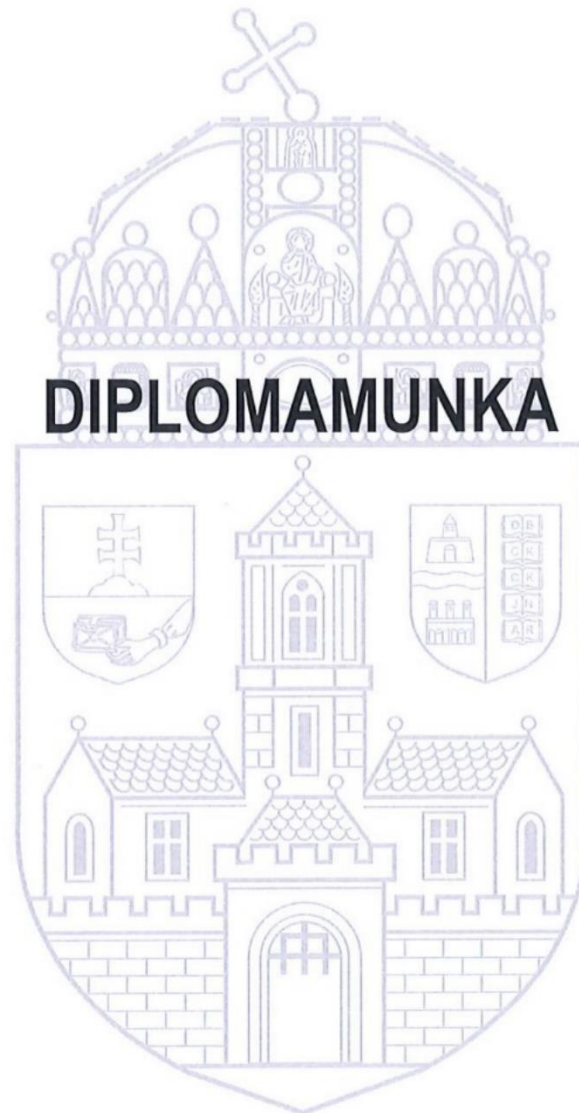




ÓBUDAI EGYETEM

Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Automatizálási és Energiarendszerek Intézet



DIPLOMAMUNKA

ÓE-KVK

2025.

Hallgató neve:

Balogh Géza

Hallgató törzskönyvi száma:

T011170/FI12904/K



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Villamosenergetikai Intézet

DIPLOMAMUNKA FELADATLAP

Hallgató neve: Balogh Géza

Diplomamunka száma: SZD2505121030513037XZWSXB

Törzskönyvi száma: T011170/F112904/K

Neptun kódja: XZWSXB

Szak: villamosmérnöki (Budapest)

Specializáció: Energetika specializáció

A dolgozat címe: Geomágneses viharok hatása a transzformátorokra és a villamosenergia-hálózatra

A dolgozat címe angolul: Effects of Geomagnetic Storms on Transformers and the Power Grid

A feladat részletezése: 1. Szakirodalom összegyűjtése a naptevékenységekről, GIC jelenségről

2. A GIC kialakulásának fizikai leírása

3. A GIC hatásának vizsgálata a transzformátorokra és a hálózatra

4. Konkluzió

Intézményi konzulens neve: Morva György Ádám

Külső konzulens neve: Dr. Nádor Gábor

Munkahelye:

A kiadott téma elévülési határideje: 2027. 05. 15.

Beadási határidő: 2025. 05. 15.

A diplomamunka: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2025. 05. 14.



Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találok:

belső konzulens

külső konzulens



HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott hallgató kijelentem, hogy a diplomamunka saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült diplomamunkában található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Budapest, 2025. 05. 14.

Balogh Géza
.....
Hallgató aláírása

**ÓBUDAI EGYETEM KANDÓ KÁLMÁN VILLAMOSMÉRNÖKI KAR
VILLAMOSENERGETIKA SZAKIRÁNY
NAPPALI TAGOZAT**

**GEOMÁGNESES VIHAROK HATÁSA A
TRANSZFORMÁTOROKRA ÉS A
VILLAMOSENERGIA-HÁLÓZATRA**

**Effects of Geomagnetic Storms on Transformers and
the Power Grid**

Intézeti konzulens:
Dr. Morva György
egyetemi tanár

Külső konzulens
Dr. Nádor Gábor
Kutatás-fejlesztési vezető

Készítette:
Balogh Géza
villamosmérnök hallgató

**BUDAPEST
2025**

Tartalomjegyzék

1	BEVEZETÉS	7
2	A NAP.....	8
2.1	Naptevékenységek.....	10
2.2	Magnetoszféra	13
2.3	Naptevékenységek földi hatásai	14
2.3.1	Sarki Fény	14
2.3.2	Hatások skálázása.....	15
2.3.3	Klíma és időjárás	17
2.3.4	Műholdhúzás	17
2.3.5	Kommunikáció (rádiózavarok)	18
2.3.6	Élettani hatások	18
2.3.7	Villamos energiahálózatok.....	18
3	A GEOMÁGNESES ZAVAROK MÖGÖTTI FIZIKA LEÍRÁSA.....	20
3.1	A GIC kialakulása	21
3.2	Más DC-komponens források	23
3.2.1	Egyenáramú vasúti járművek	23
3.2.2	HVDC.....	25
3.2.3	Aktív korrózióvédelem.....	26
3.2.4	Régiók közti oszcillációk	26
4	A TRANSZFORMÁTOROKRA GYAKOROLT HATÁSOK.....	27
4.1	A vasmag telítése	27
4.2	A GIC jellemzőinek számítása.....	30
4.2.1	Az állandósult állapot jellemzői.....	30
4.2.2	GIC okozta tranziens jelenség.....	31
4.2.3	GIC hatása bekapcsolt AC feszültség mellett	33
4.3	Tervezési szempontok	35
4.3.1	Rövidzárási impedancia	35
4.3.2	Névleges fluxussűrűség.....	36
4.3.3	Kiegyenlítő tekercselés	38
4.3.4	A vasmag típusa	39

4.4	Felharmonikusok.....	40
4.5	Rezonancia	40
4.6	Veszteségek.....	41
4.6.1	Hiszterézis veszteség.....	41
4.6.2	Örvényáram veszteség.....	42
4.6.3	Tekercsveszteségek	42
4.6.4	Ampermenet-egyensúly	44
4.6.5	Szkin veszteség	44
4.6.6	Szórt veszteségek	45
4.7	Melegedés.....	45
4.7.1	Melegedés típusok.....	45
4.7.2	Melegedés okozta meghibásodások	46
4.8	Zajok.....	47
4.8.1	A transzformátor zajának forrásai	48
5	A RENDSZER VÉDELME A JELENSÉGGEL SZEMBEN	52
5.1	Monitoring rendszerek szükségessége	52
5.1.1	Hall-effektus érzékelők	53
5.1.2	Optikai áramváltók.....	53
5.1.3	SMDA és DOGME rendszer.....	53
5.2	Megelőzés, védekezés a jelenség ellen	54
5.2.1	Sorba kapcsolt kondenzátortelepek.....	54
5.2.2	Csillagpontba szerelhető DC blokkoló eszközök.....	55
5.2.3	DC kompenzáló berendezés	56
5.2.4	Kezelőszemélyzet általi beavatkozások	56
	ÖSSZEFOGLALÁS.....	58
	SUMMARY	59
	ÁBRAJEGYZÉK	60
	FELHASZNÁLT IRODALOM	61

1 BEVEZETÉS

Az emberiséget ősidőktől kezdve lenyűgözte a Nap és a Föld közötti titokzatos kapcsolat, aminek bizonyítékai fellelhetők nemcsak a technológiában, hanem a vallásainkban és a kultúránkban is. Az egyik ilyen érdekes jelenség a sarki fény, melyet az ókori kultúrákban különböző módokon értelmeztek: a skandináv mitológia és a finnugor népek a mitikus lények, istenek tevékenységének eredményeként magyarázták a jelenséget. Más kultúrák, mint például a görögök és a rómaiak természetesen jelenséggé, csillagászati megfigyelések eredményeként értelmezték. Az évezredek során elindult a technikai fejlődés, melynek köszönhetően egyre többet tudtunk meg bolygónkról és a naprendszerünkről. A jelenségnek azonban nem tulajdonítottak túl nagy jelentőséget, egészen a 19. század közepéig. 1838-ban megjelent az első távíró, amely lassan elterjedt a világon. 1852-ben a teljes beépített hossza már körbe érte volna a Földet. 1859 augusztus végén azonban történt valami. Aznap sok helyen figyeltek meg sarki fényeket a bolygónkon: Rómában, Havannában, és Hawaii-on is. A fénykorát élő távíró rendszerben hibák és működési problémák léptek fel, világszerte többen áramütést szenvedtek, és elektromos berendezések gyulladtak ki. Az eseménnyel egyidőben több tudós, köztük Richard Carrington brit csillagász számolt be a Nap korongján megjelenő sötét foltokról. Az emberiség már korábban is tudatában volt a napkitörések lehetséges hatásainak, de a Carrington esemény óta jelentős figyelmet kapott a tudományos közösségekben. Az 1800-as évek végén több tudós, köztük Kristian Birkeland és Carl Størmer kezdték el tanulmányozni az északi fényt, és azok kapcsolatát a Föld mágneses terével. Megfigyelték, hogy a sarki fény megjelenésekor a napkorongon napfoltok láthatók, és ezzel összekapcsolták a napszél és a sarki fény fogalmát. Később a 20. században, az űrverseny beindulásával és a műholdak megjelenésével a tudósok közvetlenül kezdték mérni a napszelet és annak hatásait a bolygónkra. Egyre világosabbá vált, hogy a napszélben található töltött részecskéknek nemcsak a sarki fények kialakulásában van fontos szerepük, hanem a Földünk környezetére és technológiai rendszereinkre, de még a saját szervezeteinkre is hatást gyakorolnak.

Dolgozatomban a napszél kialakulásáról, geomágneses kölcsönhatásáról, és a villamosenergia-rendszerre gyakorolt hatásairól fogok írni.

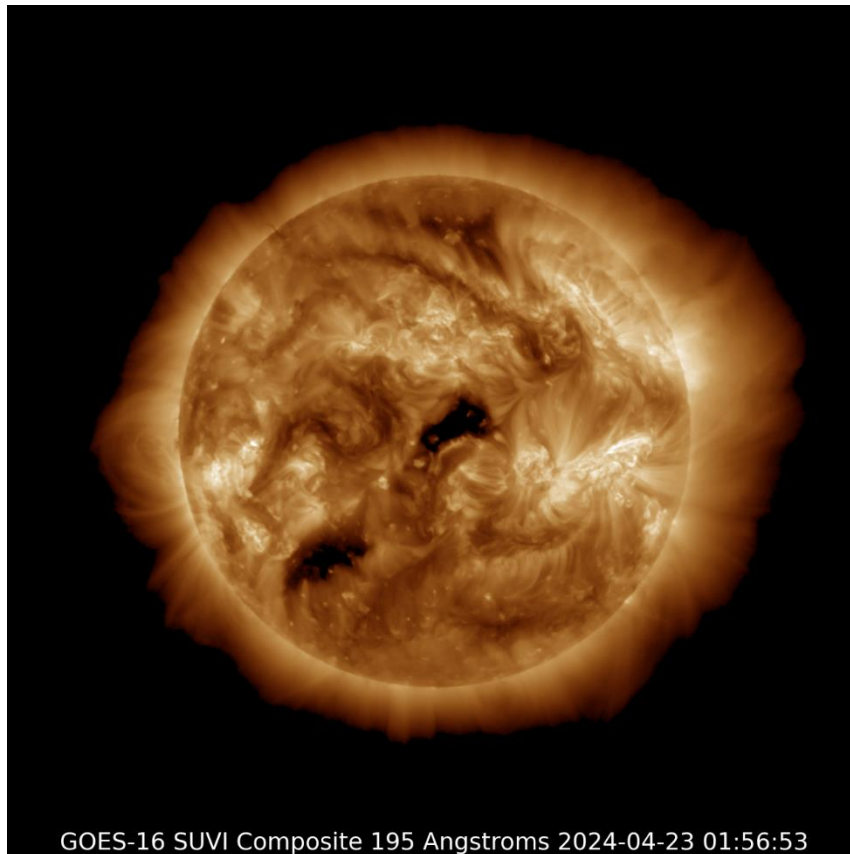
2 A NAP

A Nap a naprendszerünk központi csillaga, mely körül bolygónk is kering. Tömege 333.000-szerese a Föld tömegének, átmérője pedig 1.392.700 km. Hatalmas tömegéből adódóan a gravitációs gyorsulás is óriási, 274m/s^2 . Ez a gravitációs gyorsulás tartja pályán a naprendszer összes objektumát, köztük a Földet is. A Nap az egyetlen olyan égitest a naprendszerben, amely fényt és hőt sugároz, ami egyrészt elengedhetetlen az élet fenntartásához, másrészt az ezáltal kibocsájtott energia meghatározza az égitestek atmoszféráját, időjárását, és egyéb más jelenségeit.

A Nap egy hatalmas, gázból álló gömb, melynek belsejében állandó nukleáris reakciók zajlanak. Szerkezetét tekintve legbelül található a mag, ahol a fúziós reakció történik. Az itt uralkodó gigantikus nyomás és hőmérséklet lehetővé teszi a hidrogénatomok fúzióját, amely héliumot, és rengeteg energiát generál. A hőmérséklet itt elérheti a 15 millió kelvint is. Kifele haladva a sugárzó zónába jutunk, ahol a fúzió által termelt fotonok a magot elhagyni igyekeznek, és közben más atomokba vagy ionokba ütköznek. Az ütközések során irányt változtatnak, így a felszínre jutás átlagos ideje igen hosszú, akár 1 millió évet is elérheti. A nap belsejének legkülsőbb régiója az úgynevezett konvekciós zóna. Itt a hőmérséklet már nem elég nagy a sugárzással való hőátadásra, így ebben a rétegben a hő a forró anyag áramlása révén terjed a napfelszín felé. A Nap felszínét fotoszférának nevezzük. Ez egy párszáz km vastag réteg, ahol a csillag által termelt energia szétszóródik infravörös, látható fény és ultraibolya sugárzás formájában. Ennél kisebb és nagyobb energiájú elektromágneses hullámok is kialakulnak, de csak csekély mértékben. Efölött található a kromoszféra, melynek alsó rétege 4-5ezer kelvin hőmérsékletű, és a Nap esetében vörös színben pompázik. Felfelé haladva a hőmérséklet növekedésnek indul, és a napkoronát elérve 1-2 millió K-t is eléri. A jelenség oka nem tisztázott, és egy aktív kutatási terület mind a mai napig. A napkorona egy rendkívül forró, de nagyon kis sűrűségű réteg. Éles határa nincs, így a naptól többmillió kilométerre is észlelhető. A legkülső térrészt helioszférának nevezzük, itt még a naptevékenység képes hatást gyakorolni a környezetére. Ezen túl már nem Naprendszeréről, hanem csillagközi úrról beszélünk. [1] [2] [3]

Csillagunk működése alapvetően a magjában zajló fúziós reakciókra épül, melyek során hidrogénatomok ütköznek és egyesülnek, hogy héliumot hozzanak létre. A héliumot termelő

fúzióknak két típusa van: az egyik a proton-proton ciklus, a másik pedig a nehezebb elemeket is termelő CNO (szén-nitrogén-oxigén) ciklus. Az előbbi a kisebb tömegű csillagokra, míg az utóbbi a nehezebb csillagokra jellemzők. Mivel a Napunk kis tömegű csillagnak számít, túlnyomórészt proton-proton ciklus működik benne. [3]



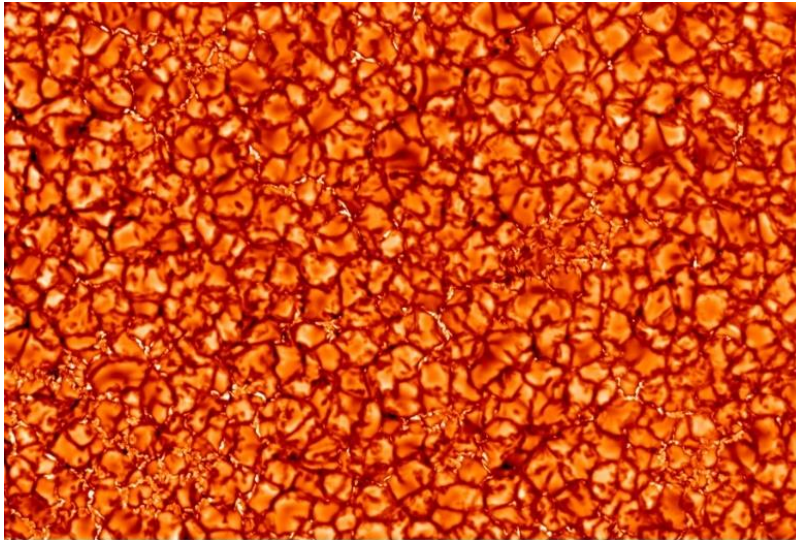
1. ábra: A Nap 195 Angström (19,5 nm) hullámhosszon

A fenti képen látható a Nap 19,5nm-es szűrőn át készített fényképe. A képet a GOES-16 műhold, (Geostationary Operational Environmental Satellite) készítette, mely több különböző hullámhosszon készít a Napról valós időben képsorozatot. Ezen képeket animálva is megtekinthetjük az NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) oldalán. [5]

Az űridőjárást egy amerikai ügynökség, az NOAA követi, és jelzi előre. Az NOAA nem csak űridőjárással, hanem a napi időjárás-előrejelzésektől, a viharjelzésektől és az éghajlat-figyeléstől a halászati gazdálkodásig, nagyon széleskörű tevékenységet folytat. [5]

