



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Villamosmérnöki és Informatikai Kar

Villamos Energetika Tanszék

Balangó Dávid

**TÁVVEZETÉKEK DINAMIKUS
TERHELHETŐSÉGÉNEK
MODELLEZÉSE**

TDK dolgozat

KONZULENS

Németh Bálint

Cselkó Richárd

BUDAPEST, 2013

Összefoglaló

Az elosztott termelés folyamatos terjedése, a villamos energia iránti növekvő igény, és további gazdaságossági szempontok miatt elengedhetetlen, a villamosenergia elosztásban és átvitelben használt eszközök hatékony felhasználása.

A villamos teljesítmény szállításának a távvezeték hálózat és az abban található egyes eszközök illetve azok tulajdonságai és egyéb tényezők szabnak határt. Jelenleg egy adott távvezeték szakaszon átvihető teljesítmény maximális értékét az adott szakasz paramétereit és előre megszabott külső tényezők, mint például a várható hőmérséklet alapján határozzák meg. A megengedett maximális teljesítmény számításánál az lehetséges legrosszabb esettel számolnak, így meghatározva egy, az adott szakaszra jellemző statikus maximális terhelhetőséget. A változó időjárási körülmények, különböző hőmérsékletek esetén azonban ez a statikus terhelhetőség általában a valós, megengedhető terhelésnél jóval kisebb.

A távvezetékek hatékonyabb kihasználását, az átvihető teljesítmény növelését segíti elő az úgynevezett dinamikus terhelhetőség számításának módszere. A távvezetékek dinamikus terhelhetőségének vizsgálata mindig az adott körülmények alapján határozza meg az adott távvezeték szakaszra a megengedett maximális átvihető teljesítményt. A távvezetékek dinamikus terhelhetőségének számításával, és a rendszer ilyen irányú megközelítésével a hálózat egyes részein jelentős többleteljesítmény átvitelére van lehetőség. A dinamikus terhelhetőség meghatározásához megfelelően kiépített megfigyelő, elemző, adatfeldolgozó rendszerre van szükség, amely az adott szakaszból kialakított modell alapján, az aktuális körülményekre alapozva határozza meg a maximálisan átvihető teljesítményt.

A dolgozat célja a dinamikus távvezeték terhelhetőség modellezésének vizsgálata, illetve egy olyan rendszer alapjainak kidolgozása, hosszútávon annak teljes felépítése, amely valós időben képes megbecsülni egy adott távvezeték szakasz dinamikus terhelhetőségét, bekalkulálva az esetleges üzemzavarok hatásait is.

Abstract

In recent years deregulation of power supply industry has emerged. As a result of this, electric utilities have been under pressure to exploit the capabilities of existing devices, facilities, and infrastructure efficiently, and to utilize all their transmission resources to the fullest.

Electric power transmission is limited by the properties of the components of the electric power transmission system such as power transmission lines. The maximum amount of power transmitted through a system is also limited by other factors such as weather conditions, temperature changes etc., that tend to influence the physical attributes of parts of a system. Nowadays the most common way to calculate the maximum amount of power that can be transmitted through a power line is called static line rating. Static line rating mostly depends on worst case scenarios of thermal behavior of power lines. Since the calculations are based on static worst case parameters, changes of weather parameters, changes of current heating the power line etc. are not taken into account.

By taking dynamic parameters into consideration when calculating line rating, the maximum ampere capacity changes as dynamic parameters change. Dynamic line rating is highly recommended because its deployment is expected to increase asset utilization and operating efficiency. Dynamic line rating allows assets to be used with greater loads, by continuously monitoring and rating line capabilities. Through dynamic line rating it is possible to determine ampacity in real time allowing extra power to be accommodated, compared to static line rating. In order to calculate dynamic line rating it is necessary to apply different techniques for monitoring weather conditions, the wind cooling effect, and also line sag parameters.

There are different physical modelling techniques for dynamic line rating that have been established recently. This paper discusses the characteristics of modelling techniques and based on these techniques shows the basic principles which are necessary to build a system, calculating and predicting dynamic line rating in real time.

Tartalomjegyzék

1 Bevezető	8
2 Statikus és dinamikus terhelhetőség	10
2.1 Statikus terhelhetőség	10
2.2 Dinamikus terhelhetőség.....	11
3 Távvezetékek terhelhetőségének növelése	13
3.1 Régi sodronyok cseréje	14
3.2 Dinamikus terhelhetőség számítás	14
3.3 A vezetékek túlterhelése	15
3.4 Szezonális statikus terhelhetőségi szintek beállítása	16
4 A dinamikus terhelhetőség számítása	17
4.1 Szemléletmódok a terhelhetőség számításban	17
4.1.1 Időjárás alapú dinamikus terhelhetőség számítás	17
4.1.2 A vezeték hőmérsékletén alapuló dinamikus terhelhetőség	17
4.1.3 A vezetékek belógásától függő dinamikus terhelhetőség	18
4.2 Hibrid rendszerek.....	18
5 A terhelhetőség számításakor felhasznált paraméterek.....	19
5.1 A vezeték áramának fűtő hatása, a Joule-veszteség	19
5.1.1 Az ohmos veszteség Cigré-féle modell szerint történő számítása.....	19
5.1.2 Az ohmos veszteség IEEE szerint történő számítása.....	20
5.2 Környezeti hőmérséklet	20
5.3 Napsugárzás	21
5.4 Sugárzásból eredő hőveszteség.....	22
5.5 Levegőminőség	23
5.6 A távvezeték sodronyainak hőkapacitása	23
5.7 A távvezeték érése hatása.....	25
5.8 A konvektív hűtést befolyásoló tényezők	26
5.9 Sugár irányú hőmérsékleti gradiens.....	29
5.10 Vezetékek méretének hatásai	29
5.11 A legnagyobb megengedett vezeték hőmérséklet.....	29
5.12 A vezetékek belógása, feszessége.....	31

5.12.1 A belógás számítása.....	32
5.12.2 Hőtágulás	33
5.12.3 A vezetékhooszt befolyásoló egyéb paraméterek	34
5.12.4 „Ruling Span” módszer	34
6 Távvezetékek dinamikus terhelhetőségének modellezése	36
6.1 Modellezés a gyakorlatban	36
6.1.1 Fizikai modell	36
6.1.2 „Grey-box” modellezés.....	38
6.1.3 Mesterséges Intelligencia használata	40
6.2 Az egyes modellek összehasonlítása	41
7 A fizikai modell megalkotása	43
7.1 A modell felépítése	43
7.1.1 A modellben, a számításhoz használt paraméterek	43
7.2 Elhanyagolások, egyszerűsítések, eltérések a szabványos modellekhez képest... 44	
7.3 Eredmények	45
7.3.1 Saját modell és IEEE összehasonlítása.....	45
7.3.2 A saját és a Cigré-féle modell összehasonlítása	48
7.4 A saját modell által szolgáltatott eredmények grafikus megjelenítése és értékelése	51
7.5 A fizikai modellen túlmutató modellezési eljárások szükségessége	56
8 Összefoglalás, további tervek.....	57
9 Irodalomjegyzék.....	58

1 Bevezető

Napjaink gazdasági környezetében az élet minden területén, a különböző rendszerek működésük optimalizálására törekszenek. Nincs ez másként az energiaszektorral sem. A villamosenergia termelést, átvitelt és elosztást erősen befolyásolják egyes gazdaságossági kérdések. Az egyre növekvő fogyasztás, az egyre elosztottabbá váló termelés, a növekvő igények és ezzel párhuzamosan az öregedő eszközpark és infrastruktúra komoly problémákat jelentenek a villamosenergia szolgáltatóknak. Ezen problémák megoldására több lehetséges járható út létezik. Az egyes lehetőségek anyagilag jelentősen eltérő mértékű terhet jelentenek a szolgáltatóknak, az energiapiac szereplőinek, és a végső fogyasztóknak. Az egyik, egyben a legköltségesebb megoldás, az új erőművek, új távvezetékszakaszok létesítése, új eszközpark beszerzése, és ezzel a termelt, és továbbított energia mennyiségének növelése. Másik megoldás a jelenlegi, öregedő berendezések, eszközök, felújítása, esetleges cseréje, a kapacitás ilyen módú növelése.

Az előzőleg bemutatott két megoldás komoly többletköltségekkel terelheti az energetikával kapcsolatban levő piaci szereplőket. A költségek csökkentése érdekében éppen ezért elengedhetetlen feltérképezni, hogy nagyobb kaliberű beruházások, átalakítások nélkül miként van lehetőség a jelenleg működő eszközpark használatának optimalizálására. Szükség van olyan megoldások keresésére, amelyekkel lehetőség nyílik a meglévő rendszerünkben ott rejlő tartalékok kiaknázására. Ilyen típusú szemléletet követ a dolgozatomban tárgyalt dinamikus távvezeték terhelhetőség.

A dinamikus távvezeték terhelhetőség egyik kulcskérdése, hogy miként lehetséges a meglévő távvezetékeink teljesítményszállító kapacitását növelni, és a ezzel párhuzamosan a szolgáltatás megbízhatóságát fenntartani. A dinamikus távvezeték terhelhetőség számítása, illetve az ilyen és ehhez hasonló rendszeroptimalizáló módszerek lehetővé teszik, hogy az újonnan rendszerbe álló erőművek által termelt többlet teljesítmény szállítását költséges beruházások, például teljesen új távvezetékszakaszok létesítése nélkül is meg lehessen oldani. A villamosenergia iparban egyre elterjedtebbé válik az úgynevezett elosztott termelés, amely további többlet teljesítmény betáplálását vonja maga után olyan helyeken, ahol eddig erre nem volt példa. Egyre elterjedtebbé válnak a különböző megújuló energiahordozókat

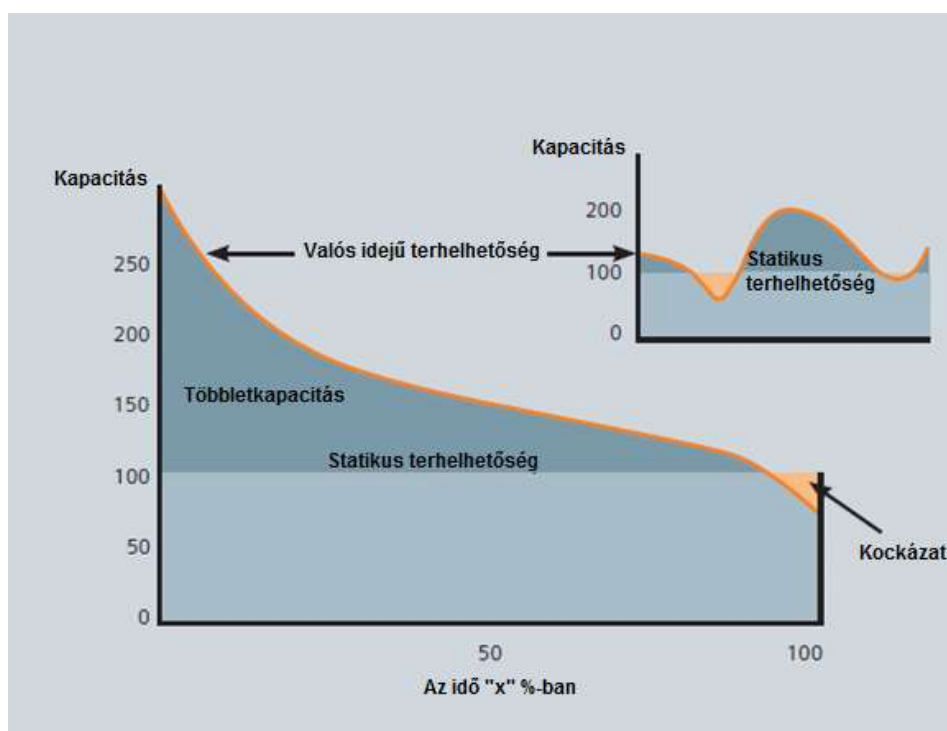
felhasználó erőművek, termelési pontok, mint például a szélerőművek, naperőművek. Az ezek által termelt villamos energia felhasználása csak akkor valósulhat meg, ha az valahogy eljut a végső felhasználóhoz, a fogyasztóhoz. Sok esetben a megtermelt energia mennyiségével az infrastruktúra fejlesztése nem tud lépést tartani.

A XX. századi energiaszektorra jellemző gyakorlat, és infrastruktúra nem volt felkészülve az ilyen, újonnan létesített erőművek által termelt energia fogadására, és a megváltozott energetikai környezetre. A XXI századi technológia lehetővé teszi teljesen új eddig nem ismert lehetőségek kifejlesztését, és alkalmazását, a meglévő rendszereinkben lévő tartalékok felderítését, és kihasználását.

Az átviteli- és elosztóhálózat által szállítható maximális teljesítmény meghatározására jelenleg a leginkább az úgynevezett statikus terhelhetőségi modellt alkalmazzák. A statikus terhelhetőségi modell lényege, hogy a távvezeték, illetve annak egyes részeinek terhelhetőségét egy előre meghatározott számítási módszer segítségével kalkulálják. A statikus terhelhetőségi modell a terhelhetőség számításánál időjárási, hőmérsékleti, terhelési tényezőket vesz figyelembe, worst-case szemlélettel. Az ilyen módon megállapított terhelhetőség egy adott távvezeték-szakasz esetén, teljesen független a valós idejű körülményektől, az aktuális időjárási, hőmérsékleti adatoktól, a terhelés állapotától illetve ezen tényezők változásaitól. Szükségszerűen adódik egy ilyen modell esetén, hogy mivel az, a számítások során a paraméterek legrosszabb értékével kalkulál, az idő nagy részében a tényleges terhelhetőség jóval meghaladja a számítottat, többletkapacitást hagyva az eszközeinkben, például egy távvezeték szakasz terhelhetőségében.

2 Statikus és dinamikus terhelhetőség

Távvezetékek esetén elengedhetetlen azok terhelhetőségének ismerete. A távvezetékek létrejöttével a terhelhetőség meghatározásának módja az úgynevezett statikus terhelhetőség számítása volt. A gyakorlatban ez azzal járt, hogy egy adott vezetékszakra, bizonyos paraméterek figyelembe vételével meghatároztak egy maximális terhelhetőségi értéket. A technológia fejlődésével lehetőség nyílt a statikus terhelhetőség által, a berendezésekben hagyott tartalékok kiaknázására. Megjelent a dinamikus terhelhetőség számítása, amely jelentős mértékben javíthatja az egyes villamos berendezések kihasználtságát. A valóságban a dinamikus terhelhetőség számításával az idő 98%-ban nagyobb terhelhetőséget, az idő 95 %-ban pedig átlagosan 15-30 %-kal nagyobb terhelhetőséget lehet elérni mint a statikus terhelhetőség számításával. [1],[2]



1. ábra A statikus és dinamikus terhelhetőség összehasonlítása [1]

2.1 Statikus terhelhetőség

A statikus terhelhetőség számításánál, pontosan meghatározzák, hogy egy adott távvezetékszakaszt mekkora terheléssel lehet biztonságosan üzemeltetni. A statikus

terhelhetőség számításánál nincs szükség arra, hogy a távvezeték vezetőinek fizikai paramétereit folyamatosan monitorozzák. Nem ismert sem a vezetők valós idejű hőmérséklete, sem azok belógása. Gyakorlatilag bármilyen valós idejű információ, beleértve a hőmérsékleti, időjárási, széljárási paramétereket is, a statikus terhelés számításánál teljes mértékben redundánsnak tekinthetők. Mivel a statikus terhelhetőséget a különböző paraméterek worst-case értékeivel kalkulálják, a mindenkori terhelés sosem fog meghaladni egy adott értéket, még ha ezt a távvezeték el is tudná viselni. A statikus terhelhetőségi modell feltételezi, hogy az általa számított terhelhetőségi értékek a mindenkori körülményektől függetlenül, biztonságosan alkalmazhatóak. E szerint az elv szerint a terhelhetőség meghatározásához megbecslik milyenek a legrosszabb körülmények, amelyek között a távvezetéknek üzemelnie kell, például viszonylag meleg környezeti hőmérséklet esetén, gyenge, csendes széljárás mellett. Figyelembe veszik, hogy az adott távvezeték sodronyainak mekkora a legnagyobb megengedett hőmérséklete, majd a terhelhetőség szempontjából legrosszabb körülményeket és egy előre kalkulált megengedett hőmérsékleti értéket figyelembe véve kiszámolják az adott szakasz maximális terhelhetőségét. Éppen ezért ez a számítási mód szükségszerűen tartalékokat hagy egy rendszerben, hiszen ahogy a valóságban az egyes paraméterek, mint például a külső hőmérséklet, a szél hűtő hatása, vagy a távvezeték aktuális terhelése, folyamatosan változnak, más és más körülményeket teremtve, a valós terhelhetőség is folyamatosan változik. A terhelhetőség nagy mértékben összefügg a sodronyok aktuális hőmérsékletével. A valóságban hidegebb külső hőmérséklet esetén ugyanazon sodrony, ugyanolyan aktuális terhelés mellett valószínűleg alacsonyabb hőmérsékleten fog üzemelni amely magában hordozza a terhelhetőség maximumának emelkedését.

