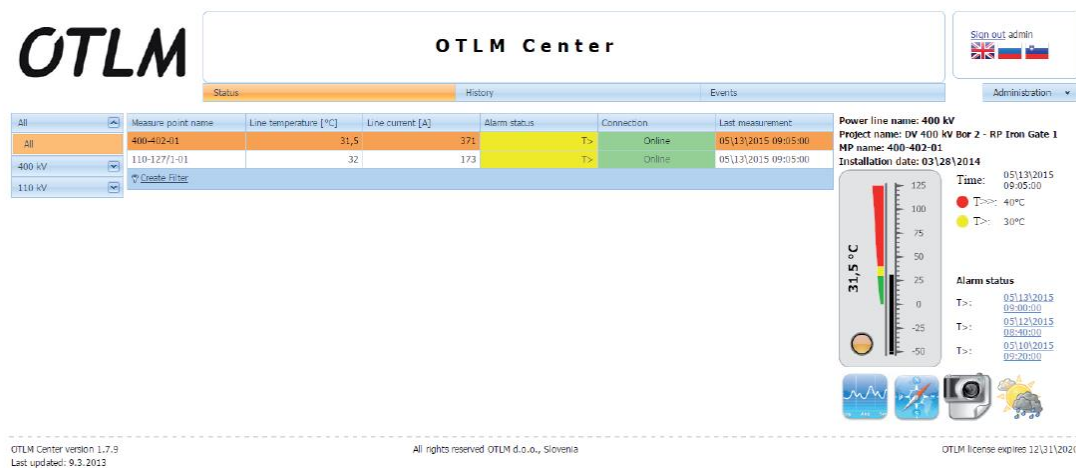
- OPGW (optikai szállal kombinált védővezető)
- Mobil kommunikáció (SIM kártya)
- LoRa
- WiFi
- Műhold

Megjegyzés: A LoRa (**Long Range**) egy kis kimenő teljesítményű, WAN hálózati (*low-power wide-area network*; LPWAN) technológia. Széles spektrumú modulációs technikát, a „*ciripelő*” spektrumot (*chirp spread spectrum*; CSS) alkalmazza átviteli megoldásként. A LoRaWAN technológia egyik legnagyobb előnye annak rendkívüli energia hatékonyságában rejlik, évekig magára hagyva, megbízhatóan működik mindenféle kiegészítő tápellátás (vezetékes áramellátás, napelem stb.) nélkül. Az Antenna Hungária Zrt. LoRaWAN hálózatának a *becsült lefedettségét* a https://www.ahrt.hu/hu/fejlesztoknek_honlapon_megtalaljuk.

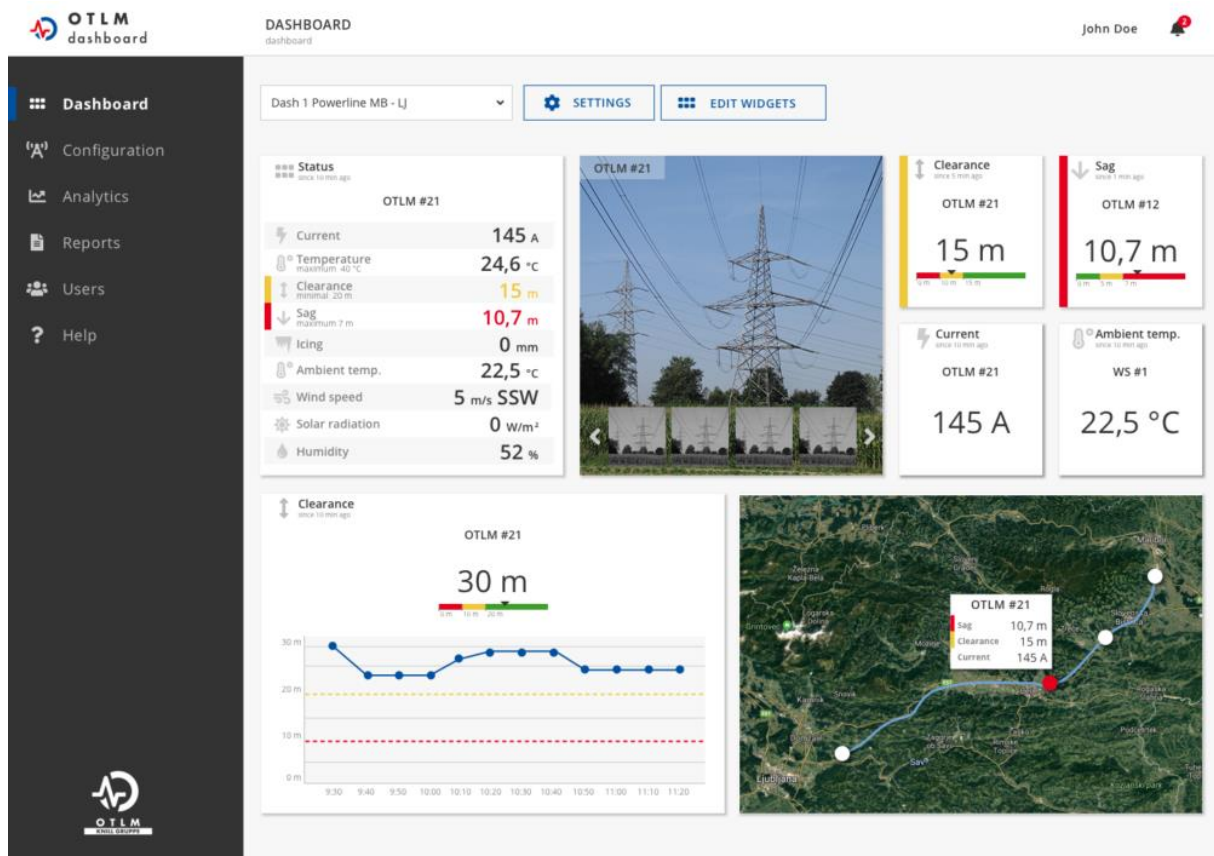
Az OTLM szerverre érkező adatok feldolgozása és kiértékelése a LiMa szoftverrel történik.

OTLM LiMa szoftver

Az OTLM LiMa (**Line Management**) egy webes alkalmazás, amelyet a mért adatok nyomon követésére, mentésére és elemzésére fejlesztettek ki (103. ábra). Ez a szoftver csatlakoztatható az SCADA-hoz egy diszpécserközpontban az IEC 60870-5-104 protokollon keresztül, vagy webszolgáltatások útján. A monitorozásra, minősítésre, beállításra, riasztásra és előrejelzésre szolgáló szoftver kétirányú kommunikációt (szerver-OTLM) és valós idejű áttekintést (elemzéseket) tartalmaz az összes OTLM rendszermérésről (numerikus vagy diagram).



103. ábra. Az adatok megjelenítése az OTLM LiMa alkalmazásban [68]



104. ábra. Feldolgozott adatok [68]

Az OTLM rendszer képes előre jelezni, észlelni a jegesedési eseményeket, valós időben jelzést adni a rendszerirányítóknak, hozzájárul a távvezeték biztonságos üzemviteléhez, ezért a kitűzött céloknak maximálisan megfelel (104. ábra).

Az ismert OTLM rendszer választását az is indokolja, hogy további fejlesztéssel, kiépítéssel (LIDAR felmérési adatok, ezekből 2D és 3D távvezeték-modellek, a kritikus feszítőközök meghatározása, belógás, földfeletti magasság számítása, jegesedés megfigyelése kamerával stb.) az átvihető teljesítmény időjárásfüggő szabályozását is segíti (DLR). Ez utóbbi téma nem képezi a vizsgálatom tárgyát.

11. A KUTATÓMUNKA EREDMÉNYEINEK ÖSSZEFOGLALÁSA

A disszertációban ismertetett - alkalmazott műszaki tudományági – munkában a választott kutatási terület a nagyfeszültségű szabadvezeteki hálózatok témakörébe tartozik.

A magyarországi villamosenergia-rendszer, az európai villamosenergia-rendszerekkel való kapcsolatának ismertetése, majd egy rövid nemzetközi kitekintés után feldolgoztam a szakirodalmat. Foglalkoztam a jegesedés kialakulásával, fajtáival és előrejelzésével. Bemutattam a jegesedés okozta tipikus káreseményeket, a távvezeteki sodronyok jégtelenítési mechanizmusait, a jégtelenítési módszereket.

Részletesen feldolgoztam a távvezeteki sodronyok hőmérsékletét befolyásoló tényezőket, a hőmérséklet számítását különböző időjárási körülmények között.

Megállapítottam, hogy a választott téma – a távvezeteki sodronyok jegesedése - kiemelt fontosságú a villamosenergia-ellátás biztonsága szempontjából.

A kutatási terület és a kutatási cél meghatározása után négy hipotézist állítottam fel.

A hipotézisek vizsgálatához alkalmazott módszerek, szoftver-rendszerek (ATP-EMTP programrendszer, LabVIEW szoftverrendszer, ANSYS 2020 R2 végeeselemes szoftverrendszer) ismertetése után bemutattam az általam kidolgozott különféle szimulációs modelleket, a numerikus analízishez kifejlesztett programokat. A különféle szimulációkkal kapott eredményeket – ahol csak lehetőség volt rá - összevetettem a valóságos nagyfeszültségű távvezetéken mért eredményekkel és a laboratóriumi mérési eredményekkel, így módon validáltam azokat. A vizsgálati eredményeket analitikusan és grafikusán is ismertettem.

A vizsgálatok után javaslatot tettem a jegesedés okozta károk elkerülését segítő korszerű meteorológiai előrejelző rendszer kiépítésére is.

A kutatási eredményeket 5 tételben foglaltam össze.

