



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Villamos Energetika Tanszék

Szélerőművek villámvédelmének vizsgálata PMAS módszer segítségével

Készítette

Palotai Roland

Konzulens

Dr. Kiss István

2015

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés, absztrakt	3
1.1. Megújuló energiaforrások	3
1.2. Napenergia	4
1.3. Szélenergia	7
2. Szélerőművek villámvédelme	10
2.1. Villámvédelmi megoldások.....	10
2.1.1. Felfogó elektródák vizsgálata [5].....	10
2.1.2. Turbina feletti földelt vezetékes védelem [6].....	14
2.2. Szélerőművek sérülései [7]	17
2.2.1. Könnyű sérülések	17
2.2.2. Normál sérülések.....	19
2.2.3. Komoly sérülések.....	20
2.2.4. Katasztrófális sérülések.....	21
3. A PMAS módszer.....	26
3.1. Vonzási tér elmélete	26
3.2. PMAS szimuláció.....	28
4. Laboratóriumi mérések elméleti alapjai	33
5. Laboratóriumi kísérletek	37
5.1. Összehasonlító kísérletek szigeteletlen és szigetelt modellen.....	39
5.2. Kísérletek szigetelt modellen	41
5.3. Kísérletek szigetelt és szigeteletlen rúdon	48
5.4. Mérések kiértékelése	55
6. Következtetés, javaslat	60
Köszönetnyilvánítás	61
Irodalomjegyzék.....	62

1. Bevezetés, absztrakt

A mai modern világunk működésének egyik alappillére a megfelelő és hatékony energia-ellátás. Ahhoz hogy ez megvalósulhasson, arra van szükség, hogy az összes gazdaságosan hozzáférhető energiatermelési lehetőséget kiaknázzuk. Ezért egyre nagyobb szerepet kapnak a megújuló energiaforrások, köztük a két legelterjedtebb a napenergia és a szélenergia.

Mindkét esetben nagy jelentősége van a megfelelő villámvédelemnek a biztonságos üzemvitel szempontjából. A tapasztalat sajnos azt mutatja, hogy bizonyos esetekben a létesített villámvédelem ellenére, villámcsapásból sok kár keletkezik. A dolgozat fő témája a villámcsapás ellen védő berendezések, megoldások hatékonyságának vizsgálata. A vizsgálatainkhoz a Dr. Horváth Tibor professzor úr által kidolgozott valószínűséggel súlyozott vonzási tér (PMAS – Probability Modulated Attraction Space) módszert használjuk fel.

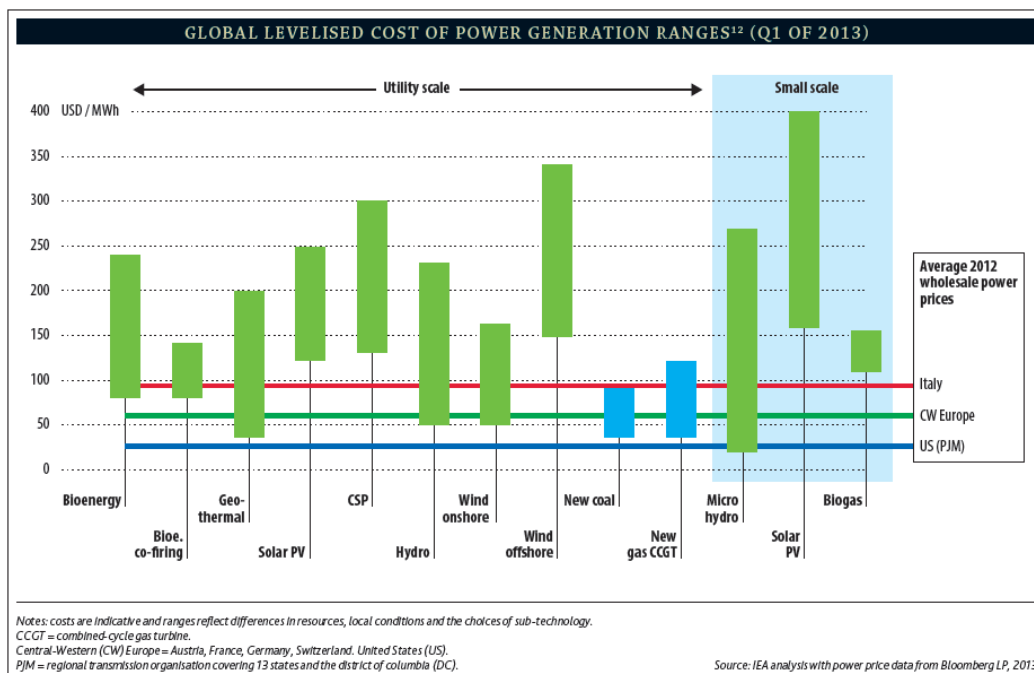
A dolgozatom elején áttekintést adok a megújuló energiaforrásokról, majd röviden ismertetem a napenergia telepek villámvédelmének alapjait, és a PMAS módszer e területen való használhatóságát. Ismertetem továbbá a szélérőművek felépítését, típusait, a ma is használatos villámvédelmi megoldásokat, illetve azokat a sérüléseket, amelyeket egy villámcsapás okozni képes. Ezek után AutoCAD program segítségével létrehozunk egy méretarányos modellt, majd egy a PMAS elméleten alapuló programmal kiszámítjuk a vonzási terét. Létrehozunk a fizikai modelleket, amiket majd a mérések során használni fogunk. A célunk a szélgenerátorokat érő villámcsapások közül a lapát végén elhelyezkedő felfogók helyett a lapátba csapó, vagy azon végigfutó becsapások számának becslése, ehhez használtuk a vonzási teret. A laboratóriumi mérések segítségével ellenőrizzük a kiszámított vonzási tér helyességét, majd megvizsgáljuk, hogy milyen torzulás következik be, ha a modellünket szigetelővel borítjuk. Egy ismert vonzási terű modell segítségével megvizsgáltuk továbbá, hogy a korábban elvégzett kísérleteink milyen beállítások mellett adnak a valóságnak megfelelő eredményt. A méréseink során sok különböző feszültség szinteken vizsgáldtunk, illetve azt is megfigyeltük, hogy milyen hatással van a vonzási térre, ha különböző polaritású kisüléssel végezzük a mérést.

1.1. Megújuló energiaforrások

Rohamosan fejlődő világunkban az emberiség energiaigénye folyamatosan növekszik, ennek kielégítése érdekében szükségünk van minden gazdaságos energiatermelési lehetőség kiaknázására. A legkézenfekvőbb megoldás a fosszilis energiahordozók alkalmazása, sajnos az

ilyen energiaforrások kihasználása egyre több nehézségbe ütközik. Ahogy a felszín közelében lévő könnyen kinyerhető lelőhelyek apadnak, úgy drágul az ezzel a módszerrel előállított energia is. A környezettudatos szemléletmód elterjedésével a környezetszennyező kőolajon, kőszénen és földgázon alapuló energiatermelés a társadalom szemében is nemkívánatossá vált. Ezen folyamatok kényszerítették az energiaszektort arra, hogy a figyelmüket a megújuló energiaforrások felé fordítsák.

Megújuló energiaforrásoknak nevezzük azokat a természeti jelenségeket, amelyekből energia nyerhető ki és jelentősebb emberi beavatkozás nélkül újrafelhasználhatóak. Ilyenek például a víz-, a nap-, a szélenergia és a geotermikus jelenségek. A megújuló energiaforrásokon alapuló termelés beruházási és üzemeltetési költségei még nem olyan kedvezőek, mint a foszszilis energia előállításé, de az utóbbi években a technológia fejlődésének köszönhetően rohamos csökkenés tapasztalható.

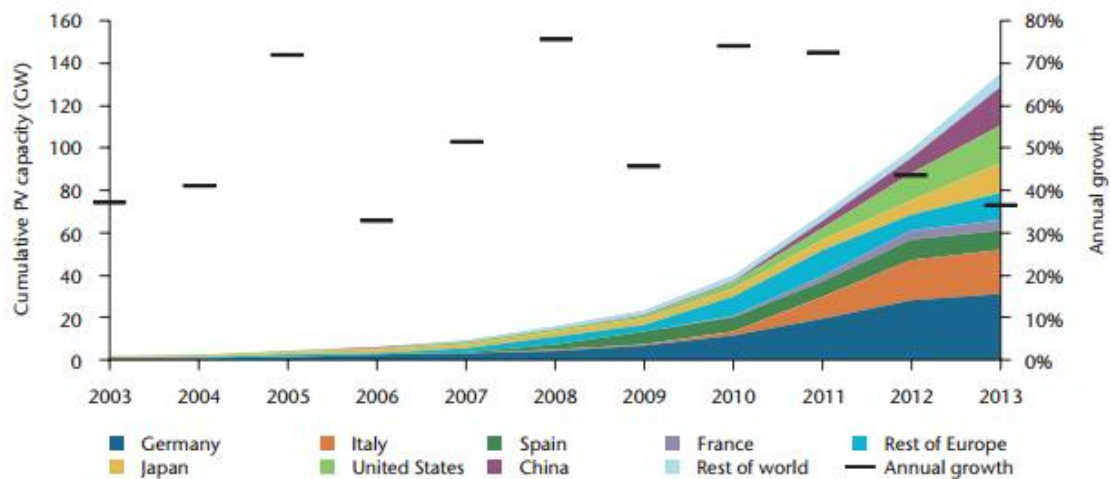


1-1. ábra - Megújulók által termelt energia ára 2013. első negyedében [1]

1.2. Napenergia

A megújuló energiaforrások egyik dinamikusán fejlődő ágazata a fotoelektromos (PV - photovoltaic) elemekkel történő energiatermelés, röviden a napenergia. Ez a fajta energiatermelés nagy előnye, hogy a telepítéséhez nincs szükség semmilyen különleges természeti felté-

telre, csak területre, és viszonylag naps éghajlatra. Sok energiatermelő létesítménnyel ellentétben, a napelem telepek létesíthetőek városokban is, úgy hogy nem zavarják a városban élőket sem levegőszennyezéssel, sem zajszennyezéssel. Ennek ellenére a napenergia nagymértékű felhasználása nem volt széles körben elterjedt, ami magyarázható a nagy beruházási költségekkel és a lassú megtérüléssel. A technológia fejlődésével azonban a napelem cellák ára, illetve a telepítés költsége is nagymértékben csökkent az elmúlt években, ezek hatására napelem telepek száma is jelentősen megnövekedett.



Source: Unless otherwise indicated, all tables and figures derive from IEA data and analysis.

KEY POINT: Cumulative PV capacity grew at 49%/yr on average since 2003.

1-2. ábra - A napenergia termelés növekedése 2003-2013 [2]

Természetesen a napelem parkok kialakítása is többféle lehet, a leginkább elterjedt, a döntött felépítményre szerelt, lapos napelem panelekből álló típus. Ez a fajta kialakítás nem igényel magas tartószerkezetet, így nem emelkedik ki a környezetéből. Ennek ellenére villámvédelemre a napelem telepeknek is szükségük van, tekintve hogy nagy sík területet fednek le, ezáltal jelentős a villámcsapás valószínűsége. A napelemnél kiemelten fontos a villám szokásos romboló hatásán kívül figyelembe venni, a villámáram hegfelelő útvonalon történő elvezetését, mert a levezető körül kialakuló nagy mágneses térerősség erősen rongálhatja az érzékeny napelem paneleket.

Alapvetően kétféle levezető elrendezést alkalmazunk a napelemnél, az egyik kialakítás során a felfogó elektródát a paneleket tartó szerkezethez erősítjük, és magán a földelt fémszerkezeten keresztül vezetődik le a villámáram. A másik elrendezésben a panelt tartó felépítmény mellé egy különálló felfogó rudat helyeznek, ami levezeti a villámáramot.

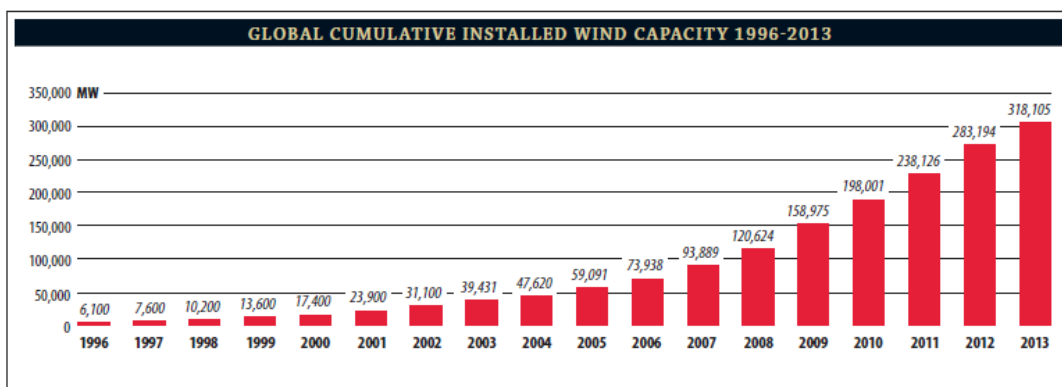
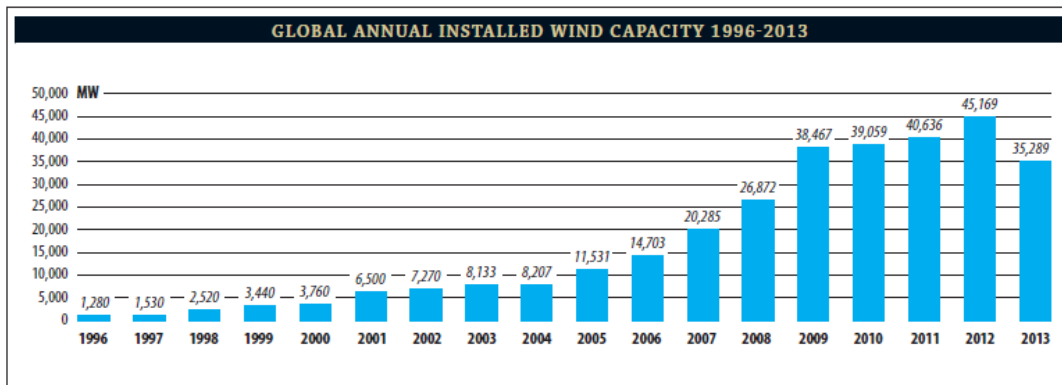


1-3. ábra - A két legelterjedtebb felfogó elrendezés [3]

Az általam feldolgozott tanulmány [3] számításai alapján az első megoldás használata a célravezetőbb, mert így a villámáram eloszlik a tartószerkezet sok lábán, ezáltal kisebb mágneses teret hoz létre, mint a különálló rudas esetben. A lényegesen kisebb mágneses tér hatására a panelekben, illetve az elektronikában nem indukálódik akkora feszültség, hogy az sérülést okozzon.

1.3. Szélerenergia

A megújuló energia felhasználás egyik rohamosan fejlődő ága a szélerenergia. A 90-es évek közepétől kezdve felhasználása gyors ütemben emelkedni kezdett, ahogy az országok felfedezték a benne rejlő lehetőségeket.



1-4. ábra - Évenkénti / összes szélerenergia kihasználás 1996 - 2013 [1]

A szélerenergia pozitív tulajdonságai közé tartozik, hogy nincs szükség különleges természeti feltételekre, a szél-turbina nem igényel nagy helyet, illetve telepíthető vízfelszínre is. Tulajdonságai miatt a világ nagyon sok országában adottak a feltételek jelentősebb szél-erőmű park kialakítására, ennek ellenére főleg a gazdaságilag fejlettebb régiókban használták ki a széler-energiát nagy arányban. Ez indokolható a szél-erőmű parkok magas beruházási és karbantartási költségeivel.

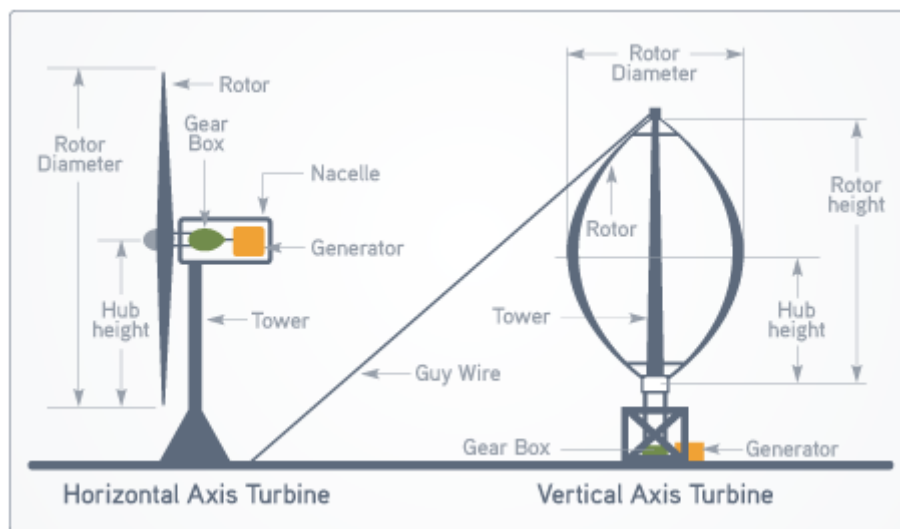
Természetesen a szél-erőműveknek is rengeteg különböző típusa létezik, és ezeket sokféleképpen csoportosíthatjuk. Talán a legelterjedtebb szempont a tengelyelrendezés szerinti megkülönböztetés, amivel két nagy csoportba sorolhatjuk a szél-turbinákat.

