



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
VET Tanszék

Balogh Dániel

**KISFESZÜLTSGŰ
ELOSZTÓHÁLÓZATI KÁBEL
ÁLLAPOTÉRTÉKELŐ RENDSZER
FEJLESZTÉSE**

Tudományos Diákköri Konferencia dolgozat

KONZULENS

Dr. Cselkó Richárd

BUDAPEST, 2021

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	4
Abstract.....	5
1 Bevezetés	6
2 Kábelek élettartama	8
2.1 Külső sértés.....	9
2.2 Öregedés	9
2.3 Túlterhelés, túlfeszültség	10
2.4 Részleges kisülések.....	10
2.5 Gyártási hibák	10
3 EV és PV fogyasztók megjelenése.....	11
3.1 Elektromos autók	11
3.1.1 Smart töltőállomások	12
3.1.2 Energiatárolók.....	12
3.1.3 V2G technológia	12
3.2 Napelemek	13
3.3 Megoldások és fejlesztési irányok	13
4 Kiszűrésű kábelek fenntartása és üzemeltetése	14
4.1 Üzembehelyezés	14
4.2 Üzemeltetési feladatok.....	14
5 Diagnosztikai eljárások és módszerek kiszűrésűn	16
5.1 Szigetelési ellenállás mérése.....	17
5.2 Terheléses tesztek	17
5.3 Részkiülés mérés	17
5.4 Pneumatikus mérés	18
5.5 TDR	19
5.6 Statisztikai elemzés, kockázat értékelés	20
6 Algoritmusok.....	21
6.1 Kábelfektetési módok értékelése	21
6.1.1 Az algoritmus részletes leírása	22
6.1.2 Weibull-eloszláson alapuló hiba előrejelzés.....	33
6.2 Kábel állapotértékelése	34

6.2.1 Cél.....	34
6.2.2 Algoritmus leírás.....	34
6.2.3 Kiindulási adatok és kimenetek	40
7 Továbbfejlesztési lehetőségek	42
7.1 PV	42
7.2 Felhasználói felület	42
7.3 Terhelés profil módosítása.....	42
8 Irodalomjegyzék.....	43
9 Ábrajegyzék.....	45
10 Táblázatjegyzék	46

Összefoglaló

A villamosenergia-elosztó hálózat üzemeltetői számos kihívással néznek szembe napjainkban. A jelenlegi hálózatot alkotó eszközök jelentős részéről elmondható, hogy tervezett élettartamuk végéhez közelednek és félő, hogy feladatuk hamarosan nem fogják tudni biztonságosan ellátni. Ugyanakkor mivel működésük során mind a mechanikai, mind a villamos hatások eltérőek lehetnek, az egyes eszközök állapota különbözhet. Erre alapozva és gazdasági szempontokat figyelembe véve a hálózatrészeket sokszor tervezett élettartamukon túl is szeretnénk üzemeltetni. Ez azonban csak olyan eszközök esetén javasolt, ahol diagnosztikai eljárásokkal igazoltuk, hogy a kábel még biztonságosan üzemben tartható. További kihívást jelenthet, hogy az egyre növekvő energiaigény miatt szükségessé válhat az elosztó hálózat bővítése, illetve új típusú fogyasztók is megjelenhetnek rajta, amelyek tovább ronthatják a megbízhatóságot. Különösen igaz ez a kisfeszültségű hálózatrészre, ahol az eszközök kisebb tartalékkal vannak tervezve.

A kisfeszültségű hálózatot számos eszköz alkotja. Áthatóbb vizsgálat természetesen minden eszköz esetében ajánlott, de munkám során elsősorban a földalatti kábelekkel foglalkoztam. A választásom azért esett rájuk, mert diagnosztikai módszereik a közép- és nagyfeszültségű szintekhez képest elmaradottnak mondhatók és a szakirodalom is kevésbé foglalkozik a témával.

Munkámban általános képet adok a kisfeszültségű kábelek jelenlegi üzemeltetési stratégiáiról és a felmerülő problémákról. Emellett röviden beszámolok a lehetséges diagnosztikai módszerekről és kutatási irányokról. Ezután elkészítetek egy algoritmust, ami képes a kábelek adatai és mérhető paraméterei alapján azok állapotát jellemezni. Az algoritmus működésére azt tekintetem kikötésnek, hogy tudja kezelni az adatok hiányát. Erre azért van szükség, mert előzetes kutatások alapján várható, hogy sok, a számoláshoz használt adat nem áll majd rendelkezésre. Az algoritmus további irányelve, hogy az eredményeket olyan formában kapjam meg, hogy azok könnyen összehasonlíthatók legyenek egymással. Ezáltal azok mindenképpen felhasználhatók lesznek legalább a fontossági sorrend felállítása erejéig. Végül pedig az eredmények értékelésével és a rendszer továbbfejlesztési lehetőségeivel zárom a dolgozatot.

Abstract

Distribution grid operators face various challenges today. In general, many of the assets that make up the current grid are approaching the end of their design lifetime and it is feared that they will soon be unable to perform their tasks safely. At the same time, as they are subject to different mechanical and electrical stresses during their operation, the condition of each device may differ. On this basis, and taking into account economic considerations, we often aim to operate parts of the grid beyond their design lifetime. However, this is only recommended for devices where diagnostic procedures have demonstrated that the cable can still be safely operated. Further challenges may be the need to expand the distribution grid to meet increasing energy demand, and the introduction of new types of consumers that may make the grid even less reliable. This is particularly true for the low-voltage part of the grid, where equipment are designed with lower margins.

The low-voltage grid is made up of a large number of devices. A detailed analysis is recommended for all types of devices, but my work is focused on underground cables. I have chosen this topic because low-voltage cable diagnostic methods are immature compared to medium and high voltage levels and the literature on them is scarce.

In my work I will give a general overview of the current operating strategies related to low-voltage cables and the problems associated with them. I will also briefly discuss possible diagnostic methods and research directions. I will then develop an algorithm that is able to characterize the condition of cables based on their data and measurable parameters. The algorithm's operation is constrained to be able to handle the lack of data. This is necessary because, based on preliminary research, it is expected that much of the data used for the calculation will not be available. A further guideline for the algorithm is to obtain the results in a form that can be easily compared with each other. In this way, they will be usable at least to the extent of prioritisation. Finally, I conclude my thesis with an evaluation of the results and the possibilities for further development of the system.

1 Bevezetés

Az eszközgazdálkodás a villamos energia szolgáltatás esetében azokat a döntéseket jelenti, amiket egy szolgáltatónak meg kell hoznia, hogy a hálózat az idő minél nagyobb hányadában üzemben tartható legyen a karbantartási költségek optimalizálása és a biztonságos üzemeltetés mellett. Jelen dolgozatban a kisméretű kábelek üzemeltetését vizsgálom és célom egy olyan rendszer fejlesztése, amely adatelemzésen alapul és képes megkönnyíteni a szolgáltatói döntések meghozatalát.

Az elosztó hálózat fontos részét képezik a kisméretű földalatti kábelek, melyek 231/400 V-on üzemelnek, a KÖF/KIF transzformátortól indulnak és a fogyasztóknál végződnek. Ezen kábelekre jellemző, hogy eszközgazdálkodás terén a közép-, vagy nagyfeszültségű kábelekéhez képest elmaradottok, ugyanis nincs olyan eszköz, amivel a kábelek állapota gazdaságosan és kellő mértékben felmérhető lenne. Ebből következik, hogy a kezdődő hibák nem kerülnek időben detektálásra és a jövőben a kábelek váratlanul üzemképtelenné válhatnak, így a hozzájuk csatlakozó fogyasztók energia ellátása ideiglenesen megszűnhet.

Egy üzemképtelenné vált kábel esetén az ahhoz csatlakozó fogyasztók nem jutnak villamos energiához. Természetesen ez a fogyasztóknak közvetlen problémát jelent, de ugyanakkor ez a szolgáltatóknak is problémát jelent, hisz a kiesés ideje alatt nem profitálnak a kiesett fogyasztókból, valamint a szolgáltatás minőségére vonatkozó követelmények nem teljesítése esetén pénzbeli bírságokkal kell számolniuk. Ilyen minőségi előírásra vonatkozó mutatók például a feszültség kimaradás átlagos gyakorisága (SAIFI), a feszültség kimaradás átlagos időtartama (SAIDI), a feszültség kimaradás átlagos időtartama az érintett fogyasztóknál (CAIDI), illetve a rövid idejű feszültség kimaradás átlagos gyakorisága (MAIFI). Továbbá a meghibásodott kábelt ki is kell cserélni, ami további költségeket jelent, mint például az új alkatrész/eszköz költsége, üzemanyag költségek (alvállalkozók esetén szállítási költségek), illetve városi környezetben egy kábel cseréje gyakran az útburkolat megbontásával is jár, ami már csak abból a szempontból sem kedvező, hogy zavarja a forgalmat.

A fentebb említett problémák és szolgáltatói költségek minimalizálásának érdekében, tehát fontos csökkenteni a váratlanul bekövetkező kiesések számát. Mindazonáltal a váratlanul bekövetkező kiesések teljes elkerülése lehetetlen, hiszen

vannak előre nem jelezhető hibák. Míg az előre nem jelezhető hibák nagyrésze külső sértésből származik, addig egy kábel villamos vagy mechanikai öregedéséből bekövetkező hiba előre jelezhető, így meg is előzhető. A megelőzéshez azonban tisztában kell lenni a kábelek állapotával, hogy a kábelek esetleges javítása vagy cseréje valóban egy költség effektív megoldás legyen. Tehát a kábeleket ne idő előtt cseréljük, de ne is veszélyeztessük a hálózatot olyan kábelek üzemeltetésével amiknek, mechanikai és elektromos tulajdonságai már nem megfelelőek.

Közép- és nagyfeszültségen sokat fejlődött a kábeldiagnosztika, így időszerűvé vált, hogy a kisfeszültségen is növeljük a kábelek megbízhatóságát, ugyanis jelenleg a kisfeszültségű kábelek a hálózat leggyengébb láncszemei. Az elosztó hálózat felépítéséből következik, hogy egy kisfeszültségű kábel üzemképtelenné válása következtében kevesebb fogyasztó esik ki, mint egy közép- vagy nagyfeszültségű kábel kiesése következtében, így érthető, hogy eddig a kábel diagnosztika kisfeszültségen háttérbe szorult. Ugyanakkor számszerűen a hibák legnagyobb hányada a kisfeszültségű hálózaton következik be. Emellett arra számítunk, hogy ez a szám tovább fog nőni a nagyszámban terjedő elektromos autók és megújuló energiatermelők megjelenésének következtében. A dolgozat első sorban nem az új típusú fogyasztók mélyre menőbb elemzéséről szól, de hatásuk nagyban befolyásolja az elosztó hálózat eszközeinek élettartamát köztük a kisfeszültségű kábeleket is, ezért röviden bemutatásra kerülnek majd.

A dolgozatban a kábelek állapotát befolyásoló tényezőket illetve azok meghatározására irányuló módszereket, stratégiákat és technológiákat röviden összefoglalom. Továbbá bemutatásra kerül két saját algoritmus is, melyek közül az egyik a kábelfektetési módok közüli választást könnyíti meg, valamint termikus paraméterek alapján képes várható élettartamot számolni. A másik algoritmus pedig a kábelek általános állapotának becslését teszi lehetővé. Ebben az esetben Fuzzy típusú logikát alkalmazunk, így a kimenet minden esetben egy szám lesz (a $[0; 1]$ tartományban) a különböző értékelési kategóriákban. A kimenetek értelmezését egyértelművé teszem, így gyorsan megállapítható, hogy a kábel állapota megfelelő-e, avagy szükség van üzemeltetői beavatkozásra. Az algoritmusok eredményei könnyen összehasonlíthatók egymással, így könnyen kialakítható fontossági sorrend a kábelek üzemeltetésével járó feladatok között.

2 Kábelek élettartama

A kábelhálózatok tervezése és üzemeltetése során egyik legfontosabb kérdés, hogy meddig lesz megfelelő az eszköz. Egy kábel élettartama az előírások alapján addig tart, amíg a kiválasztott jellemzőjének értéke a rá vonatkozó kritikus értéket nem lépi túl. Ezzel az értékkel biztosítjuk azt, hogy a kábel biztonságos üzemben működik, és veszteségei nem haladják meg az elfogadhatót. Ilyen jellemző lehet például az átütési szilárdság, a szigetelési ellenállás, vagy a veszteségi tényező ($\tan(\delta)$). A kábelek élettartama nagyban függ a szerkezetüktől, az anyagaiktól, az üzemi körülményeiktől és gyártási eltéréseiktől, így pontos élettartamot nem lehet mondani, de mégis szükség van egy körülbelüli értékre.

A kábelek legkritikusabb része a szigetelés. A szigeteléseket alá lehet vetni öregítési vizsgálatoknak, amik segítségével kaphatunk egy az anyagra vonatkozó várható élettartamot. Amennyiben ismerjük egy folyamat során a hőmérsékletet, az anyagra jellemző aktivációs energiát és a preexponenciális tényezőt, akkor az Arrhenius-egyenlet segítségével számolható reakciósebesség, mely segítségével számolható várható élettartam. Az így kapott élettartamok azonban csak meghatározott körülmények közt tekinthetők irányadónak. Tehát amennyiben a kábel üzeme alatt a körülmények változnak, a várható élettartama is csökken, vagy kedvező esetben akár nőhet is.

