



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

Csótai Enikő, Pózmán Réka Alexandra

**FESZÜLTSG ALATTI MUNKAVÉGZÉS
SORÁN A LEGKISEBB MEGKÖZELÍTÉSI
TÁVOLSÁG MEGHATÁROZÁSÁNAK
LEHETŐSÉGEI ÉS EZEK
ÖSSZEHASONLÍTÁSA**

TDK dolgozat

KONZULENSEK

Dr. Göcsei Gábor

Dr. Németh Bálint

BUDAPEST, 2022

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	4
Abstract.....	5
1 Bevezetés	6
2 A feszültség alatti munkavégzés (FAM).....	7
3 Balesetek FAM során.....	8
3.1 A Manitoba Hydro baleset	8
3.1.1 Az 1997-es baleset	8
3.1.2 A baleset körülményei	8
3.1.3 Időjárási körülmények [6].....	8
3.1.4 A baleset [6].....	9
3.1.5 Vizsgálatok a baleset után [6].....	10
3.1.6 A baleset vizsgálatának eredményei [6]	11
4 IEC 61472:2013 szabvány [7][8]	13
4.1 A legkisebb megközelítési távolság definíciója.....	13
4.2 A legkisebb megközelítési távolság számításának menete.....	13
4.2.1 Statisztikai túlfeszültség	13
4.2.2 Résszilárdság	14
4.2.3 A résszilárdságot befolyásoló különböző szempontokat egyesítő tényező ...	15
4.2.4 Villamos távolság	20
4.2.5 Kockázatok figyelembevétele.....	20
5 IEEE 516-2021 szabvány [9]	22
5.1 Megközelítési távolság fogalmak IEEE szerint	22
5.2 Megközelítési távolságok számításának menete.....	23
5.2.1 Szerszámtényező.....	23
5.2.2 Levegő telítettségi tényező	24
5.2.3 Fázis és föld között várható legnagyobb tranziens túlfeszültség.....	25
5.2.4 Magasságkorrekciós tényező	26
5.2.5 A véletlen mozdulatok kockázatát kiküszöbölő biztonsági tényező	26
6 Magyar szabályozások.....	27
6.1 MSZ EN 61472:2013	27
6.2 72/2003. GKM rendelet [11]	27
6.2.1 A rendelet szerinti definíció.....	28

6.3 Az MSZ EN 61472:2013 szabvány és a 72/2003. GKM rendelet értékeinek vizsgálata fázis-föld rendszerre 72,5 kV fölött.....	28
6.3.1 Legkisebb megközelítési távolság ép rendszer esetén.....	28
6.3.2 Legkisebb megközelítési távolság sérült szigetelő esetén	29
6.3.3 Legkisebb megközelítési távolság lebegő vezetőképes tárgy jelenléte esetén	31
7 A két szabvány összehasonlítása.....	33
7.1 Paraméterek, amik különböznek a két szabvány esetén	35
8 Érzékenységtanulmány	36
8.1 Az IEC szabvány érzékenységtanulmánya.....	36
8.1.1 A paraméterek módosítása.....	37
8.2 Az IEEE szabvány érzékenységtanulmánya.....	40
8.2.1 A paraméterek módosítása.....	41
9 Összefoglalás.....	44
Köszönetnyilvánítás	46
Irodalomjegyzék.....	47
Ábrajegyzék.....	49
Függelék.....	50

Összefoglaló

Napjainkban az egyre növekvő energiaigény kielégítéséhez elengedhetetlen a meglévő villamosenergia-átviteli hálózat nagyfokú kihasználtsága. A tervezett üzemidőt azonban a rendszeres karbantartás és szerelési munkálatok akadályozhatják. Ezek a legtöbb esetben feszültségmentes állapotban végzett feladatok, amik így jelentős energia kimaradást okozhatnak a szerelési munkálatok időtartama alatt. Ennek kiküszöbölésére kínálja a feszültség alatti munkavégzés (továbbiakban: FAM) megoldást, amelynek során a karbantartási műveletek elvégzéséhez nem szükséges a hálózat egyes szakaszainak lekapcsolása. A technológiára már számos megvalósítási lehetőséget dolgoztak ki, amelyek közös célja a gazdasági szempontok előtérbe helyezése mellett, a szerelési munkákat végző szakemberek védelme is. A biztonság garantálásának érdekében az egyik fő feladat a legkisebb megközelítési távolság meghatározása. Ennek az értéknek a meghatározásához a témában már számos szabvány fogalmazott meg számítási módszereket. Ezek a számolási modellek azonban alapjaikban térnek el egymástól, így az eredményül kapott védőtávolsági értékek is különböznek, amelyek így nem ugyanolyan mértékű biztonságot nyújtanak.

Kutatásunk során két, a témában meghatározó, szabvány számítási modelljeit vizsgáltuk meg, majd hasonlítottuk össze, annak érdekében, hogy képet kaphassunk az egyes paraméterek befolyásoló képességéről, ezeknek a legkisebb megközelítési távolságra gyakorolt hatásáról, ezáltal a biztonsági tényező alakulásáról. Az összehasonlítás során figyelembe vettük az egyes szabványok által végzett munkák baleseti statisztikáit is. Célunk az volt, hogy a FAM során elengedhetetlen legkisebb megközelítési távolság meghatározását leíró szabványokat összehasonlítsuk, mely során képet tudunk alkotni az egyes számítási modellek védelmi biztonságosságáról, majd ezek után a gazdasági tényezőket is figyelembe véve a minimumra csökkentjük ezeket a védőtávolságokat az egyes paraméterek befolyásolásával.

Abstract

Nowadays, high utilisation of the available electricity transmission system is essential to meet the growing demand for energy. However, regular maintenance and installation work on the transmission line can interrupt the planned running time. In most cases, these works are carried out under de-energised conditions and can therefore cause significant energy outage during the installation works. To eliminate this problem, live line work (LLW) offers a solution where maintenance operations do not require disconnection of certain sections of the system. Several applications of the technology have already been developed, with the common aim to protect the workers carrying out the operations, while also putting economic aspects high on the table. In order to guarantee safety, one of the main tasks is to determine the minimum approach distance. Several standards have already defined calculation methods to determine this value. However, these models differ in their principles and the resulting values of the protection distances are different and do not provide the same level of safety.

In our research, two standard calculation methods, which are relevant in this topic, were examined and compared in order to get an overview of the influence of each parameter on the minimum approach distance and its impact on the safety factor. In the comparison, we also took into consideration the accident statistics of the works carried out using each standard. Our aim was to compare the standards for determining the minimum approach distances necessary in LLW in order to get an overview of the safety level of each calculation model and to reduce these distances to a minimum by influencing the parameters, also taking into account economic factors.

1 Bevezetés

A feszültség alatti munkavégzés kulcsfontosságú szerepet tölt be a villamosenergia átviteli rendszer életében. Ahhoz, hogy a hálózatok működtetése zavartalan lehessen és a fogyasztók igényeit is a lehető legmegfelelőbben lehessen kielégíteni a FAM egy kedvező megoldást biztosít a karbantartások és különböző szerelési munkálatok elvégzésére. A feszültségmentesítés elkerülésével jelentős teljesítmény kimaradásoktól lehet „megmenteni” az átviteli hálózatot, ami napjainkban, a villamosenergia-igény nagyfokú növekedésének korában kiemelt fontosságú.

A FAM kivitelezését számos szabvány és előírás határozza meg, tekintettel a feszültség alatti állapot veszélyességére. Természetesen a fő cél, hogy a munkálatokat teljesen biztonságosan, balesetmentesen, a szakemberek testi épségével lehessen elvégezni. Ehhez az egyik legalapvetőbb előírás a legkisebb megközelítési távolság (továbbiakban: MAD (minimum approach distance) mértékének megfelelő meghatározása és betartása. A távolság kiszámításáról és befolyásoló tényezőinek megismeréséről számos szabvány és cikk értekezik, amelyek közül ez a dolgozat két, a témában jelentős szerepet betöltő szabvánnyal foglalkozik (IEC 61472:2013, IEEE 516-2021) és a hozzájuk kapcsolódó cikkek és rendeletek egy részével.

A kutatás célja ezeknek a szabványoknak az összehasonlítása volt, annak érdekében, hogy megállapíthatóak legyenek a számítási módszerek eltéréseiből adódó különbségek, a legkisebb megközelítési távolság meghatározása során. Motivációnkat a FAM során bekövetkezett balesetek adták, hogy kutatásunkkal fényt deríthessünk ezek bekövetkezéseinek okaira, esetleg alátámaszthassuk, hogy a különböző eseteknél alkalmazott MAD nem volt megfelelő mértékű. Emellett szeretnénk bebizonyítani, hogy az egyes befolyásoló tényezők értékeinek módosításával, jelentősen változhat a MAD értéke is, tehát a FAM kivitelezése előtt célszerű az összes bemenő paraméter alapos áttanulmányozása, hogy a különböző munkavégzések helyszíneire illeszkedő védőtávolságok betartása megvalósulhasson.

2 A feszültség alatti munkavégzés (FAM)

A feszültség alatti munkavégzés, másnéven FAM lehetővé teszi, hogy a távvezetéseken szükséges beavatkozások végrehajtását, esetleges karbantartási munkálatok elvégzését, feszültségmentesítés nélkül hajtsák végre a szakemberek, annak érdekében, hogy ne történjen teljesítmény kiesés a villamosenergia hálózaton. A FAM további előnye, hogy a munkálatok előre tervezhetőek, ezzel előtérbe kerül az üzemzavar-megelőzési karbantartások biztonságos, valamint gazdaságos végrehajtása. A munkálatok rendszerint normál üzemállapotban kivitelezhetőek, így az ellátás biztosítása folyamatos marad. Figyelembevételre Magyarország átviteli hálózatának export-import viszonyait, a villamosenergia-kereskedelemben is nagy jelentősége van a feszültség alatti munkavégzésnek, ugyanis szintén tervezhetősége miatt a karbantartási munkálatok végrehajtása az energiaáramlás folyamatos fenntartása mellett is kivitelezhető, megakadályozva ezzel a kereskedelmi energiaszolgáltatás akadályoztatását.[1][2]

A FAM különböző technológiákat foglal magában többek között attól függően, hogy milyen feszültség szinten történik a munkavégzés. Magyarországon jellemzően kisméretű hálózatokon érintéssel, közepes feszültségű hálózatokon a távolból végzett és kombinált, nagyfeszültségű hálózatokon pedig a potenciálon végzett munkamódszert használják a szakemberek. A nagyfeszültségen alkalmazott potenciálon végzett munkamódszer lényege, hogy a karbantartást végző ember a villamos tér árnyékolására használt vezetőképes öltözkéneke potenciálját egy potenciálkapocs alkalmazásával a feszültség alatt álló részekhez rögzíti. Az ettől a ponttól különböző potenciálú részekről a feszültség szint függvényében meghatározott távolságok biztosítják a biztonságos munkavégzés kivitelezését.[1]

Ezek közül az egyik ilyen legfontosabb távolság, amit érdemes kiemelni, és amivel kutatásunk során foglalkoztunk, az a legkisebb megközelítési távolság, amely a munkavállaló bármely testrészének és a tőle különböző potenciálon lévő részek közötti legkisebb távolságot jelenti. Kutatásunk során ezt a távolságértéket, valamint a megállapításához szükséges paramétereket vizsgáltuk 72,5 kV fölötti AC hálózat esetén.

