



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Villamos Energetika Tanszék

## **A nagyfeszültségű FAM személyzet villamos ív elleni védelmének vizsgálata**

**Készítette:**

Halász Bálint Gergely

**Neptun :**

XZ7DU1

**Konzulens:**

Németh Bálint, adjunktus  
Cselkó Richárd, tanársegéd  
Göcsei Gábor, doktorandusz

**Dátum:**

2014. 10. 22.

# Tartalom

Összefoglaló .....	2
Abstract .....	3
1. Bevezetés .....	4
2. Nemzetközi kitekintés .....	6
2.1. Feszültség alatti munkavégzés .....	6
2.2. Villamos ívvédelem.....	7
3. Vezetőképes öltözet .....	9
4. Villamos ív energiája .....	13
4.1. A villamos ív feszültsége.....	14
4.2. Íven átfolyó áram .....	15
4.2.1. Egyfázisú zárlati modell:.....	18
4.3. Geometriai modell: .....	20
4.3.1. Első elrendezés.....	22
4.3.2. Második elrendezés: .....	23
4.4. Az ív talppontjainak viselkedése.....	24
5. Rendelkezésre álló mérési eredmények és a számítási módok összevetése .....	26
6. Adott hálózaton elvégzett számítás .....	29
7. Villamos ívvédelemben alkalmazott védőeszközök .....	32
8. Konklúzió és tervek .....	34
9. Irodalomjegyzék .....	35

## Összefoglaló

A villamos energia megjelenése óta jelentősége nagymértékben megnőtt, felhasználási módja sokrétűvé vált. Nagy szerepet játszik a világ iparának lélegeztetésében, és mindezek mellett a lakossági felhasználása is nagy méreteket ölt. A felhasználói szokások – legyen az ipari vagy lakossági – megkövetelik a villamos energia folyamatos elérhetőségét.

Mint ahogyan a feszültség alatti munkavégzés technológia megnevezése is sugallja, esetében a karban tartott hálózati elem feszültség alatt áll, melyből adódóan a munkát csak rendkívül szabályozottan, nagy odafigyeléssel történhet. Az előírások szigorú követelményeket állítanak a munkát végző személlyel, és a felhasznált munkaeszközökkel kapcsolatban is, a minél magasabb fokú személyi biztonság érdekében. Ennek ellenére előfordulhat, hogy külső okból, vagy a munkát végző személy hibájából kifolyólag olyan baleset történik, amely próbára teszi a szerelő által használt védőfelszerelés hatásosságát. Különösképpen nagy kockázatot jelenthet olyan veszélyhelyzet, amelyre az épp karbantartott hálózat fizikai és villamos jellemzői előreláthatólag nem engedtek következtetni a védőeszközök kiválasztásakor. Ebben az esetben megjelenhet olyan jellegű káros igénybevétel, amitől a védőfelszerelés nem mentesíti a viselőjét.

Nagyfeszültségű hálózaton jellemzően az úgynevezett potenciálon végzett munka módszere használatos. A módszer sajátossága, hogy az effajta munkát lehetővé tevő védőruházatnak a mechanikai igénybevételeken kívül Faraday kalitkaként kell a viselőjét védeni a nagy villamos térerősséggel szemben. Ezzel szemben a kis- és közép-feszültségű hálózatokon alkalmazott ívvédelemről az aktuális NaF FAM védőruházatra vonatkozó IEC szabvány nem tesz említést, így nem követelmény.

Dolgozatomban a potenciálon végzett munkamódszerben előforduló elrendezéseket, illetve a magyar villamos hálózat jellemzőit figyelembe véve keresem azokat az eshetőségeket, amikor villamos ív alakulhat ki. A kialakuláson kívül fontos az ív által sugárzott energia mértéke és annak hatása, ezért keresem azt a számítási módot, mely nagyfeszültségű hálózatok esetében is helytálló. Az eredmények alapján összevetem a más feszültség szinteken használatos felszerelések védőképességét, a NaF hálózat igényével.

## **Abstract**

The significance of electric power has grown in a large scale since its appearance. Furthermore, its production methods have become diverse. The electric power takes an important part in the operation of the world industry. Next to all these points, its residential consumption is also very remarkable. The users' habits - they can be industrial or residential - demand the continuous accessibility of electric power.

As the name of the Live Line maintenance technology indicates, the maintained element of the network remains under voltage. For this reason, work can be done orderly and with special care. The regulations set strict standards to the employees and the implements in order to ensure high security. However, accidents could happen due to external reasons or the mistakes of the employee. These accidents put the effectiveness of the personal protecting equipment to the test which are used by the mechanics. An emergency for which one had no way of preparing during the selection of the protective equipment, as the physical and electric features of the system did not indicate its possibility, is especially risky. In such cases the protective equipment might not protect the wearer from damaging effects.

The method of the so called work on potential is used typically on high voltage. The feature of this method is that the protective equipment, which is used in such a work, has to protect the wearer against the high electric field as it would be a Faraday cage, out of the mechanical strain. Contrarily, the IEC standard, relating to the actual high voltage LLM protecting equipment, does not mention the arc flash protection which is applied on small and medium voltage networks.

In my work I investigate those arrangements which occur in work on potential methods. Furthermore, taking into consideration the features of the Hungarian electric network, I search for those possibilities when electric arc can be initiated. Beside the establishment of the arc, the degree of the energy radiating by the arc and its influence are also important. So I look for the calculating method which can be acceptable in the case of high voltage networks. According to the results, I compare the protecting ability of the other equipment which are used on different levels of voltage with the requirements of the high voltage network.

## 1. Bevezetés

A villamosenergia-piac átalakulása komoly kihívást jelent a piac valamennyi szereplője számára. Az ellátás biztonsága a szolgáltatók és üzemeltetők részére továbbra is a legfontosabb szempont. A biztonság mellett a fogyasztói tudatosság növekedése - beleértve a villamosenergia-felhasználást - és a villamos energia folyamatosan növekvő meghatározó szerepe a mindennapi életünkben új technológiák alkalmazását igényli.

Az elmúlt évtizedekben a gazdaság alakulása, a megváltozott fogyasztói szokások szükségessé tették, hogy a lakosság bármikor hozzáférjen a számára nélkülözhetetlen, egyre növekvő mennyiségű villamos energiához. Ahhoz, hogy ez maradéktalanul megoldható legyen, nem alkalmazható megoldásként az átviteli hálózat távvezetékszakaszainak még átmeneti kikapcsolása sem.

Ennek megvalósítására az 1970-es években dr. Csikós Béla (1922-1994) tevékenységének eredményeként kialakult a magyar nagyfeszültségű hálózatra vonatkozó feszültség alatti munkavégzés (FAM) technológiája.

„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 (a továbbiakban: FAM tevékenység).” [1]

Az ilyen típusú munkát végző személy a nagyfeszültségű részek közvetlen közelében tartózkodik, melyből kifolyólag az általánosnak mondható, munkakörülményekből eredő veszélyeken kívül, más terhelésekkel is számolni kell. Ilyen különös terhelés a testét érő nagymértékű villamos térerősség, mely védőruházat nélkül káros lehet a szakszemélyzet egészségére. A munkában használt bevizsgált eszközöknek többek között az efféle terhelések elleni védelmet is nyújtaniuk kell. Viszont a felvetett terheléseken és körülményeken kívül jelen vannak olyan veszélyek is, melyek esetleges hiba előfordulásakor jelentkezhetnek.

Dolgozatom egy részében a nagyfeszültségű hálózatokon végzett feszültség alatti munkával foglalkozom. Ezen a feszültség szinten (Magyarországon jelen lévő névleges NaF feszültség szintek: 120 kV, 220 kV, 400 kV, 750 kV) tipikusan használt munkamódszer a potenciálon végzett munka. Ilyen típusú munka esetén, a beavatkozást végző személy a karbantartandó fázisvezetővel villamos összeköttetésben áll. A módszer védőeszköze az elektrosztatikus védőruházat, amely Faraday-kalitkaként viselkedik: ideális esetben külső hatásra belsejében a villamos térerősség nulla lesz.

Dolgozatom másik jelentős része a villamos ívvel, és annak káros hatásai ellen védelmet nyújtó villamos ívvédelemmel foglalkozik. Célom, hogy kiszámítsam egy nagyfeszültségen kialakuló villamos ív által sugárzott energiát, ez alapján pedig becslést tegyek az ellene alkalmazható védőeszközök hatásosságára.

## 2. Nemzetközi kitekintés

### 2.1. Feszültség alatti munkavégzés

A feszültség alatti munkavégzés technológiái különös figyelmet fordítanak a személyi védelemre, melynek részei a személyi védőfelszereléseken kívül a jól megtervezett és szabályozott lebonyolított munkamódszerek. Ennek ellenére lehetnek olyan káros külső tényezők, melyek a rendkívüli odafigyelés ellenére sem kiküszöbölhetőek. Adódhat olyan helyzet, mikor a szélsőséges környezeti feltételek különös igénybevételeket jelentenek a munkavégzéshez használt felszerelésekre, ez esetben az eszközök nem képesek biztosítani egyes, rájuk vonatkozó előírásokat. Ilyen környezeti hatás lehet például a levegő nagy páratartalma, mely kicsapódva lecsökkentheti egyes célszerszámok felületén történő átíveléshez szükséges feszültséget, így megkönnyítve egy esetleges zárlat kialakulását. A környezeti hatásokon kívül nagy veszélyt jelenthetnek a munkaeszközök sérülései, hibái, melyekre az időszakos vizsgálatok során nem derült fény, tehát csak egy bekövetkező baleset esetében mutatkoznak.