2.2 Dinamikus terhelhetőség

A statikus terhelhetőséggel szemben a dinamikus távvezeték terhelhetőség számítása valós időben is figyelembe vesz egyes, terhelhetőség-befolyásoló paramétereket, mint például a széljárás alakulását, a hőmérséklet változásait, vagy az aktuális sodronyokon lévő terhelést.

A dinamikus terhelhetőségi modell számítási módszerei igen hasonlóak a statikus terhelhetőségnél alkalmazott lehetőségekhez. A legnagyobb különbség a statikus és dinamikus terhelhetőség között az, hogy a dinamikus terhelhetőség esetén a

számításba bekalkulált paramétereket valós időben kell monitorozni, és azokat valós időben feldolgozni. Ezáltal lehetőség van egy valós idejű terhelhetőségi értéket generálni, amely átlagosan, a statikus terhelhetőségnél nagyobb teljesítményt enged a távvezetéken szállítani. Ennek a módszernek a velejárója, hogy a számított értékek folyamatosan változnak, illetve azok erősen függenek a távvezeték mindenkori állapotától.

3 Távvezetékek terhelhetőségének növelése

A növekvő fogyasztási igények és az egyre elterjedtebbé váló, új típusú megújuló energiaforrásokat felhasználó energiatermelés egyre nagyobb igényeket támaszt napjaink energiarendszerei felé. A villamos hálózatnak ki kell tudnia elégíteni az egyre növekvő energiaéhséget. A korábban telepített, öregedő infrastruktúra sok esetben már ma sem képes a megfelelő mennyiségű teljesítmény átvitelére, a növekvő fogyasztási igények kielégítésére. Napjaink technológiai újításaival, egyéb korszerű megfontolásokkal lehetőség nyílik a meglévő távvezetékek, átviteli berendezések fejlesztésére, azok energiaszállító kapacitásának növelésére. A régi, elöregedett eszközpark felújításával, illetve az új elméleti, technológiai eredmények felhasználásával lehetőség nyílik a villamos berendezések hatékonyabb kihasználására. A megfelelő mennyiségű teljesítmény átvitelét akadályozó egyik tényező a távvezetékek átviteli kapacitása. Egyértelmű tény, hogy a villamos berendezések terhelése nem növelhető a végtelenségig, annak különböző fizikai tényezők szabnak határt. A távvezetékek esetében a legfontosabb teljesítmény-átviteli kapacitást korlátozó faktor a távvezetékek hőmérséklete. A különböző környezeti paraméterek és a távvezetéken áramló teljesítmény függvényében változik a távvezeték sodronyainak hőmérséklete. A gyakorlatban, a távvezetékek tervezésénél építésénél, sodronytípustól függően meghatározzák az üzem közben elérhető legmagasabb hőmérsékletet. Egy ilyen korlát felállításának elsősorban az a célja, hogy a távvezeték biztonságosan üzemeljen, a lehető legrosszabb körülmények között is. A vezeték hőmérsékletének növekedése, és a biztonságos határ fölé kúszása rontja a távvezeték sodronyainak mechanikai és villamos paramétereit, meggyorsítja azok elöregedését.

Ahhoz hogy egy távvezetékszakaszon nagyobb teljesítményt lehessen szállítani különböző változtatásokat kell alkalmazni, vagy magán a távvezetéken vagy a korábbi gyakorlaton, szemléleten.

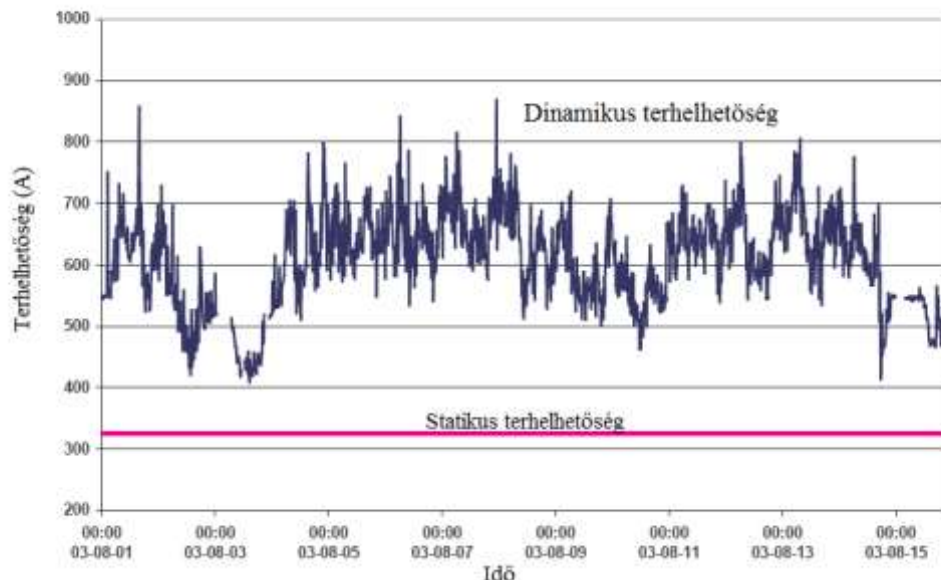
A távvezetékek terhelhetőségének növelése megoldható a régi sodronyok teljes cseréjével, a korábban meghatározott terhelhetőségi értékek módosításával, dinamikus terhelhetőség számítással, új távvezetékek építésével, a vezeték túlterhelésével.

3.1 Régi sodronyok cseréje

Viszonylag elavult módszerek számít a korábban telepített távvezetékek sodronyainak nagyobb, erősebb sodronyokkal történő cseréje. Amellett, hogy ez a megoldás jelentős munkaigénnyel jár, a sodronyok teljes cseréje nem nevezhető túlságosan költséghatékonynak sem. A sodronyok cseréjén kívül lehetőség van még kapacitásnövelésre, ha a régi sodronyokkal párhuzamosan kapcsolnak ugyanarra a szakaszra vezeték. Régi sodronyok cseréje esetén, az új erősebb, nagyobb terhelhetőségű sodronyok nagyobb megengedett földtől mért távolságot igényelhetnek, ezért új sodronyok felszerelése esetén általában az oszlopok magasítása is szükséges, ami jelentősen növeli a munkaköltségeket.

3.2 Dinamikus terhelhetőség számítás

A statikus terhelhetőséggel szemben lehetőség van a távvezetékek dinamikus terhelhetőségének számítására. Ez a módszer ugyan bizonyos mértékű beruházással jár (megfelelő mérőberendezések telepítése, számítógépes infrastruktúra kiépítése, számítási módok kidolgozása) de ennek összege eltörpül a módszer segítségével kiaknázható tartalékok értéké mellett.

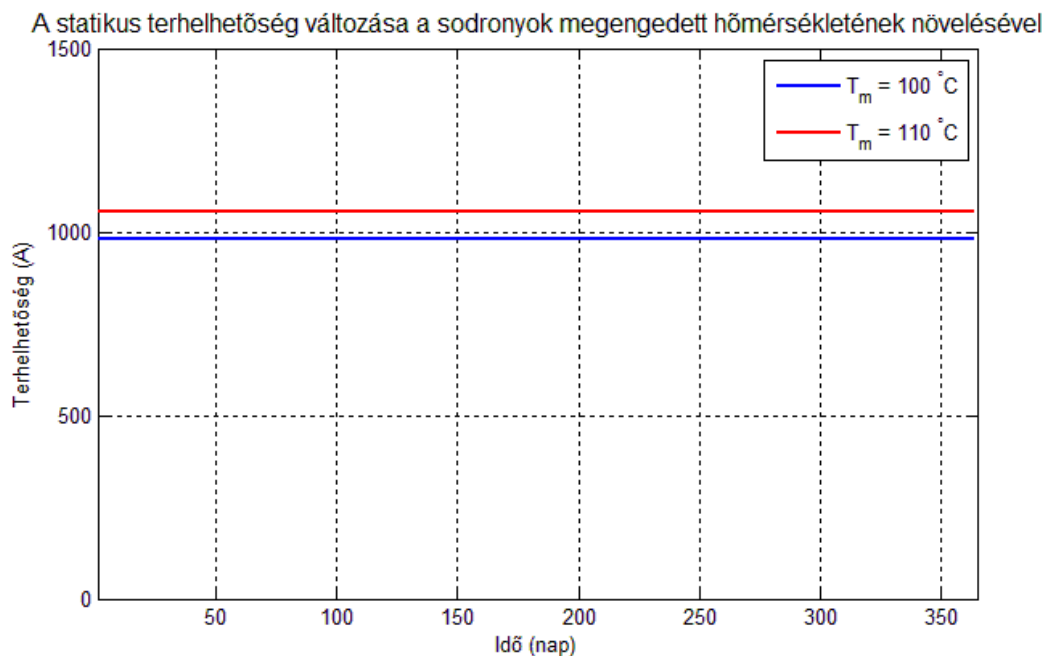


2. ábra A statikus és dinamikus terhelhetőségi értékek összehasonlítása az idő függvényében [21]

A dinamikus terhelhetőség számításának első lépése a megfelelő paraméterek értékeinek mérése, mérési adatok gyűjtése. A nagy számú szenzor által mért és szolgáltatott mérési eredmény feldolgozását, az erre a célra készített és megfelelően kidolgozott modell alapján, megírt szoftver végzi. A dinamikus terhelhetőség számításának olyan esetekben van jelentősége ahol az adott távvezeték terhelhetőségének egy statikus, worst-case körülmények alapján számított értéket adnak. Dinamikus terhelhetőség számításnál a mindenkori terhelhetőség időben annak függvényében fog változni, hogy az azt befolyásoló környezeti tényezők, vezeték belógás, és egyéb paraméterek változnak.

3.3 A vezetékek túlterhelése

A távvezeték sodronyainak mindenképpen van egy előre meghatározott maximálisan megengedett hőmérséklete. A megengedett maximális hőmérséklet módosításával, növelésével további többletkapacitást lehet a rendszerben létrehozni, azonban az így megnövelt terhelhetőség, a megnövekedett üzemi hőmérsékletek miatt, ez a módszer jelentősen csökkentheti a távvezeték üzembiztosságát, a sodronyok és egyéb elemek élettartamát. [7]

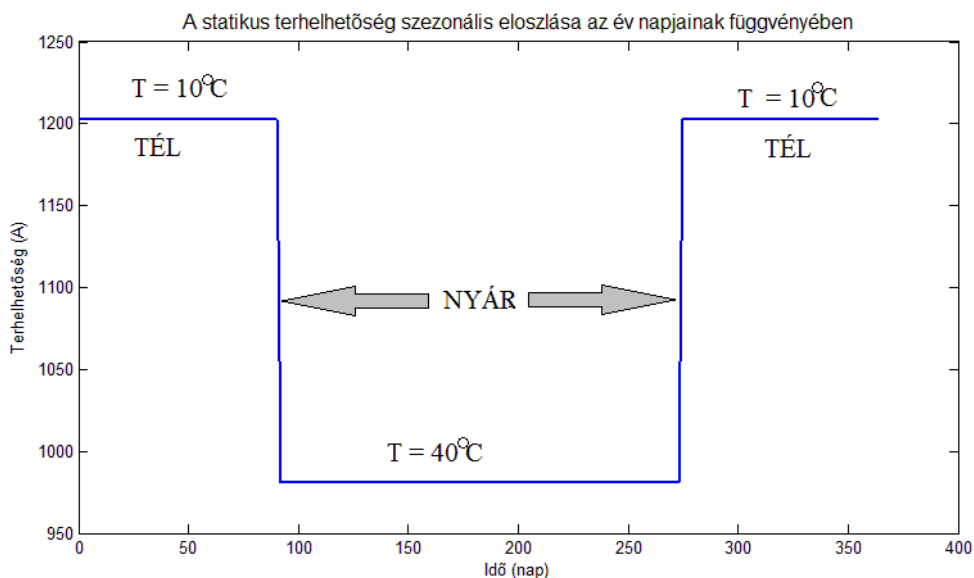


3. ábra A statikus terhelhetőség változása ha a sodronyunkat magasabb megengedett hőmérsékleten üzemeltetjük

A vezetékek túlterhelésével, azaz a legnagyobb megengedett hőmérséklet változtatásával, növelésével a terhelhetőség is növekedni fog. Statikus terhelhetőség számítása esetén ez a statikus terhelhetőségi érték fog növekedni, dinamikus terhelhetőség számításánál pedig a dinamikus terhelhetőségi, értékek maximuma, illetve ezzel egyidejűleg az átlagos terhelhetőség lesz magasabb.

3.4 Szezonális statikus terhelhetőségi szintek beállítása

Az egész éves konstans statikus terhelhetőség egyik továbbfejlesztett változata a szezonális statikus terhelhetőség. Ennek lényege, hogy a terhelhetőséget évszakonként külön-külön meghatározzák, de évszakonként továbbra is statikusan. A gyakorlatban ez úgy néz ki, hogy amikor nyáron viszonylag meleg van, a megengedett legnagyobb terhelhetőség alacsonyabb, télen hideg időben pedig a terhelhetőség értéke egy magasabb statikus értéket kap.



4. ábra A statikus terhelhetőség szezonális meghatározása, nyári 40 oC-os, és téli 10 oC-os maximum környezeti hőmérsékleteket feltételezve

Mivel az egyes paraméterek worst-case értékei évszakonként jelentősen eltérhetnek egymástól, például a nyári és téli környezeti hőmérsékletek worst-case értékei, érdemes külön statikus terhelhetőséget számolni a nyári és a téli hónapokra egyaránt. A szezonális terhelhetőségi szinteket lehetséges a nyári-téli bontásnál finomabb felbontásban is meghatározni (negyedéves, intervallumokra).

4 A dinamikus terhelhetőség számítása

A távvezeték terhelhetősége nagy mértékben összefügg a távvezeték sodronyainak hőmérsékletétől illetve azok belógásától. Ez a két fő paraméter az, amely meghatározza egy vezetékszakaszon a megengedett maximális terhelést. Dinamikus terhelhetőség számítására három alapvető megközelítés létezik, amelyekben közös, hogy a terhelhetőséget a távvezeték hőmérséklete alapján becslik, illetve erre vezetnek vissza.

4.1 Szemléletmódok a terhelhetőség számításban

4.1.1 Időjárás alapú dinamikus terhelhetőség számítás

Az időjárás alapú dinamikus távvezeték terhelhetőség számítása elsősorban az időjárás paraméterek valós idejű monitorozásán alapszik. Az időjárás alapú modell által felhasznált legfontosabb paraméterek a levegő hőmérséklete, a napsugárzás hatása, a távvezetékre érő szél sebessége és iránya. Az időjárás alapú modell használhatósága akkor maximális, ha a távvezeték mentén megfelelő elrendezésben található az időjárás figyelésére alkalmas meteorológiai állomások, amelyek képesek pontos, valós idejű adatokat továbbítani a modell számításához. Ez a fajta modell a legegyszerűbben használható, hiszen nincs szükség különböző, egyéb műszerek távvezetékre történő felszerelésére. Az időjárás paraméterek mérése teljesen független a vezeték aktuális terhelésétől, az azon folyó áram értékétől, így az időjárás alapú modell jól használható nem várt eseményeken kívüli terhelhetőség becslésre, tehát amikor a távvezeték átlagos, normál üzemi körülmények között működik.

4.1.2 A vezeték hőmérsékletén alapuló dinamikus terhelhetőség

A vezeték hőmérsékletén alapuló terhelhetőségi modell elsődleges számítási módszere, hogy a vezeték valós idejű hőmérsékletét egy ezzel ekvivalens hatású, a vezetékre merőleges irányú szélesebséggé konvertálják. Az így számított, vezetékre merőleges szélesebséget ezután több más tényezővel közösen használják a dinamikus távvezeték terhelhetőség számításánál. A módszer előnye, hogy valós időben kap a rendszer adatokat a távvezeték hőmérsékletéről, hátránya, illetve a modell egyik nehézsége, hogy a vezetékre közvetlenül elhelyezett szenzorokat igényel. Az egyes

szenzorok által szolgáltatott hőmérsékleti adatok nem feltétlenül jellemzik pontosan a vezeték hossz-menti átlagos hőmérsékletét.

4.1.3 A vezetékek belógásától függő dinamikus terhelhetőség

A vezetékek belógása is megszabhatja a távvezeték sodronyainak terhelhetőségét. A belógás monitorozásán keresztül eldönthető, hogy egy adott távvezeték szakaszt lehet e még tovább terhelni, esetleg vissza kell e venni az aktuális terhelhetőségből. A vezetékek belógásának mértékében szerepet játszik a sodronyok hőmérséklete, azok anyaga, szerkezete, a különböző, külső tényezők, mint a vezetéket érő napsugárzás, vagy a szél hűtő hatása. Mivel egy adott távvezeték mentén rengeteg oszlopköz található ennél a számítási módszernél, a legpontosabb eredményt akkor lehet elérni, ha a lehető legtöbb oszlopköz belógási adatait monitorozzák.