3 Balesetek FAM során

3.1 A Manitoba Hydro baleset

A Manitoba Hydro Kanada egyik legnagyobb integrált villamosenergia- és földgázelosztó vállalata. A cég már 1961 óta látja el energiaszolgáltatói feladatait Manitoba tartományban. Az Egyesült Államok középnyugati részén és Kanadában négy nagykereskedelmi piacon végez villamosenergia kereskedelmet, valamint 608 554 villamosenergia- és 293 256 földgázfogyasztónak nyújt szolgáltatást jelenleg is. [3]

3.1.1 Az 1997-es baleset

1997 októberében a Manitoba Hydro 550 kV-os váltakozó feszültségű távvezetékén végzett munka során egy FRP FAM rúd átívelt. A FAM rudak karbantartásának és vizsgálatának javítása ellenére 2002-ben hasonló munka során egy második átívelés történt. A legutóbbi villamos ív oka feltehetően az alacsony mértékű felszíni szennyeződés volt. Laboratóriumi vizsgálatok kimutatták, hogy az FRP FAM rúd szivárgási távolságának lényegesen nagyobbak kell lennie, mint a minimális légrés megközelítési távolságának.[4][5][6]

3.1.2 A baleset körülményei

A D602F 500 kV-os vonal a manitobai Winnipegtől mintegy 8 km-re északra fekvő Dorsey Station és a minnesotai Duluth közelében lévő Forbes között halad, 532,7 km hosszan. 1994-ben a Dorsey-től 225,98 km-re lévő Roseau-nál (Minnesota) soros kompenzációval egészítették ki ezt a vonalat. A soros kondenzátorokat vezetékhiba esetén megkerülik. Az átívelés előtt a D602F-en a Dorsey-nél rögzített terhelés 1328 MW +96 Mvar volt (a vonal Dorsey-i végén lévő 270 Mvar söntreaktor a mérési pont vonal felőli oldalán volt). Dorsey-nél a hiba előtti feszültség 521,8 kV rms volt, ami 301 kV nns fázis-föld feszültségnek felel meg. Egy későbbi vizsgálat azt mutatta ki, hogy a feszültség a hibahelyen 302,4 kV rms fázis-föld feszültség lett volna.[4][5][6]

3.1.3 Időjárási körülmények [6]

A winniepegi repülőtéren, a baleset helyszínétől mintegy 44 km-re nyugat-északnyugatra, 1997. október 27-én, közvetlenül a baleset előtt és után a következő óránkénti időjárási értékeket regisztrálták:

C Harmatpont °C RH% Szél km/h (átlag)

11:00 0.5 -7.0 58 50 (délről)

12:00 1,3 -6,7 56 54 (délről)

A winniepegi repülőtéren a nap során mért legnagyobb szélesebesség (széllökések) 76 km/h volt 12:00 órakor. A repülőtéren október 27-én 24 óra alatt nem jelentettek csapadékot.

A Manitoba Hydro fenntart egy időjárás állomást Dorseyben. 09:00 és 11:00 óra között a környezeti hőmérséklet körülbelül 0 °C volt, a relatív páratartalom pedig csökkenő tendenciát mutatott. 11:26 órakor a Dorsey meteorológiai állomás 975 mBar (97,5 kPa) légnyomást mért.

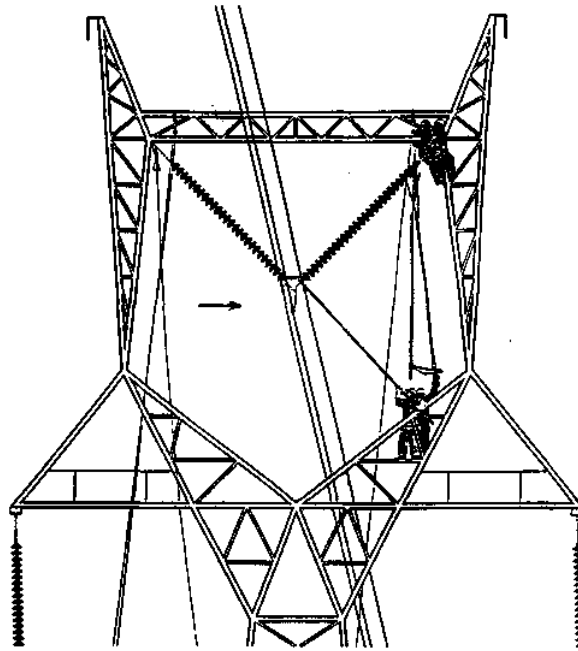
A baleset helyszínének pontos időjárás viszonyai nem ismertek. A jelentések szerint az égbolt tiszta volt, felhős időszakokkal. Bár a szél erős volt, nem jelentettek a levegőben szálló törmelékot. A torony koordinátái: 49.856718° szélesség és 96.556834° hosszúság. A helyszíntől 2400 km-es körzetben 1997. október 27-én nem volt villámlás.

Kiemelendő, hogy az 1997. október 18. és 25. közötti időszakban minden nap esett az eső vagy havazott a winniepegi repülőtéren. Ez alatt az időszak alatt a baleseti FAM rúd egy feszültség alatt álló vezetékzsákos pótkocsiban maradt, kivéve október 24-én (pénteken), amikor 500 kV-os munkát végeztek.

3.1.4 A baleset [6]

A baleset a Dorsey-től 66 km-re lévő D602F vonalon történt, miközben a felfüggesztő szigetelősálakat cserélték, amit az 1. ábra mutat. A helyszínen a vezeték kelet-nyugati irányú volt, az alvezetők pedig 1272 kcmil 54/19 ACSR Pheasant 1272 kcmil-esek és 35 mm átmérőjűek voltak. A három alvezető 457 mm távolságra helyezkedett el egymástól. A B-hez tartozó "V" húrszigetelőket kicserélték. A torony északi oldalán a B alvezetők alatt két vezeték munkás tartózkodott úgy, hogy a B-n végzett munkához használt FAM rúd nagyjából egy vonalban volt az egyik felfüggesztő szigetelősállal. Az első számú szerelő a torony északnyugat felőli oldalánál dolgozott, és a "V" felfüggesztő szigetelő északi kötegéhez tartozó hajlított csavart szerelte be egy 32 mm átmérőjű FAM rúddal, 4,88 m tiszta szigeteléssel. Miután ez megtörtént, a FAM rudat átadták a torony északkeleti sarkában lévő második számú szerelőnek. A második szerelő felemelte a FAM rudat, és egy racsnis rögzítéssel koronacsavart szerelt a

meghajlított csavarra. Ezután a rudat leeresztették, és a racsnis rögzítést lecserélték egy dugókulcsra. Amikor a második szerelő ismét felemelte a FAM rudat a fázisvezetőhöz, rövid időn belül átívelés következett be. A toronyban lévő másik három szerelő nem észlelte a balesetet, később azonban észrevették, hogy a sérült szerelő keze még mindig a FAM rudat szorongatta, és a rúd még mindig érintkezett a nagyfeszültségű vezetőkkel. A rúd ezután kiesett a szakember kezéből, ráesett a felső alvezetőre és lebegve maradt, amíg végül a szél hatására a földre nem esett.



1. ábra A baleset során végzett FAM ábrázolása

3.1.5 Vizsgálatok a baleset után [6]

A baleset után a FAM rudat megvizsgálva a felületén elszíneződés volt látható, amit az átívelés okozott. Ennek az első jeleit azonban a rúd nagyfeszültségű végétől 1,09 m-re észlelték, ami azt jelenti, hogy az ív ezen a zónán belül nem volt a felszín közelében. A felület elszíneződésének első jele a sérült szerelőhöz képest 7 óránál volt, de néhány centiméteren belül az elszíneződött foltok átkerültek az 1 órai pozícióba, és ebben a pozícióban maradtak, amíg a vonalvezető jobb keze a rúd nagyfeszültségű végétől 3,35 m-re került. A FAM rúdon keletkezett szintén egy sérülés a nagyfeszültségű végétől 4,15 m-re, amikor a toronnyal érintkezett. A rúd és oszlop találkozásából adódóan a tornyon is keletkezett egy sérülés. A szerelő bal keze a távvezeték oszloppal való érintkezési pont és a jobb keze között volt: Egy teleobjektívvel felszerelt fényképezőgép segítségével sikerült dokumentálni a legelső alvezető bilincsenél lévő lehetséges ívnyomokat.

A Manitoba Hydro-nál az 500 kV-os váltakozó feszültségű áram abszolút megközelítési határa 3,0 m.

3.1.6 A baleset vizsgálatának eredményei [6]

A vizsgálat azt mutatta, hogy az átívelés valószínűleg a legalsó alvezetőtől, 1,05 méteres légrétegen keresztül az FRP rúd felszínéig terjedt. Az ív ezután a földig tartó távolság hátralévő részében a FAM rúd felszínének közelében maradt. A teljes körű vizsgálatok kimutatták, hogy a koronakisülések és a hozzá tartozó U.V. kibocsátások időszakosan jelentkeztek az egyes alvezetők bilincseiből, valamint a dugókulcs telepítőjéből és az FRP rúd nagyfeszültségű végéből. A koronakisülések a fémrészekből kifelé irányultak az elektromos mező irányába és nem torzította őket sem a szél, sem a rúd jelenléte. A kisülésben lévő levegő térfogatának átmérője a legalsó alvezetéknél az U.V. kibocsátások alapján körülbelül 300 mm-re becsülhető. A koronakisülésben lévő levegő térfogata a földi elektródnál ehhez képest kicsi volt.

Valószínű, hogy az FRP rúd felülete (szennyeződés és nedvesség hatására) kellően vezetőképesé vált ahhoz, hogy a negatív félciklus alatt lehetővé tegye a pozitív felületi töltés elektrosztatikus indukcióját. Bár a baleseti rúd felületén nem találtak jelentősebb szennyeződést, a felülete szabálytalan (hosszanti karcolások) és hidrofóbítása pedig gyenge volt.

3.1.6.1 Az eredmények alapján hozott intézkedések

1. A levegőben szálló törmelékre vagy jelentős szennyeződésre utaló jelek hiányában arra a következtetésre jutottak, hogy az átívelés elsődleges oka az FRP rúd felületének állapota volt, amelyhez a különleges időjárási körülmények is hozzájárultak. Bár a rudakat a gyártó által ajánlott módon karbantartották, felületi állapotuk nem felelt meg az IEEE Std. 978-1984 szabványban foglalt ajánlásoknak. A sima, fényes felület fenntartása lehetővé teszi, hogy a FAM rudak megfeleljenek ezeknek az előírásoknak, és segít biztosítani, hogy a rúd felülete biztonságos állapotban maradjon.

2. A meghozott korrekciós intézkedések a következők:

a) A feszültség alatt álló vezetékeknél használt FAM rudakat az IEEE Std. 978-1984 szabványnak megfelelő éves villamos vizsgálatoknak kell alávetni. Azokat a rudakat, amelyek nem felelnek meg ennek a követelménynek, újra kell fényezni.

b) A feszültség alatt álló vezetékeknél használt rudakat legalább hetente villamos vizsgálatnak kell alávetni egy olyan kézi tesztelő készülékkel, amelynek alkalmazását úgy módosították, hogy az IEEE Std. 978 vizsgálati módszerrel kapott eredményeknek jobban megfeleljenek. Azokat az FRP rudakat, amelyek nem felelnek meg ennek a vizsgálatnak, meg kell tisztítani, újra kell fényezni és újból megvizsgálni.

c) 230 kV-os és annál nagyobb feszültségű vezetékeknél a feszültség alatti munkavégzést fel kell függeszteni, ha a szél maximális sebessége széllesekben meghaladja a 40 km/h-t. Kisebb feszültség szinteknél nagyobb szélesség-határértékeket határoztak meg.

d) 80% a maximális relatív páratartalom minden feszültség alatti munkavégzés során, 500 kV váltakozó- vagy egyenfeszültségnél és minden csupasz kézi munkánál, bármilyen feszültség szinten.

e) Tűzálló ruházatot kell viselni minden feszültség alatti munkavégzés során. 500 kV váltakozó- vagy egyenfeszültségnél teljes vezetőképes védőruhát kell viselni.

f) Csak tiszta, nem szennyezett kesztyűt szabad használni az FRP rudak kezeléséhez.

4 IEC 61472:2013 szabvány [7][8]

Az IEC 61472:2013-as európai szinten elfogadott szabvány a feszültség alatti munkavégzést és a legkisebb megközelítési távolságot szabályozza a 72,5 kV-tól 800 kV-ig terjedő feszültségszinteken, utóbbira számítási módszert is tartalmaz. Kutatásunk során ezt a számítási módszert vizsgáltuk, ennek részleteiről lesz szó a továbbiakban.

4.1 A legkisebb megközelítési távolság definíciója

MAD: A legkisebb távolság a levegőben a munkavállaló bármely testrésze, beleértve a közvetlenül kézben tartott tárgyakat (kivéve a feszültség alatti munkavégzésre alkalmas szerszámokat), és a különböző elektromos potenciállal rendelkező rész(ek) között.