Hasonló eset történt 1997-ben, amikor egy 500 kV-os nagyfeszültségű, váltakozó áramú hálózaton feszültség alatti munkavégzés módszerrel karbantartást végeztek egy 32 mm átmérőjű, 4,88 m szigetelési hosszúságú úgynevezett „hot stick” (szigetelő rúd) segítségével. A munka lépéseként a tartóoszlopon álló szerelő felemelte a szigetelő rudat a nagyfeszültségű sodronyhoz, mellyen átívelés alakult ki. A zárlati áram körülbelül 3 periódusideig állt fenn. [2]

A történetek után 5 évvel, 2002-ban egy másik baleset történt, ahol ismét egy szigetelő rúdon bekövetkező átívelés okozott balesetet, hasonló körülmények között. Ebben az esetben a munkát végző személy íválló ruhát viselt, mely jelentős védelmet nyújtott a villamos ív károsító hatásai ellen. [3]

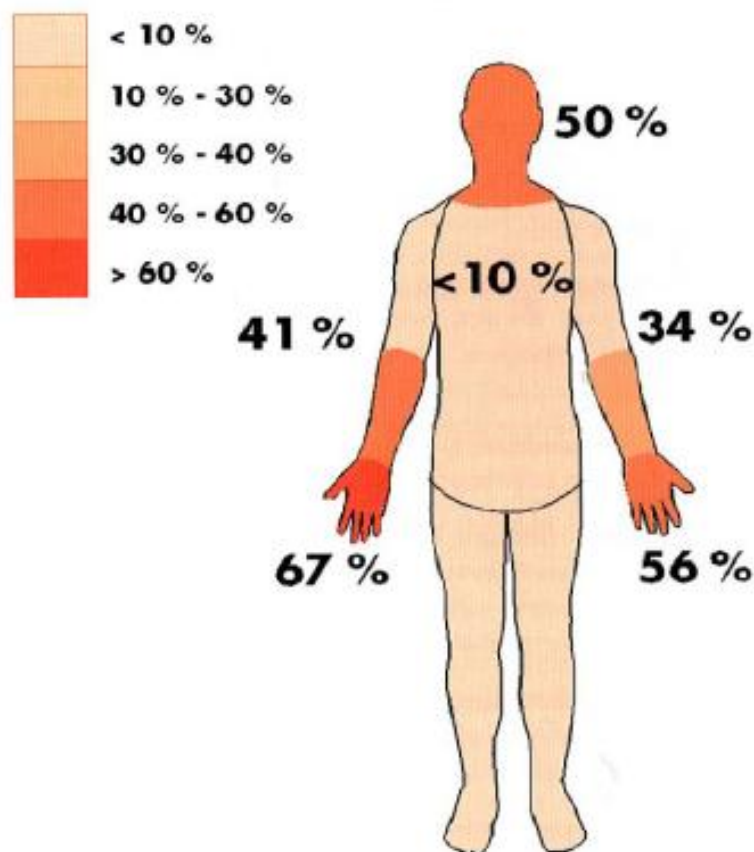
Az efféle sajnálatos balesetek vetnek fényt az olyasfajta kockázatokra, melyekre a technológia rendkívüli szabályozottsága sem nyújt védelmet, és mutatnak rá arra, hogy egy adott technológiának milyen rejtett veszélyei állnak fenn.

A külföldi kitekintésen kívül megemlítendő, hogy hazánkban az effajta balesetekkel szemben az úgynevezett Munka-végrehajtási feltételekkel rendelkeznek. Ennek értelmében

a végrehajtott FAM munkálatot csak a meghatározott Munka-végrehajtási feltételeknek (MVF) eleget tevő munkakörülmények fennállása esetén lehet megkezdeni.

## 2.2. Villamos ívvédelem

Egy tíz éves tanulmány, melyet a „Electricity de France” végzett azt mutatja, hogy a rögzített villamos jellegű sérülések 77%-a villamos ív által okozott sérülés, mely sugallja, hogy az ív mint jelentős veszélyforrás van jelen a villamos iparban dolgozó személyzet munkájában. Ebből kifolyólag nem szabad elhanyagolni a vele szembe irányuló óvintézkedéseket. Az ívvédelem egy komplex feladat, mivel a villamos ív által keltett személyzetre káros hatása rendkívül sokrétű, ebből kifolyólag a megfelelő védőfelszerelés kiválasztására nagy gondot kell fordítani. [4]



1. ábra - Ív által okozott sérülések jellegzetes eloszlása [5]

Az íválló ruházatok és védőeszközök anyagai, úgynevezett ATPV értékkel minősíthetők. Az ATPV (Arc Thermal Performance Value) egy felületre eső energiaérték, mely egy anyagra vonatkozóan megadja, hogy mekkora terhelés az, amely esetén a belőle készült



védőruházat még meg tudja védeni a viselőjét a másodfokú égési sérüléstől melynek határértéke  $1,2 \text{ cal/cm}^2$ . Tehát az igényeknek megfelelően a védőeszközt, az ATPV értéke szerint lehet kiválasztani. [6]

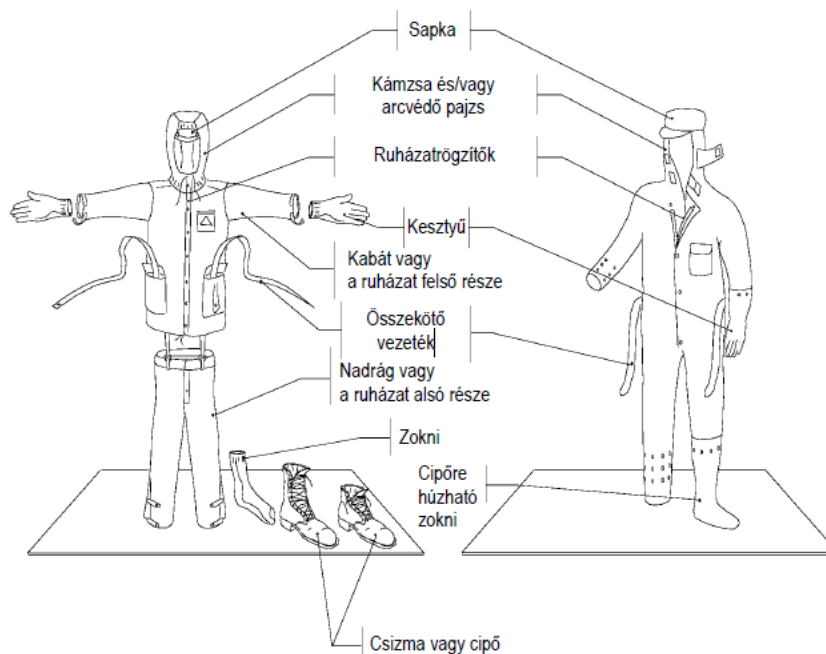
A védőeszközök tesztelésére több tesztelő eljárás is létezik, közülük az úgynevezett „Box test” elnevezésű eljárást emelném ki. Ez a teszt demonstrálja egy doboz kialakítású pl. kapcsolószekrényben kialakult ív hatását a nyitott oldalán álló személlyel szemben. Ennek jelentősége abban rejlik, hogy a dobozban kialakuló ív energiája a nyitott oldal felé reflektálódik, így a sértett felé sugárzott energia más mértékű, és más jellegű is, mintha az ív egy nyitott térben képződne. [7]

### 3. Vezetőképes öltözet

Témám tárgyának része, a nagyfeszültségű FAM során alkalmazott elektrosztatikus védőruházat. A nagyfeszültségű védőruha alapvetően egy teljesen zárt, a viselő testének egészét körbeölelő, villamosan vezető anyagból készült ruházat. A villamosan vezető tulajdonságot az anyagba szőtt vezető szálakkal érik el.

Ennek jelentősége, hogy a nagyfeszültségű részek közelében, ahol a feszültség alatti munkavégzés történik, nagy villamos térerősség van jelen, mely hatására a testben áramok indukálódnának. Ezen térerősséggel szemben védeni kell a munkát végző személyt. Tehát a vezető szálakkal átszőtt, teljes testet befedő ruha jelentősége, hogy annak belsejében a villamos térerősség közel nulla.

A nagyfeszültségű védőruházat több komponensből áll. Fontos, hogy minden komponens között meg legyen a megfelelő villamos kapcsolat. Ennek érdekében minden ruhadarabon megtalálható a szomszédos ruhadarabbal való összeköttetésre szolgáló - például patentos kialakítású - kapocs. A ruha a megfelelő védelem biztosítása mellett nem korlátozhatja a viselő érzékeit, komfortérzetét. Például a védőkesztyűnek a megfelelően kicsi villamos ellenállás és nagy kopásállóság mellett kellő mértékű mozgékonyt is biztosítania kell. Másik példa lehet erre az arc védelme, melyet úgy kell megvalósítani, hogy az elektrosztatikus arcvédő ne korlátozza a munkát végző személyt a látásban, lélegzésben.