A belógás monitorozása a gyakorlatban azért is fontos mert gyakran ez az egyik szűk keresztmetszete a terhelhetőségnek. A távvezetékek sodronyainak maximális belógását különböző jogi, hatósági előírások is szabályozzák. A villamos berendezések feszültség alatti részeinek a villamos üzembiztonság és egyéb villamos előírások miatt a megfelelő védőtávolságban kell lenniük, a földelt vagy más potenciálon lévő részekről.

A dinamikus terhelhetőség számításánál figyelembe vett alap összetevőnek a dolgozatban a saját számításaimnál a távvezetékek belógását fogom figyelembe venni.

4.2 Hibrid rendszerek

A különböző megközelítésben tárgyalt terhelhetőség-számítási módszerek ötvözésével a rendszer pontosítására, az egyes különböző szemléletmódokban rejlő gyengeségek megszüntetésére van lehetőség. Az időjárási, vezeték-hőmérsékleti, valamint a belógási adatok együttes monitorozásával, az azok közötti összefüggések feltárásával a terhelhetőség pontosabb becslése érhető el. Az egyes befolyásoló tényezők mérése során keletkező adatbázisok felhasználhatók intelligens terhelésbecslő modellek, rendszerek megalkotására, amelyekkel lehetségessé válik a terhelhetőség előrejelzése.

5 A terhelhetőség számításakor felhasznált paraméterek

5.1 A vezeték áramának fűtő hatása, a Joul-veszteség

A távvezetékek sodronyainak véges vezetőképessége miatt azokon valamilyen mértékben ohmos veszteség jelentkezik, amely többek között a vezetékek melegedését idézi elő.

A vezeték ohmos ellenállása a villamos hálózatokon veszteséget okoz, azon valamekkora teljesítmény disszipálódik. A vezetékek ellenállásának hatására a vezetékben folyó áram a vezetéket melegíti. A vezeték hőmérsékletét a rajta átfolyó áram, (és egyéb tényezők) addig növeli(k), amíg be nem áll a termikus egyensúly, tehát az áram (és más paraméterek) okozta hőmérsékletnövekedés hatásait ki nem egyenlítik az egyéb, hőmérsékletcsökkentő hatások. A sodronyok melegedésének mértéke a távvezetéken folyó áram nagyságától és egyéb környezeti hatásoktól függ. A váltakozó áramú ellenállás és a váltakozófeszültség okozta mágneses hatások szintén a vezeték hőmérsékletének növekedését okozzák. [3][2]

A sodronyok egyenáramú ellenállását a sodrony anyaga, keresztmetszetének nagysága, a vezető hossza határozzák meg. AC esetben a vezető ellenállása a Skin-hatás miatt nagyobb mint DC esetben ezért a megnövekedett ellenálláson ugyanakkora áram nagyobb veszteséget hoz létre. A váltakozó áramú ellenállás a váltakozó áram frekvenciájától függ.

5.1.1 Az ohmos veszteség Cigré-féle modell szerint történő számítása

Az acél maggal ellátott sodronyok ohmos veszteségének közelítő számítási módja [4]:

$$P_j = k_j R_{AC} \cdot (1 + \alpha(T - 20)) \cdot I_{AC}^2 \quad (1)$$

Ahol:

k_j = becsült paraméter,

R_{AC} = AC ellenállás 20 °C -on (Ω),

α = hőmérsékleti együttható (K^{-1}),

I_{AC} = AC áram (A).

5.1.2 Az ohmos veszteség IEEE szerint történő számítása

Az ohmos veszteség számítási módja az IEEE 738-as szabvány alapján:

$$P_j = R(T_v) \cdot I_{AC}^2 \quad (2)$$

Ahol:

$R(T_v)$ = a vezeték ohmos ellenállása T_v hőmérsékleten.

5.1.2.1 A vezeték ellenállásának hőmérsékletfüggése

A vezeték ellenállásának hőmérsékletfüggése miatt a vezetéken keletkező hőveszteség jelentősen eltérhet az egyes hőmérsékleti tartományokban. A sodronyok ellenállásának hőmérsékletfüggéséről az előző pontban is kaphattunk némi képet. Az IEEE 738 szabvány alapján a sodronyok ellenállásának hőmérsékletfüggése az alábbi módon számolható:

$$R(T_v) = \left[\frac{R(T_{max}) - R(T_{min})}{T_{max} - T_{min}} \right] \cdot (T_v - T_{min}) + R(T_{min}) \quad (3)$$

Ahol:

$R(T_v)$ – a vezeték váltakozó áramú ellenállása T_v hőmérsékleten [Ω/m],

$R(T_{min})$ – a vezeték váltakozó áramú ellenállása T_{min} hőmérsékleten [Ω/m],

$R(T_{max})$ – a vezeték váltakozó áramú ellenállása T_{max} hőmérsékleten [Ω/m],

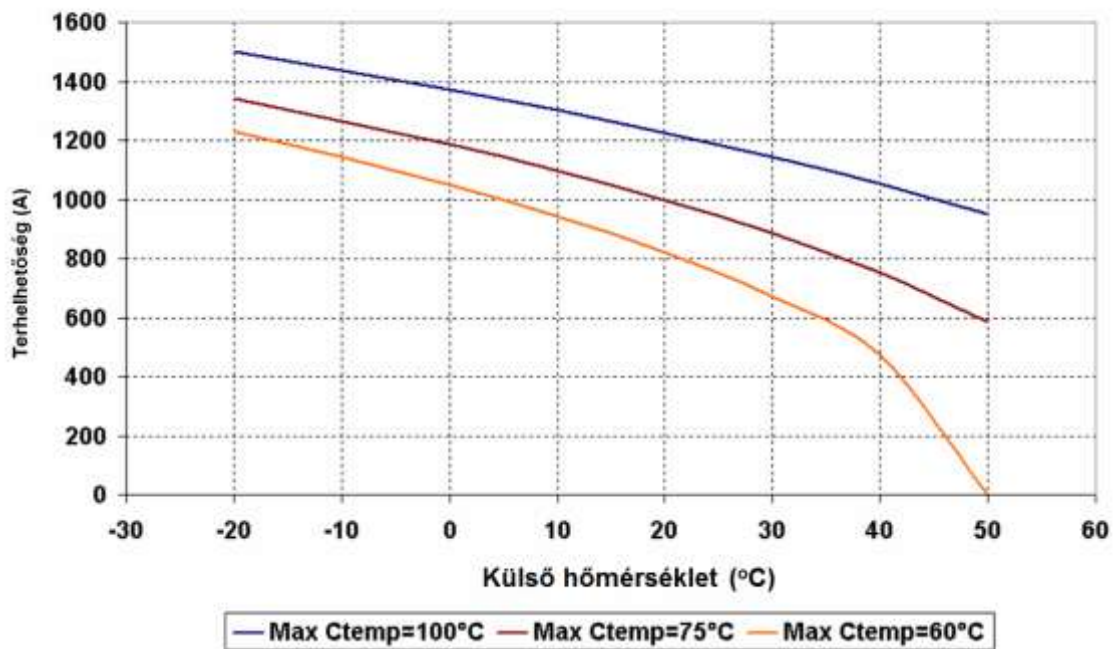
T_{max} – specifikációban meghatározott maximális vezeték hőmérséklet [$^{\circ}C$],

T_{min} – specifikációban meghatározott minimális vezeték hőmérséklet [$^{\circ}C$].

5.2 Környezeti hőmérséklet

A környezeti hőmérséklet közvetlenül is hatással van a távvezeték sodronyaira. Ha például a távvezeték környezetében a hőmérséklet emelkedik, a távvezeték sodronyainak hőmérséklete is emelkedni fog. A gyakorlatban a környezeti hőmérséklet változását teljes mértékben követi a távvezeték hőmérsékletének változása (a távvezeték fajhőjétől függő termikus időállandóval). Önmagában a külső, környezeti hőmérséklet változása azon távvezetékek esetén befolyásolja jelentősen a terhelhetőséget, amelyek

alacsonyabb hőmérsékleti tartományban üzemelnek, amelyek megengedett legnagyobb üzemi hőmérséklete alacsonyabb. Az alacsonyabb maximális megengedett hőmérséklettel rendelkező vezetékszakaszok esetén a külső hőmérséklet kis változása is jelentős terhelhetőség változást von maga után.



5. ábra ACSR „Drake” sodrony terhelhetőségének külső hőmérséklettől való függése, különböző megengedett hőmérsékletek esetén [2]

5.3 Napsugárzás

A napsugárzás hatása jelentős eltéréseket mutat az egyes távvezetékek esetén. A napsugárzás távvezetésekre gyakorolt hatása több tényezőtől is függ, olyanoktól, mint a távvezeték földrajzi elhelyezkedése, a nap aktuális állása, a levegő páratartalma, sűrűsége, az aktuális időjárási körülmények vagy a felhőzet. A nap által sugárzott energia sodronyon történő elnyelődésének mértéke az egyes sodronytípusonként eltérő. A napsugárzás melegítő hatásának mértéke függ a sodronyok átmérőjétől, azok felületének elnyelési tényezőjétől, a beeső napsugárzás szögétől, a szórt sugárzás mértékétől. [2]

A napsugárzással érkező hőteljesítmény mérése, és számítása nem egyszerű, drága berendezéseket igényel, amelyek folyamatos felügyelet mellett kell, hogy üzemeljenek. A napsugárzás által szállított teljesítmény számításának egyszerűsített módja [4]:

$$P_s = \alpha SD \tag{4}$$

Ahol

α = elnyelési tényező,

S = napsugárzás (W/m^2),

D = a vezető átmérője(m).

5.4 Sugárzásból eredő hőveszteség

A testek az őket érő sugárzás egy részét elnyelik, másik részét visszaverik, illetve átengedik. Az abszorpciós tényező megadja, hogy a test a rá eső sugárzás, hőáram mekkora részét nyeli el. A tökéletes elnyelő abszorpciós tényezője $\alpha = 1$, míg a tökéletes tükröző vagy áteresztő test abszorpciós tényezője $\alpha = 0$. Az abszorpciós tényező és emissziós tényező egy adott test esetén megegyeznek. Ennek oka a termodinamika II. főtételeire vezethető vissza.

Egy test által kisugárzott hőáram:

$$J_Q = A\sigma\varepsilon T^4 \tag{5}$$

Ahol:

A = a sugárzó test felülete,

ε = az emissziós tényező,

σ = a Boltzmann állandó,

T = a sugárzó test abszolút hőmérséklete.

Az elnyelési és sugárzási tényező határozza meg, hogy a távvezeték sodronyainak energiája hogyan változik sugárzás, mint energiaközlés során. A sugárzási és elnyelési tényezők a sodronyok öregedésével folyamatosan változnak. A változás mértéke elsősorban attól függ, hogy a távvezeték milyen feszültség szinten üzemel illetve, hogy annak környezetében milyen mértékű a levegő szennyezettsége. Általában az újonnan létesített távvezetékek sodronyainak emissziós és abszorpciós tényezője 0,2 0,3 körüli érték, amely a sodronyok öregedésével, a sodrony felületének szennyeződésével akár 0,9-es értékűre is nőhetnek. [2],[3]

Egy vezető sodrony kisugárzott teljesítményének számítása [6]:

$$P_r = \frac{\pi}{2} D \sigma \{ \varepsilon_g [T_c^4 - T_g^4] + \varepsilon_d [T_c^4 - T_d^4] \} \quad (6)$$

Ahol:

D = a sugárzó sodrony átmérője,

ε_g = az emissziós tényező a sodrony föld felé néző oldalán,

ε_d = az emissziós tényező a sodrony ég felé néző oldalán,

σ = Boltzmann állandó,

T_c = a sodrony abszolút hőmérséklete,

T_g = a föld hőmérséklete,

T_d = az ég hőmérséklete.

Mivel a sugárzással történő hűlés során a kisugárzott teljesítmény elhanyagolható más teljesítményáramlásokhoz képest, a sugárzás útján távozó teljesítmény egyszerűsített számítási módja[5][6]:

$$P_r = \pi D \sigma \varepsilon [T_c^4 - T_a^4] \quad (7)$$

Ahol:

T_a = a külső hőmérséklet.

5.5 Levegőminőség

A levegőminőség mint lehetséges faktor magában foglalja a levegő sűrűségét, annak viszkozitását. A levegő fizika paraméterei elsősorban a távvezeték sodronyainak környezetében történő hőáramlást befolyásolják.

5.6 A távvezeték sodronyainak hőkapacitása

A sodronyok hőkapacitása megadja, hogy egységnyi sodronyhossz, egységnyi sodrontömeg esetén a sodrony anyagától függően mekkora energiát kell közölni, az egységnyi mennyiségű, méretű anyaggal, hogy annak hőmérséklete egységnyit változzon. A hőkapacitás értelmezésére lehetőség van állandó nyomáson illetve állandó térfogaton. A gyakorlatban az állandó nyomáson értelmezett hőkapacitást használják, hiszen a hőcsere-folyamatok, távvezetékek esetén közel állandó, légköri nyomáson játszódnak le.

A hőkapacitás számítási módja:

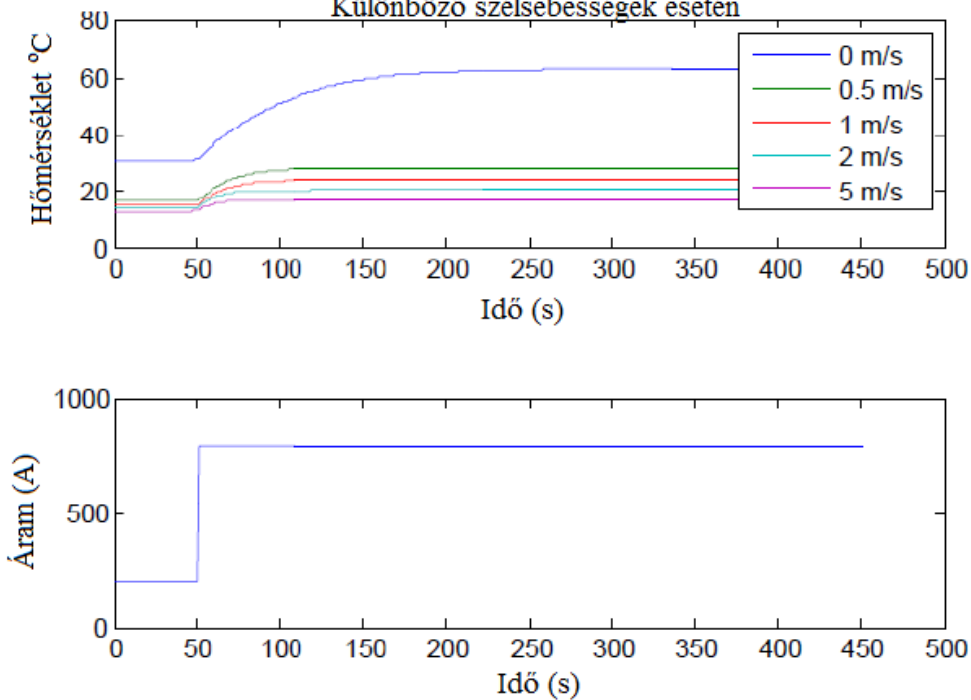
$$mC_p = \sum m_i C_{pi} \quad (8)$$

Anyag	Fajhő $C_p \left(\frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \right)$
Alumínium	955
Réz	423
Acél	476
Alumínium borítású acél	534

1. táblázat Egyes anyagok fajhője

A sodronyok hőkapacitásának a tranziens termikus folyamatok esetén van szerepe. A hőkapacitás létezése miatt a sodronyok hőmérséklete nem követi azonnal az egyes paraméterek különböző hőmérsékletmódosító hatásait. A hőkapacitás szerepe elsősorban azoknál a tranziens folyamatoknál jelentős, amelyek lefutási ideje 5 és 30 perc közé esik, ugyanis ilyen időállandóval a vezeték hőmérséklete képes felvenni a megváltozott körülmények által meghatározott új hőmérsékleti értéket.

A vezeték hőmérsékletének változása a vezetéken folyó áram ugrásszerű változása esetén
Különböző szélességekre



6. ábra A vezeték hőmérséklet változása a vezetéken folyó áram értékének változása következtében [5]

5.7 A távvezetékét érő szelek hatása

A távvezetékét érő szél nagy mértékben befolyásolja annak hőmérsékletét a konduktív hőelvonás következtében. A szél hűtő hatása az egyik legfontosabb termikus tulajdonságokat befolyásoló faktor ugyanis a különböző minőségű szelek, igen különböző termikus állapotokat képesek előidézni a távvezetékek sodronyainak esetében. A távvezetékét érő szelek feltérképezése, és megfigyelése egyben a legnehezebben kivitelezhető feladatok közé tartozik. A feladat nehézsége abban áll, hogy a széljárás folyamatos monitorozásához jó minőségű, megbízható mérőeszközökre van szükség, illetve, hogy gyakran a széljárás gyors változásainak követése csak pontatlanul valósítható meg. [2]

További nehézség, hogy a szélmérő szenzorok elhelyezésének olyannak kell lennie, hogy az megfelelően reprezentálja a távvezeték sodronyait érő szelek minőségét.