12. Új tudományos eredmények, tézisek

1. tézis: Az ATP-EMTP szimulációs rendszerben kidolgoztam az új ZSCiGW (Zero Sequence Component in Ground Wire) modellezési eljárást, amely az átviteli és elosztóhálózatokon alkalmazott távvezetékek védővezetőiben létrehozható áram nagyságának meghatározására szolgál. Az eljárás kidolgozásánál figyelembe vettem, hogy Magyarországon, a nagyfeszültségű hálózatokon alkalmazott oszlopok és védővezetők hatásosan földelt rendszerűek, így normál üzemállapot esetén a védővezetőben nem folyik áram. Az eljáráshoz kidolgozott szimulációs környezet tetszőleges típusú oszlopok és tetszőleges oszlopközök esetén is alkalmas a védővezetőben folyó áram meghatározására. A számítógépes szimulációval kapott eredményeket analitikus számítással, valamint valóságos távvezetéken történt mérés segítségével validáltam.
[43], [44], [54]
2. tézis: A ZSCiGW modellel végzett szimuláció és a mérések alapján megállapítottam, hogy a nagyfeszültségű távvezetékek védővezetőiben zérus sorrendű megtáplálás esetén a fázisvezetőkben folyó áram (I_0) mintegy 60 %-a mérhető, ezért az ilyen elrendezéssel megvalósítható a védővezető(k) jégtelenítése.
[43], [44], [54]
3. tézis: Létrehoztam egy komplex villamos és hőtani távvezetési modellt, valamint új szimulációs szoftvert (TDNw – Transmission and Distribution Network algorithm) fejlesztettem ki a National Instruments LABVIEW moduláris programkörnyezetben. A blokkokból kialakított program a célirányosan elhelyezett smart meteorológiai érzékelők adataira és az átviteli rendszerirányítók SCADA csatornákon beérkező valós terhelési adataira, valamint az adott összeköttetés fizikai paramétereire épül, alkalmas tetszőleges ACSR sodrony melegedésének, és rétegáramainak meghatározására a ráadott terhelés függvényében. Az eredmények grafikus és analitikus módon is megjeleníthetőek, melynek alkalmazásával lehetővé vált a villamosenergia-átviteli és – elosztóhálózati rendszer villamos és termikus modellezése átviteli kapacitás, rétegáramok és teljesítmények, valamint a kialakuló sodronyhőmérsékletek tekintetében. A számítógépes szimulációval kapott eredményeket laboratóriumi méréssel validáltam.
[56], [64]

4. tézis A FEdA (Finite Element deicing Analysis) végelelemes szimulációs vizsgálatokat olyan, termikus és mechanikai szempontból is több lépésben finomított VEM modellt fejlesztettem ki, amely során az ACSR sodronyokat nem tömör rúdként, hanem az acélsodrony és alumíniumkoszorú tényleges kialakításával vettem figyelembe, a melegedés egy kapcsolt hőtani-villamos számításra alapul, a jegesedést pedig három különböző jégalakokkal modelleztem (szimmetrikus körgyűrű alakú jég, aszimmetrikus kialakítású jég, valamint a valóságos esetekhez hasonló komplex geometriai kialakítású ún. „rűcskös” jég). A FEdA modell a szimuláció során figyelembe tudja venni az olvadás miatti tömeg- és geometriai változást is. A szimulációval kapott eredményeket ebben az esetben is laboratóriumi sodrony melegedési és jégolvadási mérés segítségével validáltam.

[55], [56]

5. tézis A FEdA szimuláció során a jégolvadás folyamatának elemzését mesterségesen kialakított jég térfogatának változásával vizsgáltam. A védővezetőn kialakult különböző alakú jég rétegek hőmérsékletváltozását vizsgálva (amelynek során az olvadás bekövetkezik) megállapíthatjuk, hogy terheletlen fázisvezetőknél képződött mindhárom vizsgált jégmodell esetében közel azonos olvadási görbét kapunk, tehát megállapítható, hogy a jegesedés vizsgált alakjának, nincs jelentős befolyása a jégolvasztás folyamatára.

[55], [56]

13. Javaslatok a kutatás folytatására

A megbízható, modern és kiemelten jó minőségű energiaellátás biztosítása nemzetgazdasági szempontból kiemelten fontos. Ugyanakkor azt tapasztaljuk, hogy a szélsőséges időjárási körülmények egyre gyakrabban veszélyeztetik a villamosenergia-rendszer biztonságos üzemvitelét az átviteli és az elosztóhálózatokon. Kutatási eredményeimmel a villamosenergia-ellátás biztonságának javításához szeretnék hozzájárulni.

Kutatómunkám során létrehoztam a távvezetési sodronyok olyan villamos- és hőtani modelljeit, amelyekkel — különféle programrendszerek segítségével — szimulálni tudtam a zérussorrendű megtáplálás hatására a védővezetőkben indukálódó áram nagyságát, a sodronyok melegedését az áram és a környezeti meteorológiai hatások figyelembevételével, a jégolvasztás folyamatát. Javaslatot tettem professzionális meteorológiai előrejelző rendszer kialakítására. A numerikus analízissel kapott eredményeket mérésekkel validáltam.

Kutatómunkám folytatása során további mérésekkel és szimulációkkal szeretném vizsgálni, hogy a zérussorrendű megtáplálás hatására a védővezetőkben folyó áram nagyságát hogyan befolyásolja

- az oszlopok különféle konstrukciója
- a távvezetékek (oszlopok, szerelvények stb.) életkora, korróziós állapota, a földelések állapota stb.
- a terület domborzata
- a hálózatkép változása (felhasítások, T-leágazás)

A zérussorrendű megtáplálás hatásainak méréséhez szükség lesz a MAVIR és/vagy az áramszolgáltatók segítő közreműködésére.

További hasznos vizsgálat lehet régi távvezetékek esetén HTLS sodrony alkalmazása az átviteli kapacitás növelésére és ennek hatása a védővezető sodronyok jegesedésére.

Ezekkel a vizsgálatokkal is szeretném csökkenteni a jegesedések (ónos esők) által előidézett távvezetési károsodások mértékét.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Nemzeti Fejlesztési Minisztérium: Nemzeti Energiastratégia 2030, Budapest, 2012, ISBN 978-963-89328-1-5 és
Innovációs és Technológiai Minisztérium: Nemzeti Energiastratégia 2030, kitekintéssel 2040-ig, 2020. január, <https://www.enhat.mekh.hu/strategiak> (Letöltve: 2020.05.27.)
- [2] A magyar villamosenergia-rendszer (VER) 2018. évi adatai, Magyar Energetikai És Közmű-Szabályozási Hivatal, <http://mekh.hu/a-magyar-villamosenergia-rendszer-ver-2018-evi-adatai>,
(Letöltve: 2020.05.27.)
- [3] MAVIR: A rendszerirányítás 70 éves története, <https://www.mavir.hu/web/mavir/rolunk/>
(Letöltve: 2020.05.27.)
- [4] Áttekintő ábra a magyar villamosenergia-rendszer legfontosabb adatairól,
<http://www.mavir.hu/web/mavir/home> (Letöltve: 2020.05.27.)
- [5] World Nuclear Association: Nuclear Power in China, <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-a-f/china-nuclear-power.aspx> (Letöltve: 2020.05.27.)
- [6] Global Energy Network Institute: Scetch map of national power networks
http://www.geni.org/globalenergy/library/national_energy_grid/china/chinesenationallelectricitygrid.shtml
(Letöltve: 2020.05.27.)
- [7] FREX OSM: Russian Electricity
<https://frexosm.ru/power/#4/51.78/67.65> (Letöltve: 2020.05.27.)
- [8] Russia electricity production https://en.wikipedia.org/wiki/Electricity_sector_in_Russia#cite_note-exgovelect-1
(Letöltve: 2020.05.27.)
- [9] Global Energy Network Institute: National Energy Grid Canada
http://www.geni.org/globalenergy/library/national_energy_grid/canada/index.shtml
(Letöltve: 2020.05.27.)
- [10] Task Force: Guidelines for Meteorological Icing Models, Statistical Methods and Topographical Effects, CIGRE, Paris, April 2006
- [11] Guidelines for Field Measurement of Ice Loadings on Overhead Power Line Conductors, CIGRÉ TB 179, "", August 2000.

- [12] HORVÁTH Á., SIMON A.: Az áramszolgáltatást veszélyeztető szélsőséges téli időjárási helyzetek, Védelem Tudomány – IV. évfolyam, 4. szám, 2019. 10. hó
<http://www.vedelemtudomany.hu/articles/06-horvath-simon.pdf> (Letöltve: 2020.05.27.)
- [13] Fotó: MVM XPERT (OVIT) Zrt.
- [14] Fotó: EON DÉDÁH Zrt.
- [15] MOLNÁR I: Felkészülés havária helyzetekre az E.ON elosztóknál, MEE vándorgyűlés, 2015. szeptember 17. http://www.mee.hu/files/files/b5_molnari.pdf (Letöltve: 2020.05.27.)
- [16] Fotó: MAVIR Zrt.
- [17] Working Group B2.29: Systems for Prediction and Monitoring of Ice Shedding, Anti-Icing and De-icing for Overhead Power Line Conductors and Ground Wires, 438 TECHNICAL BROCHURE CIGRE, ISBN: 978-2-85873-126-8
- [18] ZHAO, J., GUO, R., CAI, L.: Improvement of LineROver: A mobile robot for de-icing of transmission lines, 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry, Montreal, Quebec, Canada, 2010.
- [19] Thermal behaviour of overhead conductors, Technical Brochure 207, CIGRE, Paris, , August 2002.
- [20] IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors, IEEE Std 738™-2006 (Revision of IEEE Std 738-1993), 30 January 2007.
- [21] Working Group B2.43: Guide for Thermal Rating Calculations of Overhead Lines, CIGRE, Paris, December 2014. ISBN: 978-2-85873-302-6
- [22] MORGAN, V.T. : The current-carrying capacity of bare overhead conductors, Institution of Engineers, Australia, Electrical Engineering Trans., Vol. EE4, pp. 63-72, 1968.
- [23] CARROLLTON, GA.: Overhead Conductor Manual, 2nd Edition, (Ed. Ridley Thrash), Southwire Company, 2007.
- [24] EWAN, A.W.: A set of curves for skin effect in isolated tubular conductors, General Electric Review, Vol. 33, pp.249-251, 1930.
- [25] MORGAN, V. T.: Rating of bare overhead conductors for continuous currents, Proc. IEE (London), Vol. 114, pp. 1473-1482, 1967.
- [26] MORGAN, V.T.: The thermal rating of overhead line conductors, Part 1- the steady state thermal model, Electric Power Systems Research, pp. 119-139, 1982.

- [27] SHARMA, M.R. and PAUL, R.S.: Total, direct and diffuse solar radiation in the tropics, *Solar Energy*, Vol. 9, pp. 183-192, 1965.
- [28] MEINEL, A.B. and MEINEL, M.P.: *Applied Solar Energy. An Introduction*, Addison Wesley, New York, 1976.
- [29] SPENCER, J.W.: Calculation of solar position for building purposes, CSIRO Australia Division of Building Research, Technical Paper No. 14, 1965.
- [30] DOUGLASS, D.A., CLAIRMONT, B., IGLESIAS, J., PETER, Z.: Radial and Longitudinal Temperature Gradients in Bare Stranded Conductors with High Current Densities, Cigré Paper B2-108, Paris, August 2012.
- [31] MORGAN, V.T.: The radial temperature distribution and effective radial thermal conductivity in bare solid and stranded conductors, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 5, pp. 1443-1452, July 1990.
- [32] CHEN, S. L., BLACK, W.Z. and LOARD, H.W.: High-Temperature Ampacity Model for Overhead Conductors, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 17, No. 4, pp. 1136-1141, October 2002.
- [33] IEEE Std 738-2012, "IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors". October 2012.
- [34] MORGAN, V.T.: The heat transfer from bare stranded conductors by natural and forced convection in air, *Inter. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 16, pp. 2022-2034, 1973.
- [35] KAZAKEVICH, F.P.: Effect of the angle of incidence of a gas stream on the heat transfer from a circular cylinder, *Zhur. Tekh. Fiz.*, Vol. 24, pp. 1341-1347, 1954.
- [36] MORGAN, V.T.: *Thermal Behaviour of Electrical Conductors, Steady, Dynamic and Fault-Current Ratings*, Research Studies Press, John Wiley & Sons, New York, 1991.
- [37] WYLIE, R.G. and LALAS, T.: Confirmation and interpretation of a kink in the Nu (Re) plot for a cylinder in a transverse stream, *Proc. Second Australasian Conf. on Heat and Mass Transfer*, Sydney, pp. 273-278, 1977.
- [38] CHISHOLM, W.A. and BARRETT, J.S.: Ampacity Studies on 49°C-Rated Transmission Line, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 4, No. 2, April 1989.
- [39] DAVIS, M.W.: Nomographic computation of the ampacity rating of aerial conductors. *Trans. IEEE on Power Apparatus and Systems*, Vol. 89, no. 3, March 1970.
- [40] LIENHARD IV, J.H. and LIENHARD V, J.H., *Heat transfer textbook 3rd ed.* Phlogiston press, Cambridge, Massachusetts, 2008.