2. ábra - Elektrosztatikus védőruházatok felépítése [8]

Az 2. ábrán láthatjuk, hogy a szóban forgó védőruházat többféle felépítéssel is készülhet. A bal oldalon egy kabátból, nadrágból és egyéb kiegészítőkből álló védőruházat, míg a jobb oldali képen egy kezeslábas típusú ruházat látható.



**3. ábra - Magyar ruha**

A 3. ábrán látható védőruházat a magyar, Dr. Csikós Béla szabvány szerint készült vezetőképes öltözet, az ahhoz tartozó vezető kesztyű és vezető zokni. A kesztyűn és a zoknin szalagokat láthatunk, melyek szerepe a zokni-nadrág lábszár, kesztyű-zakó kar részek villamos összeköttetésének biztosítása. Hasonló szalag gondoskodik a zakó és nadrág összeköttetéséről is.



4. ábra – Magyarosított orosz ruha

A 4. ábrán az oroszok és magyarok által közösen fejlesztett védőruházat egyes komponensei láthatóak, a teljesség igénye nélkül. Ilyen ruhakomponens a ruházat részét képező kabát, annak csuklya része arcvédő hálóval, és az egyes ruhakomponensek villamos összekötésére szolgáló szalagok.

A nagyfeszültségen alkalmazott védőruházattal szemben az **MSZ IEC 60895** szabvány támaszt követelményeket, a következők szerint: [8]

#### Általános előírások

A vezetőképes öltözetnek villamosan folytonos egységet kell képeznie a viselője számára. A potenciálkiegyenlítő vezetőnek bírnia kell a mechanikai és villamos igénybevételt. Ruhakomponensek közötti villamos kapcsolatoknak jól kell működniük.

Felhasznált vezetőképes anyag műszaki követelményei:

- Lángállóság

- Villamos ellenállás
- Áramvezetési képesség
- Ernyőzés és árnyékolás hatékonysága
- Tisztításállóság
- Szikrakisüléssel szembeni védelem
- Kopás- és tépésállóság

Speciális ruhakomponensek:

- Vezetőképes kesztyűk, zoknik, külső zoknik
- Vezetőképes lábbeli
- Vezetőképes kámzsa, vezető arcvédő

A szabvány nem tér ki a villamos ívvel szembeni védelemre, így jelenleg az nem követelmény. Első megközelítésben ennek oka lehet, hogy villamos ív csak valamilyen hiba következményeként jöhet létre, melynek valószínűsége a feszültség alatti munkavégzés technológiájából (meghatározott védőtávolságok, tüzetesen kidolgozott munkamenet, különleges üzemviteli állapot, szigorú alkalmassági feltételek mind a személyzet, mind a felszerelést illetően) kifolyólag csekély.

## 4. Villamos ív energiája

Villamos ív energiamérlege:

$$P = P_e + P_v + P_s + P_k$$

ahol:  $P$  - az ívben keletkezett teljesítmény

$P_e$  - az elektródokon keresztül elvezetett teljesítmény

$P_v$  – a hővezetéssel távozó teljesítmény

$P_s$  – a sugárzással távozó teljesítmény

$P_k$  – konvekcióval távozó teljesítmény [9]

Az ívben keletkezett teljesítmény a hőközlés különböző módjain keresztül jut el a környezetébe, melyeknek összege alapvetően egyenlő az ívben keletkezett összes teljesítménnyel, ami az ív feszültségének, és áramának szorzataként áll elő. Emellett ha ismert az ív időtartama, akkor számolható, hogy az adott hálózaton kialakuló villamos ív mekkora terhelést jelenthet a környezetében lévő felszerelés és személyek számára. A hőátadás alapvetően három különböző módon történhet a környezet felé. A három mód a következő:

**Hővezetés:** Ekkor a hő a közeg magasabb hőmérsékletű részéből az alacsonyabb hőmérsékletű része felé áramlik, ekkor a közeget alkotó részecskék elmozdulása nem számottevő.

**Hőáramlás:** Ekkor a hő a közeg makroszkopikus részeinek áramlása, helyváltoztató mozgása következtében terjed. Ennek két típusa különböztethető meg:

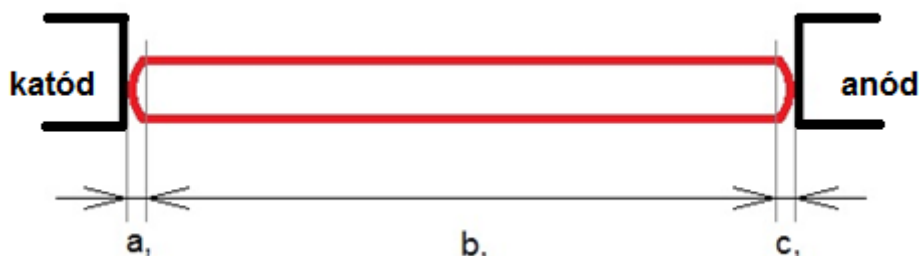
- szabad konvekció: a hőszállító közeg mozgását a hőmérsékleti különbségek hatására kialakuló sűrűségkülönbség hozza létre
- kényszerkonvekció: a hőszállító közeg mozgását valamilyen külső erő biztosítja

**Hősugárzás:** Ennek esetében az energia térbeli terjedése elektromágneses hullámok formájában valósul meg. [10]

Alapvetően a számításaim során azt feltételezem, hogy a megtermelt energia egésze eljut a környezetébe valamilyen közvetítő közeg által, és a közeg veszteségmentesen továbbítja azt. A probléma ezen megközelítése azt eredményezi, hogy a megalkotott számítási mód eredménye az ív hőmérsékletének, energiájának legkedvezőbb terjedését fogja adni, tehát várhatóan felül fogja becsülni egy kialakuló ív környezetében mérhető felületegységre eső energiát.

#### 4.1. A villamos ív feszültsége

A villamos ív feszültsége három részfeszültség összetevőre oszlik, az anódesésre, a katódesésre és az ívesésre. Az anód- és katódesés az ív talppontjainak feszültségével egyenlő.



5. ábra - Villamos ív részei: a-katódesés övezete, b-ívoszlop, c-anódesés övezete

A nagyáramú villamos ív feszültség-gradiense - méréseken alapuló számítások szerint - az áram növekedése mellett 0,95 kV/m körül alakul nagy elektródtávolság esetén. A mérés 3,4 m nagyságú elektródtávolság mellett zajlott, a gradiens számításakor a teljes ívfeszültséget osztották az elektródok távolságával. Viszont megjegyzendő, hogy a teljes ívre vonatkozó feszültség mellett mérték az ív két talppontjához közeli feszültséget is, melynek eredményeként megállapították, hogy a végpontokhoz közeli feszültség-gradiens 1,3~1,4-szerese az ívoszlop gradiensének. Ebből levonható az a következtetés, hogy jelentősen rövidebb ívek esetén valószínűleg nagyobb feszültség gradienssel kellene számítani ahhoz, hogy a számítás jól közelítse a valós keletkező energia értékét. [11]

Számításaim során az általuk számított feszültség gradienst (0,95 kV) a mérési elrendezés elektród távolságától jelentősen eltérő hosszúságú ívek esetén nem alkalmazom.

Hossz (m)	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
Feszültség (kV)	2,85	3,325	3,8	4,275	4,75	5,225	5,7

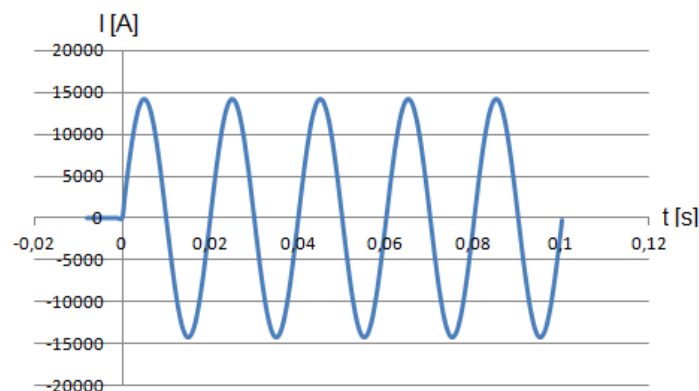
1. táblázat - Különböző hosszúságú ívek feszültségei

## 4.2. Íven átfolyó áram

A váltakozó feszültségű rendszeren kialakuló zárlati áram alapvetően két összetevőből áll, melyek a következők:

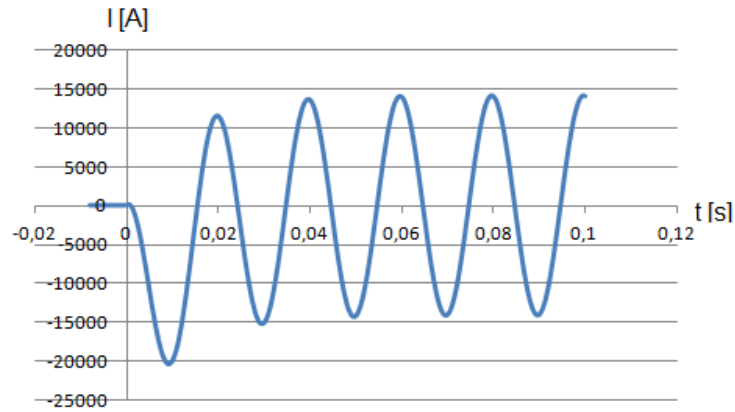
- Stacioner összetevő
- Tranziens összetevő