A távvezeték sodronyainak hűtéséért a mesterséges konvekción kívül, egyéb természetes konvekción alapuló hűtési módok is felelnek. A távvezeték sodronyainak hőmérséklete, nem egyensúlyi állapotban eltér a környezeti hőmérséklettől. Amennyiben a sodronyok és a környező hőmérséklet egymástól eltér, megindul a

természetes konvekció folyamata és ezzel a vezeték körülvevő levegő áramlása. Amikor a mesterséges konvekciót előidéző szelek nem fújnak, így akkor is létrejöhet hőmozgás áramlás útján.

A természetes konvekció mértékének számítási módja [3]:

$$q_{cn} = 0.0205 \rho_f^{0.5} D^{0.75} (T_c - T_a)^{1.25} \quad (9)$$

Ahol:

ρ_f = a levegő sűrűsége,

D = a sodrony átmérője,

T_c = a sodrony hőmérséklete,

T_a = környezet hőmérséklete.

5.8 A konvektív hűtést befolyásoló tényezők

Általánosságban elmondható, hogy a nagyobb szélesség jobb konduktív hűtési tulajdonságokkal bír adott irányú áramlás esetén. A távvezeték sodronyaira merőlegesen fújó szelet tekinthetjük a leginkább hűtő hatásúnak. Ez a hűtő hatás, amennyiben a szél beesési szöge a távvezeték sodronyaihoz képest stabilan kilencven fok, a szél sebességének növekedésével növekszik. A szél fújási szögének változásával a hűtő hatás is változik. A statisztikák alapján a sodronyokkal 45°-ot bezáró szélirány a sodronyokra merőleges, ugyanolyan sebességű szél hűtő hatásának csak 85 %-t, míg a sodronyokkal 30°-os szöget bezáró szélirány a sodronyokra merőleges ugyanolyan sebességű szél hűtő hatásának csak a 74 %-t produkálja. A legkisebb effektív hűtő hatást a sodronyokkal párhuzamosan fújó szél biztosítja, amely a megegyező sebességű sodronyokra merőleges szél hűtő hatásának körülbelül csak 60%-t éri el. [2], [3]

A konduktív hűtés mértékét befolyásolja még a vezető sodronyok felületi érdessége is. Az érdesebb felületű vezetők általában sokkal jobban hűlnek konvektív módon, mint egy sima felületű, ugyanolyan átmérőjű vezető.[6]

A mesterséges konvekció hatásának számítása a következőképp lehetséges [3]:

$$q_{c1} = [1,01 + ,0372 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0,52}] k_f K_{angle} (T_c - T_a) \quad (10)$$

$$q_{c2} = [0,0119 \left(\frac{D \rho_f V_w}{\mu_f} \right)^{0,6}] k_f K_{angle} (T_c - T_a) \quad (11)$$

Ahol:

$D = a$ sodrony átmérője,

$\rho_f = a$ levegő sűrűsége,

$v_{sz} = a$ levegő áramlási sebessége a sodrony körül,

$\mu_f = a$ levegő dinamikus viszkozitása,

$k_f = a$ levegő hővezető képessége,

$T_c = a$ sodrony hőmérséklete,

$T_a = a$ környezeti hőmérséklet.

Az első egyenlet alacsony szélesebességek esetén alkalmazható, magas szélesebességek esetén pontatlan, a második egyenlet pedig nagyobb szélesebességek esetén működik jól, és alacsony szélesebességek esetén vezet pontatlan eredményre. A két egyenletről elmondható, hogy bármilyen szélesebesség esetén az használatos, amelyik nagyobb értéket ad eredményül. [3]

$K_{angle} = a$ szél irányától függő változó melynek számítása módja [3]:

$$K_{angle} = 1.194 - \cos(\phi) + 0.194 \cos(2\phi) + 0.368\sin(2\phi) \quad (12)$$

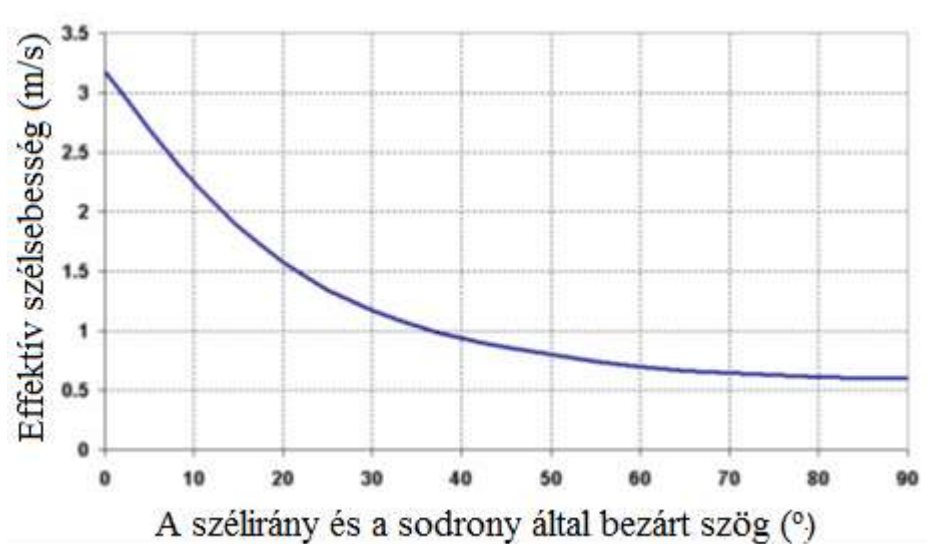
Ahol:

$\phi = a$ szél irányának és a távvezeték sodronyainak egymással bezárt szöge.

A különböző irányú és sebességű szelek összehasonlíthatóságának érdekében érdemes egy úgynevezett effektív szélesebességet számítani. Az összetartozó szélesebesség-szélirány adatokból egy ezzel ekvivalens hűtési hatású, sodronyokra merőleges szélirányú szél sebességét kell számolni. A következő táblázat alapján látható, hogy a különböző szélirányok esetén mekkora szélesebességre van szükség egy $0,6 \frac{m}{s}$ sebességű, a vezetékre merőlegesen fújó szél hűtő hatásának eléréséhez.

Szélesebesség	Szélirány vezetékkel bezárt szöge
$0,6 \frac{m}{s}$	90°
$0,8 \frac{m}{s}$	45°
$1,3 \frac{m}{s}$	$22,5^\circ$
$2,2 \frac{m}{s}$	0°

2. táblázat Ekvivalens hűtőhatással rendelkező szelek [3]



7. ábra Ekvivalens hűtési teljesítményű szelek sebessége a szélirány függvényében [2]

Alacsony szélesebességek esetén a szél egyes tulajdonságainak mérése igen nehézkes. Külső, meteorológiai szervek mérési eredményeinek figyelembe vétele ekkor nagy hibával alkalmazható a számítások során.

A szél sebességének megoszlása elsősorban magasságfüggő, minél alacsonyabban található egy berendezés, valószínűleg annál kisebb sebességű szél éri. A terhelhetőség számításánál érdemes figyelembe venni a távvezetékek maximálisan megengedett belógási magasságán mért széljárás adatokat. Amennyiben a széljárás adatok mérése nem a megfelelő magasságban történik, például a vezetékeknél magasabb mérőállomás segítségével, a számításba korrekciós tényezők beiktatása szükséges. [2]

A széljárási adatokat nagy mértékben befolyásolja még a távvezeték környezete, a domborzat, illetve a földrajzi elhelyezkedés. Beépített, fás környezetben a tereptárgyak erőteljesen módosítják a távvezetékét érő szelek tulajdonságait, turbulenciát, irány és sebességváltozást előidézve.

5.9 Sugár irányú hőmérsékleti gradiens

Mivel a távvezetékeinek sodronyaiban keletkező hő valamilyen formában távozik a sodrony belsejéből, a sodronyoknak szükségszerűen van valamilyen sugárirányú hőmérsékleti gradiense. A gyakorlatban ez annyit jelent, hogy a sodronyok belsejében keletkező hő, a termodinamika alapvető törvényei szerint a hidegebb helyek, mint például a sodrony külső felülete felé áramlik. A hő „mozgása” a sodrony egymáshoz feszülő alkotóelemeinek érintkezési felületein keresztül történik, éppen ezért annak mértéke függ a vezetékben ébredő feszültségektől, és a belógás mértékétől.

Normál üzemi körülmények között, a sugár irányú hőmérsékleti gradiens értéke kisebb keresztmetszetű vezetékek esetén nem játszik túl nagy szerepet a terhelhetőség alakulásában, azonban annak hatása nagyobb keresztmetszetű sodronyoknál, hirtelen nagy terhelések esetén már nem elhanyagolható.

5.10 Vezetékek méretének hatásai

A vezetékek nagysága, tömege, anyaga elsősorban a különböző termikus és mechanikai időálló befolyásolásán keresztül hat a terhelhetőségre. Egy vastagabb vezető például termikus szempontból sokkal „lomhábban” reagál a megnövekedett terhelésre, illetve az az által keltett nagyobb Joul-veszteségre. A vezetékek méretének hatásai éppen ezért a különböző zárlati események következtében megváltozó terhelhetőségi adatokat befolyásolják leginkább.

5.11 A legnagyobb megengedett vezeték hőmérséklet

A vezetékek terhelhetőségének becslésénél az egyik legfontosabb lépés az adott vezeték maximális hőmérsékletének meghatározása. A gyakorlatban a különböző sodronytípusok maximális megengedett hőmérséklete 50 °C és 180 °C közötti hőmérsékletre tehető, de bizonyos sodronytípusok megengedett legnagyobb hőmérséklete akár a 250 °C –t is elérheti. A megengedett legnagyobb hőmérséklet meghatározására azért van szükség, hogy a sodronyok mechanikai, villamos

tulajdonságai a távvezeték üzeme közben a lehető legkisebb mértékben romoljanak a különböző terhelési minták következtében. A túl nagy hőmérsékletek károsíthatják a vezeték egyes szakaszait, gyengíthetik a sodrony szerkezetét, befolyásolhatják annak szilárdságát. [2]

Alumínium típusa		Vezetőképesség (%IACS)	Legkisebb mechanikai feszültség (MPa)	Megengedett maximális hőmérséklet (°C)	
				Folyamatos	Rövid idejű
Hidegen húzott	1350-H19 (HAL)	61,2	159-200	90	120
Hőálló	TAL	60	159-176	150	180
Extra hőálló	ZTAL	60	159-176	210	240
Teljesen hőkezelt	1350-0	63	59-97	200-250	250

3. táblázat Egyes alumínium sodronyok megengedett hőmérsékleti értékei és egyéb paraméterei [12]

Tranziens hőmérsékleti események esetén a legnagyobb megengedett hőmérséklet általában meghaladja a normál üzemi körülményekre meghatározott értékeket. Az esetleges zárlati áramok okozta hőmérsékletnövekedést ugyanis nem lehet elkerülni, ezek lefutási ideje rövidebb és hatása is teljesen más típusú, mint a folyamatos túlterhelés esetén.

A sodronyok áramterhelésének számításában igen fontos szerep jut az adott sodrony megengedett legnagyobb hőmérsékletének. Az általam végzett számítások és szimulációk a sodronyok legnagyobb megengedett hőmérsékletét veszik a terhelhetőséget korlátozó legfontosabb tényezőnek.

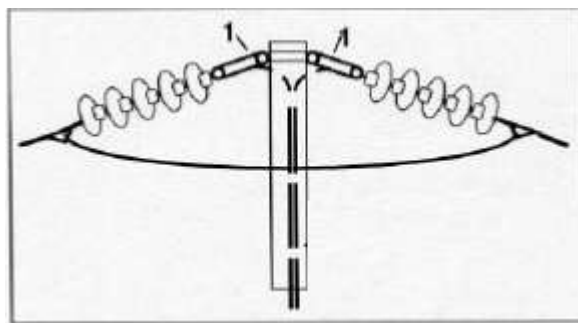
5.12 A vezetékek belógása, feszessége

A vezetékek terhelhetőségét korlátozó másik legfontosabb tényező a vezetékek hőmérséklete mellett a vezetékek belógása. A vezetékek belógása elsősorban a sodronyok hőmérsékletétől függ. Egyéb befolyásoló tényezők, mint például a vezetéken felhalmozódó, a vezetékre rakódó csapadék, vagy egyéb mechanikai terhelés szintén a vezetékek belógásának változását okozzák.

A vezetékek, sodronyok hossza a hőmérséklet változásával együtt változik. A hőtágulás következtében a vezetékek hossza nő, ennek következtében megnő a belógás, megváltoznak az oszlopokra jutó mechanikai feszültségek. A vezetékek belógása, azaz a legkisebb távolsága a földtől, vagy a környező tereptárgyaktól nem léphet át bizonyos határokat. A belógás mértékének meg kell felelnie a biztonságos üzemhez elengedhetetlen villamos, jogi, és hatósági előírásoknak.

A vezetékek hőmérsékletének extrém növekedésekor előfordulhat olyan mértékű hőtágulás, hogy a sodrony egyes szálai eltávolodnak egymástól. Az ilyen és ehhez hasonló sorozatos tágulási- összehúzóási folyamatok komoly kopásnak teszik ki a sodronyt, jelentősen csökkentik annak élettartamát.

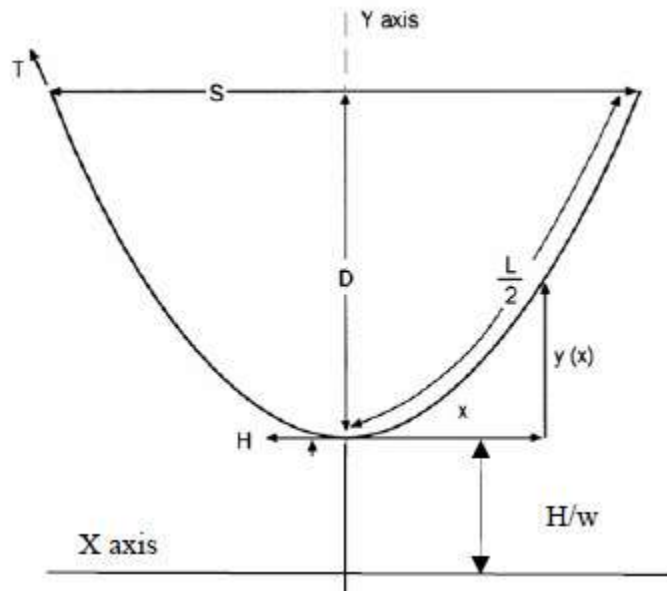
A sodronyok belógásán túl lehetőség van a sodronyok által, a tartó és feszítőszigetelőket, illetve az oszlopokat terhelő erők vizsgálatára is. Az távvezeték egyes részein ébredő mechanikai feszültségek figyelembe vételével mind a belógás, mind a dinamikus terhelhetőség pontosabban meghatározható.



8. ábra Az oszlopra helyezett nyúlásmérő-bélyegek (1) a rendszerben ébredő mechanikai feszültségek mérésére[7]

5.12.1 A belógás számítása

A benyúló vezeték alakja, annak íve legjobban egy parabola függvény ívéhez hasonlítható.



9. ábra A belógás alakulása két egyforma magasságú felfüggesztési pont esetén [4]

Az ábra jelölései:

D = belógás (m),

S = oszlopköz, a felfüggesztések közötti távolság,

L = vezeték hossz (m),

H = vízszintes erő-összetevő (N),

T = teljes mechanikai feszültség (N),

w = egységnyi hosszúságú vezeték hossza. (N/m),

x = a legmélyebben elhelyezkedő ponttól mért vízszintes távolság(m),

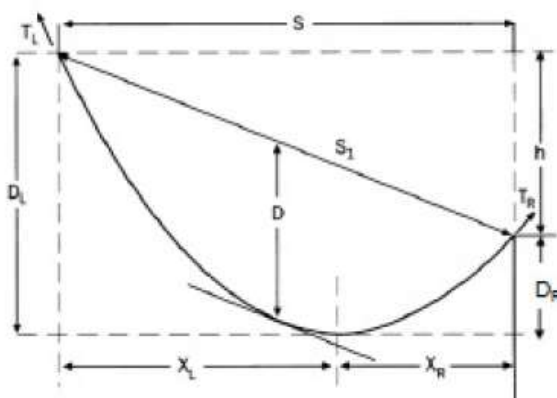
$y(x)$ = a sodrony x pontjának a legmélyebben elhelyezkedő ponttól mért függőleges irányú távolsága (m).

A belógó sodrony íve egy parabola-függvénnyel közelíthető, amely igen szemléletesen mutatja az egyes összefüggéseket a belógás, a mechanikai feszültségek és az oszlopköz nagysága között. A parabola függvénnyel történő közelítés hibája elhanyagolható a gyakorlatban használt oszlopközök és vezeték hosszok esetén.