4.2 A legkisebb megközelítési távolság számításának menete

A MAD értéke két fő komponensből adódik, a villamos távolságból, ami a vizsgált hálózattól függő paraméter, valamint az ergonómiai távolságból, ami az esetek nagyrésztében egy fix érték.

$$D_A = D_U (K_S = 1) + D_E \quad (1)$$

Ahol

D_A - legkisebb megközelítési távolság [m]

D_U - villamos távolság [m]

D_E - ergonómia távolság, általában 0,3 [m]

4.2.1 Statisztikai túlfeszültség

Az U_2 statisztikai túlfeszültség olyan tranzienst túlfeszültség csúcserték, amelynek túllépése két százalékos statisztikai valószínűséggel következik be. Ennek a paraméternek az értékei a (2) és (3) képletekből számíthatóak:

$$U_{e2} = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \right) \cdot U_S \cdot u_{e2}$$

(2)

$$U_{p2} = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \right) \cdot U_S \cdot u_{p2}$$

(3)

Ahol

U_{e2} - 2 százalékos statisztikai túlfeszültség fázis és föld között [kV]

U_{p2} - 2 százalékos statisztikai túlfeszültség két fázis között [kV]

U_S - a hálózat két fázisa között megjelenő legnagyobb feszültség [kV]

u_{e2} - 2 százalékos statisztikai túlfeszültség egységnyi értékre vetítve fázis és föld között [-]

u_{p2} - 2 százalékos statisztikai túlfeszültség egységnyi értékre vetítve két fázis között [-]

Ha az u_{p2} értéke nem áll rendelkezésünkre, akkor az u_{e2} ismeretében a következő képlett segítségével számítható.

$$u_{p2} = 1,35 \cdot u_{e2} + 0,45$$

(4)

4.2.2 Résszilárdság

$$U_{90} = K_S \cdot U_2$$

(5)

Ahol

U_{90} - olyan impulzus vizsgálati feszültség csúcserték, amelynél a szigetelés meghatározott feltételek mellett kilencven százalékos valószínűséggel ellenáll a feszültségnek [kV]

K_S - statisztikai biztonsági faktor [-]

Az (5) egyenletbe behelyettesítve a (2)és (3) egyenleteket, az alábbi összefüggéseket kapjuk.

$$U_{e90} = K_S \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) \cdot U_S \cdot U_{e2} \quad (6)$$

$$U_{p90} = K_S \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) \cdot U_S \cdot U_{p2} \quad (7)$$

Ahol

U_{e90} - 90 százalékos statisztikai impulzus ellenállás fázis és föld között [kV]

U_{p90} - 90 százalékos statisztikai impulzus ellenállás két fázis között [kV]

4.2.3 A résszilárdságot befolyásoló különböző szempontokat egyesítő tényező

$$K_t = k_s \cdot k_g \cdot k_a \cdot k_f \cdot k_i \quad (8)$$

Ahol

K_t - a résszilárdságot befolyásoló különböző szempontokat egyesítő tényező [-]

4.2.3.1 k_s - átlagos statisztikai eltérési tényező [-]

A statisztikai eltérési tényező figyelembe veszi az átütési feszültség statisztikai jellegét, azonban, ha ennek értéke nem ismert a rések kialakítását reprezentáló vizsgálatokból, akkor 5%-os szórást feltételezve, 0,936-os értékkel számolhatunk.

4.2.3.2 k_g – réstényező [-]

A réstényező figyelembe veszi a hézagok kialakításának a levegő dielektromos szilárdságára gyakorolt hatását. Ha a távvezeték struktúrája ismert, akkor további számításokkal meghatározható a pontos érték, azonban ennek hiányában is elvégezhetőek a számolások közelítő értékek használatával. Fázis és föld között $k_g = 1,2$, míg két fázis között $k_g = 1,45$.

4.2.3.3 k_a – Környezeti tényező [-]

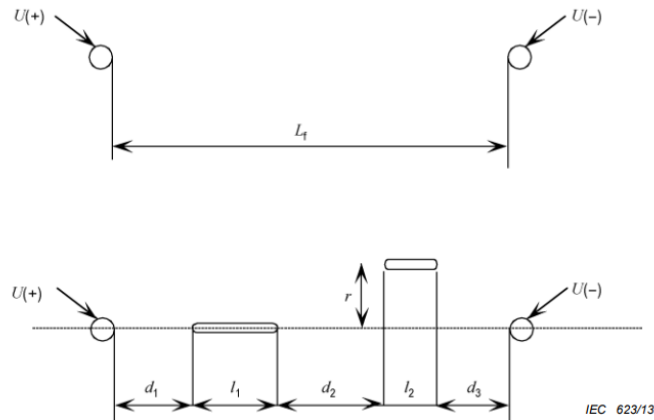
A környezeti tényező a levegő sűrűségét veszi figyelembe, amit a levegő hőmérséklete és páratartalma mellett leginkább a tengerszint feletti magasság befolyásol, így ennek függvényében választhatjuk ki a megfelelő értéket az 1. táblázat alapján.

1. táblázat A tengerszint feletti magasságokhoz tartozó környezeti tényezők

Tengerszint feletti magasság [m]	k_a környezeti tényező
0	1,000
100	0,995
300	0,983
500	0,972
1000	0,941
1500	0,909
2000	0,875
2500	0,841
3000	0,805

4.2.3.1 k_f – lebegő vezetőképes tárgy tényező

A lebegő vezetőképes objektumok csökkenthetik, vagy akár növelhetik is a rés villamos térerősségét a mező torzulása révén. A k_f tényező a fennmaradó rés hosszától és a vezető tárgynak a rés tengelyétől való r oldaltávolságától függ. Ezt mutatja meg a 2. ábra, illetve a számítási módja alább látható.



2. ábra A lebegő vezetőképes tárgy és a rés elhelyezkedése

Számítási módja fázis-föld esetén:

$$D = L_f - F \quad (9)$$

$$\beta = \frac{F}{D + F} \quad (10)$$

Számítási módja két fázis esetén:

$$P = L_f - F \quad (11)$$

$$\beta = \frac{F}{P + F} \quad (12)$$

Ahol

D – a fennmaradó légrés hossza fázis-föld között [m]

P - a fennmaradó légrés hossza két fázis között [m]

L_f – a légrés hossza eredetileg [m]

F –a légrésben lévő összes lebegő vezetőképes tárgy hosszának összege a rés tengelyének irányában [m]

β - a lebegő tárgyak teljes hosszának aránya az eredeti légrés hosszához képest [-
]

Ezek alapján a k_f tényező már meghatározható a 2. táblázat alapján. Értéke 0,75 és 1 között változik, azonban, ha a jelen lévő lebegő vezetőképes tárgyakra vonatkozóan nem állnak rendelkezésünkre konkrét kísérleti adatok, akkor számolhatunk a legbiztonságosabb, $k_f = 0,75$ értékkel.

2. táblázat A fázis és föld közötti rések értékei

Fázis és föld közötti rések					
β^b	L_f^a [m]				k_f
	-tól	-ig	-tól	-ig	
0,1	-	0,9	3,9	-	1
	0,9	3,9	-		0,95
0,15	-	0,5	4,7	-	1
	0,5	1	3,3	4,7	0,95
	1	1,2	2,7	3,3	0,9
	1,2	2,7	-		0,85
0,2	-	0,4	4,9	-	1
	0,4	0,9	3,7	4,9	0,95
	0,9	1	3,1	3,7	0,9
	1	1,2	2,6	3,1	0,85
	1,2	2,6	-		0,8
0,25	-	0,3	5,1	-	1
	0,3	0,8	3,8	5,1	0,95
	0,8	0,9	3,2	3,8	0,9
	0,9	1,1	2,8	3,2	0,85
	1,1	1,3	2,4	2,8	0,8
	1,3	2,4	-		0,75

4.2.3.2 k_i – sérült szigetelő tényező

A sérült szigetelő tényező figyelembe veszi a sérült szigetelők vagy a sérült szigetelőrészek hatását a legkisebb megközelítési távolságra.

$$k_i = 1 - 0,8 \cdot k_d \cdot \frac{A_d}{A_0} \quad (13)$$

Ahol

k_d – a sérült szigetelő részek állapotát jellemző tényező [-]

$k_d = 1$ edzett üveg szigetelő esetén

$k_d = 0,75$ porcelán szigetelő esetén

$k_d = 1,25$ kompozit szigetelő esetén

A_0 - a sérülésmentes szigetelő hossza vagy a sérülésmentes szigetelőegységek száma

A_d - a sérült szigetelő hossza vagy a sérült egységek száma az A_0 hosszúságú szigetelőben

4.2.4 Villamos távolság

A korábban meghatározott értékekből már könnyedén kiszámítható a villamos távolság az alábbi képlet segítségével.

$$D_U = 2,17 \cdot \left(e^{\frac{U_{90}}{1080 \cdot K_t}} - 1 \right) + F \quad (14)$$

4.2.5 Kockázatok figyelembevétele

A feszültség alatti munkavégzés kockázatainak figyelembevétele kiemelt szerepet játszik a védőtávolság meghatározása során, így egy biztonsági távolsággal növeljük meg a villamos távolság értékét. Ennek a tényezőnek a számítására két lehetőséget kínál a szabvány.

Az egyik lehetőség az, hogy a D_U villamos távolságot egy fix értékű D_E ergonomiai távolsággal növeljük meg, melynek értéke általában 0,3 méter. Ez esetben a

résszilárdság képletében szereplő K_S statisztikai biztonsági tényezőt 1-nek vesszük. A második lehetőség szerint számolva, a villamos távolsághoz nem adódik hozzá az ergonómiai távolság, viszont a statisztikai biztonsági tényezőt 1,1-nek vesszük, ami szorzó tényezőként növeli a résszilárdság értékét, ezzel a legkisebb megközelítési távolságot is. A kapott eredményekre mindig teljesül az alábbi egyenlőtlenség:

$$D_A = D_U(K_S = 1) + D_E > D_U(K_S = 1,1) \quad (15)$$

Tehát, az ergonómiai távolságot használva minden esetben nagyobb lesz az eredményül kapott védőtávolság. A számítási módszer megválasztásakor figyelembe kell venni, hogy milyen körülmények között zajlik a feszültség alatti munkavégzés, ami miatt szükséges lehet a nagyobb biztonsági távolságra. Ilyen befolyásoló tényező lehet az, hogy a szakember milyen jellegű eszközt használ a szerelés során, valamint a pozíciója rögzítettsége, hogy van-e lehetősége felállni, kihajolni, ezzel nagyobb eséllyel véletlen „rossz” mozdulatot tenni.

5 IEEE 516-2021 szabvány [9]

Az IEEE 516-2021-es szabvány a feszültség alatt álló távvezetékek karbantartási módszereinek az alkalmazásához nyújt útmutatást, melyet többek között Amerikában is alkalmaznak. Az IEC szabványhoz hasonlóan tartalmaz számítási módszereket a védőtávolságok meghatározásához különböző feszültség szinteken, amik közül mi a 72,5 kV fölötti, fázis és föld közötti, AC rendszerekre alkalmazott módszert vizsgáltuk és a továbbiakban részletezzük.

5.1 Megközelítési távolság fogalmak IEEE szerint

a) Legkisebb légszigetelési távolság (továbbiakban MAID - minimum air insulation distance):

Az a legkisebb távolság a levegőben egy feszültség alatt álló elektromos berendezés és/vagy a hálózaton dolgozó szakember teste között, amely különböző potenciálon van. Ennek értéke egyenlő vagy nagyobb lesz, mint a MAD, ha a részben lebegő, vezetőképes tárgy is található. A MAID csupán egy elektromos komponens, biztonsági tényezőt nem tartalmaz.

b) Legkisebb megközelítési távolság (MAD):

A legkisebb légszigetelési távolság (MAID) plusz egy biztonsági tényező a véletlen mozgások miatt.

c) Fázis-föld szerszámokra vonatkozó legkisebb megközelítési távolság (továbbiakban MAD for Tools - minimum approach distance for line-to-ground tools):

Egy feszültség alatt álló rész és a legközelebbi földpotenciálon lévő pont közötti legrövidebb távolság alapján mért legkisebb szükséges szigetelési távolság hossza. A MAD for Tools véletlen mozgásnak kitett szerszámokra vonatkozik.

d) Legkisebb szerszám szigetelési távolság (továbbiakban MTID - minimum tool insulation distance):

Egy feszültség alatt álló rész és a legközelebbi földpotenciálon lévő pont közötti legrövidebb távolság alapján mért legkisebb szükséges szigetelési távolság hossza,

figyelembe véve a lebegő vezetőképes tárgyakat is. Az MTID azokra a szerszámokra vonatkozik, melyeknél nincs lehetőség véletlen mozgásra (rögzített tárgy, pl.: fémtüske).

