



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

Gyergyádesz László

**FAM KÖTELEK ÁTÍVELÉSÉNEK
FIZIKAI HÁTTERE ÉS
SZABVÁNYOS VIZSGÁLATAI**

TDK-dolgozat

KONZULENS

Dr. Cselkó Richárd

BUDAPEST, 2023

Tartalomjegyzék

Összefoglaló	5
Abstract.....	6
1 Bevezetés	7
1.1 Problémafelvetés.....	8
2 Elméleti összefoglaló	9
2.1 Feszültség alatti munkavégzés.....	9
2.2 FAM-kötelek.....	10
2.2.1 FAM-kötelek használata	10
2.2.2 FAM-kötelek gyártása	11
2.3 Vonatkozó szabványok.....	14
2.3.1 IEC 62192:2009	14
2.3.2 IEC 62192 következő kiadása.....	15
2.3.3 IEEE Standard 516.....	17
2.3.4 Csikós-féle ML 2. Műszaki Lapok	18
2.4 FAM-kötelek hibajelenségei.....	19
2.5 Átívelés	20
2.5.1 Átívelés szennyeződések és nedvesség hatására	20
2.5.2 Átívelés FAM-köteleknél	21
2.5.3 Feszültségpróbával megszűnő szennyeződések.....	22
3 Összehasonlító mérések.....	24
3.1 Szennyezett és tiszta kötelek.....	24
3.1.1 Mintadarabok	24
3.1.2 Eredmények	25
3.1.3 Konklúzió.....	26
3.2 Új és régi típusú kötelek	26
3.2.1 Mintadarabok	27
3.2.2 Száraz körülmények.....	28
3.2.3 Nedves körülmények	29
3.2.4 Konklúzió.....	30
4 Összegzés és konklúzió	32
4.1 További lehetőségek	33

Köszönetnyilvánítás	34
Irodalomjegyzék.....	35
Táblázatjegyzék	37
Ábrajegyzék.....	38

Összefoglaló

A feszültség alatti munkavégzés (FAM) módszerei és eszközei feszültség szintenként jelentősen eltérnek. A nagyfeszültségű környezetekben ennek egy kritikus megvalósulása az igen nagy értékű lokális villamos térerősség, így a NaF FAM megvalósításához használt kötelek – melyek segítségével személyzet és eszközök mozgatása és rögzítése történik – is ki vannak téve e hatásnak.

Az ilyen szigetelőkötelek egy veszélyes hibajelensége a kötél felületén történő átívelés, ennek legvalószínűbb kiváltó okai a nedvesség és a szennyeződések. A mélyebb megértés érdekében áttekintem a nemzetközi irodalmat és térerősségszámításokat végzek.

A szabványi környezet közelmúltbéli változásai nem csupán a gyártókat, hanem a vizsgálólaboratóriumokat is kihívás elé állítják, hiszen mind villamos, mind mechanikai tesztek szempontjából szigorúbb követelményeket kell teljesíteniük a mintadaraboknak.

Jelen dolgozatban a gyakorlati alkalmazások mellett összefoglalom az átívelés jelenségének fizikai hátterét, valamint összehasonlító vizsgálatokat végzek a szabványok alapján.

Abstract

The methods and means of live-line working (LLW) vary considerably from one voltage level to another. Therefore, in the case of high voltage environments, high local electric field values. The insulating ropes that are used to move and secure personnel and equipment to carry out LLW on high voltage transmission lines, are also prone to this phenomenon.

A dangerous failure characteristic of such insulating ropes is flashover on their surface, the most likely causes being moisture and contamination. For a deeper understanding, the international literature will be reviewed, and electrostatic field calculations will be performed.

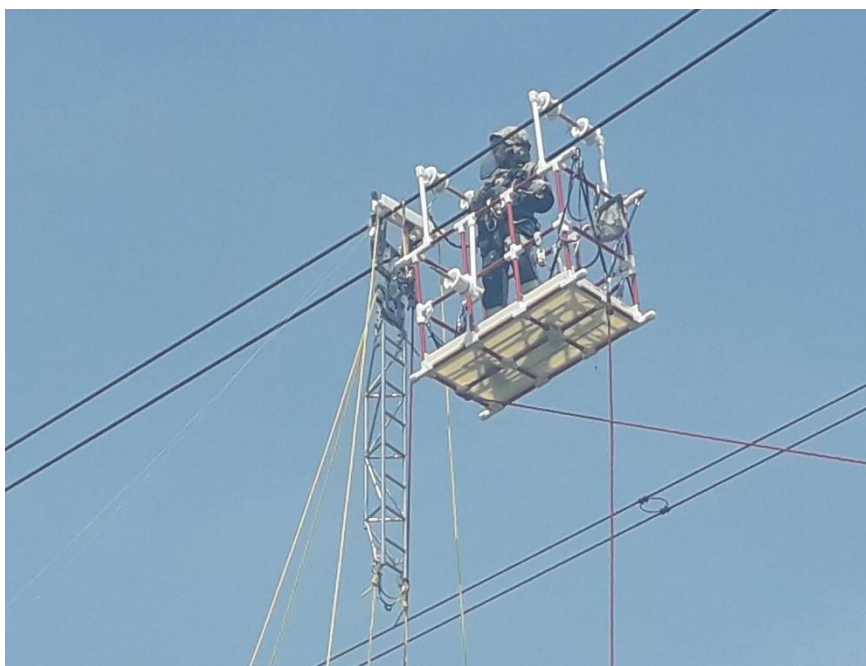
Recent changes in the standard environment have challenged not only manufacturers but also testing laboratories to meet more stringent requirements for specimens in both electrical and mechanical tests.

In this research, in addition to practical applications, the physical background of the phenomenon of flashover is summarised and comparative tests are carried out regarding the standards.

1 Bevezetés

Dolgozatomban a nagyfeszültségű feszültség alatti munkavégzés egy speciális kérdésével foglalkozom. A nagyfeszültségű villamosenergia-hálózatokon a FAM egy kritikus részlet, hiszen nemcsak az üzembiztonsághoz járul hozzá, hanem a tervezett menetrendezést is elősegíti és a gazdasági szempont sem elhanyagolható. Fogyasztói oldalról pedig a kisebb mértékű zavartatás formájában érhető tetten.

Ahhoz, hogy a FAM által valóban bekövetkezzenek az említett előnyös folyamatok, számos tényező megfelelő kezelésének kell együttesen jól működnie. Kezdve a szervezeti struktúrával és a személyzet oktatásával, a szükséges beavatkozások megszervezése, a FAM-eszközök rendelkezésre állása és periodikus vizsgálata, valamint a folyamatos ellenőrzés és kutatás-fejlesztés is egyaránt fontos komponens.



1. ábra Szerelőkocsi kettős kötegelésű sodronyon

A szigetelőkötelek használata Magyarországon sokéves sikeres használati múltat tekint vissza, azonban ez nem jelenti azt, hogy nem történhetnek meg olyan folyamatok, melyek miatt ne lenne szükséges a téma kutatása. A fő motiváció a közelmúlt szabványi változásai voltak, valamint az a tény, hogy a villamosan szigetelőanyagokból készült kötelek irodalma rendkívül minimális.

1.1 Problémafelvetés

A közép- és nagyfeszültségű FAM-munkák során számos veszélyforrás adódik, mely végső soron két tényezőre, a magasságra és a nagyfeszültségű aktív részekre vezethető vissza. Ugyanakkor a nagyfeszültséggel való érintkezésnek több formája és oka is lehet: a pillanatnyi rosszullét, a helytelenül kivitelezett munkafolyamat és a villamos hálózati eszközök nem megfelelő működése mellett a hibás egyéni védőeszköz is eredményezhet balesetet vagy halálesetet.

Többek között a kanadai Manitoba Hydro villamosenergiarendszer-irányító példája is tanulságos az egyéni FAM-védőeszközök kutatásának szempontjából [16]. Az 1997-ben és 2002-ben bekövetkezett FAM-balesetek [6] FRP (üvegszállal megerősített műanyag) anyagú rudakon történt átívelés miatt történtek meg. Ez a feszültségi alatti munkavégzés egyes formáinak hosszú ideig történő leállításához vezetett, azonban fontosabb, hogy egy olyan kutatási folyamat indult meg, ami során nem csak a védőeszközöket, hanem a szervezeti előírásokat, a beavatkozó személyzet képzését, oktatását és a munkafolyamatokat is áttekintették és megújították.