A belógást leíró, közelítő parabola-függvény:

$$y(x) \cong \frac{w \cdot x^2}{2 \cdot H} \quad (13)$$

A gyakorlatban az egymást követő oszlopok gyakran nem ugyanakkora magasságúak, illetve a domborzati viszonyok miatt gyakran a vezeték két felfüggesztési pontjai két egymást követő oszlop esetén nem esnek ugyanabba a magasságba. Ebben az esetben más számítási módszerre van szükség.



10. ábra Különböző magasságban található felfüggesztési pontok hatása a belógásra [4]

A belógás számítása ilyen „torzult” esetben a következőképp hajtható végre:

$$y(x) \cong \frac{w \cdot S^2}{8 \cdot H} \quad (14)$$

A belógás becsülhető még a vezeték hossz és az oszlopköz hossza alapján:

$$D = \sqrt{\frac{3 \cdot S \cdot (L - S)}{8}} \quad (15)$$

5.12.2 Hőtágulás

A belógás mértéke erősen függ a sodronyok hőtágulásának mértékétől. A hőtágulás következtében a vezető hossza jelentős mértékben képes megváltozni, megnőni. A hőtágulás mértéke lineárisan függ a vezető hőmérsékletének megváltozásától és egy, az anyagra jellemző lineáris hőtágulási együtthatótól.

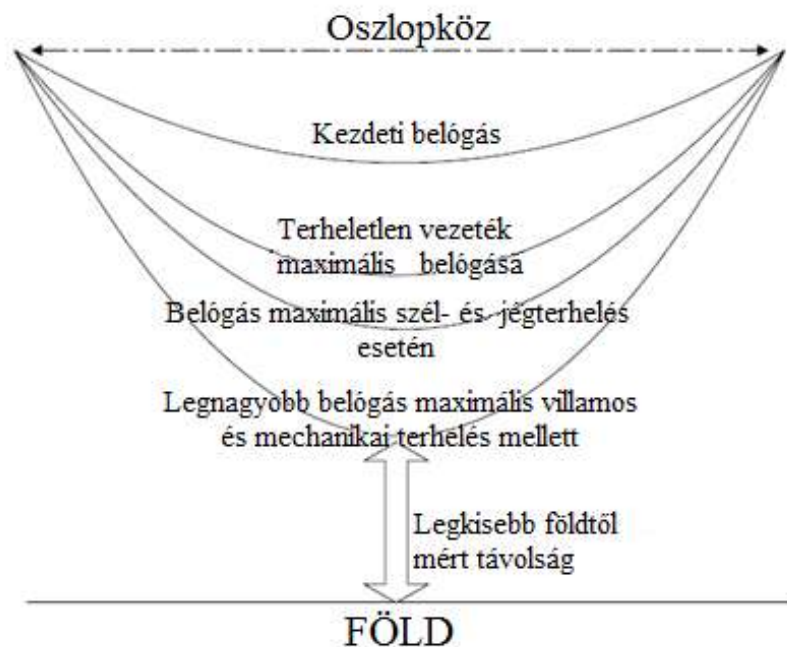
A hőtágulás mértéke a következők szerint számolható:

$$\frac{\Delta L}{L} = \alpha_l \cdot \Delta T_c \quad (16)$$

Amikor a vezeték hossza a hőtágulás következtében megváltozik, megváltoznak a vezetékben ébredő mechanikai feszültségek is.

5.12.3 A vezetékhozzát befolyásoló egyéb paraméterek

A vezetékek hozzát azok hőmérsékletén kívül több egyéb paraméter is befolyásolhatja. A sodronyt érő szelek folyamatos vibrációt okoznak a távvezetéken, belengetik azt, az egyéb időjárási körülmények, mint például a vezetékre rakódó hó, illetve jég pedig további mechanikai terhelést jelent mind a sodronyokra, mind az azokat tartó és függesztő berendezésekre. Az ilyen és ehhez hasonló vezetékhozzát befolyásoló tényezőket figyelembe kell venni a megengedett legnagyobb belógás meghatározásánál.



11. ábra A különböző belógást módosító paraméterek hatásai [8]

5.12.4 „Ruling Span” módszer

A távvezetékek egyes oszlopközeinek tulajdonságai a gyakorlatban csak a legkritikább esetben egyeznek meg. Egy valós távvezeték oszlopközei általában eltérő hozzúságúak, az oszlopok magassága különböző, a nyomvonal-menti domborzat folyamatosan változik. A távvezeték gyakran keresztez olyan kritikusnak mondható elemeket, mint autópályák, utak, lakóövezetek, különböző tereptárgyak, amelyek miatt az adott oszlopköz sodronyainak belógására különös tekintettel kell lenni. Amennyiben a távvezeték összes oszlopközének sodronyaira szeretnénk általános megállapításokat

tenni a „Ruling Span” módszert kell használnunk. A „Ruling Span” módszer, az eltérő nagyságú oszlopközök hossza, az egyes oszlopközök sodronyaiban ébredő mechanikai feszültségek alapján, illetve egyéb befolyásoló tényezők figyelembe vételével egy effektív oszlopköz-hosszt számol. Az eltérő nagyságú oszlopközöket a további számítások során a „Ruling Span” módszer által számított oszlopköz nagysággal lehet helyettesíteni, figyelembe venni. A „Ruling Span” módszer által számított oszlopköz-hossz tehát olyan, mintha a teljes távvezetékünk ilyen nagyságú oszlopközökből épülne fel. [22]

A „Ruling Span” definíciója:

$$RS = \sqrt{\frac{S_1^3 + S_2^3 + \dots + S_n^3}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}} \quad (17)$$

Ahol:

RS = a domináns oszlopköz-hossz egy n oszlopközt tartalmazó távvezetékszakasznál,

S_1 = az első oszlopköz valós nagysága

S_n = az n . oszlopköz valós nagysága.

Az i . oszlopköz belógása ezek után számítható:

$$D_i = D_{RS} \left(\frac{S_i}{RS} \right)^2 \quad (18)$$

6 Távvezetékek dinamikus terhelhetőségének modellezése

A gyakorlatban a távvezetékek dinamikus terhelhetőségének modellezésére több lehetőség is létezik. A dinamikus terhelhetőség modellezésének egyes lehetőségei jelentősen eltérnek egymástól, de valamilyen szinten mindegyik módszer a távvezeték terhelhetőségének fizikai modelljéből indul ki, a távvezeték terhelhetőségének fizikai modellje pedig a távvezeték termikus állapotán, annak változásain alapul. A technológia és az egyes matematikai módszerek fejlődésével lehetőség nyílt az egyszerűbb fizikai modell által nyújtott lehetőségek kiterjesztésére. Az új, modern megközelítésben tárgyalt modellezési technikák lehetőséget adnak a távvezeték terhelhetőségének pontosabb becslésére, a különböző távvezeték-szakaszok terhelhetőségének egyedi modellezésére.

6.1 Modellezés a gyakorlatban

6.1.1 Fizikai modell

Egy távvezeték terhelhetőségéről általánosságban kijelenthető, hogy az gyakorlatilag a vezetékek hőmérsékletétől, illetve annak belógásától függ. Az egyszerűsítés kedvéért a dolgozatomban feltételeztem, hogy az alapvető fizikai modellben a vezeték belógása nem befolyásolja az aktuális terhelhetőséget, tehát (mint az a valóságban ténylegesen előfordul) nincsenek jogi, üzemi előírások a vezetékek belógására vonatkozóan.

Az egyszerűsített fizikai modell szerint ekkor a vezeték terhelhetősége gyakorlatilag visszavezethető a sodronyok legnagyobb megengedett hőmérsékletére. Ez a megállapítás arra enged következtetni, hogy a fizikai modellünknek olyan paramétereket kell tartalmaznia, amelyek a vezeték hőmérsékletét befolyásolják. Ezek a paraméterek a különböző IEEE és Cigré szabványok, illetve a dolgozat előző fejezetei alapján:

- a vezetéken folyó áram fűtő hatása: P_J ,
- a sugárzásból eredő hőveszteség: P_R ,

- a napsugárzás fűtő hatása: P_s ,
- a szél, illetve a konvektív áramlások hűtő hatása: P_C ,
- a vezetékek termikus tehetetlensége: $mC_p \cdot \frac{dT_v}{dt}$.

Az dolgozatomban a terhelhetőség fizikai modellezésénél ezt az egyszerűsített szemléletet követem, tehát elhanyagolok bizonyos hatásokat, mint például a vezetékben folyó áram mágneses fűtő hatását, vagy a sodrony körüli koronakisülések hatásait.

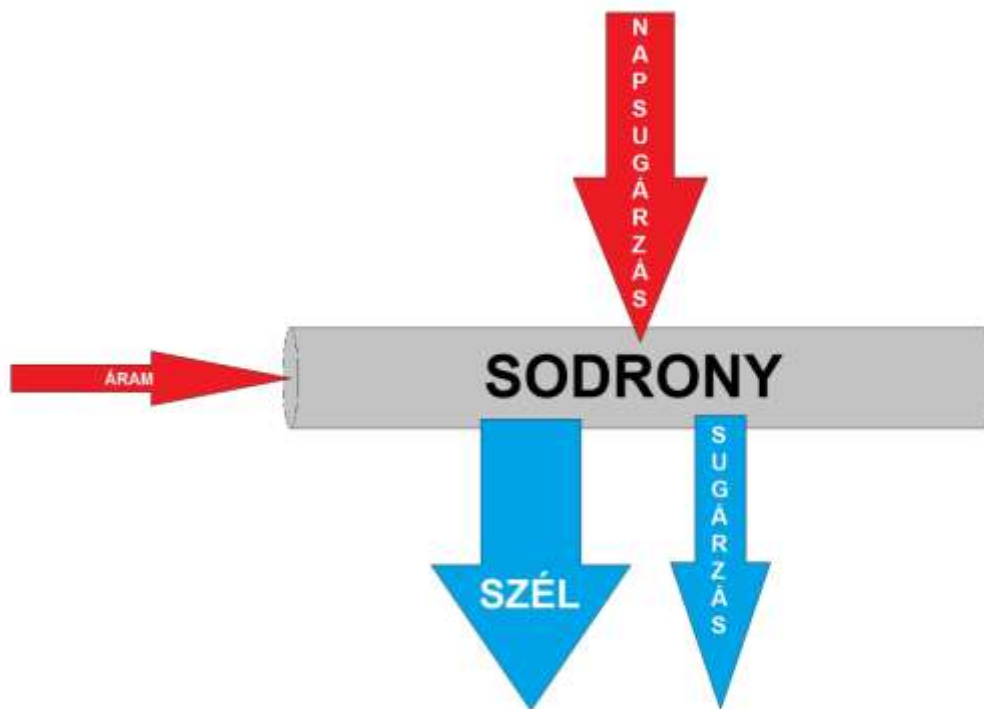
Az egyszerűsített modellben szerepet kapó paraméterek közötti kapcsolatot legjobban a távvezeték terhelhetőségének hőegyensúlyi egyenlete írja le. A hőegyensúlyi egyenletnek két, alapvető megjelenési formája ismert.

6.1.1.1 Hőegyensúlyi egyenlet

Állandósult állapot

$$P_j + P_s = P_R + P_C \quad (19)$$

Statikus eset alatt azt értjük, amikor a távvezetékét érő termikus hatások és a távvezeték termikus tulajdonságai már nem változnak, tranziens termikus jelenségek nem történnek, vagy már lecsengtek.



12. ábra A sodrony hőegyensúlyi egyenletének szemléltetése

Tranziens állapot

$$P_j + P_s = P_R + P_C + mC_p \cdot \frac{dT_v}{dt} \quad (20)$$

Dinamikus esetben a távvezetékét érő, hőmérsékletet befolyásoló hatások még változó intenzitással hatnak a távvezetésekre, a vezetékek hőmérséklete a sodrony termikus tehetetlensége miatt azonban csak bizonyos időállandóval képes ezen termikus hatások követésére.

Az távvezeték termikus tehetetlenségét a további számítások alkalmával elhanyagolom, modellben azzal a feltételezéssel élek, hogy a távvezeték hőmérséklete azonnal reagál a különböző környezeti hatásokra.

6.1.1.2 A terhelhetőség meghatározása

A hőegyensúlyi egyenlet világosan leírja a távvezetékét érő egyes hatások közötti kapcsolatot, így ez alapján becsülhető a távvezetéken átfolyó áram aktuális értéke. Amennyiben a távvezeték hőmérséklete ismert a számítás könnyedén elvégezhető, és mivel $= I^2 \cdot R(T_v)$:

$$I = \sqrt{\frac{P_R + P_C - P_s}{R(T_v)}} \quad (21)$$

Tudni kell, hogy a gyakorlatban a távvezetésekre felszerelt sodronyok esetén, az egyes sodronytípusok maximális hőmérsékletét a gyártói adatlapok világosan rögzítik.

Amennyiben az hőegyensúlyi egyenlet egyes, vezeték hőmérsékletétől is függő paraméterek hatását a megengedett maximális hőmérséklet függvényeként értelmezzük, a távvezeték terhelhetősége, I_R is számolhatóvá válik:

$$I_R = \sqrt{\frac{P_R(T_{max}) + P_C(T_{max}) - P_s}{R(T_{max})}} \quad (22)$$

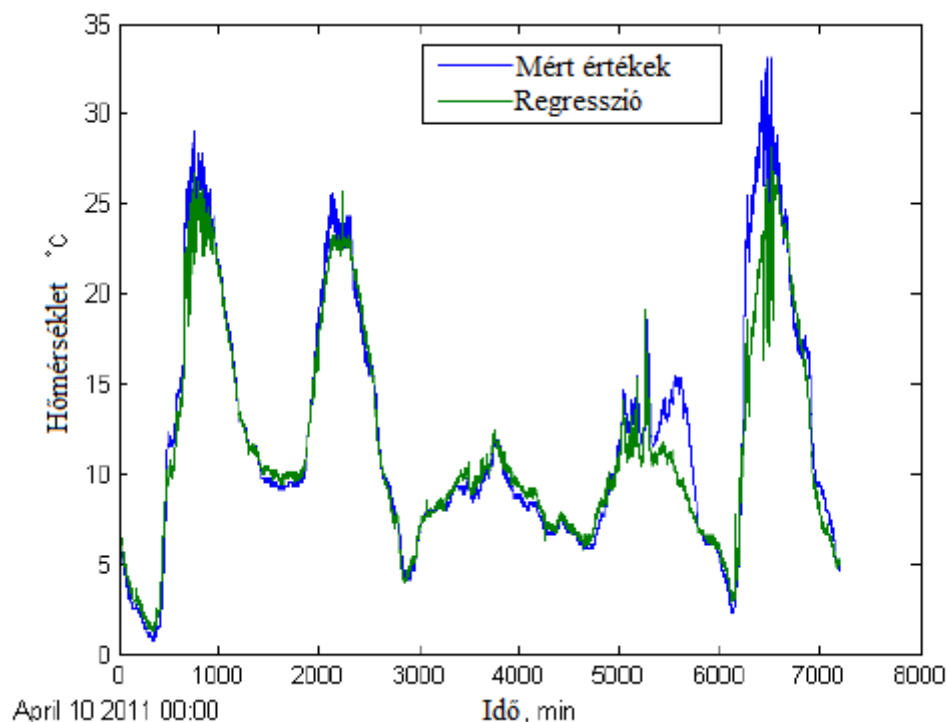
A fizikai modellel kapcsolatos legfőbb probléma ez egyes paraméterek mérésénél jelentkezik. Az egyes paraméterek mérési pontatlanságai miatt a fizikai modell által szolgáltatott eredmények gyakran csak közelítő eredményt adnak a terhelhetőségre.

6.1.2 „Grey-box” modellezés

Egyes rendszerek modellezésére több különböző módszer létezik. Lehetőség van a meglévő fizikai összefüggések alapján egy konkrét fizikai modellt felállítani, illetve

lehetőség van pontos fizikai összefüggések ismerete nélkül kizárólag a az egyes mért értékek alapján egy rendszerről modellt alkotni. E két modellezési technika keveréke az úgynevezett „Grey-box” modellezés, amely felhasznál bizonyos fizikai összefüggéseket, de a modellalkotás során ezen összefüggéseknél, különböző mérési eredményekre hivatkozva egyszerűsítéseket, elhanyagolásokat, általánosításokat tesz.

A „Grey-box” modellezés esetén lehetőség van különböző matematikai módszerek segítségével, a gyakorlatban nehezen számítható fizikai modellek egyszerűsítésére. Többszörös lineáris regresszió segítségével például lehetséges a távvezetékek hőmérsékletének becslése, illetve a távvezeték hőmérsékletének a többi paramétertől való függésének meghatározása. A többszörös lineáris regressziós modell segítségével a fizikai modellből származó egyszerűsített egyenletekben megjelenő becsült paramétereinek számítása válik lehetségessé. Ezen becsült paraméterek kalibrálásával a keresett változó értéke a valósághoz képest igen pontosan becsülhető.