A hálózati áram a zárlat kialakulásának kezdete előtt, egy üzemi teljesítményhez szükséges értékkel rendelkezik, és a rendszer teljesítménytényezőjéből következő „ $\varphi$ ” szöggel el van tolódva a feszültségtől. A zárlat kialakulásának pillanatában felvett áram értéke  $I_{st}(0)$ , mely függ az aktuális fázishelyzettől. A tápfeszültség a zárlat kezdetekor megindítja a zárlati áramot, mely a táplált hálózat hirtelen lecsökkent ellenállása/impedanciája miatt nagymértékben megnő az üzemi áramhoz képest, viszont a fázisa nem változik. Mivel az áram nem változhat ugrásszerűen, az ív képződésének pillanatában az áramérték  $I_{st}(0)$ -val egyenlő, és mivel a fázishelyzet sem változott a megnövekedett amplitúdóval együtt, a zárlati áram közéértéke eltolódik. A tranziens áramösszetevő a hálózati paraméterek függvényében nullához konvergáló komponens, melynek értéke a zárlat kialakulásakor egyenlő a közéérték eltolódásával. Ennek fényében látható, hogy a zárlati áram egyenlő a stacionárius- és tranziens komponensek összegével. Ennek hatása abban nyilvánul meg, hogy megváltozik az áram időfüggvényének menete, így annak effektív értéke is. [12]

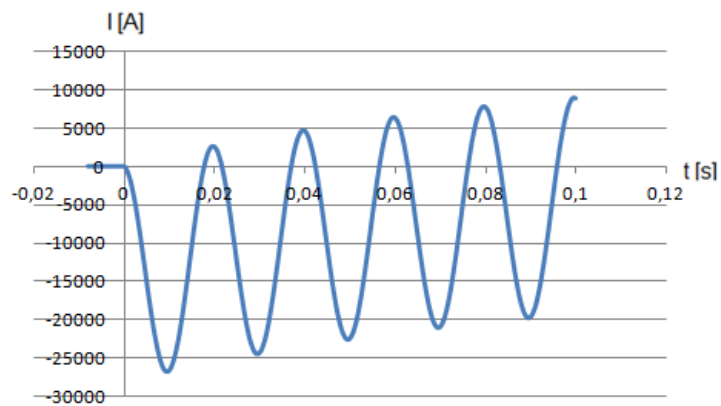


6. ábra - Bekapcsolási szög 0, tranziens összetevő nem játszik szerepet





7. ábra - Bekapcsolási szög  $\frac{\pi}{2}$  - tranziens összetevő megváltoztatja az áram menetét ( $\tau=0,011$  s esetén)



8. ábra - Bekapcsolási szög  $\pi/2$  - tranziens összetevő megváltoztatja az áram menetét ( $\tau=0,1$  s esetén)

A 6,7,8 ábrán a zárlati áram alakulásának szélsőséges esetei láthatók. Az első esetben a zárlat éppen az áram null-átmenetében lép fel, így a tranziens összetevő nem játszik szerepet, míg a második és harmadik esetben gyakorlatilag a szélsőértéknél lép fel, így a tranziens összetevő eltolja az áram menetét.

$$I_{1\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T I(t)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T (A * \sin(\omega * t))^2 dt} = 10 \text{ kA}$$

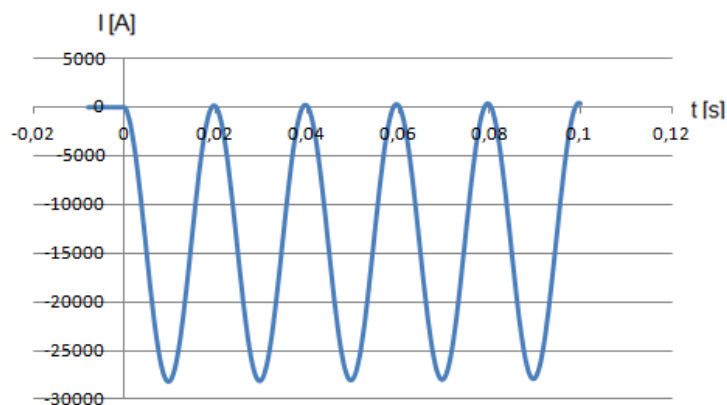
$$I_{2\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T (A * \sin(\omega * t + \frac{\pi}{2}) - A * \sin(\frac{\pi}{2}) * e^{-\frac{t}{\tau}})^2 dt} = 10,373 \text{ kA}$$

$$I_{3\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{T} * \int_0^T (A * \sin(\omega * t + \frac{\pi}{2}) - A * \sin(\frac{\pi}{2}) * e^{-\frac{t}{\tau}})^2 dt} = 13,645 \text{ kA}$$

Az 6. ábrán egy 10 kA effektív értékű, 50 Hz frekvenciájú  $10 \text{ kA} \cdot \sqrt{2}$  csúcsértékű szinuszos áram-jelalak látható, míg a második és harmadik esetben az  $I_r$  jellel összegzett áram, melynek effektív értékét a fent számított eredmények alapján változtatta a tranziens. A fentebb látható számításhoz, illetve ábrázoláshoz használt „ $\tau$ ” időállandót a hálózat hosszegységre eső ellenállása és hosszegységre eső induktivitása alapján számítottam a következő módon:

$$\tau = \frac{R}{L}$$

Tehát az effajta hálózati viselkedés is befolyásolhatja az áram effektív értékét, ami indokoltá teheti egy biztonsági szorzó tényező létrehozását a zárlati áram megállapításának során.



9. ábra - Bekapcsolási szög =  $\pi/2$ ,  $\tau = 40$  \* „ív időtartama”

A biztonsági szorzó mértékének meghatározásához fel kell deríteni a „ $\tau$ ” időállandó lehetséges értékeinek intervallumát, de a legrosszabb esetet (9. ábra) feltételezve a (amikor a „ $\tau$ ” értéke jóval nagyobb az ív időtartamától, és az ív áramának bekapcsolási szöge  $\pi/2$ ) zárlati áramforma jó közelítéssel egy „A” amplitúdójú szinuszos alapharmónikus, és egy „A” nagyságú offset komponens összegéből adódik. Ebben az esetben az effektív érték meghatározására használható a következő formula: [13]

$$I_{RMS} = \sqrt{I_0^2 + \frac{1}{2} * \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}$$

- Ahol:  $I_{RMS}$  - „I” áram effektív értéke
- $I_0$  - „I” áram középértéke
- $I_n$  - „I” alap- és felharmonikusok amplitudója

Esetünkben a számítás a következő formát ölti:

$$I_{RMS} = \sqrt{A^2 + 0,5 * A^2} = \sqrt{A^2 * (1 + 0,5)} = A * \sqrt{1,5} = I_{eRMS} * \sqrt{2} * \sqrt{1,5}$$

$$I_{RMS} = I_{eRMS} * \sqrt{3}$$

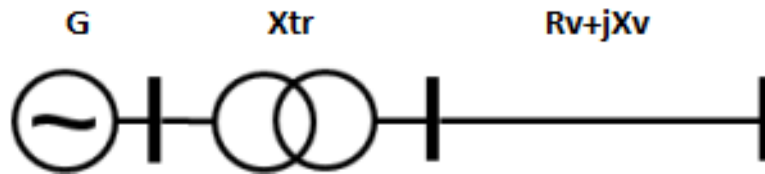
- Ahol:  $I_{RMS}$  - Tranziens áram effektív értéke
- $I_{eRMS}$  - Eredeti áram alapharmonikusának effektív értéke
- $A$  - Alapharmónikus amplitúdója ami az ofszet értéke

A számítás alapján a biztonsági tényezőt  $\sqrt{3}$  értékűnek választhatjuk, ezzel kiküszöbölve a tranziens jelenségekből adódó kiszámíthatatlan árammenet hatását ívszámítás esetén.

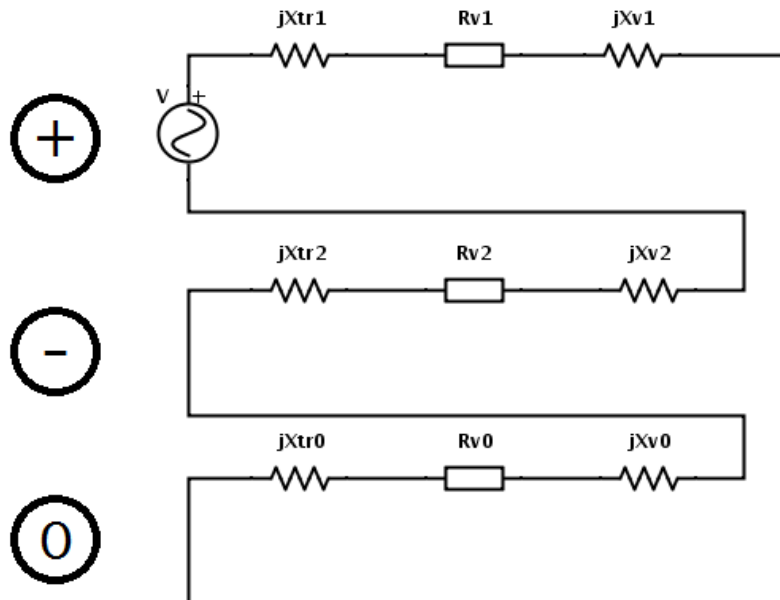
A következő számításom során a zárlati áram nagyságának meghatározásához a szimmetrikus összetevők módszerét használom fel.