Kisfeszültségen a kábelek üzemi feszültsége sokkal kisebb, szigetelésük vastagsága pedig arányaiban jelentősen nagyobb, mint közép- és nagy feszültségen. Élettartamukat tehát kevésbé befolyásolja a villamos erőtér, ebből következően nem jellemző a kábelekre a részkisülések jelensége, az elnedvesedés és a „Treeing” jelenség sem, melyek középfeszültségen gyakran okoznak hibákat. Ezért a kábeleket inkább a mechanikai terhelésekre tervezik, ennek ellenére tönkremenetelüket elsősorban külső sértések okozzák. Viszont feltételezve, hogy a kábelt nem fogja külső sérülés érni, akkor az elsődleges veszélyforrást a szigetelés termikus előregedése, a kémia szennyeződések, a túlterhelések és esetleges gyártási hibák okozzák. Az alábbiakban röviden ismertetem a kábel élettartamát legnagyobb mértékben befolyásoló jelenségeket.[1]

2.1 Külső sértés

Kisfeszültségű kábelek esetén a leggyakoribb hiba a külső sértésből eredő hibák csoportja. Fellépésük nem előre jósolható, mert forrásuk sok esetben emberi tevékenység, például földmunkálatok során markolóval véletlen átvágnak egy kábelt. Ebben az esetben a probléma sokszor azonnal jelentkezik, azonban ha csak kisebb sérülés éri a kábel burkolatát, akkor lehetséges, hogy a kábel üzemképes marad, tehát nem lép fel azonnali kiesés, de a későbbiekben itt könnyebben történhet átütés a kábelen. Ezért azokban az esetekben, ha a kábelek közelében a kábelekre veszélyes munkálatokat végeznek, akkor felügyelni kellene a folyamatot és a felszínre kerülő kábeleket minden esetben ellenőrizni és sérülés esetén javítani vagy cserélni kell, így nem kell rövid idő elteltével újra kiásni a kábelszakaszt, amikor az átüt és zártos lesz. A földmunkálatok mellett problémát okozhatnak a fák gyökerei is, illetve a nagyobb mechanikai igénybevétel, ami származhat például forgalmas utaktól vagy a vasút közelségétől. Az ilyen jellegű veszélyforrásokat már a kábelfektetés során azonosítani kell és a kábeleket további mechanikai védelemmel ellátni. Ilyen védelem lehet például az, hogy közvetlen földbe fektetés helyett védőcsőbe fektetik a kábeleket. Nagyobb mechanikai védelem nem csak a kábelt fogja védeni az esetleges sérülésektől, hanem az emberi életet is abban az esetben, ha valaki közel kerülne a kábelhez. [2][3]

2.2 Öregedés

Míg nagy- és közép feszültségen a kábelek tönkremenetelét számos belső változás okozhatja, addig kisfeszültségű kábelek esetén a hibákat ritkán okozza más, mint külső sértés. A kábelek szigetelőanyaga viszont öregszik, ezért előbb-utóbb tönkre fognak menni azok a kábelek is, amiket nem ért külső sértés. Öregedés alatt azt a folyamatot értjük, ahol a kábel fizikai- és villamos jellemzői az idő előrehaladtával folyamatosan romlanak, ezt a folyamatot kisfeszültségen termikus és mechanikai jelenségek okozzák. Termikus hatás az, hogy kábeleken a veszteségek hőformájába jelennek meg, valamint a hő származhat a környezetből, vagy egyéb a kábel közelében található hőforrásból, például egy másik kábel hőforrásnak tekinthető. A szerves szigetelőanyagok öregedésének sebessége folyamatosan nő a hőmérséklet növekedésével. Mechanikai megterhelés származhat például közeli vasutak által keltett rezgésektől vagy a forgalmas utaktól.

2.3 Túlterhelés, túlfeszültség

A kábeleket adott feszültségre és áram kapacitásra tervezik, amennyiben ezeket túllépjük, a kábel élettartama drasztikus mértékben csökken, de akár azonnali tönkremenetel is bekövetkezhet. Ez tekinthető lehetne az öregedés egy formájának, de az itt lejátszódó folyamatok sokkal gyorsabbak. Itt már megjelenhetnek a villamos jelenségek hatása is. Ugyanis, ha a feszültség túllépése akár rövid időre is, de jelentősen túllépi a névleges értéket akkor a szigetelőanyag átütési szilárdsága nem lesz elég nagy és átütés következhet be, ami zárlatot okoz. Amennyiben az áram értékünk túl nagy a kábel nagyon gyorsan melegszik, ez egyben azt is jelenti, hogy termikus öregedése nagymértékben felgyorsul, illetve ha a hőmérséklete meghaladja a szigetelőanyag hőállóságát, akkor az végleg üzemképtelenné válhat.

2.4 Részleges kisülések

A részleges kisülések jelenléte nem jellemző kiefeszültségű kábelekre üzemi körülmények mellett, de a kábelek próbafeszültségén mellett már megjelennek, ezért röviden megemlítjük ezt a lehetőséget is.

Az inhomogén erőtér következtében létrejövő részleges kisülések nem ütnek át a szigetelőanyagot, de állandó jelenlétük kémiai és fizikai hatásai roncsolják azt. Ha a probléma huzamosabb ideig fennál, akkor okozhatja a szigetelőanyag teljes átütését, ami esetünkben a kábel tönkremenetelét is jelenti egyben. Típus szerint lehet koronakisülés, belső (üreg) kisülés, vagy felületi (kúszó) kisülés. Roncsolóhatásuk függ intenzitásuktól, típusuktól és fellépésük helyétől. Fontos, hogy jelenlétük időben detektálásra kerüljön, lehetőleg üzemi körülmények között, hogy a hiba forrása megállapítható legyen. [2]

2.5 Gyártási hibák

A hibásan legyártott eszközök sok problémát okoznak a szolgáltatóknak, mert a legtöbb esetben nem bírják ki az üzemi körülményeket hosszútávon és hamar cserélni kell őket. A cseréhez viszont fel kell tárnunk a kábeleket nem sokkal azután, hogy telepítve lettek. A hibás kábeleket szemrevételezéssel, valamint a kábelfektetés után, de még az üzembe helyezés előtt végzett folytonossági mérésekkel és terheléses tesztekkel lehet szűrni. Sajnos a hiba a legtöbb esetben nem vehető észre és csak az üzembe helyezés utáni pár hétben/hónapban fog kiderülni, amikor a kábel meghibásodik.

3 EV és PV fogyasztók megjelenése

Az előző fejezetben tárgyalt jelenségekhez hasonlóan az elektromos autóknak (Electric Vehicles – EVs) és a napelemeknek (Photovoltaics – PVs) is van a kábel élettartamára negatívan ható tényezője, ami a kábelek öregedésének felgyorsulásában jelenik meg. Én mégis egy külön fejezetben fejtem ki őket, a téma aktualitása és összetettsége miatt.

Az egyre jobban terjedő és egyre nagyobb támogatással rendelkező megújuló és környezetbarát technológiák közül jelenleg a kisfeszültségű hálózat üzemére a legnagyobb hatást az elektromos autók töltése és a napelemek terhelése jelenti. Ezek a technológiák a magánszemélyek számára is elérhetőek és népszerűségük egyre nő, így egyre nagyobb számban vannak jelen. A két említett technológia kétségkívül bolygónk védelmét szolgálja, mindazonáltal a nagymértékű adaptációjuk új kihívások elé állítja az energiaszolgáltatókat.

3.1 Elektromos autók

Az elektromos autók töltésének nagy hatása van a hálózatra nézve. Egyrészt nagymértékű alkalmazása instabillá teheti a hálózat feszültségét. Másrészt nagy terhelést jelent a hálózat számára, ami rövidtávon és hosszú távon is problémákat okozhat. Rövidtávon, ami talán a nagyobbik problémát jelenti az az, hogy a napi csúcsterhelés idején (jellemzően este 6-7 óra környékén, amikor az emberek hazaérnek a munkából) jelentkező nagy hálózati terhelést tovább növeli az EV-k töltése. Az így a hálózaton folyó áramok már sok esetben túlmelegedéssel fenyegethetik a kisfeszültségű kábeleket, ez különös igaz a fogyasztókhoz közel. A hosszútávú probléma, míg talán nem olyan súlyos, de a kábelek általános hőmérsékletének növekedéséből következik. Az általános növekedés azért nem olyan jelentős, mert az öregedés mértéke nem egyenes arányosságban áll a kábel hőmérsékletével, így még egy PVC kábel élettartama 50°C-on 1066 év, addig 60°C-on 179 év és 70°C-on már csak 40 év (természetes ezek számok csak akkor érvényesek, ha csak a termikus hatásokat vesszük figyelembe). Harmadrészt a töltőállomások átalakítójára jellemző, hogy a hálózatra káros hatású felharmonikusokat keltenek az AC (hálózat) – DC (akkumulátorok töltése) átalakítás során. Szerencsére a megjelenő felharmonikusok mértéke típusonként eltér és az átalakítók fejlesztésével mértékük egyre csökken. [4][5]

A nemzetközi piacon többféle töltőeszköz is rendelkezésre áll egyaránt magánhasználatú és közhasználatú alkalmazásra is. Az eltérő eszközök különböző mértékben terhelik meg a hálózatot, így a hálózatra kifejtett negatív hatásuk eltérő mértékű. A kisebb teljesítményű és kevesebb áramot fogyasztó berendezések tehát kisebb veszélyt jelentenek a hálózatra, mindazonáltal minden berendezés esetén számítani kell arra, hogy nagymértékű terjedésüket nem bírná el a hálózat. Szükséges tehát a hálózat fejlesztése és töltőállomások hálózatra kifejtett hatásának csökkentése.

3.1.1 Smart töltőállomások

A „smart” töltőállomások fejlesztése egy ígéretes technológia, mely segíthet a jövőbeli problémák elkerülésében. Célszerű megoldás lehet otthoni vagy munkahelyi töltőállomások esetében, amikor az autó huzamosabb ideig áll és nincs szükség gyors töltésre. Lényege, hogy az EV-k töltési ideje szabályozva van, így a plusz terhelés nem a napi csúcsterhelés idején fog megjelenni, helyette a nap folyamán jobban eloszlik. Ezt úgy érik el, hogy a töltőállomás információt kap a hálózat terheltségéről és csak akkor fogja tölteni az autót, ha van szabad kapacitás, így elkerülve a túlterhelést. [4]

3.1.2 Energiatárolók

Egy másik lehetőség, hogy a töltőállomásokat villamos energiátárolókkal látják el, melyek lehetővé teszik az elektromos autók csúcsidőben való töltését a hálózat túlterhelése nélkül. Ez célszerű megoldás lehet a közhasználatú töltőállomások esetében, ahol nagyobb teljesítményű töltőket alkalmaznak. Ezt az is alátámasztja, hogy az energiátárolók méretük és költségük miatt a legtöbb esetben nem megfelelő választás magánszemélyek számára. Az energiátárolók pedig a „smart” töltőkhöz hasonlóan csak a nap azon szakaszaiban töltődnének, amikor a hálózaton elégséges szabad kapacitás áll rendelkezésre. Ilyen jellegű tárolók megoldhatják a napelemek által termelt többlett energia problémáját is. [4]

3.1.3 V2G technológia

A V2G (vehicle-to-grid) technológia lényege, hogy lehetővé teszi az energia visszatöltését az elektromos autók akkumulátoraiból a hálózatba. Ez segíthetné a hálózati energia ingadozásait kiegyenlíteni különösen az egyre terjedő nap- és szélenergiából előállított energia terjedésével. [4]

3.2 Napelemek

A napelemek jótékony hatása a hálózatra nézve akkor jelentkezik, amikor a megtermelt energiát fel is használja egy háztartás, ezzel tehermentesítve a hálózatot. Negatív hatása pedig, akkor jelentkezik, amikor a háztartások napközbeni energia felhasználása minimális és a napelemek terhelése maximális, ugyanis ilyenkor a megtermelt energiát visszatöltik a hálózatba. Mikor a napelemek terhelése elég nagy, hogy megfordítsák az energia áramlásának irányát, akkor okozhatnak instabil feszültség szinteket, túlfeszültségeket és nagyobb veszteségeket a hálózaton a normál üzemhez képest. Emellett felboríthatják a hálózat fázisainak egyensúlyát is. Ahhoz, hogy a hálózatot túlterheljék nagymennyiségben kell jelen lenniük, ami egyelőre nem jellemző és a közeljövőben nem is várható. Így a probléma egyelőre kezelhető egyszerűbb technikákkal, mint például a napelemek termelésének korlátozásával vagy a napelemek által termelt többlet energia számára beépített energiátárolókkal. [6]

3.3 Megoldások és fejlesztési irányok

Annak fényében, hogy az elektromos autók és a megújuló energiaforrásból származó energia részarányának növelése általános cél, így a fent említett problémák kiküszöbölésén folyamatosan dolgoznak. A legígéretesebb technológiákat röviden megemlítettük.

Míg az említett technológiák fejlesztés és tesztelés alatt állnak, eddigi eredményeik ígéretesek. Habár általánosságban a kutatások és a gyakorlat azt mutatja, hogy a jelenlegi hálózat még a legtöbb esetben rendelkezik elég szabad kapacitással, hogy a jelenlegi elektromos autók töltési igényét gond nélkül kielégítse, mégis figyelmeztetnek, hogy ez a jövőben nem lesz így. A legfontosabb tehát, hogy a problémák megoldására szolgáló technológiák implementálása párhuzamosan történjen az elektromos autók és a környezetbarát energiatermelők terjedésével.

4 Kisfeszültségű kábelek fenntartása és üzemeltetése

4.1 Üzembehelyezés

A kábelgyártók az általuk gyártott kábeleknek megadják a villamos és mechanikai paramétereit. Az energiaszolgáltató feladata inentől kezdve, hogy a kábeleket a megfelelő körülmények és határértékek között üzemeltesse. Ez a feladat a kábelek megvásárlásától a kábel élettartamának végéig tart.