A szennyeződések és a nedvesség két olyan tényező, melyek a kötél felületén megnövelhetik az átívelés esélyét. Ezeket és a megváltozott szabványi környezetet figyelembe véve vizsgálom, hogy milyen mértékben indokoltak ezek a változások a jelenleg is használatban lévő köteleket illetően; továbbá, hogy a szabványos tesztek mennyire igazodnak a veszélyforrásokhoz.

2 Elméleti összefoglaló

Ebben a fejezetben összefoglalom azokat az ismereteket, melyek szükségesek a problémafelvetésben ismertetett kérdéskörhöz, valamint konklúzió levonásához, illetve részletesen bemutatják a FAM-köteleket. Minden alfejezetben a hazai helyzetet is vizsgálom.

2.1 Feszültség alatti munkavégzés

A feszültség alatti munkavégzés olyan tevékenység, melynek során a munkát végző személy, a villamos hálózat vagy berendezés feszültség alatt álló szerkezeti részein munkát végez, miközben a feszültség alatt álló berendezésnek feszültség alatt álló részeit testével közvetlenül, vagy szigetelt, vagy szigeteletlen munkaeszközével, egyéni védőeszközével közvetve vagy munkadarabbal közvetve a munkamódszerektől függően megérinti, átívelési távolságon belül megközelíti, létesítési, üzembe helyezési, üzemeltetési, üzemzavar-elhárítási és -megelőzési, javítási és karbantartási feladatok végrehajtása céljából.

Feszültségintenziténként eltérő módszerrel oldják meg a FAM-tevékenységet a beavatkozó szerelők, melyhez eltérő előzetes felkészülés és védőeszköz-apparátus szükségeltetik. A közép- és nagyfeszültségű hálózatokon a távolból végzett munka módszere jellemző, ekkor az egyéni védőfelszerelés olyan szigetelőanyagból készül, mely véd az adott hálózat névleges feszültségintenzitén. Az egyes FAM-eszközök (burkolatok, söntkábelek, végszerelvénnyek) mozgatása FAM-rudakkal történik, melyek jellemzően üvegszállal megerősített műanyagból, műgyantából készülnek. Olyan külföldi nagyfeszültségű hálózatokon, melyek névleges feszültsége 35 kV (KöF-szint felső határ) és 132 kV (legalacsonyabb NaF-szint Magyarországon) közé esik, földrajzi helytől függően alkalmaznak távolból végzett munkát (hot-stick method) is, ami nem zárja ki a FAM-kötelek alkalmazását párhuzamosan.

Nagyfeszültségen nehézkessé válna a munka, ha továbbra is szigetelő rudakkal kellene megoldani a feladatokat, akkor túlzottan nagy távolságokat kellene áthidalni. A távvezetékek névleges feszültségintenzitje olyan nagy, hogy a körülöttük kialakuló villamos térben a biztonságos védőtávolság oly mértékben megnő a KöF-távvezetékekhez képest, hogy emberi erővel nem lenne lehetséges az ilyen hosszúságú FAM-rudak kényelmes,

pontos és kockázatmentes kezelése. Az egyéni védőfelszerelés így illeszkedik a NaF-szinten szokásos munkamódszerhez, mely a potenciálon végzett munka: a beavatkozó szerelők vezetőképes öltözetet hordanak a munka során. Így a fázisvezetők potenciáljára kerülve, azok közvetett érintésével végezhetik el az adott feladatot. A személyzet és eszközeik mozgatásához alkalmazható például helikopter, azonban a levegőből való megközelítés jelentős költségvonzattal bír. A talajról kiinduló megközelítés során kötelek alkalmazásával történik a munka.

2.2 FAM-kötelek

FAM-kötélnek nevezhetőek az olyan szigetelőanyagból készült kötelek, melyeket valamely feszültség alatti munkavégzés részfolyamat során használ az átviteli hálózat beavatkozó személyzete, és azokat az adott országban hatályos szabvány(ok) szerint teszteltek.

A FAM-kötelek használata a nagyfeszültségű szabadvezetékek esetén jellemző, mely egyrészt a nagy feszültségszintből eredő nagy villamos térerősségtételekből következik, másrészt pedig a nagy magasság miatti megközelítési nehézségek miatt, valamint a 2.1 fejezetben ismertetett NaF FAM munkamódszer miatt is.

2.2.1 FAM-kötelek használata

A nagyfeszültségű FAM során az alábbi műveletekre használhatóak a szigetelőkötelek (a teljesség igénye nélkül):

- tartó szigetelő megközelítése
- áramvezető megközelítése
- haladó mozgás áramvezető mentén, létra, szerelőszték vagy szerelőkocsi segítségével

Országonként eltérő, hogy pontosan milyen folyamatok elvégzése történik az átviteli hálózaton feszültség alatt, és azon belül is egyéni típus technológiák léteznek a műveletekre. Felhasználástól függően más-más végződésű köteleket készítenek elő munkához: ez lehet gyűrűs, csomózott, elvágott, karabinerrel vagy kampóval szerelt. Az IEC 62192 szabvány szerint elvágás, összefűzés, varrás és krimpelés is megfelelő mód lehet a végződés vagy végszerelvény kialakítására. Magyarországon funkció szerint az alábbi köteleket különböztetjük meg:

- munkakötél
- biztosító kötél
- fel-le mozgató kötele (húzókötel)
- emelő-süllyesztő kötél
- előre-hátra mozgató kötele
- balanszkötél

A FAM-köteleket gyakorlat szerint száraz körülmények között használják, lehetőség szerint a teljes FAM-műveletsort igazítják az időjáráshoz. Ugyanakkor mind gyártáskor, mind a szabványos mérések összeállításánál figyelembe veszik az olyan worst case eseményeket, mint például egy hirtelen nagy csapadékmennyiséggel érkező zápor, eső vagy vihar. A feszültség alatti munkavégzés lehetséges időjárás körülményeire megkötések is találhatóak az IEEE útmutatóiban.

Gillies et al. kutatásában [6] részletezett FAM-tevékenység során acélszerkezet-elemek cseréjét végezte egy kétrendszerű 500 kV-os távvezetéken a beavatkozó személyzet, amikor enyhe eső kezdett esni a munkavégzés területén. Az elkövetkező 30 percben az egyik FAM-kötél villamos ív volt megfigyelhető a felső szakaszon. A talajon a kötelelet fogó személy bár kisméretű szigetelő kesztyűt viselt, egyre növekvő kellemetlen érzés kíséretében észrevette, hogy áram folyik a kötélen keresztül, azonban az elengedési határt átlépve munkatársa beavatkozása akadályozta meg a végzetes kimenetelt.

2.2.2 FAM-kötelek gyártása

A szigetelő köteleket szintetikus anyagokból, például polipropilénből, polietilénből vagy poliamidból készítik. Lehetnek egy- vagy többszálúak (pászma), az egyes szálak pedig „rostokból”, elemi szálból tevődnek össze. Léteznek azonban mag és külső köpeny kialakítású változatok is.

A kötelek gyakran rendelkeznek bevonattal (coating), ami például viaszos anyag lehet. Ez a bevonat egyes esetekben vízben oldódó, és végső formájában szilárd vagy akár folyékony bevonatként van jelen az elemi szállakon. Olyan kötelek is elérhetőek, melyek hőre lágyuló műanyag külső réteggel (thermoplastic outer jacket) vannak ellátva. A kötelek szigetelési ellenállása nagyon magas, több 10 G Ω feletti is lehet.