#### 4.2.1. Egyfázisú zárlati modell:

A zárlati áram a hálózat szimmetrikus összetevőkre bontásával számítható. Az egyfázisú földzárlat esetén a pozitív, negatív és zérus sorrendű hálózat sorosan kapcsolódik egymáshoz a zárlat helyén. Ebben az esetben a számításban sugaras hálózati elrendezés feltételezett. [14]



10. ábra - Egyvonalas séma



11. ábra - Szimmetrikus összetevők módszere

A számításhoz a nagyfeszültségű hálózatokra jellemző nagyságrendű villamos paramétereket használtam, melyek a következők:

Un [kV]	Rv [Ω/km]	Xv [Ω/km]	Sn [MVA]	ε [%]
400	0,2	0,27	2000	8

2. táblázat - Távvezeték paraméterei

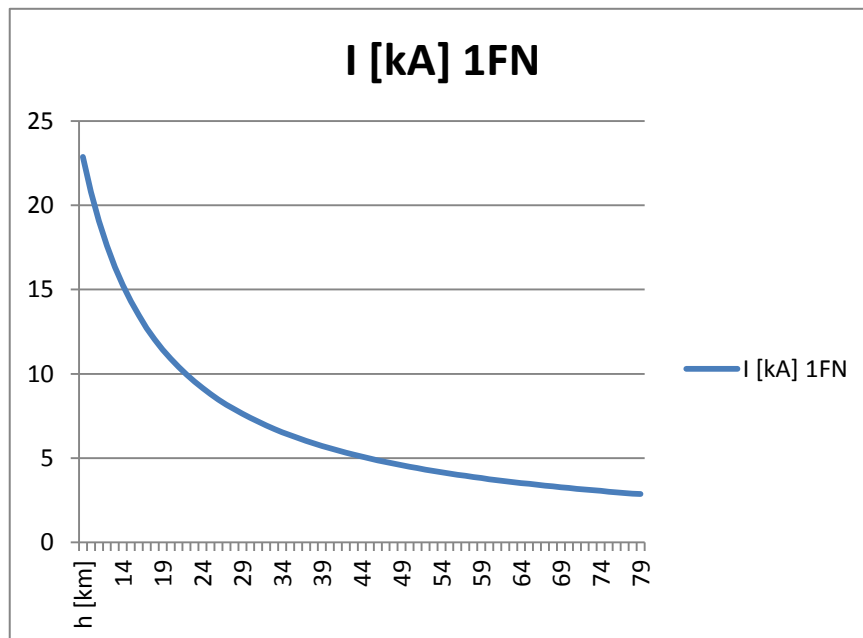
Transzformátor impedanciája:

$$Z_{tr} = \frac{\varepsilon}{100} * \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{8}{100} * \frac{(400 \text{ kV})^2}{2000000 \text{ MVA}} = 0,0064 \Omega$$

A szimmetrikus összetevők valós dimenziós értékekbe való átszámításához használt formula:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad I_b = 3 * I_0$$

A zárlati áram nagyságát nagyban befolyásolja a tápponttól való távolság, ezért a következő diagramon látható, hogy a tárgyalt hálózaton mekkora rövidzárlati áram alakulhat ki a távolság függvényében 10, és 80 km tartományban ábrázolva.

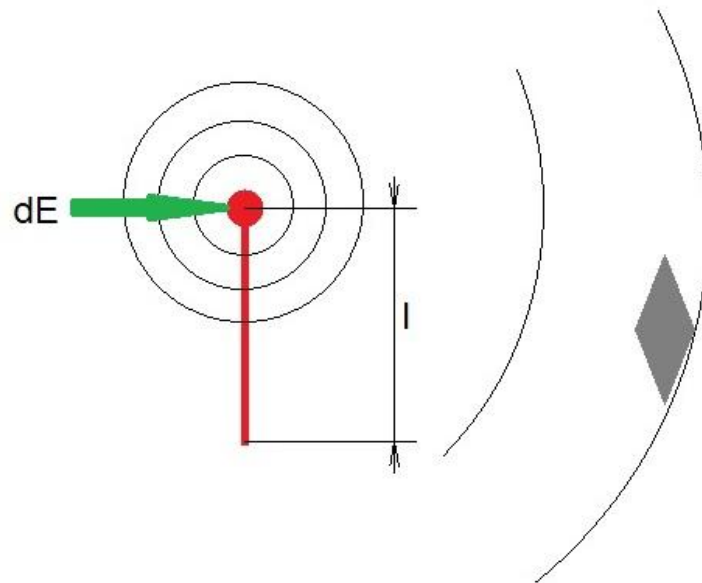


12. ábra - Zárlati áram nagysága a betáplálás távolságának függvényében

### 4.3. Geometriai modell:

A nagyfeszültségű hálózat méretei miatt a baleset folytán kialakuló ív hosszúsága nagy valószínűséggel egy nagyságrendbe esik a hálózaton dolgozó szakszemélyzet távolságával, így az ív, mint energiaforrás nem tekinthető pontforrásnak, viszont ahhoz nincs elég közel, hogy végtelen egyenesként legyen modellezhető. Emiatt a következőekben, mint véges, egyenes formájú forrásokat tárgyalom őket. A modell azt az elhanyagolást is magába

foglalja, hogy az ívet végtelen kis átmérőjűnek tekinti, mivel az centiméter nagyságrendbe esik, a tőle vett méteres távolságokkal szemben. Tehát számításom alapja, hogy homogén energiaeloszlást feltételezek az ív mentén, és felbontom a forrást végtelen kis kiterjedésű,  $dE$  energiájú pontforrásokra, majd összegezem hatásaikat a tárgyalandó pontban. A  $dE$  pontforrások energiája úgy terjed, hogy a körülötte lévő koncentrikus gömbhéjakon a bennük lévő össz-energia felületesen eloszlik. Tehát a körülötte lévő „ $R$ ” sugarú gömbháj össz-energiája  $dE$ , egységnyi felületre eső energiája „ $dE/A$ ”, ahol „ $A$ ” a gömbháj felszíne.

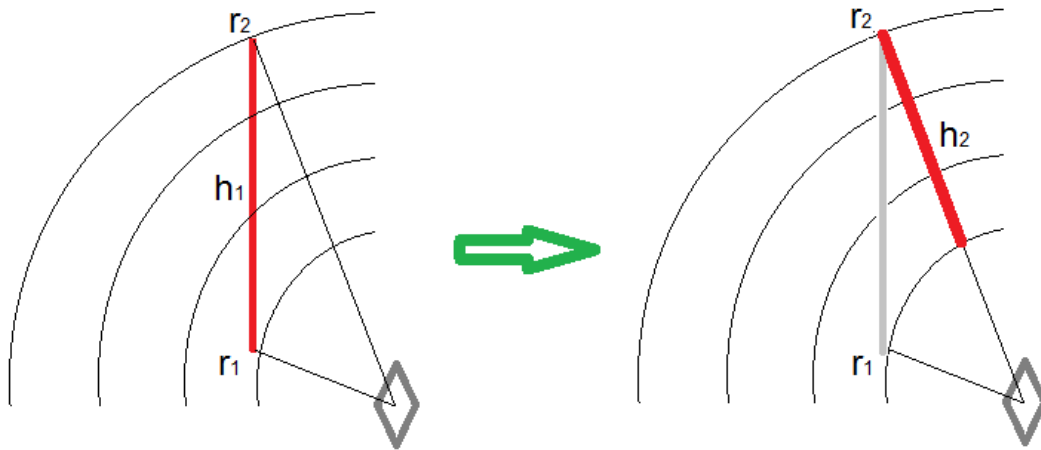


13. ábra - Ív felbontása " $dE$ " forrásokra

Az alábbiakban két olyan elrendezésre vonatkozó számítási modellt állítok fel, melyek az általam vélt, gyakran előforduló szituációk esetén nagy valószínűséggel használhatóak lehetnek.

### 4.3.1. Első elrendezés

Ebben az esetben nem az ív mellett van a munkát végző személy, így alkalmazható rá a következő modell:



14. ábra - Transzformáció I.

Ekkor a „ $h_1$ ” hosszúságú ív helyett, a „ $h_2$ ” hosszúsággal számíthatunk, mert a modellben ekkora hosszúságban oszlik el a teljes energia.

