



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék

Viola Dániel Timon

**DINAMIKUS TÁVVEZETÉK TERHELHETŐSÉG
SZAKÉRTŐI-RENDSZER IMPLEMENTÁLÁSA ÉS
FEJLESZTÉSE**

KONZULENS

Dr. Németh Bálint

BUDAPEST, 2017

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	4
Abstract	5
1 Definíciók	6
2 Bevezetés	7
2.1 A távvezeték építés kezdetei.....	7
2.2 A dinamikus távvezeték terhelhetőség ötlete.....	8
2.2.1 Miért csak most?.....	12
2.3 Jelenlegi modellek, kutatások, fejlesztések	13
2.3.1 A jelenlegi DLR projektek.....	14
3 A Dinamikus távvezeték terhelhetőség elméleti alapjai	18
3.1 Statikus termikus terhelhetőség	18
3.1.1 Bemeneti paraméterek	18
3.1.2 A DLR számítások alapja	18
3.1.3 Számítások	19
3.1.4 Numerikus számítások.....	27
3.2 Kritikus oszlopközök meghatározása	30
4 Teljeskörű DLR rendszer	33
4.1 Célkitűzés.....	33
4.2 Miért a Matlab?.....	33
4.3 Rendelkezésemre álló adatsor.....	33
4.4 Megvalósítás	34
4.4.1 Állandósult állapotbeli sodrony hőmérséklet meghatározása (Steady state conductor temperature).....	34
4.4.2 Állandósult állapotbeli termikus terhelhetőség (Steady state thermal rating).....	37
4.4.3 Virtuális szenzor és valós idejű terhelhetőség	41
4.4.4 A valós idejű terhelhetőség számítása	42
4.4.5 Szimulációs eredmények	43
4.4.6 Az eredmények értékelése	48
4.5 Továbbfejlesztési lehetőségek	49
5 Konklúzió	51
6 Köszönet nyilvánítás	52

Irodalomjegyzék.....	53
A – Függelék: Belógás számítása	55

Összefoglaló

Napjainkban folyamatosan növekszik a villamos energia fogyasztás. Ezt a növekvő energiaigényt ki kell elégítenünk, a fogyasztók nem maradhatnak áramszolgáltatás nélkül. Ennek megfelelően folyamatosan növekszenek az erőművi kapacitások a várható fogyasztói igény szerint. Azonban a villamos energia átviteli hálózat nem bővül ilyen ütemben.

Az átviteli hálózat bővítése egy rendkívül lassú, drága és időigényes folyamat és a jövőben problémát jelenthet, hogy az erőművekben megtermelt villamos energiát nem tudjuk eljuttatni a fogyasztókhoz. A dinamikus távvezeték terhelhetőség (DLR) erre a problémára kínál költség hatékony és viszonylag gyors megoldást.

Egy adott távvezeték vonal átviteli kapacitását hagyományosan előre meghatározzák a tervezéskor. Ekkor a sodronyok belógását leíró paramétereket veszik figyelembe és egy olyan biztonsági tényezővel számolnak, hogy legrosszabb esetben is biztonságosan üzemelhessen a távvezeték. Dinamikus távvezeték terhelhetőség során ezeket a paramétereket valamilyen időközönként figyeljük (akár valós időben) és ezen paraméterek alapján számoljuk a távvezeték (akár valós idejű) terhelhetőségét.

Jelen dolgozat célja, bemutatni egy komplex DLR rendszer fejlesztésének lépéseit és az ezzel kapcsolatos problémákra rávilágítani. Munkám során Matlab környezetben valósítottam meg egy összetett DLR rendszert mely mért adatok alapján képes valós időben számolni a sodronyok hőmérsékletét és belógását. A TDK dolgozatom jelentőségét az adja, hogy az eddigiek során még nem készült ilyen komplexitású, mégis kompakt rendszer, mely már magában foglalja a sodronyok belógásának számítását is.

Abstract

Today's energy consumption is ever increasing. That consumption must be satisfied, the consumers cannot be left without proper electricity service. Regarding that, the power plant capacity is continuously increasing accordingly the predicted consumption. However, the electrical transmission system is not developing at the same pace.

Increasing the transmission capacity of a power line is a very slow, time-demanding and expensive task. In the future it can be a major problem, that the power generated in the power plants can't be brought to the consumers. Dynamic Line Rating (DLR) offers a relatively fast and economic solution to that problem.

The conventional transmission capacity of a power line is derived from the conductors' physical parameters and the environmental properties of the line. In that case the transmission capacity of the line is calculated, and the line cannot be operated on higher levels than that designed value. In case of DLR, the parameters which determine the transmission capacity of the power line are monitored, and the transmission capacity is recalculated based on these measured parameters.

The purpose of this paper is to present the development of a complex DLR system. The developed system was implemented in Matlab and it is capable to calculate the temperature and sag of the conductors in real time. The significance of my work is that the previously implemented systems did not include the sag calculation of the power lines. Thus, I have created a more compact and consequent system by integrating the necessary sag calculations.

1 Definíciók

Áramterhelhetőség: (ampacity) Egy sodrony áramterhelhetősége, a sodrony azon villamos tulajdonsága, mely a feszültség terhelhetőség mellett elsődlegesen meghatározza az átvihető teljesítmény nagyságát. A sodrony áramterhelhetősége és termikus terhelhetősége szorosan összefügg.

Átviteli kapacitás: (transmission capacity) Az átviteli kapacitás megadja, hogy az adott hálózaton vagy hálózatrészen mekkora teljesítmény átvitel valósítható meg.

Átviteli hálózat: (transmission network) A villamosenergia hálózatnak azon eleme, mely nagytávolságra juttatja el a villamosenergiát. Jellemzően az erőművektől alállomásokig terjedő szakasz.

Elosztóhálózat: (distribution network) A villamosenergia hálózatnak azon eleme, mely az alállomásoktól a fogyasztókig juttatja el a villamosenergiát.

Termikus terhelhetőség: (thermal rating) Egy sodrony termikus terhelhetősége, a sodrony egy olyan fizikai paramétere, mely közvetlenül megadja, a sodrony maximális üzemi hőmérsékletét. Ezen hőmérséklet felett általában a sodrony fizikai paramétereiben irreverzibilis folyamatok következnek be, melyek akár a sodrony idő előtti elöregedéséhez is vezethetnek. Ez áttételesen meghatározza a sodronyon maximálisan átengedhető áram nagyságát, így a sodrony maximális terhelhetőségét.

Elosztó hálózat üzemeltetője: (DSO) Azon üzemeltető cég, szervezet, mely az elosztó hálózat üzemeltetéséért felelős.

Átviteli hálózat üzemeltetője: (TSO) Azon üzemeltető cég, szervezet, mely az átviteli hálózat üzemeltetéséért felelős.

Grafikus felhasználói felület: (GUI) Egy olyan felület, mely az ember és gép közti munkát grafikus eszközök segítségével könnyíti meg.

Kritikus oszlopköz: (critical node) Egy távvezeték azon oszlopközei, ahol a sodronyok belógása a legnagyobb veszélyt jelenti mind jogszabályok megsértése szempontjából, mind élet és vagyon védelmi szempontból.

2 Bevezetés

Munkám a jelenlegi távvezeték infrastruktúra fejlesztéshez köthető. Emiatt a következőkben röviden ismertetem a távvezeték építés történetét illetve, hogy hogyan is jutottunk el a dinamikus távvezeték terhelhetőség ötletéig és hol tartunk most.

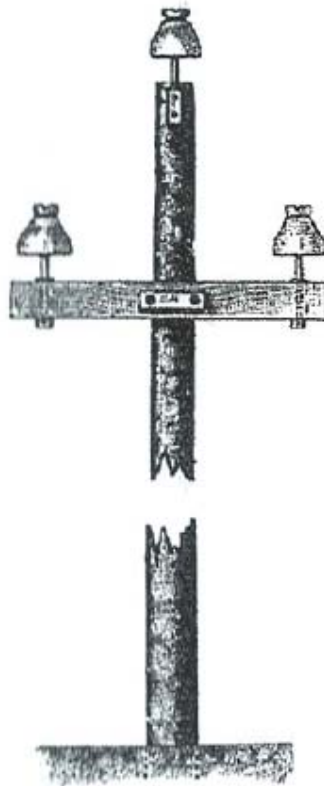
2.1 A távvezeték építés kezdetei

A 19. század végén, az ipari forradalom hatására, egyre nagyobb igény volt az energia szállításra. A villamos energia megjelenése előtt több különböző megoldás volt jelen például csőrendszereket építettek ki melyekben nagynyomású víz vagy gőz áramlott.

Azonban ezek a rendszerek gyakran meghibásodtak és viszonylag alacsony volt a hatásfokuk, nagy volt az energia veszteség a szállításból adódóan. A 19. század második felében egyre nagyobb teret nyert a villamos energia és így elkezdődtek a villamosenergia hálózatok kiépítése, a villamosenergia szállítása.

Az 1880-as években kibontakozott az úgynevezett „*War of Currents*”, egy szakmai vita, mely megosztotta az akkori szaktekintélyeket. A két tábor az egyenáramú és a váltakozóáramú rendszerek támogatói alkották. Az egyenáramot támogatók vezéralakjaként Thomas Edison, a váltakozóáramot támogatók vezetőjeként pedig Nikola Tesla vonult be a történelembe.

Az 1885-ben Déry Miksa, Bláthy Ottó Titusz és Zipernowsky Károly által szabadalmaztatott transzformátor döntötte el a kérdést. Az egyenáramú átvitel legnagyobb problémája a nehézkes feszültség szintek közötti váltás. A váltakozóáramú átvitel esetén ezt a problémát megoldotta a transzformátorok alkalmazása.

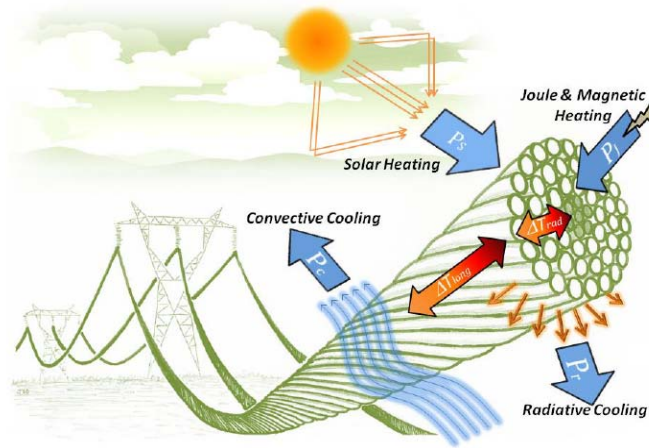


1.ábra lauffeni fa oszlop, mely 15 kV-os AC vonalat tartotta [8]

A váltakozó áramú rendszerek győzelmét jelezte, az 1891-ben Németországban megépült első nagyávolságú távvezeték vonal. A vonal Lauffen am Neckar és Frankfurt között üzemelt, megközelítőleg 175 km hosszú volt. 1893-ban a chicagói világkiállítás villamosenergia ellátását Tesla váltakozóáramú rendszerével oldották meg. Ugyanebben az évben a Niagara vízesésnél található erőmű tervezésénél ismét a váltakozó áramú rendszer nyert, ami végleg eldöntötte a váltakozóáramú rendszerek „győzelmét”.

2.2 A dinamikus távvezeték terhelhetőség ötlete

A távvezetéseken megengedhető energiaátvitel maximumát a távvezeték **áramterhelhetősége**, a sodronyok fizikai paraméterei, a sodronyok **belógása** és a **környezeti** paraméterek határozzák meg. Az ipari tapasztalatok alapján rövidebb (80 km) vonalak esetén a sodronyok termikus terhelhetősége, hosszabb (80-320 km) vonalak esetén feszültség korlátozások és nagyon hosszú (>320 km) vonalak esetén stabilitási problémák határozzák meg a maximális átviteli kapacitást.



2.ábra Távvezeték befolyásoló tényezők[1]

Távvezeték terhelhetőség értékét először az 1930-as években számoltak, maximális termikus terhelhetőség alapján. A számítások során olyan feltételeket vettek figyelembe, hogy a távvezetékek biztosan ne legyenek majd túlterhelve. Ennek eredményeként 0.6096 m/s-os szélsősebességgel számoltak.

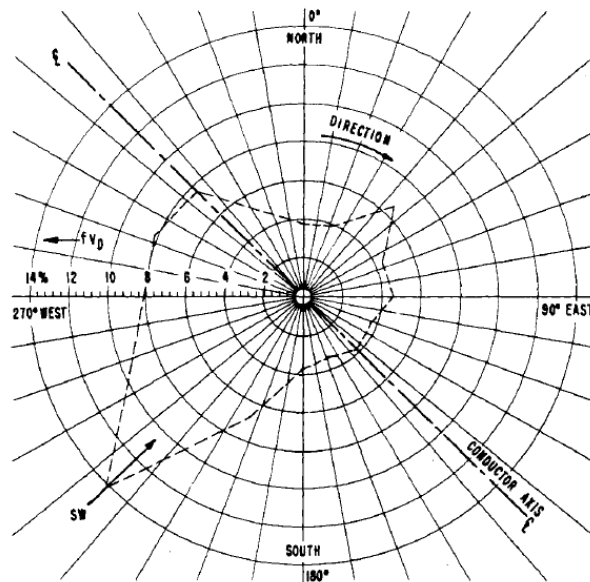
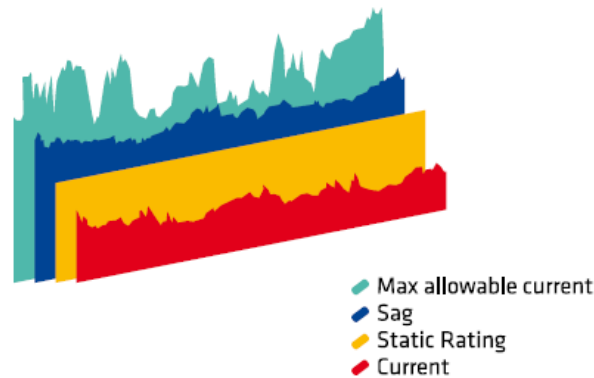


Figure 3. f_{v_D} = Frequency of occurrence of wind velocity in percent of time as a function of wind direction for the period Jan. 1948 through June 1964.

3.ábra Előforduló szélereősségek/irányok[5]

A valóságban kevesebb mint 5%-ban fordul elő ennyire vagy ennél alacsonyabb szélsősebesség. És ennél is kisebb arányban fordul elő magas környezeti hőmérséklet alacsony szélsősebességgel együtt. Így a vezetők túlmelegedése gyakorlatilag

elhanyagolható. Napjainkban is használatosak az ezen alapuló konzervatív becslések, mely során folyamatos 40 °C környezetihőmérsékletet, teljes napsütést, 0.6096 m/s-os sodronyra merőleges szelet feltételeznek. Ezen feltételekkel számolva, legrosszabb esetet (worst-case) feltételezünk, így nagy biztonsági tényezővel dolgozhatnak a mérnökök, megelőzve a veszélyes távvezeték terheléseket.



4.ábra Távvezeték terhelhetőségét meghatározó paraméterek[12]

Távvezeték terhelhetőséget meghatározó tényezők, látható, hogy kihasználatlanok a sodronyok.