Tengelyelrendezés szerint:

- Horizontális tengelyű
- Vertikális tengelyű

A horizontális tengelyű szélturbina egy magas oszlopon helyezkedik el, ezzel kihasználva, hogy nagyobb magasságban nagyobb az átlagos szélesség és így több a kitermelhető szélenergia. Ebből a tulajdonságából ered, hogy a nagyobb teljesítményű szélérőművek óriási méreteket ölthetnek, amihez komoly alapsztra van szükségük, ezáltal jelentősen megnövekszik a beruházási költségük. Hátránya továbbá, hogy a vízszintes tengelye miatt a szélérőmű irányfüggő, tehát a megfelelő működés érdekében a tengelyt egy automatika segítségével mindig szélirányba kell fordítani. Negatívumai ellenére a jelentősen nagyobb kiadott teljesítmény miatt az energiaiparban gyakorlatilag csak ilyen kialakítású szélérőműveket alkalmaznak.

A vertikális tengelyű szélturbínák sokkal kisebb teljesítményt képesek leadni, mint horizontális társaik, viszont lényegesen kisebb felépítményt igényelnek, és az előbbiekkal ellentétben irányfüggetlenek. Eltérő tulajdonságaik miatt alkalmasak lehetnek városi környezetben való alkalmazásra, ahol a turbulens légáramlatok gyakran változtatják a szélirányt. Kevésbé elterjedt, mint a horizontális típusú szélérőművek.



1-5. ábra - Horizontális- és vertikális tengelyű szélturbina [4]

Működésüket tekintve nincs nagy különbség a szélturbina típusok között. A lapátok keresztmetszete a repülőgép szárnyaihoz hasonló alakú, rajtuk nyomáskülönbség következtében felhajtó erő jön létre, ami forgómozgássá alakul. Ez a forgás általában túl lassú egy generátor közvetlen meghajtásához, így egy váltóművön keresztül csatlakozik a generátor forgórészéhez. Horizontális tengelyű szélturbina típus esetén a váltómű és a generátor is a torony tetején, a

hub-ban helyezkedik el, illetve itt található az érzékelő és az automatika, ami a szélturbinát szélirányba állítja.

2. Szélerőművek villámvédelme

Mint már említettem, a szélerőműveket a nagyobb teljesítmény elérése érdekében nagy magasságokban telepítjük, így érjük el, hogy nagyobb átlagos szélsébségnek legyen kitéve a szélkerék. A nagy magasság azt is jelenti, hogy a szélerőmű általában kiemelkedik a környezetéből, így jelentősen megnő annak az esélye, hogy villámcsapás éri. Létezik olyan villámvédelmi megoldás, ami a szélerőmű mellé különálló védőtorony kialakítását írja elő, de ez sem jelent teljes védelmet, ezzel szemben jelentősen megnöveli egy szélturbina beruházási költségét. A legelterjedtebb villámvédelmi elrendezés a lapátok végén elhelyezett felfogó elektródákból, és a hozzájuk kapcsolódó, a földdel közvetlen kontaktust kialakító levezető rendszerből áll. A beépített felfogó- és levezető rendszer általában jó vezetőképességű anyagból (rendszerint fémötvözet) készül, így biztosítva a töltések lapáton való biztonságos áthaladását.

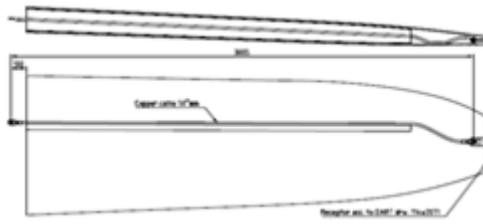
2.1. Villámvédelmi megoldások

Rengetegféle villámvédelmi megoldás létezik manapság, ezek közül talán a beépített levezetővel rendelkező a legelterjedtebb. Ez három részből áll, egy fémből készült felfogó elektródából, egy a lapát belsejébe ágyazott levezetőből és egy földelésből. A felfogó elektróda feladata, hogy begyűjtse a villámcsapásokat. Sokféle kialakításban használják, a lapátba ágyazott korongtól, az egész lapátvéget fedő fémsapkáig. A levezető általában a lapáton belül van kialakítva, de folynak kutatások a lapáton kívül elhelyezett rendszerrel is, így elkerülendő a levezető felhevüléséből származó meghibásodások, de jelentősen romolhatnak a lapátok aerodinamikai tulajdonságai. Léteznek még merőben más elveken alapuló megoldások, ilyen a villámvédő torony, vagy a szélkerék felett kifeszített földelt vezetékpár.

2.1.1. Felfogó elektródák vizsgálata [5]

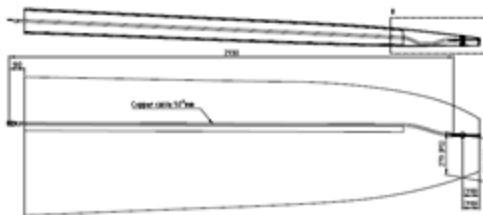
A mérés célja hogy a sokféle, ma is használatos elektróda kialakítás közül melyek a leghatékonyabbak. Négy különböző felfogó rendszert használtak.

- FMTR (Full Metal Tip Receptor) - A lapát végét teljesen fedő egybefüggő fémsapka, és a hozzá tartozó beépített levezető rendszer.



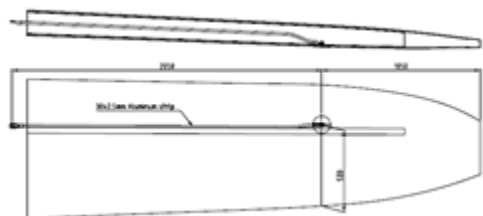
2-1. ábra - FMTR felfogó [5]

- 3PTR (3 Prolongation Tip Receptor) - Két darab 45 mm átmérőjű kör alakú elektróda van a lapát alsó és felső oldalán, ezek a lapáton keresztül átszúrva csatlakoznak egymáshoz és a levezetőhöz.



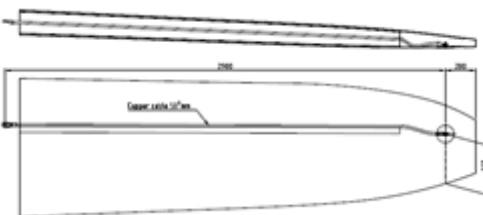
2-2. ábra - 3PTR felfogó [5]

- PDR (Painted Disc Receptor) - Egy 45 mm átmérőjű korong alakú festett elektróda csak az egyik oldalon, és a hozzá csatlakoztatott levezető



2-3. ábra - PDR felfogó [5]

- UPDR (Unpainted Disc Receptor) - Egy 110mm átmérőjű festetlen korong alakú felfogó, szintén csak az egyik oldalon, és a levezetőrendszer.



2-4. ábra - UPDR felfogó [5]

Az ily módon kialakított felfogó rendszereket kétféle tesztnek vetették alá. Az első mérési sorozatban, egy hosszabb időtartamú (500 ms feletti), de kisebb áramú (néhány 100 A) kisülést (CC, Continuing Current) kellett elvezetniük. Ezt a jelet egy alacsony energiára kioldó három lépcsős Marx-típusú impulzus generátor szolgáltatta, megközelítőleg 150 kV (1,2/50 μ s) feszültséggel. Ez a teszt a felfogórendszerek megolvadás elleni ellenállását, illetve a megégés mértékét vizsgálja. Az áramimpulzus képét pedig HP 54504A digitális oszcilloszkóppal figyelték.

Teszt Azonosító	Paraméterek					
	Felfogó típus	Teljes át- vitt töltés [C]	Időtartam [ms]	Áram csúcsér- téke [A]	Lapát Pozíciója [V/H]	Átment [Igen/Nem]
CC1	FMTR	215	536	414	V	Igen
CC2	3PTR	198	541	388	H	Igen
CC3	3PTR	202	541	386	V	Igen
CC4	3PTR	203	536	403	V	Igen
CC5	3PTR	209	538	409	V	Igen
CC6	PDR	200	536	390	V	Igen
CC7	UPDR	194	538	398	V	Igen

2-1. táblázat - Continuing Current mérés eredményei [5]

Az utolsó oszlop egy minőségi besorolást ad, értékelve a teszt során szerzett sérülés mértékét, mint a fém részek olvadása, repedések és törések keletkezése és a további használhatóság szempontjából.



2-5. ábra - CC mérés alatt FMTR és 3PTR szerzett sérülései [5]



2-6. ábra - CC mérés alatt PDR és UPDR szerzett sérülései [5]

A második mérési sorozatot rövid idejű (2 ms-nál kevesebb), de nagy amplitúdójú (kb.150-200 kA) impulzusszerű kisülésekkel (IC, Impulse Current) végezték. Ezt a jelalakot két 30 μ F kapacitású, 100 kV-ig töltött összekapcsolt kondenzátorteleppel hozták létre. A teszt során az áramimpulzus nagy mágneses erőt hozott létre, illetve jelentős rezisztív melegedés is fellépett, amit a felfogóelrendezéseknek ki kellett állniuk.

Teszt Azonosító	Paraméterek					
	Felfogó típus	Teljes átvitt töltés [C]	Specifikus energia tartalom [MJ/ Ω]	Áram csúcsértéke [kA]	Lapát Pozíciója [V/H]	Átment [Igen/Nem]
IC1	FMTR	93,4	9,33	182	H	Igen
IC2	3PTR	62,8	4,4	172	H	Nem
IC3	3PTR	89,3	9,26	183	H	Igen
IC4	PDR	90,4	9,21	183	H	Igen
IC5	UPDR	91,2	9,38	187	H	Igen

2-2. táblázat - Impulse Current mérés eredményei [5]

Az IC2 azonosítójú esetben jól látható, hogy a töltés, az energiatartalom, és a csúcsérték is jelentősen kisebb volt a többi méréshez képest, ezt a generátor túl korai kisülése okozta, így a vizsgálatot megismételték IC3 azonosítóval. Általánosságban elmondható hogy ennél a mérési sorozatnál az égésnyomok jelentősen kisebbek, annak ellenére, hogy itt is magas hőmérséklet keletkezik.



2-7. ábra - IC alatt FMTR és 3PTR szerzett sérülései [5]

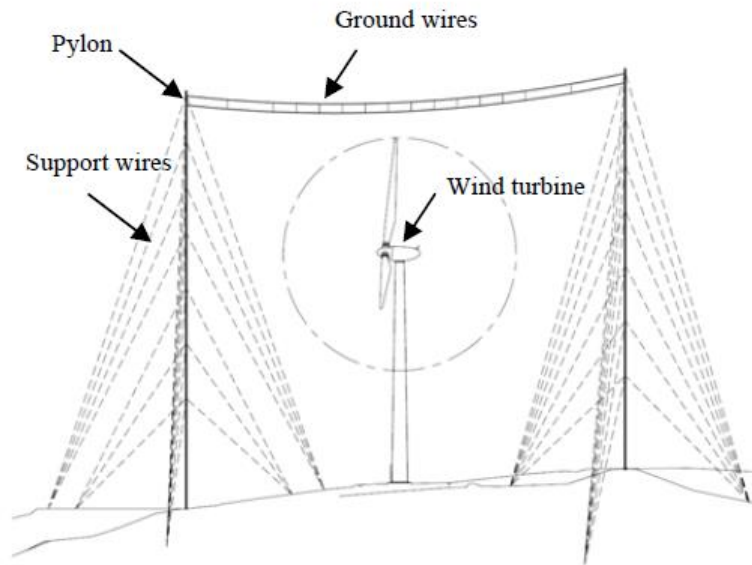


2-8. ábra - IC alatt PDR és UPDR szerzett sérülései [5]

2.1.2. Turbina feletti földelt vezetékes védelem [6]

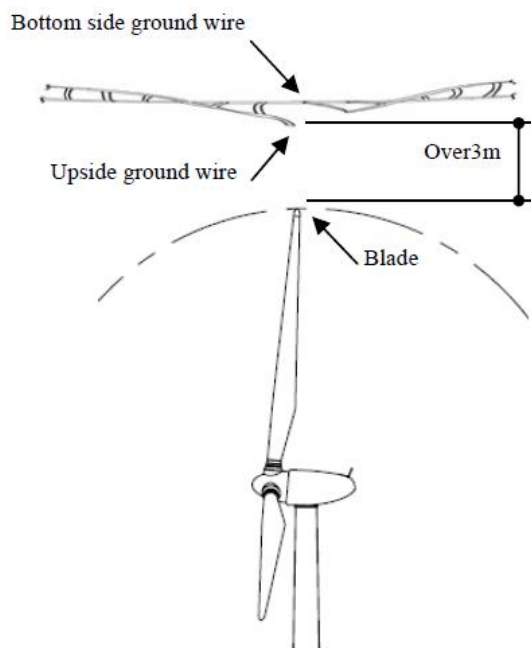
Korábbiakban már említettük, hogy a beépített levezetővel rendelkező villámvédelmi megoldás a legelterjedtebb, melynek oka, hogy könnyen kialakítható, gazdaságos és nagy hatékonyságú védelmet biztosít. Az ettől eltérő rendszerek (pl. villámvédő tornyok) nagy beruházási költséggel járnak, és nem biztosítanak hatékonyabb védelmet villámcsapásokkal szemben.

A turbina feletti földelt vezetékes védelem egy tesztelési fázisban lévő védőrendszer. Alapvetően két, a szélkerék két oldalán elhelyezkedő magas toronyból, és az azokat összekötő, a turbina felett átívelő vezetékpárból áll.



2-9. ábra - A rendszer kialakítása és részei [6]

Azt elkerülendő, hogy a földelő vezeték beleakadjon a forgó turbina lapátokba, a védő vezetőket a függőleges lapát maximális helyzetéhez képest kb. 3 méterrel magasabbra telepítik. Ez a légrés megakadályozza azt, hogy villámcsapás esetén a védő vezető és a lapát között átütés jöjjön létre. Ezen felül biztonsági okokból nem csak egy vezeték tölti be a védő szerepét, hanem két párhuzamosan futó vezeték pár. A vezetők meghatározott távolságonként össze vannak kötve, így ha az egyik sérülés vagy karbantartás miatt el is szakad, a másik megtartja, és nem engedi a lapátok közé esni. Érdeemes még megemlíteni a tám kábelek szerepét, amik azon kívül, hogy stabilizálják a tornyokat, segítenek a villám földre való levezetésében is, így eloszlik a villámáram és a földpotenciál nem nő a veszélyes szint fölé.



2-10. ábra - A rendszer vezetékszakadás esetén [6]

2007-ben teszt céllal kialakítottak egy ilyen rendszert Japánban Fukaura városában található 80 m magas 750 kW teljesítményű szél-turbinához. Az elmúlt években, a védelem felállítása óta drasztikusan csökkent a turbina által elszenvedett villámcsapások és az ebből keletkező károk száma. Meglepő, de az eddigi feljegyzések szerint a rendszer 100%-os hatékonysággal működik. A rövid fennállási időre való tekintettel azonban ezt a hatékonyságot érdemes óvatosan kezelni, és megvárni, hogy hogyan alakul a jövőben. A védelem kiépítése természetesen nem olcsó, illetve nagyobb szélerőmű parkoknál a rendszer telepítése is nagy nehézségeket okozhat.

Év	Villámcsapások száma	Termelés kiesés [nap]	Költség [millió Japán Yen]
2002	2	125	27,252
2003	2	90	16,922
2004	1	70	3,576
2005	5	298	80,102
2006	2	220	28,395
Turbina feletti földelt vezetékes védelem kialakítása			
2007	0	0	0
2008	0	0	0
2009	0	0	0
2010	0	0	0
2011	0	0	0
2012	0	0	0
2013	0	0	0

2-3. táblázat - Veszteségek a védelem előtt és után [6]

2.2. Szélerőművek sérülései [7]

A szélerőmű sérüléseit négy különböző csoportba lehet sorolni súlyosságuk szerint, kezdve a könnyű meghibásodásoktól egészen a katasztrofális sérülésekig. A négy nagyobb csoport utal arra, hogy a sérült turbina milyen hamar igényel javítást, illetve szükséges-e az azonnali leállítás.