5.2 Megközelítési távolságok számításának menete

$$D_{MAID,L-G} = 0,3048 \cdot (C_1 + a) \cdot T_{L-G} \cdot V_{L-G} \cdot A \quad (16)$$

$$D_{MAD,L-G} = 0,3048 \cdot (C_1 + a) \cdot T_{L-G} \cdot V_{L-G} \cdot A + M \quad (17)$$

$$D_{MADforTools,L-G} = 0,3048 \cdot (C_1 \cdot C_2 + a) \cdot T_{L-G} \cdot V_{L-G} \cdot A + M \quad (18)$$

$$D_{MTID,L-G} = 0,3048 \cdot (C_1 \cdot C_2 + a) \cdot T_{L-G} \cdot V_{L-G} \cdot A \quad (19)$$

Ahol

D - távolság [m]

C_1 - 0,01 [ft/kV] rms

C_2 - szerszámtényező [%]

a - levegő telítettségi tényező [-]

T_{L-G} – a fázis és föld között várható legnagyobb tranzienstúlfeszültség egységben kifejezve [per unit]

V_{L-G} – a fázis és föld között kialakuló legnagyobb üzemi feszültség [kV]

A – magasságkorrekciós tényező [-]

M – a véletlen mozdulatok kockázatát kiküszöbölő biztonsági tényező [m]

5.2.1 Szerszámtényező

A C_2 szerszámtényező a légrétegben lévő szigetelőszerszámok hatását növeli további 6%-kal, valamint az immateriális javakra további 4%-kal. A 6%-os tényező a

szerkezet és az elektróda kialakításától, valamint a szerszám felületének állapotától függően további 2- 20%-kal nőhet

A számítások során $C_2 = 1,1$, tehát 110%-os közelítő értékkel számolhatunk.

5.2.2 Levegő telítettségi tényező

A levegő telítettségi tényező a kapcsolási túlfeszültség légtelítettségi tényezője, a légtelítettség kompenzálására szolgáló korrekciós arány, a távolság és kV arányában kifejezve.

A legtelítettségi tényező meghatározásához szükség van a V_{peak} , legnagyobb tranziens feszültség meghatározására

$$V_{L-G,peak} = V_{L-G,rms} \cdot T_{L-G} \cdot \sqrt{2} = 1,414 \cdot TOV_{L-G} \quad (20)$$

Ahol

V_{peak} - fázis és föld között mért legnagyobb feszültség, amely egy tranziens esemény során a légréseken keresztül jelentkezik [kV]

TOV_{L-G} – fázis és föld között fellépő tranziens túlfeszültség [kV]

A legnagyobb tranziens feszültség értéke alapján a következőképpen számítható ki a levegő telítettségi tényező.

a) Ha V_{peak} kisebb, mint 635 kV,

$$a = 0 \quad (21)$$

b) Ha V_{peak} nagyobb, mint 635,1 kV és kisebb, mint 915 kV

$$a = (V_{peak} - 635) \cdot 0,00000714 \quad (22)$$

c) Ha V_{peak} nagyobb, mint 915,1 kV és kisebb, mint 1050 kV

$$a = (V_{peak} - 915) \cdot 0,00000714 + 0,002 \quad (23)$$

d) Ha V_{peak} nagyobb, mint 1050,1 kV és kisebb, mint 1600 kV

$$a = (V_{peak} - 1050) \cdot 0,000008 + 0,003$$

(24)

5.2.3 Fázis és föld között várható legnagyobb tranziens túlfeszültség

A várható legnagyobb tranziens túlfeszültség a munkaterületen várható két százalékos statisztikai túlfeszültség és a rendszerben megjelenő legnagyobb tranziens feszültségének a hányadosa.

$$T = \frac{V_2}{V_{L-G,peak}}$$

(25)

Ahol

V_2 – 2%-os statisztikai túlfeszültség [kV]

Azonban, ha nem áll rendelkezésünk a fenti paraméterek valamelyike, akkor bizonyos feltételek mellett a szabványban megadott táblázatból kiválasztható a megfelelő T érték a két fázis között megjelenő feszültség alapján.

3. táblázat A tranziens túlfeszültség értékei

V_{L-L} - fázis-fázis feszültség [kV]	T - Tranziens túlfeszültség [p.u.]
≥ 362	3,0
363-550	2,4
551-800	2,0

5.2.4 Magasságkorrekciós tényező

A magasságkorrekciós tényező a tengerszint feletti magasságtól függő egy feletti tényező, melynek értéke a szabványban ismertetett táblázat alapján választható ki.

4. táblázat A magasságkorrekciós tényező értékei

Tengerszint feletti magasság [m]	A – magasságkorrekciós tényező [-]
0-900	1,00
901-1200	1,01
1201-1500	1,05
1501-1800	1,08
1801-2100	1,11
2101-2400	1,14
2401-2700	1,17
2701-3000	1,20
3001-3600	1,25
3601-4200	1,30
4201-4800	1,35
4801-5400	1,39
5401-6000	1,44

5.2.5 A véletlen mozdulatok kockázatát kiküszöbölő biztonsági tényező

Az M biztonsági tényező a MAD és MAD for Tools villamos védőtávolságokhoz adódik hozzá, hogy a véletlen mozdulatok se okozhassanak balesetet a munkafolyamat közben. 72,5 kV felett érke M = 0,3 m.

6 Magyar szabályozások

A FAM Magyarországon is elterjedt gyakorlat, melyet egyaránt alkalmaznak kis-, közép- és nagyfeszültségű hálózatszinteken.

6.1 MSZ EN 61472:2013

Hazánkban a feszültség alatti munkavégzést, valamint a legkisebb megközelítési távolság meghatározásának módját az MSZ EN 61472:2013-as szabvány határozza meg, ami egy az egyben a 4. fejezetben részletezett IEC 61472:2013 számítási elvét alkalmazza. [10]

6.2 72/2003. GKM rendelet [11]

Ennek ellenére a hatályban lévő 72/2003. GKM rendelet melléklete a Feszültség Alatti Munkavégzés Biztonsági Szabályzatát fogalmazza meg, melynek 2. bekezdése az előírt távolságokat tartalmazza táblázatos formában, feszültség szintekre bontva. Ezek az értékek a 5. táblázatban láthatóak.

5. táblázat A legkisebb megközelítési távolság értékei

U_n	Legkisebb megközelítési távolság [m]	
	fázis-föld között	fázis-fázis között
$\leq 1 \text{ kV}$	0,3	N/A
1-20 kV	0,6	N/A
20-35 kV	0,7	N/A
120 kV	0,9	1,2
220 kV	1,6	2,0
400 kV	2,7	3,7
750 kV	4,3	7,6

6.2.1 A rendelet szerinti definíció

Munkavégzés legkisebb védőtávolsága (MAD): az a levegőben mérhető legkisebb munkavégzési védőtávolság, melyet a munkát végző személy bármely testrésze vagy a kezében tartott vezető anyagú szerszám és a tőle eltérő potenciálú (feszültség alatt álló vagy földelt) részek között kell betartani ahhoz, hogy áramütés ne következhesse be.

A beavatkozó szerelőnek földpotenciálú munkaállásról végzett munkáknál a feszültség alatt álló csupasz szerkezeti részekről, potenciálon végzett munkáknál a földelt részekről és az eltérő potenciálú feszültség alatt álló csupasz szerkezeti részekről kell a legkisebb megközelítési távolságot tartania.

6.3 Az MSZ EN 61472:2013 szabvány és a 72/2003. GKM rendelet értékeinek vizsgálata fázis-föld rendszerre 72,5 kV fölött

Hazánkban a FAM során a rendelet szerinti értékek használata leegyszerűsíti a munkafolyamatot, azonban ennek hátránya, hogy az adott munkát jellemző paramétereket, melyek nagy valószínűséggel befolyásolják a védőtávolságot, nem veszi figyelembe. Ilyen tényező lehet a szigetelő állapota vagy a lebegő vezetőképes tárgyak jelenléte.

Az IEC modellje alapján számításokat végeztünk a magyar szabványos feszültség szintekre fázis-föld között, vizsgálva azokat a paramétereket is, amik befolyásolják a legkisebb megközelítési távolságot. Az eredményeket összevetettük a 72/2003. GKM rendelet szerinti értékekkel, ebből következtetéseket vontunk le. Az itt használt tényezők számításának módját a 4. fejezetben részleteztük, így ezekre nem térünk ki külön.

6.3.1 Legkisebb megközelítési távolság ép rendszer esetén

A vizsgálat során sérülésmentes, Magyarországra jellemző hálózat adataival végeztük el a számítást. A rendszer legnagyobb üzemi feszültségének a névleges feszültséghez képesti 5%-os növekedést tekintjük. A tengerszint feletti magasság Magyarország területének 98%-án 400 méter alatti [12], így 100 és 300 méter közötti környezeti tényezővel számoltunk, továbbá edzett üvegből készült szigetelők használatát

feltételeztük [13]. A szabvány alapján kapott eredményeket és a rendeletben meghatározott értékeket, valamint ezek egymáshoz képesti arányát az 6. táblázat tartalmazza.

6. táblázat A távolság változása százalékos értékben

U_n [kV]	D_r [m]	$D_{IEC,ép}$ [m]	Százalékos változás
120	0,9	0,75	-17%
220	1,6	1,19	-26%
400	2,7	2,18	-19%
750	4,3	5,14	20%

Ahol

U_n – a rendszer névleges feszültsége [kV]

D_r – rendelet szerint meghatározott legkisebb megközelítési távolság [m]

$D_{IEC,ép}$ – IEC szabvány szerinti legkisebb megközelítési távolság ép hálózatra számítva [m]

Az összehasonlításból az látszik, hogy a 72/2003. GKM rendelet táblázatos értékeihez képest az IEC szabvány alapján számolt eredmények nagyjából 20%-kal alacsonyabbak, azonban 750 kV esetén nem, itt a számított eredménye 20%-kal magasabb lett, ami a feszültséghez mérten jelentős különbség.

6.3.2 Legkisebb megközelítési távolság sérült szigetelő esetén

A FAM gyakorlata bizonyos esetekben amiatt válik szükségessé, mert a távvezeték egyik eleme valamilyen okból kifolyólag megsérült [14], amit az üzembiztos működés érdekében ki kell javítani. A vizsgálat során azt elemeztük, hogy a rendelet szerinti értékek megfelelnek-e abban az esetben is, ha a távvezeték szigetelői megsérültek.

Két opciót vizsgáltunk, amikor a szigetelő $\frac{1}{10}$ -d, illetve amikor az $\frac{1}{5}$ -d része sérült meg. A számolás során használt adatok megegyeznek az ép rendszer adataival, egyedül a

szigetelő állapotát jellemző paramétereket változtattuk. Az eredmények az előző példához hasonlóan az 7. táblázatban láthatóak.

7. táblázat A távolság változása százalékos értékben, sérült szigetelő esetén

U_n	D_r [m]	$D_{IEC,1/10}$ [m]	Százalékos változás
120 kV	0,9	0,8	-11%
220 kV	1,6	1,3	-19%
400 kV	2,7	2,44	-10%
750 kV	4,3	5,98	39%
U_n	D_r [m]	$D_{IEC,1/5}$ [m]	Százalékos változás
120 kV	0,9	0,87	-3%
220 kV	1,6	1,465	-8%
400 kV	2,7	2,87	6%
750 kV	4,3	7,52	75%

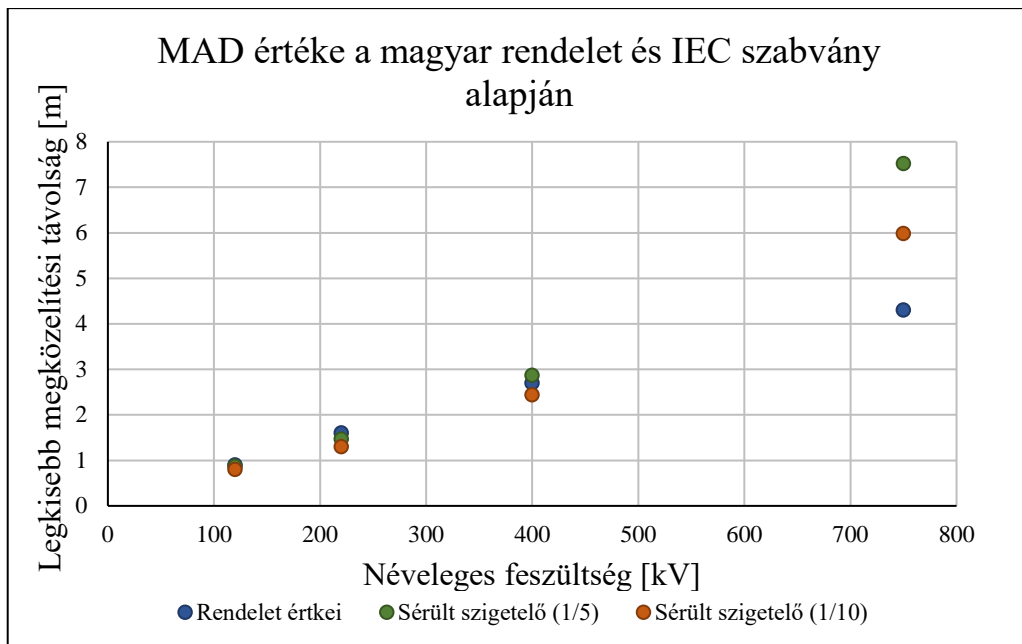
Ahol

$D_{IEC,1/10}$ - IEC szabvány szerinti legkisebb megközelítési távolság abban az esetben, ha a szigetelő $\frac{1}{10}$ -d része sérült [m]

$D_{IEC,1/5}$ - IEC szabvány szerinti legkisebb megközelítési távolság abban az esetben, ha a szigetelő $\frac{1}{5}$ -d része sérült [m]

A legkisebb megközelítési távolság az alacsonyabb feszültség szinteken még mindig a szabvány szerinti érték felett van, azonban a 400 és 750 kV-os hálózatokon a rendelet szerinti távolságok már a szükséges mérték alatt vannak. A 1. diagram jól szemlélteti a védőtávolságok közötti eltérés mértékét.