A 1977-ben az IEEE *Transactions on Power Apparatus and Systems* részlegén belül megjelent Murray W. Davis cikke „*A new Thermal Rating Approach: The real time thermal rating system for strategic overhead conductor transmission lines*” címmel. Ezt a kiadványt tekinthetjük a dinamikus távvezeték terhelhetőség első leírásának. A szerző ismerteti azokat a problémákat melyekkel az akkori észak-amerikai TSO-k szembesültek. Ezek közül sok probléma még ma is jelen van (időszakos, nem várt terhelések a hálózaton). A probléma lényegét pedig abban látja a szerző, hogy indokolatlan 0 m/s-os szélsősebességgel és állandó napsugárzással számolni a távvezetékek terhelhetőségét. Ezzel indokolatlanul túlméretezzük a szabadvezeteki hálózatot. Ez nem feltétlenül baj, ugyanakkor rendkívül gazdaságtalan. A szerző részletesen ismerteti, hogy a meglévő hálózat, a korábban említett indokok miatt, jobban kihasználható és így például a nem várt terhelések problémája megoldható lenne.

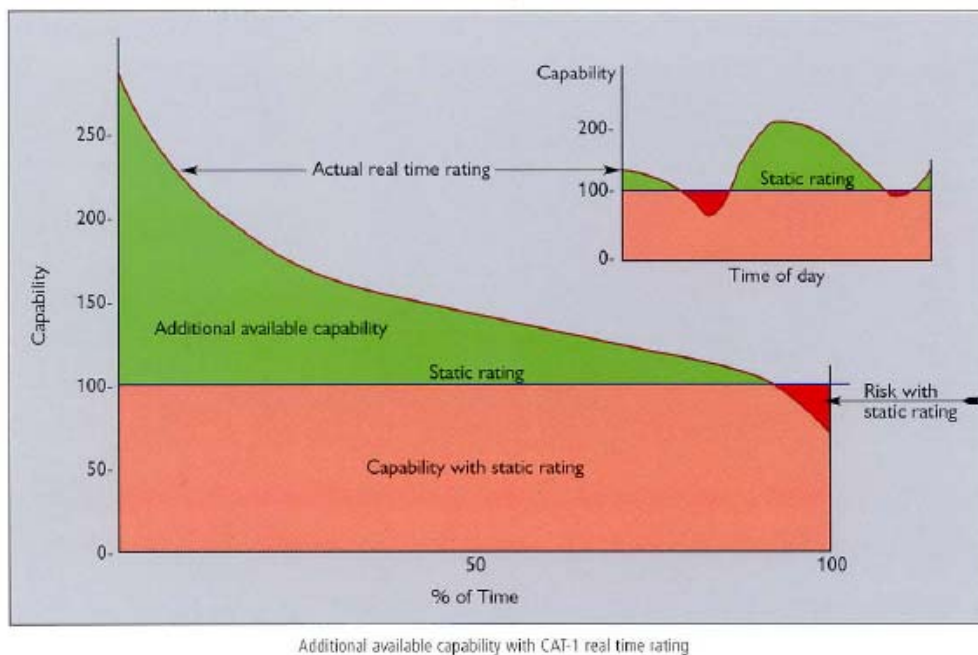
Dinamikus távvezeték terhelhetőség során nem ezen konzervatív paraméterekkel számolunk. A hagyományos worst-case eset helyett, valós idejű adatokat használunk és így határozzuk meg a sodrony terhelhetőségét.

DLR során a sodronyok fizikai paramétereinek és a környezeti paraméterek függvényében próbálunk meg maximális áramterhelhetőséget használni az adott távvezeték szakaszon úgy, hogy ez semmiképp se sértse meg a belógásra vonatkozó szabályozásokat. Ez az esetek nagyrésztében a hagyományosan tervezettnél nagyobb áramterhelhetőséget jelent, ami a sodrony tervezettnél magasabb hőmérsékleten való üzemeltetését jelenti.

Cigré 2017-ben megjelent kiadványa[3] alapján real-time DLR, seasonal DLR és még sokmást határozhatunk meg. Azonban e két példát véve kiválóan megérthető a probléma. Seasonal DLR esetén nyári és téli időszakokat különböztetünk meg. Ekkor az adott régióra jellemző historikus meteorológiai adatok alapján határozzuk meg a terhelhetőség számításához szükséges időjárási paramétereket. Így a két szezorra kapunk különböző terhelhetőség értékeket.

Real-time DLR esetén azonban folyamatosan megfigyeljük, valós időben a környezeti paramétereket. Így a valós idejű adatok segítségével valós időben számoljuk a távvezetékek áramterhelhetőségét. Ennek következtében jobb kihasználhatósággal és nagyobb biztonsággal üzemeltethető a távvezeték vonal. Habár kétségtelen, egy ilyen rendszer kiépítése nyilván nagyobb befektetés, mint csupán a szezonális terhelhetőségek kiszámítása.

A hagyományos, „könyv szerinti” terhelhetőség számítások sem teljesen biztonságosak. Ahhoz, hogy minden kockázatot kiküszöböljünk 0 m/s szélsőséggel kéne számolni. Dinamikus távvezeték terhelhetőség esetén ezt is figyelembe tudjuk venni, így növelve a rendszer biztonságát.[3][5][6][7][13]



5.ábra DLR segítségével elérhető kapacitás növekedés és növelt üzembiztonság[10]

2.2.1 Miért csak most?

A távvezetékek terhelhetőségével már az 1930-as évek óta foglalkoznak. Ebben az időben papíron, kézzel kellett mindent kiszámolni. Így a valós idejű DLR által megkövetelt komplex hőmérsékleti egyenletek és differenciálegyenletek valós időben történő megoldása elképzelhetetlen volt. Azonban ekkor nem is volt szükség ilyen megoldásokra.

A dinamikus távvezeték terhelhetőség gazdasági és környezetvédelmi okai csupán néhány évtizede váltak annyira jelentőssé, hogy ezen rendszer fejlesztéséhez hozzá kezdjenek.

Napjainkban rendkívül gyorsan növekszik a villamosenergia fogyasztás. Épp emiatt folyamatosan növekszenek az erőművi kapacitások, azonban a villamosenergia átviteli hálózatot is ennek megfelelően kellene bővíteni.

Ennek azonban két fő akadálya van. Az átviteli hálózat bővítése, hagyományos értelemben, új távvezeték vonalak építését jelenti, ami egy rendkívül költséges folyamat. A második probléma, hogy egy új nyomvonal engedélyeztetésének egyre több környezetvédelmi és jogi akadálya van, amik tovább lassítják az egyébként is 3-5 éves kivitelezési időt. Azaz rendkívül drága és időigényes folyamat az átviteli hálózat bővítése.

Erre a problémára kínál egy alternatív megoldást a dinamikus távvezeték terhelhetőség. Amennyiben egy szolgáltató úgy dönt, hogy DLR rendszert szeretne telepíteni egy adott távvezeték vonalra, akkor a vonal kapacitása várhatóan 30%-kal növekszik (5).

A DLR rendszer telepítése és üzembe helyezése körülbelül 2 hét és 2 hónap közé tehető. A rendszer üzembehelyezési költsége rendkívül változó. Függ az adott távvezeték vonal sajátosságaitól és attól is, hogy melyik cég megoldását választja a szolgáltató, esetleg saját rendszer kiépítésébe fektet be. A DLR rendszer kiépítése csupán a szenzorok felhelyezéséből és néhány helyszíni mérésből, legrosszabb esetben a teljes távvezeték vonal bejárásából áll.

Jól látható, hogy nagyságrendbeli különbség van mind idő mind anyagi ráfordítás szempontjából egy DLR rendszer telepítése és új távvezeték vonalak építése között. Emiatt folyamatosan jelennek meg újabb cégek, saját fejlesztésű DLR rendszerekkel és egyre több szolgáltató veszi igénybe ezen szolgáltatásokat.

Egy tipikus alkalmazása a valós idejű dinamikus távvezeték terhelhetőség rendszernek a megújuló energiák eljuttatása a hálózatba. Elsősorban a naperőművek és a szél erőművek esetén. A naperőműveknek általában téli időszakban van a legnagyobb teljesítmény leadása. Alacsonyabb környezeti hőmérséklet mellett a távvezetékek átviteli kapacitása is nagyobb, mint statikus terhelhető esetben. A szél erőművek esetén is hasonló a helyzet. Bár offshore szél erőművek esetén kábeleken keresztül történik az energia továbbítása, szárazföldi erőművek esetén legtöbbször szabadvezetékeket alkalmaznak. A szél erőművek hideg, szeles időben adják le a legnagyobb teljesítményt, ekkor, a távvezetékek átviteli kapacitása is nagyobb.

Azonban ahhoz, hogy ezt a megnövekedett átviteli kapacitást kitudjuk használni, egy olyan rendszerre van szükség, ami folyamatosan képes figyelni a környezeti paraméterek alakulását és ennek függvényében becslést adni a sodronyok tényleges terhelhetőségére.

2.3 Jelenlegi modellek, kutatások, fejlesztések

A jelenlegi DLR projektek nagyrésztében közös, hogy a két legnagyobb mérnököket tömörítő szervezet, az IEEE és a CIGRÉ által rendszeresen frissített

dokumentumokra támaszkodva fejlesztik rendszereiket. Azaz, egymással megosztva tapasztalataikat, rendkívül gyorsan fejlődnek ezek a rendszerek.

A jelenlegi kutatások szépségét és sokszínűségét adja, hogy a legtöbb új vállalkozó saját fejlesztésű szenzorokkal lép piacra. Ezen szenzorok által mért (valós idejű) paraméterek általában ugyanazok, hiszen a DLR algoritmus által megkövetelt adatok ugyanazok. Viszont a mérési elvek rendkívül különbözőek lehetnek.

A jelenlegi kutatások nagy hangsúlyt fektetnek a terhelhetőségek előrejelzésére. A DLR előrejelzések jelentőségét talán gazdasági oldalról lehet a legjobban megfogni. A szolgáltatók a teljesítmény áramlást legalább egy nappal előre határozzák meg, így a DLR által felkínált valós idejű többlet kapacitásnak nincs közvetlen gazdasági haszna, csupán vészhelyzetek esetén. Az előrejelzések segítségével, azonban ez a probléma megoldható. Emiatt jelenleg nagy erőforrásokkal zajlik egy minél pontosabb előre jelzést előállító algoritmus kifejlesztése. A kutatások rendkívül sok oldalúak, egyes kutatások neurális hálók segítségével próbálnak megoldást találni, míg mások statisztikai módszereken alapuló eszközökkel (Monte-Carlo) közelítik meg a problémát.

A jelenlegi előrejelzésekről elmondható, hogy minél nagyobb intervallumra adnak becslést, annál pontatlanabbak. A rövid idejű előrejelzések (5-15-30 perc) jelentőségét az üzembiztonságban találjuk meg. Amennyiben hirtelen lecsökken a szélsébség, fennáll a sodronyok túlmelegedésének veszélye, így ezt célszerű előre jelezni és megelőzni ezt az eseményt.

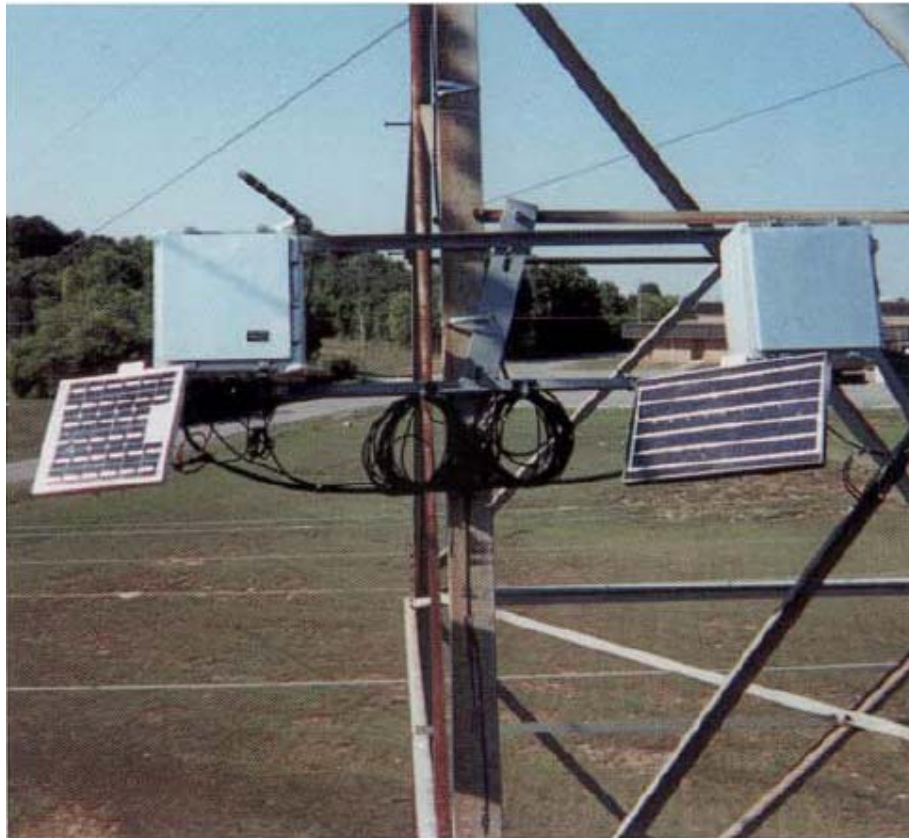
A különböző DLR projektekből rengeteg más továbbfejlesztési lehetőség van. A különböző gyártók sokféle szolgáltatással egészítik ki az általuk kínált DLR rendszert. Ilyenekre példa a különböző terhelhetőség előrejelzések implementálása, a vészhelyzet és kockázat elemző bővítmények, az alternatív átviteli utak feltárását végző eszközök.

2.3.1 A jelenlegi DLR projektek

Az alábbiakban ismertetem néhány, versenyszférában jelen levő gyártó megoldásait. Gyakorlatilag az összes rendszerben közös, hogy ugyanazon Cigré vagy IEEE algoritmus adja a távvezetékek terhelhetőség számításának alapjait. A legnagyobb eltérés az algoritmus bemeneti paramétereinek mérésében, biztosításában jelentkezik. Ezen adatok valós idejű, pontos és folyamatos mérése a mainapig kihívást jelent.