- [41] Working Group B2.12.: Guide for the selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings, Technical Brochure 299, CIGRE, Paris, August 2006.
- [42] MAVIR, MAHALIA adatbázis
- [43] BAGI, T.: A method presented by measurements to prevent harmful effects of icing forming on ground wires of high-voltage transmission lines, In: Francesca, Cosmi (szerk.) PROCEEDINGS OF 34th DANUBIA-ADRIA SYMPOSIUM ON ADVANCES IN EXPERIMENTAL MECHANICS, Università degli Studi di Trieste, (2017) pp. 1-3., 3 p.
- [44] BAGI, T.: Measuring Current Distribution of Phase Conductor and Current Intesity Induced in Ground Wire on the 400 kV Transmission Line, In: Kolcun, M; Kurimsky, J; Kolcunova, I (szerk.) 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017, Technical University of Kosice, (2017) pp. 681-687., 7 p.
- [45] BAGI, T. és MORVA, GY.: A jegesedés hatása a villamosenergia-rendszer biztonságos üzemvitelére, ELEKTROTECHNIKA 109 : 3 pp. 5-7., 3 p. (2016)
- [46] BAGI T. és MORVA GY.: A magyarországi átviteli hálózatokon tapasztalt jegesedési problémák vizsgálata, In: Óbudai Egyetem (szerk.), XXXIII. KANDÓ KONFERENCIA 2017: "Kandó a tudomány hajóján" Absztrakt kötet, Óbudai Egyetem, (2017) pp. 78-79., 2 p.
- [47] European EMTP-ATP Users Group, <https://www.emtp.org/> (Letöltve: 2020.05.27.)
- [48] PRIKLER, L.: Szimmetrikus összetevők számítógépi szimulációja, LABOR II. (BME VIK Villamos Energetika Tanszék, mérési útmutató 2009)
- [49] ATP Draw, <https://www.atpdraw.net/> (Letöltve: 2020.05.27.)
- [50] National Instruments: Virtuális Instrumentáció LabVIEW-el <http://www.electro.unimiskolc.hu/~elkszabo/Oktatas/Labview%20ismerteto.pdf#page=1&zoom=auto,-7,-228> (Letöltve: 2020.08.10.)
- [51] Virtual Instrumentation, <https://www.ni.com/hu-hu/innovations/white-papers/06/virtual-instrumentation.html> (Letöltve: 2020.05.27.)
- [52] ANSYS 2020 R2, <https://www.ansys.com/>
- [53] Ansys Workbench (Introduction to ANSYS Mechanical, Release 18.2, Ansys Inc., 2017.)
- [54] BAGI, T.: Nagyfeszültségű távvezetékek védővezetőiben indukálódó áramok bemutatása biztonságtechnikai szempontból, HADMÉRNÖK 12 : 3 (2017) pp. 8-14., 7 p.

- [55] BAGI, T.: Analytical and Experimental Investigation of Ice Melting in Power Line Ground Wires, PERIODICA POLYTECHNICA-MECHANICAL ENGINEERING 64 : 2 (2020) pp. 159-164. , 6 p.
- [56] BAGI, T.: Commonly Used Ground Wire of Distribution Networks under Various Operating and Load Conditions, ACTA ELECTROTECHNICA ET INFORMATICA 20 : 1 (2020) pp. 3-8. , 6 p.
- [57] Working group B2.12: Alternating Current (AC) Resistance of Helically Stranded Conductor, CIGRE 345, 2008 April
- [58] Working group B2.12: Guide for the selection of weather parameters for bare overhead conductor ratings, Technical Brochure 299, CIGRE, Paris, August 2006
- [59] FUX Rt. Termékismertető: Vezetéksodronyok
https://www.fux.hu/files/fux_katalog/fux_vezeteksodronyok.pdf (Letöltve: 2020. 11. 30.)
- [60] ANSYS 2019R2 Program Help. Canonsburg, PA, USA, 2019.
- [61] ZWIERCZYK, P. T. and VÁRADI, K.: Thermal Stress Analysis of a Railway Wheel in Sliding- Rolling Motion, J. Tribol., vol. 136, no. 3, pp. 031401–031401, May 2014.
- [62] Ice – Thermal Properties, The Engineering ToolBox, https://www.engineeringtoolbox.com/ice-thermal-properties-d_576.html
(Letöltve: 2019.10.16)
- [63] BAGI, T.: Warming and Load Testing of Steel Ground Wires in Laboratory, In: Kádár P., Lamacchia F. (szerk.), PROCEEDINGS IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE AND WORKSHOP IN ÓBUDA ON ELECTRICAL AND POWER ENGINEERING, IEEE CANDO-EPE 2018, New York (NY),: IEEE, (2018) pp. 283-287., 5 p.
- [64] BAGI, T.: Examination of a Typical High Voltage Phase Conductor Under Various Operating and Load Conditions, In: Mankovits T. (szerk.) PROCEEDINGS OF THE 6th INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING (ISCAME 2018), Book of extended abstracts, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen, (2018) p. & , 2 p.
- [65] FERNANDEZ, E., ALBIZU, I., BEDIALAUNETA, M.T., MAZON, A.J., LEITE, P.T.: Review of dynamic line rating systems for wind power integration, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 53 (2016) pp. 80-92, <https://core.ac.uk/download/pdf/158824695.pdf> (Letöltve: 2020.07.20.)
- [66] https://www.saltec.de/tl_files/Download/45_SALTEC_OTLM_eng_V13-2017.pdf
(Letöltve: 2020.07.20.)

[67] http://www.c-g.si/wp-content/uploads/2016/08/30_OTLM-ANGLESKI.pdf

(Letöltve: 2020.07.20.)

[68] <https://www.otlm.eu/> (Letöltve: 2020.07.20.)

[69] LOVRENČIĆ, V., GABROVŠEK, M., KOVAČ, M., GUBELJAK, N., ŠOJAT, Z., KLOBAS, Z.: The Contribution of Conductor Temperature and Sag Monitoring to Increased Ampacities of Overhead Lines (OHLs). Periodica Polytechnica, Electrical Engineering. (2015) 10.3311/PPee.8585. https://www.researchgate.net/figure/OTLM-Centres-platform_fig6_282661598

(Letöltve: 2020.07.20.)

[70] GESZTI, P. O.: Villamos energia rendszerek I., Tankönyvkiadó Budapest, 1986

[71] NOVOTHNY, F.: Villamosenergia-rendszerek I., jegyzet, Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar, Budapest, 2010

[72] MORVA, Gy.: Villamosenergetika, Digitális Tankönyvtár, Edutus Főiskola, 2012 https://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017_62_villamosenergetikai_rendszerek/ch03s06.html (Letöltve: 2020.05.27.)

[73] SEBŐ, I.: Szabadvezetékek villamos jellemzőinek számítása digitális számítógépen. Elektrotechnika folyóirat, 1965, 58. évf. 10.sz. pp: 396-404

[74] SHAMS GHAHFAROKHI, P., KALLASTE, A., BELAHZEN, A., VAIMANN, T., RASSÖLKIN, A.: Determination of Forced Convection Coefficient Over a Flat Side of Coil, Conference: 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON), Conference Paper, October 2017. <https://www.researchgate.net/publication/320415779> (Letöltve: 2020.07.20.)

Bagi Tamás közleményei

Tudományos folyóiratcikk

- [BT1] BAGI T. Analytical and Experimental Investigation of Ice Melting in Power Line Ground Wires, PERIODICA POLYTECHNICA-MECHANICAL ENGINEERING 64 : 2 pp. 159-164. , 6 p. (2020)
- [BT2] BAGI T. Commonly Used Ground Wire of Distribution Networks under Various Operating and Load Conditions, ACTA ELECTROTECHNICA ET INFORMATICA 20 : 1 pp. 3-8. , 6 p. (2020)
- [BT3] BAGI T., NAGY B., ORLAY I. Az átviteli kapacitás növelése HTLS sodrony alkalmazásával, ELEKTROTECHNIKA 113 : 7-8 pp. 20-22. , 3 p. (2020)
- [BT4] BAGI T. Nagyszültségű távvezetékek védővezetőiben indukálódó áramok bemutatása biztonságtechnikai szempontból, HADMÉRNÖK 12 : 3 pp. 8-14., 7 p. (2017)
- [BT5] BAGI T. MORVA, GY. A jegesedés hatása a villamosenergia-rendszer biztonságos üzemvitelére, ELEKTROTECHNIKA 109 : 3 pp. 5-7., 3 p. (2016)
- [BT6] BAGI T. A Magyarországon meglévő és a férőhely hiány miatt létesítendő büntetés-végrehajtási szervezet biztonsági rendszereivel szemben támasztott általános követelmények, BÁNKI KÖZLEMÉNYEK 1: 3 pp. 43 -48, 5 p. (2018)

Konferenciaközlemény folyóiratban vagy konferenciakötetben

- [BT7] BAGI T. Warming and Load Testing of Steel Ground Wires in Laboratory, In: Kádár P., Lamacchia F. (szerk.), PROCEEDINGS IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE AND WORKSHOP IN ÓBUDA ON ELECTRICAL AND POWER ENGINEERING, IEEE CANDO-EPE 2018, New York (NY),: IEEE, (2018) pp. 283-287., 5 p.
- [BT8] BAGI T. Examination of a Typical High Voltage Phase Conductor Under Various Operating and Load Conditions, In: Mankovits T. (szerk.) PROCEEDINGS OF THE 6th INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON ADVANCES IN MECHANICAL ENGINEERING (ISCAME 2018), Book of extended abstracts, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen, (2018) p. & , 2 p.