2. ábra Viaszos bevonatú FAM-kötél

Az alábbi gyártók foglalkoznak jelenleg FAM-célra is alkalmas szigetelőkötelek gyártásával:

- Barry (CAN) [20]



3. ábra Barry "Rescue" szigetelőkötél

- Folch Ropes S.A. (E) [18]



4. ábra Folch Ropes SA 3STRANDS kötele

- Roblon (DK) [22]



5. ábra Roblon szigetelőkötel, három méretben

- Specialised Force (AUS) [19]



6. ábra Specialised Force egypázmás szigetelőkötel

- TID Power [21]



7. ábra TID Power szigetelőkötel

2.3 Vonatkozó szabványok

Ebben az alfejezetben bemutatom az olyan dokumentumokat, melyek a szigetelőkötelekre vonatkoznak, és azokkal kapcsolatban követelményeket, előírásokat fogalmaznak meg. Jelen dolgozatban a villamos vizsgálatokat, tulajdonságokat elemzem, így a mechanikai tartalmat nem részletezem. Minden feltüntetett feszültségérték effektív értéként értendő.

Fontos megjegyezni, hogy külön kezelendők a periodikus vizsgálatoktól a típusvizsgálatok, melyeket a gyártónak kell elvégeznie vagy elvégeztetnie a termék tervezését követően, viszont annak gyártását megelőzően, hogy a kialakítás megfelelőségét igazolhassa.

A dokumentumok az alábbiak:

- IEC 62192:2009 Live working – Insulating Ropes (Magyarországon: MSZ EN 62192 2009) [1] [2]
- IEC 62192 Live working – Insulating Ropes, következő kiadás tervezet
- IEEE Standard 516, IEEE Guide for Maintenance on Energized Power Lines, 2009 [3]
- Dr. Csikós Béla: 750 kV, 400 kV, 220 kV és 120 kV nagyfeszültség érintésével és közelében végzett munka technikája III.2.rész, ML 2. Műszaki Lapok
- ASTM F1701-12(2018): Standard Specification for Unused Rope with Special Electrical Properties [5]

2.3.1 IEC 62192:2009

Az IEC 62192 2009-től érvényes szabványa tartalmazza az általános követelményeket, az elvégzendő tesztek (vizuális, mechanikai, villamos) és periodikus tesztek. Ez a szabvány elődjéhez képest szigorúbb követelményeket támaszt a FAM-kötelekkel szemben [17]. A Magyar Szabványügyi Testület az IEC szabványát átvette.

Vizuálisan ellenőrizendő a periodikus vizsgálatok során, valamint minden használat előtt terepen, hogy a szigetelőkötel sérülésektől és szennyeződésektől mentes. A kötelek javítása nem ajánlott, tisztításuk a gyártó által előírt módon lehetséges. A száraz és nedves körülmények is ugyanúgy részei a periodikus vizsgálatnak. A vizsgálati

periódus nem szigorúan definiált, a használat mértékének megfelelően lehetséges elvégezni a száraz és nedves villamos vizsgálatokat, akár évente.

Villamos periodikus vizsgálatok száraz körülmények között:

- **Elektródelrendezés:** az elektródtávolság 300 mm. 0,5 és 1 mm közötti átmérőjű ónozott rézhuzalból szükséges elkészíteni a két elektródot oly módon, hogy a kötelet a kerülete mentén körbevegye.
- **Feszültségpróba:** 100 kV (50/60 Hz) nagyságú feszültséggel 1 percen keresztül szükséges a mintadarabokat mérni. Nem történhet átívelés, a kötél felületén nem lehet égésnyom vagy egyéb sérülés.
- **Szivárgó áram mérése:** a feszültségpróba alatt mérendő, 100 Ω értékű ellenálláson; a szivárgó áram nem haladhatja meg a 100 μA -t. Amennyiben ezt az értéket nem haladja meg, viszont a fluktuáció 10 μA -nél nagyobb, akkor további 5 percig kell folytatni a feszültségpróbát.

Különbségek a nedves villamos periodikus vizsgálatok során:

- **Elektródtávolság:** 600 mm
- **Szivárgó áram:** nem haladhatja meg az 500 μA -t a mérés során, és az 1 perces időtartam végére nem lehet magasabb 250 μA -nél.

2.3.2 IEC 62192 következő kiadása

Bár az IEC 62192:2009 szabvány jelenleg is érvényes, azonban a következő verzió draft dokumentuma már elkészült, a publikáció időpontja azonban még nem ismert. A szabvány fő felépítése állandó maradt, azonban lényegi különbségek jelentek meg a definíciókban és a tesztek kivitelezésében, valamint a periodikus tesztek időtartama is változott.

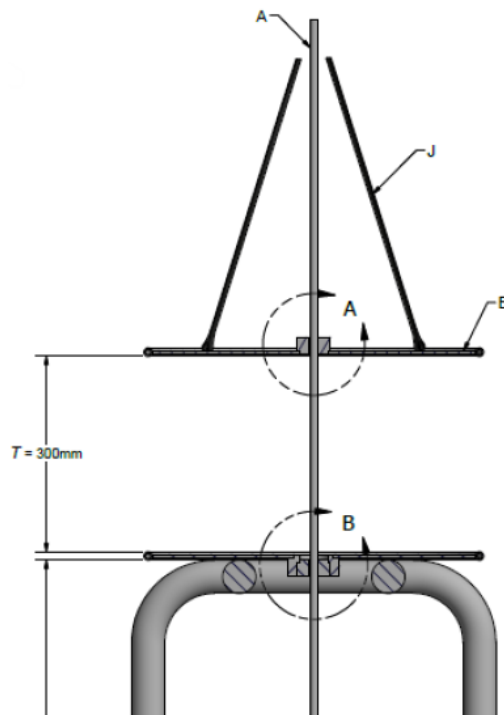
Az egyik legfontosabb változás, hogy a szigetelőkötél két új típusa jelent meg definícióként: Type 1 és Type 2 insulation rope. A Type 1 az olyan köteleket írja le, melyek szintetikus anyagból készülnek, elsődleges szigetelést biztosítanak, azaz úgy tervezték őket, hogy közvetlenül érinthessék a feszültség alatt lévő, áramjárta fázisvezetőket (akár földhöz képest mért feszültség, akár fázisok közti feszültség esetén). Míg a Type 2 kötél alatt az olyan szintetikus anyagból készült köteleket értjük, mely másodlagos szigetelést biztosítanak, azaz nem arra a célra tervezték őket, hogy

közvetlenül érintsék a feszültség alatt lévő, áramjárta fázisvezetőket. Ugyanakkor véletlen vagy súrlódó érintés megengedhető, ami rövid idejű érintést feltételez.

Azonban a kötélfelülete nem indikálja önmagában a típust, mindazonáltal az extrudált külső műanyag rétegű kötelek jellemzően Type 1 vagy Type 2 követelményeknek felelnek meg, a viaszos bevonatú kötelek jellemzően Type 2 követelményeket tudnak teljesíteni. Azonban az olyan szigetelőkötelek, melyek ezek közül egyikkel sem rendelkeznek, jellemzően nem tudják teljesíteni egyik típus követelményeit sem.

Villamos periodikus vizsgálatok száraz körülmények között:

- A Type 1 és Type 2 kötél típusok vizsgálati módszere között nincs különbség.
- Elektrodelrendezés: az elektródtávolság 300 mm, az elektródok alakja pedig egy középen lyukas gyűrűlap. A lyukat úgy kell kialakítani, hogy annak legyen rézbetéte, ami szorosan vegye körbe a tesztelt kötelet. A szivárgó áram méréséhez használt mérőkör ehhez a betéthez kapcsolódik.



8. ábra Új elrendezés a szivárgó áram mérésére

- Feszültségpróba: 100 kV (50/60 Hz) nagyságú feszültséggel 1 percen keresztül szükséges a mintadarabokat mérni. Nem történhet átívelés, a kötélfelületén nem lehet égésnyom vagy egyéb sérülés.

- Szivárgó áram mérése: a feszültségpróba alatt mérendő, 100Ω értékű ellenálláson; a szivárgó áram nem haladhatja meg a $10 \mu\text{A}$ -t. Az áramnak a mérés során stabilnak kell lennie, és nem emelkedhet az 1 perces mérési időtartam végén. A kapacitív csatolás kompenzálása érdekében az elrendezést meg kell mérni üresjárás állapotban, mintadarab nélkül is, ekkor maximálisan $3 \mu\text{A}$ a megengedett szivárgó áram.
- Vizsgálati periódus: a vizsgálatot évente meg kell ismételni, vagy annál gyakrabban, ha a használat indokolja.