2.3.1.1 CAT-1

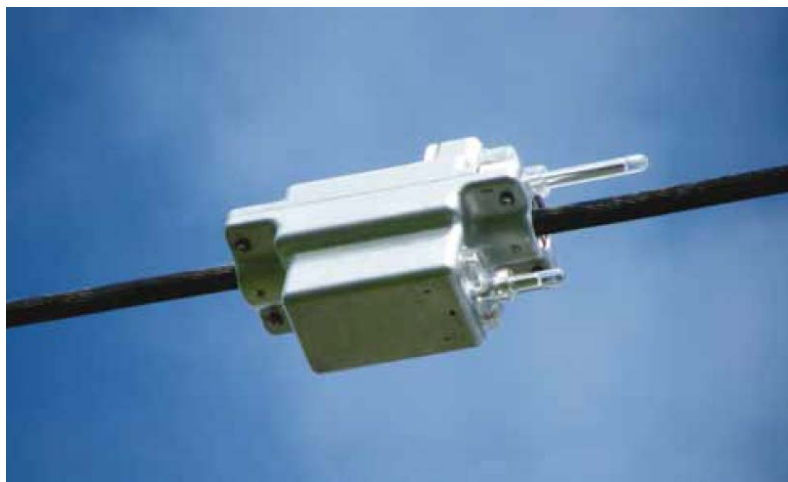
A legelső valóban működő rendszer a CAT-1. Ez a rendszer észak amerikai fejlesztésű és elsősorban a dinamikus távvezeték terhelhetőség megvalósítása a célja, vagyis a távvezeték vonal valós idejű monitorozása volt a célja. A rendszerrel 10-30% - os teljesítmény átvitel növekedést tudtak elérni. A projekt sikerességét jelzi, hogy 1991 és 2000 között több mint 70 szolgáltató, 5 kontinensen telepített ilyen rendszert bizonyos távvezeték vonalaira.[10]



6.ábra CAT-1 főegység[10]

2.3.1.2 Ampacimon

Az Ampacimon a belga Elia fejlesztése. Belgium akkor vált egyértelművé, hogy az átviteli hálózat a szűk keresztmetszet az energia szolgáltatásban, amikor a szélerőművek bekapcsolásra kerültek Észak-Németországban. Az ország átviteli hálózata nem volt képes a többlet teljesítmény továbbítására. Az új távvezetékek építéséről szó sem lehetett, ugyanis egy gyors és hatékony megoldásra volt szükség. Így saját DLR rendszer fejlesztésébe kezdtek, melynek alapja az Ampacimon szenzor.[12]



7.ábra Ampacimon, sodronyra szerelhető szenzor[12]

A szenzor sajátossága, hogy belógás mérésre is képes. Ez a paraméter, nem feltétlenül szükséges a távvezetékek terhelhetőségének számításában, de egy rendkívül fontos adat. A szenzor a sodronyokon terjedő háromdimenziós rezgés hullámokat méri és ez alapján számolja vissza a pillanatnyi belógást. Ez a megoldás bizonyítottan használható, leginkább Németországban és Belgiumban használják.[12]

2.3.1.3 Lindsay

Észak-amerikai cég, mely csupán néhány éve van jelen a dinamikus távvezeték terhelhetőség terén, mégis rendkívül innovatív megoldásokkal álltak elő. Lindsay nem csupán a DLR rendszert kínálja, hanem egy felhő alapú szolgáltatást is. Az ő szervereiken futnak a terhelhetőséget számító algoritmusok, illetve a szenzorok által küldött adatok feldolgozása is. Ennek a megoldásnak az előnye, hogy folyamatosan tudják fejleszteni a rendszerüket. A DSO-k és TSO-nak kevesebb a kezdeti befektetése, ugyanis nincs szüksége új eszközpark kiépítésére. A Lindsay által fejlesztett szenzor LiDAR rendszer segítségével képes mérni a belógást. Ennek a rendszernek az előnye, hogy nem csupán a belógást képes mérni, mint az Ampacimon esetében, hanem képes a sodronyok alatt lévő objektumok észlelésére is. Emiatt sokkal nagyobb pontossággal határozható meg a belógás és a DSO-k számára is biztonságosá teszi a DLR alkalmazását városi környezetben.[11]



8.ábra Lindsay szenzor[11]

2.3.1.4 Egyéb DLR projektek, további fejlesztések

Még számtalan más gyártót sorolhatnánk fel, azonban ez a három példa jól mutatja, hogy sok gyártó van jelen a piacon és folyamatosan készülnek az újabb és újabb fejlesztések. Egyre inkább az a trend bontakozik ki, hogy a DLR szenzorok mellé készítik el saját DLR szolgáltatásaikat és algoritmusait a gyártók. Azt, hogy adott szolgáltató melyik megoldást választja rendkívül sok minden befolyásolhatja. Sok szolgáltató például kritériummá teszi, hogy a szenzorok FAM szerelhetőek legyenek. Ezzel is minimalizálva a rendszer kiesését.

A fentebb leírtak fényében jól látszódik, hogy a dinamikus távvezeték terhelhetőség egy bizonyítottan jól működő rendszer. Napjaink energia igényének kielégítéséhez, olyan megoldásokra van szükségünk, melyek gyorsan kivitelezhetők és a sűrűn lakott területek esetén is megoldást kínálnak. A DLR ezen problémákra kínál megoldást és járulékos előnyökkel is rendelkezik, melyek egyre jobban elterjednek. Ilyen előnyök például a terhelhetőség előrejelzése, a vészhelyzetek előrejelzése, a rendszer biztonságának javítása alternatív áramutak felderítésével és jelentős kutatások zajlanak a jegesedés megszüntetését illetően is.

3 A Dinamikus távvezeték terhelhetőség elméleti alapjai

Ebben a fejezetben ismertetem az általam végzett számítások, az általam készített DLR rendszer elméleti alapjait. A következőkben leírtak CIGRÉ és IEEE munkák függvényében, a szakirodalom részletes kutatását követően foglaltam össze.

A célom egy olyan teljes körű dinamikus távvezeték terhelhetőséget megvalósító rendszer fejlesztése, mely a következőkben leírt elméleti megfontolásokat alapul véve képes valós időben meghatározni egy adott távvezeték szakasz pillanatnyi áramterhelhetőségét. A rendszer képes kritikus oszlopközök figyelembe vételére és ezen oszlopközökben a sodronyok belógásának meghatározására.

3.1 Statikus termikus terhelhetőség

A következőkben részletezem a távvezeték termikus terhelhetőségének számítási folyamatát. A statikus termikus terhelhetőség során egy távvezeték állandósult áramterhelését határozzuk meg, állandó sodrony hőmérséklet és állandó környezeti paraméterek mellett.

3.1.1 Bemeneti paraméterek

Statikus termikus terhelhetőség esetén a két legfontosabb paraméter az általunk meghatározott sodrony hőmérséklet, illetve a sodrony fizikai paraméterei. A következőkben először a számítások elméleti alapjait veszem végig, majd egy példán keresztül bemutatom a számítások folyamatát.

A következő bemeneti paraméterekre van szükség

3.1.2 A DLR számítások alapja

Az egész távvezeték terhelhetőség számítás alapjait egy hőtani mérleg adja. A távvezeték terhelhetőséget így, a távvezetékek termikus modelljéből vezetjük le. Ezt jól szemlélteti az 2.

A terhelhetőség alapegyenlete a következő hőtani mérleg:

$$h\ddot{o} \text{ nyereség} = h\ddot{o} \text{ veszteség}$$

$$P_J + P_S + P_M + P_i = P_C + P_r + P_W \quad \text{egyenlet 1}$$

Ahol: P_J – Joule-hő, P_S – napsugárzásból nyert hő, P_M – mágneses hatásokból eredő hő, P_i – korona jelenségekből eredő hő, P_C – konvektív hűtés, P_r – kisugárzott hő és P_w – a csapadékok hűtő hatása.

Azonban ezen tényezők közül nem tudjuk a gyakorlatban mindet figyelembe venni. A P_i , korona jelenség miatt kialakuló hőt, csak magas páratartalom és nagy szélsébség esetén kell figyelembe venni. Azonban ilyen esetekben a konvektív hűtés, P_C sokkal jelentősebb, ezért P_i -t elhanyagoljuk.

A P_w , csapadék miatti/párolgás miatti hő veszteség azonban jelentősen befolyásolhatja a sodrony hőmérsékletét. Azonban a gyakorlati életben ritka, hogy a teljes távvezeték vonal egyszerre legyen kitéve csapadéknak. Emiatt ismét nehéz figyelembe venni ezt a tényezőt. Amennyiben ezt a komponenst is elhanyagoljuk, nagyobb rendszer biztonságot nyerünk, így élünk ezzel a hanyagolással is. Így jutunk el az alábbi egyenlethez:

$$P_J + P_S + P_M = P_C + P_r \quad \text{egyenlet 2}$$

Amennyiben P_M , mágnesezettség miatti hőt, már a joule hőbe számoljuk, a sodrony effektív ellenállásának növelésével, egy még általánosabb összefüggéshez jutunk:

$$P_J + P_S = P_C + P_r \quad \text{egyenlet 3}$$

3.1.3 Számítások

Ebben a fejezetben a már ismerttetett hőtani modell egyes elemeinek számítási módszereit részletezem.

3.1.3.1 Joule hő

Joule-hő azon energia mennyiség, melyet a sodronyon átfolyó áram hoz létre. A továbbiakban a Joule-hő nem foglalja magában a mágneses hő, ezt a két mennyiséget külön számítom. A Joule-hő figyelembe veszi a sima ohm-os ellenállást és váltakozó áram esetén a skin-hatás miatt bekövetkező változásokat. Egyenáramú esetben a joule-hő számítása $P_J = I^2 \cdot R_{DC}$ egyenlet 4 szerint történik.

$$P_J = I^2 \cdot R_{DC} \quad \text{egyenlet 4}$$

Ahol I a teljes DC áram, R_{DC} a hosszegységre jutó egyenáramú ellenállás [ohm/m]. Ez függ az anyag fajlagosellenállásától ρ [ohm*m] adott hőmérsékleten, függ az átlagos sodrony hőmérséklettől T_{AV} és függ a sodrony keresztmetszetétől A [m²]. Az anyag fajlagosellenállása a következő módon számítható:

$$\rho = \rho_{20} \cdot \{1 + \alpha_{20} \cdot (T_{AV} - 20) + \zeta_{20} \cdot (T_{AV} - 20)^2\} \quad \text{egyenlet 5}$$

Ahol α_{20} és ζ_{20} a lineáris és négyzetes hőmérsékleti együtthatók [1/K], [1/K²] 20 °C hőmérsékleten. A négyzetes tag azonban csak 130 °C felett válik jelentőssé. R_{DC} számszerű értékei analitikus módszerekkel is kiszámítható, azonban a gyártók általában megadják ezt az értéket. Adott hőmérsékletre lineáris interpoláció segítségével megkaphatjuk a számításainkhoz szükséges értéket, azonban itt jelentős hibák kerülhetnek a számításainkba. Ezek a hibák abból erednek, hogy az ellenállás változása nem lineáris a hőmérséklet változásával. Általában a sodronyokat 85-90 °C feletti hőmérsékleten nem üzemeltetjük, csak kritikus helyzetekben, ekkor is rövid ideig.

3.1.3.2 A skin-hatás

A skin hatás azon jelenség, amikor váltakozó áram hatására a sodrony ellenállása növekszik, mert a sodronyon folyó áram egyre inkább a sodrony felszínén folynak, annak teljes keresztmetszete helyett. Ezen jelenség figyelembe vételével a Joule-hő a következő módon számítható:

$$P_J = k_{sk} \cdot I^2 \cdot R_{DC} \quad \text{egyenlet 6}$$

Ahol, k_{sk} a skin-hatás miatti tényező. R_{DC} , az egyenáramú ellenállás hosszegységenként. A skin hatás növekszik a sodrony átmérőjének és a frekvencia növelésének hatására.

A skin-hatás miatt bekövetkező ellenállás változás Bessel-függvények segítségével számítható. Azonban ezek komplexitása miatt már előre ki vannak számolva és a gyártó biztosítja ezen értékeket. Így a továbbiakban nem foglalkozom ezek számítási módszereivel.

3.1.3.3 Mágneses hő számítása

Acélmag erősítésű vezetők esetén, mint például az ACSR sodronyok, a sugárirányú lüktető mágneses fluxus és a spirálózó vezető rétegek kölcsönhatása miatt hő keletkezik. Ezt a keletkezett hőt két komponensre bonthatjuk, P_{core} , az a hőmennyiség,

ami az acélmag miatt keletkezik és P_{redis} , az a hő ami a vas mentes vezetőrétegekben, az áram sűrűség újra eloszlásából keletkezik.

$$P_M = P_{core} + P_{redis} \quad \text{egyenlet 7}$$

Ezen hatások csupán páratlan számú (1,3) vezető réteggel rendelkező acélmagos sodronyok esetén jelentkeznek. Páros számú vezető réteg esetén a mágneses hatások semlegesítik egymást. A mágneses jelenségek miatti hőveszteség csak nagy áramsűrűség esetén jelentős. Fontos még megjegyezni, hogy a szabványok (IEC, ASTM) semmilyen kritériumot nem adnak a sodronyok mágneses viselkedése szempontjából. Így a sodronyok mágneses tulajdonságai általában nagyban változnak különböző gyártóként.

3.1.3.4 Napsugárzásból eredő hő

A sodronyok napsugárzásból eredő hő nyereségét (P_{SOLAR} [W/m]) három tényező befolyásolja közvetlenül. P_{SOLAR} egyenesen arányos a sodrony külső átmérőjével D [m], a sodrony felszínének abszorpciós képességével α_S illetve a teljes sugárzási intenzitással I_T [W/m²].

$$P_S = \alpha_S \cdot I_T \cdot D \quad \text{egyenlet 8}$$

α_S : az abszorpciós tényező értéke 0.2-től (egy fényes, új sodrony) 0.9-ig (megviselt vezető, ipari környezetben) változhat. Egy teljesen új sodrony körülbelül 1 hónap alatt jut el $\alpha_S = 0.5$ állapotig ipari környezetben és nagyjából 1 év alatt 0.9 nő az értéke. Az öregedés általában lassabb ritkán lakott, kevésbé szennyezett környezetekben. A sodronyok abszorpcióját nem könnyű meghatározni. Egyes mérési módszerek először a sodrony emisszióját határozzák meg, majd ez alapján az abszorpciót 0.1-0.2-vel nagyobb értékkel közelítik. Egy másik módszer szerint csupán egy állandó abszorpciót kell figyelembe venni, ami legalább 0.8.

I_T : Teljes sugárzási intenzitás, viszonylag könnyen mérhető olcsó és megbízható műszerekkel, melyek DLR szempontjából is alkalmasak mérési eredmények szolgáltatására. Azonban I_T értéke jelentősen változhat a távvezeték vonal mentén és sok tényező befolyásolhatja, mint az adott szakasz tájolása (É-D, É-K stb.), adott domborzat, a környezetből származó sugárzott fényintenzitás. Ezen problémák miatt célszerű a legrosszabb esetre tervezni és a vonal mentén előfordulható legnagyobb sugárzás értékkel számolni. Ebben az esetben I_T -re jó becslés adható a hely, az év napja, a nap relatív

magasságának és a szakasz irányításának figyelembe vételével. Az alábbi formula ezt az összefüggést foglalja össze.

$$P_S = \alpha_S \cdot D \cdot \left[I_B \cdot \left(\sin(\eta) + \frac{\pi}{2} \cdot F \cdot \sin(H_S) \right) + I_d \cdot \left(1 + \frac{\pi}{2} \cdot F \right) \right] \quad \text{egyenlet 9}$$

I_T , a teljes sugárzási intenzitás a földfelszínén több komponensből áll elő. A két fő komponens I_B a sugárzási intenzitás a földfelszínén, ami a felszínre merőleges napsugarakból áll elő, illetve I_d a szórt sugarakból származó fényintenzitás.

I_B a közvetlen sugárzásból eredő fényintenzitás [W/m²]. Ennek számítása tengerszinten a következő kép történik:

$$I_{B(0)} = N_S \cdot \frac{1280 \cdot \sin(H_S)}{\sin(H_S) + 0.314} \quad \text{egyenlet 10}$$

Ahol N_S egy tisztasági tényező a légkört tekintve. A sztenderd atmoszférára $N_S = 1.0$ értéket használunk. Azonban 0.8-1.2 érték jellemző a tiszta égre és 0.5 ipari környezetre. Erős, vastag felhőzet esetén pedig $N_S = 0$ -val is élhetünk. I_B a tengerszint feletti magassággal arányosan növekszik az alábbi képlet szerint:

$$I_{B(y)} = I_{B(0)} \cdot \left[1 + 1.4 \cdot 10^{-4} \cdot y \cdot \left(\frac{1367}{I_{B(0)}} - 1 \right) \right] \quad \text{egyenlet 11}$$

H_S a napmagasság a következő képpen adható meg:

$$H_S = \arcsin(\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta_S) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta_S) \cdot \cos(Z)) \quad \text{egyenlet 12}$$

ahol φ a szélesség; δ_S a deklináció

$$\delta_S = 23.3 \cdot \sin \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot (284 + N^*)}{365} \right] \quad \text{egyenlet 13}$$

N^* = az év napja (ahol január 1. = 1)

Z = a nap óraszöge = $15 \cdot (12 - \text{Time})$, fokban megadva, ahol Time órában van megadva 0-24 formátumban.