2.2.1. Könnyű sérülések

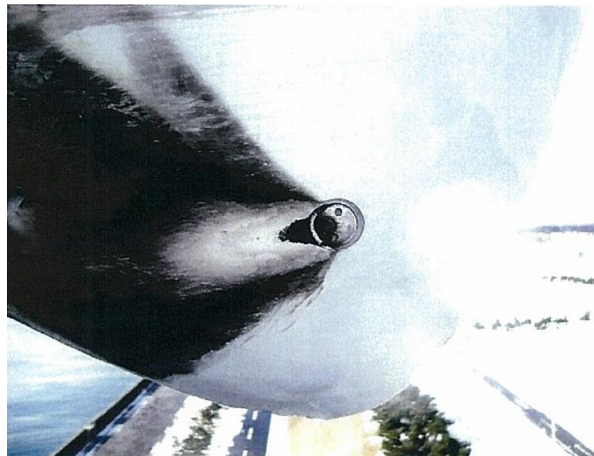
Ezek a sérülések nem igényelnek azonnali beavatkozást, javításukat elégséges elvégezni a következő karbantartás alkalmával.

- Felfogó elektróda megolvadása - A villámáram nagy energiája miatt egy közvetlen találat esetén előfordulhat, hogy a felfogó elektróda felszíne megolvad, kisebb gödröket hagyva a felületen. A sérülés komolynak látszódhat, de ha a levezetőn nem keletkezett törés a rendszer képes ellátni a feladatát.



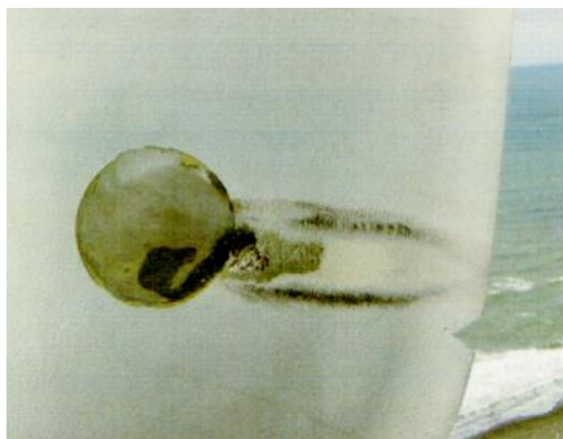
2-11. ábra - Felfogó megolvadása [7]

- Felületi perzselődés - Villámcsapás alkalmával gyakran előfordul, hogy a létrejövő nagy hó következtében az elektróda körül megperzselődik a lapát felszíne. Még látványosabb lehet, ha a lapát felszínén valamilyen szennyeződés (például tengeri só) található, a javítása egyszerű, kevés költséget igényel.



2-12. ábra - Felületi perzselődés [7]

- Egyéb könnyű sérülések - Egy gyűjtőkategória a ritkábban tapasztalható könnyű sérülések számára. Ilyenek lehetnek a felfogó festésének lehámlása vagy pontszerű perzselődések kialakulása.



2-13. ábra - Festék lehámlás [7]

2.2.2. Normál sérülések

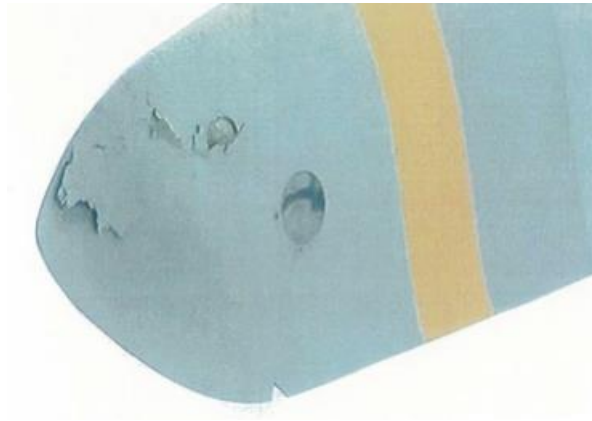
Azok a sérülések, amelyek nem igényelnek azonnali javítást, de minél előbbi beavatkozás javasolt.

- Felfogó leválás - A felfogó elektróda leválása, aminek az oka lehet a közvetlen villámcsapás okozta ohmos melegedés vagy a lapáton belüli levegő hirtelen tágulása.



2-14. ábra - Felfogó leválás [7]

- Felületi lehámlás - A villám nem mindig csap közvetlenül a felfogóba, előfordul, hogy a lapát felszínén végighaladva éri el az elektródát. Ezen alkalmakkor gyakran megesik, hogy a kisülés felszakítja a lapát felszínét. A sérülés független a felfogó típusától, előfordul beépített korong alakú elektródánál, vagy lapát végét beborító fémsapkánál egyaránt.



2-15. ábra - Felületi lehámlás [7]

2.2.3. Komoly sérülések

Azok a sérülések, amelyek azonnali javítást igényelnek.

- Repedés a hegesztések mentén - Az üvegszálás polimer (GFRP - Glass Fibre Reinforced Polymer) hegesztései mentén létrejövő repedés. Nem tűnhet komoly hibának, de könnyen forgás közbeni kiegyenlítetlenséghez, és ezáltal további repedések létrejöttéhez, extrém esetben leszakadáshoz vezethet.



2-16. ábra - Hegesztés menti repedés következménye [7]

- Szakadás a lapát éle mentén - Sokszor jön létre régebbi felfogó elektródával nem rendelkező turbinák esetében. Nagyan hasonlít az előző típushoz, figyelmen kívül hagyása súlyosabb sérülések létrejöttéhez vezethet.



2-17. ábra - Szakadás a lapát éle mentén [7]

2.2.4. Katasztrófális sérülések

Azok a sérülések, amelyek nem csak azonnali javítást, de azonnali turbina leállást is igényelnek. Ezek a sérülések potenciálisan veszélyesek lehetnek az emberi életre a földre eső alkatrészek miatt.

- Lapát letörés - Ez a sérülés típus gyakran jelentkezik a régebbi, felfogó elektródával és levezetővel nem rendelkező szélturbinák esetében. Rendkívül súlyos sérülésnek számít, mivel a leszakadó lapát részek közvetlenül veszélyesek lehetnek az emberi életre. A leszakadás oka lehet, hogy a villámáram behatol a lapát belsejébe, és a kisülés időtartama elég hosszú (a Japánban előforduló "téli villámok" esetén a 10ms-nál hosszabb időtartam sem ritka), a keletkező hő az anyagban lévő vizet elpárologtatja, és a gázokat is hirtelen tágulásra készíti. Azokat a feltevéseket, hogy a fém védőelektródával nem rendelkező szélerőműveket ritkábban éri villámcsapás, az elmúlt években rendre megcáfolták. Ennek oka, hogy a villám útja könnyen záródik, ha a lapát felszínén tengeri só, vagy egyéb szennyezőanyag található. Ezért fontos az ilyen régi típusú szélturbinák védő levezetővel történő ellátása.



2-18. ábra - Leszakadt lapát [7]

- Lapát kiégés - Előfordulhat, hogy az üvegszálak polimer anyagból készült lapát közvetlen villámcsapás esetén meggyullad és égésnyomokat hagy a felületen. A másik ok lehet egy helytelenül elhelyezett, vagy korábban meghibásodott levezető, ami nagy villámáram esetén felizzhat és meggyújthatja a lapát anyagát.



2-19. ábra - Lapát kiégés [7]

- Levezető olvadása - Az ilyen típusú meghibásodásnál a nagy villámáram hatására a levezető elolvad, ami a lapát belülről történő kiégését okozhatja. Ezen kívül a kitáguló gázok hatására létrejöhetnek repedések a lapát anyagában.



2-20. ábra - Levezető olvadása utáni kiegészítés [7]

A későbbiekben ez a fajta sérülés csoportosítása kis kiegészítéssel esett át. A gyakorlatban ugyanis többször történt olyan eset, ahol akár emberi élet is veszélybe kerülhetett volna, mégis enyhébb kategóriába lett az incidens besorolva. Így annyit módosítottak, hogy a normál sérülések közé tartozó felfogó leválást katasztrofális sérülések közé sorolták, amennyiben a leváló alkatrész képes az emberi élet kioltására. Ha a felfogó leszakadó része olyan kicsi hogy az sérülést kevésbé okozhat, abban az esetben a normál sérülési kategóriába marad besorolva.

Sérülés típusa		Katasztrofális sérülés			Komoly sérülés		Normál sérülés		Könnyű sérülés			
		Lapát letörés	Lapát kiégés	Levezető olvadás	Repedés a hegesztések mentén	Szakadás a lapát éle mentén	Felületi lehámulás	Felfogó leválás	Felfogó elektróda megolvadása	Felületi perzselődés	Egyéb könnyű sérülések	
Lehetséges kiváltó okok	Környezeti tényezők	Nagy villámenergia	X	X	X	X	X	X	X			
		Víz elpárolgása	X			X	X					
		Felületi szennyeződés					X	X			X	X
	Kisülés jellege	Átütés a lapáton	X	X	X	X						
		Átütés a felfogón							X	X		
		Átütés a lapát felszínén				X	X	X			X	X
	Kialakítási / beépítési hiba	Felfogó hiánya	X	X	X	X						
		Lapát anyaghibája	X			X	X					
		Vezetékezés hibája		X	X							

2-4. táblázat - Sérülések kiváltó okai [7]

Sérülés típusa		Katasztrofális sérülés			Komoly sérülés		Normál sérülés		Könnyű sérülés		
		Lapát letörés	Lapát kiégés	Levezető olvadás	Repedés a hegesztések mentén	Szakadás a lapát éle mentén	Feltületi lehámítás	Felfogó leválás	Felfogó elektroda megolvadása	Feltületi perzselődés	Egyéb könnyű sérülések
Kockázatmenedzsment	Emberi sérülés törött részek miatt	Nagyon valószínű			Valószínű		Ritka		Soha		
	Lapát feltétlen cseréje	Szükséges			Néha szükséges		Ritkán		Soha		
	Mérnöki beavatkozás	Speciális daru a lapátcseréhez			Gondola vagy daru		Daru vagy darus jármű		Ideiglenes állvány vagy alpinista kötél		
	Karbantartó személyzet	Lapát gyártója			Lapát gyártója		Helyi karbantartó személyzet		Helyi karbantartó személyzet		
	Javítás teljes költsége	Nagyon magas			Magas		Közepes		Alacsony		
	Termelés kiesés	Több hónap			Pár hét		Pár nap		Semmi		
	Esemény gyakorisága	Többnyire ritka (helyfüggő)			Viszonylag ritka (helyfüggő)		Közepes		Gyakori		
	Meghibásodás elkerülése költsége	Nagyon magas			Viszonylag magas		Semmitől a közepesig		Semmitől az alacsonyig		

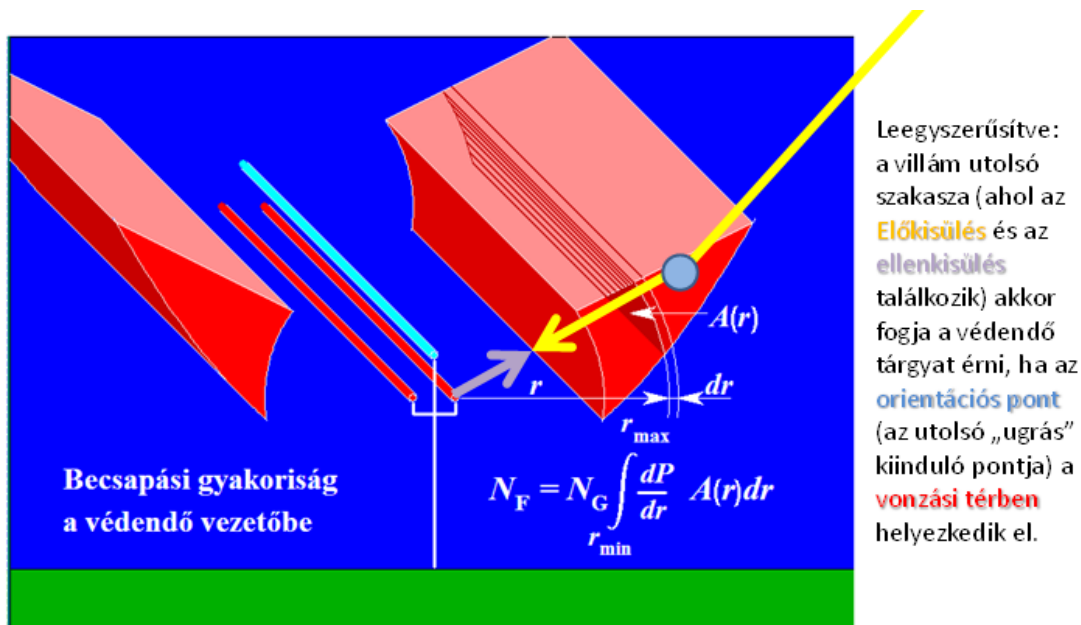
2-5. táblázat - Sérülések és kockázatmenedzsment [7]

3. A PMAS módszer

A PMAS (Probability Modulated Attraction Space) módszer, egy a vonzási tér meghatározására szolgáló eljárás, amit Dr. Horváth Tibor professzor úr fejlesztett ki. Ez a módszer meglehetősen pontosan képes bonyolult objektumok vonzási terét leírni.

3.1. Vonzási tér elmélete

Orientációs pontnak azt a pontot nevezzük, ahol a villám csúcsa akkor van, amikor az ellenkiszülés elindul. Ezen orientációs pont és a becsapási pont között lévő távolság az orientációs távolság, ami a villám áramától függ. Figyelembe véve hogy a villámáram nem lehet akármilyen kicsi, definiálunk egy minimális orientációs távolságot, aminél az orientációs pont nem lehet közelebb az objektumhoz. Azon pontok halmaza, amelyekre igaz, hogy a lehetséges orientációs pontok közelebb vannak egy objektumhoz, az adott objektum vonzási terének nevezük.



3-1. ábra - Távvezeték vonzási tere [8]

A 3-1. ábrán látható távvezetéknel a piros színnel jelölt tér a piros fázisvezető vonzási tere, az itt lévő pontok közelebb vannak ehhez a vezetékhez, mint a kék védővezetőhöz vagy a földhöz. Ezt a teret három felület határolja, az első egy hengerfelület, amely a legkisebb orientációs távolsághoz tartozik. A másik a vezetékre merőleges, függőleges síkmetszeten a fel-fogó és a védendő vezetők középpontjait összekötő felezőmerőleges által meghatározott sík, a

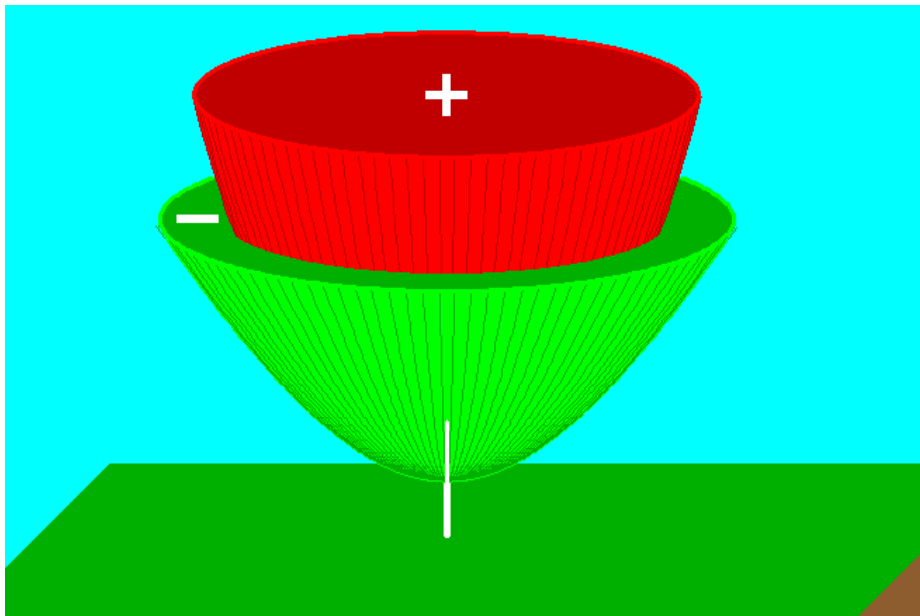
harmadik pedig a földtől és a védendő vezetőől egyenlő távolságra lévő pontok görbéje (parabola) által meghatározott ívelt felület.