1. diagram A védőtávolságok közötti eltéréseknek mértéke



A 120 kV-os hálózaton a három érték között nincs nagy eltérés, azonban a feszültségszinteken fölfelé haladva egyre nagyobb a differencia. 750 kV esetén a legkisebb értékű védőtávolság a rendelet szerinti táblázatból adódik, ami 4,3 méter, a legmagasabb pedig 7,4 méter, ami abban az esetben szükséges, ha a távvezeték szigetelőinek az $\frac{1}{5}$ -d része sérült. A két érték között 75%-os növekedés van, ami FAM során jelentős különbséget jelent a biztonságban és nagy kockázatot a munkavégző szakemberre nézve.

6.3.3 Legkisebb megközelítési távolság lebegő vezetőképes tárgy jelenléte esetén

Az IEC szerinti számítási módszer tartalmaz egy fontos tényezőt, ami a legrésben jelen lévő lebegő vezetőképes tárgyak hatását veszi figyelembe. Ennek értéke 0,75 és 1 között változik, azonban a szabvány kitér arra az esetre is, amikor a pontos érték meghatározásához szükséges adatok nem állnak rendelkezésre. Ebben az esetben $k_f = 0,75$ -tel kell a számításokat elvégezni, ami a nagyobb biztonság irányába befolyásolja a MAD értékét.

A vizsgálat során a 72/2003. GKM rendeletben meghatározott táblázatos értékeket ezúttal a 0,75-ös lebegő tárgy tényezővel számolt IEC szerinti távolságokkal hasonlítottuk össze és vontunk le következtetéseket.

A számoláshoz használt adatok itt is változatlanok, a szigetelők sérülésmentesek, csupán a k_f tényezőt csökkentettük. Az így kapott eredményeket a 8. táblázat tartalmazza.

8. táblázat A távolság változása százalékos értékben, lebegő vezetőképes tárgy esetén

U_n [kV]	D_r [m]	$D_{IEC,k_f=0,75}$ [m]	Százalékos változás
120	0,9	1,096	22%
220	1,6	1,98	24%
400	2,7	4,28	59%
750	4,3	13,43	212%

Ahol

$D_{IEC,k_f=0,75}$ - IEC szabvány szerinti legkisebb megközelítési távolság abban az esetben, ha a k_f tényező értéke 0,75 [m]

A számítás eredményeként nagyságrendekkel nagyobb értékeket kaptunk a rendelethez képest. 120 kV-os hálózaton a szabvány szerinti távolság 22%-kal nagyobb, 750 kV esetén pedig már 212%-kal haladja meg a 72/2003. GKM rendeletben szereplő értéket.

Az összehasonlítások alapján elmondhatjuk, hogy a táblázatot tartalmazó rendelet sérülésmentes rendszerre vizsgálva az esetek nagyrésztében helytálló, azonban 400 és 750 kV-os hálózatokra érdemes a szabvány szerinti számolási módot alkalmazni. Sérült szigetelő, illetve lebegő vezetőképes tárgyak légrésben való jelenléte esetén pedig kiemelten fontos, hogy az IEC számítási módszerével is ellenőrizzük a szükséges távolságot, ugyanis nagy eséllyel a várttól eltérő eredményt kapunk.

Összességében megállapíthatjuk, hogy a 72/2003. GKM rendeletben szereplő távolságok meghatározásához valószínűleg ép hálózatot és az országra jellemző normál körülményeket feltételeztek, így nem számol semmilyen befolyásoló tényezővel, amiket az MSZ EN 61472:2013-as szabvány figyelembe vesz.

7 A két szabvány összehasonlítása

Az IEEE és az IEC szabványok között szembeűnő az a különbség, hogy mind a paraméterek, mind pedig az összefüggések között nagy eltérés fedezhető fel. Bizonyos tényezőket az egyik szabvány figyelembe vesz, míg a másik nem, amiből adódóan felmerül a kérdés, hogy melyik szabvány alkalmazása biztonságosabb, mik azok a paraméterek, amik valóban elengedhetetlenek a legkisebb megközelítési távolság meghatározása során. Az elemzés során egy valós, sérülésmentes távvezeték adatait felhasználva összehasonlítottuk a két szabvány számítási módszerével kapott fázis-föld eredményeket és következtetéseket vontunk le belőle.

A távvezeték adatait a MAVIR Zrt. szolgáltatta számunkra, ami alapján a két modell bemeneti paraméterei az alábbiak szerint alakulnak. A 9. táblázat az IEC, a 10. táblázat pedig az IEEE adatait tartalmazza. Az összefüggéseket és a tényezők meghatározásának módját az 4. és 5. fejezetben fejtettük ki részletesen, így itt már csak az eredményeket tüntetjük fel.

9. táblázat Az IEC szabvány számítási modelljének bemenő paraméterei

IEC 61472-2013 számítási modell bemenő paraméterei	
k_d	1
A_d	0
A_0	1
k_s	0,936
k_g	1,2
k_a	0,995
k_f	1
U_s	420 kV
U_{e2}	2,2
F	0
D_E	0,3 m
K_s	1

10. táblázat Az IEEE szabvány számítási modelljének bemenő paraméterei

IEEE 516-2021 számítási modell bemenő paraméterei	
V_{L-G}	420 kV
A	1
T_{L-G}	2,4
C_1	0,01 ft/kV
C_2	1,1 (110%)

Ezek alapján a számított védőtávolságok értékeit a 11. táblázat tartalmazza.

11. táblázat A védőtávolságok értékei a szabványok számítási modelljei alapján

IEC 61472-2013	Védőtávolság [m]
MAD	2,18
IEEE 516-2021	Védőtávolság [m]
MAD	2,312
MAID	2,012
MTID	2,189
MAD for Tools	2,489

A kapott eredmények között nem alakult ki látványos eltérés, ép rendszer esetén a védőtávolságok közel azonosak.

7.1 Paraméterek, amik különböznek a két szabvány esetén

A legjelentősebb eltérés a szigetelő állapotára vonatkozó tényezőknél jelentkezett, ugyanis az IEC szabvány figyelembe veszi ezeket, míg az IEEE nem. Az európai szabvány szerinti MAD értéke sérült esetben a szigetelő anyagától is függ, ez azonban semmilyen formában nem jelenik meg az IEEE modelljében.

Bár a szabványok számítási modelljei ép rendszert vizsgálva korrelálnak egymással, de ha a szigetelőt bármilyen mértékű sérülés éri, az Egyesült Államokban alkalmazott módszer nem számol plusz kockázattal, ami alapján feltételezhető, hogy az IEEE szabványt alkalmazó területeken, a FAM során bekövetkező balesetek száma ennek eredményeképpen magasabb, mint más számítási módszert alkalmazó országokban, államokban.

8 Érzékenységtanalízis

A szabványok és az egyes számolási módszerek alapos megismerése után célunk az volt, hogy megvizsgáljuk az egyes paraméterek befolyásoló erejét, amely hatással lehet a MAD értékére. Ehhez először a képleteket Excel, majd Matlab kódok formájában is megírtuk, hogy a számítások automatikusan működhessenek. Ezek után a szabványokban található példafeladatok adatait importáltuk be a programokba, visszaellenőrizve, hogy valóban helyesek-e számításaink. A kezdeti nehézségek után, amit az okozott, hogy az IEC szabványt később módosították az egyik képletben szereplő elírás miatt, amire csak hosszas irodalomkutatás után sikerült rájönnünk, végül sikerült mind Excelben, mind pedig Matlabban előállítanunk egy olyan programot, ami néhány bemenő paraméter megadása után képes megállapítani a MAD értékét.

8.1 Az IEC szabvány érzékenységtanalízise

A minta számolási példában szereplő bemeneti paraméterek:

- $K_s = 1,0$
- $k_s = 0,936$
- $k_g = 1,2$
- $k_a = 0,941$
- k_f és $k_i = 1,0$
- $U_S = 525 \text{ kV}$
- $u_{e_2} = 2,2$
- $F = 0$
- $D_E = 0,3 \text{ m}$

Ezen kezdeti feltételek alapján az IEC szabvány által meghatározott MAD értéke:

$$D_U = 2,787 \text{ m} (= 2,8 \text{ m})$$

(26)

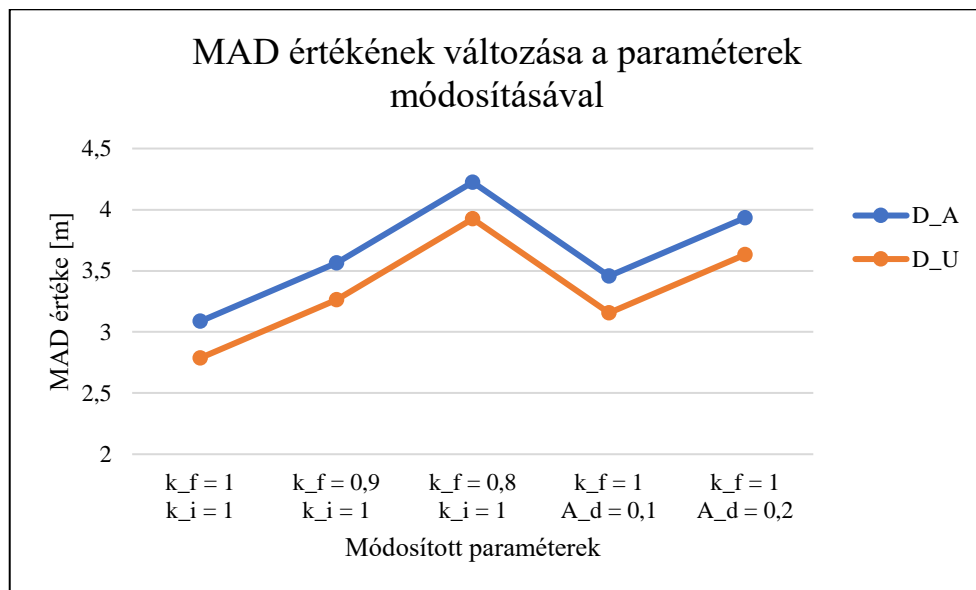
$$D_A = 2,8 \text{ m} + 0,3 \text{ m} = 3,1 \text{ m}$$

(27)

8.1.1 A paraméterek módosítása

Ebben a részben bemutatjuk, hogy az IEC szabványban meghatározott MAD számítása hogyan változik az egyes bemeneti paraméterek módosításával. Ennek tudatában lehetőség nyílik arra, hogy az egyes távvezetékek elhelyezkedéséből, illetve állapotából következtetni lehessen egy esetleges karbantartási vagy egyéb szerelési munkálatok beavatkozásához szükséges FAM biztonságot feltételeinek körülményeire. Ezt szem előtt tartva a munkavégzés tervezhetővé válik, ami nagyban segíti a szakemberek munkáját.