I_d , a szórt sugárzási intenzitás [W/m²]. I_B és I_d között van korreláció, ennek gyakorlati magyarázata, hogy felhőzet esetén I_B értéke csökken, míg I_d értéke növekszik. Ennek a hatásnak a leírását magába foglalja $I_d = (430.5 - 0.3288 \cdot I_B) \cdot \sin(H_S)$ egyenlet 14.

$$I_d = (430.5 - 0.3288 \cdot I_B) \cdot \sin(H_S) \quad \text{egyenlet 14}$$

η , a napsugár beesési szöge a sodrony tengelyéhez viszonyítva.

$$\eta = \arccos[\cos(H_S) \cdot \cos(\gamma_S - \gamma_C)] \quad \text{egyenlet 15}$$

Ahol γ_C a sodrony irányszöge.

γ_S a nap irányszöge:

$$\gamma_S = \arcsin \left[\frac{\cos(\delta_S) \cdot \sin(Z)}{\cos(H_S)} \right] \quad \text{egyenlet 16}$$

F a földfelszín „albedo”-ja, a felszín fényvisszaverő képessége. F értéke körülbelül 0.05 víz esetén, 0.1 erdők esetén és 0.6-0.8 havas terület esetén.

3.1.3.5 Konvektív hűtés

A konvekció, hőáramlás által leadott hő szinte mindig a legjelentősebb tényező a hőmérlegben. Termikus besorolás esetén azon esetek a legfontosabbak amikor alacsony a szél sebesség (vagy akár 0), ekkor ugyanis alacsony a hőáramlás és így fel tudnak melegedni a sodronyok. A konvekciónak két típusát különböztetjük meg, természetes és erőltetett konvekció. Előbbi zérus szélesebesség esetén van jelen, míg utóbbi függ a szélesebességtől. Általánosan elmondható, hogy alacsony szélesebességek esetén a természetes konvekció a domináns tag, míg közepes és nagy szélesebességek esetén az erőltetett konvekció az uralkodó komponens.

A hőáramlás miatti hővesztés az úgynevezett Nusselt szám segítségével fejezhető ki zárt alakban a következőképpen:

$$P_c = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_S - T_a) \cdot N_u \quad \text{egyenlet 17}$$

A konvektív hűtés számításában tehát nagy jelentősége van a Nusselt-számnak, ami hőáramlási, termodinamikai megfontolások alapján határozható meg. A Nusselt-szám adott szituációtól és más környezeti paraméterektől függ. Rengeteg kísérlet és megközelítés van jelenleg is érvényben ennek minél pontosabb meghatározására. Azonban alacsony szélesebességek esetén a számítások még mindig pontatlanok és nem adnak kielégítő eredményt. Ezt a problémát Két modell közti eltérések részletezem.

λ_f a levegő hő vezetőképessége T_f hőmérsékleten (a vékony levegőréteg hőmérséklete, ami a sodrony felületét körül öleli). T_S a sodrony hőmérséklete és T_a a környezet hőmérséklete. $T_f = 300 \text{ °C}$ a következő képpen számolhatunk:

$$\lambda_f = 2.368 \cdot 10^{-2} + 7.23 \cdot 10^{-5} \cdot T_f - 2.763 \cdot 10^{-8} \cdot T_f^2 \quad \text{egyenlet 18}$$

Ahol

$$T_f = 0.5 \cdot (T_s + T_a)$$

egyenlet 19

3.1.3.6 Erőltetett konvekció

Egy hengeres, csupasz vezetőre merőlegesen beérkező légáramlás esetén élhetünk az alábbi közelítéssel, mely megadja a kapcsolatot a Nusselt-szám és a Reynolds szám között:

$$Re = V \cdot D / v_f$$

egyenlet 20

Ahol V a szélesség [m/s] és D a sodrony átmérője [m], v_f pedig a levegő kinematikus viszkozitása [m²/s] T_f hőmérsékleten. v_f függ a tengerszint feletti magasságtól és a következő képp fejezhető ki:

$$v_f = \mu_f / \gamma$$

egyenlet 21

Ahol μ_f a levegő dinamikus viszkozitása és γ a levegő sűrűsége [kg/m³] a sodrony magasságában. Az alábbi kifejezés megadja μ_f számítását $T_f \leq 300^\circ\text{C}$ ig.

$$\mu_f = (17.239 + 4.635 \cdot 10^{-2} \cdot T_f - 2.03 \cdot 10^{-5} \cdot T_f^2) \cdot 10^{-6} \quad \text{egyenlet 22}$$

Az alábbi összefüggés, egy újabb mérföld követ jelentett az áramlástani kutatásokban. Először Morgan írta le 1973-ban.[14]

$$Nu_{90} = B \cdot Re^n$$

egyenlet 23

Ahol B és n az alábbi táblázat 1 Reynolds szám segítségével a segéd konstansok kiválasztása szerint alakul:

Sima vezetők			Sodort vezetők $Re_s \leq 0.05$			Sodort vezetők $Re_s > 0.05$		
Re	B	n	Re	B	n	Re	B	n
35 – 5000	0.583	0.471	100-2650	0.641	0.471	100-2650	0.641	0.471
5000-50000	0.148	0.633	2650-50000	0.178	0.633	2650-50000	0.048	0.800
50000-200000	0.0208	0.814						

táblázat 1 Reynolds szám segítségével a segéd konstansok kiválasztása[1][14]

B és n értéke függ a vezető felületének érdességétől Re_s és a Reynolds számtól. Re_s számítására egy lehetséges módszer az alábbi:

$$R_s = d/[2 \cdot (D - d)]$$

egyenlet 24

Ahol, D a sodrony átmérője. A táblázatból látható, hogy alacsony szélességek esetén a sodrony érdessége nem játszik szerepet ($Re < 2650$), viszont növelni tudja a Nu-t és így a hűtést, nagy szélességek esetén akár 60% is. ($Re = 50000$).

Szélesség figyelembe vételére [1]: A fentebb megadott értékek csupán merőleges szélesség esetén érvényesek. Azonban a szélirány rendkívül gyorsan változhat, épp emiatt a szél támadási szöge (δ) fontos szerepet játszik a hűtési folyamatokban. Morgan által kínált összefüggések delta függvényében az alább láthatók:

$$\frac{Nu_\delta}{Nu_{90}} = \left(\sin^2(\delta) + 0.0169 \cdot \cos^2(\delta) \right)^{0.225}, \text{ sima felületű sodronyokra}$$

egyenlet 25

$$\frac{Nu_\delta}{Nu_{90}} = 0.42 + 0.68 \cdot (\sin(\delta))^{1.08}, \text{ sodort vezetőkre } \delta \leq 24^\circ$$

egyenlet 26

$$\frac{Nu_\delta}{Nu_{90}} = 0.42 + 0.58 \cdot (\sin(\delta))^{0.90} \text{ sodort vezetőkre } \delta > 24^\circ$$

egyenlet 27

Ezen összefüggések csupán $Re < 4000$ esetén érvényesek.

3.1.3.7 Természetes konvekció

0 m/s-os szélesség esetén a Nu a dimenzió nélküli Grashof és Prandtl számok szorzatától függ. Ekkor az alábbi összefüggés van érvényben:

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

egyenlet 28

A Reynolds szám esetén D a sodrony teljes átmérőjének kell, hogy legyen. A és m együtthatók értékére Morgan adott becslést $Gr \cdot Pr$ alapján. Ezen értékek több száz kísérlet eredményeként kerültek megállapításra és számtalan más helyen használták fel. Ez atáblázat 2 Természetes hőáramlás számításához szükséges állandók foglalja össze.

Gr Pr értéke		A	m
Minimum	Maximum		
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

táblázat 2 Természetes hőáramlás számításához szükséges állandók[1]

Alacsony szélsébségek:

Az átmenet természetes és erőtített konvekció során rendkívül kényes pont a mainapig. Számos modell készült a jelenség pontos leírására, azonban minden eddigi modell rendelkezik hiányosságokkal és nem írják le pontosan a valóságot. Ezen szélsébség tartományban komplex áramlástani összefüggések alkalmazása szükséges, melyek csupán elméleti síkon állják meg helyüket. A legtöbb közelítőleg jó eredményt adó modell használatához ugyanis a teljes távvezeték vonal mentén ismernünk kéne folyamatosan a szélsébségre és a szélirányra. Ez viszont nem lehetséges.

Ezen problémák miatt, dinamikus távvezeték terhelhetőség esetén a

$$P_c = \pi \cdot \lambda_f \cdot (T_s - T_a) \cdot Nu \quad \text{egyenlet 29}$$

vagy

$$\frac{Nu_\beta}{Nu_0} = 1 - 1.58 \cdot 10^{-4} \cdot \beta^{1.5} \text{ sima vezetőkre } \beta < 60^\circ \quad \text{egyenlet 30}$$

$$\frac{Nu_\beta}{Nu_0} = 1 - 1.76 \cdot 10^{-6} \cdot \beta^{2.5} \text{ sodort vezetőkre } \beta < 80^\circ \quad \text{egyenlet 31}$$

egyenleteket érvényesek. A természetes és az erőtített konvekció közül a nagyobbat használják.

3.1.3.8 Sugárzott hő leadás

A nettó sugárzott hő veszteség a teljes sugárzott energia a sodrony felszínén. Ez két komponensre bontható fel. A hő, mely a földfelé és a környezet felé sugárzódik, a hő mely közvetlenül az ég felé sugárzódik. Stefan-Boltzmann törvényt alkalmazva, a következő összefüggéshez jutunk el.

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot F_{c-g} \cdot \varepsilon_S \cdot \left[(T_S + 273)^4 - (T_g + 273)^4 \right] + \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot F_{c-sky} \cdot \varepsilon_S \cdot \left[(T_S + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4 \right] \quad \text{egyenlet 32}$$

Ahol, D a sodrony külső átmérője, σ_B a stefan-boltzmann együttható, ε_S a sodrony felületének emisszivitása és T_S a sodrony felületének hőmérséklete, T_g a föld hőmérséklete a sodrony alatt, T_{sky} pedig az ég hőmérséklete a sodrony felett, F_{c-g} az

energia azon része, mely eléri a földet és a környezetet. T_{sky} a sugárzott energia azon része mely az égbe megy.

DLR szempontjából egyszerűsíthetjük az általános $P_r = \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot F_{c-g} \cdot \epsilon_S \cdot [(T_S + 273)^4 - (T_g + 273)^4] + \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot F_{c-sky} \cdot \epsilon_S \cdot [(T_S + 273)^4 - (T_{sky} + 273)^4]$ egyenlet 32-vel a közelítéssel, hogy T_g és T_{sky} egyenlő a környezeti hőmérséklettel, T_a -val. Ekkor a következő összefüggést kapjuk:

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot \epsilon_S \cdot (F_{c-g} + F_{c-sky}) [(T_S + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad \text{egyenlet 33}$$

A föld felé sugárzott energia és az ég felé sugárzott energia összegének a teljes sugárzott energiával kell egyenlőnek lennie. Így ezen F_{c-g} és F_{c-sky} együtthatók összegének 1 az értéke:

$$P_r = \pi \cdot D \cdot \sigma_B \cdot \epsilon_S \cdot [(T_S + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad \text{egyenlet 34}$$

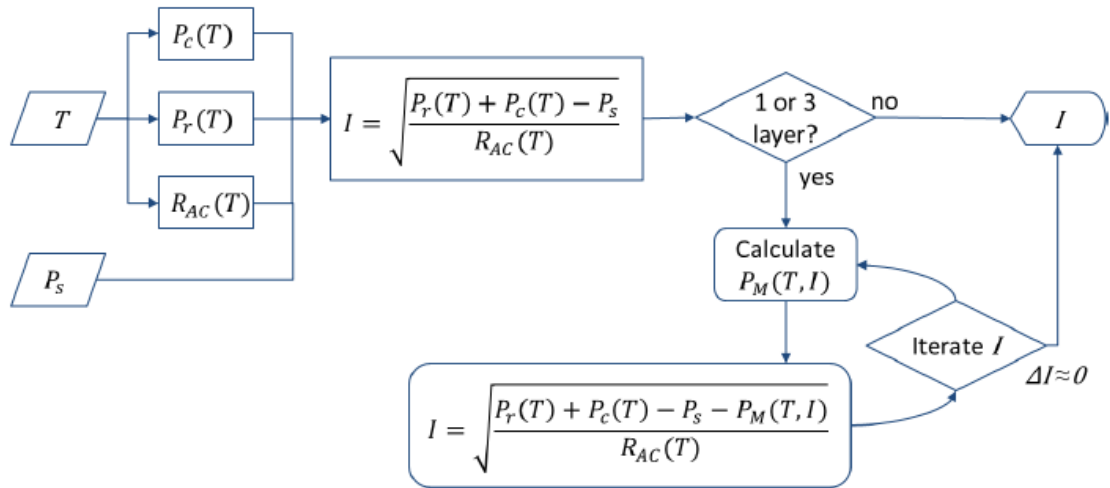
A

3.1.4 Numerikus számítások

AZ

3.1.4.1 Állandósult állapotbeli termikus terhelhetőség számítási elve

A



9.ábra Állandósult állapotbeli termikus terhelhetőség számítása[1]

A

Adott időjárási paraméterek birtokában az első lépés, hogy a Számítások 3.1.3.-ban leírtak szerint kiszámítjuk P_c , P_r és R_{ac} értékét az ismert sodrony hőmérséklet esetén. Ekkor az áramterhelhetőség a hőtani mérleg átrendezésével ($P_J + P_S + P_M = P_c + P_r$ egyenlet 2) kapható meg.

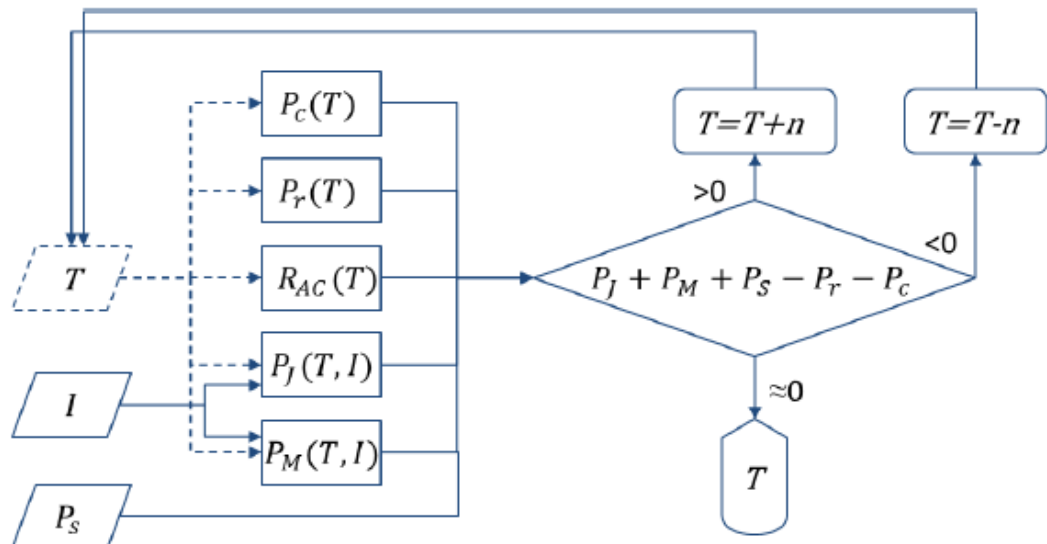
Amennyiben a mágneses hatások is jelentősen befolyásolhatják a kialakult áramterhelhetőséget, szükség lehet I iteratív módon történő kiszámítására.