A valóságban természetesen a vonzási tér nem határolható el ilyen élesen, egy orientációs pontról nem feltétlenül mondható meg, hogy hova fog becsapni a villám, csak egy bizonyos valószínűséggel. Tehát a valóságban egy objektum vonzási tere azokat a pontokat foglalja magába ahol nagyobb a valószínűsége, hogy a villám az említett objektumba csap, mint máshova. Így a tér határfelületeit azok a pontok határozzák meg ahol a becsapási valószínűség (kis b -vel jelöljük) $b=0,5$. A vonzási tér egyes pontjaihoz hozzárendelhető egy dP/dr érték az alábbi egyenlet alapján:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{k * p}{\sqrt{2\pi} * r} * \exp\left(-\frac{1}{2} * k^2 * p^2 * \left(\ln \frac{r}{r_m}\right)^2\right)$$

3-1. képlet – dP/dr kiszámítása

Ahol, k a villám polaritásától függő paraméter, p különböző szerzők által 1,2-2 közé eső érték, r_m az orientációs távolság medián értéke, r az orientációs távolság. A továbbiakban fontos megjegyeznünk, hogy a vonzási tér pozitív és negatív polarításra eltérő.

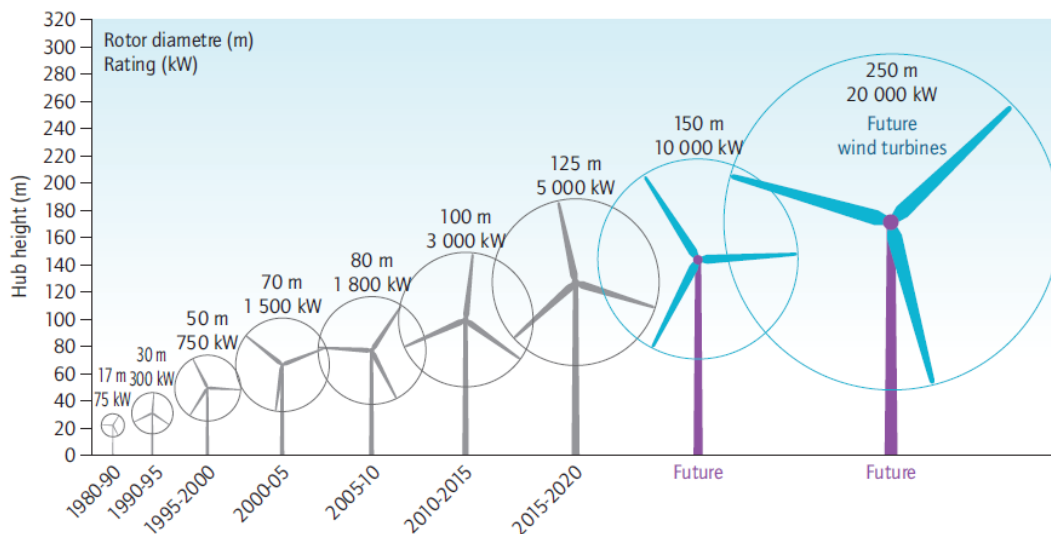


3-2. ábra - Torony pozitív és negatív vonzási tere [8]

3.2. PMAS szimuláció

A szélturbina PMAS módszerrel történő vonzási tér számításához egy speciálisan erre a feladatra készült programot használtunk. Ahhoz hogy a program a számításokat el tudja végezni, szükség van a szélkerék modelljére DXF formátumban, illetve egy PAR formátumú file-ra, ami a szélturbinát magába foglaló szimulációs tér adatait adja meg.

A DXF formátumú modell megalkotásához használhatunk egyszerű szövegszerkesztő programot, vagy megrajzolhatjuk AutoCAD segítségével és utána menthetjük DXF formátumba. Mi az utóbbit választottuk, és az egyszerűség kedvéért az egyvonalas modell mellett döntöttünk, így könnyebben azonosíthatjuk a különböző részekhez tartozó vonzási tereket. A modelljeink méreteinek meghatározásához nem egy mai szélturbinát vettünk alapul, hanem egy jövőbeni szélerőmű becsült méreteit. Ez azért fontos, mert így előrejelzést tudunk adni a jövőben épülő turbinák esetleges problémáira, illetve a lapát/torony méretarány növekedésével szintén elősegítjük a vonzási terek megkülönböztetését.

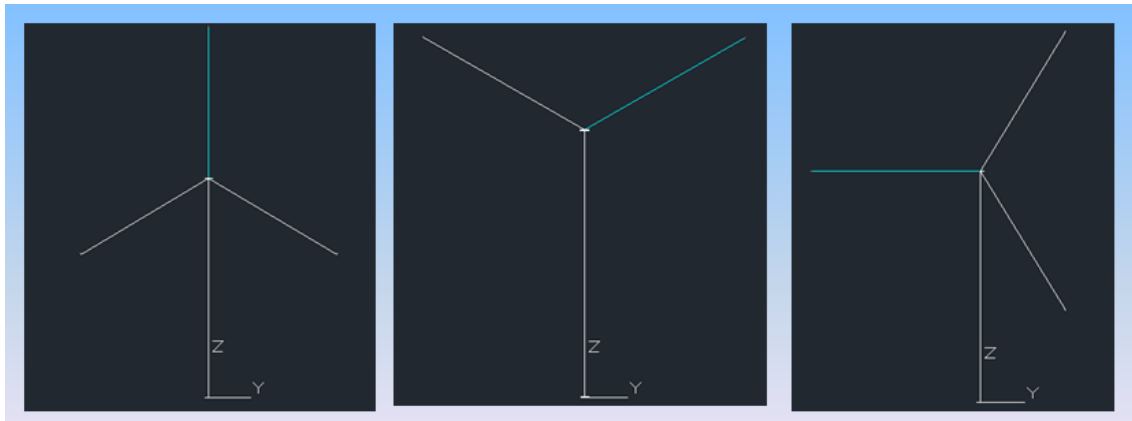


3-3. ábra - Szélturbinák méreteinek növekedése [9]

Ezek alapján a jövőbeni turbinák akár elérhetik a 180 m-es toronymagasságot, valamint a 250 m-es lapátátmérőt is. Mivel a segédprogramunk milliméteres beosztást használ, így a mi modellünk így 180 mm magas lett, 125 mm-es lapáthosszal, 0,5 mm-es felfogóval a lapátvégeken. Ahhoz hogy a vonzási tereket jól megkülönböztethessük, a felfogóhoz piros LAYER-t, míg a lapáthoz cian színű LAYER-t használtunk a DXF file-unkban. A megfelelő vizsgálhatóság érdekében nem csak egy modell készült, hanem három és mindegyik egy fő lapátállást reprezentál.

Modellek:

- "A" állás - Egyik lapát függőlegesen felfelé
- "B" állás - Egyik lapát függőlegesen lefelé
- "C" állás - Egyik lapát vízszintesen oldalra



3-4. ábra - A három lapátállás

A DXF life-on kívül létre kell még hoznunk a szimulálandó teret leíró PAR file-t. A file-nak tartalmaznia kell a tér méreteit, a vonzási tér típusát, a tér pontjainak sűrűségét, illetve a vonzási tér megjelenítésének paramétereit, az elkészítéshez egyszerű szövegszerkesztőt használunk. A PAR file kódja:

```

-350 * xmin
-350 * ymin
50 * zmin
350 * xmax
350 * ymax
500 * zmax
200 * nx, legfeljebb 200
200 * ny, legfeljebb 200
200 * nz legfeljebb 200
5 * ns, a síkmetszetek száma ábrázoláshoz
3 * a síkmetszet típusa: 1=xy, 2=xz, 3=yz
20 * a 3 koordináta értéke INDEXBEN, tehát 1..nx v. 1..ny, v. 1..nz értékű
1 * ábrázolás típusa: 1=csak vonzási tér 2=p.modulált vonzási tér
3 * a síkmetszet típusa: 1=xy, 2=xz, 3=yz
60 * a 3 koordináta értéke INDEXBEN, tehát 1..nx v. 1..ny, v. 1..nz értékű
1 * ábrázolás típusa: 1=csak vonzási tér 2=p.modulált vonzási tér
3 * a síkmetszet típusa: 1=xy, 2=xz, 3=yz
100 * a 3 koordináta értéke INDEXBEN, tehát 1..nx v. 1..ny, v. 1..nz értékű
1 * ábrázolás típusa: 1=csak vonzási tér 2=p.modulált vonzási tér
3 * a síkmetszet típusa: 1=xy, 2=xz, 3=yz
140 * a 3 koordináta értéke INDEXBEN, tehát 1..nx v. 1..ny, v. 1..nz értékű
1 * ábrázolás típusa: 1=csak vonzási tér 2=p.modulált vonzási tér
3 * a síkmetszet típusa: 1=xy, 2=xz, 3=yz
180 * a 3 koordináta értéke INDEXBEN, tehát 1..nx v. 1..ny, v. 1..nz értékű
1 * ábrázolás típusa: 1=csak vonzási tér 2=p.modulált vonzási tér

```

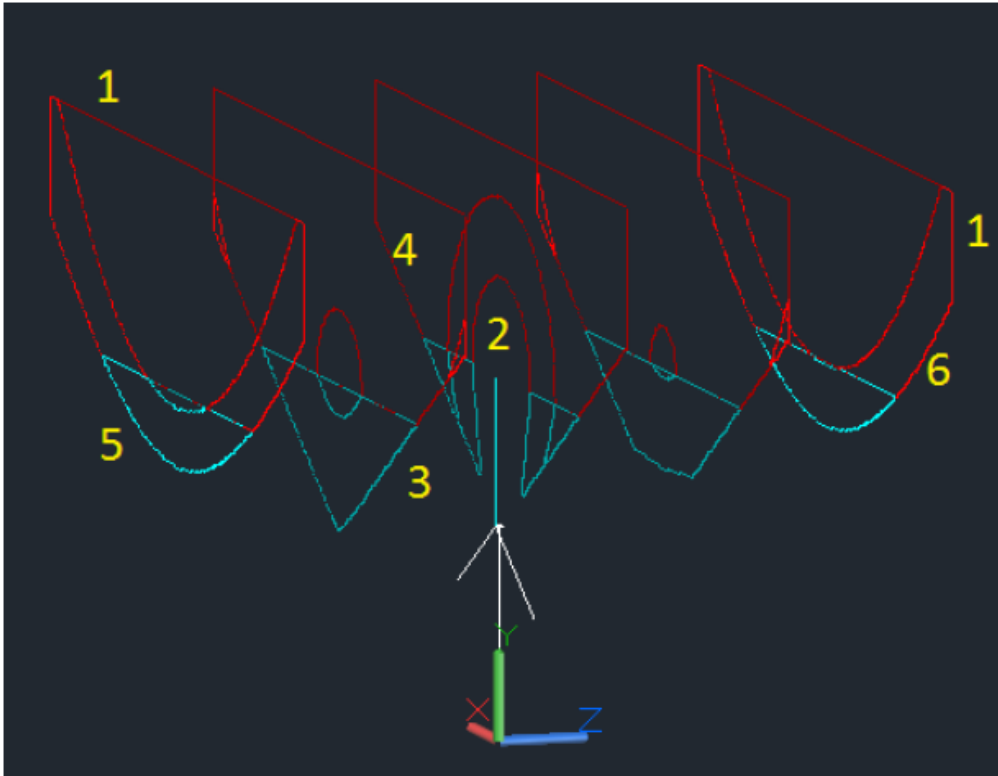
A szimuláció lefuttatásához, a programunk megnyitása után, a "Load DXF file" és a "Load params" parancsokkal bevisszük az elkészült file-jainkat. A program lehetőséget ad az elrendezés ellenőrzésére gördülő gömb módszerrel, a "Rolling Spere" gomb segítségével. Beállíthatjuk, hogy a szimulált villám paraméterei a magas épületeknél jelentkezővel (Tower) vagy lapos területeken tapasztalhatóval (Plane) egyezzen meg. A "Calculate" gomb megnyomásával a vonzási tér kiszámítása ténylegesen megtörténik, utána kiválaszthatjuk, hogy az eredményt DXF file-be mentjük, vagy MATLAB-os ellenőrzés céljából M kiterjesztésű file-ba.

The screenshot shows the PMAS program control interface. It includes several input fields and buttons for configuration. The 'Radius of rolling sphere [m]' is set to 100. The 'Ng [1/squarekm/year]' is 1, and the 'Ratio of + lightning' is 0.100000. The 'Im [kA]' is 61. The 's' values are 1.325000, 0.592000, and 1.215000. The 'Override m[m]' values are 120, 120, and 120. The 'Bundled operation' section shows parameters p=1.5, a=0.100000, b=0.699999, cp=1, cn=644, dp=31.60000, and dn=32.5. Below these is a table of lightning strike data.

obj\ID	1 kA	2 kA	5 kA	10 kA	20 kA	35 kA	50 kA	100 kA	200 kA	300 kA
1(RED)	11797.538	10891.046	3872.6332	488.24383	0	0	0	0	0	0
2(CYAN)	1239.7484	976.95468	163.74037	0	0	0	0	0	0	0
3(BLUE)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4(Purple)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5(Yellow)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total:	13037.287	11868.001	4036.3737	488.24383	0	0	0	0	0	0

3-5. ábra - A PMAS program kezelőfelülete [10]

Az alul látható táblázatok cellái az úgynevezett egyenértékű területet adják meg. Ez az érték mutatja meg nekünk, hogy mekkora az a síkterület, melybe ugyanannyi az oszlop által megadott áramerősségnél nagyobb erejű villám fog becsapni egy év alatt.

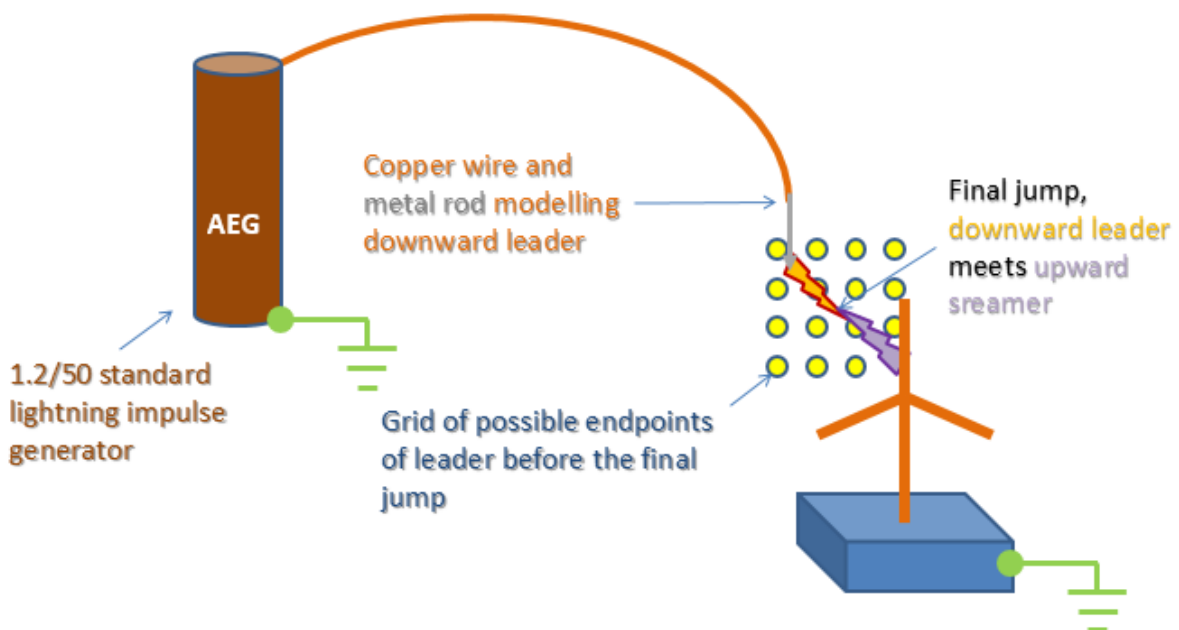


3-6. ábra - "A" lapátállás, függőleges lapát vonzási tere [10]

A DXF file-ba mentett szimulált vonzási teret AutoCAD programmal megnyitva vizsgáltuk meg. Az ábrán jól láthatóan elkülönül a lapát és a felfogó tere, a vonalak pedig a határoló felületeket jelképezik. Az 1-essel jelölt részek a szimulált tér maximális kiterjedéséből adódnak, a 2-essel jelölt félgömb pedig a minimális orientációs távolságból következik. A 3-as és 4-es vonalak a nem vizsgált lapát és a kiemelt részekről egyenlő távolságra lévő síkot adják meg. Az 5-ös és 6-os görbék pedig a kiemelt lapát, illetve felfogó és a föld között egyenlő távolságra lévő felületek.