Különbségek a nedves villamos periodikus vizsgálatok során:

- Elektódtávolság: 600 mm.
- Type 1 esetén a feszültségpróba 100 kV üzemi frekvenciás feszültségen történik, és 5 percig tart, Type 2 köteleknél ugyanez érvényes, azonban 50 kV feszültségen.
- A szivárgó áram Type 1 vizsgálatoknál nem haladhatja meg a $10 \mu\text{A}$ -t a mérés során, az 5 perces időtartam végén pedig nem emelkedhet. Type 2 esetén jóval magasabb határértékek vannak előírva: a szivárgó áram nem haladhatja meg az $500 \mu\text{A}$ -t a mérés során, és az 5 perces időtartam végére nem lehet magasabb $250 \mu\text{A}$ -nél.

A szabványtervezet 8.4.2 fejezetében található egy rendkívül fontos megjegyzés, mely szerint a nyílt szövésű kötelek esetén nem lehetséges a nedves periodikus tesztelés. Ebben az esetben a végfelhasználó a felelős azért, hogy a száraz villamos és egyéb periodikus tesztek, használati múlt, élettartam alapján eldöntse, hogy mikor vonja ki a használatból a kötelet.

2.3.3 IEEE Standard 516

Az IEEE 516-os számú szabványa angolul a „Guide for Maintenance Methods on Energized Power Lines” címet viseli, ami a feszültség alatt lévő, aktív távvezetéseken végzett karbantartási munkálatokhoz tartozó útmutatót jelenti, így ez nem kizárólagosan a szigetelő kötelekről szól. Ezek közül a legfontosabbakat emelem ki:

Az alábbiakat fogalmazza meg a szabvány 5.9 fejezete:

- általánosan a szigetelőkötelek használatáról

- használati utasítás
- vizes abszorpciós követelmény
- periodikus tesztek

A 6.3.4 fejezet a tárolási követelményeket fogalmazza meg.

6.5.5: a sérült köteleket ki kell vonni a használatból.

2.3.4 Csikós-féle ML 2. Műszaki Lapok

Bár ez a kiadvány nem egy szabvány, és jelenleg nem is konkrétan ezeket a köteleket használják a nagyfeszültségű FAM során Magyarországon, a Dr. Csikós Béla által kidolgozott szabadalom műszaki lapjának vonatkozó része az eddigiekhez hasonló követelményeket fogalmaz meg, kisebb részletességgel.

- tárolás és szállítás: zárt műanyag edényben, csomómentesen
- periodikus vizsgálat: évente, feszültségpróba 1,5 kV 50 Hz-es feszültséggel, 1 m elektródtávolsággal



9. ábra FAM-kötelek tároló hordóikban

2.4 FAM-kötelek hibajelenségei

A szigetelőkötelek villamos és mechanikai állapotát több tényező is gyengítheti. A hőigénybevétel elsősorban a kötélre és kötélbe kerülő vezetőképes anyagoktól függ, hiszen az ezekben folyó áram hőhatást fejt ki. [14] Így ezáltal a kötél mechanikai állapotát nagymértékben a kötél szerkezet határozza meg, hiszen ha a szerkezet miatt több vezetőképes anyag tud a kötél elemi szálain megmaradni, akkor nagyobb mértékű hőigénybevétellel és annak következményeivel lehet számolni.



10. ábra FAM-kötél végződésénél felületi sérülések

Az alábbi táblázat összefoglalja a hibák lehetséges valószínű okait:

1. táblázat Hibajelenségek és okaik

hibajelenség	hiba oka(i)
szakítószilárdság meggyengülése	<ul style="list-style-type: none"> • túlterhelés • villamos igénybevétel • elszakadt elemi szálak (nagy mennyiségben) • hőigénybevétel
tartós megnyúlás	<ul style="list-style-type: none"> • elszakadt elemi szálak (nagy mennyiségben) • túlterhelés
szakadás a végződésnél	<ul style="list-style-type: none"> • súrlódás a fém végszerelvényen • leggyakoribb érintkezési pont • túlterhelés
felületi sérülések	<ul style="list-style-type: none"> • súrlódás fémes felületen • helytelen tárolás • felületi szennyeződés
átívelés	<ul style="list-style-type: none"> • felületi szennyeződés • belső szennyeződés • nedvesség
átütés	<ul style="list-style-type: none"> • belső szennyeződés • nedvesség • hőigénybevétel

2.5 Átívelés

A FAM-kötelek villamos szempontból közel támszigetelő típusnak tekinthetők, hiszen alkalmazásukból eredően hiszen az elektródok két különböző halmazállapotú szigetelőanyaggal érintkeznek: a levegő és maga a kötél. A fémelektrod egyik oldalról adott, hiszen a kötelek érintik a fázisvezetőket használat közben, viszont a kötél másik vége a talajra terített, földpotenciálú ponyván vagy egyéb alkalmas felületen található. Azonban fontos megjegyezni, hogy ez csak megfeszített állapotban igaz teljes mértékben, hiszen laza állapotban a térerősség nem feltétlenül párhuzamos a szigetelőfelülettel.

Átívelés akkor keletkezik, amikor a villamos ív két különböző halmazállapotú szigetelőanyag határfelülete mentén (néhány szakaszon esetleg a határfelülettől elszakadva) alakul ki két, egymáshoz képest különböző feszültségen levő fémelektrod között.

A villamosenergia-szektorban két kiemelten fontos területen hosszú ideje vizsgálják az átívelés jelenségét. A kültéri szigetelők a nagyfeszültségű távvezetéseken ki vannak téve az időjárásnak, és a mostoha körülmények között is üzembiztosan kell működniük, elkerülve zárlati események indulását. A másik pedig a FAM-hoz használt eszközök, hiszen egy szigetelőrúd vagy szigetelőkötél átívelésekor szinte bizonyosan emberéletek kerülnek veszélybe.

2.5.1 Átívelés szennyeződések és nedvesség hatására

Cherney tanulmányában [7] a hosszúrúd szigetelőket vizsgálta, és megmutatta, hogy a hagyományos kerámiaszigetelők ónos eső esetén nagyobb valószínűséggel ívelnek át, mint az olyan polimerből készültek, melyek változó átmérőjű ernyőzettel rendelkeznek. Az általános jegesedés csökkenti a szigetelő mentén a kúszóutat, ezáltal gyakoribb az átívelés ilyen esetben. A legfontosabb eredmény ebből a kutatásból azonban, hogy a szennyeztelen felületű szigetelők esetén még ónos eső hatására sem indul meg átívelés.

Farzaneh et al. [9] szintén kültéri szigetelőket vizsgáltak, ködös és esős körülményeket összehasonlítva. Ködös körülmények között a kisülések áramai szinte minden esetben nagyobbak voltak az esős körülmények áramainál. Az átívelések gyakorisága pedig 2-3-szor alacsonyabb eső esetén, pedig mindkét időjárási jelenség

nedvességet visz a szigetelő felületére. Ennek oka az lehet, hogy a szennyeződések egy részét letisztítja az esőzés.

Egy szintén szennyezett kültéri szigetelőket elemző tanulmányban [8] megfigyelték, hogy az egyenletesen, teljes felületen szennyezett szigetelők esetében a potenciáeloszlás közel lineárisan változik, azonban a részleges (pl.: foltok formájában jelen lévő) szennyeződések esetén a potenciáeloszlás erősen nemlineáris, ezzel pedig nagyobb villamos igénybevételnek lehetnek kitéve.