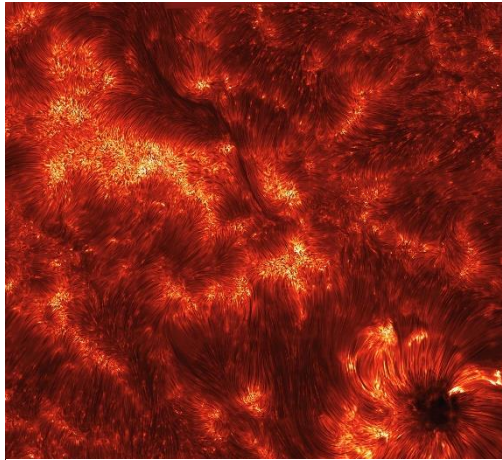
2.1 Naptevékenységek

Naptevékenységeken különféle folyamatokat és jelenségeket értünk, amelyek a Nap körül zajlanak. Ezen jelenségek közül néhány jelentős hatással van a Naprendszerben található égitestekre. A Nap felületén található granulák a fotoszférán megjelenő „csomósodó” mintázatot alkotó területek. Ezeket a körülbelül 1000 kilométer átmérőjű képződményeket a fotoszférában történő feláramlások hozzák létre, melyek a hőt a Nap belső részéről a felszínre hozzák. A felszínen lehűlt anyag visszabukik a mélybe, így egy folyamatosan változó mozgást eredményez a granulák alakjában és mozgásában. [3] [4]



2. ábra: Granulák

A szpikulák olyan szálszerű képződmények, amik a Napfelszínből kiemelkednek a koronába, hőt és anyagot szállítva oda. A szpikulák jelensége összefüggésben van a Nap mágneses tevékenységével. Azt a tartományt, ahol a szpikulák nagy számban jelennek meg, aktív régióknak nevezik, ugyanis a területet intenzív mágneses aktivitás és napkitörések jellemzik. [3] [4]



3. ábra: Szpikulák

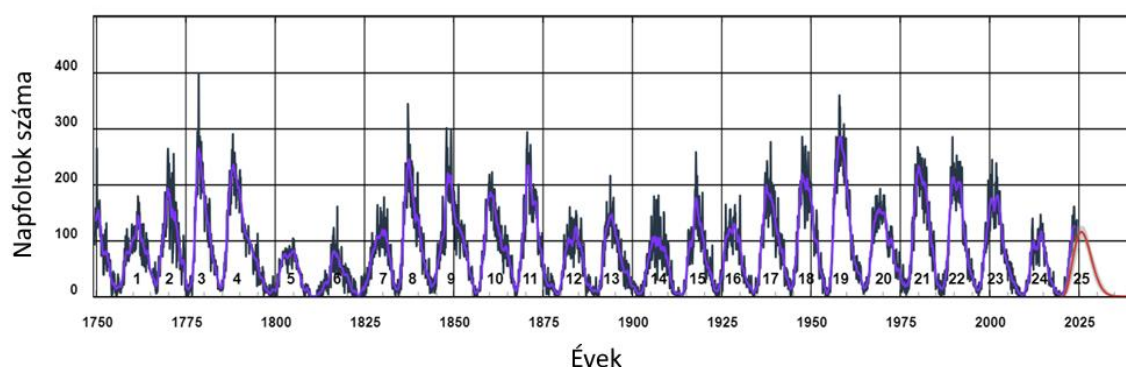
A fotoszféra hidegebb területei a környezetüktől akár 2000 fokkal is hidegebbek lehetnek, ami miatt sötétebbnek látszanak. Ezeket a területeket hívjuk napfoltoknak, melyek átmérője párezer km. A belső sötét részét umbrának hívjuk. Egy napfoltot érdemes különböző hullámhosszú szűrőkön át megfigyelni, ugyanis azok megjelenésében eltérések lehetnek. A napfoltok megjelenésének gyakorisága periodikusan változik. Vannak évek, mikor alig jelennek meg, máskor viszont többszáz is megjelenhet rövid időn belül. [3] [4]



4. ábra: Napfoltok – kép: Komka Péter

Két napfoltminimum vagy két napfoltmaximum között körülbelül 11 év telik el, így kijelenthető, hogy egy napfoltciklus 11 évig tart. Napfoltok csoportosan is megjelenhetnek a Nap felszínén, tipikusan az aktív régiókban. A napfoltok körül gyakran megjelennek fáklyamezők is,

melyek a fotoszféra és a kromoszféra fényes jelenségei, és a napfoltoktól eltérően ezek a területek melegebbek a környezetüknél. Jellegzetes alakjukat a mágneses térnek köszönhetik. Az aktív régiókban robbanásszerű anyagkitörések, úgynevezett flerek pattanhatnak ki. A napfoltciklus maximumán akár tíznél is több ilyen heves kilövellés történhet naponta. A kilövellő plazma hőmérséklete a többmillió kelvint is elérheti, mely a csillagot elhagyva halad tovább az űrben. A napkorona hatalmas hőmérséklete elegendő energiát biztosít a napkorona anyagának, hogy szabaduljon a gravitációs vonzástól. Az így kialakuló folyamatos, lassan változó részecskeáramlás a napszél, ami több ezer km/s sebességgel hagyja el a napot, és attól távolodva folyamatosan lassul. Ha nagyméretű részecskekidobódás történik, azt koronakitörésnek, angolul CME-nek (Coronal Mass Ejection) nevezzük. Másodpercenként kb. 3millió tonnával csökken a Nap tömege a folyamatos anyagkiáramlás miatt. [3] [4]

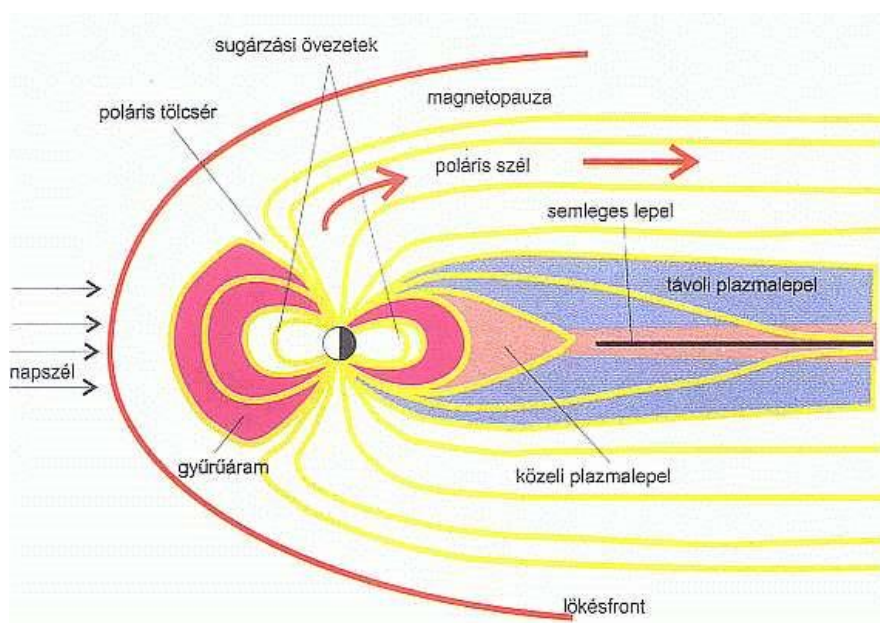


5. ábra: Naptevékenység ciklusai

Az 5. ábrán az NOAA által feljegyzett napciklusok láthatók. 1750-től kezdve minden ilyen ciklust beszámoltak, így ma, 2024-ben a 25. napciklusban járunk. A ciklus maximumára jellemző, hogy a sok napfolt mellett egyéb más jelenségek is - például flerek - jelennek meg. A 25. napciklus végén látható piros görbe egy előrejelzés, amely különböző iparági csoportoknak fontos információt szolgáltat: például az ilyen előrejelzések segítségével megtervezhetjük egy alacsony földköri pályán keringő műholdnak a manőverezését. Egy napfoltmaximum ugyanakkor a műholdat is jobban igénybe veszi, így annak élettartamának megjósolásában is fontos tényező. Mindemellett az előrejelzéssel különféle űridőjárási események gyakoriságát is meghatározhatjuk, legyen szó rádiózavarokról, geomágneses viharokról vagy sugárzásos viharokról. [4] [5]

2.2 Magnetoszféra

A Föld magnetoszférája egy olyan réteg a Föld körül, melyet a Föld mágneses mezeje hoz létre, és ez nyújt védelmet a Naptól (és a Naprendszerből) érkező sugárzások ellen. A mágneses mező a Föld belsejéből ered, ahol a folyékony mag Coriolis-erő miatti áramlása létrehozza azt. A magnetoszféra alakja nem szimmetrikus: a napsütötte oldala nyomott, míg a másik oldal hosszan elnyújtott alakú. A Föld mágneses terének azon része, amely a napszéllel találkozik, magnetopauzának hívják. Ez az a terület, ahol a napszél nyomása megegyezik a bolygó mágneses mezejének ellentartó erejével. Alakja folyamatosan változik a Napszél erősségének függvényében.



6. ábra: Magnetoszféra - kép: Horváth Miklós

Habár mágneses mezőnk eltéríti a részecskéket, ezáltal védelmet nyújt a napszél ellen, közel sem mondhatjuk tökéletes pajzsak. A bejutott töltött részecskéket a mágneses tér befogja, és a 6. ábrán látható sugárzási övek jönnek létre. Ezeket a sugárzási övezeteket az első amerikai műhold, az Explorer-1 mérései alapján James Alfred van Allen fedezte fel, 1958-ban. Két részre bontható. A belső töltött protonokat tartalmaz, és a külső pedig töltött elektronokat. A Van Allen-övezetkből a töltött részecskék képesek behatolni az alsóbb rétegekbe, ahol a légkör atomjaival ütközve gerjesztik azt. Ez fénykibocsátással jár, ez okozza a sarki fényt. A gyorsuló

részecskék a sarki pólusokat az erővonalak mentén elhagyják, ez alakítja a poláris szelet. Az erővonalak itt távolabb záródnak, melyek kialakítják a képen látható plazmafelhőket. Ezeknek a felhőknek a viselkedése egy nagyon bonyolult folyamat, mely az űridőjárást befolyásolja, és a mai napig aktív kutatási terület. [6]

2.3 Naptevékenységek földi hatásai

A naptevékenység által okozott jelenségek közül a koronakidobódásoknak és a flerek-nek vannak földi hatásai. Ezek a hatások a jelenség bekövetkezése után változó idővel érik el a Földet. Egy fler által kibocsátott elektromágneses sugárzás fénysebességgel halad, és szinte észlelés után azonnal hatást fejt ki bolygónkra. A nagy energiájú részecskék sokezer km/s sebességgel haladnak, így azok később, pár órán belül érnék el minket. A koronakidobódások által generált napszél lassabb részecskeáramlások formájában közelít a Földhöz, ezek napokig is eltartanak, míg ideérnek. Ezen részecskék okozzák a geomágneses viharokat, így azok a Nap folyamatos megfigyelésével bizonyos mértékig előre jelezhetők. [7]

A naptevékenység elérve a Földet számos hatást gyakorol arra, melynek következtében sokféle jelenséget tapasztalhatunk a környezetünkben.

2.3.1 Sarki Fény

Egy sokak által ismert, népszerű és látványos természeti jelenség. Az északi fényt (Aurora borealis) az északi sarkkör környékén, a déli fényt (Aurora australis) a déli sarkkör környékén figyelhetjük meg. A Napból érkező részecskéket a Föld mágneses mezeje eltéríti, így a bolygónk nagy részén láthatatlan. Az északi és a déli pólusnál azonban a mágneses erővonalak közel kerülnek a Föld légköréhez, így a napközeli részecskék kölcsönhatásba lépnek a légkörünket alkotó gázokkal. A kölcsönhatás energiát bocsájt ki, ennek köszönhetően a légkör különböző rétegeiben különféle színekben pompázó fényáradathoz vezet. A fényt általában zöldes vagy vöröses árnyalatban lehet megfigyelni, de néha más színek is előfordulhatnak, mint például a kék vagy a lila. [7] [8]



7. ábra: Sarki fény

Erős napviharok esetén a sarkköröktől távolabb is megfigyelhető. A fenti képet én fényképeztem 2024. május 10-én, ekkor ugyanis egy G5 erősségű geomágneses vihar alakult ki a Földön, és ennek következtében Magyarországról is látni lehetett az északi fényt.

2.3.2 Hatások skálázása

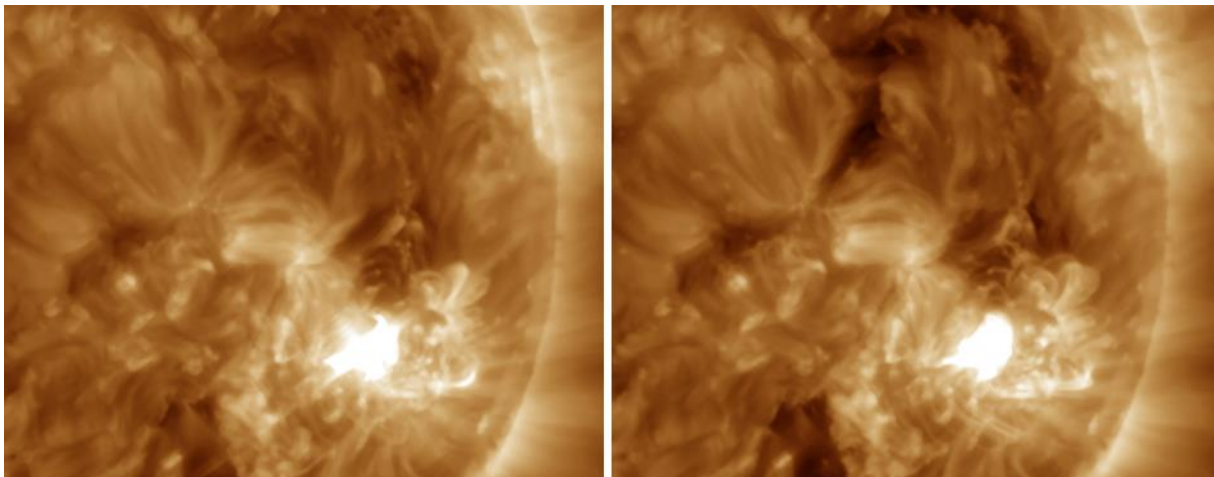
Az NOAA több skálázást is használ az űrbeli jelenségek mérésére: a geomágneses viharokat G1-G5-ig, a sugárzási viharokat S1-S5-ig, illetve a rádiózavarokat R1-R5-ig skálázza be.

A geomágneses viharok esetén a mérőszám a Kp index, mely az északi és déli pólusok közti mágneses aktivitást mutatja meg. A Kp indexet a világ különböző pontjain elhelyezkedő mérőállomásokon mérik, és számítják ki. Ez a mértékrendszer egy 0-9 skálán mozog, ahol a magasabb értékek erősebb geomágneses aktivitást jelentenek. Kp 5-től beszélünk G1 erősségű geomágneses viharról, Kp6 (G2), Kp7(G3), Kp8-9(G4). A G5 erősségű viharokat Kp9o-nak nevezik, ez a Kp index legmagasabb pontja. Ez akkor következik be, amikor a geomágneses aktivitás egy olyan szintet ér el, melyet már nem lehet skálázni. [5]

A sugárzási viharokat a 10MeV-nál nagyobb részecskék fluxusából határozzák meg. Minden egyes lépés az S-skálán tízszeres részecskefluxus növekedést jelent.

Az R-skála a „Radio Blackouts” vagyis rádiózavarok mérésére szolgál. Olyan elektromágneses sugárzások okozzák, mint a röntgen vagy az extrém-ultraibolya. Mivel fénysebességgel haladnak, a sugárzást kibocsájtó fler észlelése után azonnal kifejti hatását. Az elektromágneses sugárzásokat 0,1-0,8nm közti hullámhossztartományban mérik, és itt is osztályozzák. Az osztályozás az „A” típusú flerekkel kezdődik, melyeknek 10nW/m^2 az energiája a megadott hullámhosszon. Ezt követi a „B” típusú fler a 100nW/m^2 ionizáló energiával, utána a „C” osztály $1\mu\text{W/m}^2$ -rel, majd az „M” osztály $10\mu\text{W/m}^2$, végül pedig az „X” osztály $100\mu\text{W/m}^2$ -rel. Ezen osztályokat tovább bonthatjuk azzal, hogy egy számot írunk mögéjük, az alapérték szorzójaként. X osztálynál nincs nagyobb osztály, így ezeknél akár X20 (0.002W/m^2), vagy annál is nagyobb számokat írhatunk a flerek intenzitásának meghatározására. Az R1-es rádiózavar az M1 osztályú flerekből származhat, az R2 pedig az M5-ből. Az R3-hoz az X1, az R4-hez az X10 és az R5-höz az X20-nál nagyobb méretű napkitörések tartoznak. [9]

A 8. ábra bal oldalán egy fler látható, abban a pillanatban, hogy éppen kialakul, majd a jobb oldali képen egy fél órával későbbi állapot:



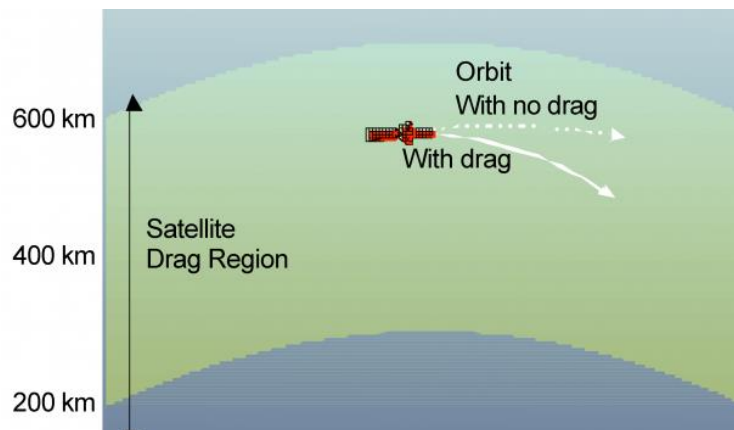
8. ábra: fler – kép: NOAA

A hatalmas mennyiségű sugárzás, ami elhagyja a Napot, lehűti a környező területet. A kitörés után látható, hogy a környező terület sötétebb, mint előtte.