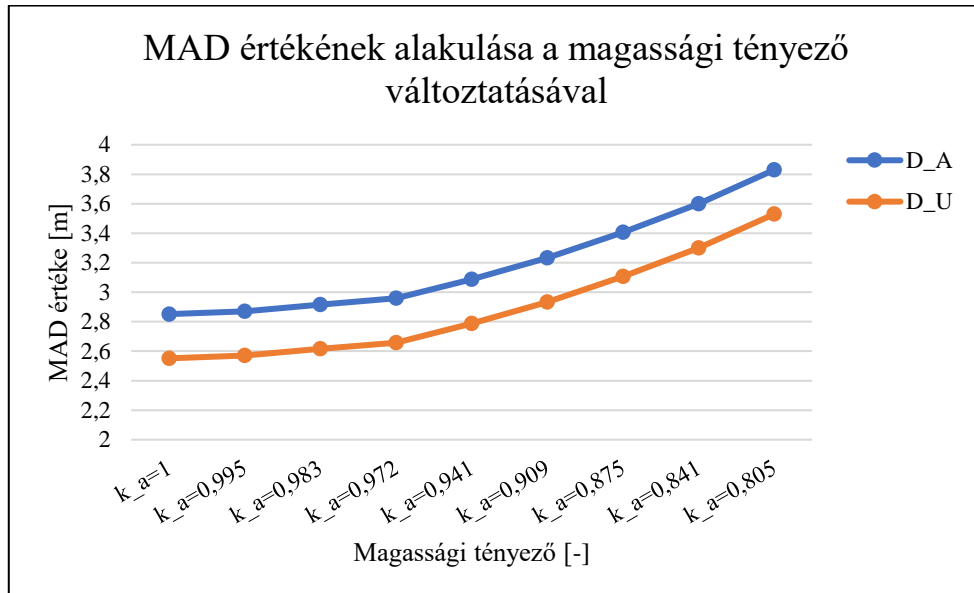
2. diagram A MAD értékének változása lebegő vezetőképes tárgy, illetve a sérült szigetelő tényezőjének változtatásával



A 2. diagram kirajzolása során a lebegő vezetőképes tárgy (k_f), a sérült szigetelő (k_i), illetve a sérült szigetelő hosszának vagy az A_0 hosszúságú szigetelőben lévő sérült egységek számának (A_d) tényezőjét módosítottuk, amely így a távvezeték normál állapotától eltérő helyzetek hatását mutatja be a MAD értékére. Ezen a diagramon jól látszik, hogy az egyes paraméterek változásával, amely a normál üzemi állapottól való eltérést jelenti, a MAD értéke megnövekszik, tehát a munkát végző szakemberek kénytelenek nagyobb megközelítési távolságot tartani saját biztonságuk fenntartásának érdekében. A k_i érték módosítása természetesen csak abban az esetben lehetséges, ha feltételezett helyzet modellezése sérült szigetelővel történik. Ehhez szükséges az A_d

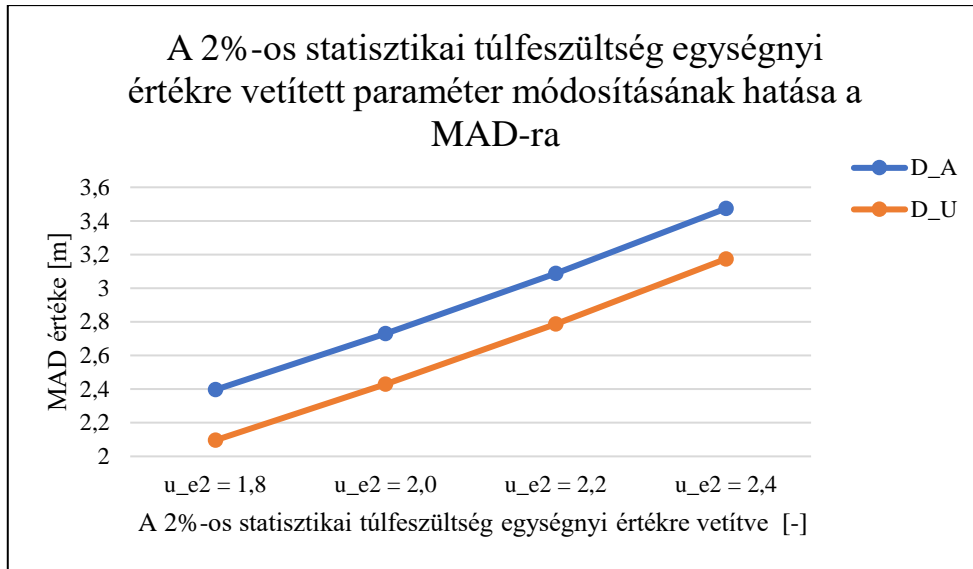
értékének módosítása is, hogy ennek a szigetelőnek a paraméterei pontosabban legyenek meghatározva, ez ugyanis a számítási folyamat elengedhetetlen része.

3. diagram A MAD értékének változása a magassági tényező függvényében



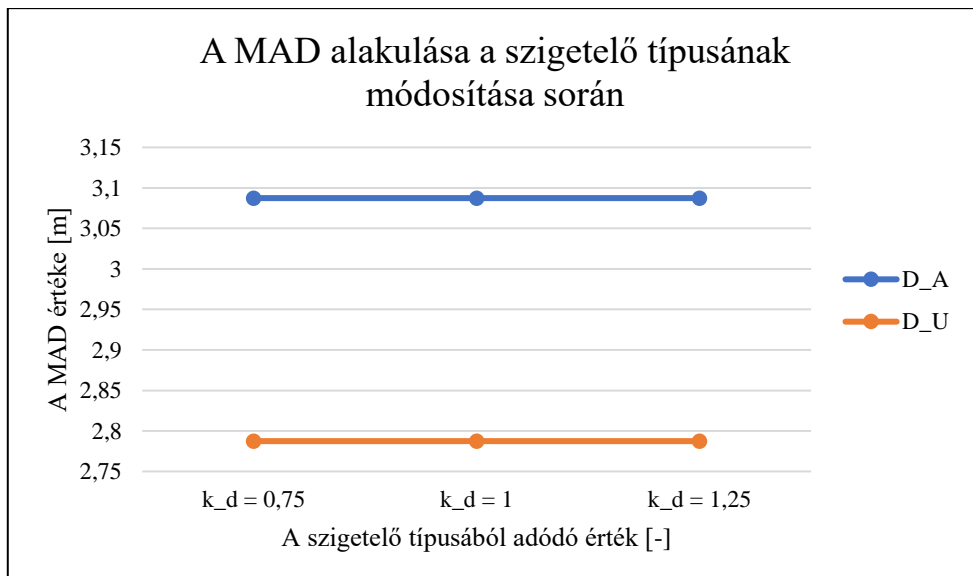
A 3. diagram ábrázolása során a környezeti tényező értékét módosítottuk annak érdekében, hogy képet kaphassunk arról, hogy a távvezeték tengerszint feletti elhelyezkedése milyen mértékben befolyásolja a MAD értékét. Ebben az esetben egy teljesen ép, sérülésmentes állapotot vettünk figyelembe, hogy valóban csak a magassági tényező befolyásolóerejét lehessen vizsgálni. A k_a tényező változása úgy alakul, hogy minél nagyobb a távvezeték tengerszint feletti magassága, annál kisebb ez az érték. Tengerszinten a $k_a = 1$, míg tengerszint felett 3000 méteren pedig 0,805 az értéke, az IEC szabvány meghatározása alapján. Ezek alapján a diagramról megállapítható, hogy semmilyen más érték változásának, csak a környezeti tényező hatásának köszönhetően, minél magasabban helyezkedik el egy távvezeték, annál nagyobb megközelítési távolságot szükséges tartani a FAM során.

4. diagram A MAD értékének változása a túlfeszültség egységnyi értékének változtatásával



A 4. diagramon a 2%-os statisztikai túlfeszültség egységnyi értékre vetített tényezőjének módosításával járó hatást rajzoltuk ki. Ezt az értéket általában a szakirodalom 2,2-nek határozza meg, hivatkozva az IEC szabványra, ahol szintén ennyinek nevezi meg általános esetben. [15] Ugyanakkor fontos megvizsgálni, hogy ennek a paraméternek a módosításával hogyan változik a MAD értéke. A diagram alapján minél nagyobb ez az érték, annál nagyobb megközelítési távolságot szükséges tartania a munkavégző szakembernek.

5. diagram A MAD értékének változása különböző szigetelőtípusok alkalmazása során



Elemzésünk során az IEC szabvány még egy tényezőjét vizsgáltuk, amely pedig a szigetelőtípusok befolyásolóereje volt. A szabvány három lehetséges szigetelőtípushoz határoz meg különböző k_d értéket, amelyek a következők:

- porcelán szigetelő ($k_d = 0,75$)
- edzett üveg szigetelő ($k_d = 1$)
- kompozit szigetelő ($k_d = 1,25$)

A diagramról leolvasható, hogy ép, teljes mértékben sérülésmentes szigetelők esetében a szigetelők típusa nem befolyásolja a legkisebb megközelítési távolságot. Ez úgy következik, hogy a MAD értékének megállapítása során a számolásnál ez a tényező csak akkor kap szerepet, ha a szigetelő sérült, és az egyenletben, mint szorzótényező szerepel. Abban az esetben, ha a szigetelő sérülésmentes, a szorzat eredménye nulla, a k_d értékétől függetlenül, hiszen már az A_d érték miatt nullával lesz egyenlő az egyenlet ezen része.

8.2 Az IEEE szabvány érzékenységtanulmány

A minta számolási példában szereplő bemeneti paraméterek:

- $V_{L-L} = 348 \text{ kV}$
- $m = 4400 \text{ ft}$
- $T = 2,8$

Ezen kezdeti feltételek alapján az IEEE szabvány által meghatározott védőtávolságok értéke:

$$D_{MAIDL-G} = 2,007 \text{ m} \tag{28}$$

$$D_{MTIDL-G} = 2,187 \text{ m} \tag{29}$$

$$D_{MADL-G} = 2,312 \text{ m} \tag{30}$$

$$D_{MAD_{forTools_{L-G}}} = 2,492 \text{ m} \quad (31)$$

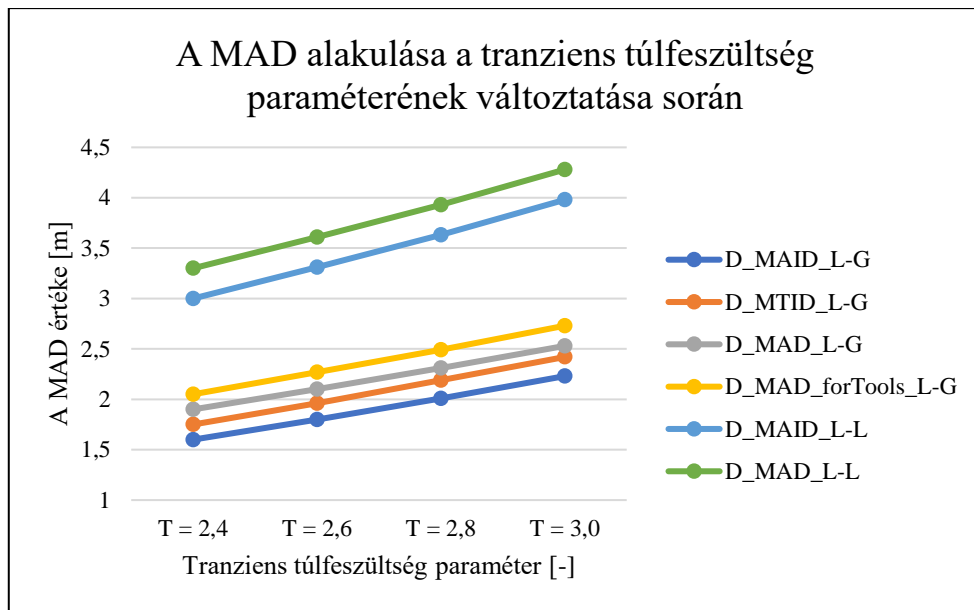
$$D_{MAID_{L-L}} = 3,634 \text{ m} \quad (32)$$

$$D_{MAD_{L-L}} = 3,934 \text{ m} \quad (33)$$

8.2.1 A paraméterek módosítása

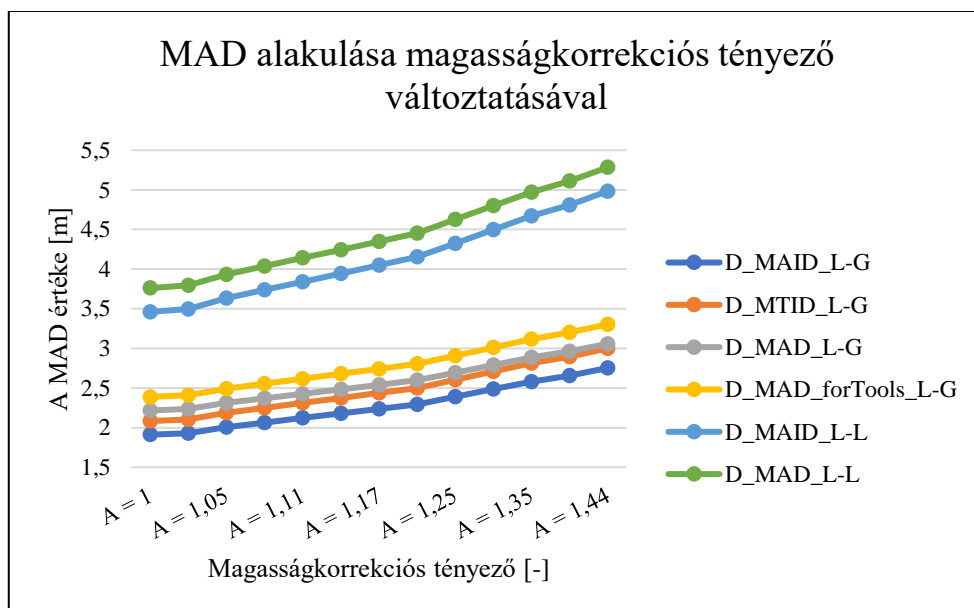
Az IEEE szabvány esetében hasonló érzékenységanalízist végeztünk, mint az IEC szabvány esetében. Célunk itt is az volt, hogy a paraméterek módosításával képet alkothassunk a számolási lépések során kapott egyenletek változásáról, és hogy ez miképp befolyásolja a MAD értékét. Ez a szabvány több megközelítési értéket határoz meg, ugyanakkor kevesebb tényezőt vesz figyelembe, így jelentősen kevesebb bemeneti paramétert deklarál. Ennek eredményeképpen két jelentősebb esetet vizsgáltunk meg, a tranziens túlfeszültség, valamint magasságkorrekciós tényező alakulását. Mindkét esetben ugyanúgy diagramok segítségével ábrázoltuk a MAD értékének változását. Az egyes paraméterek befolyásoló erejéről kapott információ a feszültség alatti munkavégzés tervezhetőségét segíti elő, amely a szakemberek biztonságát és a munka kivitelezését, valamint sikerességét helyezi előtérbe.