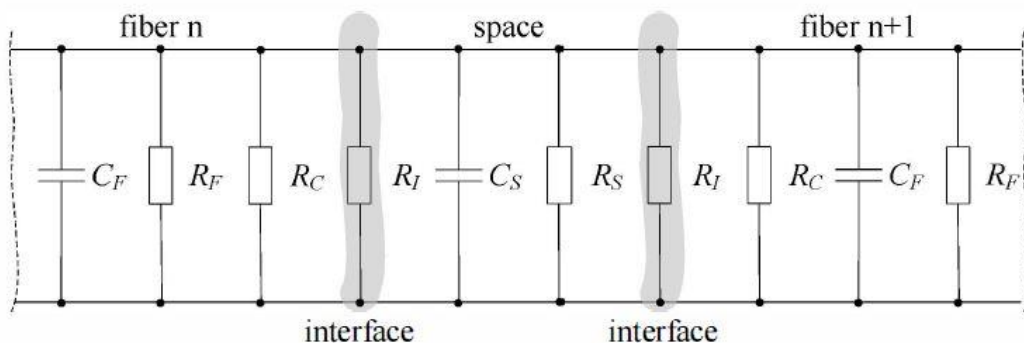
McDermid 2008-as tanulmányában [10] FAM-rudak átívelését vizsgálta. Tiszta ködös körülmények között a szennyezett rudak felületén csak 2 mA-nél nagyobb szivárgó áram esetén történt meg az átívelés. Azonban ennél alacsonyabb áramoknál néhány váratlan esetben is megfigyelt átíveléseket. Az ún. fast flashover jelenség csak rendkívül specifikus körülmények esetén következik be, bizonyos páratartalom és feszültséggradiens párosításoknál.

2.5.2 Átívelés FAM-köteleknél

Gillies et al. 1991-es tanulmányában [11] az akkori szabványi követelményeinek felülvizsgálatának szükségességére hívják fel a figyelmet. A 100 kV-os feszültségpróba, illetve a nedves körülményeknél 50 kV-os próba az ajánlott módszer, 1 láb elektródtávval, továbbá megbízható szivárgóáram-mérést javasolnak. A polydacron (polietilén-tereftalát) anyagú kötelek nedves állapotukban nem kerülhetnek kontaktusba aktív fázisvezetővel, és azok közelében is csak fokozott óvatossággal kell őket használni.

Saha és Wichmann kutatásában [13] 7 különböző felépítésű szigetelőkötelet vizsgáltak száraz és nedves körülmények között is. A száraz testek során érdemi eltérés nem volt megfigyelhető, azonban minél ritkább, nyíltabb szövésű volt a kötél kialakítása, annál nagyobb volt az átívelési feszültség szórása a szennyezett mintapontokon. Nedves körülmények esetén azonban jelentős különbségek voltak mind szivárgó áram, mind a feszültségpróba sikerességét illetően.

Pampel 2014-ben [14] egy egyszerűsített RC-modellt alkotott meg az elemi szálakból pászmaiba összeálló kötelekből, mellyel az átívelési folyamatokat könnyebben lehet leírni. Ezekhez Lissajous-ábrák is társíthatóak, melyek megkönnyítik a kiértékelést. Kiemeli, hogy ennek segítségével megmutatható, hogy a szigetelő felületen elhelyezkedő folyamatos vezetőképes utak (szennyeződés, nedvesség) vezetnek a legerősebb hőigénybevételhez.



11. ábra Pázmás felépítésű szigetelőkötél RC ekvivalense [14]

Laniga 2021-es tanulmányában [15] extrudált hőre lágyuló műanyag külső rétegű köteleket hasonlít össze hagyományos, pázmás kötelekkel. Eredményei alapján az előbbi típusú FAM-kötelek szigetelőképesége jobb, kisebb az átívelések kockázata, és alacsonyabb szivárgó áramok mérhetőek.

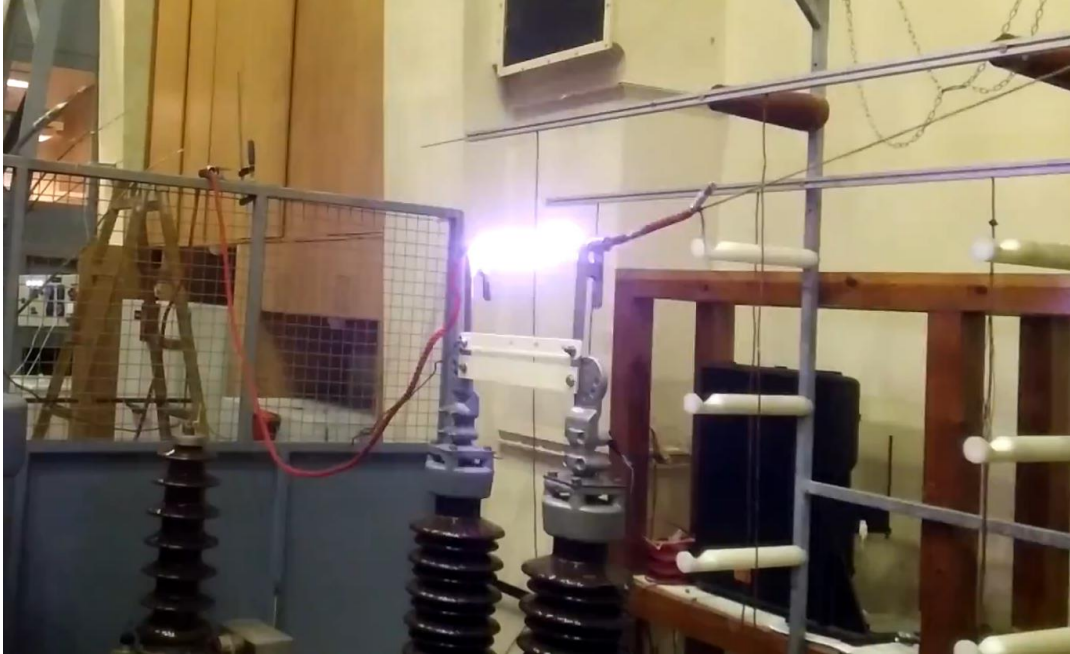
2.5.3 Feszültségpróbával megszűnő szennyeződések

Az IEC 62192:2009 szerint amennyiben egy szigetelőkötél bármely teszten elbukik, akkor nem teljesítette a szabványos követelményeket. Azonban az évek során több alkalommal is megfigyelhető volt egy jelenség a Nagyfeszültségű Laboratóriumban végzett periodikus vizsgálatok során. Egyes kötelek olyan felületi szennyeződéssel rendelkeztek, melyek a szemrevételezés során nem voltak észrevehetőek. A feszültségpróbák elvégzése közben egy bizonyos feszültségértéken (jellemzően a 100 kV-os maximum érték és 75 kV között) átívelés történt, ami azonban megszűnt legfeljebb néhány tizedmásodpercen belül. Ha nem szűnt meg, akkor pedig a mérőtér transzformátor-betáplálási körének védelme aktiválódott, megszakítva azt, ezzel az ívet is megszüntetve.

A vizsgálat megszakítását követően három lehetőség állt fent:

- 1) Új vizuális ellenőrzés után semmilyen szennyeződés nem volt látható; ismételt feszültségpróba során nem történt átívelés az előírt 1 perces időtartam alatt, a szivárgó áram állandó értékű volt.
- 2) Új vizuális ellenőrzés után szennyeződés volt látható a kötél azon szakaszán, amelyen a feszültségpróba során az átívelés történt. Ennek tisztítása után, ismételt feszültségpróba során nem történt átívelés az előírt 1 perces időtartam alatt, a szivárgó áram állandó értékű volt.

- 3) Új vizuális ellenőrzés után szennyeződés volt látható a kötél azon szakaszán, amelyen a feszültségpróba során az átívelés történt. Ennek tisztítása után, ismételt feszültségpróba során újra átívelés történt. A sikeres felületi tisztítás ellenére, többszöri próbálkozás után is átívelt a kötél több szakasza is.



12. ábra Átívelt FAM-kötél ismételt feszültségpróbája

Az 1. esetben a legvalószínűbb eshetőség a vizsgálatot megelőző sikertelen vizuális ellenőrzés. Azonban a szennyeződés, amely az átívelést okozta, elég kis méretű volt ahhoz, hogy a villamos ív magas hőmérsékletének hatására elégjen. A 2. esetben ugyanez a jelenség történt, azonban a szennyeződés nagyobb kiterjedésű volt. A 3. jelenség szintén lehetséges, hogy szennyeződés okozta az első átütést, azonban a további átütések már egyéb hibára utalnak (belső sérülés, maradandó szennyeződés, réteg vagy bevonat sérülése).