A számítás egyik fontos járuléka, hogy könnyen ellenőrizhetjük a sodrony radiális hőmérsékleti különbségeit. Ekkor a sodrony magjának és a felszínének hőmérsékleti különbségét számoljuk ki. Amennyiben ez a hőmérséklet túl nagy a sodrony élettartamát megrövidítő káros hatások, fizikai folyamatok indulhatnak meg. Emiatt célszerű ezt a radiális hőmérséklet különbség értéket ellenőrizni.[1]

A számítások konkrét megvalósítását 4.4.2-ben részletezem.

3.1.4.2 Állandósult állapotbeli sodrony hőmérséklet számítási elve

Állandósult állapotbeli számításaink ellenőrzéseként lehetőségünk van az állandósult állapotbeli hőmérséklet kiszámítására.



10.ábra Állandósult állapotbeli hőmérséklet számítása[1]

Ehhez az alábbi egyenletet kell megoldanunk:

$$P_J(T, I) + P_M(T, I) + P_S - P_C(T) - P_r(T) = 0 \quad \text{egyenlet 35}$$

A hőmérséklet számítása iteratív módon történik és egy első becslésre van szüksége a rendszernek. A rendszer minden egyes becsléssel közelebb kerül a valós hőmérséklethez.

Az számítás konkrét megvalósítását 4.4.1.-ben részletezem

3.1.4.3 Tranziens számítások:

A tranziens számítások adják a dinamikus távvezeték terhelhetőség alapjait. Ahhoz, hogy a biztonsági távolságokat, környezet és személyi védelmet biztosítani tudjuk folyamatosan változó körülmények között is meg kell tudnunk határozni a sodronyok hőmérsékletét. A következőkben bemutatott módszer képes nagy pontossággal meghatározni a sodrony aktuális hőmérsékletét.

A szabadvezetékek hőmérséklet változását az alábbi egyenlet határozza meg:

$$m \cdot c \cdot \frac{dT_{av}}{dt} = P_J + P_M + P_S - P_C - P_r \quad \text{egyenlet 36}$$

Ahol m a sodrony hosszegységre jutó tömege [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$] és c pedig a vezető hőkapacitása [$\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$]. Vasmentes vezetők ($P_M = 0$) és acél-magos sodronyok esetén:

$$m \cdot c = m_a \cdot c_a + m_s \cdot c_s \quad \text{egyenlet 37}$$

Összefüggés érvényes, ahol az a és s alsó indexek a vasmentes és a vas tartalmú sodrony részekre utal. Egyes sodrony típusok sűrűségét $100 \text{ }^\circ\text{C}$ -ig állandónak szoktuk tekinteni és a hőkapacitásukat a hőmérséklet függvényében lineárisan változónak tekintjük:

$$c(T) = c_{20} \cdot [1 + \beta_{20} \cdot (T - 20)] \quad \text{egyenlet 38}$$

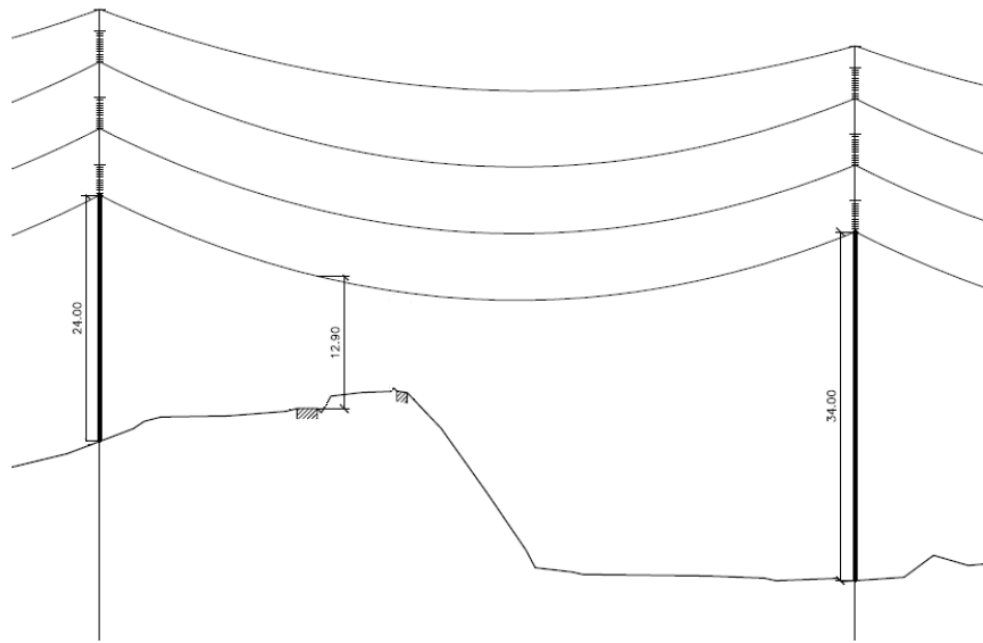
Ahol a 20-as alsó index a $T=20 \text{ }^\circ\text{C}$ -on érvényes értékeket jelöli, β_{20} pedig a hőmérsékleti együttható.

A hőmérleg egyes elemei különbözően viselkednek változó paraméterek hatására. P_J joule hő lineárisan növekszik T_{av} hőmérséklettel. A skin-hatás tényezője enyhe nem linearitással rendelkezik a sodrony hőmérsékletét tekintve, azonban minden más paramétertől független. P_M , mágneses hő általában elhanyagolható, azon sodrony típusok esetében, ahol viszont mégis számít P_M értékét befolyásolja a sodrony hőmérséklete, a sodrony feszítettsége és az áramerősség. A környezeti paraméterektől független. P_S , napsugárzásból nyert hő gyakorlatilag a globális sugárzástól függ és teljesen független az

áramerősségtől és a sodrony hőmérsékletétől. P_r nem lineárisan változik a sodrony hőmérséklet függvényében és függ a környezeti paraméterektől.[1]

3.2 Kritikus oszlopközök meghatározása

A kritikus oszlopközök meghatározása egy olyan feladat, melyet az eddigiek során mindig emberi erőforrásokkal kellett kivitelezni. Ennek oka az, hogy a valóságos objektumokat, akadályokat, melyek a távvezetékek alá, környezetébe kerülnek, nem lehet másképp felmérni.



11.ábra Hirtelen letörés és még egy út keresztezés a távvezeték szakasz mentén

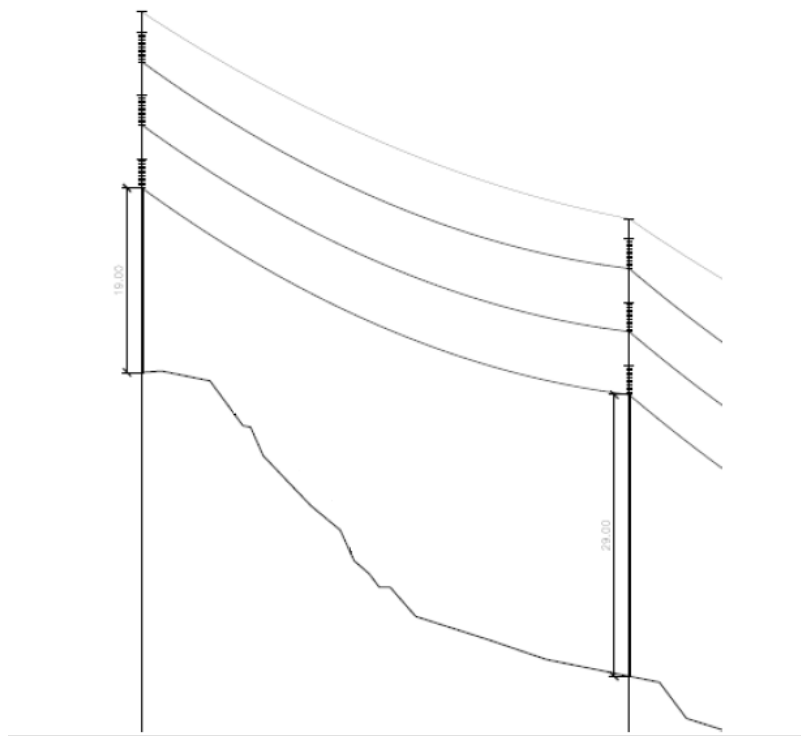
A hossz-szelvények által kínált adatok jelzik, hogy mekkora távolságra vannak egymástól az adott oszlopok, jelzik, hogy milyen jellegű a domborzat az adott helyen, milyen jellegű akadályok vannak a sodrony alatt (utak (11), ültetvények, házak, folyók). Azonban nem támaszkodhatunk ezen adatokra. Közép- és kisméretű távvezetékek esetében számtalan példa volt már arra, hogy fák nőttek veszélyesen közel a szabadvezetékekhez. Egy másik fontos eset, az olyan területek vizsgálata melyeken munkavégzés zajlik. Amennyiben ilyen területen halad keresztül a távvezeték, rendkívül fontos, hogy nagybiztonsággal ismerjük a sodronyok belógását. Egyéb más akadályok is

elképzelhetők, azonban a jogi korlátozások miatt ritka az olyan eset, hogy emberi építmények kerüljenek túl közel a sodronyokhoz.

Az alábbiakban ismertetem azt a módszert, melyet a kritikus oszlopközök automatikus felismerésére, meghatározására dolgoztam ki. Fontos megjegyezni, hogy ez a módszer nem váltja ki teljes mértékben a helyszíni felméréseket, azonban nagyban megkönnyíti azt. Például a teljes távvezeték vonal bejárása szükségtelenné válik.

A módszer alapját a tartó és feszítő oszlopok helyzete adja. A számítások előnye, hogy semmilyen helyszíni mérést nem követel meg.

A kritikus oszlopközök meghatározásához az alábbi kritérium rendszert állítottam fel. A meglévő adatok alapján ki kell számolnunk az összes oszlopköz távolságát és az összes oszlopköz szintkülönbségét.



12.ábra Folyamatos szintkülönbség két távvezeték oszlop közt.

Az első lépésben ki választjuk az 10 legnagyobb oszlopközzel rendelkező szakaszt. A második lépésben pedig a 10 legnagyobb szintkülönbséggel rendelkező szakaszt. Nehéz számszerű kritériumokat megfogalmazni, mint például minden 500 m-

nél hosszabb oszlopközt kiválasztunk, ugyanis a sodrony típusától, tartó oszlop típusától és a domborzattól is függ, hogy ez az 500 m sok vagy kevés.

A hosszabb oszlopközök kritikusak, ugyanis nagyobb áramterhelhetőség hatására, magasabb hőmérsékleten üzemelnek a sodronyok, így megnövekszik a sodronyok belógása. A hosszabb oszlopközök esetén ez a belógás jobban megnő, mint rövidebb oszlopközök esetén.

A szintkülönbségek azért kritikusak, mert nem tudhatjuk, hogyan változik a domborzat. Ha egyenletesen változik a szintkülönbség a két oszlopközt (12), akkor nincs probléma. Amennyiben egy hirtelen letörés (11) van jelen az oszlopköznél akkor már kisebb mértékű belógás változások is problémát jelenthetnek.

Az első két lépés után 10-10 oszlopköz lett kiválasztva. Ekkor a harmadik lépésben kiválasztjuk, azon oszlopközöket, melyek mindkét lépésben kiválasztásra kerültek. Ezek mindenképp kritikusnak számító oszlopközök. A többi oszlopköz esetén a hossz-szelvény alapján és mérnöki megfontolások alapján kell eldöntenünk, hogy kritikusak-e. Egy átlagosan 500 m-es oszlopközökkel rendelkező távvezeték vonal esetén lehetséges, hogy három 500 m alatti oszlopköz kritikusként lett kiválasztva a nagyszint különbségek miatt, viszont egy 700 m-es nem lett kiválasztva, mert teljesen sikerületen halad. Ezek a megfontolások jól fedik a valóságot.

Az ezek alapján kiválasztott oszlopközök figyelése kellő biztonságot ad a tervezők számára, hogy egy jó alsó becslést, minimum követelményt ad. Azaz a minimális szenzorok számát és azok optimális helyét tudjuk meghatározni, a szenzorokat a kritikus oszlopközökbe kell felszerelnünk.

A módszer hátránya, hogy nincs helyszíni mérés. Ennek szükségességét az adja, ahogyan már a bevezetőben is említettem, a tervezők számára ismeretlen akadályok kerülhettek a sodronyok alá az építés óta.[16]

4 Teljeskörű DLR rendszer

Az alábbi fejezetben részletezem az általam felépített modell szerkezetét. Kitérek a rendszer sajátosságaira, előnyeire, hátrányaira. A rendszer felépítésénél ismertetem a mérnöki megfontolások fizikai hátterét, illetve a jelenleg érvényes szakirodalom ajánlásait figyelembe veszem.

4.1 Célkitűzés

A célom egy olyan dinamikus távvezeték terhelhetőséget megvalósító rendszer építése, mely figyelembe veszi a sodronyok belógását és a kritikus oszlopközöket. A rendszer képes automatikusan ajánlást adni a kritikus oszlopközökre és ezek figyelembe vételével számolja ki a távvezetékek valós idejű terhelhetőségét.

4.2 Miért a Matlab?

A Matlab egy olyan programozási nyelv, mely lehetővé teszi bonyolult számítások és vizualizációk gyors megjelenítését. A fejlesztőkörnyezet számtalan beépített eszközzel rendelkezik, mely más nyelvekben, mint JAVA, Visual Basic, C# stb. nem található meg. Jelenleg a Matlab egy, az iparban is, rendkívül széleskörűen használt software, melyet a mérnökök azért használnak, mert segítségével gyorsan lehet komplex számításokat és szimulációkat elvégezni.

Választásom azért esett a Matlabra, mert rendkívül széleskörű támogatást nyújt különböző fájl formátumú adatok feldolgozására. Nagy mértékű támogatás van a különböző ipari rendszerekkel való kommunikációhoz (pl.: SCADA). Illetve a korábban felsorolt nyelvek közül, a Matlabbal van a legnagyobb tapasztalatom.

Továbbá Matlab környezetben lehetőség nyílik GUI interaktív fejlesztésére. Ami szintén meggyorsítja és megkönnyíti a fejlesztést. Illetve lehetőséget biztosít a program jövőbeli fejleszthetőségére. Ezt a rugalmasságot más programozási nyelvekben sokkal nehezebb implementálni.

4.3 Rendelkezésemre álló adatsor

Nagymennyiségű valós adat áll rendelkezésemre. Ezen adatok egy mediterrán övezetben található 220 kV-os távvezeték vonalon elhelyezett szenzorokból származnak.