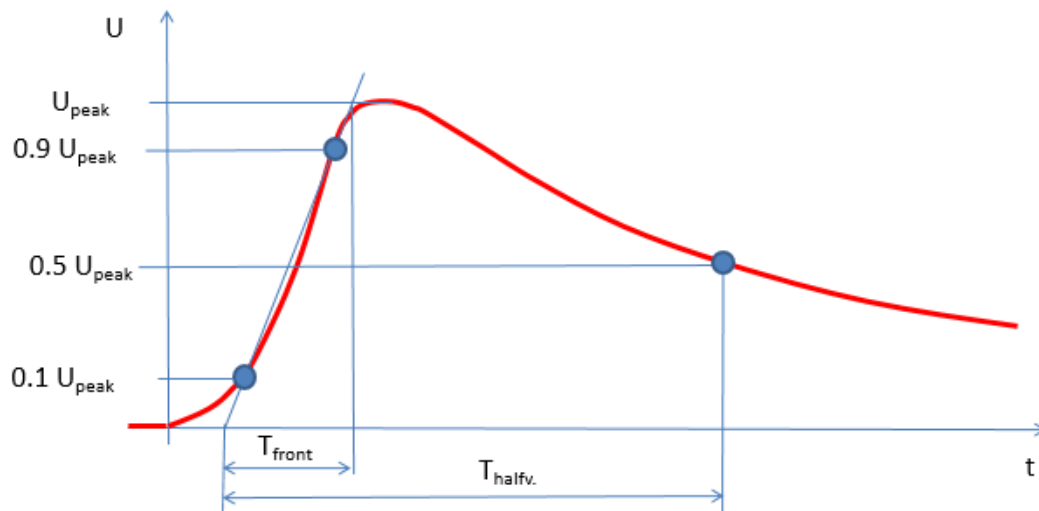
4. Laboratóriumi mérések elméleti alapjai

A PMAS programunk által kiszámított vonzási teret laboratóriumi körülmények között is ellenőrizzük, annak érdekében, hogy megbizonyosodjunk a helyességéről. Ezen méréseket a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamos Energetika Tanszék Nagyfeszültségű Laboratóriumában végeztük, az ott található 1 MV-os AEG gyártmányú lökésgerjesztővel. A mérési elrendezésünk a 4-1. ábrán található, a lökésgenerátor kimenete egy merev sárgaréz elektródára van kötve, ennek a végpontja lesz az orientációs pont. Ehhez képest mozgatjuk a szélturbina modellünket.



4-1. ábra - A mérési elrendezés [11]

A méréseink során egy a 4-2. ábrán látható standard 1,2/50-es impulzust használunk, ami azt jelenti, hogy az impulzus felfutási ideje (T_{front}) 1,2 μs , a féltérk idő (T_{halfv}) pedig 50 μs . Ez megfelel az IEC 60060-1:2010 szabványban leírt villámcsapáskor létrejövő feszültségimpulzusnak.



4-2. ábra - A lökésgerjesztővel előállított hullámforma [11]

A valóságban villámcsapás két féle módon jöhet létre a gyakoribb, amikor az előkiszülés a töltéssel rendelkező felhőből indul meg, és a föld felé tart, ez a lefelé irányuló villámcsapás. Amint az előkiszülés elég közel ér a szélturbinához, megjelenik az ellenkiszülés és létrejön az orientációs pont. A mérésünk során az orientációs pont rögzítve van az elektróda végén, így nem képes mozogni a villámáram függvényében, és ezzel sok eltérést kapunk a természetes esethez képest. A vizsgálatunk akkor pontos, ha az adott elektróda-modell távolságban akkora feszültséget hozunk létre a lökésgerjesztővel, hogy az átütés éppen létrejön. Ha ennél kisebb a feszültség, az átütés nem történik meg, ha viszont nagyobb, akkor az orientációs pont, ami messzebb lenne, a modell közelébe kényszeríti az elektróda, ezzel torzítva a vonzási teret. Ezt a feszültséget a lökésgerjesztő szikraközeinek állításával tudjuk szabályozni.



4-3. ábra – Felfelé irányuló villámcsapás [12]

Ha a szikraközöket elég nagyra állítjuk, akkor előfordulhat, hogy az előkisülés nem az elektródából indul meg, hanem a modellünkből, ez az úgynevezett felfelé irányuló villámcsapás. A természetben az ilyen villámcsapások a magasan elhelyezkedő, például hegytetőn lévő épületeknél szoktak kialakulni. Az ilyen típusú villámcsapásoknál nem tudunk orientációs pontot megállapítani ugyanis a kisülés közvetlenül a modellünkből indul, így vonzási térről sem tudunk ilyen esetben beszélni. Ettől függetlenül a felfelé irányuló villámcsapások a sérülések vizsgálata szempontjából igen fontosak lehetnek, tekintve hogy a kisülés a szélturbina lapátjából indul. Az elektródán és a levezetőn átfolyó nagy áramok miatt fellépő elektrodinamikus erőhatások során, az szélturbina jelentős sérüléseket szenvedhet. Illetve vannak olyan különleges időjárással rendelkező területek, például Japánban a Japán-tenger partvidékén, az úgynevezett „téli villámok esetén” a nagyméretű turbináknál a villámcsapások közel 100%-a felfelé irányuló villám.

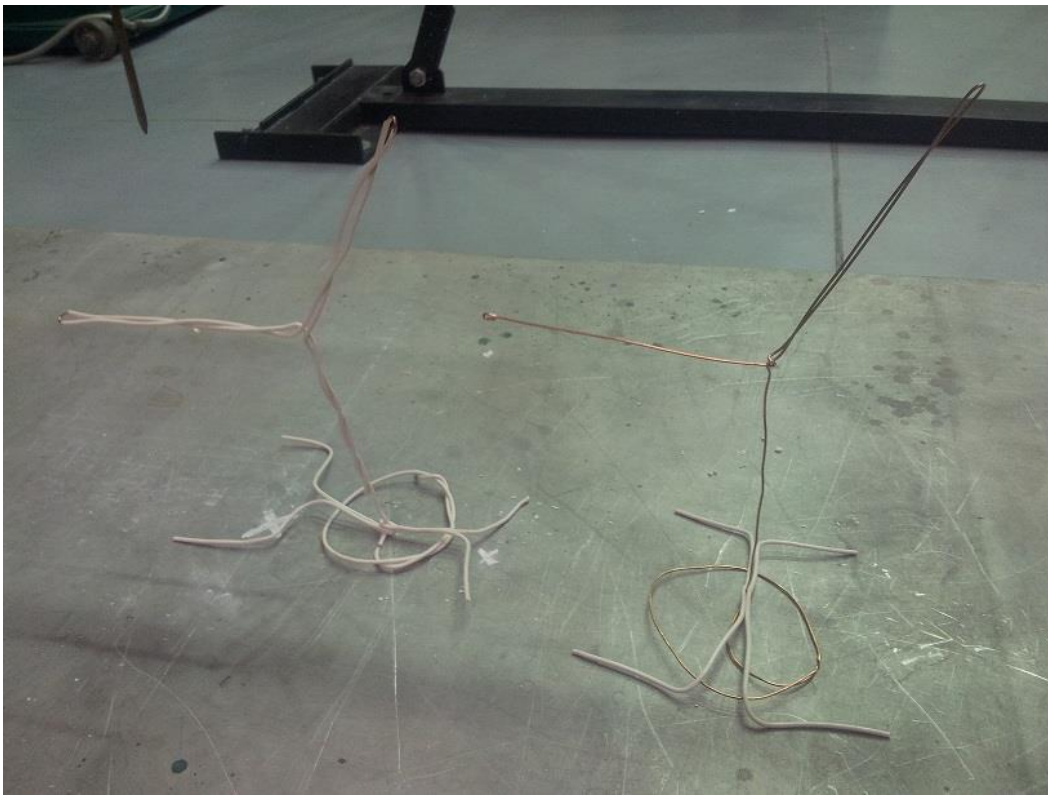
Ezen kívül érdemes még a méréseknél figyelembe venni, hogy milyen polaritású kisüléssel dolgozunk. Ahogy a 3-2. ábrán is látható a vonzási tér eltérő pozitív és negatív kisülés esetén. A negatív kisülés jobban keresi a csúcsokat így a vonzási tere is szélesebb, míg a pozitív

kisülés vonzási tere szűkebb ugyanarra az objektumra nézve. A vizsgálatainkhoz elengedhetetlen hogy mind a két polaritással végezzünk méréseket, tekintve hogy a negatív villámcsapások a gyakoribbak, de a pozitív villámcsapások a kisebb vonzási terük miatt nagyobb eséllyel csapnak a védendő objektumba. Meg kell említenünk még a vegyes polaritású villámokat ahol a villámcsapás többszörös kisülései közben polaritást váltanak. Fontos továbbá, hogy az eltérő polaritású villámcsapások különböző sérüléseket okoznak. Míg a negatív villámcsapásoknál gyakoribb a sok impulzussal rendelkező többszörös villám, addig a pozitív kisülések esetén gyakoribb a hosszabb ideig tartó, nagy energiát hordozó villámcsapás.

A fentiekből megállapítható hogy az egyszerűnek tűnő mérési összeállításunk mögött bonyolult folyamatok játszódnak le, és a vizsgálataink során rendkívül körültekintően kell eljárunk ahhoz, hogy a kapott eredményeik helyesek, és a valóságnak megfelelőek legyenek.

5. Laboratóriumi kísérletek

Mint azt a fentiekben már említettem, a méréseinket a Villamos Energetika Tanszék Nagyfeszültségű Laboratóriumában végeztük. A vizsgálatainkhoz elengedhetetlenül fontos egy megfelelő modell készítése. A mi modelljeink között megtalálható két szélturbina modell, és egy rúd modell. A szélgenerátor modellekből az egyik csupasz vezetőből készült, míg a másik egy szigetelő burkolattal van ellátva, a rúd modellünkből csak szigeteltet készítettünk. A modelljeink mindegyike 1,5 mm átmérőjű rézvezetékéből készült, ami mint azt később láthatjuk, az egyszerűsége ellenére meglepően jól modellezi a valóságot.



5-1. ábra – A szigetelt és szigetetlen turbina modell [10]

A szigetetlen modellünk úgy lett kialakítva, hogy a rézvezetékéről lefejtettük a szigetelést, majd megfelelő formára hajtogattuk. A modellünknek csak két lapátját alakítottuk ki, de a karok szimmetrikussága miatt nem szükséges mind a hármat elkészítenünk. A hajlékony anyagának köszönhetően minden mérésnél beállíthatjuk az éppen szükséges lapátállást. A lapátok végét lekerekítettük, hogy jobban hasonlítson a valóságos szélgenerátor lapátra, és így kiküszöböltük a hegyes vezeték csúcshatásából létrejövő vonzási tér torzulást is. A modell méreteit tekintve 22,5 cm magas, a lapátok pedig 19,5 cm hosszúak.

A szigetelt modell annyiban különbözik az előzőtől, hogy fent hagytuk a szigetelését majdnem mindenhol. Ahhoz hogy a valóságoshoz a legjobban közelítsünk a modellünkkel, ki kell alakítanunk a felfogó elektródát is. Ezt úgy oldottuk meg, hogy a lapát végén megbontottuk a szigetelést így létrehozva egy kis vezető részt, ez modellezi a felfogó elektródánkat, ezen kívül megbontottuk a szigetelést a modellünk talpán is, hogy a vezető padlóval érintkezzen így le tudja vezetni a kisüléseket. Természetesen itt is behajlítottuk a lapátok végét, méreteiben megegyezik a szigeteletlennel.



5-2. ábra - A szigetelt rúd modell

A szigetelt rúd modellünk az előzőekhez hasonlóan 1,5 mm átmérőjű vezetékből készült, és 55 cm magas. A szigetelt szélturbina modellhez hasonlóan a szigetelés csak a modell csúcán

illetve a talpán van megbontva a kisülés levezetése érdekében. Ezen kívül használtunk még egy szintén 55 cm magas réz rudat, hogy a szigetelt rúddal mért eredményeinket össze tudjuk hasonlítani egy ugyanolyan, de vezető anyagból készült modellel.

Ahhoz hogy a modellünk illetve az orientációs pont helyzetét pontosan le tudjuk írni, szükségünk volt egy koordináta rendszerre, amiben ezeket elhelyezhetjük, és mozgathatjuk. A koordináta rendszerünk origóját, az elektróda földre vetített döféspontjában határoztuk meg. Továbbá rögzítettük, hogy az X koordinátánk a lapátok síkjával párhuzamos vízszintes irány, az Y koordináta a lapátok által meghatározott síkra merőleges vízszintes irány, illetve a Z koordináta a függőleges irány legyen. Mivel az elektródánk rögzítve van, csak függőlegesen, Z koordináta szerint tudjuk mozgatni, ezért ha az orientációs pont X-Y síkban történő elmozdítására van szükség, akkor modellünket kell a mérések során arrébb helyezni. Az orientációs pontjaink precíz felvételét elősegítendő, készítettünk egy sablont, amire felrajzoltuk a vonzási teret, és felvettük az aktuális mérendő pontokat. A mérés során a kisülések árama nem volt akkora, hogy a beállított elrendezést képes lett volna deformálni, így az 50 kisülékes sorozatot folyamatosan megszakítás nélkül tudtuk lemérni.

5.1. Összehasonlító kísérletek szigeteletlen és szigetelt modellen

A PMAS programba bevitt modellt a program a számítás során úgy kezeli, mintha az teljes egészében vezető anyagból készült volna. Így a kiszámított vonzási tér a szigetelés nélküli modellünk terével kell megegyeznie. Az első mérési sorozatunkkal azt fogjuk megvizsgálni, hogy a program által számított tér és a valóságos vonzási tér mennyire egyezik meg.

Az első mérés során, a 3-4. ábrán látható úgynevezett „B” lapátállásban, fogunk vizsgáldni. Az elektródánkat a két felfelé álló lapát felezővonalába helyeztük, és ott három lépésben Z koordináta szerint felfelé mozgattuk, a modellünket pedig Y irányban távolítottuk az origótól. Ezzel azt vizsgáltuk, hogy a felezővonalban milyen eloszlással éri a kisülés a lapátot és a felfogót, illetve a magasság növelésével növekszik-e a felfogót érő találatok száma.

A mérésünk során minden pontban 50 darab pozitív polaritású kisülést hoztunk létre. Azért választottuk a pozitív polaritást, mert a negatívval ellentétben kevésbé keresi a csúcsokat, illetve a gyakorlatban ezek a villámcsapások általában nagyobb energiát hordoznak, és ezáltal nagyobb sérülést is képesek okozni.

Szigetelés	Z koordináta [cm]	Y koordináta [cm]		
		0	4	8
Van	42	49/1	42/8	22/28
	48	9/41	12/38	0/50
	52,5	4/48	3/47	1/49
Nincs	48	44/6	47/3	43/7
	52,5	30/23	17/33	19/33

5-1. táblázat – Az első mérés eredményei „B” lapátállásban

A táblázat értelmezése a következő: minden cellában a számok a „lapátokon keresztül záródó kisülések száma” / „felfogókon keresztül záródó kisülések száma” felírást követi. Vannak olyan cellák ahol a kisülések száma meghaladja az 50-et, az azért lehetséges, mert a többször létrejöttek olyan kisülések is, amelyek főága és mellékága a lapátot és a felfogót is érte egyidejűleg. A táblázatból jól látható hogy a magasság növelésével az orientációs pont egyre távolodik a lapátok vonzási terétől és közeledik a felfogók vonzási teréhez. Ugyanez tapasztalható ha Y koordináta szerint távolodunk a modellünktől, egyre jobban növekszik a felfogókat érő találatok száma. Ezen kívül megfigyelhető az is, hogy a szigetelt modellünk esetén már kisebb magasságnál is jelentősen nagyobb a felfogót érő kisülések aránya.

A következő mérési sorozatunk alkalmával egy az előzőhöz hasonló mérést hajtottunk végre, de ebben az esetben a modellünk az úgynevezett „C” lapátállásban volt, vagyis az egyik lapátja vízszintes, míg a másik felfelé áll (3-4. ábra). Itt is a lapátok felezővonalán mozgattuk az elektródánk csúcsát, de ez a ferde lapátállás miatt nem csak Z koordináta szerinti elmozdulást jelent hanem Z-X síkban történő mozgást.

Szigetelés	Polaritás	X koordináta [cm]	Z koordináta [cm]		
			35,75	42,375	49
Nincs	+	8	31/1		
	-	8	20/0		
	+	12		46/5	
	-	12		6/20	
	+	16			25/25
Van	+	8	50/0		
	+	12		28/23	
	+	16		11/39	12/40

5-2. táblázat – Második mérés eredményei „C” lapátállásban

A fent látható táblázat értelmezése az előzőével megegyező. Ebben a mérési sorozatban is megfigyelhető, hogy a felezővonalon kifelé haladva egyre növekszik a felfogókat ért kisülések aránya, tehát egyre mélyebbre hatolunk a vonási terükbe. Az előzővel ellentétben, ebben az esetben megpróbálkoztunk negatív polaritású kisülésekkel is, jól látható az előzetes feltevésünk helyessége, miszerint ezek a kisülések előbb kezdik keresni a felfogót, ezáltal ilyen polaritáson kisebb a lapátok vonzási tere.