13. ábra Regressziós modell által számított és a valós, mért hőmérséklet az idő függvényében [5]

A többszörös regressziós modellen kívül rendelkezésre állnak egyéb statisztikai módszerek a dinamikus terhelhetőség becslésére. A PLS regressziós eljárás segítségével a többszörös regressziós modellnél pontosabb becslés érhető el, hatékony előrejelző

képesség mellett. A regressziós eljárások egyik közös tulajdonsága, hogy a keresett független változók és a kimeneti változó között lineáris kapcsolatot tételeznek fel.

A PLS regressziós eljárás szerint a távvezeték terhelhetőség számításánál, a távvezeték sodronyainak hőmérsékletét alapvetően a mért környezeti változók és a vezeték árama határozza meg. A többi paraméter független változónak tekinthető. Amennyiben a sodronyhőmérsékletet tekintjük a kimeneti paraméterünknek és azt y -al jelöljük a független változókat pedig x -szel, és y és x között lineáris kapcsolatot tételezünk fel a kettő közötti összefüggés a következőképp írható le:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n \quad (23)$$

ahol a_i a független változóhoz tartozó regressziós együttható. Az egyes együtthatók kalibrálásához szükség van mért adatokra. Minél több mért adat kerül feldolgozásra, a modell kalibrációja annál pontosabbá válik.[11]

6.1.3 Mesterséges Intelligencia használata

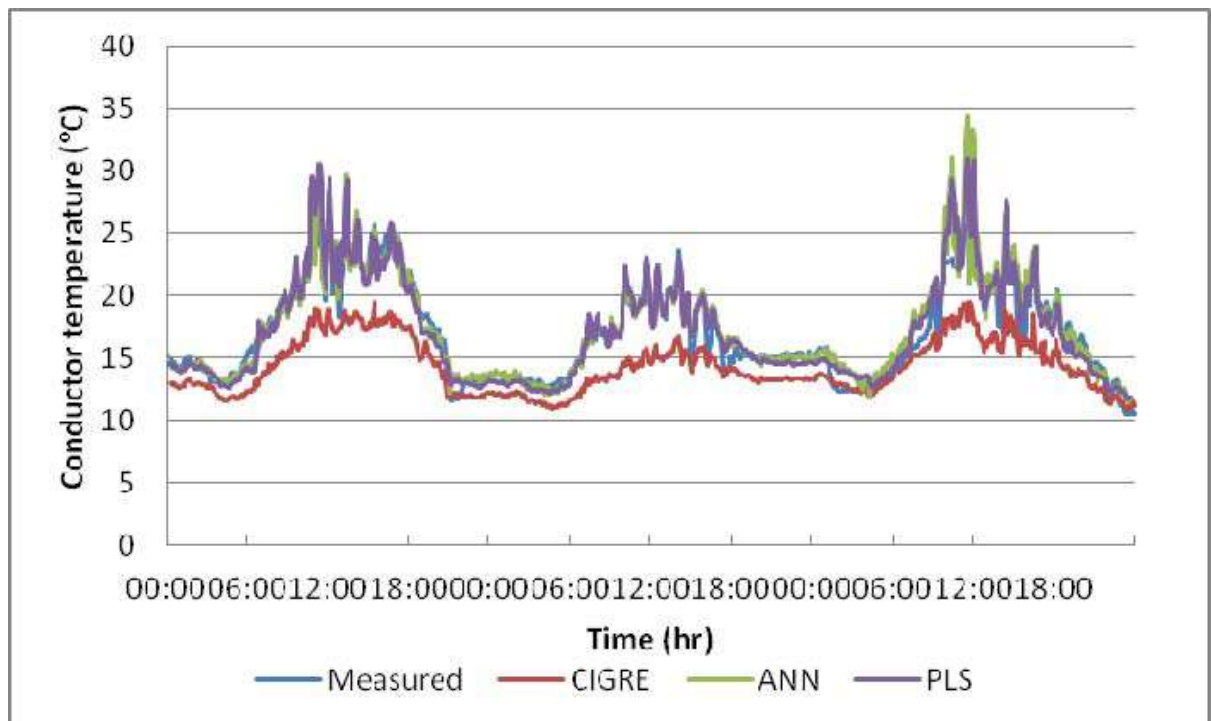
Lehetőség van a dinamikus terhelhetőség megállapítására mesterséges intelligencia használatával.

A mesterséges intelligencia használatának terhelhetőség becslés és előrejelzés esetén számos előnye van a fizikai modellel szemben. Lehetőség van a fizikai modell és, az abban szereplő paraméterek közötti kapcsolatok pontos ismerete nélkül egy igen jól működő, terhelhetőség-előrejelző rendszer kialakítására. Mesterséges neurális hálózatok alkalmazásával a terhelhetőséget meghatározó paraméterek közötti kapcsolatot nem lineáris összefüggések írják le. A neurális hálózat által feldolgozott adatok alapján az egyes, terhelhetőséget befolyásoló paraméterek súlyozásra kerülnek annak függvényében, hogy azok milyen mértékben befolyásolják a kimeneti paramétert, a terhelhetőséget. A mesterséges neurális hálózatok felépítésüket és működésüket tekintve a biológiai neurális hálózatok tulajdonságait modellezik, mesterséges neuron-hálózatokból állnak. A mesterséges neurális hálózatok alap építőelemei a mesterséges neuronok, amelyek egyszerű, de állapotukat tekintve számokkal leírható egységeknek tekinthetők. Az egyes egységek egymás közötti kapcsolatai súlyokkal rendelkeznek, számokkal leírva. Egy neurális háló bemenetei lehetnek például a terhelhetőség meghatározásához szükséges szenzorok által mért adatok, hőmérsékleti, széljárási, aktuális terhelési adatok, kimenete pedig lehet például a terhelhetőség.

6.2 Az egyes modellek összehasonlítása

Az egyes modellek mind számítási, mind megközelítési szempontból eltérnek egymástól. A fizikai modell az alapvető fizikai összefüggéseket használja fel a távvezetékek terhelhetőségének számítására, míg a többi modell különböző, terepi mérési eredmények segítségével kalkulált, becsült paramétert visz a számításba. A fizikai modellben az előre meghatározott képletek alapján az aktuális mérési eredmények behelyettesítésével történhet meg a terhelhetőség becslése, míg a többi modell korábbi mérési eredmények, adatbázisok alapján a távvezeték sodronyainak hőmérsékletére tesznek becslést.

Ha a távvezeték termikus viselkedését szeretnénk modellezni, választhatunk a különböző modellezési eljárások közül. Az egyes modellezési technikák más-más pontossággal képesek megbecsülni a sodronyok aktuális hőmérsékletét. Általánosságban elmondható, hogy azok a modellezési eljárások, amelyek nagy mennyiségű mért adat alapján kerültek kidolgozásra, sokkal pontosabb eredményt szolgáltatnak a vizsgált kérdésben. Az ilyen modellek a regressziós módszereket, vagy a mesterséges intelligenciát használó modellek.



14. ábra Tipikus sodrony-hőmérsékleti adatok egy nyári napon [11]

Az ábrán látható, hogy a valós mért hőmérsékleti adatokhoz képest a CIGRÉ által javasolt fizikai összefüggések alapján számolt hőmérsékleti értékek milyen mértékben térnek el az egyéb modellek számításaitól egy tipikus nyári napon. A fizikai modell kevésbé pontosan becsli a valós hőmérsékleti értékeket, emiatt ennek használata esetén további megfontolásokat kell tenni. A nagy mennyiségű, korábban lemerített adattal „tanított” számítási rendszerek, modellek sokkal pontosabban követik a valós hőmérsékleti profilt ezért a gyakorlatban javasolt ezeknek a használata. A pontosabb számítási eredmény elérésének egyetlen nehézsége, hogy nagy számú valós mérési eredményt kell felhasználni azok tervezése, kalibrációja során. A nem fizikai modellek mindegyikéről elmondható, hogy tervezésük, kialakításuk úgy történik, hogy egy kezdeti, még nem teljesen kifinomult számítási rendszert (melynek bemenetei az egyes terhelhetőséget befolyásoló paraméterek, kimenete a terhelhetőség) a valós mérési eredmények segítségével tökéletesítenek, a rendszer működését leíró szabályrendszert, az egyes paraméterek közötti összefüggéseket pontosítják.

7 A fizikai modell megalkotása

Az előző fejezetekben olvasható összefüggések, de főleg az IEEE 738-as szabvány és Cigré ajánlások alapján elkészítettem a távvezeték dinamikus terhelhetőségének fizikai modelljét. Az általam összeállított, majd leprogramozott modell képes a különböző környezeti tényezők és a távvezeték sodronyait jellemző paraméterek függvényében megbecsülni a sodronyok terhelhetőségének nagyságát.

Az előző fejezetben található modellezési eljárások a távvezeték termikus állapotának meghatározására törekszenek, a saját modellemben azonban nem a vezeték hőmérsékletének kalkulációját, hanem az azon megengedett legnagyobb áramerhelés számítását céloztam meg. A modell megalkotásánál felhasználtam az egyes paraméterek közötti, már meglévő fizikai összefüggéseket. A modell felállításánál törekedtem arra, hogy a végső eredmények a már meglévő szakirodalom eredményeivel összehasonlíthatóak, az egyes számított értékek a korábbi tapasztalatokkal összemérhetőek legyenek.

A modellt Matlab környezetben valósítottam meg, és teszteltem.

7.1 A modell felépítése

A dinamikus terhelhetőségi modell általam készített változata alapvetően a távvezetékek sodronyainak hőegyensúlyi egyenletére épül. A modell a számítás során figyelembe veszi a sodronyokat érő napsugárzás fűtő hatását, a szelek, illetve az egyéb konvektív hőáramlásból adódó hűtő hatást, a külső hőmérséklet hatását, a vezetékek sugárzás útján történő hűlését, az áram fűtő hatását, és a sodronyok ohmos ellenállásának hőmérsékletfüggését.

7.1.1 A modellben, a számításhoz használt paraméterek

A dolgozatomban bemutatott saját modell segítségével lehetőség nyílik különböző fizikai paraméterekkel rendelkező sodronyok dinamikus terhelhetőségének szimulációjára, különböző időjárási körülmények között, továbbá a különböző terhelhetőség növelési eljárások összehasonlítására is.

A terhelhetőség számításában a következő paramétereket használtam fel:

- Bemeneti paraméterek:
 - Szélesség $v_{sz} \left[\frac{m}{s} \right]$,
 - Emissziós tényező $\varepsilon [-]$,
 - Abszorpciós tényező $\alpha [-]$,
 - Külső hőmérséklet $T_a [^\circ\text{C}]$,
 - A sodrony megengedett legnagyobb hőmérséklete $T_{max} [^\circ\text{C}]$,
 - A sodrony külső átmérője $D [m]$,
 - Beérkező napsugárzás teljesítménye $S \left[\frac{W}{m^2} \right]$,
 - A sodrony ohmos ellenállásának hőmérsékletfüggése $R_{Tmax} \left[\frac{\Omega}{m} \right]$.
- Nem bemeneti, de opcionálisan állítható paraméterek:
 - A sodronyt környező levegő sűrűsége ρ_f ,
 - A sodronyt környező levegő hővezető képessége k_f ,
 - A sodronyt környező levegő dinamikus viszkozitása μ_f .

7.2 Elhanyagolások, egyszerűsítések, eltérések a szabványos modellekhez képest

A modellben felhasznált paramétereken kívül léteznek egyéb a sodrony hőmérsékletét befolyásoló paraméterek is, melyek hatása csekély, illetve mérése nehezen kivitelezhető. Az ilyen, és ehhez hasonló paraméterek a terhelhetőség számításánál, az egyszerűsítés kedvéért nem vettem figyelembe.

A modellben nem szerepel például a váltakozó áram okozta mágneses fűtő hatás, a nagyfeszültségű vezetékek felületénél jelentkező koronakisülések hatása.

A napsugárzás fűtő hatásánál nem vettem figyelembe a napsugarak beesési szögét, a távvezeték földrajzi elhelyezkedését, az időjárás változékonyságát, felhősödést, a levegő különböző paramétereinek változásait. A modell által feldolgozott

bemeneti adatsorokban, a napsugárzásra vonatkozó teljesítményadatokat azonban igyekeztem a valóságban is előforduló adatokkal jellemezni.

A konvektív hőmozgás számításánál az egyik legfontosabb bemeneti paraméter a szélesebesség. Mivel a szél hűtő hatásának számításánál lehetőség van az aktuális szélesebesség, valamint a szélesebesség és a sodrony által bezárt szög figyelembe vételével, egy ekvivalens hatású merőleges szélesebesség számítására, az általam készített modell nem veszi figyelembe a szélirány távvezetékekkel bezárt szögét, ezért a bemeneti adatsorokban szereplő szélesebesség adatok mind-mind a vezetékre merőleges szél sebességét jelentik. A fizikai összefüggések leprogramozásánál a szélesebességet, mint bemeneti paramétert ennek megfelelően használtam fel.

A saját modellből kihagytam a hőmérsékleti tranziensek vizsgálatát, így nem vettem figyelembe a sodronyok hőkapacitását, fajhőjét, mivel a sodronyok hőmérséklete általában a megváltozott körülményeket csak 5-30 perces időállandóval követi.

A modell megalkotásánál feltételeztem, hogy a különböző bemeneti paraméterek mérésére egytől-egyig lehetőség van. A modell teszteléséhez tesztadatokat ennek megfelelően generáltam le.

7.3 Eredmények

A saját modell működését két különböző típusú sodrony adatainak felhasználásával hasonlítottam össze az IEEE-féle és a Cigré-féle modellel.

7.3.1 Saját modell és IEEE összehasonlítása

A modell megalkotása és a fizikai összefüggések implementálása után, első lépésként összehasonlítottam a saját rendszer működését, annak eredményeit, a már meglévő, szakirodalomban is leírt kalkulációk eredményével. Az összehasonlításhoz az IEEE 738-as szabványban szereplő terhelhetőség számításánál használt bemeneti paramétereket használtam.

Bemeneti paraméterek	
v_{sz}	$0,61 \frac{m}{s}$
ε	0,5
α	0,5
T_a	40 °C
T_{max}	100 °C
D	2,81432 cm
R(25 °C)	$72,816 \frac{\mu\Omega}{m}$
R(75 °C)	$86,854 \frac{\mu\Omega}{m}$

4. táblázat Modellteszteléshez használt bemeneti paraméterek és azok értékei „Drake” 26/7 ACSR típusú sodrony esetén

A bemeneti paraméterek értékeit feldolgoztam a saját modellemmel, majd a számítás eredményeit összehasonlítottam a szabványban szereplő eredményekkel.

A bemeneti paraméterek alapján számolt teljesítményértékek és terhelhetőség:

	IEEE 738	Saját modell
Konvektív teljesítményáramlás	$82,328 \frac{W}{m}$	$80,204 \frac{W}{m}$
Sugárzási teljesítmény	$24,472 \frac{W}{m}$	$23,477 \frac{W}{m}$
Napsugárzásból származó teljesítmény	$13,978 \frac{W}{m}$	$12,150 \frac{W}{m}$
Terhelhetőség	994 A	980,54 A

5. táblázat A saját modell és az IEEE 738 szabvány által számított értékek összehasonlítása

A számított értékek alapján, a saját modell által kalkulált értékek megközelítik a szabványban szereplő számítás eredményeit, azokkal összemérhetőek. Az eredmények közötti eltérés jelentkezhethet a számítási módszerek közötti különbségekből, a számítás során végzett kerekítésekből, egyéb elhanyagolásokból.

A napsugárzásból származó teljesítmény számításánál a saját modell a Cigré által javasolt számítási módszereket használja. Ugyanez a helyzet a sugárzási teljesítmény számításánál is, ezen összetevő számítási módja szintén a Cigré-féle modellre épül.

Az általam készített modell segítségével lehetőség van a változó körülmények miatt előálló terhelhetőség-viszonyok és a változások hatásainak vizsgálatára.

Az első vizsgált sodronytípus a „Drake” 26/7 ACSR volt, melynek megengedett legnagyobb terhelése a statikus terhelhetőség számítás alapján 907 A [14], és amelynek egyéb paraméterei a 4. táblázatban is megtalálhatók. Azért esett erre a sodronytípusra a választásom, mert ezen sodrony esetén már voltak számított eredmények amelyekkel a saját modellem eredményeit össze tudtam hasonlítani. A számítások során a sodrony megengedett legnagyobb hőmérsékletét konstans 100 °C-nak vettem, ahogy azt az IEEE 738-as szabvány javasolta.