Ezen esetek megmutatják, hogy az átívelés nem minden esetben megfelelő hibaindikátor. Amennyiben az 1. vagy 2. áll fenn, és az átívelés a rövid időtartam alatt a kötélen a legtöbbször égésnyomot nem hagy, úgy nem érdemes a szabvány szerint NEM MEGFELELT státusszal kivonni a használatból. A kötelek elvágása ugyan lehetséges, ha az üzemeltető ezt megfelelő körültekintéssel teszi, azonban legrosszabb esetben ez egy 200 m hosszúságú kötelet meg is felezhet.

3 Összehasonlító mérések

Ebben a fejezetben két különböző szempontból hasonlítok össze szigetelőköteleket.

3.1 Szennyezett és tiszta kötelek

A vizsgálat oly módon rendhagyó, hogy többéves eredményeket használ fel, azonban ezek periodikus vizsgálatok voltak, és mindegyik esetében készítettem statisztikát. Ezek a FAM-kötelek terepen használatban voltak és még vannak is. A 2020., 2021. és 2022. évi ellenőrzéskor tehát volt lehetőség nyomon követésre. Minden kötelet előzetesen vizuálisan ellenőriztem, majd elvégeztem a száraz villamos vizsgálatokat.

3.1.1 Mintadarabok

A mérések során az alábbi mintadarabokat használtam fel, melyek mind nyitott szövéssű, viaszos réteggel bevont FAM-kötelek:

2. táblázat Mintadarabok adatai

mintadarabok	gyártmány	átmérő [mm]	hossz [m]	állapot
P1, P2, P9, P12, P14	Folch Ropes SA, STRANDS	12	100	megfelelő
P3, P4, P6, P13,	Folch Ropes SA, STRANDS	14	100	megfelelő
P25, P26	Folch Ropes SA, STRANDS	14	100	újszerű
P5, P7	Folch Ropes SA, STRANDS	16	100	újszerű
P8	Folch Ropes SA, STRANDS	16	85 (100)	megfelelő
P10, P11	Folch Ropes SA, STRANDS	14	200	megfelelő
P15	Folch Ropes SA, STRANDS	12	20	újszerű
P16, P17, P18, P19, P20, P21, P22, P23	Folch Ropes SA, STRANDS	16	hossz < 10	felületi sérülések a végszerelvényeknél

3.1.2 Eredmények

3. táblázat Száraz feszültségpróba, 2020

2020 (24 db)		
megfelelt	átívelést követő tisztítás után megfelelt	átívelést követően nem felelt meg
19	4	1

A P8-as mintadarab első 15 méterén több szakaszon is átívelés történt, szennyeződés nem volt látható sem a mérés előtt, sem utána. A felhasználó értesítést követően 100 m-ről 85 m-re módosította vágással a kötél hosszát. Ismételt vizsgálaton megfelelt.

4 kötélen (P1, P3, P3, P10) felületén apró fekete szemcsés szennyeződés volt megfigyelhető. Ezek miatt többször is átívelés történt a kötél első negyedén. Alapos tisztítást követően mindegyik kötél kibírta a feszültségpróbát, és a szivárgó áram állandó értékű volt a mérés alatt.

Utólagos felhasználói vizsgálatot követően a legvalószínűbb lehetőség a szennyeződés eredetére néhány beavatkozó szerelő munkavédelmi kesztyűje volt, melynek darabos tenyérfelületéről a viaszos kötéلبorításra ragadtak szemcsék. Később az ilyen kesztyűket betiltották a további nagyfeszültségű FAM folyamatoknál.

4. táblázat Száraz feszültségpróba, 2021

2021 (25 db)		
megfelelt	átívelést követő tisztítás után megfelelt	átívelést követően nem felelt meg
22	3	0

A 2021-es mérésnél 3 olyan mintadarab volt, mely átívelt. Látszólag semmilyen szennyeződés nem volt felfedezhető a felületen, azonban szinte biztosan jelen kellett ilyennek lennie, hiszen a P18, P19 és P21 köteleknél történt 2-3 méteres részekben átívelés, melyek azonos tárolóban érkeztek a vizsgálatokra. Valószínűleg használatot követően nem sikerült jól lezárni a tárolót, ezáltal nagyobb eséllyel került rá valamilyen apró szemcsés, a viaszos réteg szűrkeségébe beleolvadó szemcsés anyag-.

5. táblázat Száraz feszültségpróba, 2022

2022 (26 db)		
megfelelt	átívelést követő tisztítás után megfelelt	átívelést követően nem felelt meg
25	1	0

A 2022-es vizsgálatoknál mindössze egy kötél esetében figyeltem meg átívelést, melyről több információt nem tudtam kideríteni, hiszen az átívelés után semmilyen szennyeződés nem volt észlelhető, és többször nem ismétlődött meg a jelenség.

3.1.3 Konklúzió

Fontos megkülönböztetni a dolgozat 2.5.3 fejezetében említett eseteket, hiszen az átívelés oka nemcsak szerkezeti hiba vagy maradandó szennyeződés lehet, hanem gyorsan megsemmisülő, enyhe, felületi szennyeződés is. Ezeket a vizuális ellenőrzés során nem biztos, hogy könnyen észre tudja venni a vizsgálatot végző személy. Ezért kiemelten fontos, hogy nagy gonddal történjen ez az ellenőrzés is.

A feszültség alatti munkavégzés előtt érdemes a típustechnológia begyakorlása mellett a felhasználni kívánt eszközök kompatibilitását ellenőrizni, hiszen a kesztyűről leváló szemcsék esetéből kiderül, hogy a teszteléskor nem várt esemény történhet, azonban ez akár használat közben is gondot okozhat, ha kellően hosszú ideig és a kötél jelentős felületén történik a szennyeződés.

3.2 Új és régi típusú kötelek

Ebben a mérési sorozatban a jelenleg a magyar átviteli hálózaton használt kötéltypust (nyílt szövésű, 3 pászmas, viaszos felületű) hasonlítom össze egy új típusú kötéllal, mely hőre lágyuló műanyag külső réteggel rendelkezik. Az összehasonlítás az IEC 62192 új szabványtervezete szerinti villamos vizsgálatokkal történik.

A legnagyobb változás a kötelek kategorizálása volt (lásd 2.3.2), és ez gyakorlatilag azt jelenti, hogy a jelenleg használatban lévő kötelek nem alkalmazhatóak az új szabvány jövőbeli érvényre kerülésétől az eddigi feladatokra. A mérési sorozat megmutathatja, hogy a megváltozott szabvány mérései szerint is megfelelőek a száraz körülmények, azonban a nedves vizsgálatokhoz további fejlesztések szükségesek.

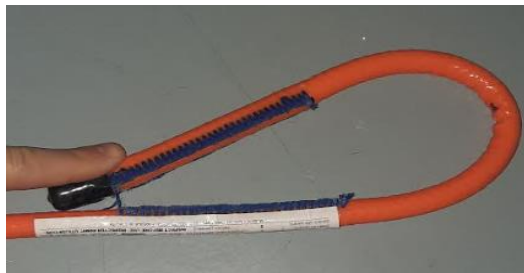
3.2.1 Mintadarabok

A mérések során az alábbi mintadarabokat használtam fel:

mintadarab	borítás	hossz [m]	előzetes állapot	végszerelvények
K1	viaszos réteg	10	megfelelt	csomó és karabiner
K2	viaszos réteg	10	megfelelt	csomó és karabiner
K3	viaszos réteg	50	nem használt	-
K4	viaszos réteg	100	nem felelt meg	csomó
K5	hőre lágyuló műanyag köpeny	15	nem használt, új	műanyag formára hajtott szem
K6	hőre lágyuló műanyag köpeny	15	nem használt, új	műanyag formára hajtott szem

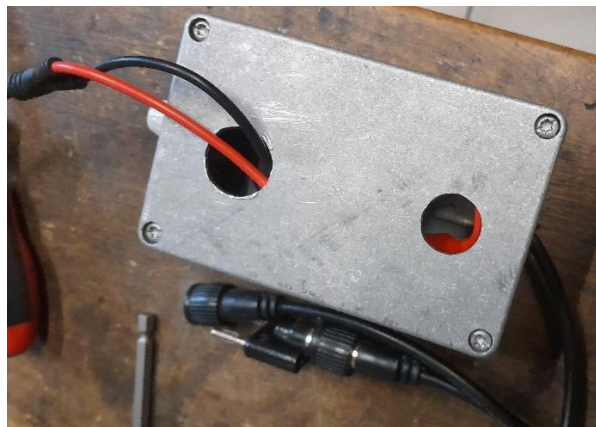
6. táblázat Mintadarabok adatai

A K5 és K6 mintadarabokat a végződésük miatt mindenképpen szükséges volt megbontani, hogy az elektródon keresztül átfűzhetőek legyenek.