5.2. Kísérletek szigetelt modellen

Az előzetes mérésekből kiderül, hogy az általunk elkészített modellek alkalmasak a vonzási tér vizsgálatára. A legérdekesebb jelenség, amit megfigyelhettünk a szigetelt és szigeteletlen modellünk vonzási terének különbsége. Azt megállapítottuk, hogy a szigetelés nélküli modell tere egybeesik a program által számítottal, de a szigeteléssel ellátott modell lapátjainak vonzási tere ennél valamivel kisebb. Ez azért fontos, a számunkra, mert a valóságban a szélturbinák is szigetelt burkolattal vannak ellátva, tehát a vonzási terük is inkább a szigetelt modell terére hasonlít. A mérések regisztrálását elősegítendő, minden ponthoz egy erre a célra létrehozott jegyzőkönyvet töltöttünk ki.

Mérési jegyzőkönyv

Bal felfogó	Bal lapát	Jobb lapát	Jobb felfogó
-------------	-----------	------------	--------------

Dátum:

X koordináta:

Y koordináta:

Z koordináta:

A távolság:

X koordináta: A lapátok síkja által meghatározott irány

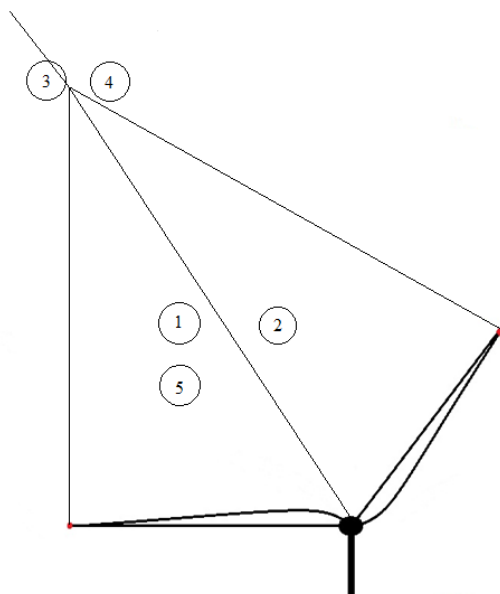
Y koordináta: A lapátok síkjára vízszintes merőleges által meghatározott irány

Z koordináta: Függőleges irány

A távolság: Az elektróda távolsága az oszlop tetejétől

5-3. ábra – Kitöltetlen jegyzőkönyv

A harmadik mérés alkalmával úgy döntöttünk, hogy elsősorban a "C" lapátállásban vizsgálódunk. Méréseink során négy objektumot különböztetünk meg, ezek az 5-3. ábrán is látható bal felfogó, bal lapát, jobb felfogó és jobb lapát. Első lépésként ellenőrző jelleggel olyan pontokat vizsgáltunk, amelyek egyértelműen valamelyik objektum vonzási terébe esnek.



5-4. ábra – A vizsgált orientációs pontok

Az 1,2,3,4 pontokat szigeteetlen modellel, az 1,5 pontokat szigetelt modellel vizsgáljuk, minden mérés alkalmával 50 negatív polaritású kisülést hozunk létre. Ennek ellenére előfordulhat, hogy egy mérési sorozatban nem pontosan 50 találat lett feljegyezve, ennek oka lehet, hogy előfordult olyan eset, amikor a kisülés fő és mellékága különböző objektumokba érkezett, illetve előfordulhat, hogy emberi pontatlanság miatt néhány találattal kevesebbet regisztráltunk.

Mérési pontok		Beérkezett találatok száma			
		Bal felfogó	Bal lapát	Jobb lapát	Jobb felfogó
Szigeteetlen	1. pont (10/0/39)	0	50	0	0
	2. pont (5,5/0/39)	0	0	50	0
	3. pont (19,5/0/56)	44	0	0	7
	4. pont (17,5/0/56)	0	0	0	50
Szigetelt	1. pont (10/0/39)	49	1	0	0
	5. pont (10/0/33)	4	17+26	0	0

5-3. táblázat – A harmadik mérés eredményei

A táblázat értelmezése: a pontok alatt lévő számok az orientációs pont koordinátáit adják meg X/Y/Z sorrendben és cm-ben, ez a rendszer megegyezik az előzetes méréseknél használttal. Szigeteetlen esetben a vártnak megfelelő eredményt kaptunk, abba az objektumba érkezett a találatok döntő többsége, amelyik vonási terében az adott pont volt. Ezek után az első pontot

újra vizsgáltuk ezúttal a valóság-hű szigetelt modellel és azt tapasztaltuk, hogy a kisülések ezúttal a felfogót választották a lapát helyett. Tehát a szigetelt modell esetén ez a pont a felfogó vonzási terébe esik, ami egyértelmű különbség a szigeteletlen modellhez képest. Később a Z koordináta csökkentésével egy olyan pontot kerestünk, ami a kiválasztott modell esetén a lapát vonzási terében van, így vettük fel az 5. orientációs pontot ahol viszont egy váratlan esemény történt. 21 kisülés után átütöttük a modellünket fedő műanyag szigetelést, az ezt követő kisülések mind a sérült pontba érkeztek, a táblázatban ezeket a "+" jel után lévő számmal jelöltük. Ettől függetlenül ezt nem tekintjük hibás mérésnek, mert ha a kisülés inkább átütést hozott létre a felületen való végigfutás helyett, feltételezhetjük, hogy az orientációs pontunk a lapát vonzási terében volt.



5-5. ábra – Az átütés során keletkezett sérülés

A negyedik mérés megkezdése előtt el kell döntenünk, hogy hogyan oldjuk meg a modell szigetelőrétegének átütésével keletkező problémát. Végül is arra jutottunk, hogy megpróbálkozunk az átütés helyénél széles szigetelőszalaggal kijavítani a hibát, illetve ha ez a módszer nem válik be, akkor a legegyszerűbb megoldás a modellünk sorozatgyártása. Az első mérésnél, amit a javított modellen végeztünk kiderült, hogy ez a módszer nem túl hatásos, ezzel szemben rendkívül látványos, ahogy a kisülés szétszakítja a feltekert szigetelőszalagot. Ezek után úgy döntöttünk, hogy a tönkrement modellek legegyszerűbb pótlási módja, ha újakat készítünk helyettük, így a későbbiekben ezt a módszert alkalmazzuk.



5-6. ábra – A sikertelen javítási kísérlet

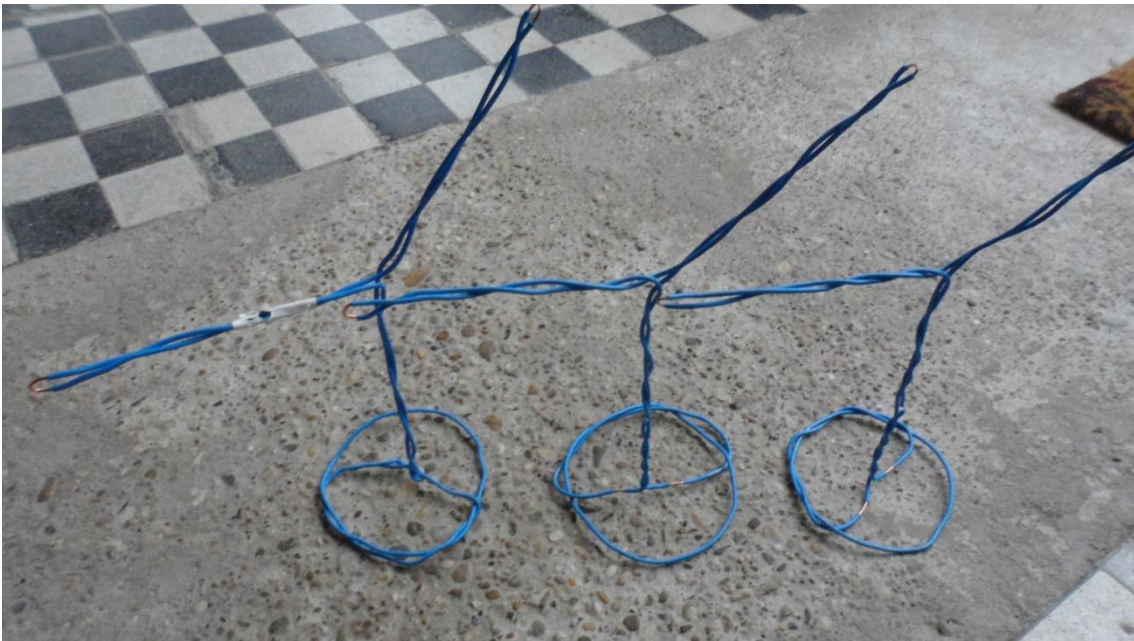
Miután a modellek pótlásának kérdése megoldódott, kezdetét vette a valódi mérés. A következőekben azt vizsgáltuk, hogy a vonzási tér hogyan változik a szigetelt lapátmodell esetében, ehhez részletesen fel kellett térképeznünk egy kitüntetett lapát vonzási terét. A "C" lapátállítás vízszintes lapátját választottuk erre a feladatra. A mérés folyamán az orientációs pontot jelképező elektródát csak X és Z koordináták mentén mozgattuk, tehát az Y koordináta minden mérési pontban 0. Minden pontban 50 kisülést hoztunk létre, aminek a polaritása ezúttal pozitív, mert ezek a kisülések kevésbé keresik a csúcsoakat, ezáltal nagyobb a valószínűsége hogy kárt okoznak. A mérés során 5 különböző pontot vettünk fel X koordináta szerint, ezek rendre 5,10,12,14,15 a távolságok természetesen cm-ben vannak megadva. Ezeket a pontokat 4 különböző rendre 33,35,37,39 cm magasságokban vettük fel. Így összesen 20 pontban vizsgálódunk, minden alkalommal szigetelt modellt használtunk.

Mérési pontok (X,Y,Z cm-ben)	Béérkezett találatok száma			
	Bal felfogó	Bal lapát	Jobb lapát	Jobb felfogó
15/0/33	46	4	0	0
14/0/33	37	13	0	0
12/0/33	27	24	0	0
10/0/33	1	10+6	0	0
15/0/35	47	3	0	0
14/0/35	40	10	0	0
12/0/35	27	25	0	0
10/0/35	3	47	0	0
5/0/35	0	0+22	0	0
5/0/35 (újra)	0	3+44	0+5	0
15/0/37	44	6	0	0
14/0/37	38	15	0	0
12/0/37	18	33	0	0
10/0/37	3	48	0	0
5/0/37	0	0	0+10	0
15/0/39	54	2	0	0
14/0/39	40	13	0	0
12/0/39	24	28	0	0
10/0/39	7	43	3	0
5/0/39	0	4	03+16	0

5-4. táblázat – A negyedik mérés eredménye

A táblázat értelmezése az előző mérésnél leírtakkal egyezik meg, a "+" jel utáni szám a szigetelő átütése utáni kisüléseket jelenti. Az X= 5 cm, Z= 33 cm koordinátájú pontban nem végeztünk mérést, tekintve hogy az X= 10 cm-es pontnál is hamar átütés keletkezett. Feltételezhetjük, hogy a közelebbi pontban is hasonló lenne az eredmény. Az X= 5 cm, Z= 35 cm-es pontnál az első alkalommal azonnali átütést tapasztaltunk, ezért úgy döntöttünk, hogy ebben a pontban megismételjük a vizsgálatot. A fent említett pontban történő ismételt mérés során viszont érdekes jelenséget tapasztaltunk, az átütés után is volt olyan kisülés, ami ahelyett, hogy a már sérült ponton keresztül záródott volna, a jobb lapát szigetelését átütve, új sérülést hozott létre és többször ezen keresztül jutott a földbe.

Az ötödik mérési sorozat megkezdése előtt ismét pótolni kellett az előző mérés során tönkrement modelljeinket.



5-7. ábra – A sorozatgyártott modellek

A vizsgálat során Y koordináta szerint is mozgattuk a modellünket, és így ellenőrizzük néhány orientációs pontot. Ezen kívül az egyik kijelölt pontban nem csak a megszokott "C" lapátállásban, de a másik kettő, eddig nem vizsgált állásban is végeztünk méréseket. A mérésnél a két lapáton és két felfogón kívül, egy ötödik objektumot is meg kell különböztetnünk, ez pedig a föld. Az előzőekhez hasonlóan itt is 50 darab pozitív polaritású kisülést hoztunk létre minden mérési pontban, viszont az orientációs pontok meghatározásához nem a megszokott X, Y, Z koordinátákat használtuk. Kijelöltünk 3 pontot, amiket csak a földtől, és a felfogótól való távolságukkal jellemeztünk. Az 1. pontban az elektródánk csúcsa 31 cm-re van a földtől, és 35 cm-re mind a jobb mind a bal felfogótól. A 2. pontunknál a föld és mind a két elfogó 31 cm távolságban van. A 3. pontnál pedig a föld 31cm, míg a felfogók 28,5 cm távolságban vannak az orientációs ponttól.

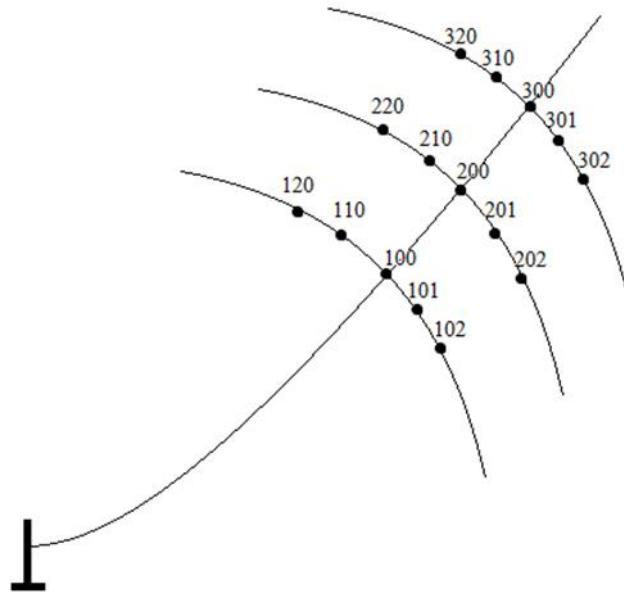
Mérési pontok	Beérkezett találatok száma				
	Bal felfogó	Bal lapát	Jobb lapát	Jobb felfogó	Föld
1. pont "C"	1	0	0	0	49
2. pont "C"	1	17	16	0	19
3. pont "C"	2	33	17	0	0
2. pont "B"	4	15	19	8	6
2. pont "A"	0	0	47	1	2

5-5. táblázat – Az ötödik mérés eredményei

A táblázat értelmezése a korábban leírtakhoz hasonló, annyi különbséggel, hogy a mérési pontoknál megjelöltük a lapátállást is. Érdekes megemlíteni az "A" lapátállással végzett mérést, itt a jobb lapát volt, amelyik vízszintesen felfelé állt. A vizsgálat során az elektródánk csúcspontja lejjebb volt a lapát legmagasabb pontjánál, de a legtöbb esetben a kisülés vízszintesen találta el a lapátot, majd a felszínén végigfutva a felfogón keresztül záródott. A jobb felfogót ért egyetlen közvetlen találatnál azt tapasztaltuk, hogy a kisülés nem az elektróda csúcsából, hanem a szárából indult ki, és szintén vízszintesen érte a felfogót.

5.3. Kísérletek szigetelt és szigeteletlen rúdon

A szélturbina modellen elvégzett mérések után úgy döntöttünk, néhány vizsgálatot egyszerű szigetelt illetve szigetelés nélküli rúdon is érdemes lenne elvégezni. Úgy gondoltuk hasznos lehet megvizsgálni a Dr. Horváth Tibor professzor úr által kiszámított vonzási tér alakját az orientációs távolságnál lényegesen kisebb, illetve az orientációs távolsággal összemérhető rúd esetére.