- [BT9] ZS. ČONKA, D. MEDVED, M. KOLCUN, S. ILENIN, J. ZBOJOVSKÝ, GY. MORVA, BAGI T. Using TCSC to improve the dynamic stability of the power system, In: Kádár P., Lamacchia, F. (szerk.) PROCEEDINGS IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE AND WORKSHOP IN ÓBUDA ON ELECTRICAL AND POWER ENGINEERING, IEEE CANDO-EPE 2018, Óbudai Egyetem, (2018) pp. 67-72., 6 p.
- [BT10] BAGI T., MORVA GY. A magyarországi átviteli hálózatokon tapasztalt jegesedési problémák vizsgálata, In: Óbudai Egyetem (szerk.), XXXIII. KANDÓ KONFERENCIA 2017: "Kandó a tudomány hajóján" Absztrakt kötet, Óbudai Egyetem, (2017) pp. 78-79., 2 p.
- [BT11] BAGI T. A method presented by measurements to prevent harmful effects of icing forming on ground wires of high-voltage transmission lines, In: Francesca, Cosmi (szerk.) PROCEEDINGS OF 34th DANUBIA-ADRIA SYMPOSIUM ON ADVANCES IN EXPERIMENTAL MECHANICS, Università degli Studi di Trieste, (2017) pp. 1-3., 3 p.
- [BT12] BAGI T. Measuring Current Distribution of Phase Conductor and Current Intesity Induced in Ground Wire on the 400 kV Transmission Line, In: Kolcun, M; Kurimsky, J; Kolcunova, I (szerk.) 9th International Scientific Symposium on Electrical Power Engineering, ELEKTROENERGETIKA 2017, Technical University of Kosice, (2017) pp. 681-687., 7 p.
- [BT13] BAGI T. A drónok térerősségel történő elvi töltési lehetőségeinek vizsgálata, In: Óbudai, Egyetem (szerk.) XIX. ŐSZI BIZTONSÁGTECHNIKAI SZIMPÓZIUM 2016. Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, (2016).
- [BT14] BAGI T. A távvezetésekre telepíthető optikai kábelek használhatóságának vizsgálata - Examination of the Transmission Lines to Install Fiber Optic Cables Usability, In: Biró, Károly Ágoston; Sebestyén-Pál, György (szerk.) ENELKO 2013 XIV. NEMZETKÖZI ENERGETIKA-ELEKTROTECHNIKA KONFERENCIA, Nagyszében, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2013), pp. 9-14. , 6 p.
- [BT15] BAGI T. Nagyfeszültségű párhuzamos kábelvonalak terhelésének vizsgálata a kábel-paraméterek, a nyomvonal jellemzők és a kábel terhelőáramának tekintetbe vételével - High Voltage Parallel Cable Lines Load Testing of the Cable Parameters, the Aligment of the Cable Characteristics and Consideration of the Load Current, In: Biró, Károly (szerk.) ENELKO 2012: XIII. NEMZETKÖZI ENERGETIKA-ELEKTROTECHNIKA KONFERENCIA = 13TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGETICS - ELECTRICAL ENGINEERING, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2012) pp. 10-15. , 6 p.

- [BT16] BAGI T. BAGI I. Szélerőmű parkok hatása a magyar villamos elosztó hálózatra - Influence of the Wind Power to the National Power Distribution Network, In: Biró, Károly Ágoston; Sebestyén-Pál, György (szerk.) XI. ENELKO - XX. SZÁMOKT NEMZETKÖZI ENERGETIKA - ELEKTROTECHNIKA ÉS SZÁMÍTÁSTECHNIKA KONFERENCIA 2010, Szatmárnémeti, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2010), pp. 8-13. , 6 p.
- [BT17] BAGI T., SZANDTNER K. Az optikai adatátviteli rendszerek alkalmazása a nagyfeszültségű villamos hálózatokon = The Optical Data Transmission Systems Adaption on the High-Voltage Networks, In: Biró, Károly Ágoston; Sebestyén-Pál, György (szerk.) X. ENELKO - XIX. SZÁMOKT: NEMZETKÖZI ENERGETIKA - ELEKTROTECHNIKA ÉS SZÁMÍTÁSTECHNIKA KONFERENCIA - INTERNATIONAL CONFERENCE OF ENERGETICS - ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE, Marosvásárhely, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság (EMT), (2009), pp. 9-15. , 7 p.

Absztrakt

- [BT18] BAGI T., KOVÁCS T. A drónok alkalmazásának lehetősége a biztonság tudományban, Előadás, VII. BDI Doktorandusz Találkozó, 2016. 10. 21,

JELÖLÉS- ÉS RÖVIDÍTÉSJEGYZÉK

AC: Alternating Current, Váltakozó áram

ACSR sodrony: Aluminium conductor steel-reinforced (cable), Acél sodrattal erősített alumínium sodrony

AI: Anti-Icing, A jegesedés kialakulásának megakadályozása

ALADIN: Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational, Numerikus időjárás előre jelző modell

AROME model: Applications de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle, Mezoskálájú numerikus időjárás előrejelző modell *(A mezoskála jellemzően a méretben 2-2000 km-ig, időben pedig az órától a napokig terjedő légköri folyamatokat öleli fel.)*

ATP-EMTP: Alternative Transient Program- Electromagnetic Transients Program, Programrendszer az elektromágneses jellegű tranziens jelenségek digitális szimulációjára

CAD: Computer Aided Design, Számítógép által támogatott tervezés

DC: Direct Current, Egyenáram

DI: Deicing, A kialakult jegesedés megszüntetése

DLR: Dynamic Line Rating, Dinamikus távvezetési teljesítmény szabályozás

DSO: Distribution System Operator, Elosztóhálózati rendszerirányító

ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Európai Középtávú Időjárás Előrejelző Központ

ENTSO-E: European Network of Transmission System Operators, Európai Villamosenergiarendszer-irányítók Szövetsége

FEdA: Finite Element deicing Analysis, A jégolvasztás végeselemes szimulációjára alkalmas modell

GSM: Global System for Mobile Communications, (eredetileg Groupe Spécial Mobile), A mobil távközlés globális szabványa

HTLS: High Temperature Low Sag, Magas hőmérsékletű, alacsony belógású (sodrony)

HVDC: High Voltage Direct Current, Nagyfeszültségű egyenáram

IEC protocol: International Electrotechnical Commission protocol, A nemzetközi elektrotechnikai szabványosítási testület által kiadott kommunikációs szabvány

ITO: Independent Transmission Operator, Független átviteli rendszerirányító

KIF: Kisfeszültségű elosztóhálózat

KÖF: Középfeszültségű elosztóhálózat

LabVIEW: Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench, Laboratóriumi virtuális műszerek grafikus programozási környezetben, programrendszer

LIDAR: Light Detection and Ranging, Lézer alapú távérzékelés

LoRa: Long Range, Kis kimenő teljesítményű, WAN hálózati (low-power wide-area network; LPWAN) technológia

MAVIR: Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zártkörűen Működő Részvénytársaság

MEKH: Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal

NAF: Nagyszültségű átviteli- vagy elosztóhálózat

OMSZ: Országos Meteorológiai Szolgálat

OPGW: Optical Ground Wire, Optikai szálakat tartalmazó védővezető

OTLM: Overhead Transmission Line Monitoring, Átviteli szabadvezeteki hálózat vizsgálata

ROV de-icer: Remotely Operated Vehicle de-icer, Távvezérelt jégtörő kocsi

SCADA: Supervisory Control And Data Acquisition, Üzemirányítók felügyeleti, szabályozó és adatgyűjtő rendszere

SVC: Static Var Compensator, Statikus meddő kompenzátor

TDNwA: Transmission and Distribution Network Warming algorithm model, Villamosenergia-átviteli és elosztóhálózat sodronyainak melegedési folyamatait bemutató modell

TSO: Transmission System Operator, Átviteli rendszerirányító

UCTE: Union for the Co-ordination of Transmission of Electricity, Unió az átviteli rendszerek koordinálásáért

VEM: Végeselemes módszer

VER: Villamosenergia-rendszer

VET: Villamosenergia-törvény, 2007. évi LXXXVI. törvény a villamos energiáról

VI: Virtual Instrument, Virtuális műszer LabVIEW programrendszerben

WRF model: Weather Research and Forecasting model, Időjárás kutatás és előrejelzés modell

ZSCiGW: Zero Sequence Component in Ground Wire model, A védővezetőben keletkező áram vizsgálatára szolgáló modell

ÁBRAJEGYZÉK

1. fejezet (A kutatási terület)

1. ábra. A villamosenergia-rendszer fizikai működési modellje
2. ábra. Az átviteli hálózat távvezetékei
3. ábra. A magyarországi hálózati elosztók
4. ábra. Az EON DÉDÁH hálózata
5. ábra. Az európai villamosenergia-rendszerek szinkronterületei
6. ábra. Magyarország villamosenergia-fogyasztása és áramkereskedelme a szomszédos országokkal
7. ábra. Atomerőművi fejlesztések Kínában
8. ábra. A hálózatok földrajzi elhelyezkedése Kínában
9. ábra. Oroszország villamos átviteli hálózata
10. ábra. Erőmű típusok éves termelési kapacitása Oroszországban
11. ábra. Kanada átviteli hálózata és az USA-val való összeköttetések
12. ábra. Az egyenáramú jégtelenítés tipikus elrendezése

3. fejezet (A kutatómunka tudományos előzményei a szakirodalomban)

13. ábra. Jégpáncél
14. ábra. Zúzmarás "jég-zászló"
15. ábra. Nedves hó szabadvezetéki sodronyon
16. ábra. Száraz hó szabadvezetéki sodronyon
17. ábra. Dér felhalmozódás kikötött portálon
18. ábra. A sodronyokra rakódott rendkívül vastag jégréteg
19. ábra. A sodronyokra tapadó jég és hó
20. ábra. Ónos eső után a megnövekedett belógás
21. ábra. A Kisvárda-Sajószöged és Munkács-Tiszalök 220 kV-os, kétrendszerű távvezetéken kidőlt oszlopok
22. ábra. A Munkács-Sajószöged 400 kV-os kikötött portál oszlop károsodása
23. ábra. A leszakadt fázisvezető sodronyok
24. ábra. Kidőlt oszlopok
25. ábra. Kidőlt oszlop

26. ábra. Az M31 autópályát keresztező oszlopközben a leszakadt sodronyok
27. ábra. Az M31 autópályát keresztező oszlopközben a leszakadt sodronyok
28. ábra. A ROV típusú jégtörő
29. ábra. Szabadvezeték melegedését és hűlését befolyásoló tényezők
30. ábra. A skin-hatás-tényezőjének változása adott sodronyméreteknél
31. ábra. Konvekciós hűtés alacsony szélesség esetén

4. fejezet (A kutatásokat megalapozó előzetes vizsgálatok)