2.3.3 Klíma és időjárás

Minden időjárási jelenség – legyen szó szélről, csapadékról vagy hőmérsékletről – a Nap által kibocsátott, különböző hullámhosszúságú elektromágneses sugárzásoknak köszönhető. Az összes hullámhosszon mért együttes besugárzás a naptevékenység maximumán kb. 1362 Watt/m^2 . Infravörös tartományban melegíti a felszínt és a levegőt, elősegíti a víz párolgását, felhőképződést és légmozgásokat indít el. A hőmérsékletkülönbségek csapadékképződést, viharokat alakítanak ki, tengeri áramlásokat okoznak. A látható fény világosságot ad a napsütötte órákban, lehetővé teszi a fotoszintézist, amely során a növények párasítanak, árnyékot adnak, oxigént termelnek és befolyásolják a helyi klímát. A napsugárzás UV tartománya ózonréteget hoz létre a sztratoszférában, ezzel védve a Földet az életre káros sugárzásoktól. Kimutatható, hogy a Nap aktív korszakában a Föld átlaghőmérséklete $0.1\text{-}0.2$ fokkal melegebb. [10]

2.3.4 Műholdhúzás



9. ábra: Műholdhúzás – kép: NOAA

A műholdhúzás egy természetes jelenség az alacsony földköri pályán keringő műholdak számára. Ez lényegében egy fékezőerő, ami a légellenállásból adódik. Szakszerű tervezéssel egy egyenletes fékezést ki lehet kompenzálni, azonban a napszél által bejutott töltött részecskék a termoszférában nagyobb sűrűségű levegőt szállítanak a keringő műholdakhoz, melyeket az lelassít és letérít a pályáról. Naptevékenység maximumakor 2-3 hetente manőverezni kell a műholdakat pályájuk fenntartásához. [11] [12]

2.3.5 Kommunikáció (rádiózavarok)

A naptevékenység változó mértékben képes zavarni a földi kommunikációt. A nagyfrekvenciás rádióadások (1-30 MHz) szórési irányát tudja befolyásolni, ezzel zavarva, vagy teljesen lehetetlenné téve a földi vételt. Főként a flerek képesek olyan röntgen sugárzást kibocsájtani, melyek ionizálják a légkört az ionoszférában. Az ionoszféra megváltozott szerkezetének köszönhetően bizonyos frekvenciákat képes visszaverni, míg másokat elnyelni, így a modulált jelso-rozatokat könnyedén tönkre teheti. Ezen típusú jelenségek a Föld napsütötte területein figyel-hetők meg, legerősebben a déli órákban, mikor a Nap a legnagyobb szögben süt. A napszéllel érkező protonok a magnetoszféra által a Földet megkerülve kölcsönhatásba léphetnek a sarkok-hoz közel levő ionoszférával, és hasonlóan a röntgen- sugárzáshoz ionizálják azt. Ez általában ott zavarhatja a kommunikációt, ahol nem süt a nap, tehát az éjjeli órákban.

A rádiózavaráson kívül ez a jelenség befolyásolja a GPS és a műholdkommunikációt is, így azok működésében pontatlanságok léphetnek fel. [14]

2.3.6 Élettani hatások

Kutatási eredmények híján nem jelenthetjük ki azt, hogy nincsenek számottevő élettani hatásai a napkitöréseknek. Megfigyelések azt mutatják, hogy az erős mágneses terek hatással vannak az egyes kóros mentális állapotban levő betegekre, de madarak esetén is ismert, hogy tájékozódásra használják. A geomágneses viharok a Föld felszínén átlagembereknél tüneteket nem okozhatnak, azonban egyesek képesek megérezni fejfájás, migrén formájában, esetleg feszültek, dekoncentráltak lehetnek.

Az űrhajósok, valamint a magasan közlekedő repülőgépek utasai kiszolgáltatottabbak az űrből érkező sugárzásokra, mint akik a felszínen vannak. Főleg az S3 vagy magasabb szintű sugárzási viharok felett sugárveszélynek vannak kitéve, így ilyenkor csak megfelelő körültekintéssel szabad űrsétát, vagy hasonló tevékenységeket végezni. [13]

2.3.7 Villamos energiahálózatok

Az 1800-as évek egyik nagy felfedezése Michael Faradayhez kapcsolódik, aki megállapította, hogy az időben változó mágneses tér képes feszültséget indukálni egy vezető anyagon

keresztül. Ez a felismerés az alapja a transzformátoroknak és a generátoroknak, melyek mára széleskörben elterjedtek a világban. Az első elektromos árammal működő rendszerek tervezői még nem ismerték fel, hogy a telegráfrendszerüket ez a természetesen létrejött mágneses fluxus teljesen áthatja, ami, ha időben változik, feszültség indukálódik a rendszerben. A létesítés után döbbsentek rá, hogy időnként feszültség indukál a rendszerben, ami akadályozza a kommunikációt, tűzkárt, vagy áramütést okoz. Ilyen volt az 1859-es Carrington-esemény is. A később megjelent koaxiális kábelek képesek voltak a jelenség csökkentésére, de megszüntetésére nem. A villamosenergia-rendszerek megjelenésével egy újabb nagyterjedésű hálózat alakult ki. [7]

A geomágneses viharok veszélye abban rejlik, hogy a villamosvezetékben nagyon lassan változó áramot indít meg. Ennek a frekvenciája 1 Hz alatt van, periódusideje 10 másodperctől akár napokig is tarthat, tehát mondhatni egy egyenáramú komponenst visz a hálózatba. Az egyenáram erőssége heves geomágneses viharok esetén elérheti akár a 100 ampert is. Ez az egyenáram az átviteli transzformátoroknak a vasmagját telítésbe hozza, melynek hatására a tekercsekben folyó áram drasztikusan megnő. Az emiatt kialakuló hőmérsékletnövekedés a transzformátor túlmelegedéséhez vezethet. A telítődés egy másik hatása, hogy a hálózati feszültség elveszti a szinuszos jelalakját, ami miatt az állomáson, vagy a hálózat más részein található védelmi berendezések működésbe léphetnek akkor is, amikor nem kellene. Ha ezek a védelmi készülékek hirtelen nagy fogyasztókat választanak le a hálózatról, az feszültségstabilitási problémákat okozhat. További problémát jelent, hogy telítődés során a vasmag nem képes tovább mágnesesődni, így a tekercsek hatalmas induktív fogyasztóként fognak működni. Ha egy rendszer a mágneses vihar előtt közel maximális kiterheltségen üzemel, akkor a vihar bekövetkeztekor a rendszer túlterhelt állapotba fog kerülni. A jelenséget 1940-ben jegyezték fel először, és azóta több esemény is kapcsolódik hozzá: áramszüneteket, feszültségstabilitási problémákat, és átviteli hálózaton transzformátor meghibásodásokat okozott a világ számos pontján. [7] [15] [16]

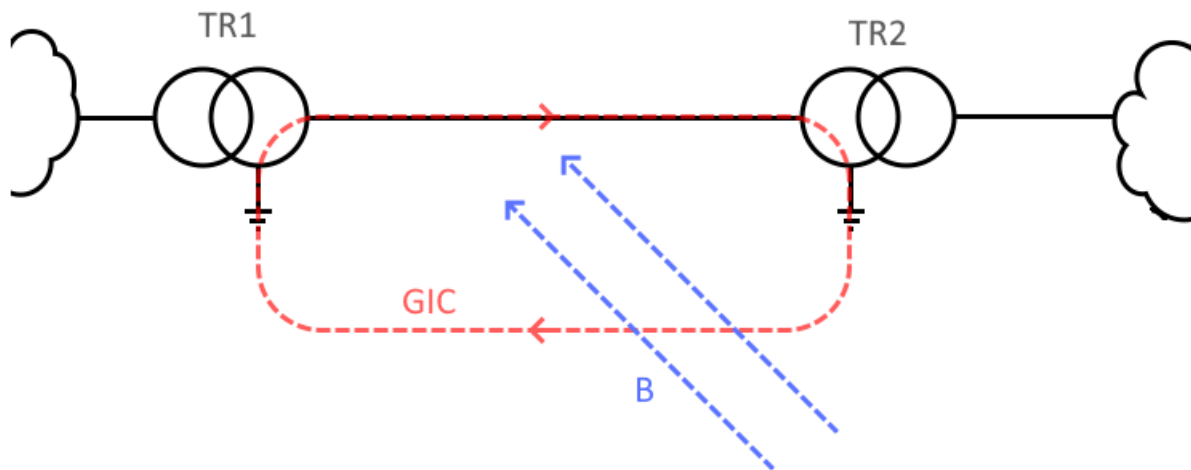
Egy jövőben bekövetkező igen erős geomágneses vihar képes lehet bolygósínten kiütni az egész villamosenergia-rendszert, melyet hónapok vagy évek alatt tudnánk csak helyreállítani. Egy ilyen esemény a mai technológiai függésünk miatt beláthatatlan következményekkel járna, ezért nagyon fontos az űridőjárás folyamatos nyomon követése, hogy időben reagálni tudjunk az esetleges viharokra.

3 A GEOMÁGNESES ZAVAROK MÖGÖTTI FIZIKA LEÍRÁSA

Az időben változó mágneses mezők és áramrendszerek nemcsak a mesterséges környezetben vannak jelen, hanem a természetben is: a Föld belsejében, a légkörben és a felső légrétegben (lásd. magnetoszféra). Példaként felhozható az iránytű, melynek hegyére mindig hatással van a Föld mágneses tere. Ez a bonyolult rendszer állandóan jelen van és folyamatosan változik a Föld forgása, a Hold gravitációs vonzása, és a Napból érkező részecskék, valamint sugárzások hatására. A geomágneses zavarok vagy GMD-k (geomagnetic disturbances) alatt a Föld felszínén mérhető mágneses mező (B-mező) változását értjük, amelyet a magnetoszféra és az ionoszféra közötti hatások hoznak létre. A felszín alatt indukálódó elektromos mező (E-mező) kapcsolatban áll a B-mező időbeli változásának sebességével, valamint a föld vezetőképességével. A heves geomágneses zavarok minden esetben a naptevékenységekből származnak, mely két fő módon jön létre: az egyik, amikor a plazma eléri a Földet, az összepréseli a Föld magnetopauzáját, ami a mágneses tér torzulása révén hozza létre az elektromos mezőt. Az így létrejött geomágneses vihar közel egyszerre jelentkezik a Föld minden pontján. A másik mechanizmus, mikor a plazma a Föld mágneses erővonalait követi, ezáltal ionoszférikus áramokat indukál a Föld felett. Ezek az áramok az ionizált légköri gázok plazmájában terjednek, körülbelül 90-150 km-es magasságban az északi és a déli sark közelében. Az egyenlítő környékén is megfigyelhető ez a jelenség, ez az EEJ (equatorial electrojet), melynek intenzitását befolyásolják az időjárási körülmények, és a napszak is (nappal általában erősebb). Vannak más kialakulási folyamatai is a GMD-nek, ilyen például a Van Allen övezetektől bejutó, elektromosan töltött részecskék hatása is. [7] [17]

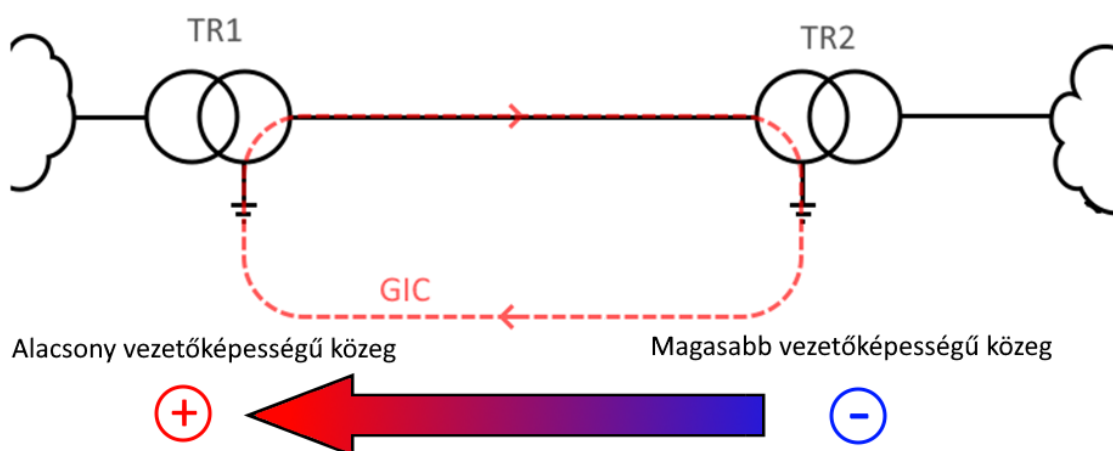
A B-mező változása, valamint az indukált E-mező hatására a hosszú vezető anyagokban, például az infokommunikációs, vagy villamosenergia átviteli hálózatokban, csővezetékekben, hosszú, egybefüggő kerítésekben, sínekben, elektromos áram jön létre. Ezt az áramot hívjuk geomágneses indukált áramnak, vagy GIC-nek (geomagnetically induced current). [7]

3.1 A GIC kialakulása



10. ábra: A GIC

A távvezetékeket átható mágneses tér kétféle módon hozhat létre áramot: közvetlen indukció révén, valamint a felszínen létrehozott E-mező által kialakult potenciálkülönbségek által. Az első verziót a 10. ábra mutatja. Itt az történik, hogy a vezető teljes hossza, és a föld közé kifesztített síkkal merőlegesen futó mágneses erővonalak változása feszültséget indukál a vezetőkben. A fent említett electrojetek, valamint a mágneses tér torzulása is előidézheti. Ezen jelenség leírása hasonlít az induktív távolbhatás leírásához, amikor egy hosszú áramjárta vezető képes a hozzá közel levő, vagy vele párhuzamosan futó vezető tárgyakba feszültséget indukálni. [7] [17] [23]



11. ábra: GIC kialakulása

A másik módja a GIC kialakulásának a Földben kialakuló potenciálkülönbségek hatása, melynek során az electrojetek pulzáló mágneses tere a Földkéreg egy jól vezető részében (nedves talaj, vagy sós tengervíz) erős áramokat indukál, amely szétszórni igyekszik a talajban. Az így létrejött potenciálkülönbség a vezető két távoli pontja között hoz létre feszültséget, mely megindítja az áramot. A folyamatot a 11. ábra mutatja. [7] [17] [23]

Mivel a mágneses tér fluktuációja lassú, így az általa indukált áram frekvenciája is kicsi lesz. Az így kialakult áram periódusideje lehet 2 másodperc, de akár több nap – sőt, magát a geomágneses vihar hosszát is meghaladhatja. Ez a lassan változó áram DC komponensként jelenik meg a hálózaton, és ez fog nekünk problémákat okozni. Fontos azonban kiemelni, hogy csak közelítőleg tekinthetjük egyenáramúnak, ugyanis nagyon lassan, de változik. [7]

Villamos hálózat esetén a folyamatról elmondható, hogy az indukált áram minden esetben földelési pontokon jut a rendszerbe. Ez adódhat például két transzformátor földeléséből, mely a fenti ábrákon is látható. Meg tudunk különböztetni rövid és hosszú idejű zavarokat a rendszerben. Az intenzív 100 A-t is meghaladó GIC-k általában rövid ideig, 15-60 másodpercig tartanak, melyek túlterhelést, mérőváltók zavarát, és a megszakítók téves kioldását okoznak. Ide tartozik az 1989-ben történt Hydro-Québec eset, mikor a rendszerben indukált geomágneses áram hatására a rendszer teljesen leállt. Mivel a hálózat nem volt teljesen kiterhelve, súlyos túlterhelésből csak csekély kár származott. Az egy percnél hosszabb zavarok általában 50 A

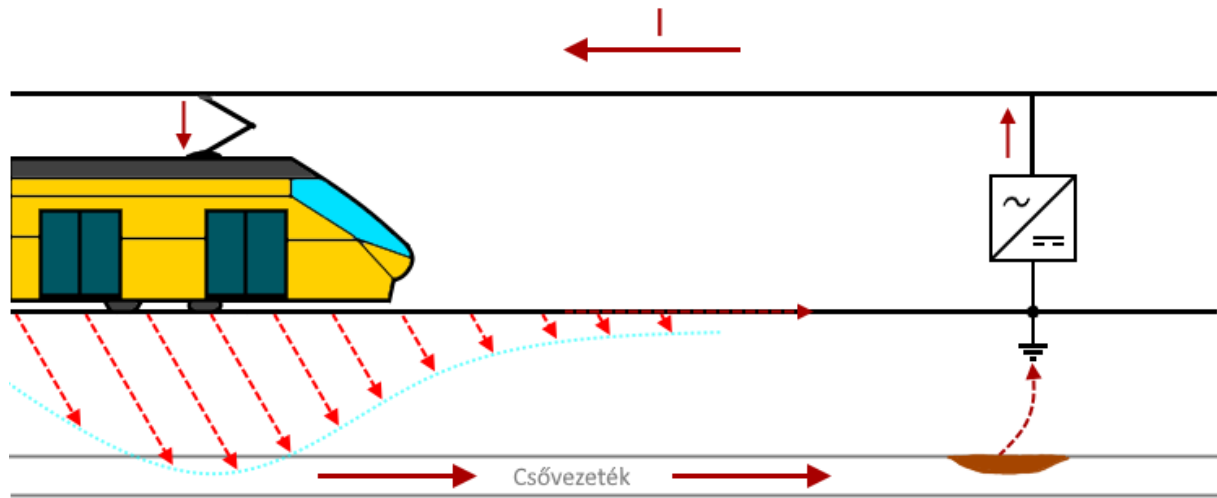
nagyságrendűek, és egy órán át is tarthatnak. Ezek ugyan nem okoznak téves működést a hálózati védelmekben, viszont hosszú ideig tartanak, és ez túlhevíti a transzformátorokat. Ugyancsak az 1989-es esethez kapcsolódik a Salemben található atomerőmű egyik transzformátorának a túlhevülése. Az oldott gázok elemzése (DGA) kimutatta, hogy a transzformátorban szerves gázok képződtek a hő hatására. A transzformátort később cserélni kellett. Hosszú ideig tartó zavaroknál a GIC nagysága 40 ampernél alacsonyabb, viszont órákig, sőt több napig is tarthat. Ebben az esetben a transzformátorban a szigetelőanyag (olaj, papír) lassú romlása következik be, melynek hatására a transzformátor hónapokkal később meghibásodhat. [7] [16] [17] [23]