$h_2$  - az ív helyettesítő forrásának hossza

$$h_2 = r_2 - r_1$$

A teljes termelt energia:

$$\sum E = U * I * t$$

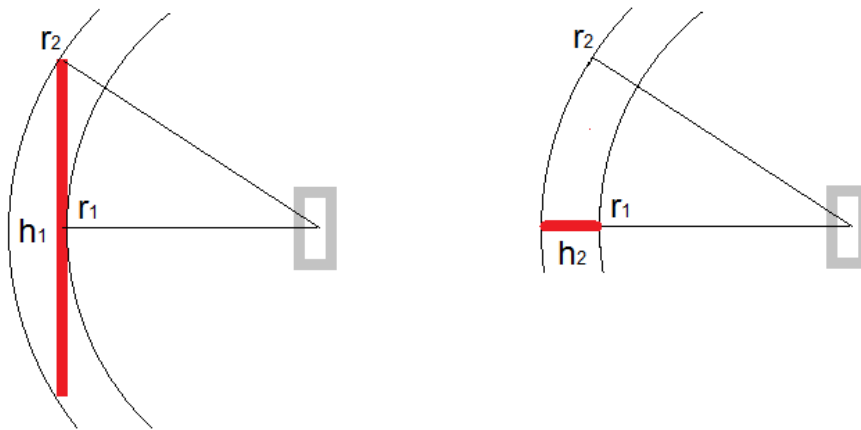
A helyettesítő vonalforrás vonalmenti energiaeloszlása, az összes energia és a számított hosszúság hányadosa.

$$E' = \frac{\sum E}{h_2}$$

Az „ $r_1$ ” és „ $r_2$ ” az ív két talppontjától mért távolsága a tárgyalt pontnak, így a felületre eső energia:

$$E_{vm} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{E'}{4 \cdot \pi \cdot x^2} dx = \frac{E'}{4 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \left[ \frac{J}{m^2} \right]$$

### 4.3.2. Második elrendezés:



15. ábra - Transzformáció II.

Ebben az esetben a felület, melyen számítandó az energia, a villamos ív – ez esetben mint vonalforrás – mellett van, így az elrendezés geometriájából kifolyólag más számítási mód vonatkozik rá. Itt is helyettesíthető a vonalforrás egy másik könnyen kezelhető forrással, és a módszer hasonló marad az első esethez.

$h_2$  - az ív helyettesítő forrásának hossza

$$h_2 = r_2 - r_1$$

A termelt összes energia:

$$\sum E = U \cdot I \cdot t$$

A helyettesítő forrás fajlagos vonalmenti energiaeloszlása, az összes energia és a számított hosszúság hányadosa.



$$E' = \frac{\sum E}{h_2}$$

Az „ $r_1$ ” távolság az ív legközelebbi pontjától (ebben az esetben az ív középpontjától) mért távolság, az „ $r_2$ ” az ív talppontjától mért távolság, így a felületre eső energia:

$$E_{vm} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{E'}{4 \cdot \pi \cdot x^2} dx = \frac{E'}{4 \cdot \pi} * \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \left[ \frac{J}{m^2} \right]$$

Mint ahogy azt a számítás elején láthattuk, a modell részét képezik különböző közelítések, elhanyagolások, melyek jelentős hibát vihetnek az eredménybe. A hibák kiküszöböléséhez fel kell deríteni azokat a tényezőket, melyek befolyásolják a modellen használt számított eredmények, és a valóságban jelen lévő energiaértékek különbségét. Ehhez azonban tüzetesen meg kell ismerni a villamos ívben lejátszódó folyamatokat, a hőátadás módját a személyzet felé, illetve mérésekkel kell igazolni - vagy ha szükséges korrigálni - az alkotott számítási módszert. Esetünkben a számítási mód használatából kapott eredmények várhatóan felülbecsülik a valós energiaértéket, mivel nem számolunk különböző veszteségekkel.

#### **4.4. Az ív talppontjainak viselkedése**

A nagy áramú és hosszúságú villamos ívet nagy áramsűrűség jellemzi, melynek mértéke 17 kA íváram mellett, mérések alapján  $4000 \text{ A/cm}^2$ . A úgynevezett „Saha-egyenlet” szerint kiszámított ívhőmérséklet az ív középső szakaszában megközelítőleg 19000 K, mely nagyságának szemléltetéseként megemlítendő, hogy a nap felszíne körülbelül 5000 K hőmérsékletű. A katódolt és az anódolt övezetének hőmérséklete bár elmarad ettől az értéktől, mégis meghaladja az alumínium olvadásához, párolgásához szükséges hőmérsékletet. Ennek folytán a nagyáramú ív fennállása alatt az ívplazmába kerülő fémgőzök további gerjesztésére és ionizációjára jelentős energiára van szükség. [15] [16] [9]

Egyfázisú földzárlat esetén az ív egyik talppontja valószínűsíthetően az acél-alumínium (ACSR) sodronyon lesz, míg a másik talppontja az alumíniumból, vagy acélból készült szerelvényen.

Elem	Fajhő $\frac{J}{kg \cdot K}$	Olvadáshő $\frac{kJ}{kg}$	Párolgáshő $\frac{kJ}{kg}$	Forráspont [°C]	Olvadáspont [°C]
Alumínium	950	398	10900	2500	660,3
Réz	385	209	4795	2600	1083

3. táblázat - Alumínium és réz jellemzői [17] [18]

Korábbi kutatások szerint, egy rézelektrodok között fennálló villamos ív lefolyásakor, 10 kA áramerősségű, 60 Hz frekvenciájú szinuszos jel egy félperiódusa alatt 0,75 g réz párolog el, melynek 3000 K-ről 20000 K-re való melegítéséhez 8500 J energiára van szükség. Ez az energiaérték tartalmazza az atomok gerjesztéséhez és ionizációjához szükséges energiát is. [15] [16] [9]

Mivel az általam eddig tárgyalt hálózatok árama, és a forrásban használt áram egyaránt szinuszos, ezért ugyanazon időtartamra számított effektív értékük megegyező csúcserték mellett megegyezik. 0,1 másodperc alatt a 60 Hz jel 6 periódusa játszódik le, így - feltételezve hogy a folyamat lineáris - a teljes energia, melyet az ív a réz termikus illetve ionizációs változtatásaira fordít a következő:

$$E = 12 * 8500 \text{ kJ} = 0,102 \text{ MJ}$$

Ez a számítás arra hivatott ebben a kontextusban, hogy példát mutasson olyan energia felhasználó folyamatokra az ív fennállása során, melyekből kifolyólag a kisugárzott energia kevesebb lesz, mint a teljes ívben keletkezett energia. Mivel ez az energia nagyban függ az elektrodok anyagától, a fentebb ismertetett ívenergia számítási módszerben a hatása nem szerepel, melynek okán a képlet várhatóan továbbra is felülről becsüli a valószínű értéket.

## 5. Rendelkezésre álló mérési eredmények és a számítási módok összevetése

A villamos ív által sugárzott energia mértékéről korábbi mérések, és más beeső energia számítási módok alapján láthatunk példát.

A következő eredményeket 2 méteres elektródtávolság mellett mérték 12 darab energiamérő cellával, melyek összesen 3 különálló panelen voltak elhelyezve. A panelek egyenlő távolságra voltak az ívtől, és egymástól is. A táblázat mért értékeit acél elektródok felhasználásával kapták. [19]

Időtartam [s]	0,1				
Ív hossza [m]	2				
Íváram [kA]	20		40		
Ívtől való távolság [m]	1,1	3	0,5	1,1	3
Mért energia [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]	<b>6,4</b>	<b>1,1</b>	<b>39</b>	<b>16,5</b>	<b>3</b>
Számított keletkezett energia [ $\text{J}/\text{cm}^2$ ]	<b>18,50</b>	<b>3,189</b>	<b>108,246</b>	<b>37,02</b>	<b>6,378</b>
Mért/számított keletkezett energia hányadosa [%]	<b>34,6</b>	<b>34,5</b>	<b>36,02</b>	<b>44,57</b>	<b>47,04</b>

4. táblázat - Mért és számított energiaértékek összevetése

A táblázat „Számított keletkezett energia” sora tartalmazza az általam számított, elhanyagolásokat tartalmazó képlet eredményeit, a méréssel megegyező geometriai elrendezés esetén. Látható, hogy a mért és számított adatok között egyfajta arányosságot

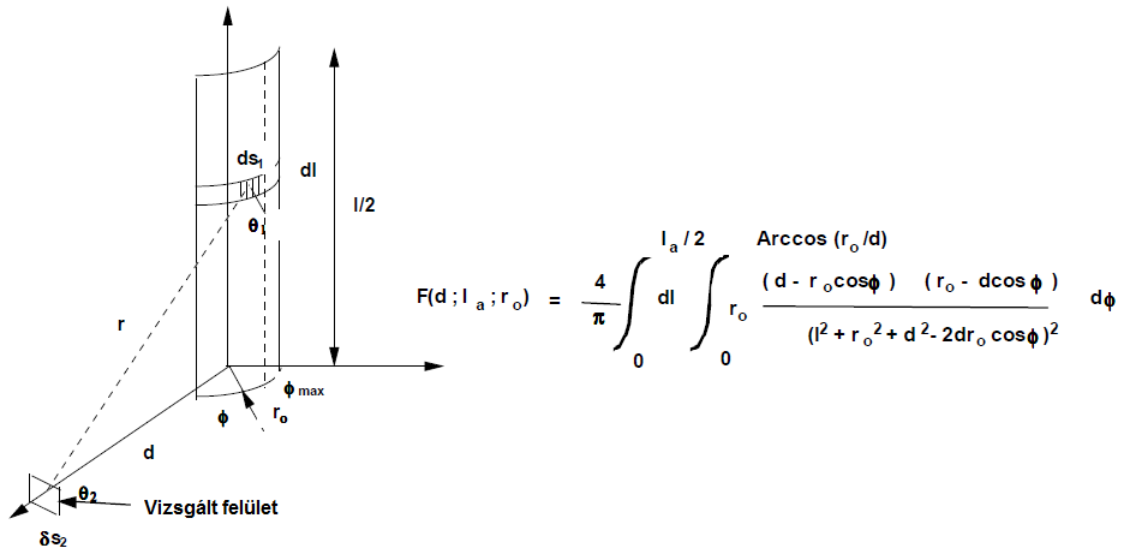
fedezhetünk fel, mely szerint a számított érték körülbelül két- háromszorosa a valós értéknek, melyből arra következtethetünk, hogy a modell eredménye felülről becsüli a valós értéket. További következtetéseket tehetünk az ív által sugárzott energia terjedésére vonatkozóan.