5-8. ábra – A vizsgált orientációs pontok, kis rúd esetén

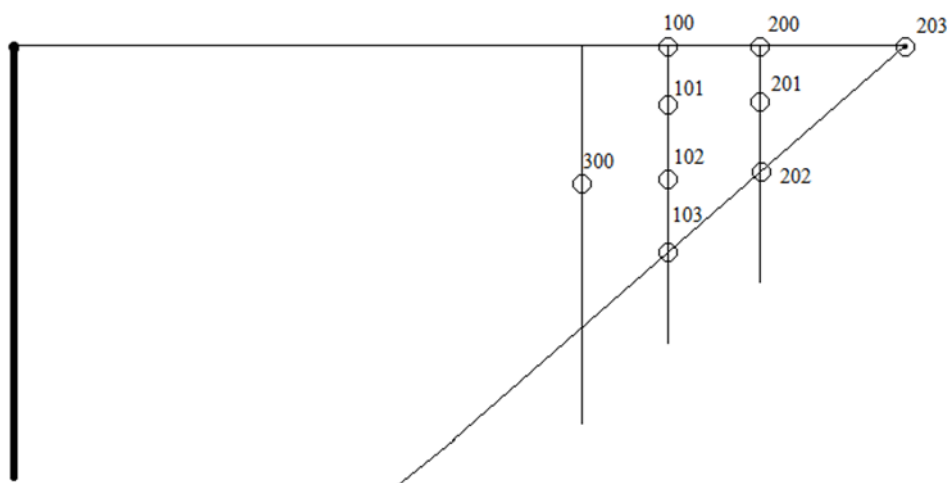
Az első mérési sorozatunk alkalmával egy kicsi, az orientációs távolságnál lényegesen kisebb, 5 cm magas rudat használtunk modellnek. Ez az elrendezés egy nem túl magas, a környezetéből nem kiemelkedő, villámvédelmi felfogóval ellátott épületet modellez. Az alapfeltevésünk az volt, hogy ebben az esetben nem fog létrejönni olyan kisülés, ami a rúd oldalát találná el, csak a földet vagy a felfogó csúcsár éri találat. Vizsgáltuk még ezen kívül azt, hogy a lökőfeszültség változtatásával hogy alakul a vonzási terünk, ezt a lökőfeszültség generátor szikraközének változtatásával tudjuk befolyásolni. A szikraköz növelésével a lökőfeszültség is nő. Az 5-8. ábrán láthatjuk a vizsgált orientációs pontokat. Meghatároztunk három különböző felületet, 20 cm/ 25 cm/ 30 cm-es távolságban. Minden felületre 5 különböző mérési pontot vetünk fel, melyből a középső a felfogó vonzási terének határ paraboláján helyezkedik el, a többi pedig tőle jobb és baloldalon 2 cm illetve 4 cm távolságban. A modellünk körszimmetrikussága miatt itt nem szükséges külön koordináta rendszert kialakítanunk elég, ha rúd csúcsához képest határozzuk meg a pontokat. A felfogó és a föld vonzási terét határoló parabolát a modellünk geometriai kialakításából számoltuk ki. A méréseinket minden pontban 50 db pozitív polaritású kisüléssel végeztünk.

Mérési pont	Szikraköz	Felfogót ért kisülések	Földet ért kisülések
200.	11 mm	13	37
210.	11 mm	25	26
220.	11 mm	32	18
300.	11 mm	10	40
310.	11 mm	19	31
320.	11 mm	30	20
320.	18 mm	31	19
310.	18 mm	13	37
300.	18 mm	12	40
200.	18 mm	14	38
210.	18 mm	9	41
220.	18 mm	27	23
220.	23 mm	27	25
210.	23 mm	13	38
200.	23 mm	4	47

5-6. táblázat – A kis rúdon végzett mérés eredményei

A mérésünket 11 cm-es szikraközzel kezdtük, és itt megállapítottuk, hogy a föld és a felfogó vonzási terét határoló parabola egy kicsit szűkebb, mint az elméleti, nagyjából a 210-es pontnál húzódik. Ez megfelel a vártnak, hiszen pozitív kisülésnél a vonzási térnek ténylegesen szűkebbnek kell lennie a geometriából kiszámolt térnél. A szikraközünk növelése során azt tapasztaltuk, hogy a felfogó vonzási tere tovább szűkült, 23 cm-nél már a 220-as pontnál mértük az 50%-os határoló parabolát. Ezen kívül a 18 mm-es szikraköznél a 200-210 pontoknál azt az érdekes jelenséget tapasztaltuk, hogy hiába vittük közelebb az orientációs pontot a rúdhoz, mégis kevesebb kisülés érte.

A második mérési sorozatban az orientációs távolsággal összemérhető 55 cm magas szigetelt és szigeteletlen modellt használtunk. Ez az elrendezés különösen magas toronyszerű épületeket, illetve magas helyre, pl. hegytetőre épült épületeket modellez. Feltételezésünk szerint ilyen esetekben számolni kell azzal, hogy létrejöhet olyan kisülés, ami a rúd csúcsa helyett az oldalát találja el. A valóságban az ilyen kisülések nagyon veszélyesek lehetnek, tekintve hogy az épületek oldalán nem található villám felfogó és levezető rendszer, illetve a becsapás közepében akár emberek is tartózkodhatnak.



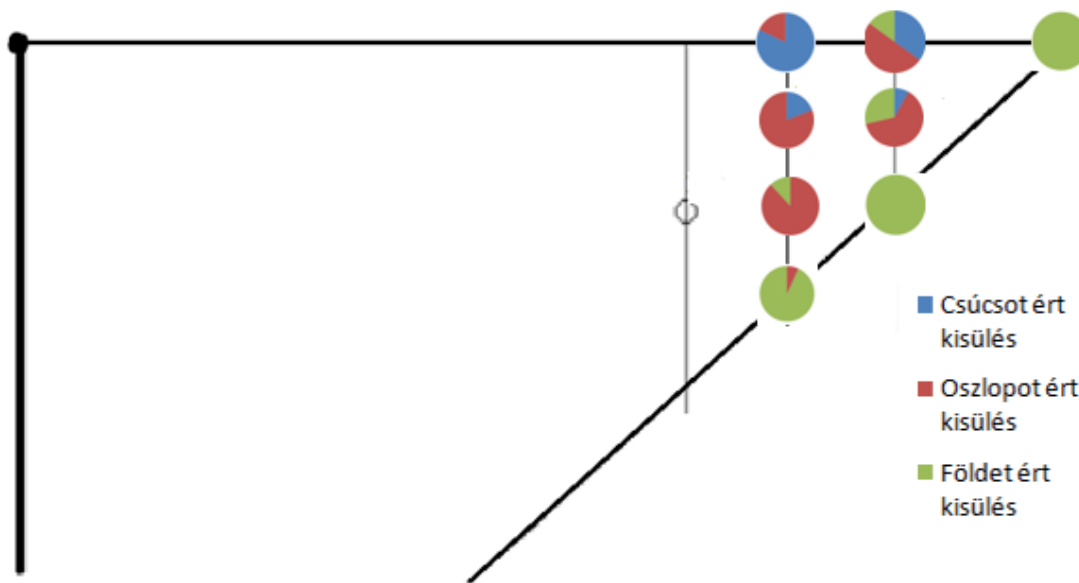
5-9. ábra – A vizsgált orientációs pontok, nagy rúd esetén

Ahogy az ábrán is látható az orientációs pontok kijelölésénél arra a térrészre koncentráltunk ahol a felfogó, a rúd és a föld vonzási tere találkozik. A vizsgálatunk célja az volt, hogy kiderítsük szigeteletlen esetben a vonzási tér eltér-e az elméletitől, és ha igen mennyire, illetve ennek függvényében milyen változást tapasztalunk szigetelt esetben. A vizsgálatokat a megadott pontokra a szokásos módon végeztük el, 50 darab pozitív polaritású kisüléssel. Az elrendezés itt is körszimmetrikus, a szikraközt az első mérés előtt 17 mm-re állítottuk, de a későbbiekben volt olyan helyzet ahol nem jött létre átütés, ekkor néhány milliméterrel megnöveltük a közt.

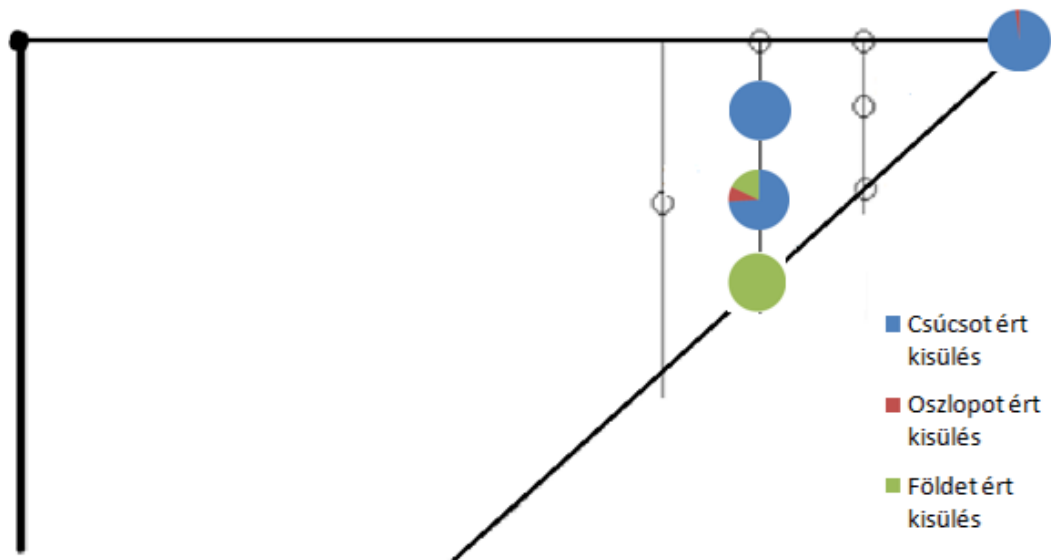
Mérési pont	Szigetelés	Csúcsot ért kisülés	Oszlopot ért kisülés	Földet ért kisülés
100	Nincs	41	9	0
101	Nincs	10	42	0
102	Nincs	0	44	6
103	Nincs	0	3	47
202	Nincs	0	0	50
201	Nincs	4	31	14
200	Nincs	21	30	9
203	Nincs	0	0	50
103	Van	0	0	50
102	Van	37	4	9
101	Van	50	0	0
300	Van	46	13	0

5-7. táblázat – A nagy rúdon végzett mérés eredményei

Több érdekes eredményt is kaptunk a mérések során. Szigeteletlen esetben többnyire az elvárásainknak megfelelően alakultak az eredmények. A 200-as pontban meglepően nagy az oszlopot ért kisülések aránya, attól függetlenül, hogy ezt a mérést egyszer megismételtük az elektróda kismértékű elmozdulása miatt. A szigetelt esetben még ennél is érdekesebbek az eredmények. Az első meglepő tapasztalatunk az volt, hogy az 50 kisülés leadása után a modellünk szigetelése statikusan jelentősen feltöltődött. Erre magyarázat lehet, hogy volt olyan a mérés során hogy nem jött létre átütés, akkor azonban korona kisülés végbemegy, ami feltöltheti a szigetelést. Ezen kívül meglepően nagy a csúcsot ért találatok arány már a földhöz egész közeli 102-es pontban is. Végül pedig a 300-as mérőpontban már olyan közel jutott az orientációs pont a modellünkhöz, hogy előfordult olyan kisülés, ami nem az elektróda csúcsából indult, hanem annak a szárából. A szemléletesség kedvéért készítettünk egy olyan ábrát ahol minden mért ponthoz egy kördiagramot rendeltünk, amin színekkel jelöltük azt, hogy milyen arányban éri a kisülés a felfogót, oszlopot vagy a földet.



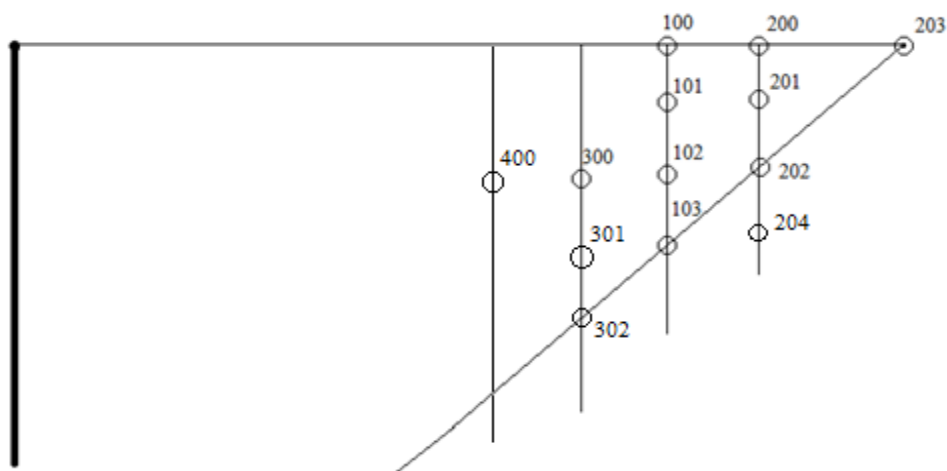
5-10. ábra – A kisülések eloszlása, szigetelés nélküli rúd esetén



5-11. ábra – A kisülések eloszlása, szigetelt rúd esetén

Az ábrából jól látszik, hogy a szigetelt esetben jelentősen lecsökkent a rúd oldalát ért találatok száma, még az olyan pontokban is ahol egyértelműen az oszlop vonzási terében van az orientációs pont.

A harmadik mérési sorozat nagyon hasonló az előtte elvégzethez, annyi különbséggel hogy itt csak a szigetelés nélküli modellel mértünk, illetve a kisülések polaritását negatívrá változtattuk.



5-12. ábra – Vizsgált orientációs pontok, nagy rúd esetén, negatív polaritással

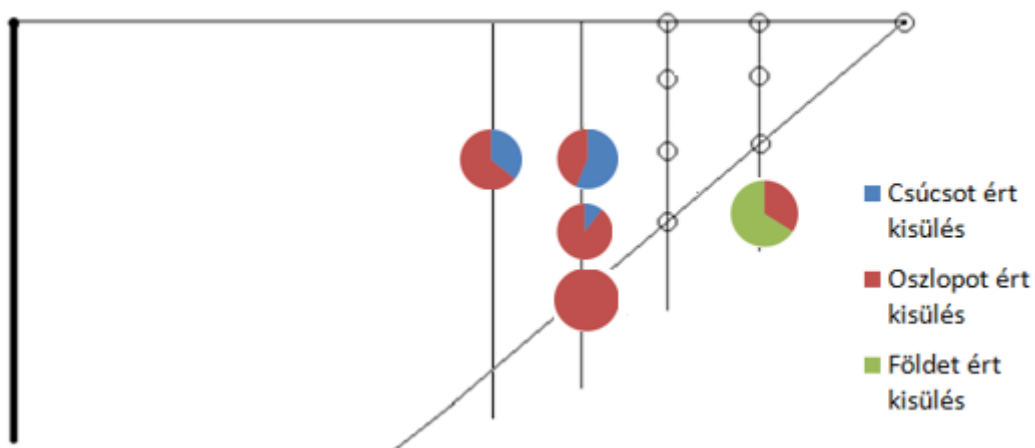
A 5-12. ábrán jól látható hogy az előző mérési sorozathoz képest felvettünk még néhány pontot a vizsgált terünkben, és azon kívül is. A mérés során minden alkalommal 50 db kisülést

hoztunk létre. Az első mérési pontban (203) észrevettük, hogy a kisülések nem minden alkalommal az elektróda csúcsából indulnak ki, hanem előfordult, hogy az elektróda oldalának különböző pontjaiból. Ezért készítettünk egy 45°-ban hajlított szárú elektródát, így biztosak lehetünk abban, hogy a kisülés a kívánt pontból induljon. A mérési sorozat elején a szikraközt 20 mm-re állítottuk, de ahol szükség volt rá ott megnöveltük 27 mm-re.

Mérési pont	Szikraköz	Csúcsot ért kisülés	Oszlopot ért kisülés	Földet ért kisülés
300	27mm	33	18	0
300	20mm	27	21	0
400	20mm	18	32	0
301	20mm	5	42	0
302	20mm	0	50	0
204	27mm	0	17	33

5-8. táblázat – A harmadik nagy rúdon végzett mérés eredményei

Az első érdekesség a már említett, az elektróda oldalából kilépő kisülés volt, ezen kívül megfigyeltük, hogy a rúd vonzási tere itt is lecsökkent, nagymértékben be kellett hatolnunk az elméleti vonzási térbe ahhoz, hogy egyáltalán tapasztaljunk ilyen kisülést. Megállapítottuk, még hogy nem csak a rúd vonzási tere csökkent, de a földé is nagymértékben torzult. A 302-es pontban elvileg a két vonzási tér határfelületén voltunk, mégsem tapasztaltunk földbe érkező kisülést, illetve a 204-es pontban ahol már bőven a föld vonzási terében voltunk még nagy arányban érték az oszlopot is kisülések. Ehhez a méréshez is készítettünk kördiagramos ábrát.