3.2 Más DC-komponens források

DC komponensek nemcsak a geomágneses vihar okozta zavaroktól alakulhatnak ki, hanem számos más forrásból is bekerülnek a hálózatba, melyeket fontos figyelembe venni. Az egyenáramú komponens lehet pulzáló, vagy oszcilláló. A pulzáló egyenáramú komponensről akkor beszélünk, amikor annak polaritása időben nem változik. Egyenáramú vasúti járművek, aktív korrózióvédelem, vagy a HVDC energiatovábbítás miatt kerülnek a hálózatba. Oszcilláció akkor történik, mikor az egyenáramú komponens iránya is megváltozik, a frekvenciája viszont olyan lassú, hogy egyenáramként értelmezhető. Ide tartoznak az úgynevezett inter-area oszcillációk és a geomágneses indukált áramok (GIC) is. Az alábbiakban egy kicsit részletesebb betekintés látható ezekről a jelenségekről. [7]

3.2.1 Egyenáramú vasúti járművek

Városi környezetben, ahol a közlekedési járműveknek sokszor kell elindulniuk és megállniuk, könnyűnek, kompaktnak kell lenniük, ott az egyenáramú vasúti vontatás egy előnyös megoldást jelent. A DC motorok egyszerű motorvezérlést tesznek lehetővé, ezért alkalmasak a gyors indulásra és a rendkívül pontos megállásra. Ezen kívül lehetővé teszik a regeneratív fékezést is, hogy fékezéskor az energiát tápláljanak vissza a hálózatba. Általában ilyen DC vontatást használnak a városi tömegközlekedésben használt villamosok, metrók, illetve a HÉV-ek. Ezen járművek többnyire 600-1000V közötti feszültség szintet használnak, de több európai országban – mint például Olaszország, Spanyolország, Lengyelország – a 3 kV-os villamos vontatás a standard. [18]

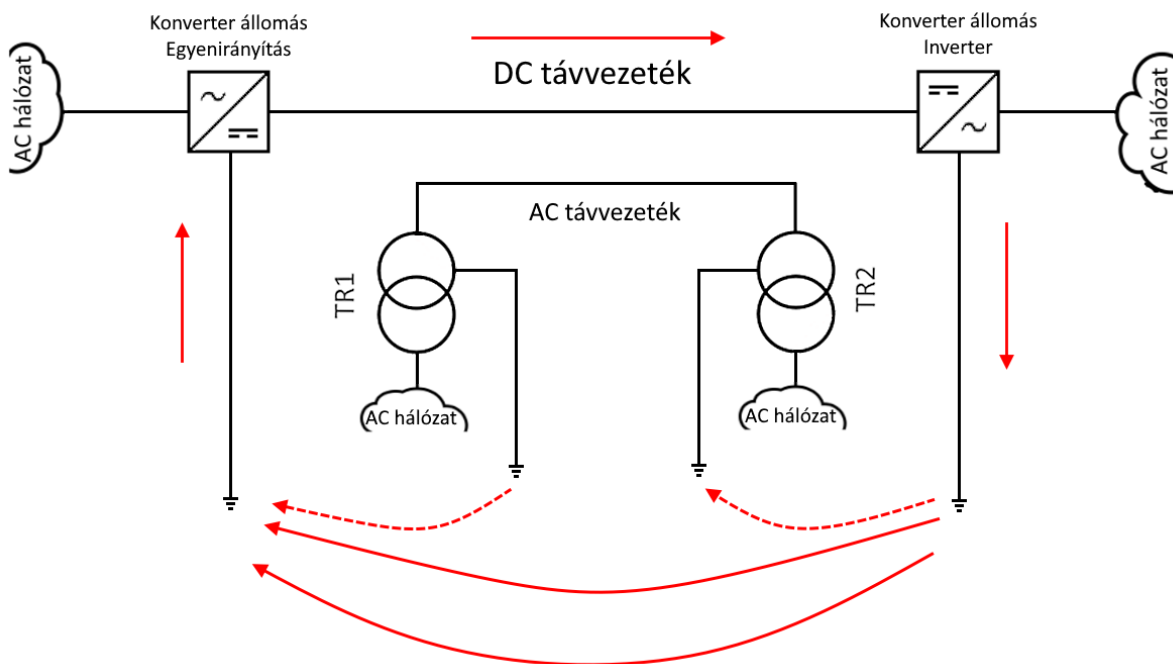


12. ábra: A DC vontatás távolbahatása

Vegyük példának a 12. ábrán látható villamost. A problémát az okozza, hogy ezeket a rendszereket úgy tervezték meg, hogy a sínen folyjon vissza az áram az ellátó állomáshoz. Mivel a sínt szigetelni rendkívül nehéz a talajtól, az esetek nagy részében elkerülhetetlen, hogy földkapcsolat jöjjön létre, ezért az áram egy része a földben fog folyni az ellátó állomás felé. A földben folyó DC áram több problémát is okoz. Ezek közül az egyik, amikor a hurokáram egy beásott csővezetékben, vagy valamilyen hosszú vezető anyagban folyik. Mikor az egyenáram kilép az anyagból, ott galvanizáció lép fel, amely tönkreteszi a csővezeték anyagát. A másik probléma akkor jelentkezik, amikor az áram egy transzformátor csillagponti földelésének közvetlen közelében folyik, és csillagponteltolódást okoz. A DC áram okozta csillagponteltolódás tartós terhelést fog jelenteni a hálózat számára, ezért tervezésnél és létesítésnél ezt figyelembe kell venni, vagy a hurokáram csökkentésével kell minimalizálni a káros hatásokat. [7] [19]

3.2.2 HVDC

Az egyenáramú villamosenergia-rendszerek (HVDC) nagyobb távolságokba gazdaságosabban képesek eljuttatni az elektromos áramot, mint a hagyományos váltakozó áramú rendszerek. Bipoláris HVDC esetén mind a pozitív, mind a negatív pólust távvezetéken, vagy kábelben szállítják, így ez általában nem okoz gondot a környező AC rendszerekben. Olyan HVDC esetében, ahol földelektródákat használnak, a visszatérő áram a földön keresztül folyik a konverterállomások között. Az ilyen egypólusú üzem hátránya, hogy földpotenciál emelkedést okoz, amely a közeli AC rendszerek földelt csillagpontjait zavarhatja.



13. ábra: Monopólusú HVDC rendszer hatása egy AC hálózatra

A 13. ábrán látható, hogy az egypólusú HVDC rendszer egyenáramot juttat a földbe, mivel az áram a konverter földelt csillagpontján keresztül távozik. Ezek az áramok a HVDC rendszer földelt csillagpontjai és a közeli AC hálózat földelt csillagpontjai között folynak, mely csillagponteltolódást hoz létre az érintett transzformátorokban. [7] [20]

3.2.3 Aktív korrózióvédelem

A katódos korrózióvédelem (CP - Cathodic Protection) egy olyan aktív villamos korrózióvédelmi eljárás, amellyel bizonyos fémszerkezeteket pl. földbe fektetett acél csővezetékeket védenek elektrokémiai korrózió ellen. Az eljárás lényege, hogy a védeni kívánt fémfelületet negatív pólusúvá, vagyis katóddá teszik egy külső egyenáramú áramforrás segítségével, ezáltal megakadályozzák az anyag tönkremenetelét. A földbe (vagy vízbe) fektetett fémszerkezetek elektrokémiai korrózióknak vannak kitéve, pont ugyanúgy, mint a 12. ábrán is látható csővezeték esetében: a környezetük elektrolitként viselkedik, emiatt galvanizáció lép fel, és ez anyagvesztéshez vezet. A védelem úgy működik, hogy egyenáramot juttatnak a fémszerkezetbe egy külső áramforrásból. A negatív pólus kerül a fémszerkezetre, a pozitív pólus pedig egy anódmezőhöz csatlakozik, melyet a földbe süllyesztenek. A fémszerkezet így elektrontöbbletet kap, így az nem fog korrodálni. [7] [21]

A földben folyó DC áramsűrűség nagysága tipikusan pár mA/m² és a szükséges feszültség is 1V környékén van. Ebből látható, hogy ennek hatása nagyságrendekkel kisebb, mint a korábban ismertetett DC forrásoknak. [21]

3.2.4 Régiók közti oszcillációk

Egy olyan nagy, összekapcsolt villamosenergia-rendszerben, mint amilyen az európai ENTSO-E hálózata, több erőmű dolgozik együtt, amelyeket szinkron-generátorok hajtanak meg. Ezeknek a generátoroknak azonos frekvenciájú feszültséget kell előállítsanak, hogy szinkronban legyenek a hálózattal. A nagy földrajzi kiterjedés miatt azonban előfordulhat, hogy egyes régiók generátorai között kis frekvenciaeltérés alakul ki. Ennek hatására periodikus teljesítményáramlás jön létre a régiók között, amely idővel kiegyenlítődni próbál. Ez a jelenség az régiók közti oszcilláció, amelynek frekvenciája jellemzően 0,1–0,3 Hz közötti. Ez az alacsony frekvenciájú teljesítményoszcilláció szuperponálódik az 50 Hz-es alapfrekvenciára, így az nem jelenik meg közvetlenül nagyon alacsony frekvenciájú kvázi DC áramként a hálózatban. Azonban bizonyos nemlineáris elemek, mint például transzformátorok vagy mérőváltók, képesek ezt a modulációt demodulálni, és emiatt kis mértékű, látszólagos egyenáramú komponens jelenhet meg bennük. Ez azonban nem valódi GIC hatás vagy DC komponens, és nem tekinthető számottevő hatásnak a transzformátorok szempontjából. [7] [22]

4 A TRANSZFORMÁTOROKRA GYAKOROLT HATÁSOK

Az előző részben megismertük, hogy a geomágneses indukált áramok olyan DC-hez hasonló „kvázi” egyenáramok, melyek egy geomágneses zavar közben alakulnak ki. A transzformátorok földelt csillagpontjain keresztül ez az áram bejut a transzformátor belsejébe, onnan az alálomási kapcsolókészülékekre, majd a távvezetésekre. A GIC-n kívül számos más forrásból is kerülnek egyenáramok a rendszerbe, azonban ezek jóval kisebb mennyiségben.

4.1 A vasmag telítése

A transzformátor működése során a primer tekercs feszültsége mágneses fluxust hoz létre a vasmagban, amely aztán a szekunder oldalon feszültséget indukál. A fluxus és a tekercsre jutó feszültség kapcsolatát a Faraday-féle indukciótörvény írja le, amely szerint a feszültség a fluxus idő szerinti deriváltjával arányos:

$$U = - \frac{d\Phi}{dt}$$

ahol:

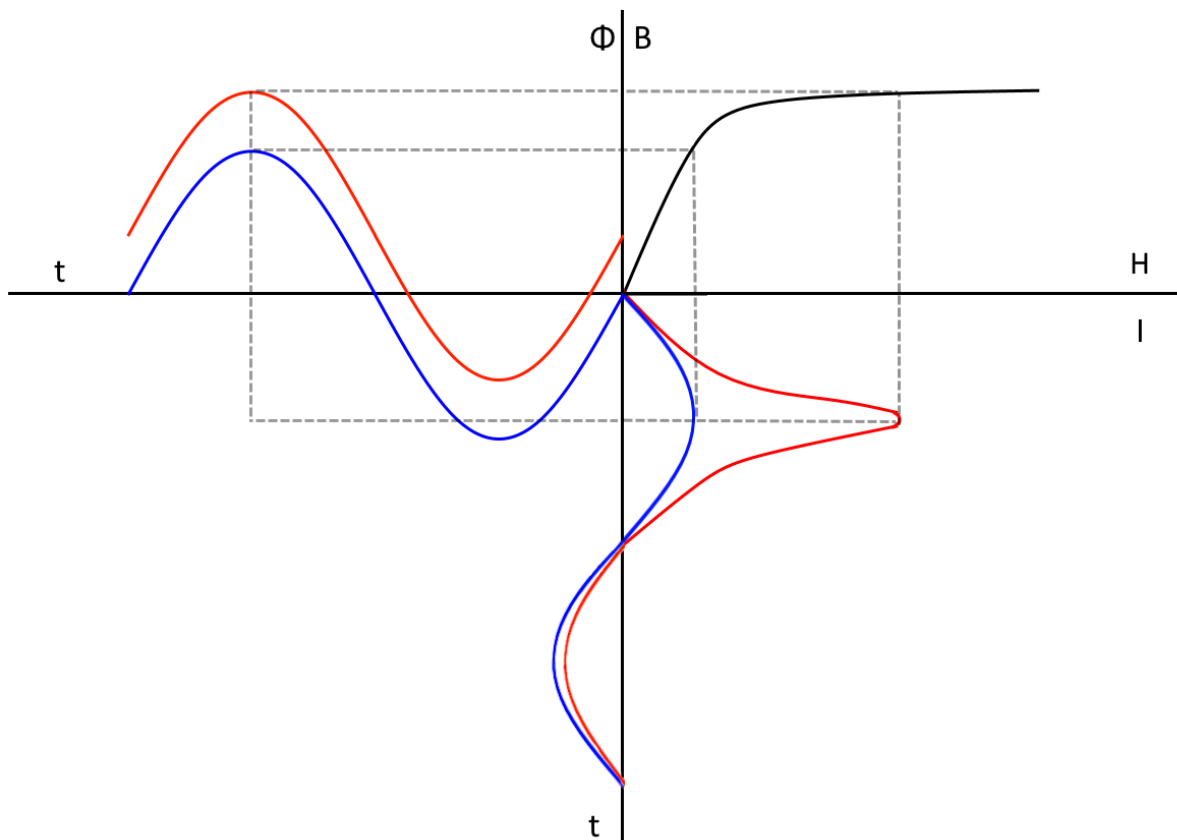
- Φ a fluxus,
- U a feszültség,
- t az idő.

Fejezzük ki ebből a fluxust:

$$\Phi(t) = - \int U(t)dt + C$$

Látható, hogy a fluxus nagysága függ a feszültség integráljától. Ez azt jelenti, hogy a feszültség (transzformátor esetében a menetfeszültség) növekedésével, vagy a frekvencia csökkenésével, a fluxus növekszik. [24] [25]

A 14. ábra egy vasmag telítődése során kialakuló fluxus és áramviszonyokat mutatja be. normál és telített állapotban. A bal felső kvadránsban az időfüggő mágneses mennyiségek (fluxus vagy fluxussűrűség) láthatók, ahol a vízszintes tengely az időt jelöli, míg a függőleges tengely a mágneses fluxust vagy a fluxussűrűséget ábrázolja. A jobb felső kvadránsban a mágnesezési görbe, vagyis a vasmag B-H karakterisztikája látható, ahol a vízszintes tengely a mágneses térerősséget, míg a függőleges tengely a fluxussűrűséget mutatja. Az alsó kvadráns az áram időbeli változását ábrázolja, ahol a függőleges tengely ismét az idő a vízszintes tengely pedig a gerjesztőáram nagyságát mutatja.



14. ábra: Egy vasmag telítése

A kék színnel jelölt esetben a szinuszos névleges feszültség szinuszos névleges fluxust hoz létre. Ebben az üzemállapotban a transzformátor vasmagja közel lineáris módon működik, a mágneses fluxus a mágnesezési görbének azon szakaszán mozog, ahol a kapcsolat a gerjesztő

áram és a fluxussűrűség között még közel arányos. Ez annak köszönhető, hogy a vas kristályszerkezetében az alapesetben rendezetlen mágneses domainek a külső mágneses tér hatására orientálódnak. Ennek eredményeként a gerjesztőáram szinuszos időbeli változást követ. [24] [25]

A piros színnel jelölt esetben a váltakozó fluxusra egy egyenáramú gerjesztés által létrehozott fluxus összetevő szuperponálódik, így a fluxus eltolódik a telítési zóna felé. Amikor a fluxussűrűség eléri vagy meghaladja a mágnesezési görbe könyökpontját, akkor a vasmag telítődéséről beszélünk. Ezen a ponton a domainek többsége már teljesen orientált, így a vasmag nem képes több mágneses fluxust vezetni. A többletfluxus kilép a vasmagból, és a mágneses kör részben a levegőben záródik. Ebben az állapotban a transzformátor közel légmagos tekercsként viselkedik, ami növekedést eredményez a gerjesztőáramban, és torzulást okoz az áramgörbében.