32. ábra. Tiszai Hőerőmű – Sajószöged 400 kV-os távvezetékek átnézeti helyszínrajza
33. ábra. A távvezetési modell a kiinduló állapotban
34. ábra. A 3F 0,4 kV-os megtáplálás kapcsolási vázlata és a megtáplálás megvalósítása
35. ábra. Mérési helyek a távvezeték átnézeti helyszínrajzán
36. ábra. A méréshez használt MW 3500 típusú lakatfogó
37. ábra. A méréshez használt kosaras kocsi
38. ábra. 1F 0,4 kV-os megtáplálás kapcsolási vázlata
39. ábra. A 2. sz. oszlop fázisvezetőinek földelése
40. ábra. Átnézeti helyszínrajz
41. ábra. Nyomvonalrajz részlet
42. ábra. Hosszelvényrajz részlet
43. ábra. A mérőberendezés
44. ábra. Mérőberendezés elhelyezése a távvezetési oszlopon
45. ábra. Regisztrált meteorológiai adatok
46. ábra. A sodrony hőmérséklet és a terhelési adatok összehasonlítása

6. fejezet (Alkalmazott eszközök és módszerek)

47. ábra. Az ATP-EMTP szimulációs rendszer sematikus vázlata
48. ábra. Az ATPDraw Windows platformon
49. ábra. Az ATPDraw menüjéből elérhető áramköri elemek
50. ábra. Front Panel (részlet)
51. ábra. Blokkdiagram (részlet)

7. fejezet (Számítógépes vizsgálatok, numerikus analízis)

- 52. ábra. Generátor OT+0 és Generátor OVSF+0 oszlopok felső része
- 53. ábra. A távvezetési modell egy részlete
- 54. ábra. A távvezeték pozitív sorrendű modellje
- 55. ábra. A távvezeték zérus sorrendű modellje
- 56. ábra. A henger falának relatív vastagsága
- 57. ábra. Az acél-mag-sodrat permeabilitása a mágneses térerősség függvényében
- 58. ábra. A réteg hőmérsékletek időbeni változását bemutató diagram
- 59. ábra. Az „ACSR Kábel Egyéni Adatokkal.vi” Front Panelja
- 60. ábra. A Front Panel egy részlete
- 61. ábra. A Blokkdiagram részletei
- 62. ábra. A rétegek hőmérséklete
- 63. ábra. Sodronymelegedés (szélsebesség 1 m/s, környezeti hőmérséklet $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, napsugárzás 300 W/m^2 , effektív áramerősség 100 A)
- 64. ábra. Sodronymelegedés (szélsebesség 1 m/s, környezeti hőmérséklet $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, napsugárzás 300 W/m^2 , effektív áramerősség 150 A)
- 65. ábra. Sodronymelegedés (szélsebesség 3 m/s, környezeti hőmérséklet $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, napsugárzás 300 W/m^2 , effektív áramerősség 150 A)
- 66. ábra. Sodronymelegedés (szélsebesség 3 m/s, környezeti hőmérséklet $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, napsugárzás 300 W/m^2 , effektív áramerősség 150 A)
- 67. ábra. Sodrony átlaghőmérséklete különféle körülmények között
- 68. ábra. A sodrony egyszerűsített modellje
- 69. ábra. A jeges sodrony egyszerűsített modellje
- 70. ábra. A jég hővezetési tényezője a hőmérséklet függvényében
- 71. ábra. A sodrony melegedése az idő függvényében
- 72. ábra. A jég melegedése az idő függvényében
- 73. ábra. A jég tömege az idő függvényében
- 74. ábra. A jég fél-gyűrű melegedési folyamatának ábrázolása
- 75. ábra. A hőmérsékletek 1000 s után
- 76. ábra. A hőmérsékletek 4150 s után

77. ábra. Hőmérsékletek az idő függvényében
78. ábra. A vizsgálat során alkalmazott vezetéksodrony geometria
79. ábra. Végeselemes háló felépítése a vezetéksodrony keresztmetszetén és palástfelületén szemléltetve
80. ábra. A végeselemes vizsgálat során alkalmazott terhelések és peremfeltételek
81. ábra. A sodrony melegítés villamos elrendezése
82. ábra. A vezetéksodrony maximális hőmérsékletének felfutása a vizsgálat során
83. ábra. A vezetéksodrony hőmérsékleteloszlás a modellen szemléltetve a vizsgálat utolsó időpillanatában
84. ábra. A vizsgálat során alkalmazott jegesedett vezetéksodrony geometriai variánsok
85. ábra. Végeselemes háló felépítése a szimmetrikus jéggel terhelt vezetéksodronyon
86. ábra. A jég térfogatának változása az olvadás folyamán az idő függvényében
87. ábra. A vezetéksodronyra ráfagyott jég olvadási folyamata

8. fejezet (A jégolvasztás kísérleti vizsgálata)

88. ábra. Hőszigetelt tároló láda sodronnyal és szárazjéggel
89. ábra. Jég képzés a sodrony egy szakaszán
90. ábra. Jeges sodronyok a kísérletben
91. ábra. A sodrony megtáplálása és a hőmérséklet érzékelők
92. ábra. A védővezető sodrony melegevése jég nélkül
93. ábra. A védővezető sodrony melegevése szimulációval
94. ábra. A jeges sodrony vizsgálata
95. ábra. A jégolvadás kezdeti szakasza
96. ábra. A jégolvadás végső szakasza
97. ábra. A jeges sodrony hőmérséklete az idő függvényében

10. fejezet (Javaslat meteorológiai előrejelző rendszer kiépítésére)

98. ábra. Sodronyokra szerelt érzékelők
99. ábra. Az OTLM rendszer felépítése
100. ábra. A szenzor felépítése
101. ábra. Távvezetési oszlopra szerelt OTLM meteorológiai állomás

102. ábra. A kommunikációs rendszer blokkdiagramja

103. ábra. Az adatok megjelenítése az OTLM LiMA alkalmazásban

104. ábra. Feldolgozott adatok

NYILATKOZAT

Alulírott Bagi Tamás Zoltán kijelentem, hogy ezt a doktori értekezést magam készítettem, és abban csak a megadott forrásokat használtam fel.

Dolgozatomban minden olyan részt, amelyet szó szerint vagy azonos tartalommal átvettem, a forrás megadásával egyértelműen megjelöltem.

Budapest, 2021.



Bagi Tamás Zoltán

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani az Óbudai Egyetem Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar Villamosenergetikai Intézetének és a Biztonságtudományi Doktori Iskolának, hogy helyet adott a témámnak és támogatta kutatómunkámat.

Köszönetemet fejezem ki Morva Györgynek témavezetőmnek és Novothny Ferencnek sokéves szakmai támogatásáért és értekezésem elkészítésében nyújtott folyamatos és áldozatos segítségéért. Külön köszönettel tartozom Prikler Lászlónak, Varga Lászlónak, Pekánovics Lászlónak és Lipovszki Györgynek a szakmai és tudományos támogatásukért.

Kutatásaim az Óbudai Egyetem Alkalmazott Tudományágak és Technológiák az Energetikában (AD&TE) kutatócsoportban valósult meg. Külön köszönöm kutatótársaimnak, Pálfi Judithnak, Holcsik Péternek, Dineva Adrienn-nek és Ónka Zsoltnak a közös munkát.

Köszönöm Dr. Bagi István Jánosnak az ELINOR Mérnökiroda Kft. ügyvezető igazgatójának, hogy kutatásom támogatta. Külön köszönöm a kutatási célra rendelkezésemre bocsájtott adatokat és erőforrásokat.

Köszönöm az elnöknek, a szigorlati bizottsági tagoknak, az opponenseknek, és a tartalék elnöknek, a titkárnak és a külső tagoknak áldozatkész közreműködésüket a fokozatszerzési eljárásban.

Végül, de nem utolsósorban szeretném megköszönni családomnak, kiváltképp édesapámnak, aki végtelen türelemmel és 40 éves szakmai háttérrel és tapasztalattal állt mellettem, és támogatott mindenben.

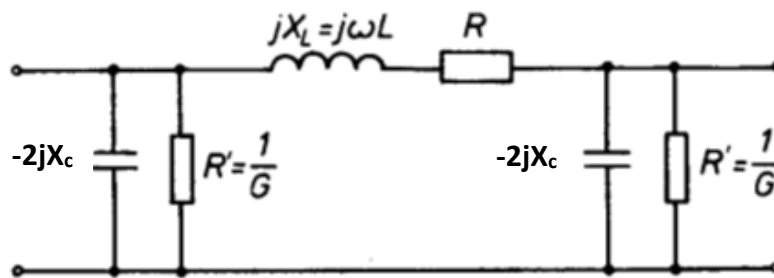
MELLÉKLET

M1. A védővezetőkben indukálódó áramok számítása 400 kV-os egyrendszerű két védővezetős távvezetéken

Az 4.1. és 7.1. fejezetben ismertetett mérés és szimuláció eredményeinek analitikus ellenőrzésére a távvezeték egyszerűsített modellezésével számításokat végeztem. Ezekhez a számításokhoz az említett távvezeték tényleges paramétereit vettem alapul.

1. A számítások elméleti háttere

A nagyfeszültségű szabadvezetékek számításához a villamos paramétereket fajlagosan (egységnyi hosszúságra vonatkoztatva) célszerű megadni. A szükséges paraméterek a soros ellenállás és induktivitás (induktív reaktancia), valamint a keresztirányú levezetés (ohmos ellenállás) és kapacitív admittancia (reaktancia). A szabadvezetékek egyfázisú π kapcsolását szemlélteti az alábbi ábra (M1, ábra).



M1. ábra. Egyfázisú π kapcsolás [70]

Az általam vizsgált távvezeték egyrendszerű háromfázisú, de fázisonként kettős kötegvezetővel és két védővezetővel lett kialakítva, így az induktivitás számításnál különböző bonyolultságú és egymásba épülő hurkokkal kell számolni. A számítások egyszerűsítése érdekében a szabadvezeték vezetőit egymással párhuzamosnak és tökéletesen egyenesnek tekintjük, amelyek a föld homogén vízszintes síkkal határolt felületével is párhuzamosak. (Természetesen a gyakorlatban nincs így). A szabadvezetékek ön és kölcsönös indukció számításainál bevezetjük a mágneses és geometriai szempontból egyenértékű GMR sugarat, melyet az M1. összefüggéssel számíthatunk [70, 71].

$$GMR = r \cdot e^{-\frac{\mu_r}{4}} \quad (M1.)$$

Tömör, körkeresztmetszetű, nem mágneses vezető feltételezve

$$GMR = r \cdot e^{-\frac{1}{4}} = 0,7788 \cdot r \quad (M2.)$$

A GMR segítségével felírt öninduktivitás külső inductívitás, ami azt jelenti, hogy az r sugarú vezetőt mágneses szempontból egy végtelen vékony falú GMR sugarú csővel helyettesíthetjük. Ennek belsőjében nem folyik áram, nincs mágneses tér, tehát csak külső inductívitása van.

A távvezeték inductívitásai az alábbi képletek alapján számíthatók:

$$L_{\text{ön}} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot l \cdot \left(\ln \frac{2l}{r} + \frac{\mu_r}{4} - 1 \right) \left[\frac{\text{H}}{\text{m}} \right]$$

$$L_{\text{kölcsönös}} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot l \cdot \left(\ln \frac{2l}{D} - 1 \right) \left[\frac{\text{H}}{\text{m}} \right]$$

(M3.)