Az adatsorok néhol hiányosak, azonban arra teljes mértékben alkalmasak, hogy teszteljem az általam fejlesztett rendszert. A hiányosságok bizonyos mért paraméterek hiányát is jelentik és bizonyos időközökben való teljes adatsorok hiányát is.

A következő paramétereket állnak rendelkezésemre a számítások során:

Szenzor azonosítója (*SensorID*) ez alapján a szenzor helyét lehet azonosítani, hogy melyik oszlopközbe van felhelyezve.

Mérése ideje (*measurementTime*): ez alapján állítom elő a terhelhetőséget (x-tengely adatai).

Szélirány (*windDirection*): a szél iránya fokban megadva.

Globális nap sugárzás (*solarRadiation*): ennek segítségével tudom számítani P_S -t.

Környezeti hőmérséklet (*ambientTemperature*): Adott szenzor által mér környezeti hőmérséklet.

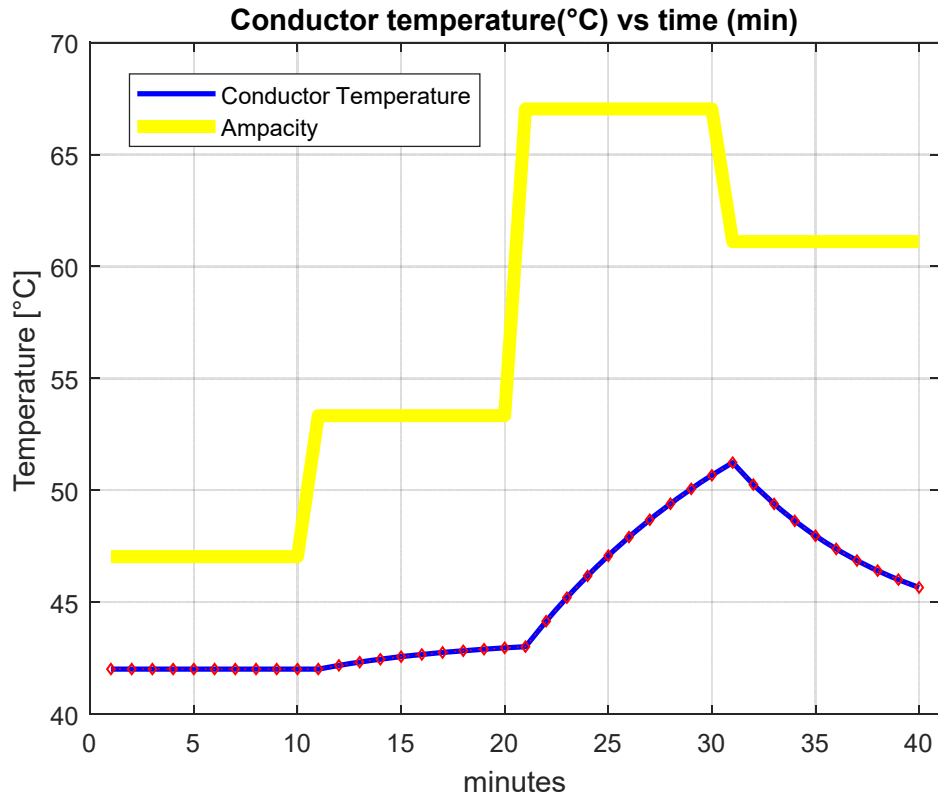
Továbbá még rendelkezésemre áll a relatív páratartalom, mint bemeneti adat, azonban ezzel nem foglalkozom. Amennyiben a korona hatások miatti hőt is figyelembe venném ezen paraméterre is szükségem lenne a számításokhoz.

4.4 Megvalósítás

A szoftver megvalósításához egy Matlab programot írtam, melyet a felhasználók egy grafikus felületen keresztül tudnak használni. A DLR rendszer implementálása során minden számítást a Dinamikus távvezeték terhelhetőség elméleti alapjai leírtak szerint végeztem. Az következőkben csak azon számításokat veszem sorra, ahol olyan megoldásokat alkalmaztam, melyek megoldása nem teljesen triviális. Némileg eltér a Dinamikus távvezeték terhelhetőség elméleti alapjai leírtaktól.

4.4.1 Állandósult állapotbeli sodrony hőmérséklet meghatározása (Steady state conductor temperature)

A statikus termikus terhelhetőség meghatározásához a CIGRÉ dokumentumban leírtak alapján teszem. Azonban a tényleges számítások matematikai hátterén némileg változtattam.

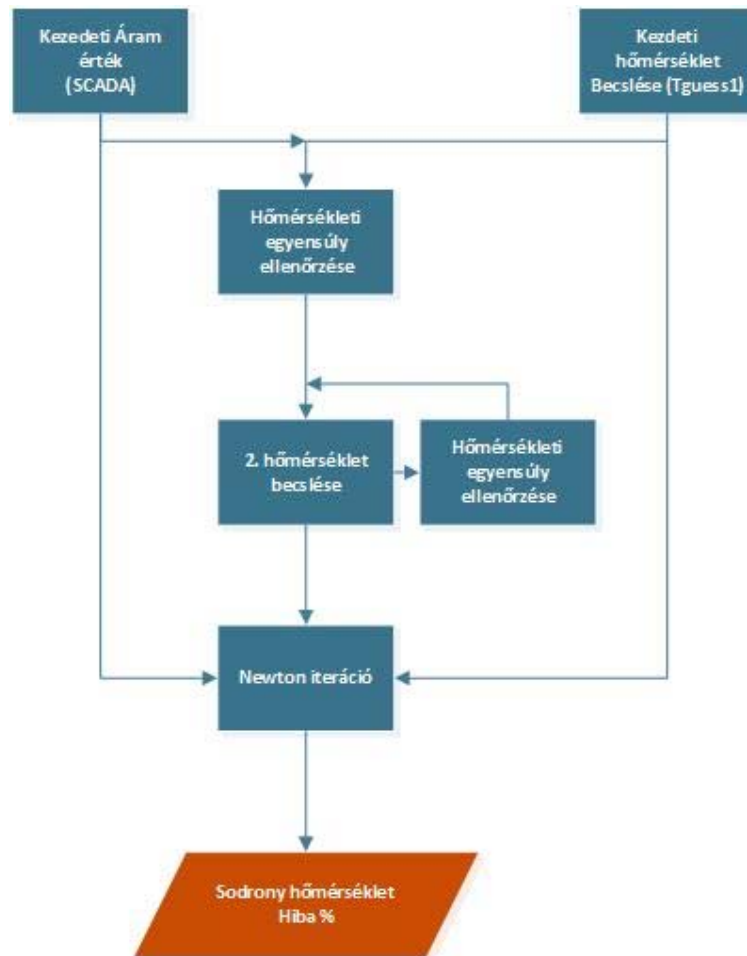


13.ábra Sodrony hőmérsékletének változása az áramterhelés hatására

A CIGRÉ-ben az elméleti módszer van csupán meghatározva, azonban a számításokhoz csupán egyfajta spagetti kódot írtak le. Ennek mind működőképessége mind pedig pontossága megkérdőjelezhető.

Az iteratív eljárás során a CIGRÉ-ben leírtak szerint először 10 °C-os léptékkel, majd 1 °C-kal kell közelíteni minden iteráció során az eredményhez. Ehelyett az általam fejlesztett rendszerben az úgynevezett „felező módszert” („bisectional method”).

A módszer matematikai háttérét a következőkben nem részletezem. A forráskód alább látható. Ahhoz, hogy ezt a módszert alkalmazni tudjam, szükség volt némi átalakítására a CIGRÉ-ben leírt elvi folyamat ábrának (10). Az eddigi módszerek esetén, ugyanis nem volt kifejezve a hőmérséklet függés, mint egyedüli bemeneti paramétere a számításoknak.



14. ábra Sodrony hőmérsékletének meghatározása

Az általam implementált megoldással pontosabb eredményt lehet elérni és azt is tudjuk, hogy az eredménynek mekkora a hibája. Az algoritmus működéséhez az itt látható forráskód részlet ad magyarázatot. Magát az iterációt a *bisectionIteration* függvény végzi. Ennek csupán segédfüggvénye a *getCorrectTguess2* függvény, ez csupán a matematikai eszköz működése miatt szükséges. További fizikai megfeleltetést ezért nem lehet hozzákötni a módszerhez. A 4.4.4.1 fejezetben egy példa számítás eredménye látható.

```

function [T_final, error] = bisectionIteration(T_guess,T_guess_2, NFault)
%This function is responsible for the bisectional convergence towards the
root of the heat balance equation.

% This fault handling is done at getCorrectTguess2.m so a correct guess is
ensured.

%% Initial new guess
%new guess is made
T_new_guess = (T_guess + T_guess_2)/2;

err = abs(heatBalance_T(T_new_guess));
  
```

```

%% Iteration

while err > NFault
    if heatBalance_T(T_guess)*heatBalance_T(T_new_guess)<0
        T_guess_2 = T_new_guess;
    else
        T_guess = T_new_guess;
    end
    T_new_guess = (T_guess + T_guess_2)/2;
    err = abs(heatBalance_T(T_new_guess));
end
T_final = T_new_guess;
error = err;
end

```

4.4.2 Állandósult állapotbeli termikus terhelhetőség (Steady state thermal rating)

4.4.2.1 Két modell közti eltérések

A következőkben az általam implementált termikus terhelhetőséget megvalósító eljárást részletezem. A módszer matematikai és fizikai háttere a CIGRÉ és IEEE modelleknek megfelelően implementáltam.

Itt jelentős eltérést találtam a két modell között. A távvezetékek dinamikus terhelhetősége esetén ugyanis a CIGRÉ modellben leírtaknak megfelelően végzett számítások és az IEEE szerinti számítások jelentősen eltértek egymástól.

A számítások során rendkívül kis értékeket kaptam $P_{convective}$ esetén. Emiatt további kutatásokat és szimulációkat végeztem. Végül az IEEE[2] és a Cigré[1] modellt hasonlítottam össze.

Az eredmények eltérése a különböző fizikai hátterekre vezethető vissza. A CIGRÉ modellben a Reynolds és Nusselt számokra való áramlástani indoklás alapozza meg a hőáramlás miatti hő veszteséget. Az IEEE modell nem ad ennyire részletes magyarázatot csupán az alábbi összefüggéseket közli.[2]

Erőltetett konvekció esetén:

$$P_c = \left[1.01 + 0.372 \left(\frac{D\rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0.52} \right] k_f K_{angle} (T_c - T_s) \quad \text{egyenlet 39}$$

Illetve

$$P_c = \left[0.0119 \left(\frac{D\rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0.6} \right] k_f K_{angle} (T_c - T_s) \quad \text{egyenlet 40}$$

Ahol a két egyenlet közül mindig azt kell figyelembe venni, amely nagyobb értéket ad. K_{angle} A szélirány miatti korrekciós tényező. Ennek számítása az alábbiak szerint történik.

$$K_{angle} = 1.194 - \cos(\theta) + 0.194 \cos(2\theta) + 0.368 \sin(2\theta) \quad \text{egyenlet 41}$$

Ahol θ a szélirány a sodrony tengelyével bezárt szög. Természetes hőáramlás esetén $P_{convective}$ számítása az alábbiak szerint történik[2]:

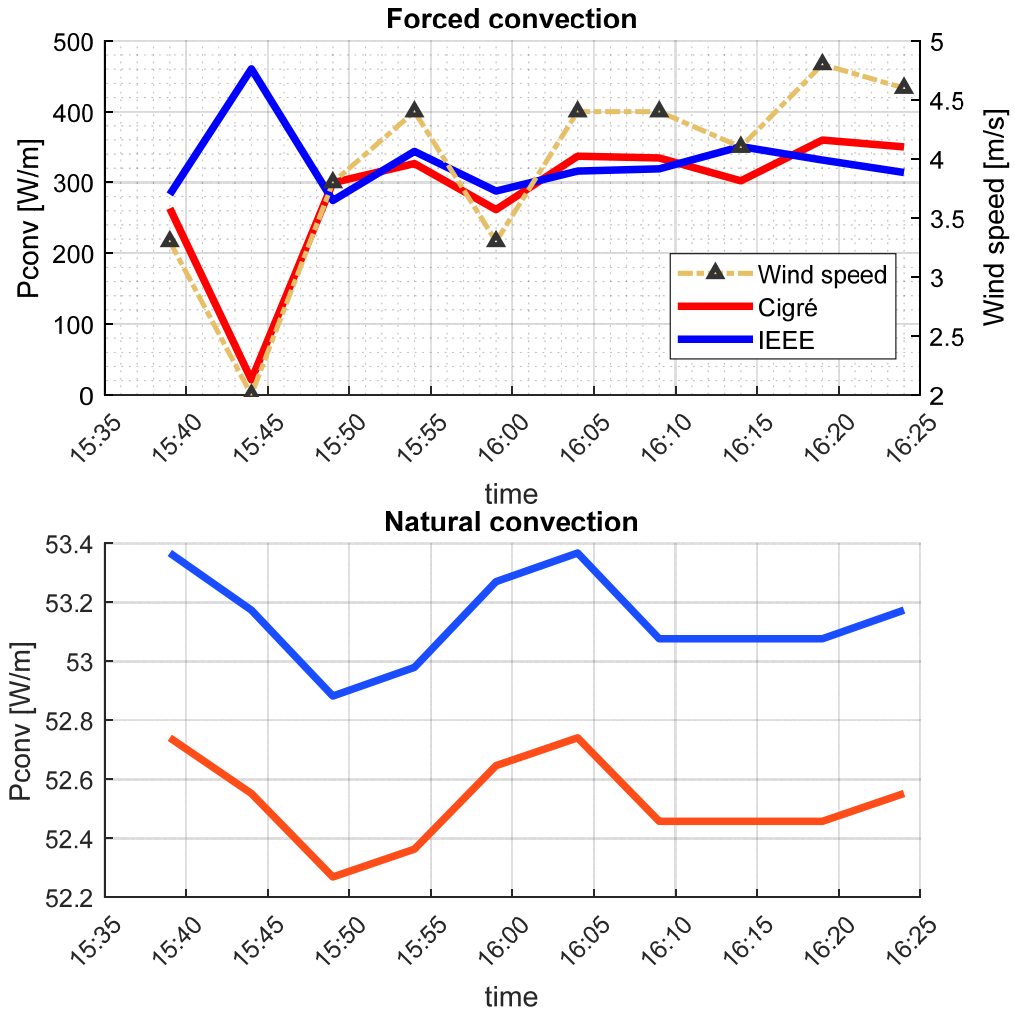
$$P_c = 0.0205 \rho_f^{0.5} D^{0.75} (T_c - T_a)^{1.25} \quad \text{egyenlet 42}$$

4.4.2.2 Az eltérések összevetése

Ahhoz, hogy összehajthassam hasonlítani a kétféle megközelítésből származó eredményeket, nagymennyiségű szimuláció elvégzésére volt szükségem. Így erre a feladatra egy külön scriptet írtam, melynek egyedüli célja volt, a két modell közti különbségek vizsgálata. Ennek eredménye 15 látható.

A szimuláció során csupán P_c értékeit számolom ki. Az értékeket két részre bontottam és külön jeleztem ki $P_{c_{forced}}$ és $P_{c_{nat}}$ értékeit. Illetve megjelenítettem a szélsőérték értékeit is.