A telítési pontot elsősorban a vasmag anyaga határozza meg, de kismértékben a megmunkálási eljárás, a lemezek hengerlési iránya és a vasmag geometria is befolyásolhatja. A teljesítménytranszformátorokban használt szilíciumacél esetén ez a pont körülbelül 2-2,2 T között helyezkedik el. Egy tekercs egységnyi hosszúsága mentén létrehozott gerjesztést a következő összefüggéssel számoljuk ki:

$$H = \frac{N * I}{l}$$

ahol:

- H: mágneses térerősség,
- l: a mágneses kör hossza,
- N: menetszám,
- I: áramerősség.

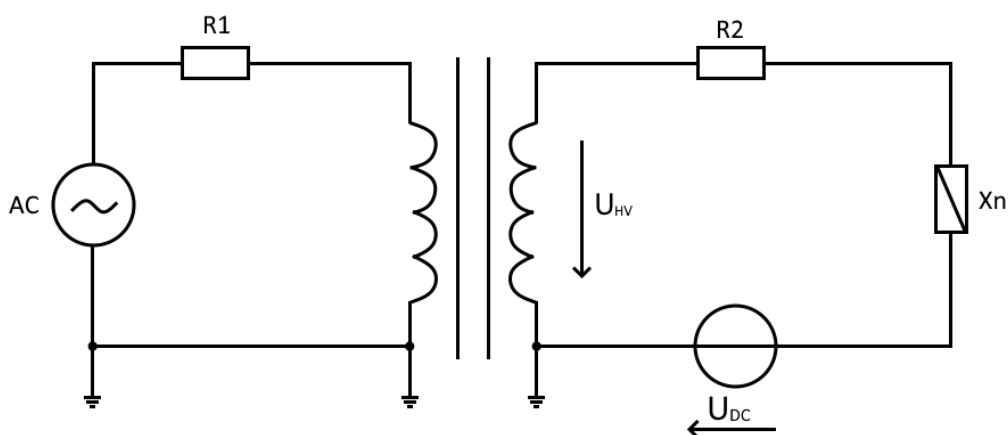
Egy transzformátor esetén a menetszám és a mágneses kör hossza adott, így a fluxussűrűség növekedésével csak az áramerősség képes nőni. Mivel a nagyfeszültségű oldalnak magasabb menetszáma van, ezért ezen az oldalon a telítés már kis DC áram hatására is bekövetkezhet. [24]

4.2 A GIC jellemzőinek számítása

A geomágneses indukált áram energiarendszerre gyakorolt hatásának számítása egy rendkívül bonyolult feladat, melyre nem igazán létezik pontos számítás. Későbbiekben láthatjuk majd, hogy a rendszer annyira sokrétű, hogy csak bonyolult áramköri és mágneses modellezés segítségével érhetünk el közelítő eredményeket. A következőkben egy nagyon egyszerű hálózaton fogom bemutatni a GIC hatásait egy teljesítménytranszformátorra.

4.2.1 Az állandósult állapot jellemzői

Vegyünk példának egy egyszerű hálózati kapcsolást: adott egy egyfázisú transzformátor egy háromfázisú transzformátor csoportban, melynek a kisfeszültségű (LV) oldalát egy váltakozó áramú generátorhoz kapcsoljuk. A nagyfeszültségű (HV) oldal a hálózathoz csatlakozik egy távvezetéken keresztül, aminek a végén egy letranszformáló (step-down) transzformátor van. A transzformátorokat tekintjük ideálisnak. Egy csillagpontba helyezett DC feszültséggenerátor a GIC-t fogja modellezni a rendszerben. A felállítást 15. ábra mutatja, ahol a hálózat két összetevővel van helyettesítve: X_n reaktanciával és R_2 egyenáramú ellenállással. [7]



15. ábra: GIC egyszerű modellezése egy példa kapcsolatban

R_1 és R_2 ellenállások a generátor és a hálózat ekvivalens egyenáramú ellenállása. Először nézzük meg azt az esetet, mikor nincs váltakozófeszültségű generátor a modellben. Ha az AC feszültség 0, és a letranszformáló transzformátor üresjárásban van, akkor az X_n megegyezik a

távoli transzformátor HV tekercsének impedanciájával, tehát X_n egy soros RL kört alkot. Ennek tudatában felírhatjuk az U_{DC} segítségével az egyenáram által létrehozott fluxust:

$$\Delta\Phi = \int_0^t U_{DC} - RI(t) dt$$

ahol:

- $\Delta\Phi$: a fluxusnövekedés,
- R : a HV hurok teljes egyenáramú ellenállása,
- I : a hurok árama,
- t : az eltelt idő.

Az egyenletből megállapíthatjuk, hogy a vasmag fluxusa addig növekszik, míg az R -en eső feszültség egyenlő nem lesz az U_{DC} indukált egyenfeszültséggel. Amint beállt az állandósult állapot, a gerjesztőáram (vagyis a GIC) értéke számítható Ohm-törvénnyel:

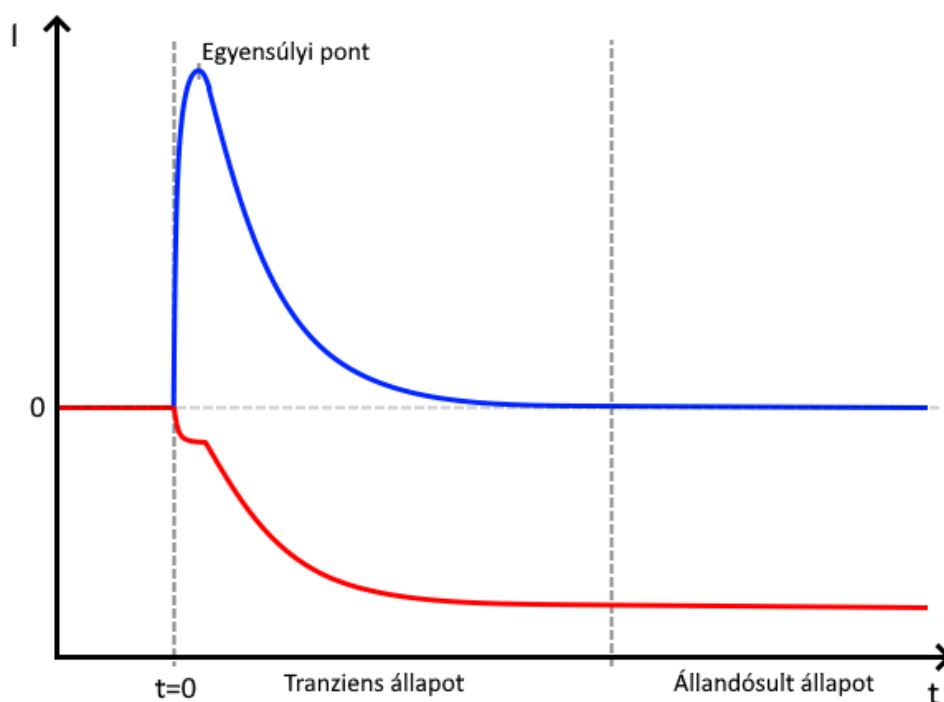
$$GIC = -\frac{U_{DC}}{R_2}$$

Az összefüggésből következtethetünk, hogy a geomágneses indukált áram végső nagyságát az indukált egyenfeszültség, valamint a hurokban levő teljes DC ellenállás határozza meg. [7]

4.2.2 GIC okozta tranziens jelenség

Amikor a geomágneses vihar eléri a Földet, több perc, de akár több óra is lehet, amíg az teljes mértékben kifejti a hatását. Az indukált áram nagysága így folyamatosan változik, mindaddig, míg be nem áll az állandósult állapot. A normál üzem és a GIC állandósult állapota közötti átmenetet hívjuk tranziens jelenségnek. A folyamat egy RL áramkörhöz hasonlóan viselkedik, melyre egyenfeszültséget kapcsolunk. Fontos különbség azonban, hogy a transzformátor induktivitása nem állandó, hanem a geomágneses zavar hatására időben változik. A jelenséget a 16. ábra mutatja. Függőleges tengelyen az áram, vízszintes tengelyen az idő kapott helyet. A kék színnel jelölt áramgörbe a kisfeszültségű oldal áramgörbéje, a piros pedig a nagyfeszültségű oldalé, melyre a DC feszültséget kapcsoljuk $t=0$ időpontban. Bár a geomágneses indukált áram

kvázi egyenáramként jelenik meg, valójában egy rendkívül alacsony frekvenciájú váltakozó jelről van szó, ezért a transzformátor nagy és kisfeszültségű tekercselése között egy mágneses csatolás alakul ki. Ez a csatolás egy fokozatosan növekvő áramot hoz létre a kisfeszültségű oldalon. Ennek az áramnak a csúcserőértéke az első egyensúlyi állapot, mely kis L/R időállandóval viszonylag gyorsan bekövetkezik. A nagyfeszültségű oldal áramgörbéje, mely piros színnel van jelölve, szintén növekszik a DC feszültség rákapcsolásakor, azonban ez negatív irányban történik, mivel a csatolt mágneses fluxus ellenkező irányú áramot indukál. A kezdeti hirtelen zuhanást követően az áram csillapodva közelíti az állandósult értéket. [7]



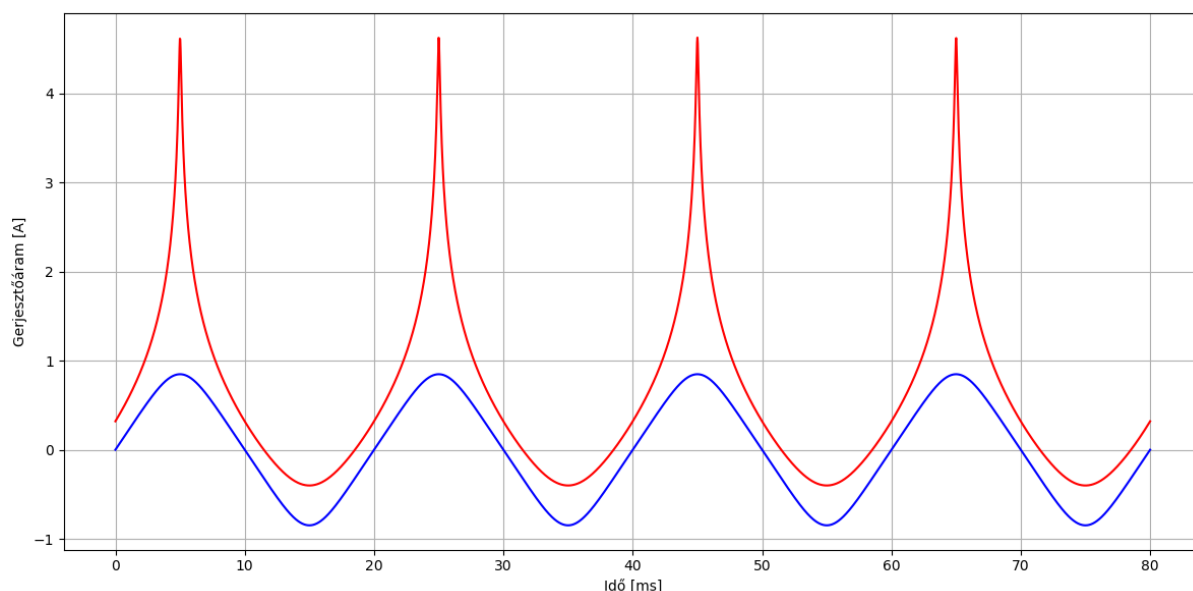
16. ábra: DC Tranziens rövidre zárt LV oldal esetén

A transzformátor vasmagja nem lineáris anyagból készül, így az induktivitás értéke függ a mágneszettségi állapottól. A vasmag telítődése során a kis és nagyfeszültségű oldalak közötti mágneses csatolás lassan megszűnik, emiatt az LV oldali áram csökkenni kezd – ez a folyamat a második tranziens szakasz. A vasmag telített állapotában az induktivitás jelentősen lecsökken,

így a rendszer viselkedése nagyobb időállandójú RL körhöz fog hasonlítani. Ennek eredményeként a HV oldali kör effektív egyenáramú ellenállása válik meghatározóvá, és a gerjesztőáram eléri az állandósult értékét. Ebben az állapotban a transzformátor már nem képes tovább indukálni feszültséget az LV oldalán, így ott az áram közel nullára csökken. [7] [24]

4.2.3 GIC hatása bekapcsolt AC feszültség mellett

Nézzük meg, hogy mi történik, ha az LV oldali generátor AC feszültséggenerátora is be van kapcsolva. A kialakuló áramviszonyokat a 17.ábra mutatja:

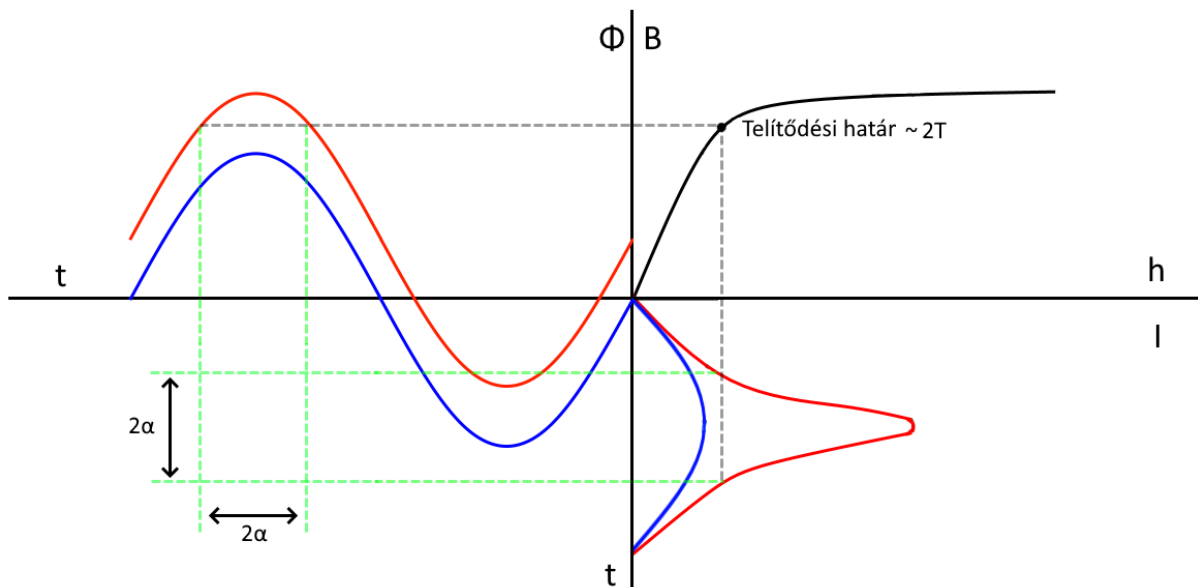


17. ábra: Gerjesztőáram GIC nélkül (kék) és GIC-vel (piros)

Normál üzemben az AC feszültség amplitúdója akkora, hogy a vasmagban létrehozott fluxus a vas mágnesezési görbéjének lineáris szakaszán mozog. Ilyenkor a fluxus szinuszos, szimmetrikus, és nem lépi át a telítési határt. A gerjesztőáram ebben az esetben a transzformátor névleges áramának körülbelül a 0,1%-a, mely a 17. ábrán kék színnel van jelölve. Amikor geomágneses indukált áramok, vagy egyéb forrásból bekerült DC komponens jelenik meg a gerjesztő áramkörben, akkor az AC gerjesztéshez egy DC mágneses összetevő adódik hozzá. Ennek köszönhetően a fluxus-idő függvény függőlegesen eltolódik. A transzformátor LV tekercsére mindig szinuszos feszültséget adunk, mely telítetlen állapotban szinuszos fluxust hoz létre. A

vasmágban záródó főfluxus a telítéssel érintett időtartományban ellaposodik, mivel a megnövekedett gerjesztőáram induktív feszültségesést okoz telítés közben. [7] [24]

Ezt az állapotot úgy tudjuk modellezni, hogy a hálózati feszültség teljes periódusát 360° -ra bontjuk, és megadunk egy α szöget, amely a periódus azon szakaszát jelöli, amikor a mágneses fluxus meghaladja a vasmag telítési küszöbét. A vasmag így periódusonként 2α ideig telített állapotban van:



18. ábra: Telítési szögek meghatározása

Az ábrából jól látszik, hogy a telített, vagyis a piros görbe két részre osztható: az elsőben a vasmag viselkedése közel lineáris, a másodikban viszont telítésbe kerül. A végső áram számítása leegyszerűsíthető azáltal, hogy az első szakaszra lineáris induktivitással, a másodikra pedig egy légmagos tekercs (RL kör) alapján közelítünk. Pontosabb eredmények érhetők el a vasmag B-H görbéjének modellezésével. A 18. ábrán például egy $\tanh()$ függvénnyel modelleztem a vasmag mágnesezési görbéjét, mely az ott látható jelalakokat adta eredményül. [7]

A végső áram ugyan elméletben kiszámítható, azonban egy geomágneses vihar esetén teljesen kiszámíthatatlan feszültségek, felharmonikusok, áramviszonyok alakulnak ki, melyeket pontosan előrejelezni nem lehetséges, csupán szimulációval tudunk közelítő értékeket kapni.

4.3 Tervezési szempontok

A GIC kialakult végső nagyságát számos tényező korlátozza, csökkenti. Ilyenek például a hálózat és a transzformátor impedanciája, a névleges fluxussűrűség (vagy névleges indukció), vagy pedig a vasmag kialakítása. A következőkben olyan paraméterekről lesz szó, melyek közvetlenül vagy közvetetten hozzájárulnak a GIC áramának csillapításhoz és melyeket akár tervezés során testreszabhatunk.