Ezekből a hosszegységre eső inductívitás kör keresztmetszetű, nem mágneses vezetősárla:

$$L_{\text{ön}} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\ln \frac{D}{r} + \ln \frac{r}{GMR} \right) \left[\frac{\text{H}}{\text{m}} \right]$$

(M4.)

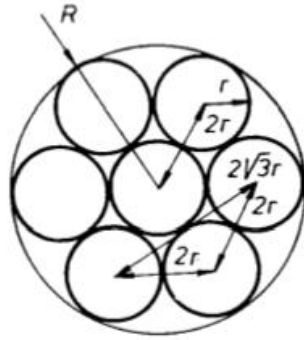
A belső reaktancia 50Hz-en, és 1 km-es hosszt feltételezve:

$$X_{\text{belső}} = 0,145 \cdot \lg \frac{r}{GMR} \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right]$$

(M5.)

Ha a vezető anyaga mágneses, a képletek μ_r -el szorzódnak. A különböző vastagságú vezetők egyenértékű redukált sugara ($0,7788 \cdot r - 1,0000 \cdot r$) tartományba esik. Itt is meg kell említeni, hogy az acél – alumínium vezetők esetén (ACSR) a magot egy acél mag alkotja, míg a külső vezetőréteget az alumínium réteg alkotja, amely kb. 6x -os keresztmetszetű. Az alumínium fajlagos vezetése 35/4,17 arányban nagyobb az acélnál, így összességében kb. 50x akkora áramot vezet az alumínium sodrat, mint az acélmag. Figyelembe véve a szkinhatást, amely különösen a nagyobb vezetőkeresztmetszeteknél lehet jelentős, az acélsodrony kb. 1-2% át vezeti a teljes áramnak.

Az eddig bemutatott számításokban a vezetőt körhengernek tekintettük. A valóságban azonban a szabadvezetékeken sodronyokat alkalmaznak. Ezek egymásra sodort huzalok, amelyek egyenként valóban körhengerek. A keresztmetszetben a körök érintik egymást. Az alábbiábra hét azonos keresztmetszetű huzalból sodrott vezetőt mutat be (M2. ábra).



M2. ábra. A sodrony keresztmetszete a GMR számításhoz a távolságokkal [70]

Az elrendezésből adódóan a csoportokra vonatkozó azon feltételek, hogy a vezetők távolsága a sugarakhoz képest nagy legyen, továbbá, hogy az áram egyenletesen oszoljék meg az egyes vezetőkön, nem teljesülnek. Az ebből eredő szkinhatás azonban körülbelül 300 mm²-es sodronykeresztmetszetig nem jelentős, és így az árameloszlás megközelítőleg egyenletes. Ezért a gyakorlati számításokhoz jól lehet használni a csoportra vonatkozó egyenleteket:

$$GMR_{cs} = \sqrt[N^2]{GMR_{a1} \cdot GMR_{a2} \dots GMR_{aN} \cdot D_{a1a2}^2 \cdot D_{a1a3}^2 \cdot \dots \cdot D_{a1aN}^2 \dots \cdot D_{a(N-1)aN}^2}$$

Az M2. ábrán feltüntetett távolságok figyelembevételével az egyenlet:

$$GMR_{cs} = \sqrt[49]{(0,7788r)^7 \cdot (2r)^6 \cdot (2r)^{18} \cdot (2\sqrt{3}r)^{12} \cdot (4r)^6}$$

$$GMR_{cs} = r \cdot \sqrt[49]{(0,7788r)^7 \cdot 2^{48} \cdot 3^6} = 2,1759 r$$

(M6.)

Átszámítva az eredményt a külső burkoló kör sugarára: $R = 3r$; $r = \frac{R}{3}$:

$$GMR_{cs} = \frac{2,1759 R}{3} = 0,7253 R$$

(M7.)

A valós távvezetékek kialakításoknál, ahol az „a” fázisvezető nem egyetlen vezetőből, hanem „N” darab vezetőből áll, valamint ezek a vezetők egymástól $D_{a1a2} \dots D_{a1aN}$ távolságra vannak, és az áram egy másik vezetőcsoporton „b” fázison folyik vissza, amelynek a vezető száma „M” egy újabb fogalmat célszerű definiálni, ez pedig a vezetőcsoportok közötti GMD távolság, amely a következő összefüggéssel számítható:

$$GMD = \sqrt[NM]{D_{a1b1} \cdot D_{a1b2} \dots D_{a1bM} \cdot D_{a2b1} \cdot D_{a2b2} \cdot \dots \cdot D_{a2bM} \dots \cdot D_{aNb1} \cdot D_{aNb2} \dots D_{aNbM}}$$

(M8.)

A számításnál feltételezzük, hogy az „a” fázisban az egyes vezetőkben az áram N-ed része folyik, míg a „b” fázisban visszafolyó áram esetén M-ed része folyik az egyes vezetőkben.

Az ismertett összefüggésekből az egyszerűsítések, összevonások után az „a” és a „b” rendszer eredő reaktanciája (X_a , X_b)

$$X_a = 0,145 \lg \frac{GMD}{GMR_{csa}},$$

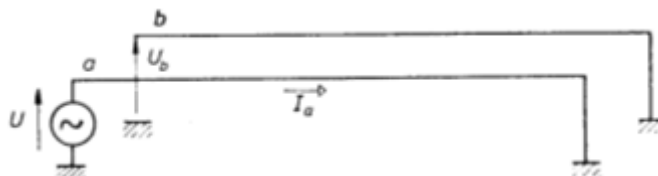
$$X_b = 0,145 \lg \frac{GMD}{GMR_{csb}}.$$

(M9.)

A számításoknál figyelembe kell venni, hogy a szabadvezetékek általában olyan hálózatrendszer elemei, melyeknek csillagpontja közvetlenül vagy impedancián keresztül össze van kötve a földdel, és így üzemszerűen, zárlatoknál, kapcsolásoknál — tehát stacioner és tranziens állapotban — áramok folynak a földben. Ezért a föld áramvezető képességének ismerete is szükséges a számítások elvégzéséhez. A föld rossz vezető a fémekhez képest. A vezető sodronyok keresztmetszete csak ritkán haladja meg a fázisonkénti 1000 mm²-t; a földben azonban óriási (sokszor km² nagyságrendű) keresztmetszeten folyhat az áram, ami kompenzálja a fémekénél nagyságrenddel rosszabb vezetőképeséget. Ebből következik, hogy a földben folyó áramokkal szembeni impedancia jelentős része rendszerint az áram be-, illetve kilépésének környékén van, ahol a keresztmetszet még „kicsi”.

A kör keresztmetszetű vezetőt vízszintesnek tételezzük fel „h” magasságban a föld felett. A földet síkkal határolt végtelen féltérként vesszük figyelembe, amelynek helytől és időtől független vezetőképesége van, tehát homogén és egyéb elektromágneses jellemzői is állandóak, azaz $\epsilon_r = \mu_r = 1$. Természetesen a gyakorlatban ezek a feltételek nem teljesülnek: a vezető magassága a föld felett nem állandó, a vezető nem vízszintes, a föld nem homogén, abban rétegek vannak, a csapadékszint, a föld vezetőképesége változik stb.

Ezek a feltételek, amelyek a problémát kezelhetővé teszik, elfogadhatók, de a kapott eredmények étékelésénél, felhasználásánál ezeket szem előtt kell tartani (M3. ábra).



M3. ábra. Kétvezetős elrendezés [71]

Tekintsünk egy kétvezetős elrendezést, ebben az esetben az „a” fázis – föld hurokra kapcsolt U feszültség I_a áramot hajt az „a” vezetőkön keresztül. Vizsgáljuk meg, hogy az „a” vezetőkkel párhuzamosan vezetett,

vízszintes, kör keresztmetszetű „b” vezetőben milyen feszültség indukálódik, azaz annak 1 km-es szakaszán milyen feszültségváltozás mérhető a vezető és a föld között. Keressük tehát az a és b vezetők között értelmezhető kölcsönös impedanciát, figyelembe véve a föld jelenlétét is, ez:

$$Z_{ab} = \frac{U_b}{I_a} \quad (\text{M10.})$$

A szakirodalom és a legtöbb számítás **Carson** eredményeit használja az ön és kölcsönös impedanciák meghatározásához.

Önimpedancia:

$$Z_{aa} = R_a + R_{aaf} + j \cdot (X_b + X_{kaaf}) \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (\text{M11.})$$

ahol

R_a = az „a” fázisvezető 1 km-re eső váltakozó áramú Ohmos ellenállása (Ω/km)

R_{aaf} = az önimpedanciának a vezető R_a ellenállásán kívüli valós része (Ω/km)

X_b = a vezető belső reaktanciája

$$X_b = 0,145 \cdot \lg \frac{r_a}{GMR_a} \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (\text{M12.})$$

r_a = a vezető geometriai sugara

X_{kaaf} = az önimpedanciának a vezetőn kívül jelentkező reaktív tagja (Ω/km)

A kölcsönös impedancia:

$$Z_{ab} = R_{ab} + jX_{ab} \quad (\text{M13.})$$

Ezek az impedanciák a függenek a homogénnek feltételezett talaj fajlagos ellenállásától (ρ [Ωm]), a frekvenciától (f [1/s]), a vezetők föld feletti magasságától (h_a, h_b [m]), a vezetők távolságától (D_{ab} [m]), valamint geometriai sugártól (r [m]) és a redukált sugártól (GMR [m]).

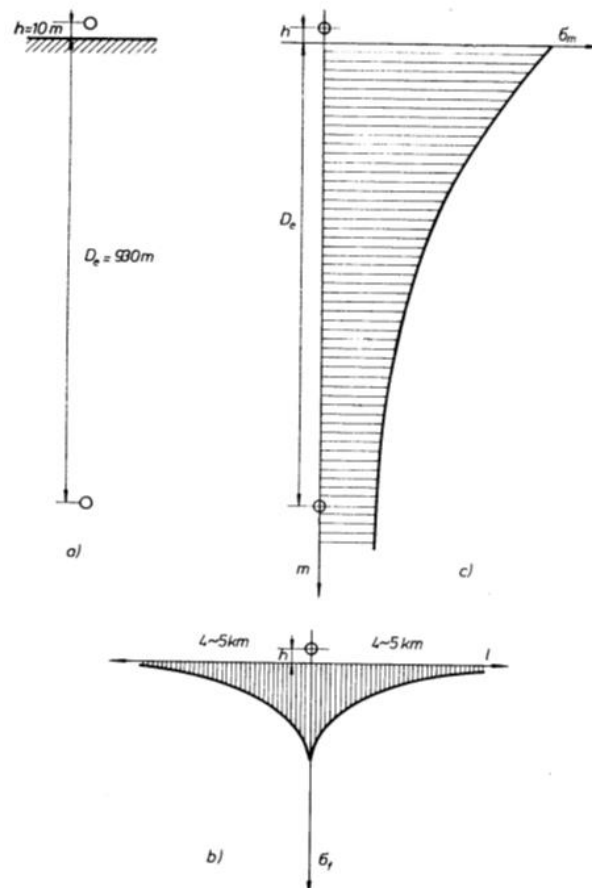
Carson szerint mind az ön-, mind pedig a kölcsönös impedancia két tag összegeként állítható elő, az egyik tag az ideális ($\rho = 0$ Ωm fajlagos ellenállású) föld esetén számítható, amelyet ki kell egészíteni egy $Z = P+jQ$ alakban felírható, és további két változótól p -től és θ -tól függő impedancia dimenziójú taggal (ún. kiegészítő impedanciával). (A $P+jQ$ Carson jelölése, és természetesen nincs köze a komplex

teljesítményhez.) A p és θ paraméter a geometriai elrendezéstől, a frekvenciától, valamint a föld fajlagos ellenállásától függ.