Wind changes and Pconvective during 2013 07 22-2013 07 22

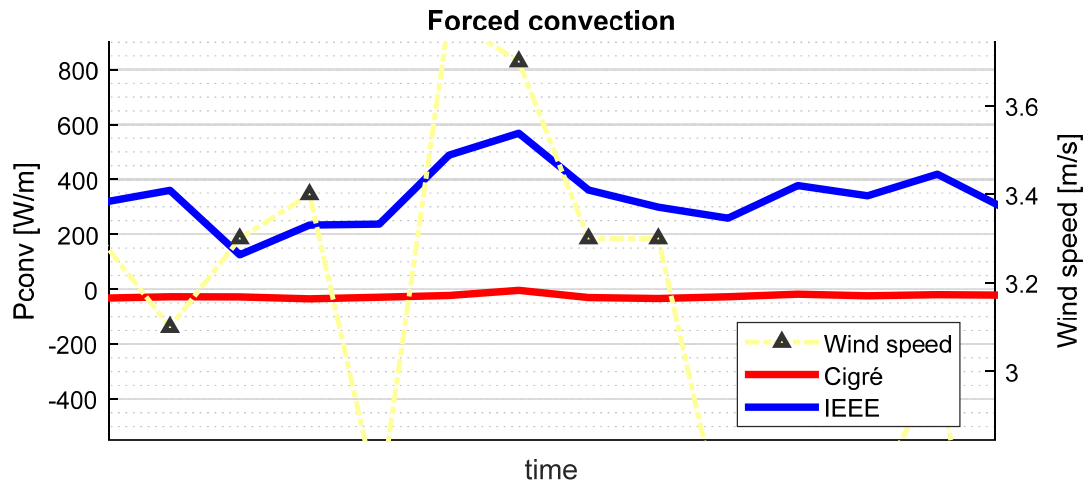


15.ábra Szélsebesség függvényében a $P_{convective}$ számítása

Az eredményekből egyértelműen látszott, hogy $P_{c_{nat}}$ esetén csupán konstans miatti eltérés van, melynek értéke érdemben nem befolyásolja a távvezeték terhelhetőségét. Azonban $P_{c_{forced}}$ esetén jelentős eltérések vannak.

Általánosan kijelenthető, hogy a CIGRÉ modell egy sokkal konzervatívabb megközelítést ad és az esetek döntő többségében alacsonyabb hűtési teljesítményt ad meg, mint az IEEE modell.

Ennek oka, hogy a CIGRÉ modell sokkal több esetben számít $P_{c_{nat}}$ értékével, még olyan esetekben is, ahol egyébként indokolatlan lenne, hiszen a szél sebessége egyáltalán nem az elhanyagolható tartományba esik (16).



16.ábra CIGRÉ és IEEE modellek eltérő számításai

Összefoglalva, a CIGRÉ és IEEE modellek lényeges eltérést mutattak a távvezetékek termikus terhelhetőségét illetően. Emiatt további számításokat végeztem és egyértelművé vált, hogy P_c számítása miatt jelentkeznek ezek az eltérések.

P_c számítási módszerét implementáltam mind az IEEE mind a CIGRÉ modell szerint és a különböző befolyásoló változókra nézve érzékenységi vizsgálatokat végeztem. Ezen vizsgálataimból a szélsőségek miatt eltérések mutatták a legnagyobb eltéréseket.

A szimulációk és számítások elvégzése után arra a következtetésre jutottam, hogy a CIGRÉ modell egy sokkal konzervatívabb szemléletet követ, mely sok esetben figyelmen kívül hagyja a szél hűtő hatását. Emiatt további számításaim során az IEEE által használt modellt alkalmazom. Mivel ez konzervatívabban veszi figyelembe a szélsőséget.

4.4.2.3 Termikus terhelhetőség számítása

A termikus terhelhetőség számítását összességében a CIGRÉ -ben leírtak szerint végzem. Ez alól kivétel P_c számítása, ugyanis az eltérések összevetése miatt az IEEE által közölt módszereknek megfelelően végzem a számításaimat.

A számítások módszere teljes egészében a már korábban (A Dinamikus távvezeték terhelhetőség elméleti alapjai) leírtaknak megfelelően történik.

4.4.3 Virtuális szenzor és valós idejű terhelhetőség

A szakdolgozatomban egyik legfontosabb eleme, hogy valós idejű terhelhetőséget számítok. Ennek kulcsfontosságú szereplője az adatok valós idejű feldolgozása.

Mivel fizikailag nem áll rendelkezésemre egy tényleges hardware ami adatokat küldeni a számítógépnek, ezért virtuális szenzorral dolgozom. Ennek lényege, hogy az adatokat adott időközönként küldi a fő programnak. Ekkor a program képes a frissen beérkezett adatok alapján egy éppen aktuális terhelhetőség kiszámítására. Ilyen módon kvantált lesz a rendszer, azonban ettől nem veszi el a valós idejűségét. A rendszer mind addig valós idejű terhelhetőséget valósít meg, amíg az egyes számítási időegységek (két adat feldolgozása közt eltelt idő) nem haladja meg a sodronyok termikus időállandóját.

A termikus időállandó kiszámításával nem foglalkozom, mert a rendelkezésemre álló adatsor 5 percnként szolgáltat új adatot. A sodronyok termikus időállandója általában 10 de inkább 15 perces nagyságrendűek.

A virtuális szenzort egy függvény segítségével valósítom meg, melyet alábbi forráskód valósít meg.

```
Function[updatedWeatherParameter,actualDateMatrix]
=virtualSensor(wethParam,sensorID,startingTime,actualDateMatrix)
%This function acts as a sensor. sends data for calculation to the main
%function.

% error handling
%% Accessing sensore Data
%create file ID
fileID = ['weather-',num2str(sensorID),'-',num2str(startingTime),'.csv'];
% Read input data
newParam = readtable(fileID,'Delimiter',';', 'ReadVariableNames',true);

%% Refreshing weather data

updatedWeatherParameter = wethParam;

updatedWeatherParameter.AmbientAirTemperature =
newParam.ambientTemperature(getCurrentTime);
updatedWeatherParameter.WindSpeed = newParam.windSpeed(getCurrentTime);
updatedWeatherParameter.WindAngle = newParam.windDirection(getCurrentTime);
updatedWeatherParameter.It = newParam.solarRadiation(getCurrentTime);
%% conditioning time data

tempDateCell = newParam.measurementTime(getCurrentTime);
tempDateCell = strsplit(tempDateCell{1},'.');
actualDate = datetime(tempDateCell{1},'InputFormat','yyyy-MM-
dd'T'HH:mm:ss');
actualDateMatrix(getCurrentTime) = actualDate;
%using actualDateMatrix, the global variable getCurrentTime equals to the
%row of the date matrix. Example: getCurrentTime = 3 the current time is
```

```
%the 3rd row of the actualDateMatrix, which means the actual time is  
%actualDateMatrix(getCurrentTime) = [date-format].
```

A szenzor ugyanazt a funkciót végzi el, mint amit egy valódi szenzornak kell csinálnia. Adott időközönként új adatokat küld, vagyis a következő feladatokat végzi el: bekéri az éppen aktuális adatokat, az új adatokat időbélyeggel látja el (getCurrentTime) és frissíti az éppen aktuális adatokat. Majd átadja az új adatokat a fő programnak.

Ezzel a függvénnyel szimulálom a rendszer valós idejűségét. Ha csupán a távvezeték dinamikus terhelhetőségére lennék kíváncsi akkor az rendelkezésemre álló adatsort egybe olvasnám be. Így akár egy nagyságrenddel gyorsabban megkaphánám az eredményeket.[1][9]

4.4.4 A valós idejű terheltség számítása

A program törzsét egy alap modul adja, mely a korábban ismertetett számításokat, funkciókat csupán részfeladatként kezeli ezeket, mint függvényeket hívja meg.

A program egy kezdeti, inicializálási folyamaton megy keresztül az indítás után (sodrony adatok betöltése, távvezeték vonal adatainak betöltése, kritikus oszlopközök meghatározása). Ekkor a működéshez szükséges változókat alaphelyzetbe állítja. A program a gyorsabb futási idő érdekében memória allokációt is végre hajt.

A program azonnal létrehozza az ábrázoláshoz szükséges felületet, azonban tényleges grafikus adat csak akkor kerül ki, amikor az első számításokat elvégezte már.

4.4.4.1 Első számítások

Az első számításokhoz a programnak szüksége van egy kezdeti áram értékre, melynek segítségével kiszámolja a sodrony aktuális hőmérsékletét. Ezt az értéket az üzemeltetőnek kell biztosítania (például SCADA rendszerből könnyen kinyerhető az adat). A szimulációk során kezdeti 1802 A-es értéket adtam meg, ez egy valós terheltségnek számít ekkora feszültség szinteken.

Az alapmodul ezután folyamatosan végzi az adatok bekérését (amíg a szenzor küldi/ a felhasználó le nem állítja). Majd ahogy új adat áll rendelkezésre, elvégzi a szükséges számításokat és kirajzolja ezeket. Mivel ez a modul adja a gerincét az egész szoftvernek és ennek a logikája tükrözi az egészrendszer felépítését, a következő folyamat ábrával (17. ábra) szemléltetem az egész program működését.



17. ábra A program egyszerűsített működése

4.4.5 Szimulációs eredmények

Egy próbaszámítás eredményeit az alábbiakban közlöm.

4.4.5.1 Felhasznált adatok

A számítások során felhasznált adatok a következők voltak:

Időjárási adatok:

<i>Szenzor ID</i>	<i>Mérés ideje</i>	<i>Szél sebesség [m/s]</i>	<i>Szél iránya [°]</i>	<i>Nap sugárzás [W/m]</i>	<i>Hőmérséklet [°C]</i>
0	2013-07-22 15:39:02	3.3	107.0	736.0	28.4
0	2013-07-22 15:44:02	2.0	211.0	738.0	28.6
0	2013-07-22 15:49:02	3.8	91.0	718.0	28.9

0	2013-07-22T15:54:02	4.4	110.0	716.0	28.8
0	2013-07-22T15:59:02	3.3	109.0	702.0	28.5
0	2013-07-22T16:04:02	4.4	99.0	698.0	28.4
0	2013-07-22T16:09:02	4.4	101.0	653.0	28.7
0	2013-07-22T16:14:02	4.1	116.0	654.0	28.7
0	2013-07-22T16:19:02	4.8	99.0	654.0	28.7
0	2013-07-22T16:24:02	4.6	94.0	662.0	28.6
0	2013-07-22T16:29:02	4.3	93.0	650.0	28.6
0	2013-07-22T16:34:02	3.9	109.0	640.0	28.8
0	2013-07-22T16:39:02	3.5	102.0	626.0	28.8
0	2013-07-22T16:44:02	4.7	113.0	588.0	29.0
0	2013-07-22T16:49:02	3.8	98.0	598.0	28.8
0	2013-07-22T16:54:02	4.2	101.0	571.0	28.9
0	2013-07-22T16:59:02	3.7	85.0	567.0	28.9
0	2013-07-22T17:04:02	4.0	93.0	532.0	29.0
0	2013-07-22T17:09:02	3.8	95.0	526.0	28.8
0	2013-07-22T17:14:02	4.0	115.0	547.0	29.0

táblázat 3 Bemeneti adatok, a szenzor által küldött paraméterek

Sodrony adatok:

Átmérő (Ds) [mm] 28.1

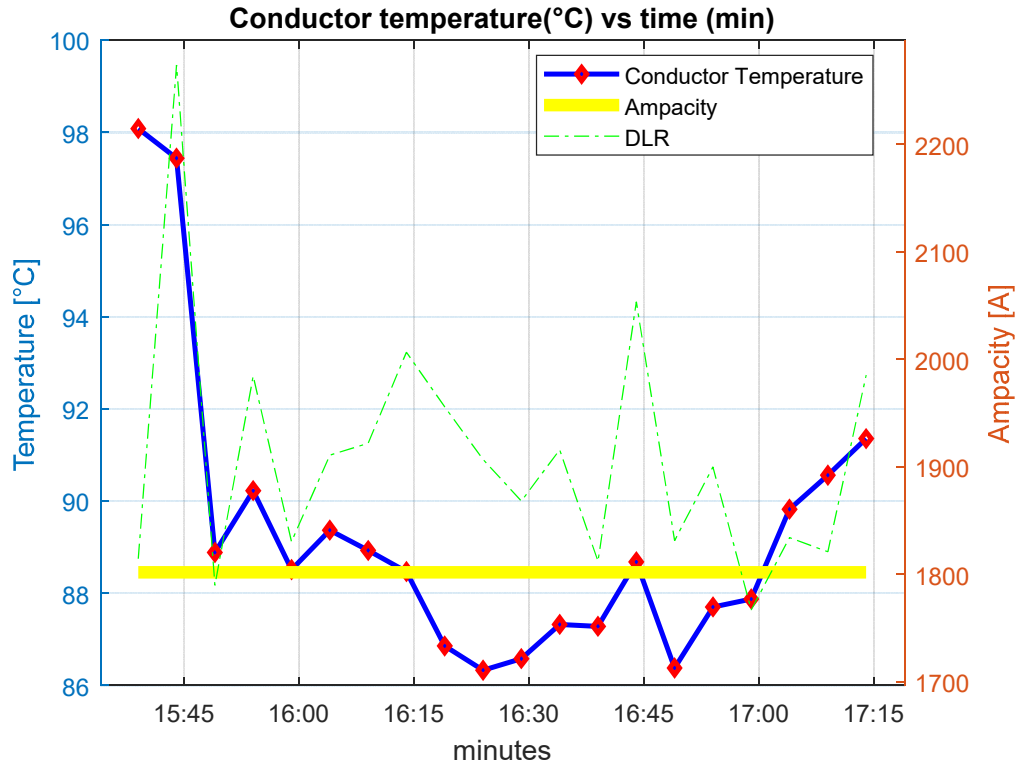
D1	10.4
d	4.44
Tmax	100

Emisszivitás	0.8
Abszorpció	0.8
T1	25
RacT1	7.28*10 ⁻⁵
T2	75
RacT2	8.72*10 ⁻⁵
Sodrony szálak száma	1
acél ő kapacitás hőmérséklet	20
Hő kapacitás	481
Alumínium hőkapacitás hőmérséklet	20
Alumínium hőkapacitása	897
Acél hőmérsékleti együtthatója	0.0001
Alumínium hőmérséklet együtthatója	0.00038
Acél hosszegységnyi tömege	0.5119
Alumínium hosszegységnyi tömege	1.116
Sodrony hosszegységnyi tömege	1.6279
Feszítő képesség	139.92
Elaszticitás	7550
Termikus megnyúlási együttható	1.92*10 ⁻⁵