- Az ívtől való tárgyalt távolságtartomány nagyságához, és a két vizsgált áramérték közötti különbséghez képest az általam felállított képlet viszonylag jól modellezi az ívtől való távolság befolyásoló hatását a közvetített energia tekintetében.
- Az egyes áramértékek mellett a távolság változásával viszonylag kismértékben változik a mért és számított keletkezett energia hányadosa (vagy ha az változik, növekvő tendenciát mutat), melyből az a következtetés tehető, hogy a távolság növekedésével nem változik számottevően a kisugárzott energia mértéke. A modellem szerint ez úgy értelmezhető, hogy a távolság növekedésével ugyan csökken a felületre eső sugárzott energia, de ennek oka az, hogy az elemi pontforrások állandó kisugárzott energiája a távolság növekedésével egyre nagyobb felületen oszlik meg.
- Mivel a sugárzott energia vesztesége nem függ jelentős mértékben a távolságtól, a kisugározatlan energiatöbbletet nagy valószínűséggel már az ívben lejátszódó folyamatok felemésztik.

Más számítási módra a mérési eredményeket közlő tanulmányban is találhatunk egy példát. A szerzők felállítottak egy részben empirikus számítási módot, mely más megközelítésből tárgyalja a kisugárzott energia mértékét. A számításukban azt feltételezik, hogy az energia sugárzás útján jut el a vizsgált felületre, melyhez a Stefan-Boltzmann törvényt vették alapul. A képlet áll egy az általuk felállított változóból - mely függ a geometriai elrendezéstől (ív hossza, ív átmérője, ívtől vett távolság) - illetve egy konstansból, melyet mérési eredmények alapján számítottak ki. [19]

$$\Phi = \Pi_{\lambda} * F(d; I_a; r_0) * \sigma * T^4$$

Ebből a képletből mérések alapján a " $\Pi_{\lambda} * \sigma * T^4$ " tag értékét  $8879 \frac{W}{cmw^2}$ , -re állapították meg, az F pedig a geometriai elrendezésből fakad (16. ábra).



16. ábra - Geometriai elrendezés, és a hozzá tartozó számítás [19]

Nagyfeszültségű hálózatok esetén a Ralph H. Lee által készített energiaszámítási módszert javasolják, mely a következő: [4]

$$E = 5,12 * 10^5 * V * I_{bf} * \frac{t}{D^2}$$

Ahol:

- E A felületre eső kisugárzott energia „d” távolságban [cal/cm<sup>2</sup>]
- V A hálózat feszültsége [kV]
- I<sub>bf</sub> A háromfázisú zárlati áram [kA]
- t A villamos ív időtartama [s]
- d A távolság az ívkisüléstől [mm]

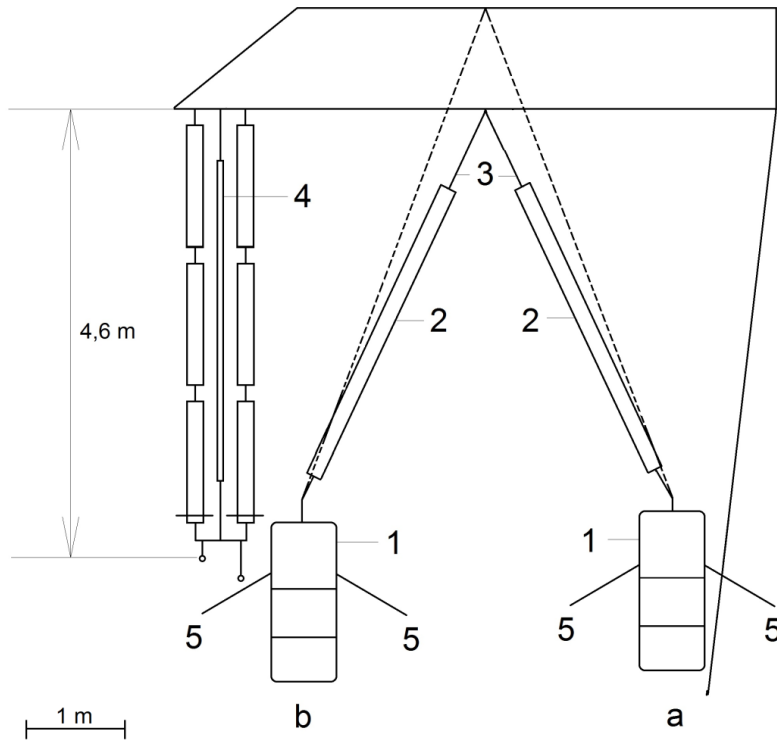
Ez a formula alapvetően szabad térben megjelenő háromfázisú zárlati ív által sugárzott beeső energia számítására származtatott módszer, mely pontforrásként kezeli az ívet, ami geometriai okokból fakadóan durva közelítésnek minősül (A távolság egy nagyságrendbe esik az ív hosszúságával). Bár ez esetben a zárlat típusa - mely a képletben is szerepel - nem az általunk valószínűnek vélt zárlati típussal megegyező, a módszer mégis megemlítendő, mivel 15 kV feszültség szint feletti számításokhoz ez a módszer ajánlott. [20]

## 6. Adott hálózaton elvégzett számítás

Az általam meghatározott értékekből illetve módszer segítségével meghatározható a leírt közelítések tudatában a kialakult ív által sugárzott teljesítmény. A kisugárzott energia számításához még szükség van az ív fennállásának idejére, melyet a hálózaton alkalmazott védelmi készülékek beállításai szabnak meg. A FAM esetén úgynevezett KÜÁ – Különleges Üzemviteli Állapot (a korábban említett FAM MVF részét képezi) lép érvénybe a karbantartás alatt álló hálózaton. Ebben az esetben a védelmi készülékek úgy vannak beállítva, hogy egy esetlegesen bekövetkező hiba esetén (például túláram) késleltetés nélkül megszakítási parancsot adnak az arra alkalmas megszakítónak, tehát az „önidővel” kikapcsol, illetve az üzemviteli állapotból kifolyólag a visszakapcsoló automatikák bénított állapotban vannak, és a kézi visszakapcsolás is tiltva van. Ebből kifolyólag az ív fennállását 100 ms időtartamúnak tekinthetjük. A 12. ábráról leolvashatóak az egyes betáplálástól való távolságokhoz tartozó áramértékek.

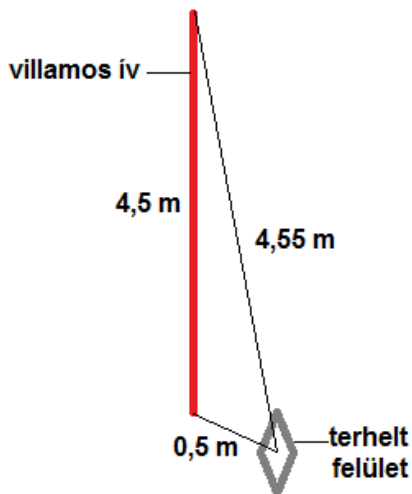
Az ív villamos paraméterein kívül szükség van azokra az információkra is, melyekből kiderül az ív és a munkát végző személy távolsága, egymástól való elhelyezkedésük. A sugárzott energia mértékét egy olyan konkrét szituációban kell kiszámolnunk, mely előállhat FAM munka közben. Ehhez a Dr. Csikós Béla által készített technológiából [21] merítettem egy olyan elrendezést, mely a tartó szigetelőlánc cseréjéhez biztosít megfelelő pozíciót a munkavégző számára.

A 17. ábrán egy 400 kV-os hálózaton történő szigetelőcseréhez használatos munkamódszer látható. Ebben az esetben a szerelőszék (1) egy szigetelő rúdra (2) van függesztve, amely függesztő kötéllal (3) van felrögzítve a távvezeték tartóoszlop keresztartó karjához. Az „a” és „b” helyzet közötti mozgást, műanyag szigetelőkötelekkel (5) biztosítják, munka közben a „b” helyzetben van a szerelőszék. Ebben az esetben 4,5 m hosszú ívet feltételezek, mely a szigetelőlánc helyén jelenik meg, így a szerelőszékben tartózkodó személy legközelebbi testrésze 0,5 m távolságra van az ív legközelebbi pontjától, a legtávolabbtól 4,55 m-re. Emellett a feszültség gradienst 0,95 kV/m nagyságúnak feltételezem, a számítást a tápponttól való 25 km távolságra lévő pontra végzem el.