7.3.2 A saját és a Cigré-féle modell összehasonlítása

Az általam vizsgált második sodronytípus a 428-A1/S1A-54/7 "Zebra" jelű sodrony volt. Ezt a sodronytípust azért vizsgáltam, mert rendelkezésemre álltak a Cigré-modell alapján, erre a sodronytípusra végzett számítási eredmények, illetve a sodrony paramétereit jellemző adatok.[16]

A számításhoz használt bemeneti paraméterek:

Bemeneti paraméterek	
v_{sz}	$0,4 \frac{m}{s}$
ε	0,5
α	0,5
T_a	40 °C
T_{max}	75 °C
D	2,86 cm
R(25 °C)	$67,4 \frac{\mu\Omega}{m}$
R(75 °C)	$82,3 \frac{\mu\Omega}{m}$

6. táblázat Modellteszteléshez használt bemeneti paraméterek és azok értékei 428-A1/S1A-54/7 "Zebra" típusú sodrony esetén

A vizsgált modellek által szolgáltatott eredmények:

	Cigré-féle modell	Saját modell
Konvektív teljesítményáramlás	31,78 $\frac{W}{m}$	28,6954 $\frac{W}{m}$
Sugárzási teljesítmény	12,92 $\frac{W}{m}$	12,91 $\frac{W}{m}$
Napsugárzásból származó teljesítmény	14,02 $\frac{W}{m}$	14,01 $\frac{W}{m}$
Terhelhetőség	602,4 A	576,69 A

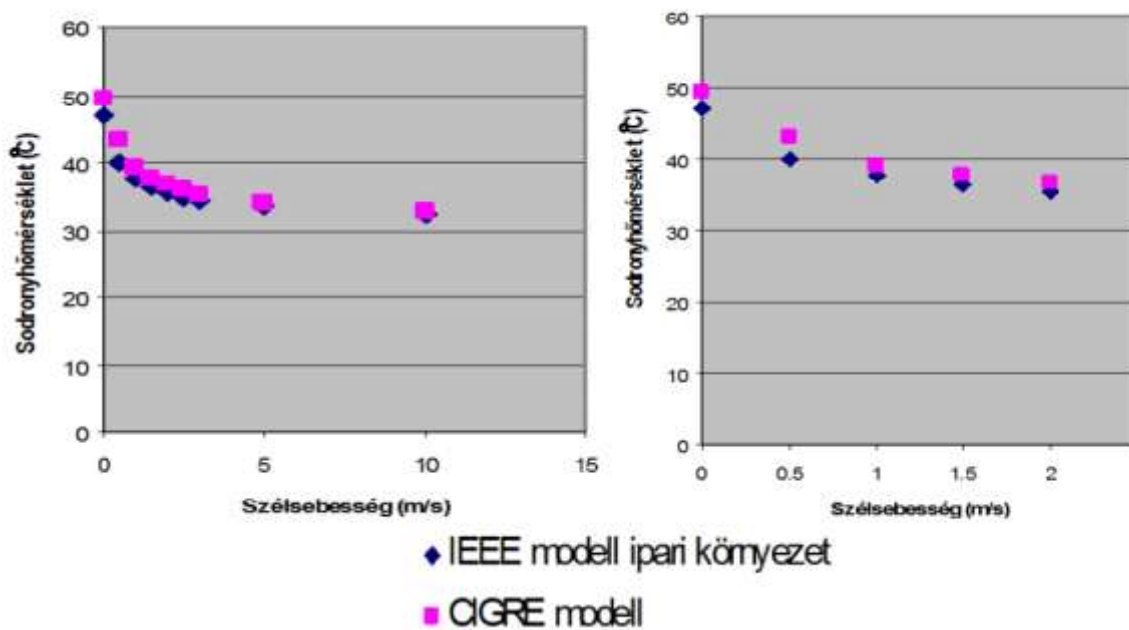
7. táblázat A saját modell és az Cigré-féle modell által számított értékek összehasonlítása

Az eredmények összehasonlításánál világossá válik, hogy a saját modell által szolgáltatott terhelhetőség értéke a Cigré-féle modell által számított terhelhetőség közelében van, azonban ismételten, az IEEE-féle modell által szolgáltatott eredményekhez hasonlóan, azt nem éri el.

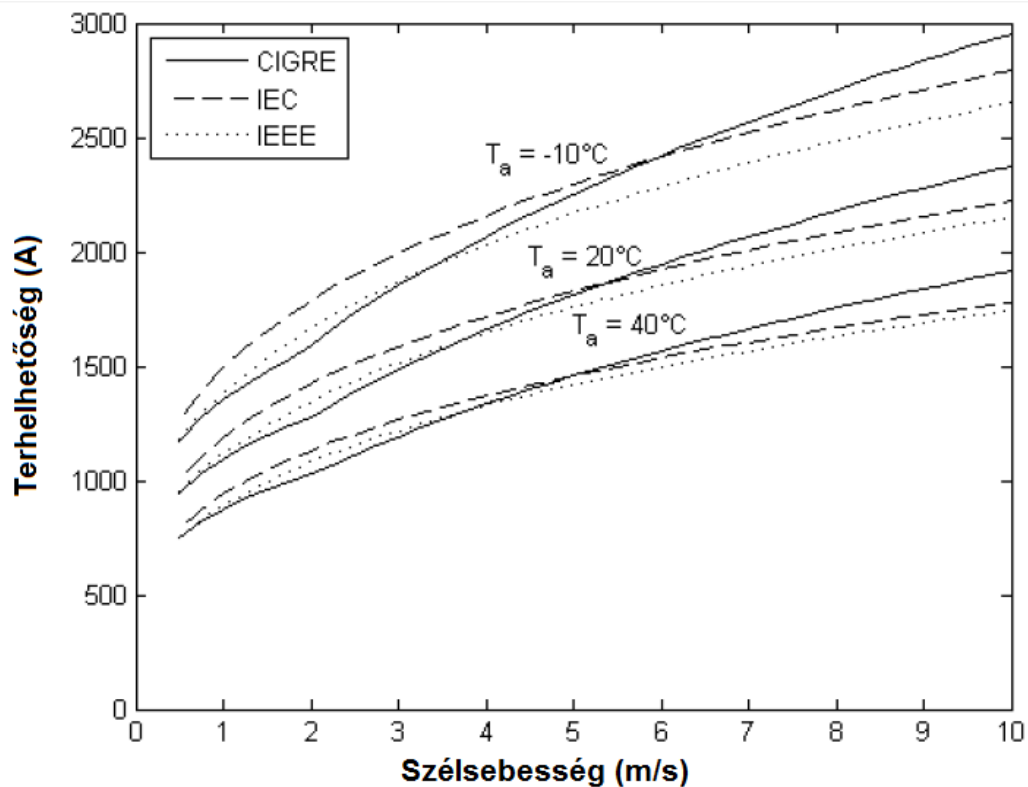
A részadatok vizsgálatánál jól látszik, hogy a saját modell által számított sugárzási és napsugárzásból származó teljesítményértékek minimális mértékben térnek el a Cigré-féle modell által számolt ilyen eredményektől.

Ahol számottevő eltérés jelentkezik az egyes modellek között, az a konvektív teljesítményáramlás. A konvektív teljesítményáramlás számítási módja a saját modellnél teljes mértékben eltér a Cigré által javasolt számítási módszerektől. Ennek oka, hogy a saját modellnél a konvektív teljesítményáramlásra vonatkozó számításokat az IEEE 738-as szabvány alapján valósítottam meg.

A különböző szakirodalmak szerint a két modell között a konvektív hűtő hatásban jelentkezik a legnagyobb különbség. Az IEEE által javasolt konvektív teljesítmény számítására vonatkozó összefüggések és a Cigré által javasolt, ugyanilyen célú összefüggések által szolgáltatott eredmények, különösen a 2 m/s-nál alacsonyabb szélességek esetén, nem elhanyagolható mértékű eltérést mutatnak. [19]



15. ábra Az IEEE-féle és Cigré-féle konvekciós teljesítményvesztésre vonatkozó számítások különbségei [19]

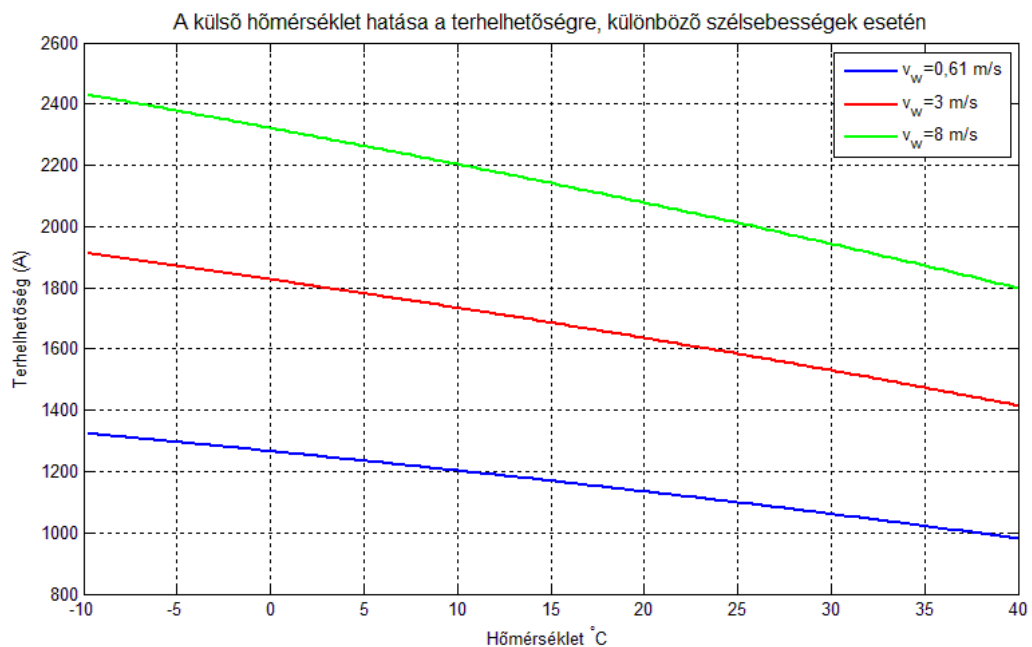


16. ábra A terhelhetőség függése a szélsebességtől különböző számítási modellek alapján, különböző külső hőmérsékletekre [20]

A konvektív teljesítményáramlás számításában tapasztalt különbségek az eredményeken is látszanak. A saját modell által szolgáltatott eredmény alulról becsülte az IEEE és a Cigré modell által számított eredményeket. Az eltérések egyik oka lehet, hogy az egyszerűsítés kedvéért a levegő minőségére vonatkozó paraméterek értékeit a saját modellben minden esetben átlagos értékre választottam, az egyes számítások során azokat nem változtattam. Nem vettem tehát figyelembe a levegő sűrűségére, hővezető képességére, nyomásra vonatkozó különbségeket, a kalkulációk során, ezen paraméterek esetén végig konstans értékekkel számoltam.

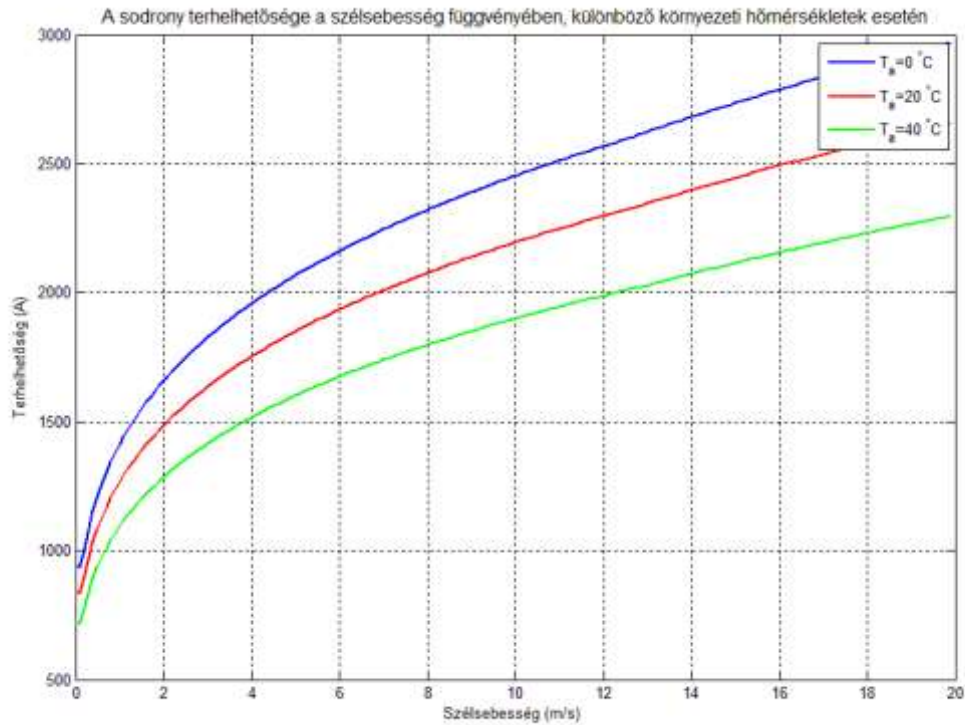
7.4 A saját modell által szolgáltatott eredmények grafikus megjelenítése és értékelése

A saját modell vizsgálata során nagy mennyiségű bemeneti adatsort generáltam, majd az adatsorokat a modell bemenetére küldve és azokat feldolgozva megvizsgáltam, hogy a saját modell milyen kimeneti értékeket produkál. A bemeneti paraméterek között a sodronyra vonatkozó adatok esetén, a „Drake” 26/7 ACSR típusú sodrony paramétereinek értékeit használtam fel.



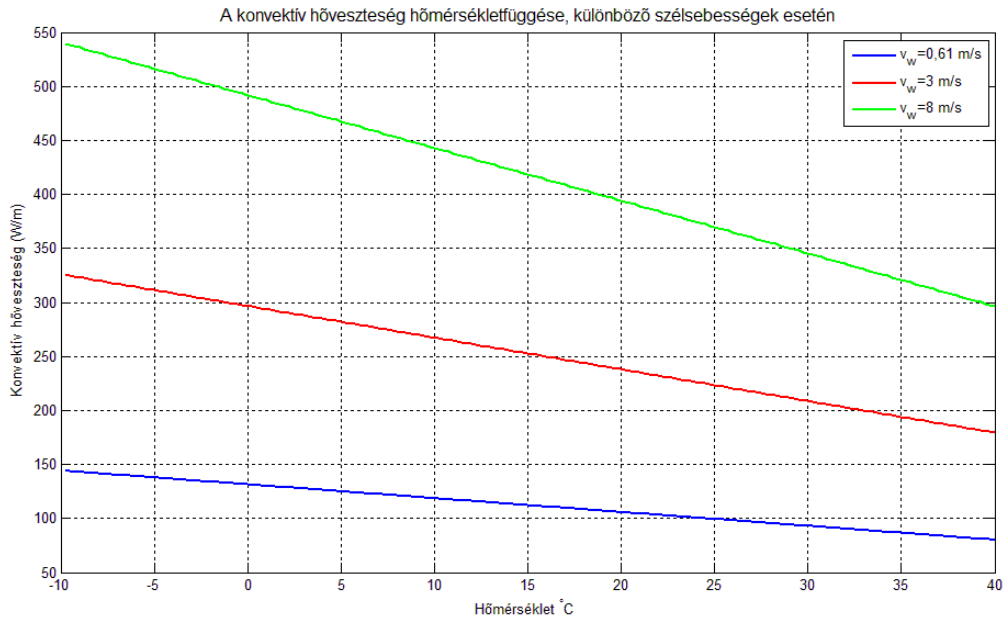
17. ábra A külső hőmérséklet hatása a terhelhetőségre, különböző szélességeknél

Az adott sodronytípus terhelhetősége alacsony hőmérsékleteken jelentősen meghaladja a statikus terhelhetőség-számítás által szolgáltatott „worst-case” eredményeket.

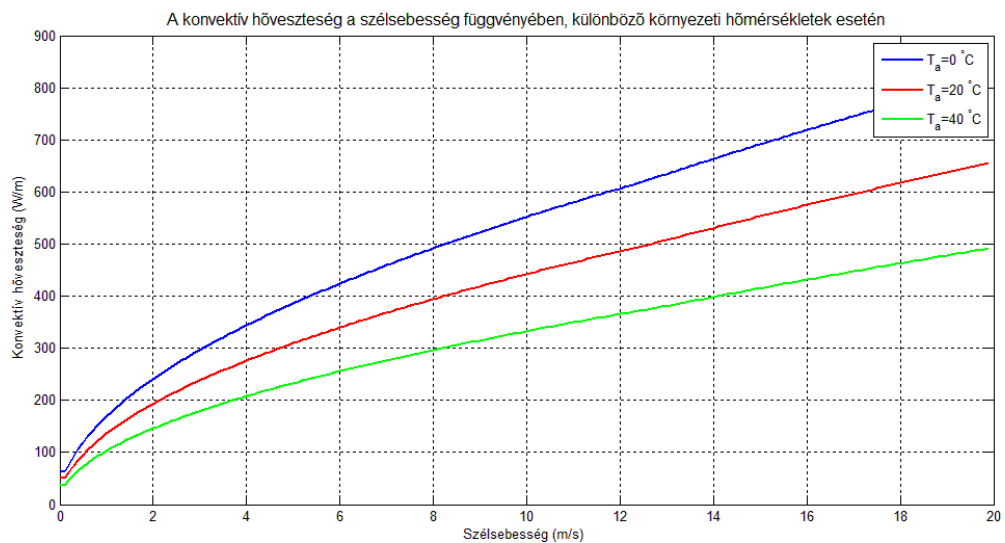


18. ábra A sodrony terhelhetősége a szélsebesség függvényében, különböző környezeti hőmérsékletek esetén

A sodronyról konvektív módon távozó hő a szélsebesség növekedésével látványosan növekszik. 4-5 m/s alatti szélsebességek esetén a szélsebességek változása jelentős eltéréseket okoz a terhelhetőségben. Az 5 m/s-nál kisebb sebességű változékony szelek a terhelhetőség becslését jelentősen megnéhezítik. A megfelelő mennyiségű mérési eredménnyel és a modell kalibrációjával az ilyen változékony körülmények hatásai is jól követhetők.