13. ábra K5 mintadarab végződése

Az alábbi módon végeztem el a mérőellenállás árnyékolását:



14. ábra Mérőellenállás árnyékolása

3.2.2 Száraz körülmények

A mérési elrendezés az alábbi ábrán látható:



15. ábra IEC 62192 szerinti elektródelrendezés

Minden kötélén 10 különböző pozícióban végeztem el a feszültségpróbát és a szivárgó áram mérését, miután az üresjárásban megmértem a kapacitív módon csatolt szivárgó áramot. Mind a 6 mintadarab esetén sikeres volt: a vizsgálat átívelés nem történt és a $10 \mu\text{A}$ határérték alatt volt minden mérési pontban a szivárgó áram.

7. táblázat Száraz mérési eredmények

mintadarab	átlagos szivárgó áram [μA]	maximális szivárgó áram [μA]	átütés	megfelelőség
K1	0,043	0,097	-	megfelelt
K2	0,105	0,171	-	megfelelt
K3	0,101	0,137	-	megfelelt
K4	0,074	0,096	-	megfelelt
K5	0,307	0,405	-	megfelelt
K6	0,815	1,227	-	megfelelt

3.2.3 Nedves körülmények

A nedvesítési kondicionáló folyamatot követően az alábbi eredményeket mértem a mintadarabokon:

8. táblázat Nedves mérési eredmények

mintadarab	átlagos szivárgó áram [μ A]	maximális szivárgó áram [μ A]	átütés	megfelelőség
K1	nincs stabil érték	nincs stabil érték	15 kV	nem felelt meg
K2	nincs stabil érték	nincs stabil érték	75 kV	nem felelt meg
K3	NA	NA	NA	NA
K4	NA	NA	NA	NA
K5	2,294	8,8	-	megfelelt
K6	1,063	1,453	33 kV	nem felelt meg

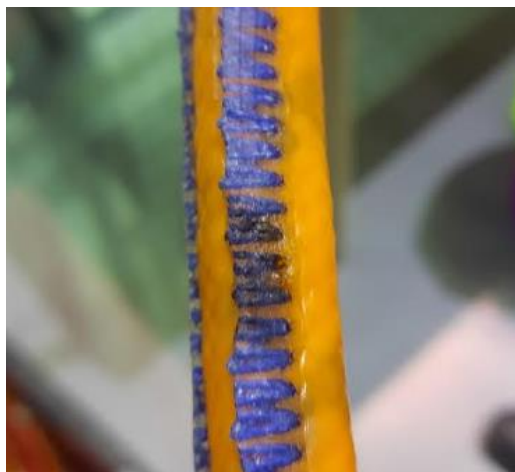


16. ábra K6 mintadarab átütése

A K3 és K4 mintadarabok nyílt szövésűek, lazább pászmmakkal, így a szabvány kiegészítése alapján nem lehetséges a nedves körülmények közötti periodikus tesztelésük (típusesztként a gyártójuknak továbbra is ellenőrizniük kell a nedves körülményeket).

A K1 és K2 kötelek bár szintén nem rendelkeznek külső borítással (köpennyel), azonban viaszos réteggel igen, és jóval sűrűbb szövésűek, mint a K3 és K4, így a mérést elvégeztem rajtuk. A szivárgó áram mérése során olyan fluktuáció volt, hogy nem lehetett érdemi leolvasást elvégezni, 10 perc után sem volt stabil érték. Bár a K2 érték teljesített a feszültségpróba Type 2 szintjét (50 kV), a sikertelen szivárgóáram-mérés miatt nem felelt meg. A K1 mintadarab el sem érte a Type 2 szintet az átívelés előtt.

A K5 mintadarab megfelelt minden szempontból, azonban a K6 esetén átívelés 33 kV-on. Azonban ez nem az elektródközben történt, hanem a kötél végződése előtt. Ez nagy valószínűséggel azért történt így, mert a végződés visszahajtása a szemes kialakításra varrott technikával történt, ahol képes volt a kötél belsejébe beszivárogni a nedvesség a vizes kondicionálás során. ennek következtében átütés is történhet a külső és belső réteg között, nem csak felszíni átívelés.



17. ábra Égésnyom a K6 mintadarab varrásánál

3.2.4 Konklúzió

Az alábbi megállapításokat érdemes rögzíteni a mérések alapján:

- Ha a borítás alá felszívódik a víz, akkor nem tud távozni, ezzel pedig átütés és átívelés veszélye áll fent. Amennyiben a nedvesség bejutása terepen történik, úgy valós esélye van annak, hogy száraz bevetési körülmények között történik meg az átütés vagy átívelés. A végzések kialakításánál ezt figyelembe kell venni.

- A külső köpeny jellemzően olyan csúszási súrlódási együtthatóval rendelkezik, hogy csak rendkívül speciális eszközzel lehet rögzíteni a nehezéket a kötélre. Egyéb módokon nehezék rögzítése destruktív is lehet.
- A felépítés alapján nagy valószínűséggel Type 2 kategóriának minősítendő kötelek száraz körülmények között ugyanolyan jó, bizonyos esetekben jobb szivárgóáram-értékeket mutatnak, mint a Type 1 kategóriájú kötelek. Ez a jelenlegi szabványos elektródelrendezésen megbukott mintadarab esetén is igaz, az új elektródkialakításon már nem bukna meg száraz körülmények között.
- A K1 és K2 mintadarab példája megmutatja, hogy az új szabványtervezet szerinti nedves méréseken nem a viaszos rétegű, köpeny nélküli (valószínűsíthetően Type 2-nek minősítendő) kötelek nem felelnek meg, mert túl sok nedvesség marad rajta a szálakon és a felületen.
- Kérdéses, hogy egy olyan végfelhasználónál, mely tiltja az esős időjárásban történő FAM-ot, van-e egyáltalán lehetősége a köteleknek benedvesednie olyan mértékben, ami egyáltalán megközelíti a periodikus vizsgálaton előírtakat. Maga a szabvány tiltja meg bizonyos kötél típusoknál a nedves periodikus tesztet, a meghibásodást elkerülendő. A korábban szabványnak megfelelt kötelekkel rendelkező felhasználó elképzelhető, hogy maximálisan Type 2 minősítésű FAM-kötelekkel rendelkezik majd a jövőben. Ez azért aggályos, mert korábban kockázatmentesen volt végezhető ugyanezekkel a kötelekkel a feszültség alatti munkavégzés.

4 Összegzés és konklúzió

A dolgozatban összefoglaltam a szigetelőkötelek FAM-eszközként való használatáról elérhető információkat. A villamos hibajelenségeik közül a legfontosabbat, az átívelést, mely szabványos periodikus tesztek során is gyakorta bekövetkezhet, részletesen tárgyaltam. Az átívelés jelenségét kutató forrásokból elérhető információkat felkutattam mind a kültéri szigetelőknél és maguknál a FAM-köteleknél is. Itt egyértelműen kiderült, hogy a kelleténél nagyobb villamos igénybevételt két faktor, a nedvesség és a szennyeződés okozhatja. Ezek nemcsak az eszköz meghibásodását (és ezzel együtt anyagi kárt), a periodikus vizsgálatok sikertelenségét okozhatják, hanem élet- és balesetveszélyes körülményeket is teremthetnek.