17. ábra - Szigetelt mozgás a 400 kV-os vezeték szélső fázisa és portál oszlopa között [21]

A számítás menetét a korábbi fejezetekben taglaltam, jelen esetben az ott felállított modellek egyikét használom a leírt számítási mód segítségével.



18. ábra - Számításhoz alkalmazott modell

$$I_{RMS} = I_{eRMS} * \sqrt{3} = 15,86 \text{ kA}$$

$$\sum E = U * I_{RMS} * t = 6,781 \text{ MJ}$$

$$h_2 = r_2 - r_1 = 4,05 \text{ m}$$

$$E' = \frac{\sum E}{h_2} = \frac{6,781 \text{ MJ}}{4,05 \text{ m}} = 1674,3 \frac{\text{kJ}}{\text{m}}$$

$$E_{vm} = \int_{r_1}^{r_2} \frac{E'}{4 * \pi * x^2} dx = \frac{E'}{4 * \pi} * \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$$

$$E_{vm} = \int_{0,5}^{4,55} \frac{1674,3}{4 * \pi * x^2} dx = \frac{1674,3}{4 * \pi} * \left( \frac{1}{0,5} - \frac{1}{4,55} \right)$$

$$E_{vm} = 237,19 \frac{\text{J}}{\text{m}^2} = 5,65 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2}$$

Áram [kA]	9,1572
Feszültség [kV]	4,275
Ív hossza [m]	4,6
Távolság a tápponttól [km]	25
Időtartam [s]	0,1
<b>Ívenergia [MJ]</b>	<b>6,781</b>
<b>Munkapozícióban ért terhelés [<math>\frac{cal}{cm^2}</math>]</b>	<b>5,64</b>

19. ábra - Számításhoz használt értékek, és eredmény

A számítás eredményeként adódó terhelő energiaérték meghaladja a másodfokú égési sérülés határát ( $1,2 \frac{cal}{cm^2}$ ).



## 7. Villamos ívvédelemben alkalmazott védőeszközök

A villamos ívvédelmi felszerelések kiválasztására léteznek különböző irányelvek, melyek tartalmazzák az igényeknek megfelelő ruházatok összeállítását. A következő táblázatot 8000 laboratóriumi teszt alapján állították össze, meghatározhatóak általa a különböző munkakörülményekhez használható ruhakombinációk. [6]

Számított beeső energia [cal/cm <sup>2</sup> ]	Ruha besorolása	Ruha leírása (rétegek száma)	Teljes tömeg [g/m <sup>2</sup> ]	Mért védelmi szint vs. másodfokú égési sérülés [cal/cm <sup>2</sup> ]
0-2	0	Nem tűzálló (1)	150-240	N/A
2-5	1	Tűzálló felső és nadrág (1)	150-270	5-7
5-8	2A	Nem tűzálló alsónemű, plusz tűzálló felső és nadrág (2)	300-400	8-18
5-16	2B	Tűzálló alsónemű, plusz tűzálló felső és nadrág (2)	340-480	16-22
8-25	3	Nem tűzálló alsónemű plusz tűzálló felső és nadrág, tűzálló kezeslábas (3)	540-680	25-50
25-40	4	nem tűzálló alsónemű, tűzálló nadrág és felső, kétrétegű kabát (4)	800-1000	40 -> 60

5. táblázat - Villamos ívvédelmi ruházat összeállítására vonatkozó irányelv [6]

A védőfelszerelés kiválasztásakor első sorban meg kell határozni azt a terhelést, melyet a védőruházatnak a legkedvezőtlenebb baleseti körülmények között ki kell bírnia. [6] Az előző fejezet alapján a mi esetünkben  $5,64 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2}$  beeső energia az, mely tartalmazza a korábban meghatározott áramtranziensekből adódó biztonsági szorzót is.

Tehát ez az a beeső energiasűrűség, ami ellen meg kell védeni a munkát végző személyt. Ahogyan a táblázat mutatja (5. táblázat), ezen energiaértékkel szemben az „2A” kategóriába eső öltözet elegendő védelmet nyújthat. A táblázat utolsó oszlopában láthatjuk, hogy az „2A” kategóriában lévő ruházat általában minimum  $8 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2}$  értékkel rendelkezik, tehát minimum  $8 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2}$ , energia esetén is elegendő védelmet nyújt a másodfokú égési sérülések ellen.

A védőképességen kívül fontos tényező egy ruha kialakításánál a használhatóság is. A „2A” kategória védőöltözete egy tűzálló nadrágból, egy tűzálló hosszú ujjú felsőből, és alsóneműből áll, mely nem tűzálló, tehát ez egy kétrétegű védőöltözet. Az öltözet anyagának fajlagos tömege  $300-400 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$  között van, ami egy komplett ruházat esetén körülbelül 1 kg tömeget jelent, mely első megközelítésben valószínűleg nem befolyásolja jelentősen a munkát végző személy mozgékonyágát.

## 8. Konklúzió és tervek

A mi esetünkben egy olyan számítási metódus felállítása volt a cél, mely nagyságrendi becslést ad a villamos ív közelében tartózkodó személyzetet terhelő energia mértékére, melyek tudatában következtetéseket tehetünk azzal kapcsolatban, hogy lehet-e reális cél a NaF FAM munkát végző személyzet védelme egy kialakuló ív káros hatásaitól a mai ívvédelmi technológiák használatával. A célokból kifolyólag az alapvető elvárás a modellel szemben az volt, hogy semmiképp se becsülje alul a terhelő energia mértékét, emellett közelítse a legnagyobb mértékben a valós értéket.

Ezen számítások eredményeinek és a piacon kapható felszerelések védőképességeinek összehasonlításából adódó eredményekből azt a következtetést tehetjük, hogy nagyfeszültségen alkalmazott feszültség alatti munkavégzés esetén kialakítható olyan tulajdonságokkal bíró elektrosztatikus védőruházat, mely elegendő védelmet nyújthat egy kialakuló zárlati ív káros hatásával szemben.

A későbbiekben további cél lehet a számítási modell pontosítása a különböző hőterjedési folyamatok figyelembevételével, illetve számítások elvégzése más munkamódszerek esetére is.

## 9. Irodalomjegyzék

- [1] 72/2003. (X. 29.) GKM rendelet (A módosító 60/2005 (VII.18) GKM rendelettel összedolgozva).
- [2] W. McDermid, J. Bromley, D. Dodds, D. Swatek és M. Hydro, „Investigation of the Flashover of a FRP Hot Stich While in Use for Live Line Work at 500 kV,” in *IEEE*, 1999.
- [3] W. McDermid és M. Hydro, „Experience with Electrical Testing of Aerial Devices for Use at 69-500 kV,” in *Electrical Insulation Conference*, Ottawa, Canada, 2013.
- [4] P. D. Ravel F. Ammerman, P. D. Tammy Gammon, P. P.K. Sen és J. P. Nelson, Comparative study of arv modeling and arc flach incident exposures, Concinnati: IEEE, 2008.
- [5] Z. Rainer és R. Gerhard, „PPE – Arc-fault-tested protective gloves,” in *ICOLIM*, Zagrab, Croatia, 2011.
- [6] D. G. Laverty, „Measuring the performance of fabric systems to protect against the thermal effects of electric arcs,” in *ICOLIM*, Madrid, Spain, 2000.
- [7] D.-I. D. Borneburg és R. Hoffmann, „Studies of face protection against the thermal hazards of an electric arc in the,” in *ICOLIM*, Prague, Czech Republic, 2006.
- [8] „MSZ IEC 60895,” in *Magyar Szabványügyi Testület*, 2004.
- [9] A. M. Zalesszkij, *A villamos ív*, Budapest: Műszaki Könyvkiadó, 1968.
- [10] G. Gyula, „Hőközlés,” Budapest, 1999.
- [11] G. Yutaka, I. Mikimasa, I. Koichi és T. Shin-ichi, „Arc Voltage Characteristics of High Current Fault,” 2000.
- [12] N. Balázs és D. K. László, „VER villamos készülékei és berendezései,” <https://vet.bme.hu/sites/default/files/tamop/vivem177/out/html/vivem177.html>, 2012.
- [13] D. F. György, *Hálózatok és rendszerek*, Műegyetemi Kiadó, 2004.
- [14] D. G. P. Ottó, *Villamosenergia-rendszerek I. kötet*, Budapest: Tankönyvkiadó, 1986.
- [15] T. H. LEE, W. R. WILSON és J. C. SOFIANEK, „Current Density and Temperature of High-Current Arcs,” 1957.
- [16] W. R. WILSON, „High-Current Arc Erosion of Electric Contact Materials,” in *Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1955.

- [17] P. Károly, Műszaki Lexikon, Első kötet, Budapest: Akadémia Kiadó, 1974.
- [18] P. Károly, Műszaki Lexikon, Harmadik kötet, Budapest: Akadémia Kiadó, 1974.
- [19] G. RIQUEL és E. DURCIK, „Thermal protection of Live Working operators for High voltage range,” in *ICOLIM*, Croatia, Zagreb, 2011.
- [20] C. Inshaw és R. A. Wilson, „ARC FLASH HAZARD ANALYSIS AND MITIGATION,” in *Western Protective Relay Conference*, Spokane, 2004.
- [21] D. C. Béla, 750 kV, 400 kV, 220 kV és 120 kV nagyfeszültség érintésével és közelében végzett munka technikája - III.1. rész.