Első idetartozó feladat a helyszínre szállítás. A helyszínre szállítás egy kritikus feladat, mely során rengeteg előírást kell betartani, ha biztosítani akarjuk, hogy az eszközöket ne érje sérülés az üzembehelyezés előtt. Az előírások azt hivatottak biztosítani, hogy a kábel ne legyen kitéve nedvességnek és ne érje őket se kémia se mechanikai sérülés. A következő lépés a kábelek fektetése, ahol előírások vonatkoznak az időjárási és fektetési körülményekre. A fektetés során szintén óvni kell a kábelt a külső sérülések fellépésétől. Miután a fektetés megtörtént, de még üzembehelyezés előtt szemrevételezni kell a szakaszt és annak folytonosságát ellenőrizni kell méréssel. Ezután célszerű terheléses teszteknek alávetni a szakaszt a gyártó által megadott próbafeszültségen. A terheléses teszt azt hivatott bizonyítani, hogy a kábel ki fogja bírni az üzemi körülményeket. Amennyiben a teszt sikeres volt a kábeleket üzembe lehet helyezni.

4.2 Üzemeltetési feladatok

A hálózat karbantartásának legalapvetőbb eleme a hibák kialakulásának megelőzése a kábelszakaszok karbantartásával. A karbantartási munkálatok az elosztórendszer rendszeres ellenőrzését és a felfedezett kezdetleges problémák javítását foglalják magukba. A kisfeszültségű kábelek folyamatos ellenőrzésének elsősorban két akadályozó tényezője van. Az egyik a hálózat nagy kiterjedése, míg a másik a kábelek földalatti elhelyezkedése. Az utóbbiból következik, hogy a rendszeres ellenőrzés leggyakrabban csak a kábelvégeken lehetséges. Az általában évenként végzett ellenőrzések a következő lépéseket foglalják magukban: [7]

- A kábelösszeköttetések és a földelések sértetlenségének és állapotának ellenőrzése.

- Kapcsolóberendezések, transzformátorok és egyéb föld feletti berendezések állapotának ellenőrzése.
- Kábelvégekről a szennyeződések letakarítása.
- Érintkezési ellenállások mérése, szigetelési ellenállás mérése a vezetők és földelők között.
- Infravörös hő vizsgálat esetén, ha a hőmérséklet megemelkedik egy összeköttetés esetén, akkor azt ki kell tisztítani majd visszahelyezni és rögzíteni.
- Földmunkálatok után a kábelvonalak ellenőrzése esetleges sérülések után kutatva.

A rendszeres karbantartás csökkenti a kábelek meghibásodásának valószínűségét, de nem teszi lehetővé a hibák kialakulásának teljes megakadályozását. A karbantartási folyamat hatékonyságát nagyban limitálja a kábelek földalatti elhelyezkedése, mert így méréseket a legtöbb esetben csak a kábelvégeken lehet végezni. Emellett a kábelek meghibásodásának nagy része külső, fizikai sértésből ered, így fellépésük a diagnosztika során vizsgált paramétereiktől független. A kábelek tehát minden óvintézkedés ellenére is könnyen meghibásodhatnak, ilyenkor a kábelt javítani/cserélni kell. Általánosságban a kábeleket cserélik, javítás csak kisebb fizikai sérülés esetén lehetséges. A meghibásodások elhárításának lépései: [7]

- A hiba helyének meghatározása. Ezt a lehető leggyorsabban és legpontosabban kell elvégezni. Ezt segíti számos diagnosztikai módszer, melyek közül több bemutatásra kerül a későbbiekben.
- Kábel javítása/cseréje, tesztelése és újra üzembe helyezése.

A kábelszakaszok cseréjét sok esetben indokolhatják gazdasági körülmények is. Ilyenkor egy szakaszt a szükségesnél hamarabb cserélnek ki, hogy ezzel hosszútávon spóroljanak. Erre lehet példa, olyan szakaszok teljes cseréje, ahol már többször történt részleges javítás, de ennek ellenére mindig újabb probléma lép fel. Szintén gazdasági megfontolásból a kábelek cseréjét össze lehet hangolni egyéb szolgáltatók (víz, gáz) felújítási munkálataival, ez különösen városi környezetben lehet előnyös, ahol a kábelek fektetéséhez szükséges az útburkolat megbontása.

5 Diagnosztikai eljárások és módszerek kiefeszültségen

A korábbiakban említésre került, hogy üzemben lévő kábelek élettartama változik az üzemi körülményektől függően, ezért aktuális állapotukat ellenőrizni kell, hogy biztonságos üzemiükről meggyőződjünk és esetleges felújítási munkálatokat előre tudjunk tervezni. A kábelek állapotának ellenőrzése történhet roncsolásos vagy roncsolásmentes diagnosztikai módszerekkel. A roncsolásos diagnosztikai módszerekkel könnyen és egyértelműen megállapíthatók a szigetelőanyagok korlátai. Közvetlenül lehet például mérni a villamos szilárdságot, ha a feszültséget addig növeljük, míg be nem következik az átütés. Azonban, ahogy nevük is sugallja, az ilyen típusú mérések roncsolják a szigetelőanyagot, ezzel csökkentve annak élettartamát. A roncsolásos tesztek, így üzemben lévő eszközök esetén elkerülendők. Roncsolásmentes diagnosztikai módszerekkel viszont nem lehet közvetlen mérni villamos szilárdságot, ami a szigetelések legfontosabb jellemzője. Közvetve viszont lehet, ez azt jelenti, hogy olyan jellemzőket mérünk, amelyekből a megfelelő szakmai tudással és kellő tapasztalattal rendelkező szakemberek következtetni tudnak a kábelek szigeteléseinek állapotára. A mérések arra épülnek, hogy a kábelek üzeme alatt a szigetelésében lefolyó kémiai- és fizikai folyamatok megváltoztatják a szigetelésük molekulaszervezetét, melynek következtében megváltoznak az anyag villamos jellemzői. Amennyiben ezeket a jellemzőket mérjük és változásuk tendenciáját figyelembe vesszük, akkor már tudunk következtetni a szigetelés állapotára. [2]

Közép- és nagyfeszültségen számos jól működő diagnosztikai módszer van, azonban ezek közül viszonylag kevés alkalmazható kiefeszültségen. Ha pedig egy módszer alkalmazható kiefeszültségen, akkor lehetséges, hogy a végeredménye nem egyértelmű vagy a mérés elvégzéséhez, a többi feszültség szinttől eltérő, speciális mérési összeállítás szükséges. Ennek okait a kábelekben kell keresni. A legnagyobb eltérés az, hogy a kiefeszültségű kábelek felépítése és szigetelésüknek anyaga eltér a közép- és nagyfeszültségű kábelekétől. Ezek az eltérések és az eltérő üzemi feszültség szint együttesen változtatják meg a kialakuló villamos jelenségeket és azok hatását a kábeleken, melyekre a diagnosztikai módszerek épülnek.

A továbbiakban bemutatásra kerül több kiefeszültségű kábeldiagnosztikára alkalmazható mérési eljárás. Fontos megjegyezni, hogy míg az eltérő diagnosztikai

módszerek eltérő mennyiségű információt hordoznak, addig a mérés elvégzéséhez és az eredmények értékeléséhez szükséges szakmai tudás is eltérő szintű. Fontos tehát, hogy a mérést végzők a számukra szükséges szakmai tudással rendelkezzenek.

5.1 Szigetelési ellenállás mérése

A kábelek egyik legfontosabb paramétere a szigetelési ellenállás értéke, ez az érték minél nagyobb annál jobb. A mérést megaohmméter segítségével végzik és a teszt során szükséges a kábel minden egyes érnek a szigetelési ellenállását megmérni a többi érhez és a föld ponthoz képest is. A mért értékeket a kábel adatlapján, illetve az ide tartozó szabványokban szereplő értékekkel kell összehasonlítani, így egyértelműen eldönthető, hogy megfelelő-e a mért érték.

5.2 Terheléssel tesztek

A teszt során a kábeleket az üzeminél nagyobb feszültségnek vetik alá, melynek pontos értékét a kábel adatlapja szabja meg. Terheléssel teszt általában az üzembehelyezés előtt történik és azt hivatott bizonyítani, hogy a hálózat ki fogja bírni az üzemi feszültséget. Előnye, hogy egyértelmű az eredmény, hogy egy kábel kibírja-e a próbafeszültséget vagy sem. Hátránya, hogy nem lehet különbséget tenni, a kábelek között, amik kibírták azt. Ez azt jelenti, hogy nem lehet megkülönböztetni egy olyan kábelt, ami már csak percekig bírta volna ki, és egy olyan kábelt, ami még egy hónapon át is üzemképes maradt volna.

A terheléssel teszt továbbfejlesztett változata, amikor a teszt nem csak a kábelek túléléséről szól, hanem egy kiválasztott paraméter értékét is figyelik a teszt alatt. A vizsgálat során megfigyelt paraméter alapján lehet következtetni a kábel állapotára. [8]

5.3 Részkiülés mérés

A részkiülés mérés röviden PD (partial discharge) széles körben alkalmazott módszer közép- és nagyfeszültségen a helyi hibák kimutatására. Alkalmazhatósága kisfeszültségen is bizonyítást nyert, ugyanakkor a nagyobb feszültség szinteken használt konvencionális mérőberendezés itt nem megfelelő, mert a válaszidő túl lassú. Ebből következik, hogy a műszer kialakításának függvényében vagy a kiülések gyakoriságát becsüli alul vagy a töltésüket becsüli túl. Ez a műszer limitált sávszélességére vezethető

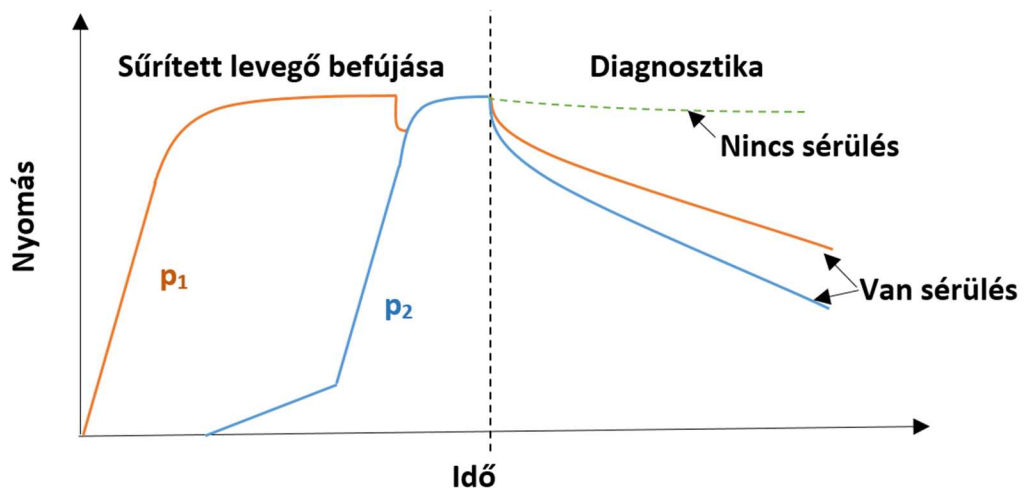
vissza, ezért kisműködésén nagyobb sávzélességű eszközre van szükség a mérés elvégzéséhez. [9]

Továbbá fontos különbség, hogy a kisműködésű kábelekkel ellentétben a közép- és nagyfeszültségű kábelek PD mentesre vannak tervezve, mert már az üzemi körülményeik mellett is felléphetnek részleges kisülések. Kisműködésű kábelek üzemi feszültségén viszont nem lép fel részleges kisülés, így itt elsődleges szempont a mechanikai követelmények teljesítése. Üzemi feszültségen tehát nem lép fel részleges kisülés a kisműködésű kábeleken, de a részkisülések mérése mégis alkalmazható. Ezt az ellentét az oldja fel, hogy a kábelek próbafeszültségén már megjelennek a részleges kisülések. Viszont nagyobb feszültségzintekkel ellentétben a kisülések itt egyaránt fellépnek sérült és ép kábelek esetén is, ezért nagyságuk szerinti döntés itt nem alkalmazható. Kisműködésű kábelek PD mérése esetén tehát az eredmények összetettebb értékelésére van szükség. Ehhez hozzájárul az is, hogy az eltérő kábel típusok esetén a szigetelésekben fellépő változások eltérő jellegűek lehetnek, így minden kábel típust külön kell kezelni. Ezért a diagnosztika során több azonos típusú kábelt is meg kell vizsgálni, hogy az eredmények összehasonlíthatók legyenek. [9]

5.4 Pneumatikus mérés

Egy nagyon egyszerű mérési eljárás a pneumatikus mérés. Az eljárás lényege, hogy sűrített levegőt juttatnak a kábelbe, majd a mérés során megfigyelik a nyomás változását. Amennyiben a kábel burkolaton sérülés van a nyomás csökkenni fog. A mérést egy INSULEAK nevű eszközzel végzik, amit több erű kábelek esetén lehet használni, de van eljárás egy erű kábelre is. Alkalmazás szempontjából az is fontos, hogy a kábel mind a két vége rendelkezésre álljon egyazon helyen.[10]

A teszt során először a kábel egyik végén sűrített levegőt fújnak be, egészen addig, amíg a kábel másik végén is el kezd emelkedni a nyomás. Ezután a kábel mind két végén további levegőt fújnak be. Amint a nyomás eléri a megfelelő értéket a levegő befújása véget ér. Ekkor pár perc várakozás után megállapítható, hogy van-e sérülés a kábelen, avagy nincs. Ez a nyomás csökkenéséből látszik. Amennyiben a nyomás állandó, akkor a kábel sértetlen. Ha viszont található sérülés a kábel burkolatán, akkor a nyomás csökkenni fog. A teszt időtartama a kábel paramétereitől függ. A folyamat végig követhető az 1. ábra. [10]



1. ábra – Pneumatikus mérés folyamata

A mérési eljárás előnyei, hogy a sűrített levegő nyomása még nem roncsoló hatású a kábelre nézve, illetve a teszt egyértelmű eredményt ad és nem szükséges szakképzett személyzet az elvégzéséhez. Hátránya, hogy csak annyi információt szolgáltat, hogy van-e külső sérülés a kábel szigetelésén. [10]

5.5 TDR

A TDR (Time Domain Reflectometry) egy elterjedt mérési technika, mely segítségével meghatározható a teljes kábelhossz, illetve különféle kábel hibák azonosítására is képes. A mérés előnye, hogy nagyon kevés energiát igényel és emellett alkalmazásának nincs roncsoló hatása a kábelek szigetelésére nézve. Hátránya, hogy a hálózat üzeme alatt nem alkalmazható és hogy a külső zajok befolyásolhatják az eredményét.