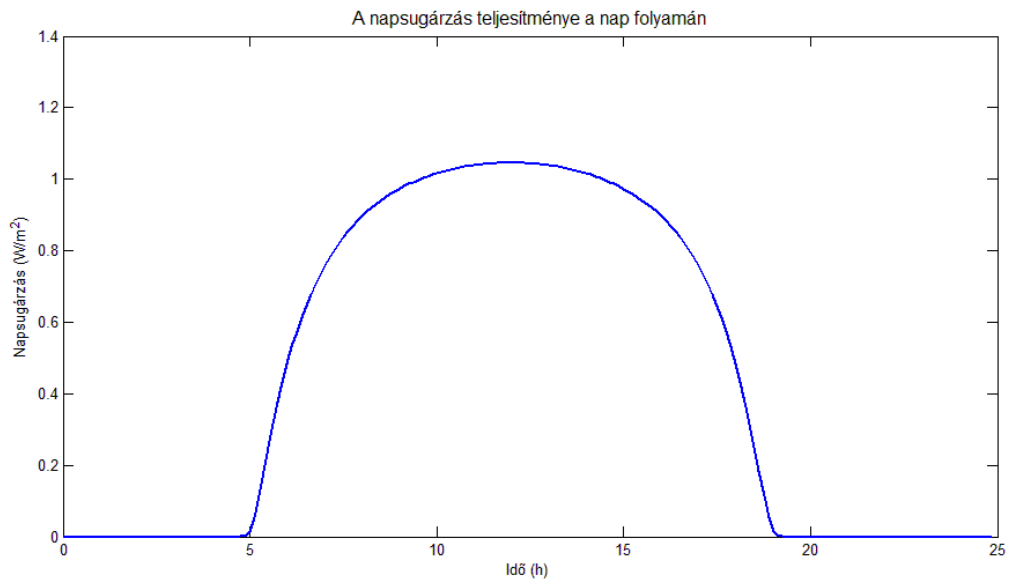


19. ábra A külső hőmérséklet hatása a konvektív hővesztésre, különböző szélsebességek esetén

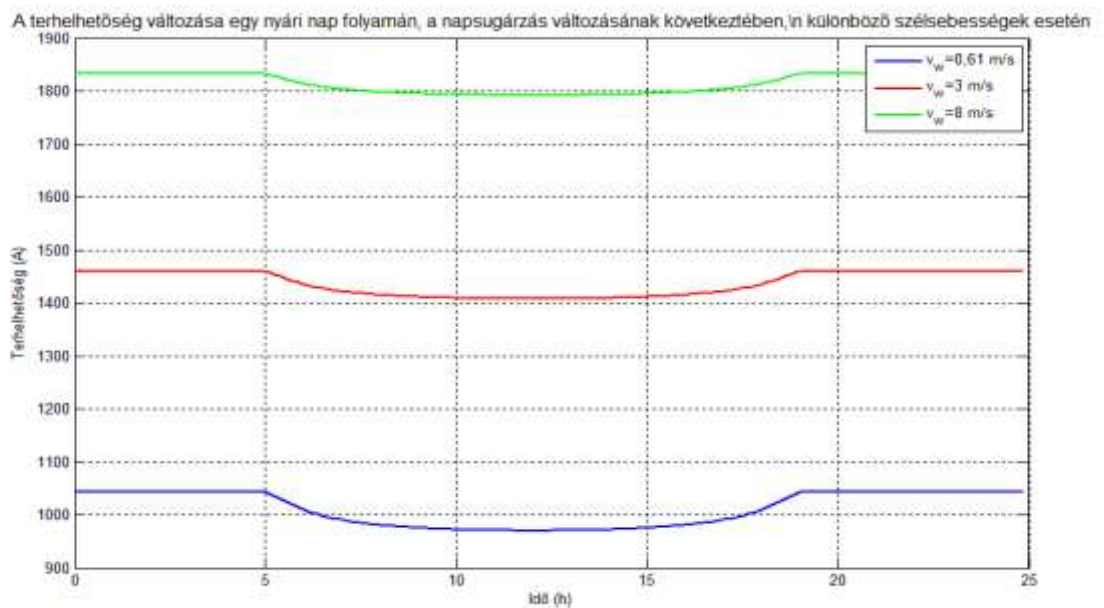


20. ábra A szélsebesség hatása a konvektív hővesztésre, különböző hőmérsékletek esetén

A konvektív teljesítményáramlás a hőmérséklet növekedésével csökken, hiszen a külső hőmérséklet növekedésével csökken a vezeték legnagyobb megengedett hőmérséklete és a külső hőmérséklet közötti különbség. A szélsebesség növekedésével viszont a konvektív teljesítményáramlás is egyre intenzívebbé válik.



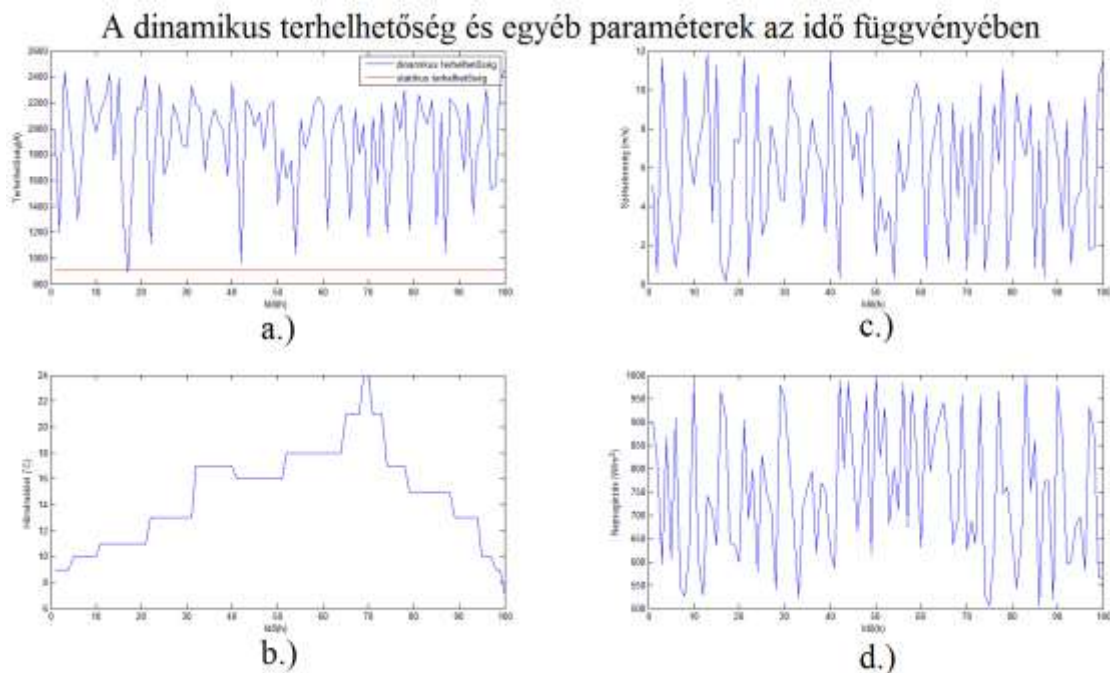
21. ábra A napsugárzás teljesítményének eloszlása egy augusztusi napon, a 47. szélességi fokon [13]



22. ábra A napsugárzás hatása a terhelhetőségre adott napon

A napsugárzás teljesítményének napi eloszlása módosítja ugyan a terhelhetőséget, de annak hatása a konvektív teljesítményáramláshoz, és a külső hőmérséklet hatásához képest kisebb. A napi napsugárzási adatokat a 47. szélességi fokra, egy augusztusi napra adtam meg. A külső hőmérsékletet a napsugárzás hatásának vizsgálatánál konstans 40 °C-ra állítottam be. A saját modell által szolgáltatott

eredmények jellegre helyesek, a szakirodalomban megtalálható eredményekkel összeegyeztethetők.



23. ábra A dinamikus terhelhetőség (a) és egyéb paraméterek az idő függvényében

A saját modell vizsgálatának utolsó lépéseként olyan adatsorokat generáltam, amelyek az időben változó környezeti paraméterek szimulálták. A generált adatsorokat a modell segítségével feldolgoztam, és megkaptam a terhelhetőség értékét az idő függvényében (22/a. ábra). Az 22. ábra a.) részén a dinamikus terhelhetőség és a statikus terhelhetőség is szerepel. A statikus terhelhetőséget 40 °C-os környezeti hőmérsékletre, 980 W/m² és 0 m/s-os szélsebességre kalkuláltam. A dinamikus terhelhetőséget a 22. ábra b.) c.) és d.) grafikonjain látható hőmérsékleti, széljárási és napsugárzási adatok függvényében számítottam.

A saját modellem által szolgáltatott eredmények alapján is látható, hogy a statikus terhelhetőség az idő nagy részében kisebb értékű mint a dinamikus terhelhetőség mindenkori értékei.

A modell tesztelése során azért használtam saját magam által generált adatsorokat, mert nem álltak rendelkezésemre valós mérési adatok.

7.5 A fizikai modellen túlmutató modellezési eljárások szükségessége

A fizikai modell, a fizikai modell által használt összefüggésekben nem szerepelnek a matematikai statisztika eszközei. A fizikai modell alapvetően mellőzi a statisztikai jelenségek hatásainak figyelembe vételét, és nem képes az egyes mérési pontatlanságok kezelésére sem. A valóságban, a konkrét mérési adatok ismeretében kijelenthető, hogy szükség van a fizikai modell újragondolására, és különböző matematikai módszerekkel annak továbbfejlesztésére. A fizikai modellezés gyengeségeire lehet megoldás a korábbi fejezetekben említett statisztikai modellek készítése, vagy a különböző mesterséges intelligenciát is használó rendszer kidolgozása.

8 Összefoglalás, további tervek

A dinamikus távvezeték terhelhetőség viszonylag új témakörnek számít a világ számos országában. A módszer segítségével lehetőség nyílik a korábban telepített távvezeték hálózatok hatékonyabb üzemeltetése, az azokban rejlő, még kiaknázatlan tartalékok felhasználására. Jelenleg a szakirodalomban fellelhető, a távvezetékek terhelhetőségének növelését célzó elméleti, fizikai alapok megfelelő iránymutatást adnak a terhelhetőség növelést érintő kérdésekben. Látható, hogy a dinamikus terhelhetőségi modell megalkotása a modellt befolyásoló fizikai paramétereken és az ezek között fennálló összefüggéseken alapul. Nem szabad ugyanakkor elfelejteni, hogy pusztán a fizikai modell felállítása még nem elegendő, az első lépést mindenképpen a különböző terepi mérések elvégzése jelentené a dinamikus terhelhetőségi modellek további kutatásában. Megfelelő mennyiségű és minőségű adattal ugyanis létrehozható egy olyan intelligens rendszer, amely távvezeték-re szabottan képes meghatározni, előre jelezni annak dinamikus terhelhetőségét.

A dinamikus távvezeték terhelhetőséggel kapcsolatos további terveim között szerepel a modellezési eljárások további, mélyebb vizsgálata, hosszabb távon pedig egy intelligens terhelhetőség-becslő program létrehozása. A különböző modellezési eljárások pontosabb összehasonlításán keresztül, az eredmények elemzésével kialakítható egy univerzálisan használható szoftver amely képes a mindenkori körülményektől függően, viszonylag nagy pontossággal, terhelhetőségi értékeket becsülni.

9 Irodalomjegyzék

- [1]: ICSM – Overhead Line Monitoring, For Maximum Power-Throughput and Highly Effective Planning, Siemens AG 2009
- [2]: CIGRÉ/IEEE Guide for Selection of Weather Parameters for Bare Overhead Conductor Ratings Summary Tapani O. Seppa, The Valley Group, Inc., USA, NETG Spring Meeting 2006
- [3]: IEEE Standard for Calculating the Current-Temperature of Bare Overhead Conductors, IEEE Std 738™-2006(Revision of IEEE Std 738-1993), IEEE 3 Park Avenue New York, NY 10016-5997, USA 30. January 2007.
- [4]: CIGRÉ - Thermal behaviour of overhead conductors, 2002
- [5]: The Overhead Line Sag Dependence on Weather Parameters and LineCurrent, Elisabeth Lindberg, UPTEC W11 017 Examensarbete 30 hp, December 2011.
- [6]: The thermal rating of overhead-line conductors Part I. The steady state thermal model, Morgan, V.T., (1982). Electric power systems research, 5 119-139
- [7]: Stretching Transmission Line Capabilities – A Transpower Investigation Jitesh Raniga*, BE, Grad.IPENZ Ramesh K. Rayudu**, BE, ME, TM.IPENZ
- [8]: Sag-tension Calculations, A tutorial Developed for IEEE TP&C Line Design Subcommittee, Dale Douglass June 2005
- [9]: Ampacimon, Overhead Line Monitoring, Brochure, March 2011
- [10]: CIGRÉ/IEEE Guide for Selection of Weather Parameters for Bare Overhead Conductor Ratings Summary Tapani O. Seppa, The Valley Group, Inc., USA
- [11]: Modelling and Prediction Techniques for Dynamic Overhead Line Rating J. Fu, Student Member, IEEE, D. J. Morrow, Member, IEEE, and S. M. Abdelkader, Member, IEEE
- [12]: Conductors for the Uprating of Overhead Lines Cigré Working Group B2.12 “Conductors for the Uprating of Overhead Lines”, 1 Nov., 2003

- [13]: Napi napsugárzási adatok, 2013. október 23.
<http://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/calculation-of-solar-insolation>
- [14]: Product Catalog – ACSR (Aluminum Conductor, Steel Reinforced)
 Avenida Francisco de Miranda, Edif. Parque Cristal, Torre Oeste Los Palos Grandes – Caracas 1062 - Venezuela
- [15]: Rocky Mountain Power Clinic: Dynamic Line Rating Shayan Barzegari, Skyler Kershner, Trevor Nichols, Zhao Qi, and Benjamin P. Sondelski, Students, University of Utah
- [16]: Numerical study of the thermal behaviour of bare overhead conductors in electrical power lines F. ÁLVAREZ GÓMEZ(1), J.M. GARCÍA DE MARÍA(2), D. GARCÍA PUERTAS(1), A. BAÏRI(3), R. GRANIZO ARRABÉ(1) (1)Department of Electrical Engineering, (2) Department of Applied Physics E.U.I.T. Industrial, Universidad Politécnica de Madrid Ronda de Valencia 3 - 28012, Madrid SPAIN (3) Laboratoire de Thermique Interfaces Environnement Département Génie Thermique et Energie; LTIE-GTE EA 4415 Université Paris Ouest. 50, Rue de Sèvres, F-92410 Ville d'Avray FRANCE
- [17]: The Thermal Rating of Overhead-Line Conductors Part II. A Sensitivity Analysis of the Parameters in the Steady-State Thermal Model V. T. MORGAN CSIRO Division of Applied Physics, Sydney, 2070 (Australia) (Received June 10, 1983)
- [18]: Comparative analysis of dynamic line rating models and feasibility to minimise energy losses in wind rich power networks Mathew Simms, Lasantha Meegahapola University of Wollongong, 2013
- [19]: Nagyfeszültségű távvezetékek termikus terhelhetőségének dinamikus meghatározása az okos hálózat eszközeivel, Tárczy Péter, Energin Kft. Okos hálózat, okos mérés konferencia, 2012. március 21.
- [20]: Smart Energy Transmission: Dynamic Thermal Rating Michael Strobach, Ueli Straumann and Christian M. Franck
- [21]: Risk Analysis in Dynamic Thermal Overhead Line Rating, Edward Siwy, 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems KTH, Stockholm, Sweden, June 2006

[22]: Limitations of the ruling span method for overhead line conductors at high operating Temperatures, Motlis, Y. Barrett, J.S. ; Davidson, G.A. ; Douglass, D.A. ; Hall, P.A. ; Reding, J.L. ; Seppa, T.O. ; Thrash, F.R., Jr. ; White, H.B. Power Delivery, IEEE Transactions on (Volume:14 , Issue: 2) Apr 1999