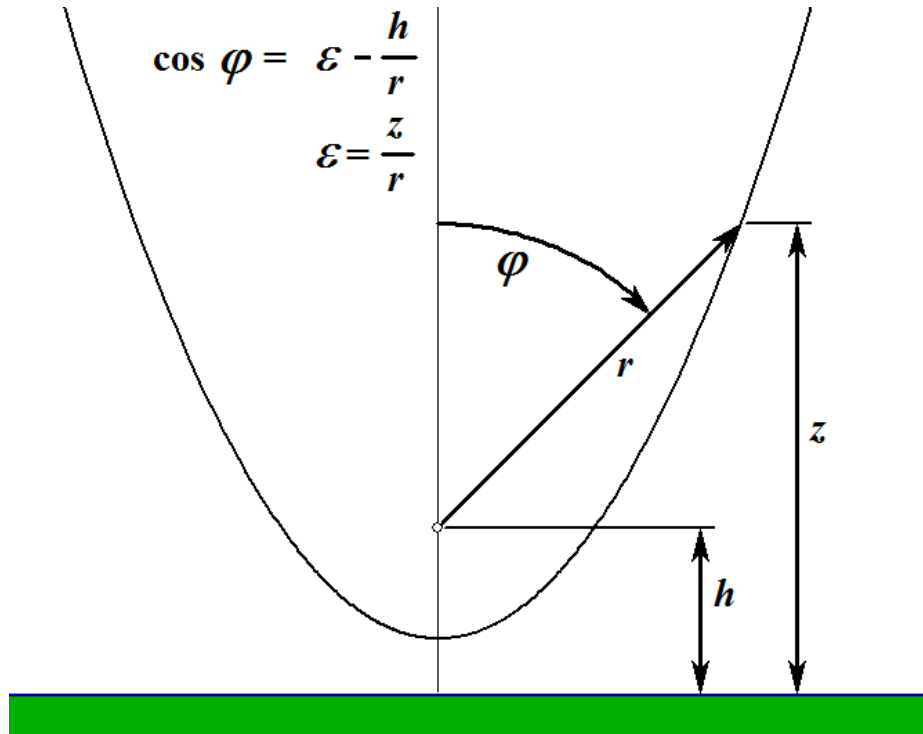


5-13. ábra – A kisülések eloszlása szigetetlen rúd esetén, negatív polaritásnál

5.4. Mérések kiértékelése

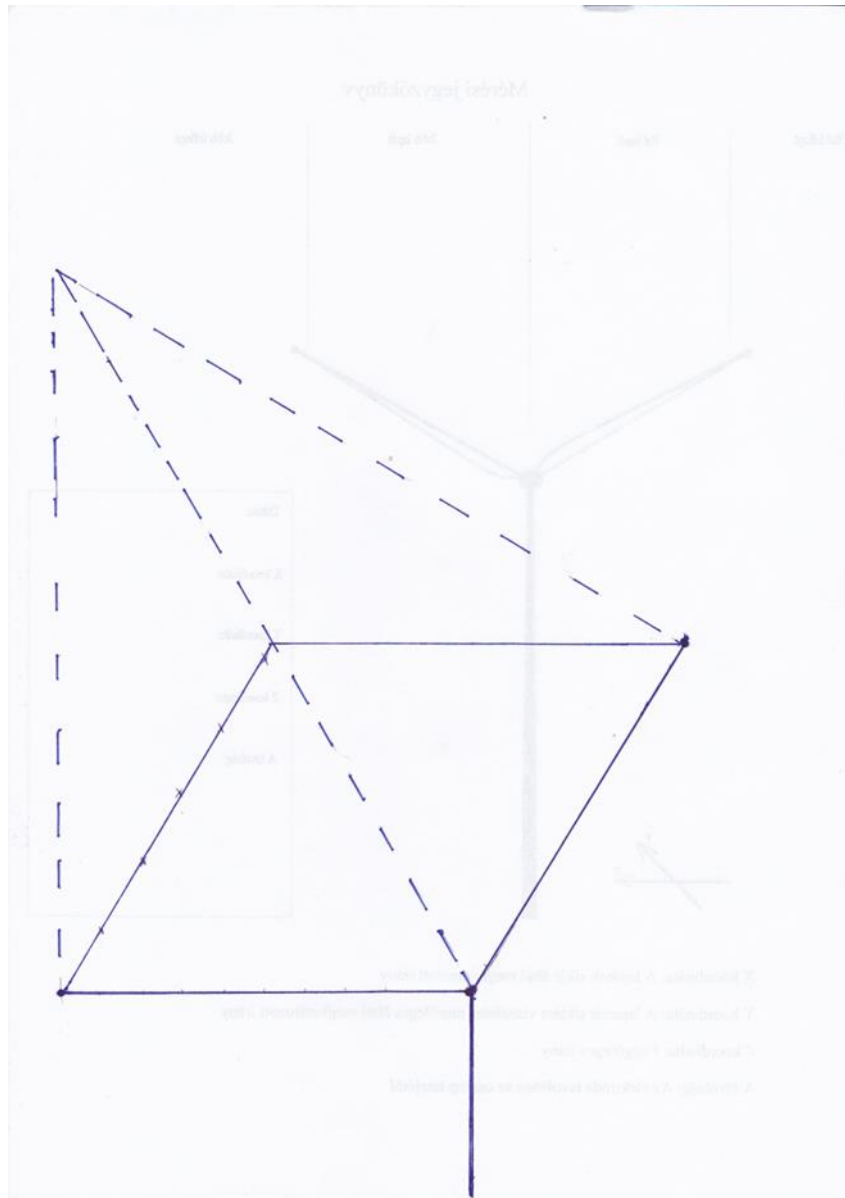
Kiértékelésre elsősorban a második mérési sorozatban kapott eredmények szorulnak. Itt ugye azt szeretnénk meghatározni, hogy hogyan változik a vonzási tér akkor, ha a lapátunk felületén szigetelés található. Természetesen mivel az időnk és lehetőségeink is végesek, nem tudtuk a lapát teljes vonzási terét maximális részletességgel feltérképezni, de a mérésünk arra elegendő, hogy a valós körülményeket jó közelítéssel meghatározzuk. Az adatainkból meg tudunk határozni minden mért magasságban egy pontot ahol 50-50% valószínűséggel találja el a kisülés a lapátot, és a felfogót. Ez a pont a $Z=33$ cm-es magasságnál $X=10$ cm és 12 cm között lesz, jelentősen közelebb az utóbbihoz kb. $11,5$ cm-nél. A $Z=35$ cm esetén az értékek nagyon hasonlóan alakulnak az előbbihez így a felezőpont itt is $X=11,5$ cm-re becsülhető. A következő magasságban, vagyis $Z=37$ cm-nél már egészen más a helyzet ugyanis a felezőpont itt az $X=12$ cm és 14 cm között lesz, nagyjából 13 cm-nél. A legnagyobb magasságban $Z=39$ cm-nél a keresett pontunk az előzőhöz hasonlóan a 12 cm és 14 cm-es mérési pontunk között lesz, $12,5$ cm-re becsülhető.

A Dr. Horváth Tibor professzor úr által kidolgozott PMAS módszerben ε -al jelöljük azt a tényezőt, amely egy vonzási tér határvonalát írja le, egy arányszámmal.



5-14. ábra – Az ε kiszámítása [8]

A fenti ábrán látható az ε kiszámításának módja egy torony, vagy rúd esetében. Ha a vonzási térben lévő objektumok mindegyike fémből készült, tehát ugyanolyan mértékben vonzza a kisüléseket, akkor az ε értéke mindig 1. A PMAS program által szimulált esetben is ez a helyzet, de a szigetelt modell megváltozott vonzási terénél már az ε értéke is változni fog. Érdekes tehát a fentebb kiszámított négy határpontunkra is meghatározni az ε értékét. A mi esetünkben a Z távolság a pont és a lapát távolsága, míg az R, a pont és a felfogó távolsága. A szükséges adatok meghatározása után minden pontra külön kiszámoltuk az ε arányt, ezek rendre: 0,7773/0,8269/0,9006/0,9103. Ha a fenti eredmények átlagát vesszük, megkapjuk a legvalószínűbb ε értéket, ami 0,8537. Mivel az eredményül kapott arány 1-nél kisebb, tehát a Z távolság kisebb az R-nél, vagyis a vonzási tér határa a szélkerék közepe felé fog behajlani. Kijelenthetjük, hogy a szigeteléssel ellátott lapátunk vonzási tere valóban lecsökkent a szimulálthoz képest. Ezután a kapott ε értéket felhasználva, megszerkeszthető az új vonzási tér.

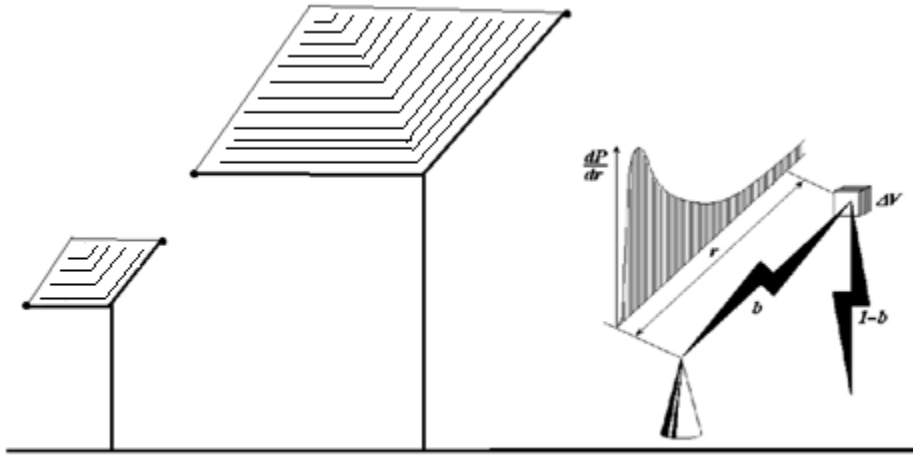


5-15. ábra – A lecsökkent vonzási tér

Az ábrán látható esetben, a lapát végétől mérve két centiméterenként meghatároztuk a tér határán lévő pontot, és ezeket összekötve rajzolódik ki a vonzási tér. A számításokat csak a vízszintes lapátra végeztük el, de a szélkerék szimmetrikus volta miatt feltételezhetjük, hogy a másik lapát esetén is hasonló eredményt kapunk. Az ábrán jól látható, a szaggatott vonallal jelölt eredeti vonzási tér, és a lecsökkent közötti különbség.

A becsapási valószínűség nem csak és kizárólag a vonzási tér alakjától függ, fontos befolyásoló tényező még a szélturbina fizikai mérete, magassága. Ezt a függést a dp/dr érték írja le. (3-1 képlet)

Ennek következtében két ugyanolyan felépítésű, de eltérő nagyságú szélturbinának, még ha a vonási terük alakja meg is egyezik, a lapátokba csapási valószínűség jelentősen eltérhet. Egy kicsi, háztartási méretű szélgenerátornál a becsapási valószínűség, szinte elhanyagolható, míg egy nagy energiatermelő szélkeréknél ez a valószínűség már jelentős



5-16. ábra - A dP/dr -el súlyozott vonzási tér [13]

Kijelenthetjük tehát, hogy a szélgenerátorok méretének növekedésével megnő a valószínűsége annak is, hogy a lapátokat villámcsapás éri, bár bizonyos turbinamagasság felett egyre több lesz a lapát végéből induló, felfelé haladó villám. Így egyre nagyobb szükség van a hatékony villámvédelmi technológiák kifejlesztésére.

A szigetelő és szigeteletlen rúdon való méréseinkből kiderült, hogy nem csak az olyan közelmúltban elterjedő bonyolult kialakításoknál, mint a szélturbina van lehetőség a villámvédelmi rendszerek fejlesztésére, hanem olyan egyszerű építményeknél is, mint a magas toronyházak. A méréseink rávilágítottak arra, hogy ilyen épületeknél nem csak a tetőn elhelyezett villámvédelmi felfogót érheti becsapás, hanem az épület oldalát is, ami nagy veszélyeket rejt magában.

A későbbiekben mindenképpen szeretném ezt a kutatást tovább folytatni, a tématerület szerencsére eléggé mély és szerteágazó ahhoz, hogy erre számos lehetőséget adjon. A jelenlegi tanulmányom jó alapot adhat ezeknek a vizsgálatoknak. Elsősorban a méréseink során kapott váratlan eredmények magyarázatát tűztem ki célul. A továbbiakban tervbe lett véve egy a fenténél alaposabb, sok mérendő orientációs pontot tartalmazó vonzási tér feltérképezés, különböző lökő feszültségekkel. Ezen kívül az előzetes mérések során, a PMAS programmal végzett

számítások szerint a „C” lapátállásban a vízszintesen álló lapát vonzási tere nagyobb, mint a felfelé mutatóé. Ezt a jelenséget is érdemes lenne a gyakorlatban megvizsgálni.

6. Következtetés, javaslat

A dolgozatomban alapvetően a szélturbinákra, illetve a különösen magas épületekre nézve tanulmányoztam a használatban lévő villámvédelmi elrendezések hatékonyságát, és azok esetleges hiányosságait. Ez a kutatás még messze nem teljes, és nagyon sok területen további vizsgálatokra szorul, ezért még az én tanulmányom sem tér ki az általam feltárt hibák konkrét megoldására. Előzetesen azért néhány fontosabb következtetést le tudok vonni, illetve néhány javaslattal is szolgálhatok.

A szélturbinák esetében a méréseink kimutatták, hogy bár a szigetelő burkolatú szélkerék kisebb eséllyel szenved el a lapátját érő villámcsapást, de ez a valószínűség messze nem elhanyagolható. A manapság használatban lévő lapátvégre szerelt elektródák nem nyújtanak teljes védelmet, úgy gondolom, hogy a lapát mentén érdemes lehet elhelyezni további felfogó elektródákat. Más tanulmányok kimutatták, hogy a lapát felületéből kiálló elektróda nagymértékben rontja a szélkerék aerodinamikáját, így mindenképpen a lapátba épített korong elektródát, esetleg az egész élt fedő fémburkolatot javasolnék.

A különösen magas illetve magaslatra épült toronyházak esetében sem elegendő az általában használt villámvédelmi felfogó rendszer, hanem szükség van az építmény oldalában is felfogókat kialakítani. Ezek lehetnek az épület oldalán végigfutó elektródák, illetve a kritikusabb pontokon és magasságokban kialakított egyedül álló felfogó rudak is.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet nyilvánítani a családomnak, barátaimnak akik támogattak a kihívások leküzdésében. Köszönöm Dr. Németh Bálintnak, Cselkó Richárdnak, és Göcsei Gábornak hogy bátorítottak a Tudományos Diákköri Konferencián való részvételre. Köszönöm Dr. Horváth Tibor professzor úrnak a támogatását és szakértelmét. Elsősorban azonban konzulensemnek, Dr. Kiss Istvánnak tartozom köszönettel a rengeteg segítségért, a jó hangulatú és izgalmas mérésekért, és minden támogatásáért.

2015.október.24

Palotai Roland

Irodalomjegyzék

- [1] Global Wind Energy Council (GWEC), *Global Wind Report - Annual Market Update 2013*, <http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-2/>
- [2] International Energy Agency, "Technology Roadmap – Solar Photovoltaic Energy" in International Energy Agency, 9 rue de la Fédération, 75015 Paris, France, 2014,
- [3] Dr. Nikolaos Kokkinos, Dr. Nicholas Christofides, Dr. Charalambos Charalambous, „Lightning Protection Practice for Large-Extended Photovoltaic Installations” in International Conference of Lightning Protection, Vienna, Austria, 2012
- [4] Hill Country Wind Power, Wind Basics, <http://www.hillcountrywindpower.com/wind-basics.php>
- [5] Yarú Méndez Hernández, Wolfgang Zischank, Klaus Stimper, Bastian Lewke, "AN EXPERIMENTAL APPROACH OF THE EFFECTS OF LIGHTNING CURRENT ON ROTOR BLADE TIPS OF WIND TURBINES" in International Conference on Lightning Protection, Vienna, Ausztia, 2012
- [6] Mitsuru Onuma, "The Effect of Overhead Ground Wires of a Lightning Protection System for a Wind Turbine Generator" in International Conference on Lightning Protection, Shanghai, China, 2014
- [7] Yasuda Yoh, Yokoyama Shigeru, Ideno Masaru, "VERTIFICATION OF LIGHTNING DAMAGE CLASSIFICATION TO WIND TURBINE BLADES" in International Conference on Lightning Protection, Vienna, Ausztia, 2012
- [8] Dr. Horváth Tibor, VE-2009, "Villám és villámvédelem" segédprogram, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2009
- [9] International Energy Agency, "Technology Roadmap - Wind Energy" in International Energy Agency, 9 rue de la Fédération, 75015 Paris, France, 2013
- [10] Kukucska Tamás, Szakdolgozat, "Szélérőművek villámvédelmének értékelése", Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2014
- [11] Dr. Kiss István, Szerző, „Introduction to lightning protection and protection of wind turbines and other renewable generation units”, Performance, 2015
- [12] Tom A. Warner, „Rare upward lightning videos reveal potential downward triggers”, Photo, 2012 <http://blogs.agu.org/geospace/2012/10/05/rare-upward-lightning-videos/>

- [13] Horváth Tibor, "Comparative Study on the Interception Concepts" in International Conference on Lightning Protection, Birmingham, United Kingdom, 1998