Megelőzendő az ilyen helyzeteket, a FAM-kötelek témakörét mind felhasználói, gyártói és kutatói oldalról szükséges napirenden tartani, hogy az esetleges káros vagy téves szokásokat, hibás értelmezéseket elkerülhessék. Fenntarthatósági szempontból is szükséges átgondolni az olyan lehetőségeket, melyek a túlzottan szigorú követelményekből eredhetnek, ezzel feleslegesen megszüntetve működő FAM-eszközök használati engedélyét.

Az új szabványtervezet a revideált határértékekkel és a Type 1/Type 2 rendszerrel biztonságosabb felhasználói környezet megteremtését teszi lehetővé, azonban néhány pontban még nehéz ezt egyeztetni a gyártói oldallal és a mérések kivitelezhetőségével. További probléma, hogy nem világos, hogy ha bizonyos típusú kötelek nedves körülmények közti periodikus tesztelése nem engedélyezett, akkor azt lehet-e egyáltalán Type 1 szerinti használatra előkészíteni. Szintén figyelemre méltó jelenség, hogy a végződésnél a köpeny alá be tud jutni a nedvesség, ha annak kialakítása során nincs megfelelően leszigetelve a nedvesség elől. Ezen nedvesség távozása nem biztosított, így akár az eszköz tönkremenetelét is okozhatja.

További előzetes mérések és diagnosztikai vizsgálatok, valamint elméleti kutatás elengedhetetlen ahhoz, hogy a jövőben is sikeresen és biztonságosan történhessen minden olyan átviteli hálózaton a feszültség alatti munkavégzés, ahol adott hozzá az infrastruktúra.

4.1 További lehetőségek

A FAM-kötelek témakörében ugyan kevesen kutatnak jelenleg, azonban többen közülük hangsúlyozták, hogy szükség van mélyebb megértésre. A következőket lenne érdemes megvalósítani:

- Az átívelési folyamatok további kutatása, és annak felismerése, hogy a jelenleg alkalmazott NaF FAM típus technológiák mely elemei kritikusak beindulásuk szempontjából.
- További adatok gyűjtése a különböző kialakítású kötelek villamos viselkedéséről.
- Az új típusú, hőre lágyuló műanyag borítású kötelek esetében a nedves vizsgálatok körülményeit újragondolni a végszerelvények ismeretében.
- Változatos szennyező anyagok hatásának tesztelése.
- Terepi felhasználói gyakorlat és tárolási szokások gyűjtése, azok összehasonlítása a mérésekkel és a szabványban előírtakkal.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nagyfeszültségű Laboratóriuma minden olyan munkatársának, akik segítségemre voltak: Dr. Cselkó Richárdnak, aki konzulensként segítette kutatómunkámat; Dr. Németh Bálintnak, a laboratórium vezetőjének, amiért biztosította a szükséges mérőeszközöket; Meszes József technikusnak a gyors és hasznos segítő munkájáért.

Kiemelt köszönettel tartozom Meixner József mérnök úrnak, amiért bármikor fordulhattam hozzá tanácsért a mérések és az elméleti anyagok kutatása során is.

Irodalomjegyzék

- [1] IEC 62192:2009 *Insulating Ropes*, .
- [2] MSZ EN 62192 *Feszültség alatti munkavégzés. Szigetelőkötelek.*, 2009
- [3] IEEE *Guide for Maintenance Methods on Energized Power Lines*, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9678146/>
- [4] Dr. Csikós Béla: *750 kV, 400 kV, 220 kV és 120 kV nagyfeszültség érintésével és közelében végzett munka technikája III.2.rész*, 1967-1980, OVIT, MVMT 172.344 szabadalom
- [5] ASTM F1701, <https://www.astm.org/f1701-12r18.html>
- [6] W. McDermid, D. R. Swatek, J. C. Bromley: *FRP hot stick flashovers during EHV live line work*, Proceedings: Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing and Coil Winding Technology Conference, Indianapolis, IN, USA, 2003, pp. 7-11
- [7] E. A. Cherney: *Flashover Performance of Artificially Contaminated and ICED Long-Rod Transmission Line Insulators*, in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 1, pp. 46-52, Jan. 1980
- [8] S. Ilhan, A. Ozdemir, S. H. Jayaram, E. A. Cherney: *Numerical and experimental investigation of the effects of pollution on glass suspension-type insulators*, in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 22, no. 5, pp. 2987-2994, October 2015
- [9] M. M. Hussain, S. Farokhi, S. G. McMeekin, M. Farzaneh: *Mechanism of saline deposition and surface flashover on outdoor insulators near coastal areas part II: Impact of various environment stresses*, in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 24, no. 2, pp. 1068-1076, April 2017
- [10] W. McDermid: *Characterization of Fast Flashover of External Insulation*, Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Vancouver, BC, Canada, 2008, pp. 510-513
- [11] D. A. Gillies, C. L. Nellis, K. H. Kuehn: *Field and test experience with insulating rope at BPA*, in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 6, no. 3, pp. 1182-1186, July 1991
- [12] C. Jiansheng, Z. Tongchun: *The new technology for improving the tensile strength of insulation rope*, 1993, Proceedings of ESMO '93. IEEE 6th International Conference on Transmission and Distribution Construction and Live-Line Maintenance
- [13] D. Wichmann, T. K. Saha: *Diagnostic Testing for the Determination of Quality of Live-Line Ropes*, 2003

- [14] H.-P. Pampel: *Electrical Behavior of Insulating Ropes for Live Working*, 2014
- [15] J. Laninga: *Comparative Analysis of Dielectric Insulating Ropes for Live Working*, 2021, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)
- [16] <https://www.tdworld.com/electric-utility-operations/article/20970883/liveline-crews-improve-safety-with-dielectric-nets>
- [17] <https://www.epri.com/research/products/1013603>
- [18] <https://www.folchsa.com/en/products/electric>
- [19] <https://www.specialisedforce.com.au/product/insulating-rope>
- [20] <https://www.barry.ca/rope-systems/dielectric-rope-and-net>
- [21] <https://www.tidpower.com/enchanpin/show.asp?id=1133>
- [22] <https://www.roblon.com/industries/energy/high-voltage-pulling-rope>

Az internetes forrásokra mutató linkek utolsó ellenőrzési időpontja: 2023. 11. 02.

Táblázatjegyzék

1. táblázat Hibajelenségek és okaik	19
2. táblázat Mintadarabok adatai	24
3. táblázat Száraz feszültségpróba, 2020	25
4. táblázat Száraz feszültségpróba, 2021	25
5. táblázat Száraz feszültségpróba, 2022	26
6. táblázat Mintadarabok adatai	27
7. táblázat Száraz mérési eredmények	28
8. táblázat Nedves mérési eredmények	29

Ábrajegyzék

1. ábra Szerelőkocsi kettős kötegelésű sodronyon.....	7
2. ábra Viaszos bevonatú FAM-kötél	12
3. ábra Barry "Rescue" szigetelőkötel	12
4. ábra Folch Ropes SA 3STRANDS kötele	12
5. ábra Roblon szigetelőkötel, három méretben	13
6. ábra Specialised Force egypázmás szigetelőkötel.....	13
7. ábra TID Power szigetelőkötel	13
8. ábra Új elrendezés a szivárgó áram mérésére	16
9. ábra FAM-kötelek tároló hordóikban	18
10. ábra FAM-kötél végződésénél felületi sérülések	19
11. ábra Pázmás felépítésű szigetelőkötel RC ekvivalense [14]	22
12. ábra Átívelt FAM-kötél ismételt feszültségpróbája.....	23
13. ábra K5 mintadarab végződése	27
14. ábra Mérőellenállás árnyékolása.....	27
15. ábra IEC 62192 szerinti elektródelrendezés	28
16. ábra K6 mintadarab átütése.....	29
17. ábra Égésnyom a K6 mintadarab varrásánál.....	30