6. diagram A MAD értékének változása a tranziens túlfeszültség függvényében



A 6. diagram ábrázolása során a tranziens túlfeszültség (T) értékét módosítottuk, különböző eseteket megvizsgálva. Ebben az esetben megállapítható, hogy minél nagyobb ennek a paraméternek az értéke, annál nagyobb megközelítési távolságot kell tartani a munkavégzés során, akárcsak az IEC szabvány u_{e2} tényezőjének esetében. Ez minden egyes MAD értékre igaz, egymástól való értékbeli eltéréseiket a számolás során előforduló egyéb befolyásoló tényezők okozzák.

7. diagram A MAD értékének változása a magasságkorrekciós tényező függvényében



A 7. diagram kirajzolása során az IEC szabványhoz hasonlóan a magasságkorrekciós tényező változtatásával alakuló MAD értékét ábráztuk. Hasonlóan a 3. diagramhoz, itt is jól kivehető, hogy a tengerszint feletti magasság növekedésével a MAD értéke is növekszik. Ebben az esetben is egy teljesen ép távvezetékkel vettünk alapul, így csak a magasságkorrekciós tényező van hatással a megközelítési távolság értékére. A különböző MAD értékek azonban tartják egymáshoz képesti eltéréseiket, növekedésük mértéke megegyezik majdnem minden esetben.

9 Összefoglalás

Kutatásunk során sikeresen elemeztük a IEC 61472-2013 és a IEEE 516-2021 szabványok legkisebb megközelítési távolságára vonatkozó számítási modelljeinek összefüggéseit és paramétereit 72,5 kV fölött, melyeket Matlabban és Excelben is elkészítettünk, ezzel az értékek kiszámítását automatizáltuk.

Összehasonlítottuk a Magyarországon érvényes MSZ EN 61472-2013 IEC-n alapuló szabvány és 72/2003. (X.29) GKM rendelet fázis és föld közötti MAD-ra vonatkozó szabályozásait, majd FAM során különböző körülményeket feltételezve vizsgáltuk a kapott eredményeket, ami alapján megállapítottuk, hogy sérülésmentes esetben a szabvány alapján számított eredmények nagyrészt a rendeletben megszabott értékek alatt vannak, azonban 400 és 750 kV-os hálózat esetén már jelentős különbségek alakulhatnak ki. Ha a normál üzemi állapottól eltérő esetet feltételezünk a két szabályzat értékei nem korrelálnak egymással, amiből arra lehet következtetni, hogy a rendeletben megszabott értékek sérülésmentes, normál üzemi állapotra vannak méretezve, így FAM kivitelezése előtt érdemes az adott munkapontra a szabvány szerinti értéket meghatározni és alkalmazni a biztonságos munkavégzés érdekében.

Elemeztük az IEEE és IEC szabványok közötti különbségeket, valamint számítást végeztünk egy valós, sérülésmentes példára, melynek eredményei a két esetben közel azonosak voltak. Ezek alapján megállapítottuk, hogy bár ép rendszerre számítva az eredmények helytállóak, de sérült szigetelő esetén jelentős különbségek alakulhatnak ki, ugyanis az IEEE szerinti modell semmilyen formában nem veszi figyelembe a szigetelők állapotát és anyagát.

Ezek után érzékenységtanulmányt végeztünk, mely során a két szabványban szereplő paraméterek védőtávolságokra gyakorolt hatását vizsgáltuk. Az IEC modelljében a lebegő vezetőképes tárgy, valamint a szigetelő állapotára vonatkozó tényezők mellett elemeztük a magassági és a 2%-os statisztikai túlfeszültség egységnyi értékre vetített tényezőjét is. Az eredmények alapján elmondható, hogy lebegő vezetőképes tárgy jelenlétében, a magasság növekedésével, sérült szigetelő esetén, valamint a 2%-os statisztikai túlfeszültség növekedése mellett a MAD értéke nőni fog. Az IEEE szabvány kapcsán a tranziens túlfeszültséget és a magasságkorrekciós tényezőt vizsgáltuk, amik növekedése szintén növeli a megközelítési távolságok értékét.

Összességében a kutatás során elértük annak célját, miszerint összehasonlítsuk és elemezzük az egyes szabványok számítási modelljeit és értékeit. Az vizsgálatok során megállapítottuk az összefüggések közti főbb eltéréseket és ezeknek a védőtávolságokra gyakorolt hatását, így következtetéseket vontunk le az egyes szabványok hiányosságairól, ami magyarázatot ad a közismert baleseti statisztikákra is.

Köszönetnyilvánítás

Ez a dolgozat nem jöhetett volna létre a MAVIR Zrt. közreműködése nélkül. Adatszolgáltatásuk és támogatásuk nagyban hozzásegített minket ahhoz, hogy számításainkat valós, magyarországi távvezetékeken végezhessük el.



Valamint ezúton szeretnénk megköszönni konzulenseinknek Dr. Göcsei Gábornak és Dr. Németh Bálintnak segítő munkájukat kutatásunk során. Türelmükkel és támogatásukkal nagyban megkönnyítették munkánkat, hogy ez a TDK dolgozat elkészülhessen.

Irodalomjegyzék

- [1] Göcsei Gábor, Dr. Németh Bálint, Dr. Berta István - A szakszemélyzet fokozott védelme nagyfeszültségű rendszereken végzett feszültség alatti munka során, Doktori (PhD) értekezés, 2016
- [2] Z. Bertalan, J. Kiss, Z. Á. Tamus - Technical Economic Feasibility Study on Live Line Maintenance on Hungarian Transmission Network, 11th International Conference on Live Maintenance, Budapest, Hungary, 2014.
- [3] <https://www.hydro.mb.ca/>
- [4] W. McDermid, D. R. Swatek and J. C. Bromley, "FRP hot stick flashovers during EHV live line work," Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference (Cat. No.03CH37480), 2003, pp. 7-11, doi: 10.1109/EICEMC.2003.1247844.
- [5] W. McDermid, D. R. Swatek and J. C. Bromley, "Progress in resolving flashovers of FRP hot sticks during EHV live line work," Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2004, pp. 548-551, doi: 10.1109/ELINSL.2004.1380690.
- [6] W. McDermid, J. C. Bromley, D. J. Dodds and D. R. Swatek, "Investigation of the flashover of a FRP hot stick while in use for live line work at 500 kV," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 3, pp. 1158-1166, July 1999, doi: 10.1109/61.772387.
- [7] IEC 61472:2013 Live working - Minimum approach distances for a.c. systems in the voltage range 72,5 kV to 800 kV - A method of calculation
- [8] IEC 61472:2013/COR1:2015 Live working - Minimum approach distances for a.c. systems in the voltage range 72,5 kV to 800 kV - A method of calculation
- [9] IEEE 516-2021 IEEE Guide for Maintenance Methods on Energized Power Lines
- [10] MSZ EN 61472:2013 Feszültség alatti munkavégzés. A legkisebb megközelítési távolságok 72,5 kV-tól 800kV-ig terjedő feszültségtartományú váltakozó áramú rendszerek esetében. Számítási módszer (IEC 61472:2013)
- [11] Melléklet a 72/2003. (X. 29.) GKM rendelethez 2.3. bekezdés
- [12] <https://www.arcanum.com/hu/online-kiadvanyok/TenyekKonyve-tenyek-konyve-1/regiok-1842E/magyarorszag-es-regioi-18440/magyarorszag-nehany-foldrajzi-adata-18441/>
- [13] A MAVIR ZRt. átviteli hálózati távvezetékei
- [14] Barnóth Péter – Feszültség alatti munkavégzés szerepe a villamos energia szolgáltatás minőségének javítására, Szakdolgozat (2019)

- [15] Belkhir, S., Moulai, H., Ainouche, T., & Soukeur, F. (2012). High Voltage Live Works: Comparative Safe Distance Approach Calculation. *Renewable energy & power quality journal*, 667-671.

Ábrajegyzék

1. ábra A baleset során végzett FAM ábrázolása.....	10
2. ábra A lebegő vezetőképes tárgy és a rés elhelyezkedése	17
1. diagram A védőtávolságok közötti eltéréseknek mértéke	31
2. diagram A MAD értékének változása lebegő vezetőképes tárgy, illetve a sérült szigetelő tényezőjének változtatásával	37
3. diagram A MAD értékének változása a magassági tényező függvényében ...	38
4. diagram A MAD értékének változása a túlfeszültség egységnyi értékének változtatásával.....	39
5. diagram A MAD értékének változása különböző szigetelőtípusok alkalmazása során.....	39
6. diagram A MAD értékének változása a tranziens túlfeszültség függvényében	42
7. diagram A MAD értékének változása a magasságkorrekciós tényező függvényében.....	42
1. táblázat A tengerszint feletti magasságokhoz tartozó környezeti tényezők ...	16
2. táblázat A fázis és föld közötti rések értékei	19
3. táblázat A tranziens túlfeszültség értékei.....	25
4. táblázat A magasságkorrekciós tényező értékei	26
5. táblázat A legkisebb megközelítési távolság értékei	27
6. táblázat A távolság változása százalékos értékben	29
7. táblázat A távolság változása százalékos értékben, sérült szigetelő esetén	30
8. táblázat A távolság változása százalékos értékben, lebegő vezetőképes tárgy esetén	32
9. táblázat Az IEC szabvány számítási modelljének bemenő paraméterei.....	34
10. táblázat Az IEEE szabvány számítási modelljének bemenő paraméterei.....	34
11. táblázat A védőtávolságok értékei a szabványok számítási modelljei alapján	35