4.3.1 Rövidzárási impedancia

A transzformátor belső soros impedanciája a rövidzárási impedancia, melynek ohmos részét képezi a tekercselés ellenállása, képzetes részét pedig a szórési reaktancia. Ennek az impedanciának a százalékban kifejezett értéke megegyezik a transzformátor rövidzárási feszültségesésének (vagy dropjának) értékével. A drop azt mutatja meg, hogy mekkora feszültségesés keletkezik a transzformátoron, amikor névleges áramot vesz fel. Minél nagyobb a drop, annál nagyobb a feszültségesés terhelés alatt, ezért telítés során kisebb maximális gerjesztőáramot eredményez. Általánosságban elmondható, hogy az alacsonyabb, szélesebb tekercsekkel rendelkező transzformátoroknak nagyobb a dropjuk, mint a keskeny, magas transzformátoroknak.

A transzformátor mágneses körének reluktanciája, vagyis az „egyenáramú mágneses ellenállása” meghatározza, hogy a zérussorrendű vagy egyenáramú mágneses fluxus milyen nehezen képes áthaladni a vasmagon vagy azon kívüli zárt mágneses körökön. A fluxus egy része a főmágneses úton halad, míg más része szóródhat – pl. a tekercsek közötti térben vagy az olajcsatornákon keresztül. A tekercsek geometriai kialakítása, elhelyezkedése valamint az olajcsatornák paraméterei befolyásolják mind a szórési reaktancia, mind pedig a reluktancia értékét.

[24]

4.3.2 Névleges fluxussűrűség

Fontos szerepet játszhat a gerjesztőáram korlátozásában, hogy a transzformátor milyen névleges fluxussűrűséggel üzemel. A teljesítménytranszformátorok vasmagjai 2 T körül telítenek be, ami azt jelenti, hogy ez alá kell beállítani a névleges indukciót. A fluxussűrűség értéke:

$$B = \frac{U}{4,44 * f * N * A}$$

ahol:

- U: feszültség
- f: frekvencia
- N: menetszám
- A: a vasmag keresztmetszete

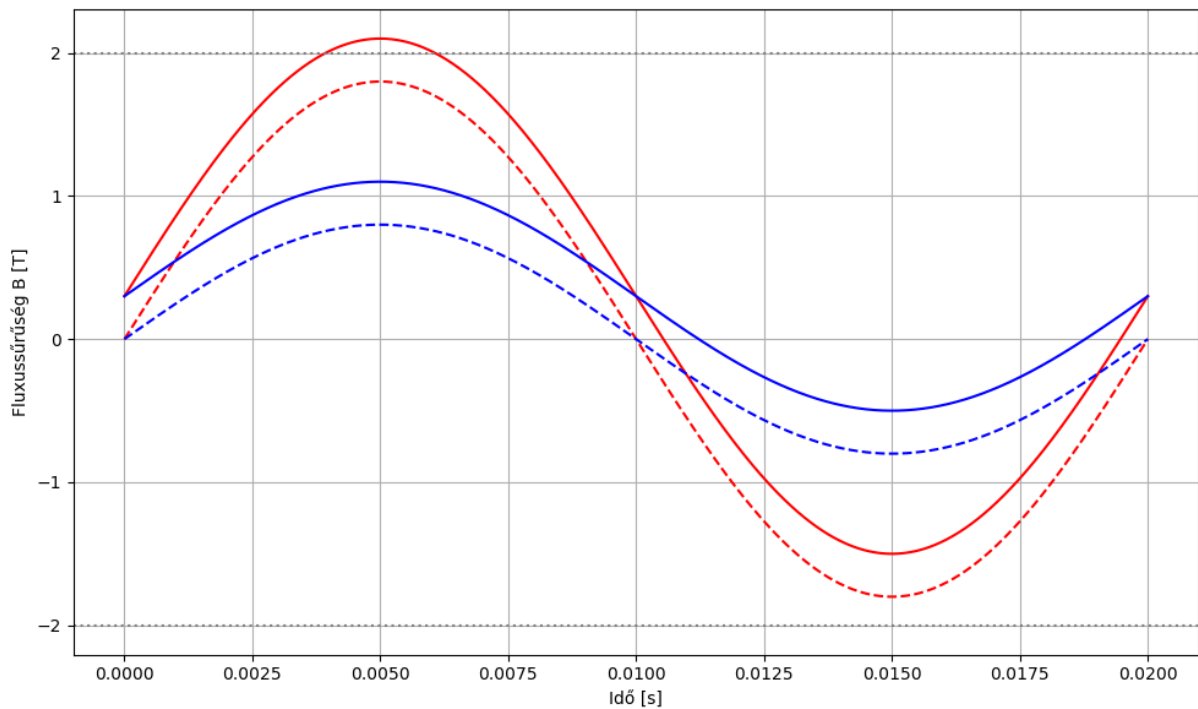
Látható, hogy a maximális fluxussűrűség függ a menetfeszültségtől, a frekvenciától és a vasmag keresztmetszetétől. Mivel a frekvencia és a feszültség adott egy hálózat esetében, ezért tervezéskor a menetek számát, és a vasmag méretét tudjuk érdemben változtatni. A számított névleges indukció értéke, és a vasmag anyagának minősége határozza meg a vasmag veszteségét, mely üresjárásban is melegíti a transzformátor olaját. Amikor a vasmag telítésbe lép, akkor nem képes több fluxust felvenni, emiatt egy légmagos tekercshez hasonlóan fog viselkedni. Ebben az esetben az indukció is másképpen számolható:

$$B = \mu_0 * I * \frac{N}{l}$$

ahol:

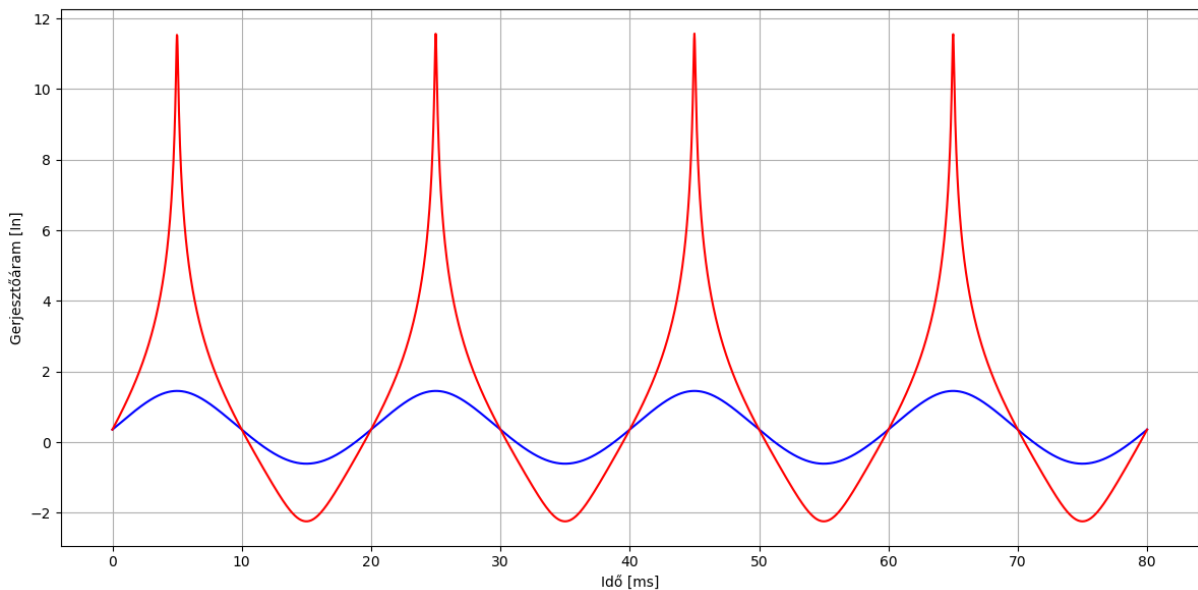
- μ_0 : a vákuum permeabilitása
- l : a tekercs hossza
- I : áram.

[24]



19. ábra: Alacsony és magas névleges fluxussűrűség DC eltolással

Hasonlítsunk össze két példát: az egyikben a maximális névleges fluxussűrűséget 0,8 T-ra, a másikban pedig 1,8 T-ra állítjuk be. Szimmetrikus tápfeszültség esetén szimmetrikus fluxus is jön létre, ami a szaggatott vonallal van jelölve a 19. ábrán, késsel az alacsony, pirossal a magas névleges indukció. Látható, hogy a 2 T telítési értéket a magas névleges indukcióval tervezett transzformátor átlépi, míg az alacsony névleges indukcióval tervezett nem. Ugyanakkor arányaiban a kis fluxussűrűségű esetben sokkal nagyobb aszimmetria lép fel, ez a torz gerjesztés pedig akár nagyobb problémákat is okozhat a transzformátorban, mint a nagy névleges indukció esetén. Ha GIC-re tervezünk egy transzformátort, mindig egy olyan ideális munkapontot kell kiválasztani, hogy elég tartalék maradjon a DC komponensnek, de elég magas legyen a fluxussűrűség ahhoz, hogy kihasználjuk a vasmagot. [7]



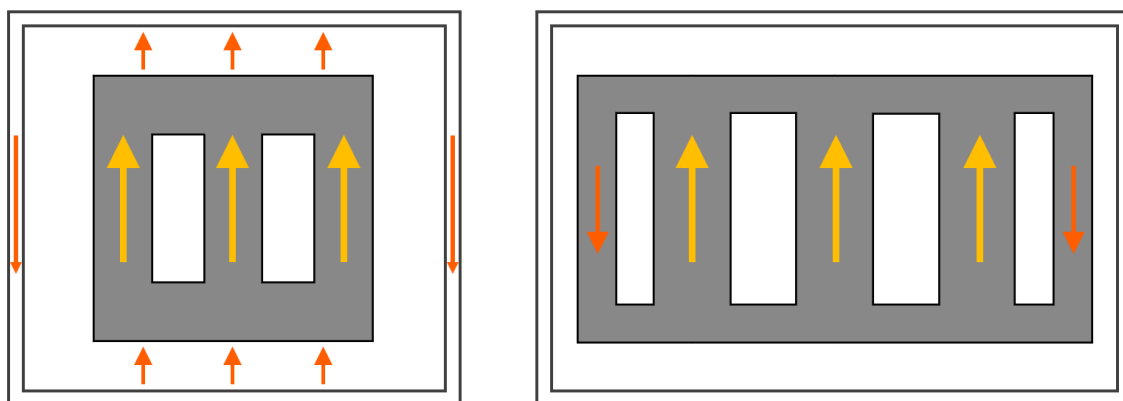
20. ábra: Gerjesztési áram DC eltolt alacsony és magas névleges fluxussűrűség esetén

4.3.3 Kiegyenlítő tekercselés

Amennyiben a transzformátor tartalmaz delta kapcsolású tekercset, a helyzet megváltozik. Szimmetrikus felépítésű transzformátort feltételezve a csillagpont felől belépő GIC mindhárom fázistekercsben azonos nagyságú és fázisú áramot hoz létre, vagyis zérussorrendű gerjesztést eredményez. Mivel a delta tekercselés egy zárt hurkot alkot, a zérussorrendű komponens köráramot tud létrehozni benne. Ez a köráram egy ellentétes irányú mágneses teret hoz létre, amely kiszorítja a DC fluxust a vasmagból. Ilyenkor a fluxus a szigetelőcsatornákon keresztül záródik, amihez megnövekedett gerjesztőáram szükséges – hasonlóan, mint csillagkapcsolás esetén. A delta hurok árama azonban képes egy bizonyos ideig kiegyenlíteni a DC feszültséget, mivel a tekercs nagy L/R arányából adódóan az időállandó akár több perc is lehet. A geomágneses zavar során indukált feszültség olyan lassan változik, hogy mire a kiegyenlítő áram lecsengene, addigra az iránya megváltozik. A vasmag emiatt nem jut el a telítési állapotba, és nem alakul ki nagy áram sem. [7]

4.3.4 A vasmag típusa

Míg a GIC áram nagyságát és végső értékét nem befolyásolja, hogy milyen szerkezetű a transzformátor vasmagja, addig a mágneses telítődés szempontjából ez egy igen fontos tényező. Különböző típusú vasmagok mind másképpen reagálnak a DC áram okozta telítődésre. A GIC-ből származó DC komponens zérussorrendű fluxust hoz létre a vasmagban. Az egyfázisú transzformátorok vasmagjainál (2, 3, vagy 4 oszlopos típus), valamint a háromfázisú (5 oszlopos és a köpeny típusú) vasmagok esetén a vasmag alacsonyabb mágneses ellenállást biztosít a fluxusnak, emiatt a vasmag már alacsony DC ampermenet esetén is telítésbe jöhet.



21. ábra: A fluxus útja 3 oszlopos 3 fázisú, illetve 5 oszlopos, 3 fázisú vasmag esetén

Ennek oka, hogy a fluxus a segédoszlopokon keresztül záródik, ami alacsony reluktanciát biztosít. Egy 3 fázisú, 3 oszlopos vasmag esetén viszont nincs ilyen segédoszlop, emiatt a fluxus kénytelen a transzformátorszekrényen vagy az olajcsatornákon keresztül záródni. Éppen ezért a három oszlopos és három fázisú vasmagok magas reluktanciát eredményeznek, ami miatt vasmag magasabb DC ampermenet esetén telít csak be. Ha egy ilyen három oszlopos transzformátor aktív része közel van a transzformátorszekrény falához, akkor a transzformátorszekrény képes úgy viselkedni, mint a segédoszlop egy 5 oszlopos transzformátor esetén. Ebből az következik, hogy minél nagyobb távolságot hagyunk a szekrényfaltól, annál nehezebb lesz telítésbe hozni a vasmagot. [7]

4.4 Felharmonikusok

A villamos hálózatok ideális esetben csak az alapfrekvenciát (50 Hz-et) tartalmazzák. A hálózati elemek többsége azonban nemlineáris terhelésként viselkedik, vagyis a felvett áramuk nem teljesen szinuszos. Ilyenek például a transzformátorok, frekvenciaváltók, kapcsolóüzemű tápegységek, LED világítások és az inverteres rendszerek. Ezek a nemlineáris eszközök a hálózatban olyan áramokat keltenek, amelyek Fourier-sorokkal leírhatók:

$$i(t) = I_1 \sin(\omega t) + I_3 \sin(3\omega t) + I_5 \sin(5\omega t) + \dots$$

ahol:

- ω : az alapfrekvencia szögsebessége,
- I_1, I_3, \dots : a felharmonikus komponensek amplitúdói,
- $i(t)$: fő időfüggvény.

Ezek a felharmonikusok magasabb frekvenciájú összetevőket hoznak létre a hálózatban, amelyek torzítják a szinuszos jeleket és különféle zavarokat okoznak. [33]

4.5 Rezonancia

Speciális esetekben, mikor a mágneses reaktancia csökken, előfordulhat, hogy a transzformátorhoz csatlakoztatott kábelek kapacitásai, illetve a hálózat kompenzáló kondenzátorai rezonanciába kerülnek a felharmonikusok frekvenciáival. A rezonancia akkor jön létre, ha egy adott frekvencián a kapacitív és induktív reaktancia megegyezik, tehát:

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

Ha ez épp egy felharmonikus frekvencián következik be, akkor az adott komponensre áram és feszültségnövekedés történhet. Ha a GIC hatására a transzformátor telítésbe kerül, és felharmonikusok alakulnak ki, akkor fennáll annak a veszélye, hogy túlfeszültségek alakulnak ki, és ennek hatására a szigetelőanyagok átütnek. Ez a hatás főleg akkor kritikus, amikor a hálózatban meddőkompenzáló kondenzátortelepek üzemelnek pl. a GIC áramok kompenzálására. [27] [32]

4.6 Veszteségek

A teljesítménytranszformátorok veszteségeit két részre bonthatjuk: üresjárási veszteségre és rövidzárási veszteségre. Az üresjárási veszteség főként a vasmagban keletkezik, feszültségtől függő, de terheléstől nem függő veszteség. Három összetevője az örvényáram veszteség, a hiszterézis veszteség, és az üresjárási áram okozta veszteség. Az első két veszteséget a vasmag anyagának és felépítésének optimalizálásával csökkenthetjük. Az üresjárási áram okozta veszteségen a primer oldal tekercseiben folyó gerjesztőáram rézveszteséget értjük, amely teljesítménytranszformátoroknál arányaiban olyan kicsi, hogy elhanyagolható (általában a transzformátor névleges primer áramának 0,05-0,1%-a). A rövidzárási veszteség a transzformátor terhelése során keletkezik. Ha a transzformátort terheljük, akkor a tekercselés ellenállása miatt a rajta folyó áram I^2R teljesítménye hővé alakítja az átvitt energia egy részét. Nagysága tipikusan 5-15-szöröse az üresjárási veszteségnek, ha a transzformátor névleges üzemben működik. Egyéb forrásból származó veszteségek is előfordulhatnak, mint például a szigetelőanyag dielektromos veszteségei, vagy a transzformátor szerkezeti elemein záródó fluxusok és áramok melegítő hatása. [24]

Egy geomágneses zavar hatással van a tekercs áramaira és a fluxusokra is, ezáltal képes növelni mind az üresjárási, mind a rövidzárási veszteséget. A veszteség olyan nagyra is nőhet, hogy a transzformátor túlhevülhet, élettartama csökkenhet, alkatrészei károsodhatnak. [7]

4.6.1 Hiszterézis veszteség

Normál üzemben a transzformátor vasmagja szimmetrikusan, a nagy permeabilitású tartományon belül működik. A GIC által okozott egyenáramú komponens viszont eltolja a fluxus középtértékét, és a fluxussűrűség hullámformája aszimmetrikussá válik. Ennek hatására a vasmag csak az egyik félperiódusban közelíti meg (vagy lépi túl) a telítési határt. Ebben az állapotban a hiszterézis hurok kiszélesedik, ami növeli a vasmagban a hőveszteséget. A hiszterézis veszteség folyamatosan növekszik a fluxusgörbe által bezárt terület növekedése miatt, viszont a növekedés telítést elérve gyakorlatilag megáll. [7] [24]