Az eljárás a hullámjelenségeken alapul, miszerint a homogén, veszteségmentes közegben a haladó hullám állandó sebességgel halad a közeg határáig, majd onnan részben visszaverődik, és ugyanakkora sebességgel indul vissza. Maga a mérési folyamat során kisfeszültségű impulzust injektálnak a vizsgált kábelbe, mely végighalad a kábelben és minden egyes eltérő (hullám-) ellenállású helyen, úgynevezett diszkontinuitási ponton megtörik, melynek során a hullám egy része tovább halad, míg egy másik része visszaverődik. Az eredeti hullámot és visszaverődésének alakját vizsgálva (például oszcilloszkópon) a jelalakokból és az eltelt időből következtetni lehet a visszaverődés okára és helyére. A jelalakból felismerhetők az elágazások és különféle meghibásodási típusok, mint például a kábelszakadások és zárlatok, a szigetelőanyag hiánya, az

üregzárványok jelenléte a szigetelésben és a víz behatolása a szigetelőanyagba vagy a csatlakozóba. [11]

5.6 Statisztikai elemzés, kockázat értékelés

A kábelek állapotértékelése történhet fizikai mérések elvégzése nélkül is matematikai módszerek segítségével. A statisztika a valóság számszerűsített összegzésével és elemzésével foglalkozik és egy lehetséges megoldás lehet a kisfeszültségű kábelek állapotának felmérésére. Alkalmazására a motiváció az, hogy általánosságban nagyon kevés mérési adat áll rendelkezésre, mivel a kisfeszültségű kábelhálózat nagy kiterjedése és földalatti elhelyezkedése miatt nehéz diagnosztikai méréseket végezni, így szükség van egy alternatív megoldásra. Az eljárás segítségével összefüggéseket keresünk a kábelek üzemeltetési és fektetési körülményei, a kábelek típusai, a környezeti tényezők és a kábelek meghibásodásai között. Lényege, hogy a felsorolt adatok beszerzése egyszerűbb és gyorsabb, mint fizikai méréseket végezni, valamint nincs szükség a helyszínre menni az adatok begyűjtéséhez. A fontosnak vélt körülményeket egy adatbázisban rögzítjük és hasonlóságokat keresünk. Amennyiben találunk valamilyen sablonszerű viselkedést, akkor azt felhasználhatjuk a még működő kábelek kategorizálására. A kategorizálás során a kábelszakaszokat különféle veszélyeztetettségi csoportokba soroljuk, mely alapján a szolgáltató dönthet egy szakasz felülvizsgálatáról. Az eljárás előnye, hogy fizikai mérések elvégzése nélkül tömegesen lehet azonosítani a nagyobb kockázatú kábelszakaszokat. A hátránya, hogy a se a hiba bekövetkezését, se annak be nem következését nem tudja garantálni. [12][13]

6 Algoritmusok

6.1 Kábelfektetési módok értékelése

Kábelfektetés során minden esetben az első lépés a kábel tervezett útvonalának felmérése. A vizsgálat során figyelembe kell venni az időjárási viszonyokat, az infrastruktúrát, a talaj típusát és az összes olyan tényezőt, ami veszélyt jelenthet a kábelre nézve.

Ezt követi a kábel fektetési módjának kiválasztása. A fektetés típusának alapvetően két hatása van a kábelek hosszú távú üzemére és megbízhatóságára. A mechanikai védelem (pl. védőcső, téglázás) csökkenti a külső sértésből eredő meghibásodások valószínűségét, ami részarányát tekintve a legnagyobb csoportként került azonosításra a kábelhibák között. Ugyanakkor a mechanikai védelem legtöbb esetben rontja a kábel termikus viszonyait, ami így a hosszú távú élettartamot és megbízhatóságot csökkenti.

A kábelfektetési módok közül két lehetőséget vizsgáltam meg. Az egyik a kábelárokba történő fektetés, a másik pedig a védőcsőbe történő fektetés. A célom az volt, hogy adott körülmények között megkönnyítsem a döntést a fektetési módok választása során. Ez egy komplex probléma, mert mind a mechanikai, mind a termikus hatásokat figyelembe kell venni.

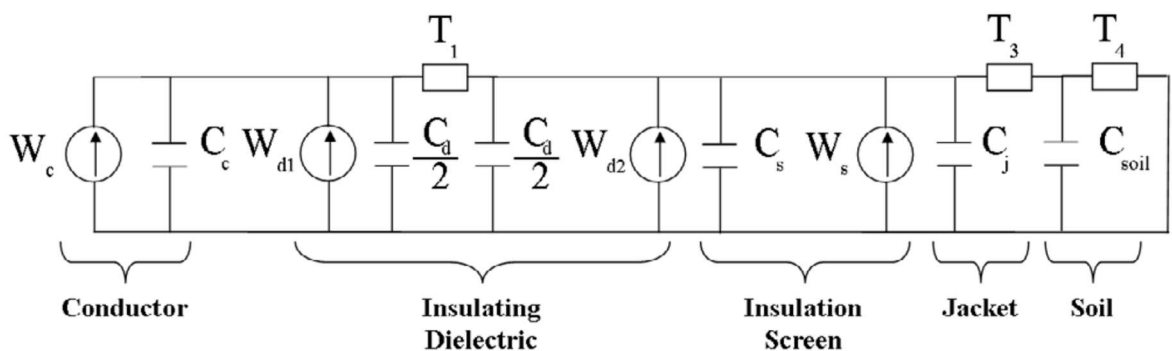
A mechanikai sértésből származó hibák nem reprezentálhatók modellek segítségével, mert bekövetkezésüknek valószínűségére csak statisztikailag, a környezeti tényezőket figyelembe véve lehet következtetni. A védőcsövek esetén megnövekedett hőmérsékletet, viszont egy termikus modell segítségével figyelembe lehet venni. Az általam alkalmazott rendszer kimeneteként megkapom a kábel hőmérséklet profilját, amiből kiszámítható az adott időegység alatt bekövetkezett öregedés. Minél kisebb időintervallumokat alkalmazunk annál pontosabban követi le a szimulált hőmérséklet a valóságban lezajló folyamatot és annál pontosabban számolható az öregedés mértéke. Ha ismerjük a tervezett élettartamot és az öregedés mértékét, akkor ki lehet számolni a várható élettartam. A várható élettartam alapján kell a döntést meghozni, hogy a kábel fektetésének során alkalmazzunk-e védőcsövet a mechanikai sérülések elkerülésének érdekében. Amennyiben a kiszámolt várható élettartam megfelelő, és a környezet megkívánja a mechanikai védelmet, akkor további dolgunk nincs.

Abban az esetben viszont, ha ez a megnövekedett hőmérséklet drasztikusan csökkentené a kábel élettartamát, akkor tovább kell gondolkodnunk a problémán. Ekkor mérlegelni kell, hogy a mechanikai védelem valóban fontos-e vagy egyéb óvintézkedéseket kell tenni. Egy lehetőség például a kábelek túlméretezése. A kábelek hőtermelése függ a rajtuk folyó áramok nagyságától és az eszköz geometriai méreteitől. Így amennyiben csökkentjük a terhelést, vagy nagyobb keresztmetszetű kábeleket alkalmazunk, akkor a kábel kevésbé fog melegedni, de ez egyben azt is jelenti, hogy a kábel a névleges értékei alatt működik és nincs teljesen kihasználva. Olykor a hálózat túlméretezése akár indokolt is lehet, de általánosságban ez nem egy gazdaságos megoldás.

6.1.1 Az algoritmus részletes leírása

6.1.1.1 Termikus modell

A problémát egy termikus modell segítségével reprezentáltam, mely hasonlít egy villamos modellhez, azonban a villamos kapacitások helyett termikus kapacitások, a hagyományos ellenállások helyett pedig hőellenállások szerepelnek a modellben. A források pedig a kábel rétegeiben fellépő veszteségeknek felelnek meg. A modell egy három csomópontú rendszer. Amennyiben pontosabb eredményt szeretnénk elérni, akkor szükséges lenne az alkotóelemeket további π tagokra bontani, ugyanakkor ez az eredmények kismértékű javulása mellett a számítási idő nagymértékű növekedését eredményezné.[14]



2. ábra – Termikus modell

A modell az alábbi mátrixos alakra redukálható. A mátrixból képzett egyenletek megoldásával megkaphatók a csomópontok hőmérsékleteit.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_e \\ \dot{\theta}_s \\ \dot{\theta}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{C_4 T_3} + \frac{1}{C_4 T_4}\right) & \frac{1}{C_4 T_3} & 0 \\ 0 & -\left(\frac{1}{C_3 T_1} + \frac{1}{C_3 T_3}\right) & \frac{1}{C_3 T_1} \\ 0 & \frac{1}{C_3 T_1} & -\frac{1}{C_1 T_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_e \\ \theta_s \\ \theta_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_4 T_4} \cdot \theta_{amb} \\ \frac{1}{C_3} \cdot (W_{d2} + W_s) \\ \frac{1}{C_1} \cdot (W_c + W_{d1}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Az 1. ábrán és az (1) képletben szereplő változók magyarázata:

- A θ_{amb} a környezet hőmérsékletét a $\theta_e, \theta_s, \theta_c$ paraméterek pedig a kábel különböző rétegeinek hőmérsékletét jelölik
- A W paraméterek a veszteségeket jelentik (W_c – vezetõn fellépõ veszteség, W_d – dielektromos veszteségek, $W_{d1} = W_{d2} = \frac{W_d}{2}$, W_s – árnyékolásban fellépõ veszteség, ez gyakran elhanyagolható)
- A C paraméterek a hõkapacitásokat reprezentálják
 - $C_1 = C_c + \frac{C_d}{2}$
 - $C_3 = \frac{C_d}{2} + C_s + C_j$
 - $C_4 = C_{soil}$
- A T paraméterek a hõellenállásokat reprezentálják [15]
 - $T_i = \frac{\rho_{i,hõ}}{2\pi} G_i$, ahol G a geometriai faktor és $\rho_{i,hõ}$ a hõellenállás
 - T_4 számítása a fektetés módjától függ:
 - Közvetlenül földbe fektetve:
$$T_4 = \frac{\rho_{soil}}{2\pi} \log_e \left[\mu + (\mu^2 - 1)^{\frac{1}{2}} \right], \text{ ahol } \mu = \frac{2L}{D_e}, L \text{ a fektetési mélység és } D_e \text{ a kábel átmérõje}$$
 - Védõcsõbe történõ fektetés esetén:
$$T_4 = \frac{U}{1+0.1(V+Y\theta_M)D_e} + \frac{\rho_{duct}}{2\pi} \log_e \left(\frac{D_o}{D_d} \right) + \frac{\rho_{soil}}{2\pi} \log_e \left[\xi + (\xi^2 - 1)^{\frac{1}{2}} \right],$$
ahol U, V és Y konstans értékek melyeket szabványok határoznak meg, θ_M az átlag hőmérséklete a védõcsõvet kitöltõ anyagnak, D_o a védõcsõ külsõ átmérõje, D_d a védõcsõ belsõ átmérõje, $\xi = \frac{L_d}{D_o}$, L_d a védõcsõ tengelyének távolsága a felszíntõl

Az (1)-es egyenlet megoldása a sajátértékek és a sajátvektorok számításával történik. Általános megoldása a következõ [14]:

$$\begin{bmatrix} \theta_e(t) \\ \theta_s(t) \\ \theta_c(t) \end{bmatrix} = c_1 \bar{v}_1 \cdot e^{\lambda_1 t} + c_2 \bar{v}_2 \cdot e^{\lambda_2 t} + c_3 \bar{v}_3 \cdot e^{\lambda_3 t} + \begin{bmatrix} \theta_e(\infty) \\ \theta_s(\infty) \\ \theta_c(\infty) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Ha a hõellenállások, hõkapacitások és veszteségek ismertek, akkor a kábel dinamikus hőmérséklet profilja a terhelés függvényében meghatározható.