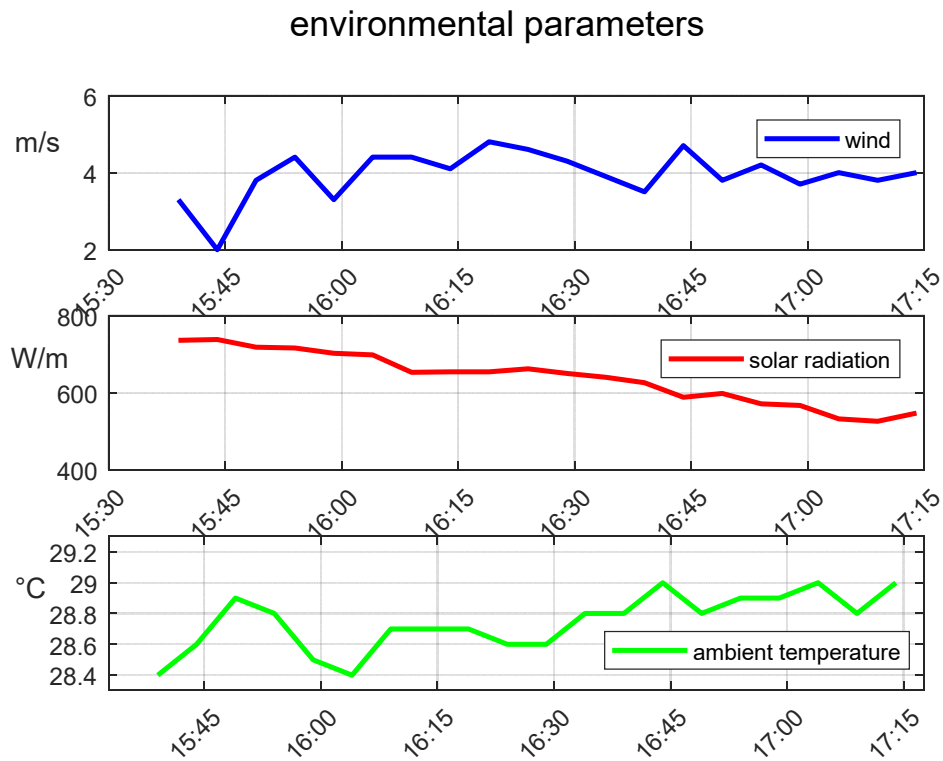
táblázat 4 Bemeneti adatok, a sodrony paraméterei

Kezdeti áram 1802 A

(kezdeti áram alapján a sodrony kezdeti hőmérséklete: 98.86 °C, hiba: 3.88%)



18.ábra Dinamikus távvezeték terhelhetőség eredményei



19.ábra A sodrony valós idejű terhelhetőségét befolyásoló paraméterek időbeli változása

Kritikus oszlopközök belógása

Belógása [m]

Idő	T2-T3	T52-T53	T65-T66	T25-26
2013-07-22 15:39:02	6.0727	6.0841	5.9301	5.3420
2013-07-22 15:44:02	6.0686	6.0800	5.9261	5.3384
2013-07-22 15:49:02	6.0146	6.0258	5.8733	5.2908
2013-07-22 15:54:02	6.0230	6.0342	5.8815	5.2982
2013-07-22 15:59:02	6.0122	6.0234	5.8710	5.2887
2013-07-22 16:04:02	6.0176	6.0288	5.8763	5.2935
2013-07-22 16:09:02	6.0148	6.0261	5.8736	5.2910
2013-07-22 16:14:02	6.0119	6.0232	5.8708	5.2885
2013-07-22 16:19:02	6.0019	6.0131	5.8609	5.2796
2013-07-22 16:24:02	5.9986	6.0098	5.8577	5.2767
2013-07-22 16:29:02	6.0001	6.0113	5.8592	5.2781
2013-07-22 16:34:02	6.0048	6.0160	5.8638	5.2822
2013-07-22 16:39:02	6.0045	6.0157	5.8635	5.2820

2013-07-22T16:44:02	6.0133	6.0245	5.8721	5.2897
2013-07-22T16:49:02	5.9989	6.0101	5.8580	5.2770
2013-07-22T16:54:02	6.0072	6.0184	5.8661	5.2843
2013-07-22T16:59:02	6.0082	6.0195	5.8671	5.2852
2013-07-22T17:04:02	6.0204	6.0317	5.8791	5.2960
2013-07-22T17:09:02	6.0251	6.0363	5.8836	5.3001
2013-07-22T17:14:02	6.0301	6.0413	5.8885	5.3045

táblázat 5 A 4 legkritikusabb oszlopköz belógásainak eredményei

A fentebbi paraméterek értelmezését a A Dinamikus távvezeték terhelhetőség elméleti alapjairól, illetve Cigré[1] és IEEE[2] dokumentumok.

4.4.6 Az eredmények értékelése

A felhasznált adatok segítségével egy ténylegesen, valós időben működő rendszert építettem fel. A számításokból látszódik, hogy a DLR-ből kapott áramterhelhetőség a statikus áramterhelhetőség (Ampacity) felett fut szinte végig. A távvezeték terhelhetőséget befolyásoló paraméterek változását is figyelve, a vártnak megfelelő eredményt kaptam. A terhelhetőség jellege az időjárási paramétereknek megfelelően alakul.

A belógás adatokat figyelve azt látjuk, hogy körülbelül 20 cm-nél nagyobb mértékben nem változik a sodronyok belógása. Vagyis nem követünk el nagy hibát. A sodronyok mechanikai számításának módszerét az A függelékben részletezem, mivel szorosan nem kapcsolódik jelenlegi munkámhoz. A módszer pontossága 10 cm-es nagyságrendbe esik. A módszer tényleges pontosságát valós mérésekkel tudnám ellenőrizni, azonban erre nem volt lehetőségem.

4.5 Továbbfejlesztési lehetőségek

Munkám során megvalósítottam a célkitűzésben részletezett feladatot. Ennek ellenére számtalan továbbfejlesztési lehetőség maradt. Ezeket eddigi munkám során még nem sikerült implementálni. Az alábbiakban a teljesség igénye nélkül felsorolom a legfontosabb továbbfejlesztési irányokat.

4.5.1.1 Kritikus oszlopközök meghatározása képfeldolgozási módszerekkel

A 3.2 leírt módszer tovább fejleszthető egy teljesen automatizált folyamattá. A rendszer műholdas képek alapján és egy képfeldolgozó eljárással meghatározná a távvezeték mentén elhelyezkedő különböző objektumokat (pl.: folyók, házak, utak, domborzat). Ekkor sokkal több szempont alapján lehetne meghatározni a kritikus oszlopközöket, mint a mostani rendszer. Továbbá a friss műholdas képek segítségével folyamatosan ellenőrizhető lenne a távvezeték vonal állapota.

Ennek az opciónak a megvalósításához a Matlab egy kitűnő fejlesztő környezet. A Matlab számos képfeldolgozási eszközzel és előre megírt függvénnyel van felszerelve.

4.5.1.2 Belógás számítások ellenőrzése

A 3.2 leírt belógás számítások ellenőrzését helyszíni mérésekkel kell ellenőrizni. Ekkor a mért és számolt adatok egyezése a rendszer megbízhatóságát jelezné, az adatok eltérése pedig azt mutatná, hogy nem pontosak a mostani rendszer eredményei. Amennyiben nagyobb (<10 cm) eltérések jelentkeznek a számítások javítására van szükség.

4.5.1.3 Előrejelzés

A jelenlegi DLR fejlesztések egyik legfontosabb funkciója a terhelhetőség előrejelzése. Az általam fejlesztett rendszer erre nem képes. Azonban a bővítés lehetősége teljes mértékben nyitva áll és a rendszer fel van készítve egy ilyen jövőbeli funkcióra. Az előrejelzések számtalan előnye miatt, ez az egyik legfontosabb tovább fejlesztési irány.

A jelenlegi szakirodalomban számtalan cikk foglalkozik egy olyan algoritmus kidolgozásával, mely képes megbízható előre jelzéseket adni. Már léteznek olyan megoldások, melyek bizonyos hibátényező mellett képesek akár 1 nappal előre jelezni a terhelhetőséget. Azonban az időm korlátossága és az előrejelzések komoly matematikai és elméleti háttere miatt én az eddigiek során nem foglalkoztam ezzel a kérdéskörrel.

4.5.1.4 Párhuzamos programozhatóság

A jelenleg futó szoftver működése alapvetően szekvenciális. Ez a Matlab működési nyelv sajátossága, mely azt jelenti, hogy az adott kódrészletek egymás után sorban futnak le. A program futási ideje és számítási kapacitása jelentősen növelhető lenne bizonyos elemek párhuzamosításával. Erre egy jó példa a kritikus oszlopközök belógásának számítása, mely egy nagy erőforrás igényű folyamat és sokszor kell elvégeznie a programnak.

5 Konklúzió

TDK dolgozatomban a dinamikus távvezeték terhelhetőség problematikáját tárgyalom. Részletesen bemutatom az IEEE és a Cigré által kiadott dokumentumokat, melyek a szakterület mérföldkő alkotó kiadványainak tekinthetők.

Dolgozatom Bevezetés röviden bemutatom, hogy hogyan alakult a távvezetékek tervezésének története, hogyan alakult ki a dinamikus távvezeték terhelhetőség ötlete. Ennek a fejezetnek a célja továbbá, hogy bemutassa a jelenlegi DLR kutatásokat, fejlesztéseket, így egy teljes képet adva az olvasónak a távvezeték terhelhetőség szakterületéről.

A A Dinamikus távvezeték terhelhetőség elméleti alapjai részletesen bemutatom a távvezetékek termikus terhelhetőségének elméleti háttérét. A fizikai összefüggések és elhanyagolások mind szerves részét képezik a végeredményben megkapott távvezeték terhelhetőségnek. A fejezet célja, hogy megalapozza a későbbi fejezetekben tárgyalt szoftveres megvalósítást és a fejlesztési javaslatokat. Továbbá ebben a fejezetben részletezem az általam kidolgozott kritikus távvezetékek meghatározását végző módszert.

Munkám Teljeskörű DLR rendszer mutatom be az általam fejlesztett program legfontosabb részeit. Ezen fejezet alfejezeteiként szerepelnek logikai sorrendben a legfontosabb számítási elemek. Illetve részleteztem még a kevésbé fontosabb számítási eljárásokat, melyeken módosítottam az elfogadott szakirodalomhoz képest.

A próbaszámítások és további szimulációk alapján az általam adott Célkitűzés megvalósítottam. A rendszer képes valós idejű számítások végzésére. Az eredményeim összhangban vannak a jelenlegi szakirodalommal és valóságú adatokkal végezve a szimulációkat, a vártaknak megfelelő eredményeket kapok.

Azonban számtalan tovább fejlesztési lehetőség maradt még nyitva. A rendszer kialakítása során az egyik kulcsfontosságú szempont a tovább fejleszthetőség volt. Ezen lehetőségek közül a legfontosabbakat a Továbbfejlesztési lehetőségekrészletezem.

6 Köszönet nyilvánítás

Ezen munka nem jöhetett volna létre a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nagyfeszültségű technika és berendezések csoportjának segítségével. Ezúton szeretném hálámat kifejezni az egész csoport felé.

Szeretném kiemelni Németh Bálintot, aki már villamosmérnöki tanulmányaim korai szakaszában lehetőséget adott a csoport munkájában való részvételre. Azt gondolom, hogy az elmúlt két év során dinamikus távvezeték terhelhetőséggel kapcsolatos munkám nélkül ezen dolgozat nem jöhetett volna létre.

Végül szeretnék köszönetet nyilvánítani mindig segítő és támogató családom felé.

Irodalomjegyzék

- [1] Cigré WG 601 B2.43 Guide for thermal rating calculations of overhead lines (2014 December)
- [2] IEEE Power Engineering Society, IEEE Std 738 – 2006 (Revision of IEEE Std 738-1993) Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors (2007 Január 30)
- [3] Cigré WG B2.59 Predicting variable line thermal ratings (2017 Május 14)
- [4] IEEE Power and Energy Society, IEEE std 738 – 2012 (Revision of IEEE Std 738-2006) Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors (2017 Június 9)
- [5] Murray W. Davis, A New Thermal Rating Approach: The Real Time Thermal Rating System for Strategic Overhead Conductor Transmission Lines - Part I - General Description and Justification of the Real Time Thermal Rating System. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, No. 3, (1977 Május/Június)
- [6] Americans for Clean Energy Grid, Dynamic Line Ratings <https://cleanenergytransmission.org/>
- [7] Sanna Uski-Joutsenvuo, Riku Pasonen, Maximising power line transmission capability by employing dynamic line ratings – technical survey and applicability in Finland. (2012 Október 5) , <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2013/VTT-R-01604-13.pdf>
- [8] Cigré Green Books, International Council on Large electric Systems, Study Committee B2: Overhead Lines, Overhead Lines (2016 Augusztus)
- [9] Cigré WG22.12, Technical Brochure NO.207 Thermal behaviour of overhead conductors (2002 Augusztus)
- [10] The Valley Group Inc., Transmission line monitoring system www.cat-1.com
- [11] J.C.McCall, P.Spillane, K. Lindsey, Determining Crossing Conductor Clearance Using Line-Mounted LiDAR, Cigré US National Committee 2015 Grid of the Future symposium (2015 Október), <http://lindsey-usa.com/dynamic-line-rating/>
- [12] Ampacimon SA., Overhead Line Monitoring, Innovative solution for Dynamic Line Rating, <http://www.ampacimon.com/wp-content/uploads/2015/09/Ampacimon-Brochure.pdf>
- [13] O. R. Schurig, C. W. Frick, Heating and Current-carrying Capacity of Bare Conductors for Outdoor Service. General Electric Review, Vol. 33, No. 3, 1930. p. 141-157

- [14] V.T. Morgan, "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
- [15] J.C. McCall, T. Goodwin, Dynamic Line Rating as a means to enhance transmission grid resilience, , Cigré US National Committee 2015 Grid of the Future symposium (2015 Október), <http://lindsey-usa.com/dynamic-line-rating/>
- [16] Perneczky Géza: Szabadvezetékek feszítése Műszaki Könyvkiadó, Budapest, (1968)

A – Függelék: Belógás számítása

A sodronyok belógásának számítása egy nem teljesen triviális feladat. Mivel egy lényeges funkciója az általam megvalósított rendszernek ezért szükséges részleteznem a számítási elveket.

A számítások során a távvezetékek mechanikai viselkedésének láncgörbés megközelítését használom, ugyanis ezen számítási módszerrel közelíthető a legjobban a sodronyok tényleges belógása. A hiperbolikus közelítés alapján a belógás a következő módon fejezhető ki:

$$\text{belógás} = \frac{\sigma_h}{\gamma} \left[ch \frac{a\gamma}{2\sigma_h} - 1 \right]$$

Másképp:

$$\text{belógás} = \frac{2\sigma_h}{\gamma} sh^2 \frac{a\gamma}{4\sigma_h}$$

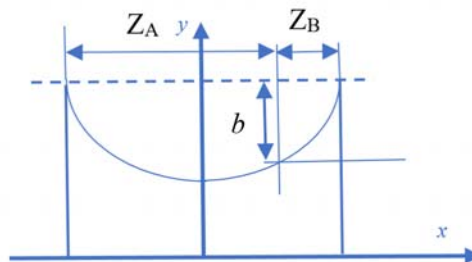
Számításaim során kiszámolom először az adott oszlopközben a σ_h mechanikai feszültség közepes értékét, majd ennek ismeretében a fentebb található állapot egyenletet megoldom. A megoldás során Newton-féle gyökkereső algoritmust használom. A mechanikai feszültség meghatározását a következő módon végzem:

$$b = \frac{\gamma Z_A Z_B}{2\sigma_h} \left[1 + \frac{1}{24} \frac{\gamma^2}{\sigma_h^2} (Z_A^2 + Z_B^2) \right]$$

Ebből σ_h -t kifejezve a következő kifejezésre jutok:

$$\frac{\gamma^3 Z_A Z_B (Z_A^2 + Z_B^2)}{2 \cdot 24b} \frac{1}{\sigma_h^2} - \sigma_h = -\frac{\gamma Z_A Z_B}{2b}$$

Az egyes szimbólumok magyarázatát az alábbi ábra adja. [16]



20. ábra Láncgörbe alakú vezető belógása[16]