A földben folyó áram Carson szerint az alábbiak szerint oszlik el (M4. ábra). Ha a föld fajlagos ellenállása nagy, akkor a visszavezetés mélysége (D_f [m]) is nagy, tehát ilyenkor nagy keresztmetszeten folyik az áram, ha viszont kicsi a fajlagos ellenállás, akkor nagyobb az áramsűrűség a vezető alatt, és kisebb keresztmetszeten folyik az áram, így az eredő ellenállás állandó lehet. Ebből viszont az következik, hogy ha nagy a föld fajlagos ellenállása, akkor az induktivitás is nagyobb lesz. Ha azt vizsgáljuk, hogy hol folyik vissza az áram, akkor azt látjuk, hogy ez kb. egy olyan keresztmetszeten történik, amelynek súlypontja D_f távolságra van a vezető alatt.

$$D_f = 659 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} \cdot [m]$$

(M14.)



M4. ábra. Földvisszavezetés Carson szerint

Az M4. ábrán

- a visszavezetésre jellemző D_f távolság
- a visszavezetés áramsűrűsége (σ_f) a felszínen, a vezetőtől mért távolság függvényében
- a visszavezetés áramsűrűsége (σ_m) a vezető alatt, a mélység függvényében

Ezek alapján az ön és kölcsönös impedanciák két fázisvezető – föld hurok esetén:

$$Z_{aa} = R_a + 0,000986 \cdot f \cdot +j \cdot 0,002894 \cdot f \cdot \lg \frac{D_f}{GMR_a} + 0,00251 \cdot f \cdot (\Delta P + j\Delta Q)$$

$$Z_{ab} = 0,000986 \cdot f \cdot +j \cdot 0,002894 \cdot f \cdot \lg \frac{D_f}{D_{ab}} + 0,00251 \cdot f \cdot (\Delta P + j\Delta Q)$$

(M15.)

A ΔP és ΔQ -tól függő korrekciós tagok elhagyásával a Carson képletek Clem-féle egyszerűsített formáját kapjuk:

$$Z_{aa} = R_a + 0,000986 \cdot f \cdot +j \cdot 0,002894 \cdot f \cdot \lg \frac{D_f}{GMR_a}$$

$$Z_{ab} = 0,000986 \cdot f \cdot +j \cdot 0,002894 \cdot f \cdot \lg \frac{D_f}{D_{ab}}$$

(M16.)

Az M15. összefüggések 50 Hz-es frekvencián:

$$Z_{aa} = R_a + 0,0495 \cdot +j \cdot 0,145 \cdot \lg \frac{D_f}{GMR_a}$$

$$Z_{ab} = 0,0495 \cdot +j \cdot 0,145 \cdot \lg \frac{D_f}{D_{ab}}$$

(M17.)

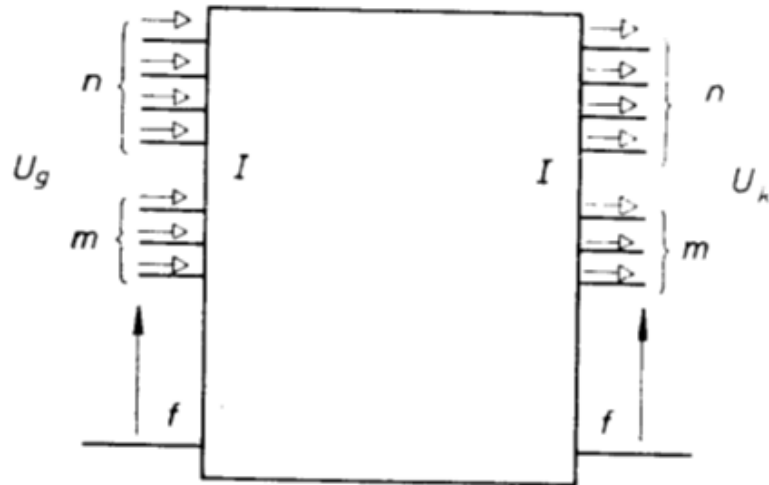
A **Carson -Clem formulák** szerint az impedancia nem függ a vezetők föld feletti magasságától, és a képletek az ellenállásokat nagyobbak, a reaktanciákat kisebbnek adja, mint a pontos összefüggések.

Az „n” fázisvezetőjű és „m” védővezetővel ellátott távvezeték vizsgálata

A vizsgálat során meg kell határozni az ön és kölcsönös impedanciákat, majd ebből a feszültséget és az áramerősséget. [72]

Tekintsünk egy általános esetet, amelyben $n=4$, $m=3$, a felvett szakaszon nincs csavarás. Így a feszültség és áram vektorok $m + n$ dimenziósak, az impedancia mátrix $(m + n) \cdot (m + n)$ -es.

Feltételezzük a baloldalon (betáplálási pont) a feszültség a földhöz képest U_g , a távvezeték végén pedig U_k , és az áramvektor pedig I (M5. ábra).



M5. ábra. Az \$m\$ fázis- és \$n\$ védővezetőből álló vezeték helyettesítése a végpontokra [73]

$$U_g = \begin{bmatrix} U_{mg} \\ U_{ng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{ag} \\ U_{bg} \\ U_{cg} \\ U_{vg} \\ U_{wg} \\ U_{xg} \\ U_{yg} \end{bmatrix}$$

$$U_k = \begin{bmatrix} U_{mk} \\ U_{nk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{ak} \\ U_{bk} \\ U_{ck} \\ U_{vk} \\ U_{wk} \\ U_{xk} \\ U_{yk} \end{bmatrix}$$

$$I = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_v \\ I_w \\ I_x \\ I_y \end{bmatrix}$$

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{mm} & Z_{mn} \\ Z_{nm} & Z_{nn} \end{bmatrix}$$

(M18.)

Az \$a, b, c\$ index a fázisvezetőt; a \$v, w, x, y\$ index a védővezetőt jelöli.

Az impedancia mátrix elemei a vezető - föld hurok-impedanciák.

A mátrix diagonálisában lévő elemekre

$$Z_{ii} = R_i + 0,0495 + j0,145 \lg \frac{D_f}{GMR_i} \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad (\text{M19.})$$

A diagonálison kívüli elemek:

$$Z_{ij} = Z_{ji} = 0,0495 + j0,145 \lg \frac{D_f}{D_{ij}} \left[\frac{\Omega}{\text{km}} \right] \quad i \neq j \quad (\text{M20.})$$

A modellre felírható vektoregyenlet:

$$\begin{aligned} U_g - Z \cdot I &= U_k \\ U_{ng} &= U_{nk} = 0 \end{aligned} \quad (\text{M21.})$$

A V feszültségvektor:

$$V = U_g - U_k = Z \cdot I \quad (\text{M22.})$$

ahol

$$V = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_m \\ V_n \end{bmatrix}, \text{ ahol } V_n = 0 \quad (\text{M23.})$$

Az egyenleteket részvektorokra bontva:

$$\begin{aligned} V_m &= Z_{mm} \cdot I_m + Z_{mn} \cdot I_n \\ V_n &= Z_{nm} \cdot I_m + Z_{nn} \cdot I_n = 0 \end{aligned} \quad (\text{M24.})$$

A második egyenletből:

$$I_n = -Z_{nn}^{-1} \cdot Z_{nm} \cdot I_m$$

ezzel az első egyenlet

$$V_m = Z_{mm} \cdot I_m - Z_{mn} Z_{nn}^{-1} \cdot Z_{nm} \cdot I_m = I_m \cdot (Z_{mm} - Z_{mn} Z_{nn}^{-1} \cdot Z_{nm}) \quad (\text{M25.})$$

Az egyenlet összefüggést ad a fázisfeszülteségek és az áramok között, vagy fázisimpedancia mátrixok kaphatunk (Z_f') a végükön rövidre zárt védővezetők esetére:

$$\begin{aligned} Z_f' &= (Z_{mm} - Z_{mn} Z_{nn}^{-1} \cdot Z_{nm}) \\ Z_{fszimm}' &= A^{-1} \cdot Z_f' \cdot A \end{aligned} \quad (\text{M26.})$$

Egyrendszerű háromfázisú két védővezetővel ellátott távvezeték vizsgálata

Két védővezető esetén az impedancia mátrix

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{aaf} & Z_{abf} & Z_{acf} & Z_{avf} & Z_{awf} \\ Z_{baf} & Z_{bbf} & Z_{bcf} & Z_{bvf} & Z_{bwf} \\ Z_{caf} & Z_{cbf} & Z_{ccf} & Z_{cvf} & Z_{cwf} \\ Z_{vaf} & Z_{vbf} & Z_{vcf} & Z_{vvf} & Z_{vwf} \\ Z_{waf} & Z_{wbf} & Z_{wcf} & Z_{wvf} & Z_{wwf} \end{bmatrix}$$

A Z_f' fázisimpedancia mátrix, illetve $Z_{f\text{szimm}}'$ szimmetrikus összetevőinek meghatározása.

$$Z_{nn} = \begin{bmatrix} Z_{vvf} & Z_{vwf} \\ Z_{wvf} & Z_{wwf} \end{bmatrix},$$

ennek inverze

$$Z_{nn}^{-1} = \frac{1}{Z_{vvf} \cdot Z_{wwf} - Z_{vwf} \cdot Z_{wvf}} \cdot \begin{bmatrix} Z_{wwf} & -Z_{vwf} \\ -Z_{wvf} & Z_{vvf} \end{bmatrix}$$

A $(Z_{mm} - Z_{mn}Z_{nn}^{-1} \cdot Z_{nm})$ mátrixszorzat:

$$\begin{bmatrix} Z_{avf} & Z_{awf} \\ Z_{bvf} & Z_{bwf} \\ Z_{cvf} & Z_{cwf} \end{bmatrix} \cdot Z_{nn}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} Z_{vaf} & Z_{vbf} & Z_{vcf} \\ Z_{waf} & Z_{wbf} & Z_{wcf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Z_{aaf} & \Delta Z_{abf} & \Delta Z_{acf} \\ \Delta Z_{baf} & \Delta Z_{bbf} & \Delta Z_{bcf} \\ \Delta Z_{caf} & \Delta Z_{cbf} & \Delta Z_{ccf} \end{bmatrix}$$

$$Z_f' = \begin{bmatrix} Z_{aaf} - \Delta Z_{aaf} & Z_{abf} - \Delta Z_{abf} & Z_{acf} - \Delta Z_{acf} \\ Z_{baf} - \Delta Z_{baf} & Z_{bbf} - \Delta Z_{bbf} & Z_{bcf} - \Delta Z_{bcf} \\ Z_{caf} - \Delta Z_{caf} & Z_{cbf} - \Delta Z_{cbf} & Z_{ccf} - \Delta Z_{ccf} \end{bmatrix}$$

A védővezetőkben folyó áramok vektora:

$$I_n = -Z_{nn}^{-1} \cdot Z_{nm} \cdot I_m$$

és a szimmetrikus összetevő impedancia mátrix:

$$Z_{f\text{szimm}}' = A^{-1} \cdot Z_f' \cdot A$$

2. A védővezetőkben folyó áram meghatározása számítással pozitív sorrendű megtáplálás esetén

A 7.1. pontban ismertetett egyrendszerű háromfázisú két védővezetővel ellátott távvezeték vizsgálata során meg kell határozni az ön és kölcsönös impedanciákat, majd ebből a feszültséget és az áramerősséget.