A szükséges bemeneti adatok a következők:

- Dielektromos veszteségek
- A fektetés mélysége
- A kábel rétegeinek hőellenállása
- A kábel rétegeinek hőkapacitása
- A környezet hőmérséklete (az átlag elfogadható, lehetőleg a legkisebb intervallumok)
- Csapadék (intenzitás, időtartam)
- Talaj típusa
- Fektetés módjára jellemző paraméterek
- Névleges áram és üzemi hőmérséklet
- Talajhőmérséklet a fektetési mélységben
- Kábel ereinek száma
- Kábel névleges értékei
- A kábel terhelés profilja (minél részletesebb)

Ha a termikus tulajdonságok nem ismertek, akkor azokat az alkalmazott anyagok, a kábel geometriai paraméterei és a fektetési tulajdonságok alapján kell kiszámolni. Ehhez további adatokra van szükség, amik a következők:

- Kábel geometriai paraméterei
- Kábel anyaga (vezetők és szigetelők)

Továbbá a számítás során figyelembe kell venni a szomszédos áramkörök vagy kábelcsoportok jelenlétét és a vizsgált eszköztől való távolságukat, ugyanis azok a modellben további hőforrásként szereplnének, tovább növelve a hőmérsékletet. A számolás során felhasznált paraméterek közül nem lehet mindent pontosan meghatározni, mert értékük változhat, például a talaj hőellenállása a csapadék függvénye és a környezeti hőmérséklet sem állandó. Ezért ezen paraméterek esetén az algoritmus átlagértékekkel számol, de ha tudomásunk van az adott kábelszakaszra jellemző pontos értékekkel, akkor azokat kell felhasználni, hogy a lehető legpontosabb eredményt érjük el.

A felsorolt bemenetek egyrésze a kábel típusán belül megegyezik, így ezeket nem szükséges minden esetben megadni. Ezért a típusra jellemző paramétereket egy katalógusként használt Excel fájlban rögzítettük. Az algoritmus bemeneteként specifikálni kell a kábel típusát és egy terhelés profilt kell megadni. A terhelés profil minél kisebb időtartamokra van lebontva annál pontosabb a végeredmény.

Egy példa az algoritmus által várt bemenetre az 1. táblázatban látható.

Dátum és idő	Áramerősség
0:00:00	179
0:15:00	179
0:30:00	178
0:45:00	177
1:00:00	175
1:15:00	174
1:30:00	172
1:45:00	170
2:00:00	199
2:15:00	196
2:30:00	194
2:45:00	192,5
3:00:00	193
3:15:00	193
3:30:00	193
3:45:00	193
4:00:00	192
4:15:00	193
4:30:00	193
4:45:00	195
5:00:00	195
5:15:00	197
5:30:00	198
5:45:00	202
6:00:00	207
6:15:00	180
6:30:00	183
6:45:00	185
7:00:00	188
7:15:00	190
7:30:00	193

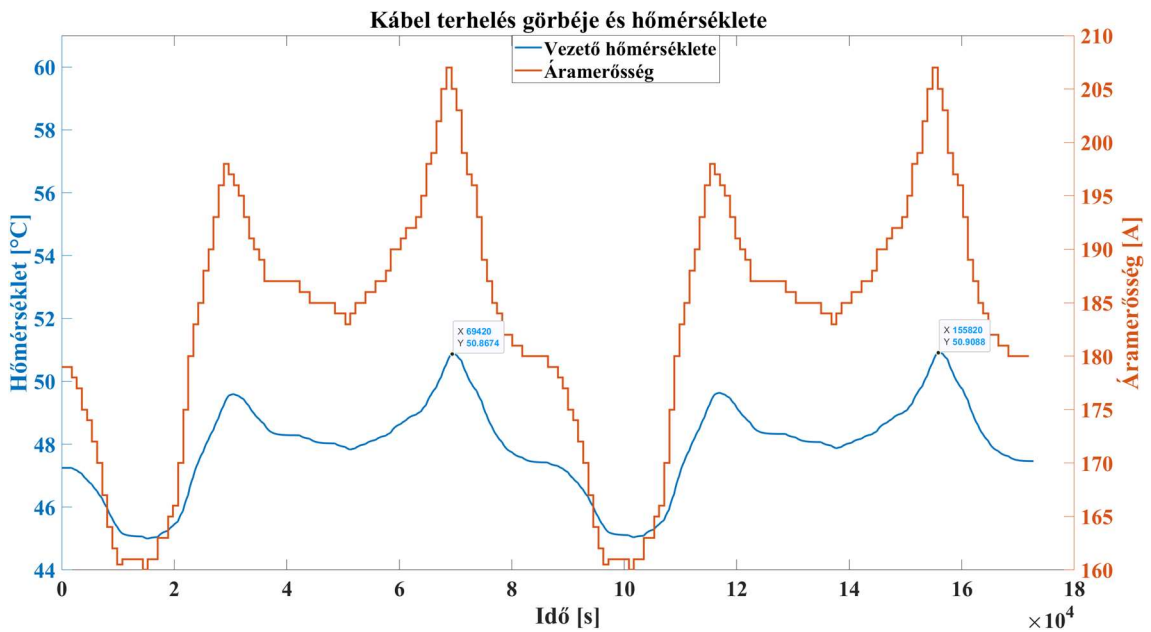
1. táblázat – Terhelés profil bemenet

A táblázatban jelenleg 7 és fél órányi terhelés van feltüntetve, de ez csak helytakarékosság miatt van. Ilyen kevés adatot ugyanis nincs értelme elemezni, helyette legalább egy teljes nap eredményeit érdemes megadni. Több nap eredményeinek megadása esetén pedig a dátumokat is meg kell adni.

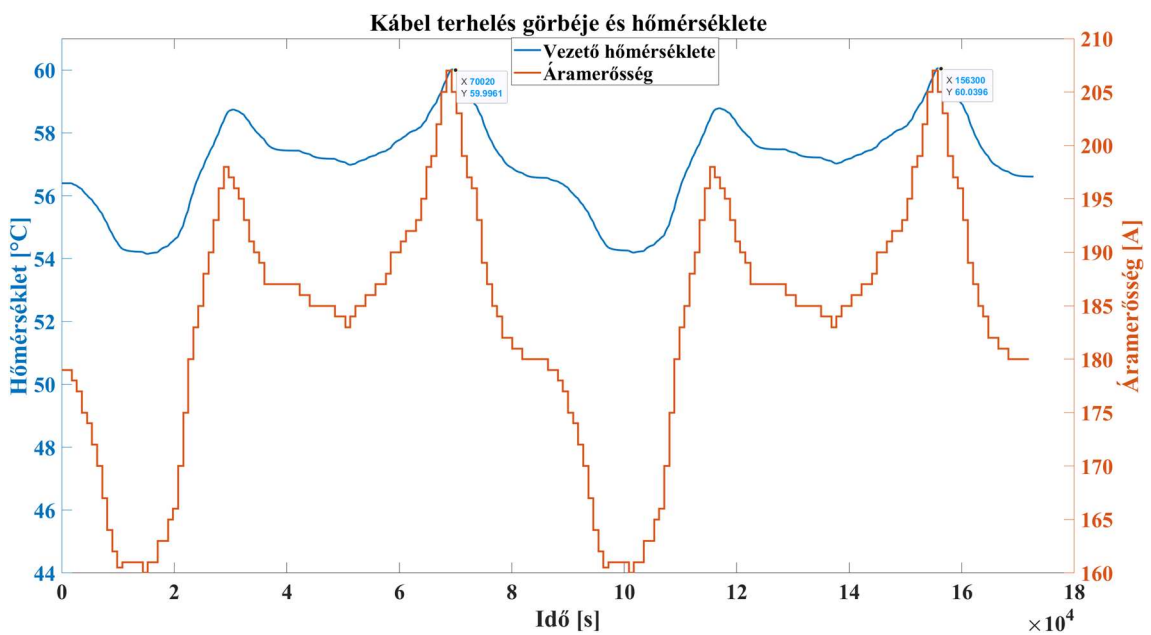
6.1.1.2 Példák kimenetre és eredmények értékelése

Ebben a fejezetben az eddig ismertetett kábelfektetési módok és a kábeleken megjelenő terhelés termikus hatását példák segítségével illusztrálom.

Elsőként azt az esetet vizsgáljuk, amikor azonos típusú kábelek terhelés görbéje megegyezik, de a fektetési módjaik eltérnek.



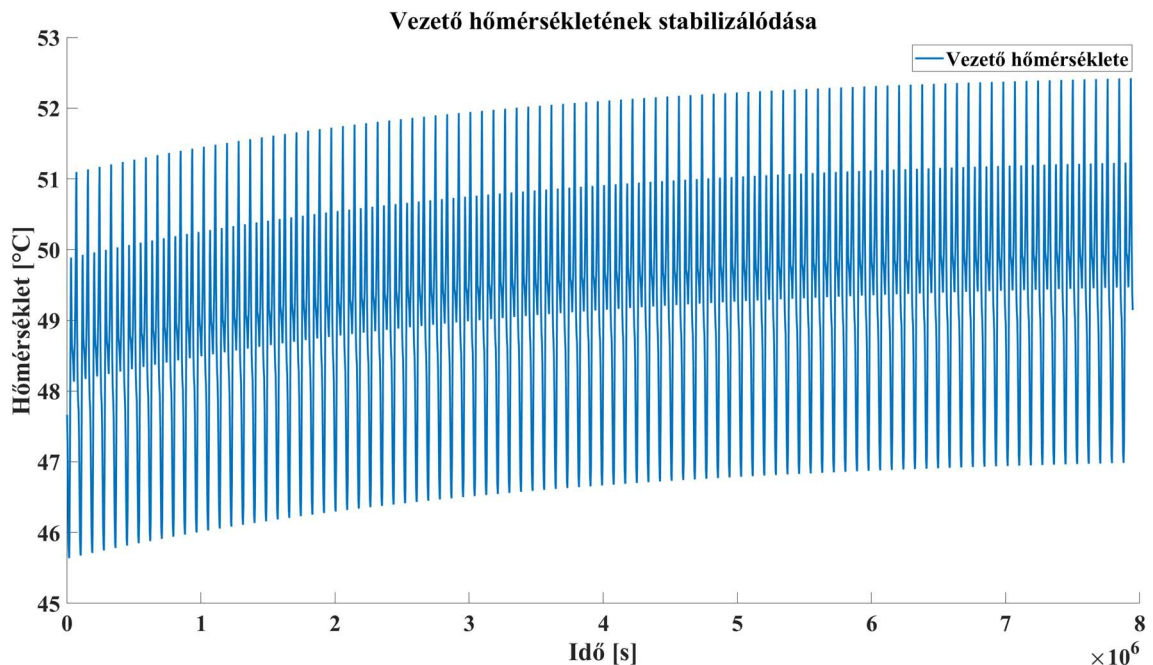
3. ábra – Közvetlenül földbe fektetve



4. ábra – Védőcsőbe fektetve

Az ábrán látható, hogy a védőcsőbe fektetett kábel hőmérséklete jelentősen (közel 10°C-al) megemelkedett a közvetlenül földbe fektetett kábeléhez képest.

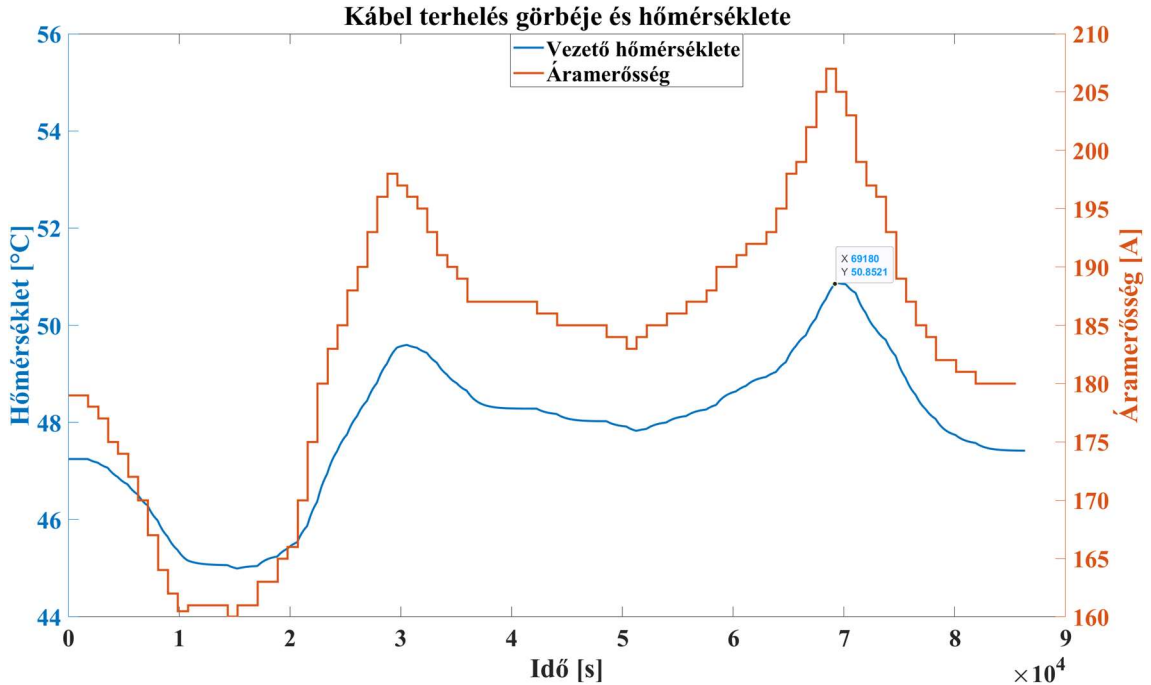
A két előző ábrán két egymást követő nap folyamán a kábelek terhelési görbéje (narancs) és hőmérséklet görbéje (kék) is látható. A terhelési görbék az 1. és a 2. napon megegyeznek, de ha figyelmesen megvizsgáljuk a hozzájuk tartozó hőmérsékleteket, akkor nem ugyanazt az eredményt látjuk. Ennek az a magyarázata, hogy a kábelek hőmérsékletváltozásának időállandója nagyobb, mint maga a változásra rendelkezésre álló idő. Ebből következik, hogy a hőmérséklet nem tud beállni az adott terheléshez tartozó végértékére. A szimulációt lefuttattuk sokkal nagyobb időtartamra is, ami azt bizonyítja, hogy a hőmérséklet idővel stabilizálódna. Az eredmény a következő:



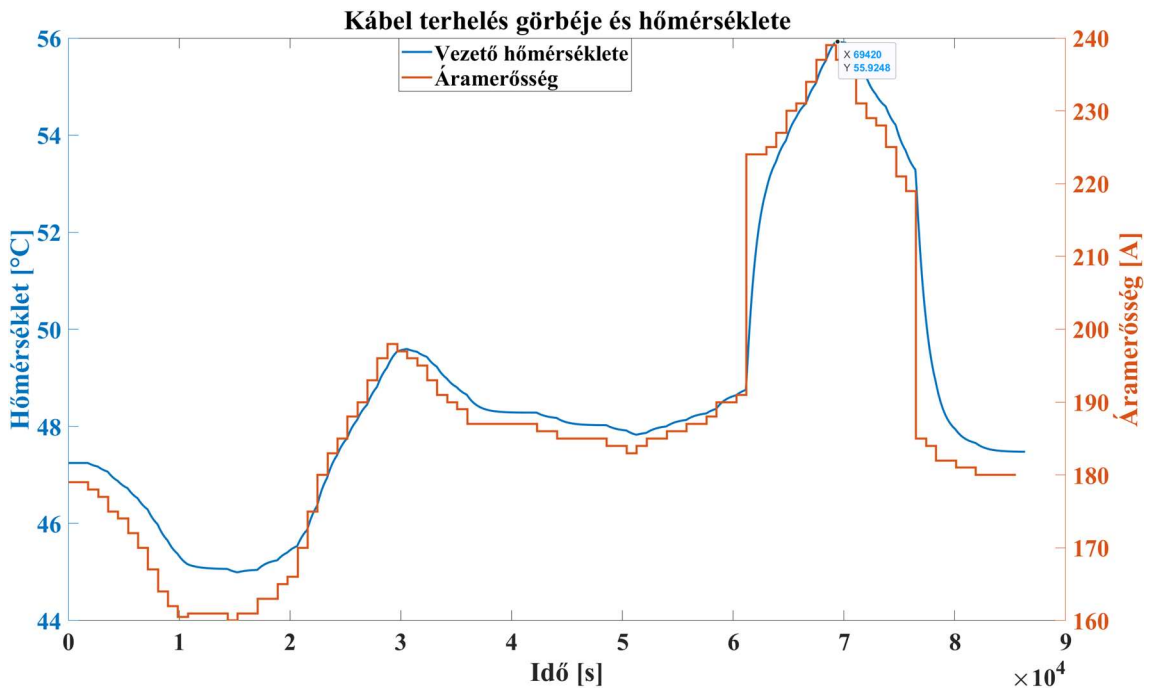
5. ábra – A kábelmelegedés hosszútávon

Minden nap ugyanazzal a terheléssel számoltunk, így minden túske megfelel egy napnak, látható hogy a kábel hőmérséklete nem csak a napi terheléstől függ, hanem a korábbi napokétól is, hiszen hőmérséklete növekszik. A szimuláció kezdetén a hőmérsékletet az adott terheléshez tartozó hőmérséklet végértékének adtam meg, de látható, hogy a hőmérséklet a napok teltevel folyamatosan nő. Ebből leszűrhető, hogy a napközben felmelegedő kábelnek nincs ideje lehűlni. Mivel a terhelés napi görbéje ugyanaz, így látszik, hogy a hőmérséklet is kezd felvenni egy végleges napi görbét, de ez egy hosszú folyamat.

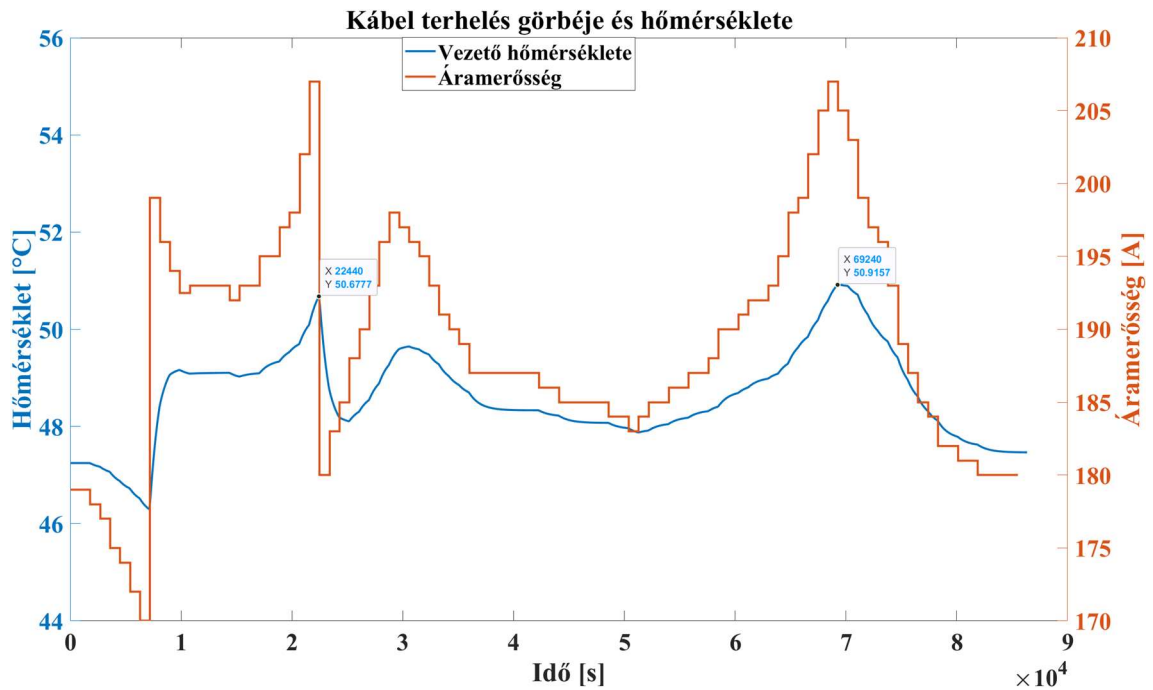
A következő példa a villamos autók töltésének terheléséhez kapcsolódik. A 3. fejezetben kifejtésre került, hogy miért baj, ha a terhelés nagymértékben növekszik, és az is, hogy mik a lehetséges megoldások ennek elkerülésére. Itt az algoritmus segítségével megmutatom, hogy ez mit jelent a hálózat hőmérsékletére nézve.



6. ábra – A hálózat alapterhelés esetén



7. ábra – Alapterhelés egy töltő terhelésével csúcsideben



8. ábra – Alapterhelés egy töltő terhelésével a csúcside elkerülésével

A szimuláció során, egy 60 kW-os akkumulátorral rendelkező villamos autót választottam és azt feltételeztem, hogy az akkumulátor a nap során félig merült le. Ennek feltöltése egy gyakori 7kW-os töltőt alkalmazva 4 órás töltési időt jelent. A töltő üzeme alatt 32 A-es fogyasztással rendelkezik. Két lehetőséget vizsgálok, az egyik, hogy a 4 órás töltési idő csúcsideben történik, míg a másik esetben a töltés csúcsideon kívül történik. Mint látható az ábrákon az első esetben (7. ábra), amikor csúcsideben töltöttük az autót, akkor az alapterheléshez képest (6. ábra) körülbelül 5°C-al megnőtt a kábel csúcshőmérséklete. A második esetben, amikor csúcsideon kívül töltöttük az autót (8. ábra), akkor a csúcshőmérséklet közel megegyezett az alapterhelés esetén tapasztalttal. Mivel a kábel öregedési csak a névleges érték közelében számottevő, így egyértelműen látható a smart töltők alkalmazásának előnye.

6.1.1.3 Várható élettartam

A már kiszámolt hőmérséklet értékek alapján meghatározhatjuk a kábel öregedési sebességének mértékét. Ez az Arrhenius egyenlet, az anyagra jellemző maximális üzemi hőmérséklet és aktivációs energia segítségével tehető meg.

A termikus öregedés sebességének mértéke a következő képpen számolható:

$$r = \exp \left\{ \frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_t} \right) \right\}, \quad (3)$$

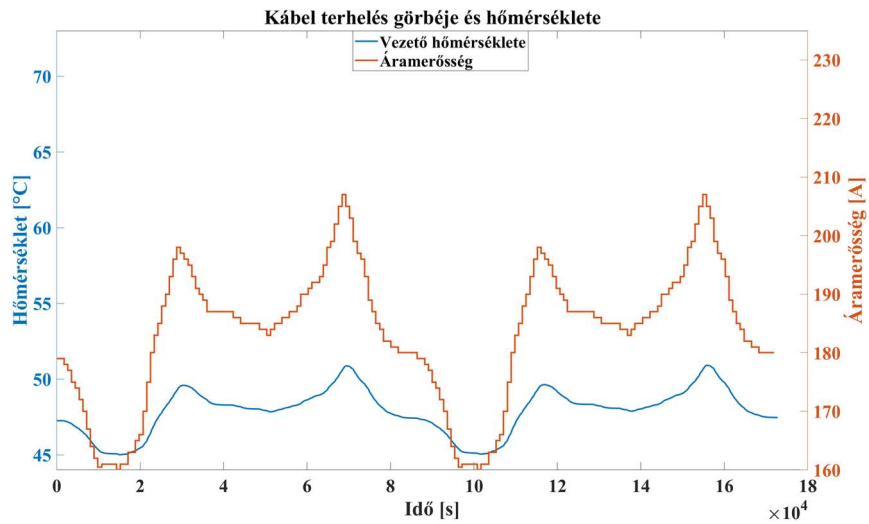
ahol: E_a az aktivációs energia, R az egyetemes gázállandó, T_e a maximálisan megengedhető hőmérséklet, ahol még az öregedés mértéke elfogadható, T_t az üzem során fellépő hőmérséklet.

Az üzemben töltött idő és az r szorzatából megkaphatjuk, hogy a kábel a tervezett élettartamából hány évet használt el eddig. Amennyiben a számolt hőmérséklet a névleges értékkel megegyezik, akkor az r értéke 1 és a kábel tervezett élettartama a várható élettartammal egybeesik. Ha az üzemi hőmérséklet magasabb, mint a névleges érték akkor a kábel fokozott öregedésnek van kitéve ($r > 1$), ez azt jelenti, hogy a várható élettartam kisebb lesz, mint a tervezett élettartam. Látható tehát, hogy a termikus tulajdonságokat akkor is érdemes megvizsgálni, ha a környezeti tényezők mechanikai hatása elhanyagolható és nincs szükség extra mechanikai védelemmel ellátni a kábelt a fektetés során.

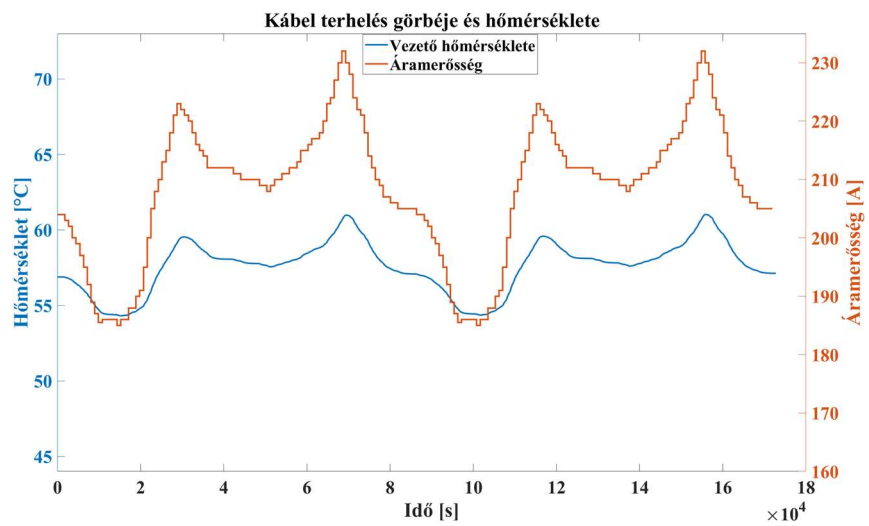
Szükséges bemeneti adatok:

- Aktivációs energia értéke
- Üzemidő
- Tervezett élettartam
- Üzemi hőmérséklet
- Megengedett maximális hőmérséklet

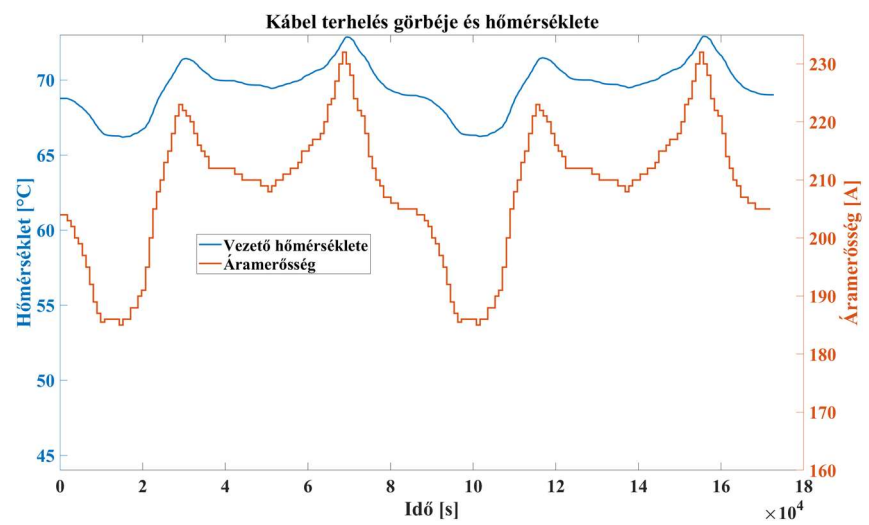
A termikus körülmények élettartamra való hatásának szemléltetésre a következő szimulációkat futtattuk egy olyan kábelen melynek tervezett élettartama 40 év:



9. ábra – a eset, alapterhelés



10. ábra – b eset, megnövelt terhelés



11. ábra – c eset, megnövelt terhelés és védőcső

A 9. ábra két nap terhelés görbáját mutatja, amikor a rendszer átlag terhelése kisebb volt, mint a névleges terhelési érték 80%-a. Azt várjuk, hogy ebben az esetben a várható élettartama nagy legyen, hiszen hőmérséklete is bőven a névleges érték alatt van.