4.6.2 Örvényáram veszteség

Az örvényáram veszteség másképp viselkedik, mint a hiszerézis veszteség. Amikor egy időben változó mágneses tér áthalad egy vezető anyagon, Faraday indukció törvénye alapján feszültség indukálódik a vezető anyagokban. Mivel ezek a veszteségek a fluxusváltozás sebességétől függenek, a GIC önmagában – mint lassú egyenáram – nem okoz számottevő örvényáram növekedést. Amikor viszont a vasmag telítődik, a fluxus hullámformája torzul, és a gyorsabb fluxusváltozások miatt az örvényáram veszteségek is növekedni kezdenek. Ennek mértéke mindaddig jelentéktelen, amíg a teljes telítődés be nem következik. [7] [24]

A transzformátor vasmag veszteségei GIC hatására akár 50%-kal is növekedhetnek. Jó minőségű, vagyis nagy permeabilitású vasmag esetén a mágneses kör kis gerjesztőáram mellett is képes nagy fluxust vezetni. Ez azonban azt is jelenti, hogy az ilyen típusú vasmagban a DC komponensű fluxuseltolódás nagyobb mértékű lehet, így könnyebben kerül a mag a telítési tartomány közelébe. Viszont, ha a transzformátort gyengébb minőségű, alacsonyabb permeabilitású vasmagból készítjük, akkor azon a DC fluxus nehezebben halad át, mivel nagyobb a mágneses ellenállása. Ez nagyobb üresjárási veszteségekkel jár, viszont telítés szempontjából ellenállóbbá teszi a transzformátort a GIC eseményekkel szemben. Ha olyan vasmagot használunk, melynek B-H görbéje nem laposodik erőteljesen, azzal a telítési pontot magasabbra tolhatjuk, melynek hatására ellenállóbb lesz a telítéssel szemben. [7] [24]

4.6.3 Tekercsveszteségek

A GIC okozta fluxuseltolás következtében nemcsak a vasveszteség nő, hanem a gerjesztőáram is, amely akár a névleges áram szintjéig is megnövekedhet. Ennek oka, hogy mikor a vasmag betelít, a létrehozott fluxus már az olajon keresztül záródik, így körülötte levő tekercs légmagos induktivitássá válik. Teljesítménytranszformátorok esetében a tekercsek ohmos ellenállása nagyon kicsi, ezért a felvett teljesítmény induktív lesz, azaz meddőteljesítmény. A meddőteljesítményt úgy számolhatjuk ki, hogy a feszültség időfüggvényét 90 fokkal eltoljuk, majd azt összeszorozva az áram függvényével integráljuk egy teljes perióduson keresztül.

Ha az integrál értékét osztjuk a periódusidővel, megkapjuk egy periódus alatt fellépő átlagos meddőteljesítményt:

$$Q = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} U \left(t - \frac{\pi}{2} \right) * I(t) d(\omega t)$$

ahol:

- Q: a meddőteljesítmény,
- U: feszültség,
- I: áramerősség,
- t: idő.

Ha szinuszos tápfeszültséget feltételezünk, akkor a felharmonikustartalmat a feszültség alap-hullámával vehetjük figyelembe. Az áram tartalmazhat magasabb felharmonikusokat, pl. $I_3 \sin(3\omega t)$. Ha viszont egy ilyen felharmonikus áram-időfüggvényt szorzunk a 90 fokkal eltolt feszültség-időfüggvényével, akkor a kapott meddőteljesítmény 0 lesz az adott felharmonikusra. Meddőteljesítmény számításakor ezért csak az alapharmonikus számít, a többi harmonikus nem járul hozzá az átlagos teljesítményhez. Mivel 3 fázisú rendszerrel számolunk, ezért a GIC miatt megnövekedő reaktív teljesítményt mindhárom fázisra ki kell számolni. Ha a feszültség és áram értékei mindhárom fázisban megegyeznek, akkor:

$$Q_{GIC} = 3 * U * I_{GIC}$$

ahol:

- Q_{GIC} : a felvett meddőteljesítmény,
- U: a tápfeszültség,
- I_{GIC} : a gerjesztőáram effektív értéke.

Ha nem szimmetrikus a GIC eloszlása, vagyis a GIC különböző értékű áramokat okoz a három fázisban, akkor a teljes reaktív teljesítményt fázisonként külön-külön kell kiszámolni, majd összeadni:

$$Q_{GIC} = U * (I_{A GIC} + I_{B GIC} + I_{C GIC})$$

A megnövekedett meddő energiaigény nagyobb áramot eredményez, ez pedig növeli az I^2R veszteséget a tekercsben. Az áram szélsőséges esetben elérheti a névleges áram nagyságát is. [7] [24]

4.6.4 Ampermenet-egyensúly

A GIC áram nemcsak direktben melegíti a tekercset, hullámalakja aszimmetrikus, így felborítja a transzformátor tekercseiben érvényesülő ampermenet-egyensúlyt. Normál esetben a fázistekercsek által keltett mágneses mezők kölcsönösen kiegyenlítik egymást, ezáltal kicsi a szórt tér vesztesége. Geomágneses áram jelenlétében azonban ez az egyensúly megbomlik, és a megnövekedett szórt tér növeli a tekercsek és a szerkezeti fém elemek (állvány, szekrényfal, fluxuscsapda, stb...) hőterhelését is. [7]

4.6.5 Szkin veszteség

Habár a geomágneses zavar nem változtatja meg a szóródó mágneses tér eloszlását, a transzformátorban megjelenő aszimmetrikus gerjesztőáram miatt felharmonikusok alakulnak ki. Az alacsonyabb felharmonikusok esetén a veszteségek nagysága a frekvencia négyzetével arányosan nő. Ilyenkor az indukált örvényáram mélyen képes a vezetőben folyni, ezért annak teljes keresztmetszetét igénybe veszi. Ezzel szemben magasabb frekvenciákon már érvényesül a skinhatás, vagyis a mágneses tér által indukált áram csak a tekercselés külső rétegébe tud behatolni. Ilyenkor az örvényáram veszteség a frekvencia négyzetgyökével növekszik. A fluxus iránya sem mindegy. Az axiális irányú mágneses tér a tekercsek keskenyebb oldalát éri, így itt még a magasabb frekvenciájú felharmonikusok esetén is jól bejut a mágneses tér a vezető anyagba, itt négyzetes a veszteségnövekedés. A radiális irányú mágneses tér viszont a vezetőt teljes hosszában éri, ahol már alacsony felharmonikusokon is csak felületi áramokat indukál, így a veszteségek növekedése itt sokkal enyhébb. A felharmonikusok által létrehozott veszteség általában kisebb a fent felsorolt veszteségeknél, ugyanis a gerjesztőáram felharmonikusainak amplitúdója gyorsan csökken, így az összesített örvényáram veszteség is alacsonyabb lesz. [7] [26]

4.6.6 Szórt veszteségek

Mint ahogy arról korábban szó esett, a vasmag telítődése esetén megnő a szórt fluxus mennyisége, mely nem a vasmagban, hanem a vasmagon kívül záródik. Ezek a szóródó fluxusok további veszteséget okoznak a transzformátor szerkezeti elemeiben azáltal, hogy olyan fém alkatrészekben okoznak örvényáramot, mint például a fluxuscsapda, a transzformátorszekrény, az állványszerkezet, vagy pedig a fokozatkapcsoló.

Nemcsak a vasmag, hanem a fluxuscsapda is telítődhet a geomágneses indukált DC áramok hatására. A fluxuscsapda feladata, hogy „csapdába ejtse” a szórt fluxust, megakadályozva azt, hogy a fluxus a transzformátorszekrénybe szóródjon, és nagy veszteségeket okozzon benne. Anyaga általában ugyanabból a vasból készül, mint amiből a vasmag, és a transzformátorszekrény belső felületére kerül felszerelésre. Mint minden ferromágneses anyag, így a fluxuscsapda is képes a telítődésre. Amennyiben ez megtörténik, a fluxus szinte ellenállás nélkül áthatol rajta és egyenesen a transzformátorszekrényben záródik. Mivel a transzformátor tartálya acélból készül, így jó elektromos vezetőképessége miatt hatalmas nagy örvényáramok alakulnak ki benne. Amikor a fluxus ilyen nem kívánatos módon záródik, az megváltoztatja a fluxuseloszlást, mely további aszimmetriákhoz vezet. Helyi melegedések is kialakulhatnak a tartály bizonyos pontjain. Ez a melegedés akár hőfáradást, és a korrózióvédelem károsodását is okozhatja. [7]

4.7 Melegedés

GIC események folyamán a veszteségek nőnek, ami megemeli a transzformátor hőmérsékletét. Ezek megértése nagyon fontos, ugyanis a melegedés az, amely a transzformátorok meghibásodását okozza.

4.7.1 Melegedés típusok

Alapvetően 3 melegedésről beszélünk egy olajszigetelésű transzformátornál: top-oil, average-winding, és hot-spot melegedés. Minden melegedést a környezeti hőmérséklethez képest kell venni, kelvinben. A top-oil, vagyis legmagasabb olajhőmérséklet melegedése a transzformátor szigetelőolajának hőmérséklet emelkedését jelenti. A transzformátor veszteségeiből származó hőt olaj veszi fel, majd a radiátorokba (vagy hőcserélőkbe) áramolva leadja azt. Ha a hőleadás

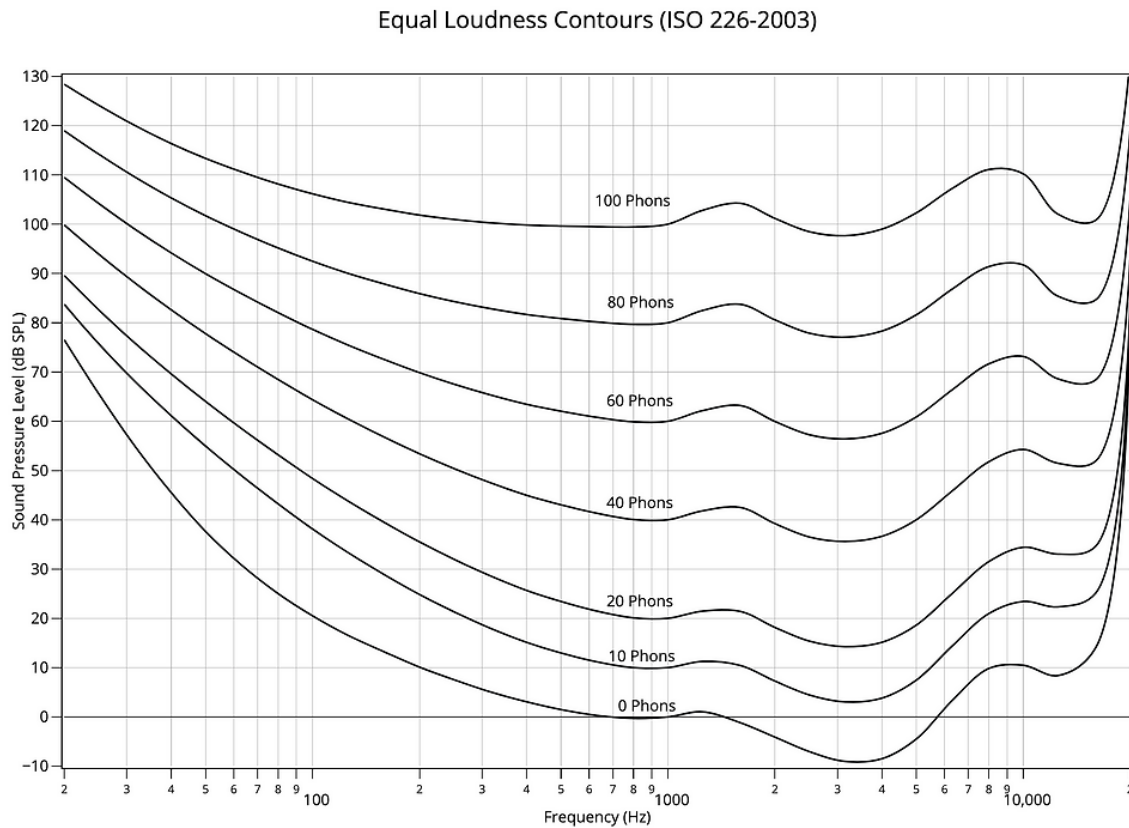
nem elegendő, a transzformátor olaja túlmelegszik, ami károsítja a transzformátort. Az average winding melegedés a tekercsek átlaghőmérsékletének emelkedését jelenti, ez üzem alatt melegebb, mint az olaj átlaghőmérséklete. A két melegedés különbsége ad egy hőlépcsőt, vagyis a gradienst. Ha nagyobb a tekercsek vesztesége, akkor megnő ez a hőlépcső, ami optimalizálatlan hűtést eredményez. A tekercsek hot-spot melegedése az adott tekercs legmagasabb hőmérsékletű pontjának melegedését jelenti, a tervezési limitet elérve a tekercsek papírszigetelését károsíthatja. Egy GIC esemény alatt ez a hot-spot melegedés sokkal veszélyesebb a transzformátorra nézve, mint maga a teljes veszteség növekedés által okozott top-oil melegedés. Ennek oka, hogy a tekercsek alsó és felső részeiben a veszteség sokkal nagyobb, mint a tekercs többi részében. A hot-spot hőmérséklet ráadásul még normál működés közben is a tekercs felső részén található, így az ott pluszba jelentkező veszteség okozza a legnagyobb problémát. Az olajhőmérsékleti melegedés abban az esetben okoz problémát, ha a transzformátor közel névleges teljesítményen üzemel, és a GIC hosszú ideig, órákon, vagy akár napokon keresztül fenn áll. Ebben az esetben csökkenteni kell a terhelést, vagy extra ventilátorokat, esetleg redundáns transzformátort kapcsolunk be – amennyiben lehetséges. [7] [24] [27]

4.7.2 Melegedés okozta meghibásodások

Különböző melegedések különböző meghibásodásokat okozhatnak a transzformátor szerkezetében. Ezek közül az egyik legfontosabb a papírszigetelés öregedésének a gyorsulása. A papírszigetelés papíryanaga hosszú cellulózláncot alkotó részecskékből áll. A részecskékből álló láncok az idők során lassan eltöredeznek, így a papír anyaga meggyengül. Ha a papír villamos tulajdonságainak a romlása elér egy bizonyos küszöböt, akkor egy végzetes hiba következhet be, amely a transzformátor tönkremeneteléhez vezet. A megnövekedett hőterhelés hatására az öregedés sebessége felgyorsul, hamarabb elérve egy kritikus állapotot. A GIC által okozott olajmelegedés károsíthatja az olajjal érintkező tömítőgyűrűk épségét, szivárgást, olajfolyást okozva ezzel. A transzformátorszekrényben folyó köráramok a szekrény bizonyos pontján okoznak melegedéseket, emiatt pedig mechanikai feszültséget okozhatnak az anyagban, roncsolhatják a korrózióvédelmet, és gyengíthetik a hegesztési pontokat. [24] [28]

4.8 Zajok

Mielőtt kitérnék a GIC okozta zajnövekedésre, előtte meg kell ismernünk, hogy mi is az a hang, és milyen mértékegységei vannak. A hang alatt egy közeg nyomásváltozásának a hullámait értjük, amelyet az emberi fül érzékelni képes. Ezek a nyomásváltozás hullámok a hangforrástól indulnak, és terjednek szét a közegben. A hullámzás frekvenciája meghatározza, hogy milyen hangmagasságot hallunk, egy egészséges emberi fül esetén ez 20 Hz-től 20 kHz-ig terjed. A hang erejét, vagyis azt, hogy milyen hangosan halljuk, meghatározhatjuk hangnyomással, hangteljesítménnyel, vagy a hangintenzitással. Transzformátorok esetén a hangnyomással fogunk foglalkozni részletesebben, ugyanis ez a leggyakoribb mértéke a transzformátor zajának. A hangnyomás egy adott helyen, adott időszak alatt mért pillanatnyi nyomásértékeknek a négyzetes középértéke, melyet pascalban mérnek. Mivel egy közegen belül adott pontban a nyomás minden irányból ugyanakkora, a hangnyomás egy skalármennyiség, vagyis csak nagysága van, iránya nincs. Az emberi fül által érzékelhető legkisebb hangnyomás 1 kHz-en 20 mikropascal. A szabvány által megállapított fájdalomküszöb ugyanezen a frekvencián 20 pascal, vagyis egymilliószor nagyobb. Mivel ez igen nagy a tartomány, ezért a decibel skálát használjuk a hangnyomás kifejezésére, ahol a 0 dB a 20 μ Pa-nak, míg a 120 dB a 20 Pa-nak felel meg. Mint ahogy a hallásküszöb és a fájdalomküszöb, úgy minden más hangnyomásérték is frekvenciafüggő. Például az 1 kHz és 5 kHz frekvencia közötti hangokat már 20 μ Pa hangnyomás alatt is érzékelhetjük, de bizonyos frekvenciájú hangokat halkabbnak is hallhatunk ugyanazon a hangnyomáson. [29]