Bemenő paraméterek a számításhoz:

- Föld ellenállása : $R_f = 0,0495 \Omega$
- Frekvencia: $f = 50 \text{ Hz}$
- Talaj fajlagos ellenállása $\rho = 100 \Omega\text{m}$
- Földvisszavezetés mélysége $D_e = 659 \cdot \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 931,97 \text{ m}$
- Fázisáramok:
 - $I_a = 65\text{A},$
 - $I_b = -32.5 + j56.2916512459885 \text{ A}$
 - $I_c = -32.5 - j56.2916512459885 \text{ A}$
- Időpillanat: 0 ms

Távvezetési oszlop típusa: GENERÁTOR OT+0 (M6. ábra)

A-talajszinttől-(0-szinttől)¶	
mért-távolságok	
a = 10.350 m	A = 10.350 m
b = 0.000 m	B = 0.000 m
c = 10.350 m	C = 10.350 m
d = 10.000 m	D = 10.000 m
e = 0.500 m	E = 0.500 m
f = 7.500 m	F = 7.500 m
g = 36.000 m	G = 36.000 m
h = 5.500 m	H = 5.500 m
j = -5.500 m	J = -5.500 m
k = 6.700 m	K = 6.700 m
l = 42.700 m	L = 42.700 m

M6. ábra. A Generátor OT+0 oszlop jellemzői

– Fázisvezető:

Típus: 3x500/65 ACSR

Átmérő: 0.311 m

$R_{DC,20^{\circ}C} = 0.0585 \Omega$

GMR (m)	GMD Fázis- Tükör (m)	GMD Fázis-Fázis (m)	GMRcs (m)	X1' (MΩ/km)	X0' (MΩ/km)
0.200	69.147	14.167	3.422	0.244	0.517

– Védővezető:

Típus: 95/55 ACSR

Átmérő: 0.016 m

$R_{DC,20^{\circ}C} = 0.2992 \Omega$

GMR_{vv} (m)	GMD VV-VVTükör (m)	GMD FV-VVTükör (m)	GMD FV-VV (m)
0.010	60.387	76.870	11.321

Számított paraméterek:

Fázis-Tükör távolságok azonos rendszeren belül (I)								
DaA (m)	DaB (m)	DaC (m)	DbA (m)	DbB (m)	DbC (m)	DcA (m)	DcB (m)	DcC (m)
64.500	70.761	67.740	70.761	75.500	70.761	67.740	70.761	64.500

Fázis-Védővezető Tükör távolságok két rendszer esetén

DaVV1 (m)	DbVV1 (m)	DcVV1 (m)	DaVV2 (m)	DbVV2 (m)	DcVV2 (m)
74.557	80.089	76.07	76.07	80.089	74.557

Fázis-Védővezető távolságok két rendszer esetén

Davv1 (m)	Dbvv1 (m)	DcVV1 (m)	Davv2 (m)	Dbvv2 (m)	DcVV2 (m)
11.024	7.043	18.688	18.688	7.043	11.024

Fázis-Fázis távolságok azonos rendszeren belül (I)

Dab (m)	Dac (m)	Dbc (m)
11.721	20.700	11.721

$$\begin{aligned}
 Z_{av2} &= 0.0495 + 0.246186450114086j \quad \Omega & Z_{av1} &= 0.0495 + 0.279423875140055j \quad \Omega \\
 Z_{bv2} &= 0.0495 + 0.307638194984882j \quad \Omega & Z_{bv1} &= 0.0495 + 0.307638194984882j \quad \Omega \\
 Z_{cv2} &= 0.0495 + 0.279423875140055j \quad \Omega & Z_{cv1} &= 0.0495 + 0.246186450114086j \quad \Omega \\
 Z_{vv} &= 0.3487 + 0.718871836710021j \quad \Omega & Z_{vv} &= 0.3487 + 0.718871836710021j \quad \Omega \\
 Z_1 & & Z_1 &= 0.0585 + 0.0121629994154424j \quad \Omega/\text{km} \\
 Z_0 & & Z_0 &= 0.207 + 1.69051598322622j \quad \Omega/\text{km} \\
 Z_{vfk} & & Z_{vfk} &= 0.0495 + 0.277749506746341j \quad \Omega \\
 Z_0^* & & Z_0^* &= 0.236508142906279 + 1.39311369933576j \quad \Omega
 \end{aligned}$$

$$U_{av2} = \begin{matrix} 3.2175+ \\ 16.0021192574156j \end{matrix} \quad V \qquad U_{av1} = \begin{matrix} 3.2175+ \\ 18.1625518841036j \end{matrix} \quad V$$

U _{bv2} =	-18.9262119820344- 7.21180460033223j	V	U _{bv1} =	-18.9262119820344-7.21180460033223j	V
U _{cv2} =	14.1204813291866- 11.8677126787282j	V	U _{cv1} =	12.2494917913101-10.7874963653842j	V
U _{v2} =	-1.5882306528478- 3.07739802164483j	V	U _{v1} =	-3.4592201907243+ 0.16325091838717j	V
U _{v2} (abs)=	3.463070197	V	U _{v1} (abs)=	3.463070197	V
I _{v2} =	-4.33303209206516+ 0.107532884719005j	A	I _{v1} =	-1.70571347198772+ 3.98462946629197j	A
Z _{av2} /Z _{vV} =	0.304271253479427+0.078733 6256589328j		Z _{av1} /Z _{vV} =	0.341700187134217+ 0.0968891138821974j	
Z _{bv2} /Z _{vV} =	0.373472561340762+0.112300 799693296j		Z _{bv1} /Z _{vV} =	0.373472561340762+ 0.112300799693296j	
Z _{cv2} /Z _{vV} =	0.341700187134217+0.096889 1138821974j		Z _{cv1} /Z _{vV} =	0.304271253479427+ 0.0787336256589328j	
I _{av2} =	19.7776314761628+ 5.11768566783063j	A	I _{av1} =	22.2105121637241+ 6.29779240234283j	A
I _{bv2} =	-18.4594556945554+ 17.3736111829081j	A	I _{bv1} =	-18.4594556945554+ 17.3736111829081j	A
I _{cv2} =	-5.65120787367254- 22.3837639660198j	A	I _{cv1} =	-5.45676994115652-19.686774118959j	A
I _{v2} =	-4.33303209206514+ 0.107532884718928j	A	I _{v1} =	-1.70571347198782+ 3.98462946629193j	A

$$I_{v2}(\text{abs}) = 4.334 \text{ A}$$

$$I_{v1}(\text{abs}) = 4.334 \text{ A}$$

3. A védővezetőkben folyó áram meghatározása számítással zérus sorrendű megtáplálás esetén

Ebben az esetben is a 7.1. pontban ismertetett egyrendszerű háromfázisú két védővezetővel ellátott távvezeték vizsgálom és ennek során is meg kell határozni az ön és kölcsönös impedanciákat, majd ebből a feszültséget és az áramerősséget.

A bemenő paraméterek a számításhoz, a távvezetési oszlop típusa, a 0 szinttől mért távolságok, a fázis- és vezetővezetők, az ezekből számított paraméterek azonosak voltak a korábbi számításoknál alkalmazottakkal, ezért ezeket nem ismétlem meg.

A zérus sorrendű megtáplálással kapott összefüggések és eredmények az alábbiak:

$U_{av2} =$	$4.2075 + 20.9258482596973j$ V	$U_{av1} =$	$4.2075 + 23.7510293869047j$ V
$U_{bv2} =$	$-24.7496618226604 - 9.43082140043446j$ V	$U_{bv1} =$	$-24.7496618226604 - 9.43082140043446j$ V
$U_{cv2} =$	$18.4652448150902 - 15.5193165798754j$ V	$U_{cv1} =$	$16.0185661886363 - 14.1067260162717j$ V
$U_{v2} =$	$-2.0769170075702 - 4.02428972061256j$ V	$U_{v1} =$	$-4.5235956340241 + 0.21348197019854j$ V
$U_{v2(ABS)} =$	$4,528630258$ V	$U_{v1(ABS)} =$	$4,528630258$ V
$I_{v2} =$	$-10.384585037851 - 20.1214486030628j$ A	$I_{v1} =$	$-22.6179781701205 + 1.0674098509927j$ A
$Z_{av2}/Z_{vv} =$	$0.2475 + 1.23093225057043j$	$Z_{av1}/Z_{vv} =$	$0.2475 + 1.39711937570027j$
$Z_{bv2}/Z_{vv} =$	$0.2475 + 1.53819097492441j$	$Z_{bv1}/Z_{vv} =$	$0.2475 + 1.53819097492441j$
$Z_{cv2}/Z_{vv} =$	$0.2475 + 1.39711937570027j$	$Z_{cv1}/Z_{vv} =$	$0.2475 + 1.23093225057043j$
$I_{av2} =$	$21.0375 + 104.629241298487j$ A	$I_{av1} =$	$21.0375 + 118.755146934523j$ A
$I_{bv2} =$	$-123.748309113302 - 47.1541070021723j$ A	$I_{bv1} =$	$-123.748309113302 - 47.1541070021723j$ A
$I_{cv2} =$	$92.3262240754506 - 77.5965828993766j$ A	$I_{cv1} =$	$80.0928309431813 - 70.5336300813584j$ A
$I_{v2} =$	$-10.3845850378514 - 20.1214486030619j$ A	$I_{v1} =$	$22.6179781701207 + 1.06740985099229j$ A
	$I_{v2(ABS)} = 22,643$ A		$I_{v1(ABS)} = 22,643$ A