A 10. ábra ugyanazt a rendszert mutatja egy jobban megterhelt esetben, így hőmérséklete is nagyobb. Azt várjuk, hogy az „a” esethez képest élettartama kisebb lesz.

A 11. ábra esetében a „b” esethez képest a terhelésen nem változtattunk, de míg „a” és „b” közvetlen földre volt fektetve addig itt védőcsövet alkalmazunk. Látható, hogy a hőmérséklet jelentősen nő, ebből következően arra számítunk, hogy élettartama is csökkenni fog.

Az három esetet az megvizsgáltam az algoritmussal és az eredmények a következők:

	a	b	c
Átlag hőmérséklet	47,89 °C	57,6 °C	69,49 °C
Átlag terhelés	183,46 A	208 A	208 A
Várható élettartam	1550 év	286,98 év	41,94 év

6.1.2 Weibull-eloszláson alapuló hiba előrejelzés

Az eddig bemutatott termikus számításokon és Arrhenius-egyenleten alapuló algoritmus képes figyelembe venni az eltérő fektetési módokat és segítségével számítható várható élettartam a kábelekre, azonban hátránya, hogy számos paraméter ismerete szükséges a használatához. Ezért röviden bemutatunk egy másik lehetséges megoldást is.

Az egyik leghatékonyabb hibamegelőzési módszer a Weibull-eloszláson alapuló hiba előrejelzés, amely matematikai statisztikán alapul. Általában görbeillesztésnek nevezik, és a valószínűség-alapú karbantartási stratégia részét képezi. Ennek során statisztikai kiértékelést végeznek egy meghibásodási adatbázis felhasználásával. Minden egyes eszköztípus esetében lehetőség van a meghibásodás valószínűségének kiszámítására. Ez az elöregedett eszközök élettartamának inputként történő felhasználásával érhető el. Alapvető fontosságú, hogy csak az élettartam végi adatokat azonosítsuk és használjuk fel, és ki kell zárni a meghibásodáshoz vezető külső hatásokat, pl. a túlfeszültséget vagy a meghibásodáshoz vezető súlyos mechanikai igénybevételt. A számítás kimenete egy eloszlásfüggvény, amely leírja, hogy egy adott életkort elérve mekkora a kiválasztott berendezés meghibásodásának valószínűsége. Ennek segítségével a karbantartás feladatok fontossága rangsorolható, és különböző eszköztípusok is összehasonlíthatók. Ezenkívül sérülékenységi elemzés is végezhető. Ez azt jelenti, hogy modellezhető a külső tényezők hatása a berendezések öregedésére, például számszerűsíthető a magasabb átlagos környezeti hőmérséklet hatása.

A szükséges bemeneti adatok:

- Eloszlásfüggvény készítéséhez
 - Hibára vonatkozó adatok
 - Berendezésazonosító (a meghibásodott berendezés egyértelmű azonosítása)
 - A meghibásodás időpontja
 - A meghibásodás oka
 - Üzembe helyezés dátuma
- Sérülékenységi elemzéshez
 - Értésítések földmunkálatokról (akár kisebb sérüléseket is keletkezhettek, amelyek csak később okoznak majd hibát)
 - Fák közelsége, infrastruktúra és bármilyen olyan környezeti tényező, ami negatívan hathat a kábel élettartamára

6.2 Kábel állapotértékelése

6.2.1 Cél

A cél egy olyan algoritmus elkészítése, ami a kábel paramétereiből, a 6.1.1.3-ban kiszámolt várható élettartamból és a kábelek esetleges diagnosztikai méréseinek eredményeiből olyan kimeneteket állít elő a kábelek jelenlegi állapotára vonatkozóan, amik egyértelműek és emellett egymással könnyen összehasonlíthatók, így a legkritikusabb kábelszakaszok könnyen azonosíthatóvá válnak.

6.2.2 Algoritmus leírás

Az adatelemzés során Excel fájlokból dolgozok, a számításokat MATLAB-bal végezem és az eredményeket egy Excel fájlba rögzítem. A bemenetek szám vagy szövegformátumúak lehetnek. Az egyes vizsgált paraméterekhez tartozó kimenetek számformátumúak és a [0; 1] tartományba esnek. Ezentúl rendelkezésre áll két szövegtípusú kimenet, mely a hiányzó adatok jelzésére szolgál. A könnyebb átláthatóság kedvéért szöveges értékelést nem társítottunk minden egyes paraméterhez, de a későbbiekben részletezve lesznek a határok, amik alapján kategóriákba sorolhatók, és a szabályrendszer is mely az összes paraméter eredményét figyelembe véve nyilatkozik a kábelek általános állapotáról.

Az esetek nagyrésztében a következő egyenlet segítségével számolunk:

$$y = \frac{1}{1 + e^{-\frac{x+a}{b}}} \quad (4)$$

A képletben szereplő „y” minden esetben a kimenetet jelenti és egy szám lesz a [0; 1] tartományban, ahol minél nagyobb a szám annál jobb a vizsgált paraméter állapota. Az „x” minden esetben a bemenet lesz. Az „a” és „b” változók értékeit a vizsgált paraméterek esetén külön tárgyaljuk.

Ha egy paraméter számításának menete a (4)-es egyenlettől eltér, akkor a számítás menete fel lesz tüntetve. A kimenetek fuzziifikált alakban már könnyen értelmezhetők, így tovább átalakításra nincs szükség.

6.2.2.1 Szigetelési ellenállás

A kábelek típusonként eltérő felépítésűek lehetnek, ezért üzemi körülményeik és az őket érő mechanikai és villamos hatások mértéke szintén eltérő. Ezt a szabványok is

figyelembe veszik, ezért a minimum érték szigetelési ellenállásra a kábel típusától függ. A rendelkezésemre álló adatok 0,6/1 kV-os PVC kábelek adatai voltak, ezért itt és a későbbiekben az ilyen típusú kábelekre vonatkozó előírásokat veszem figyelembe. A 0,6/1 kV-os PVC kábelek esetén a szükséges minimális szigetelési ellenállást egy már visszavont szabvány (MSZ 13207-2000) pontosan megadta mind egyerű, mind többberű kábelek esetére is, de az újabb MSZ 13207-2020-as szabvány már csak egyerű kábelekre adja meg, míg többberű kábelek esetén megállapodás tárgya lett az érték. Ezt a változtatást az indokolja, hogy a térfogati ellenállás és a geometriai méretek alapján nem húzható meg egyértelmű minimum. Ez abból ered, hogy a különböző típusú kábelek felépítése nem csak a geometriai méreteikben térnek el, de az őket felépítő rétegek száma és jellege is változhat. Tapasztalatok szerint, ha egy többberű kábel árnyékolással van ellátva, akkor szigetelési ellenállása 20-25%-kal kisebb az árnyékolás nélkülihez viszonyítva. A későbbiekben a 2020-as szabvány egyerű kábelekre vonatkozó értékeit felhasználjuk, míg többberű kábelek esetén a régebbi, 2000-es kiadás értékeit tekintjük referenciának, de nagyobb szórást engedünk meg. A 2020-as szabvány tesz egy kiegészítő megjegyzést, mely megengedi a szigetelési ellenállás értékének a minimum érték alatti, de legalább 80%-os értéken való üzemeltetést is, amennyiben azt műszaki és gazdasági megfontolások indokolják. Többberű kábelek esetén az erek szigetelési ellenállását külön mérik, és ezeknek veszik az átlagát. Amennyiben az ér szigetelési ellenállása és az átlag közötti eltérés nem nagyobb, mint 20% akkor a szigetelési ellenállás egyenletesnek tekinthető. Műszaki és gazdasági indokok esetén itt 50% eltérés a maximálisan megengedett. [16][17]

Az algoritmus a mért szigetelési ellenállás értékek elemzése során a (4)-es egyenletet használja fel. A mért adat, „x” ebben az esetben a szigetelési ellenállás mért értéke lesz. Az „a” változó értékét a kábel keresztmetszete, ereinek száma és névleges feszültsége alapján a szabványban előírt minimum szigetelési ellenállás értékek közül választottuk ki mind egyerű, mind többberű kábelek esetén. Míg egyerű kábelek esetén további magyarázat nem szükséges, addig többberű kábelek esetében ez magyarázatra szorul. A többberű kábelek esetében a minimum szigetelési ellenállás értéke megállapodás tárgya lenne az újabb szabvány alapján, de mivel pontos egyeztetés nem történt és mérési adatok még nem állnak rendelkezésre, így mi most a korábbi szabvány értékeit használtuk fel referenciának. Ez szerencsére a Fuzzy logika miatt nem jelent problémát, ugyanis a fuzziifikált kimenetek könnyen összehasonlíthatók egymással, így több ugyanolyan típusú

kábel eredményét összehasonlítva egyértelművé válik, hogy mely értékek azok, amelyek kiugróan rosszak. Az összehasonlítás megkönnyítésének érdekében „b”-nek itt egy nagyobb számot választottunk, aminek eredményeképp a szigmoid görbe meredeksége kisebb lesz, így nagyobb tartományban lesznek az eredmények szétszórva.

Az algoritmus végeredménye 0,5 lesz, amennyiben a mért érték éppen a minimum érték, így ez tekinthető a határnak jó és rossz szigetelési ellenállás között. A gazdasági és műszaki megfontolások mellett megengedett 80%-os szigetelési ellenállás érték már a rossz kategóriába esik, ezért bevezetünk egy harmadik kategóriát „kritikus” néven, ami a 80%-os érték alatt van. Ebben az esetben a kábelszakaszok mihamarabbi felülvizsgálata ajánlott. Az eredmények felosztása végső soron a kritikus, a rossz, és a jó kategóriát különíti el.

Változók értékei:

a: A szigetelési ellenállás legkisebb megengedett értéke, függ a kábel keresztmetszetétől és ereinek számától. A lehetséges értékeket az 2. táblázat tartalmazza.

A vezető névleges keretmetszete, mm ²	A szigetelési ellenállás legkisebb értéke, MΩ * km	
	0,6/1 kV-os kábelek	
	Egyerű ¹	Többerű ²
16	4,5	50
25	4,5	50
50	3,5	40
95	3	30
120	3	30
150	3	30
240	2,5	30

2. táblázat – PVC-szigetelésű kábelek legkisebb szigetelési ellenállása 20°C hőmérsékleten

¹ Az újabb 2020-as szabvány alapján.

² A régebbi 2000-es szabvány alapján.

b: Az értékeket az alábbi táblázat tartalmazza, melyek kiválasztása az előző táblázathoz hasonló módon a keresztmetszet és az erek száma alapján történik.

A vezető névleges keretmetszete, mm ²	Az (4) egyenletben szereplő <i>b</i> értéke	
	0,6/1kV-os kábelek	
	egyerű	többerű
16	1,2	13,3333
25	1,2	13,3333
50	0,9333	10,6666
95	0,8	8
120	0,8	8
150	0,8	8
240	0,6666	8

3. táblázat – A szigmoid görbe meredekségét meghatározó „*b*”-k értéke

A kimenetei Fuzzy értékek értelmezése:

- Jó, ha $y \geq 0,5$
- Rossz, ha $0,32 \leq y < 0,5$
- Kritikus, ha $y < 0,32$

6.2.2.2 Hiba napló

A számolás itt is az (4)-es számú egyenlet segítségével történik. Itt a minimum követelmény szolgáltatói preferencia kérdése. Az algoritmusban jelenleg a határt, amit túllépve egy kábelt „rossznak” bélyegzünk, a 0,1 hiba/km/év jelenti. A kimenetet három kategóriára különítjük el, jóra, rosszra és közepesre az ehhez tartozó bemeneti értékek és kimenethez tartozó Fuzzy értékek az alábbiakban.