Függelék

A kutatás során használt Matlab kódok

```
% IEEE Std 516 - 2021

%% Conversion

% m_m: location at above sea level [m]
% m_f: location at above sea level [ft]
% m_in: location at above sea level [in]

if exist ('m_m')
    m_f = m_m/0.3048;
else
    m_m = m_f*0.3048;
end
m_in = m_f*12;

%% Constants

% C_1: factor in ft/kV determined from 60 Hz tests on rod-to-rod gap
%      at 100 kV rms per foot of tool length withstand (100 kV
rms/ft)
% C_2: insulating tool factor

C_1 = 0.01; %[ft/kVrms]
C_2 = 1.10; %[-]

%% Tables

% V_LL: ac voltage line-to-line (rms)
% M_in: inadvertent movement factor [in]
% M_m: inadvertent movement factor [m]
% M_cm: inadvertent movement factor [cm]
% m_m: location at above sea level [m]
% A: altitude correction factor

% M - Inadvertent movement factor
if (0.301 <= V_LL) && (V_LL <= 0.750) %[kV]
    M_in = 12;
    M_m = 0.30;
    M_cm = 30;
else
    if (0.751 <= V_LL) && (V_LL <= 72.5) %[kV]
        M_in = 24;
        M_m = 0.61;
        M_cm = 61;
    else
        if (72.6 <= V_LL) && (V_LL <= 800) %[kV]
            M_in = 12;
            M_m = 0.30;
            M_cm = 30;
        end
    end
end
end
```

```

% A - Altitude correction factor
if (0 < m_m) && (m_m < 900)
    A = 1.00;

    disp('<strong>The altitude correction factor:</strong>');
    A
else
    if (901 < m_m) && (m_m < 1200)
        A = 1.02;

        disp('<strong>The altitude correction factor:</strong>');
        A
    else
        if (1201 < m_m) && (m_m < 1500)
            A = 1.05;

            disp('<strong>The altitude correction
factor:</strong>');
            A
        else
            if (1501 < m_m) && (m_m < 1800)
                A = 1.08;

                disp('<strong>The altitude correction
factor:</strong>');
                A
            else
                if (1801 < m_m) && (m_m < 2100)
                    A = 1.11;

                    disp('<strong>The altitude correction
factor:</strong>');
                    A
                else
                    if (2101 < m_m) && (m_m < 2400)
                        A = 1.14;

                        disp('<strong>The altitude correction
factor:</strong>');
                        A
                    else
                        if (2401 < m_m) && (m_m < 2700)
                            A = 1.17;

                            disp('<strong>The altitude correction
factor:</strong>');
                            A
                        else
                            if (2701 < m_m) && (m_m < 3000)
                                A = 1.20;

                                disp('<strong>The altitude
correction factor:</strong>');
                                A
                            else
                                if (3001 < m_m) && (m_m < 3600)
                                    A = 1.25;

                                    disp('<strong>The altitude
correction factor:</strong>');

```

```

A
else
    if (3601 < m_m) && (m_m < 4200)
        A = 1.30;

        disp('<strong>The altitude
correction factor:</strong>');

4800)
        A
        else
            if (4201 < m_m) && (m_m <
                A = 1.35;

                disp('<strong>The
altitude correction factor:</strong>');

< 5400)
            A
            else
                if (4801 < m_m) && (m_m
                    A = 1.39;

                    disp('<strong>The
altitude correction factor:</strong>');

(m_m < 6000)
                A
                else
                    if (5401 < m_m) &&
                        A = 1.44;

disp('<strong>The altitude correction factor:</strong>');
                    A
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
end
end
end
end
end
end
end

%% Calculation

%           V_LG: ac voltage line-to-ground (rms)
%           V_LL: ac voltage line-to-line (rms)
%           V_LG_peak: switching surge or transient overvoltage peak or
crest
%           voltage (line-to-ground)
%           T: maximum anticipated per-unit transient overvoltage
(TOV)
%           a: switching surge air saturation factor
%           C_1: factor in ft/kV determined from 60 Hz tests on rod-
to-rod gap
%           at 100 kV rms per foot of tool length withstand (100
kV rms/ft)

```

```

%           C_2: insulating tool factor
% D_MAID_LG_in: minimum air insulation distance (also DMAID in
%               equations) (line-to-ground) [in]
%   D_MAID_LG_m: minimum air insulation distance (also DMAID in
%               equations) (line-to-ground) [m]
% D_MTID_LG_in: minimum tool insulation distance (also DMTID in
%               equations) (line-to-ground) [in]
%   D_MTID_LG_m: minimum tool insulation distance (also DMTID in
%               equations) (line-to-ground) [m]
% D_MAD_LG_in: minimum approach distance (also DMAD in
%              equations) (line-to-ground) [in]
%   D_MAD_LG_m: minimum approach distance (also DMAD in
%              equations) (line-to-ground) [m]
% D_MAID_LL_in: minimum air insulation distance (also DMAID in
%               equations) (line-to-line) [in]
%   D_MAID_LL_m: minimum air insulation distance (also DMAID in
%               equations) (line-to-line) [m]
% D_MTID_LL_in: minimum tool insulation distance (also DMTID in
%               equations) (line-to-line) [in]
%   D_MTID_LL_m: minimum tool insulation distance (also DMTID in
%               equations) (line-to-line) [m]
% D_MAD_LL_in: minimum approach distance (also DMAD in
%              equations) (line-to-line) [in]
%   D_MAD_LL_m: minimum approach distance (also DMAD in
%              equations) (line-to-line) [m]

% AC voltage line-to-ground (rms):
V_LG = V_LL/sqrt(3); %[kV]
fprintf('<strong>AC voltage line-to-ground (rms) [kV]:</strong>')
V_LG

% Peak line-to-ground voltage:
V_LG_peak = sqrt(2)*V_LG*T;
fprintf('<strong>Peak line-to-ground voltage [kV]:</strong>')
V_LG_peak

% Switching surge air saturation factor:
if V_LG_peak < 635 %[kV]
    a = 0;
else
    if (635.1 < V_LG_peak) && (V_LG_peak < 915) %[kV]
        a = (V_LG_peak - 635)/140000;
    else
        if (915.1 < V_LG_peak) && (V_LG_peak < 1050) %[kV]
            a = (V_LG_peak - 645)/135000;
        else
            if (1050.1 < V_LG_peak) && (V_LG_peak < 1600) %[kV]
                a = (V_LG_peak - 675)/125000;
            end
        end
    end
end

fprintf('<strong>Switching surge air saturation factor:</strong>');
a

% D_MAID_LG_in
D_MAID_LG_in = (C_1+a)*V_LG*T*A*12;
D_MAID_LG_round_in = ceil(D_MAID_LG_in);

```

```

fprintf('<strong>Minimum air insulation distance line-to-ground
[in]:</strong>');
D_MAID_LG_in

% D_MAID_LG_m
D_MAID_LG_m = D_MAID_LG_in*0.0254;
fprintf('<strong>Minimum air insulation distance line-to-ground
[m]:</strong>');
D_MAID_LG_m

% D_MTID_LG_in
D_MTID_LG_in = (C_1*C_2+a)*V_LG*T*A*12;
D_MTID_LG_round_in = ceil(D_MTID_LG_in);
fprintf('<strong>Minimum tool insulation distance [in]:</strong>');
D_MTID_LG_in

% D_MTID_LG_m
D_MTID_LG_m = D_MTID_LG_in*0.0254;
fprintf('<strong>Minimum tool insulation distance [m]:</strong>');
D_MTID_LG_m

% D_MAD_LG_in
D_MAD_LG_in = D_MAID_LG_in + M_in;
D_MAD_LG_round_in = D_MAID_LG_round_in + M_in;
fprintf('<strong>Minimum approach distance [in]:</strong>');
D_MAD_LG_in

% D_MAD_LG_m
D_MAD_LG_m = D_MAD_LG_in*0.0254;
fprintf('<strong>Minimum approach distance [m]:</strong>');
D_MAD_LG_m

% D_MAD_forTools_LG_in
D_MAD_forTools_LG_in = D_MTID_LG_in + M_in;
D_MAD_forTools_LG_round_in = D_MTID_LG_round_in + M_in;
fprintf('<strong>Minimum approach distance for Tools
[in]:</strong>');
D_MAD_forTools_LG_in

% D_MAD_forTools_LG_m
D_MAD_forTools_LG_m = D_MAD_forTools_LG_in*0.0254;
fprintf('<strong>Minimum approach distance for Tools
[m]:</strong>');
D_MAD_forTools_LG_m

% D_MAID_LL_m
if V_LL <= 242 %[kV]
    D_MAID_LL_m = (8/(4623/((1.35*T+0.45)*V_LL)-1))*A;
else
    D_MAID_LL_m = (8/(4875/((1.35*T+0.45)*V_LL)-1))*A;
end

disp('<strong>Minimum air insulation distance (line-to-line)
[m]:</strong>')
D_MAID_LL_m

% D_MAID_LL_in
D_MAID_LL_in = D_MAID_LL_m * 39.36966;
D_MAID_LL_round_in = ceil(D_MAID_LL_in);

```

```

disp('<strong>Minimum air insulation distance (line-to-line)
[in]:</strong>')
D_MAID_LL_in

% D_MAD_LL_m
D_MAD_LL_m = D_MAID_LL_m + M_m;
disp('<strong>Minimum approach distance (line-to-line)
[m]:</strong>')
D_MAD_LL_m

% D_MAD_LL_in
D_MAD_LL_in = D_MAID_LL_in + M_in;
D_MAD_LL_round_in = D_MAID_LL_round_in + M_in;
disp('<strong>Minimum approach distance (line-to-line)
[in]:</strong>')
D_MAD_LL_in

% IEC METHOD OF CALCULATION OF MAD FOR TOOLS FOR LIVE WORKING

%% Damaged insulator factor

% k_i: damaged insulator factor
% k_d: coefficient characterizing the average state of the damaged
%       insulators
% A_d: length of damaged insulator or number of damaged units in an
%       insulator of length A_O, not shunted by long arcing horn or
grading ring
% A_O: length of undamaged insulator or number of undamaged insulator
%       units not shunted by long arcing horn or grading ring

%% Constants
% k_d = 1 -> for toughened glass insulators
% k_d = 0-1 -> for porcelain insulators, with k_d = 0.75 as an
average value
% k_d = 1.25 -> for composite insulators affected by conductive or
%       semiconductive damages

%% Calculation
k_i = 1-0.8*k_d*(A_d/A_O);

disp('<strong>The damaged insulator factor:</strong>');
k_i

%% Factor combining different considerations influencing the strength
of the gap

% k_S: standard statistical deviation factor
% k_g: gap factor
% k_a: atmospheric factor
% k_f: floating conductive object factor
% k_i: damaged insulator factor

%% Constants
k_S = 0.936;
% k_g = 1.45; -> phase to phase
k_g = 1.20;% -> phase to earth
% k_a = 0.995;
% k_f = 0.75;

```

```

%% Calculation
K_t = k_S*k_g*k_a*k_f*k_i;

fprintf('<strong>The factor combining different considerations
influencing \nthe strength of the gap:</strong>');
K_t

%% Statistical overvoltage

% U_e2: two per cent statistical overvoltage between phase and earth
% u_e2: per unit value of the two per cent statistical overvoltage
phase
%       to earth
% U_S: highest voltage of a system between two phases
% U_p2: two per cent statistical overvoltage between two phases
% u_p2: per unit value of the two per cent statistical overvoltage
between
%       two phases

%% Calculation
u_p2 = 1.35*u_e2+0.45;
U_e2 = (sqrt(2)/sqrt(3))*U_S*u_e2;
U_p2 = (sqrt(2)/sqrt(3))*U_S*u_p2;

disp('<strong>The statistical overvoltage between phase and
earth:</strong>');
U_e2
disp('<strong>The statistical overvoltage between two
phases:</strong>');
U_p2
disp('<strong>If the per unit phase to phase date are not
available:</strong>');
u_p2

%% Gap strength

% U_90: ninety per cent statistical impulse withstand voltage
% K_S: statistical safety factor
% U_2: two per cent statistical overvoltage
% U_e90: ninety per cent statistical impulse withstand voltage phase
to
%       earth
% U_S: highest voltage of a system between two phases
% u_e2: per unit value of the two per cent statistical overvoltage
phase
%       to earth
% U_p90: ninety per cent statistical impulse withstand between two
phases
% u_p2: per unit value of the two per cent statistical overvoltage
between
%       two phases

%% Calculation
U_2 = U_e2;
% U_2 = U_p2;
U_90 = K_S*U_2;
U_e90 = K_S*(sqrt(2)/sqrt(3))*U_S*u_e2;
U_p90 = K_S*(sqrt(2)/sqrt(3))*U_S*u_p2;

```



```

disp('<strong>Ninety per cent statistical impulse withstand
voltage:</strong>');
U_90
disp('<strong>Ninety per cent statistical impulse withstand
voltage phase to earth:</strong>');
U_e90
disp('<strong>Ninety per cent statistical impulse withstand
between two phases:</strong>');
U_p90

%% Electrical distance necessary to obtain U_90

% D_U: electrical distance necessary to obtain U_90
% U_90: ninety per cent statistical impulse withstand voltage
% K_t: factor combining different considerations influencing the
strength of the gap
% F: sum of all lengths, in the direction of the gap axis, of all
% floating conductive objects in the air gap (in metres)

%% Calculation
D_U = 2.17*(exp(U_90/(1080*K_t))-1)+F;

disp('<strong>Electrical distance necessary to obtain
U_90:</strong>');
D_U

%% Minimum approach Distance

% D_A: minimum approach distance
% D_U: electrical distance necessary to obtain U_90
% K_S: statistical safety factor
% D_E: ergonomic distance

%% Calculation
K_S = 1.0;
D_A = D_U*K_S+D_E;

disp('<strong>Minimum approach distance:</strong>');
D_A

```