Változók értékei:

- $a = 0,06$
- $b = 0,02$

Bemeneti értékek szerint:

- Jó, ha $x \leq 0,06$
- Közepes, ha $0,06 < x \leq 0,1$

- Rossz, ha $x > 0,1$

A kimeneti Fuzzy értékek szerint:

- Jó, ha $y \geq 0,5$
- Közepes, ha $0,12 \leq y < 0,5$
- Rossz, ha $y < 0,12$

6.2.2.3 Adipát lágyítók vándorlása

Egy a PVC kábelekre jellemző jelenség az adipát lágyítók felszínre „vándorlása”. Vizsgálata a kábelek szemrevételezéssel történik, ahol a kábel burkolatán elszíneződések után kell kutatni. Számolás tehát nem szükséges hozzá. Normál körülmények között nem jelenik meg, így jelenléte esetén ajánlott a kábelt megvizsgálni. A szemrevételezés során három kategóriába kell besorolni a kábelen tapasztaltakat, miszerint „nincs adipát”, „van adipát, de nem súlyos a probléma” és „van adipát és súlyos a probléma”. A bemenetek tehát szöveg jellegűek, amikhez előre meghatározott értékeket társítunk, hogy itt is alkalmazható legyen a Fuzzy megközelítés. Az értékek így itt is 0 és 1 közé esnek és a következőképpen alakultak:

A bemeneti adatok Fuzzy értékre konvertálása:

- Nincs adipát-> $y = 1$
- Van adipát, de nem súlyos a probléma -> $y = 0,5$
- Van adipát és súlyos a probléma -> $y = 0,1$

A kimeneti Fuzzy értékek értelmezése:

- Jó, ha $y = 1$
- Közepes, ha $y = 0,5$
- Rossz, ha $y = 0,1$

6.2.2.4 Várható élettartam

Míg a 6.1-ben kiszámolt várható élettartamok közvetlenül is felhasználhatók, addig az értékek fuzzyfikálása segítségével még gyorsabbá tehetjük a kimenetek értelmezését. A 6.1 eredményeit tehát inputként használja fel, a kábelek állapotértékelését végző algoritmus. A végeredmény pedig a többi fuzziifikált paraméterrel együtt egyetlen Excel fájlban jelenik meg.

A gyakorlat és a számítások is egyaránt azt mutatják, hogy kis terhelések esetén a kábelek szigetelése gyakorlatilag nem öregszik és több ezer évig működőképes lenne³. A kérdés viszont az, hogy hány évig szeretnénk legalább üzemeltetni egy kábelt, ami szolgáltatói preferencia. A számolás a (4)-es egyenlet segítségével történik. Az „a” és „b” paraméterek ebben az esetben a következők:

- $a = 40$, mert az általam vizsgált kábelek várható élettartam 40 év.
- $b = 10$

A kimenetei Fuzzy értékek értelmezése:

- Biztosan jó, ha $y \geq 0,71$, ekkor a kábel várható élettartam 60 évnél több.
- Jó, ha $0,2689 \leq y < 0,71$, ekkor a kábel élettartam 30 és 60 év között van.
- Rossz, ha $y < 0,2689$, ekkor a kábel élettartama 30 év alatt van.

³ Természetesen ez csak akkor lenne igaz, ha a kábel élettartamára csak a termikus viszonyok lennének hatással.

6.2.3 Kiindulási adatok és kimenetek

A kábelek adat alapú diagnosztikájához a következő adatokat használjuk fel. Ezeket túl felhasználásra kerülnek a 6.1 fejezetben kiszámolt eredmények is, így közvetve az azokhoz felhasznált adatok is, de itt azokat nem részletezzük. Amennyiben valamelyik kategóriában nem áll rendelkezésre adat, akkor az a működés szempontjából nem jelent problémát, de az eredmény kevésbé lesz pontos. Az eredmények mellett feltűntetésre került, hogy a bemeneti adatok közül mennyi áll rendelkezésre és hogy ez hány db paraméter értékét befolyásolja.

A szükséges bemeneti adatok a következők:

- Kábel paraméterei
 - Kábeltípus (katalógusnév)
 - Erek száma
 - Szigetelés típusa (PVC, PE, XLPE stb.)
 - Méretek (belső és külső)
 - Névleges áram
 - Névleges feszültség
 - A kábel hossza
- Diagnosztikai adatok (mind az új, mind a már működő berendezések esetében)
 - Szigetelési ellenállás
 - A kábelvégződéseknél az adipát vizsgálata (nincs adipát, nem súlyos, súlyos adipát figyelhető meg) PVC-kábelek esetén.

A bemenetek az algoritmus működésének gyorsítása és a könnyebb felhasználhatóság céljából két különböző fájlban vannak tárolva. Az egyik fájl egy katalógus jellegű Excel táblázat, mely tartalmazza a kábelek típusaira jellemző adatokat, így azokat típusonként elég egyszer kitölteni. A másik fájl az olyan paramétereket tartalmazza, ami a kábelekre jellemző egyéni adatokat tárolja, példa ilyen bemenetre a 4. táblázatban látható.

Adat	Kábel típusa	Mért szigetelési ellenállás	Kábel hossza	A szakaszon fellépett hibák száma	Várható élettartam	Megfigyelt adipát
1	NAYY-J 4*16 RE	1000	0,04	1	50	súlyos
2	NAYY-J 4*25 RE	2000	0,004	0,5	20	súlyos
3	NAYY-J 4*50 SE	1500	0,02	0	25	nincs adipát
4	NAYY-J 4*50 SM		0,01	0,003	30	nincs adipát
5	NAYY-J 4*95 SE	2000	0,05	0,1	35	nem súlyos
6	NAYY-J 4*95 SM	2555	0,07	0,2	40	nincs adipát
7	NAYY-J 4*150 SE	3000	0,007	0	45	nem súlyos
8	NAYY-J 4*150 SM	2000	0,9	1	50	

4. táblázat – Példa az állapotértékelést végző algoritmus bemenetére

Az algoritmus a számítás során a kábelek típusa alapján kikeresi a katalógusként használt Excel fájlból a számoláshoz szükséges további adatokat.

Az algoritmus kimenete a következő képpen néz ki:

Adat sorszáma	Szigetelési ellenállás	Adipát jelenléte	Hiba napló	Várható élettartam	Hiányzó adatok	Befolyásolt kimenetek
1	0,320820892	0,1	0,710949503	0,731058579	0 az 5-ből	0 a 4-ből
2	0,041090968	0,1	0,59868766	0,119202922	0 az 5-ből	0 a 4-ből
3	1	1	0,475020813	0,182425524	0 az 5-ből	0 a 4-ből
4	1	1	0,487877376	0,268941421	1 az 5-ből	1 a 4-ből
5	0,294214972	0,5	0,5	0,377540669	0 az 5-ből	0 a 4-ből
6	0,180291323	1	0,512497396	0,5	0 az 5-ből	0 a 4-ből
7	0,032846882	0,5	0,475020813	0,622459331	0 az 5-ből	0 a 4-ből
8	1	1	0,710949503	0,731058579	1 az 5-ből	1 a 4-ből

5. táblázat – Példa az állapotértékelő algoritmus kimenetére

A kimenetek értelmezése korábban részletekben már megjelent, de a 6. táblázatban megtalálhatók röviden összefoglalva és a kimenetek is színekkel lettek a könnyebb átláthatóság kedvéért.

Fuzzy értékek értelmezése			
Paraméter	Kategóriák		
Szigetelési ellenállás	Kritikus	Rossz	Jó
	[0 - 0,32[[0,32 - 0,5[[0,5 - 1]
Várható élettartam	Rossz	Jó	Biztosan jó
	[0 - 0,2689[[0,2689 - 0,71[[0,71 - 1]
Hiba napló	Rossz	Közepes	Jó
	[0 - 0,12[[0,12 - 0,5[[0,5 - 1]
Adipát jelenléte	Rossz	Közepes	Jó
	0,1	0,5	1

6. táblázat – Fuzzy értékek értelmezése

7 Továbbfejlesztési lehetőségek

7.1 PV

A dolgozatban az EV-k terhelés profilra és hőmérsékletre kifejtett hatásait megvizsgáltam és a következő lépés a napelemek hatásának hasonló jellegű vizsgálata lenne. Azonban a napelemek vizsgálata komplexebb feladat, mert az általuk generált terhelés az évszaktól, a földrésztől, a napelemek felületének méretétől és egyéb telepítési körülményektől nagymértékben függ. Ezért több scenáriót is fel kell állítani.

7.2 Felhasználói felület

Az elkészített algoritmus gyakorlatban történő alkalmazhatóságának érdekében a legfontosabb és leghasznosabb egy könnyen kezelhető felhasználói felület létrehozása lenne. Jelenleg az algoritmus MATLAB-ban fut, és Excel táblázatokból dolgozik. Ez számítás céljából előnyös megbízható és gyors, ugyanakkor, ha ezt a rendszert használni szeretnék a gyakorlatban, akkor előnyösebb lenne egy felhasználó barát környezet, ahol a program vezeti a felhasználót, az adatok megadásának lépéseiben.

7.3 Terhelés profil módosítása

Szükségszerű lehet terhelés profilok módosításának egyszerűsítése. A jelenleg lefuttatott szimulációk külön adatsorokból dolgoznak, de ha arra vagyunk kíváncsiak, hogy mi történne, ha egy általunk definiált módon megváltozna a terhelés, akkor az adatsorokat manuálisan kellene megváltoztatni.

Így például nehéz a különböző típusú villamos autó töltők hatását vizsgálni. Emellett a smart töltők esetében a terhelés áthelyezése is manuálisan történt, de egy smart töltő rendszer automatikusan tölteni fogja az autót, ha elég szabadkapacitás áll rendelkezésre a hálózaton, így a valós hatás reprezentálására, nekünk is hasonlóan kellene a terhelés profilt változtatnunk. Ehhez viszont szükség lenne a smart töltők algoritmusának tanulmányozására.

8 Irodalomjegyzék

- [1] M. Rycroft, “Power cable life estimation and extension,” 2017. <https://www.ee.co.za/article/power-cable-life-estimation-extension.html#.YSPA3OC8owA> (accessed Sep. 02, 2021).
- [2] K. E. Babós Sándor, Balázs Attila, Benyó Tibor, Csépes Gusztáv, Görgey Péter, dr. S. M. Kozák Endre, Luspay Ödön, dr. Németh Endre, Schmidt János, Szántó Zoltán, and dr. W. G. Szentgyörgyi Zoltán, Szonda Sándor, Varga András, Vincze Jánosné, *Közép- és nagyfeszültségű hálózati berendezések diagnosztikai vizsgálata*. .
- [3] “Underground ducting.” <https://www.jdpipes.co.uk/knowledge/ducting/underground-ducting-frequently-asked-questions.html> (accessed Sep. 02, 2021).
- [4] K. Rafey, “How Will the Grid Adjust to EV Charging?,” *T&D*, 2021.
- [5] R. K. Mohd, S. A. Mohammad, S. Adil, and J. A. M.S., “A Comprehensive review on electric vehicles charging infrastructures and their impacts on power-quality of the utility grid,” *Elsevier*, 2019.
- [6] H. Laura and V. G. Danica, “Green neighbourhoods in low voltage networks: measuring impact of electric vehicles and photovoltaics on load profiles,” *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, 2017.
- [7] “Underground Electrical Cables: An Overview of Maintenance Procedures.” <https://www.dfliq.net/blog/underground-electrical-cables-overview-maintenance-procedures/> (accessed Apr. 21, 2021).
- [8] J. C. Hernandez-Mejia, “Monitored Withstand Techniques,” 2016. Accessed: Apr. 26, 2021. [Online]. Available: <http://www.neetrac.gatech.edu/cdfi-publications.html>.
- [9] Cselkó Richárd, “Application of Partial Discharge Measurement as a Diagnostic Tool for Low-Voltage Cables,” *BME*, 2019.
- [10] J. Tarnowsky, “Pneumatic Testing of Low-Voltage Cable | T&D World,” 2013. <https://www.tdworld.com/intelligent-undergrounding/article/20963706/pneumatic-testing-of-lowvoltage-cable> (accessed Apr. 21, 2021).
- [11] I. Dorián and V. Dániel, “BME Villamos Energetika Tanszék Nagyfeszültségű Technika és Berendezések Csoport Nagyfeszültségű Laboratórium,” 2017.
- [12] M. Klerx, J. Morren, A. Prein, H. S Lootweg, E. Groot-Kabalt, and D. Harmsen, “INTERPRETATION OF STATISTICAL ANALYSIS OF LV CABLE CONDITION,” 2019.
- [13] H. S Lootweg, J. Morren, and M. Klerx, “Analyzing Parameters That Affect the

Reliability of Low-Voltage Cable Grids and Their Applicability in Asset Management,” *IEEE Trans. POWER Deliv.*, vol. 34, p. 10, 2019.

- [14] R. S. Olson, J. Holboll, and U. S. Gudmundsdottir, “Dynamic temperature estimation and real time emergency rating of transmission cables,” *IEEE Power & Energy Soc. Gen. Meet.*, 2012.
- [15] M. G. F., *Electric Cables Handbook 3rd Edition*. 1997.
- [16] Magyar Szabványügyi Testület, “Magyar szabvány MSZ 13207:2000,” 13207, 2000.
- [17] Magyar Szabványügyi Testület, “Magyar szabvány MSZ 13207:2020,” p. 93, 2020.

9 Ábrajegyzék

1. ábra – Pneumatikus mérés folyamata	19
2. ábra – Termikus modell	22
3. ábra – Közvetlenül földbe fektetve	26
4. ábra – Védőcsőbe fektetve	26
5. ábra – A kábelmelegedés hosszútávon	27
6. ábra – A hálózat alapterhelés esetén	28
7. ábra – Alapterhelés egy töltő terhelésével csúcsidőben.....	28
8. ábra – Alapterhelés egy töltő terhelésével a csúcsidő elkerülésével	29
9. ábra – a eset, alapterhelés	31
10. ábra – b eset, megnövelt terhelés	31
11. ábra – c eset, megnövelt terhelés és védőcső.....	31

10 Táblázatjegyzék

1. táblázat – Terhelés profil bemenet.....	25
2. táblázat – PVC-szigetelésű kábelek legkisebb szigetelési ellenállása 20°C hőmérsékleten	36
3. táblázat – A szigmoid görbe meredekségét meghatározó „b”-k értéke	37
4. táblázat – Példa az állapotértékelést végző algoritmus bemenetére	40
5. táblázat – Példa az állapotértékelő algoritmus kimenetére	41
6. táblázat – Fuzzy értékek értelmezése.....	41