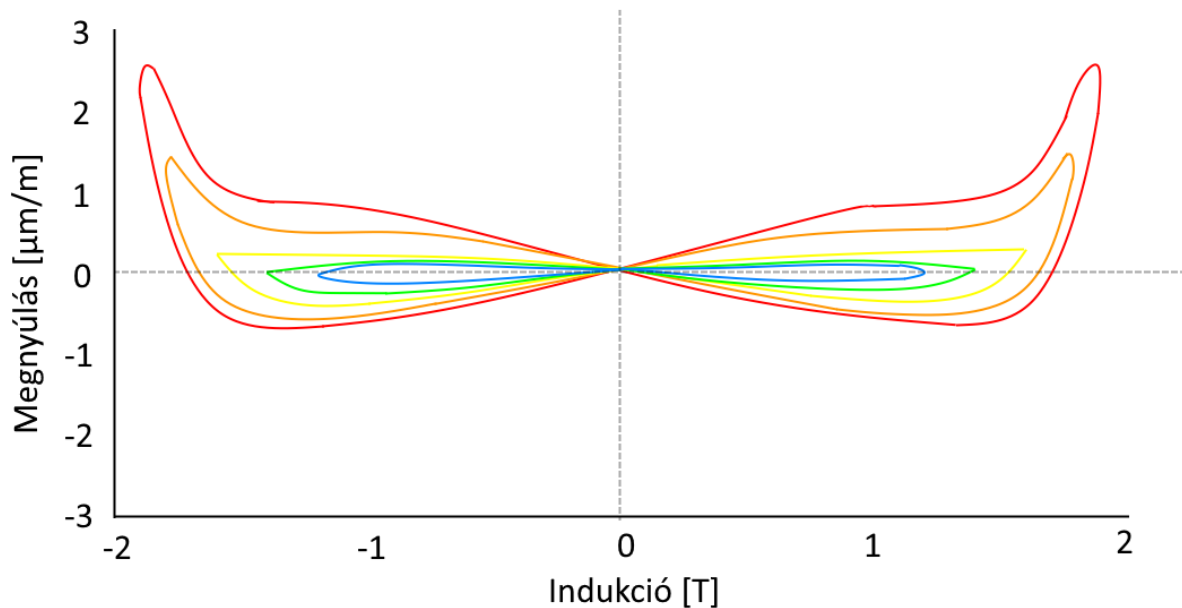
22. ábra: Fletcher - Munson görbék

A 22. ábrán a Fletcher-Munson görbék láthatók, ahol a vízszintes tengelyen a frekvencia, függőleges tengelyen pedig a hangnyomás látható. Minden görbe azt mutatja, hogy egy adott hangerő esetén (pl. 20 Phons-nál 20 dB) hol halljuk ugyanolyan hangosnak egy bizonyos hangot. A 0 Phons vonala a hallásküszöb. Jól látható, hogy az emberi hallás nem lineáris. Emiatt hangmérésekhez szabványosított szűrőket is használnak, hogy jobban lekövezzék az emberi hangérzékelést. Ez az úgynevezett A-súlyozás. [29]

4.8.1 A transzformátor zajának forrásai

A zaj forrása főként a vasmagból származik, a magnetostrikció jelensége által. A magnetostrikció a ferromágneses anyagokban megfigyelhető méretváltozásokat jelenti, amikor változó mágneses fluxus halad át rajta. A méretváltozás (nyúlás) 1 m hosszú vasmagra nézve pár μm

nagyságú lehet, mely hanghatással jár. A 23. ábrán látható a megnyúlás mértéke látható különböző névleges indukciók esetén. [24] [29]

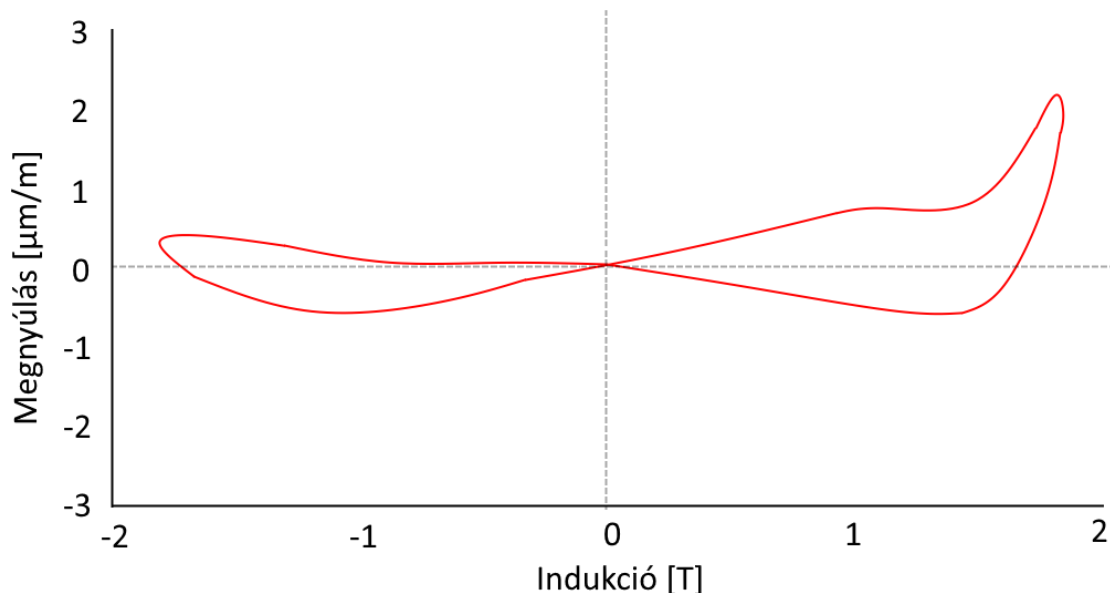


23. ábra: Magnetostrikció különböző nagyságú névleges indukciókra

A fluxus egy periódus alatt egyszer irányt vált, de a vasmag megnyúlásának iránya nem függ a fluxussűrűség előjelétől, vagyis a fluxus pozitív és negatív félhulláma egyaránt azonos irányú méretváltozást eredményez. Ez azt jelenti, hogy bár az indukció egy periódus alatt egyszer változtat irányt, a vasmagban a méretváltozás két csúcspontot fog elérni: egyszer a pozitív, egyszer pedig a negatív félperiódusban. A megnyúlás így kétszer olyan gyakorisággal történik, mint ahogyan a mágneses mező váltakozik. Ez a jelenség okozza azt, hogy a magnetostrikcióból származó mechanikai rezgések alaphérvenciája a hálózati hérvencia kétszerese lesz. Magyarországon, illetve minden 50 Hz-en működő rendszer esetén ez 100 Hz a legdominánsabb, amelyet a jól ismert zúgó hangként érzékelünk. A hangspektrum azonban nem áll meg a 100 Hz-es komponensnél. Ahogy a 23. ábrán is látszik, a magnetostrikció és az indukció közötti kapcsolat nem lineáris: az anyag mágneses telítődéséhez közeledve az alakváltozás görbéje egyre jobban eltér a szinuszos jellegektől. Emiatt a keletkező mechanikai rezgés sem lesz tisztán

szinuszos, hanem magasabb rendű felharmonikusokat is tartalmazni fog. A legjellemzőbbek közé tartoznak a páros felharmonikusok (200 Hz, 400 Hz, 500 Hz stb.), amelyek kisebb amplitúdóval, de hozzájárulnak a transzformátor zavaróbb, zizegőbb hangzásához. [24] [29] [33]

Amennyiben DC fluxus eltolódás történik, a helyzet megváltozik. A méretváltozás aszimmetrikus lesz, vagyis a fluxus egyik félperiódusában jóval nagyobb lesz a megnyúlás, mint a másik félperiódusban. Ez azt is okozza, hogy a megnyúlás-csúcsok időben kétszer olyan távolra kerültek, hiszen a másik félperiódusban kicsi megnyúlás történik. Ez az eset a 24. ábrán látható:



24. ábra: Magnetostrikció eltolt DC fluxus esetén

A magnetostrikció alaphékvenciája ebben az esetben csak 50 Hz lesz, és sokkal hangosabb, mint üzemi állapotban. A felharmonikus tartalom itt is jelentős, de mivel a fluxus nem szimmetrikusan változik, ezért az ebből fakadó mágneses erők páratlan felharmonikusokat generálnak. [24] [29]

A transzformátorok működése során nemcsak a vasmagban fellépő magnetostrikciós hatások okoznak zajt, hanem a tekercsek is hozzájárulhatnak a teljes zajkibocsátáshoz. Ennek oka, hogy az áram által létrehozott mágneses mezők folyamatos, dinamikusan változó erőhatásoknak teszik ki a tekercsokat axiális és radiális irányban is. Axiális irányban a menetek egymásra

ható vonzó- vagy taszító erői a tekercs hosszának irányába fejtenek ki nyomást vagy húzóerőt, míg radiális irányban a tekercs keresztmetszetének középpontja felé vagy onnan kifelé ható erők jelentkeznek, amelyek a tekercset szétfeszíteni vagy összenyomni próbálják. Ezek az erők a tekercseken folyó árammal négyzetesen arányosak, amelyek rezgésbe hozzák a transzformátor szerkezetét. A tekercsekben folyó áram felharmonikusai okozta zajtöbblet általában alacsony, és csak minimális mértékben befolyásolja a teljes transzformátor zaját. [24] [29]

A vasmag és a tekercsek keltette erők vibrációt, rezgéseket okoznak a szerkezeti elemekben, melyek tovaterjednek, megrezgetnek más alkatrészeket, így a körülöttük levő levegőt is. Minden alkatrésznek megvan a saját rezonanciafrekvenciája. Bizonyos esetekben, ha a transzformátorban, vagy a körülötte levő berendezésekben olyan alkatrész található, melynek rezonanciafrekvenciája megegyezik a transzformátor keltette hang frekvenciáival, akkor erőteljesen megnőhet az okozott zaj is. A zaj csökkentése érdekében rengeteg kreatív megoldás létezik a hangszigetelő falaktól kezdve a gumitalpas elhelyezésig, ám egy geomágneses zavar esetén mindenképpen számolni kell a zaj erősödésével is.

5 A RENDSZER VÉDELME A JELENSÉGGEL SZEMBEN

A geomágneses zavarok nemcsak a transzformátorokra vannak negatív hatással, hanem az egész villamosenergia-rendszerre is. A hálózat különböző elemeiben fellépő GIC áramok együttes hatása feszültségingadozáshoz, túlterheléshez és hibás védelmi működéshez vezethet. A nagy kiterjedésű, földelt hálózatok jobban ki vannak téve az ilyen zavaroknak, mivel a hosszú vezetékek mentén kialakuló potenciálkülönbségek földáramokat generálhatnak, amelyek hatással vannak az alállomások földelőrendszereire, vezetékeire, védelmi berendezéseire és akár a vezérlőelektronikára is.

A GIC hatására fellépő egyenáramú komponensek megnövelik a berendezések reaktív teljesítményigényét, ezáltal a rendszer meddőteljesítmény-mérlegét is megboríthatják, ami frekvencia- és feszültség ingadozásokhoz vezethet. A generátorok és szabályozók is érzékenyen reagálnak ezekre a feszültségváltozásokra, ami stabilitási problémákat okozhat, és a rendszer összeomlásához is vezethet, amint azt például az 1989-es quebeci áramszünetnél is láthattuk. Mindemellett a védelmi relék téves működése miatt a hibák lokalizálása és a hibaelhárítás is nehezebbé válik, ami tovább növeli a kiesési időt és a rendszer instabilitását.

5.1 Monitoring rendszerek szükségessége

A villamosenergia-hálózat monitoringja a villamosenergia-infrastruktúra állapotának folyamatos, vagy időnkénti figyelemmel kísérését, ellenőrzését jelenti. A monitoring rendszerek lehetővé teszik, hogy a rendszerüzemeltetők folyamatosan figyelemmel kísérjék a hálózat állapotát. Egy alállomáson már önmagában rengeteg mérő és védelmi berendezés található. Ilyenek például a feszültség és áramváltók, megszakítók, a transzformátorban a tekercs és olajhőmérők, olajsztintjelzők, oldottgáz analizátorok, buchholz-relék, stb. Ezen berendezések analóg vagy digitális módon kapcsolódnak egy központi monitoring-rendszerhez, mellyel felügyelhető a villamosenergia-rendszer biztonsága. A következőkben a GIC által okozott problémák lehetséges mérési módszereiről lesz szó.

5.1.1 Hall-effektus érzékelők

Mivel a hagyományos áramváltók nem használhatók DC áramú komponensek mérésére, ezért egy alternatív megoldást kell keresnünk a GIC áram monitorozására. Mint ahogy azt a korábbiakból megtudtuk, a geomágneses indukált áram a földelt csillagponton keresztül kerül a rendszerbe. A transzformátor csillagpontján jelentkező egyenáramok mérésére ajánlott módszer az úgynevezett Hall-effektuson alapuló áramérzékelő alkalmazása. A Hall-effektus egy olyan fizikai jelenség, amit akkor figyelhetünk meg, amikor egy elektromos árammal átjárt vezető egy vele merőleges irányú mágneses térbe kerül. Ilyenkor az anyagban mozgó töltéshordozók a Lorentz-erő hatására oldalirányba eltérülnek, ami az anyag egyik oldalán feszültségkülönbséget hoz létre. A Hall-effektus érzékelők olyan speciális áramváltók, melyek a DC áram által okozott mágneses teret is képesek mérni, és az így kapott mért értékeket a monitoring rendszerbe küldi. [7] [30]

5.1.2 Optikai áramváltók

Másik megoldás az optikai áramváltó, melynek működése a Faraday-effektus fizikai jelenségen alapul. A Faraday-effektus lényege, hogy egy mágneses tér hatására a fény polarizációs síkja elfordul, amikor az fényvezető anyagon halad keresztül. Az áram által létrehozott mágneses tér tehát befolyásolja a fény polarizációját, amely alapján az áram nagysága meghatározható. A fény egy optikai szálon vagy más speciális anyagon (üvegen) keresztül halad, amelyet polarizál a mágneses tér változása. A polarizációs szög változását egy optikai érzékelő méri, és ebből számítják ki az áram értékét. [7][31]

5.1.3 SMDA és DOGME rendszer

1989 márciusában egy geomágneses zavar miatt lekapcsolt a kanadai Hydro-Québec energia-rendszer. Azóta kiemelt fontosságot szenteltek a jelenségnek, és két figyelőrendszert is kiépítettek: az SMDA és a DOGME rendszert.

Az SMDA (Solar Magnetic Disturbance Asymmetry) rendszer a feszültség aszimmetriáját és az páros számú felharmonikusokat (EHD - Even Harmonic Distortion) méri. A rendszer kilenc különböző alállomásról gyűjti az adatokat, és azok valós időben elemezhetőek a

rendszerirányító központban. A DOGME rendszer négy állomáson végzi ezeket az EHD méréseket, ezzel kiegészítve az SMDA által gyűjtött adatokat. A riasztások akkor történnek, ha az SMDA rendszer 2,2%-nál nagyobb felharmonikus torzulást észlel. A DOGME rendszer esetében 2,6% a riasztási határ. A rendszerirányító központ operátorai 50 MVAr beépített kapacitív teljesítménnyel tudják kompenzálni a 735 kV feszültség szintű hálózatot. [7] [23]

5.2 Megelőzés, védekezés a jelenség ellen

A károk megelőzése ellen több lehetséges megoldás létezik. Vannak tervezési szabályok, melyeket alkalmazva csökkenthető a megjelenő áram nagysága. Fentebb láthattuk, hogy a mágneses ellenállás növelésével csökkenthető a DC fluxus eltolódása. Ez megoldható rosszabb minőségű (de nagyobb tömegű) vasmag használatával, vagy olyan vasmaggal, melynek a BH görbéje nem laposodik erőteljesen. Ez a megoldás viszont a normál működést is befolyásolja. Szintén előnyt jelent a 3 oszlopos 3 fázisú vasmag kialakítás, mivel a transzformátortartályban záródó zérussorrendű fluxus nagyobb mágneses ellenálláson keresztül záródik. A delta kapcsolású tekercsek vagy a kiegyenlítő tercier tekercselés ellengerjesztés révén csökkenti a fluxus nagyságát, ezzel kompenzálva a telítést. Az aktív rész és a transzformátor tank fala közt nagyobb távolságot hagyva csökkenthetjük a fluxuscspadába, és a szekrényfalba szóródó tér nagyságát. Az indukció helyes megválasztása, a tekercsek geometriája, a menetfeszültség kiválasztása, és a transzformátor rövidzársi impedanciájának növelése mind-mind segít a GIC hatásainak csökkentésében. [7] [24]

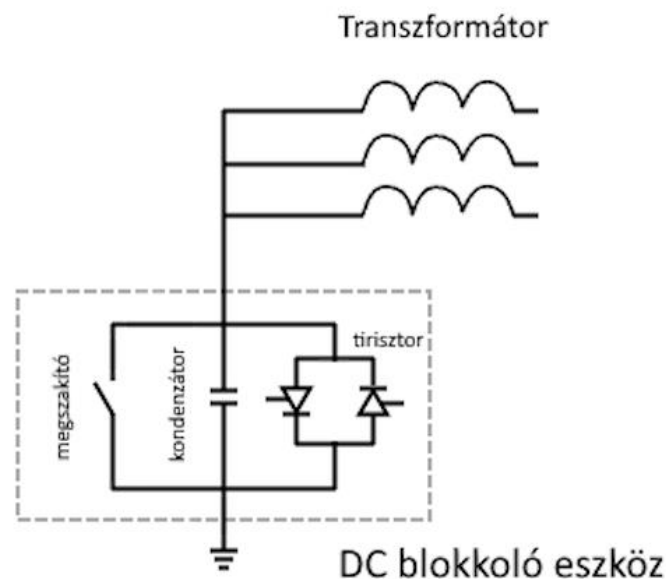
5.2.1 Sorba kapcsolt kondenzátortelepek

Az egyik lehetséges megoldás a GIC rendszerbe jutásának megelőzésére a rendszerbe beépített soros kondenzátorok alkalmazása. A soros kondenzátorok lényege, hogy megszakítják az egyenáram útját a távvezetéseken, mivel a kondenzátorok nem vezetnek az egyenáramot. Ezáltal a GIC nem jut el a transzformátor csillagpontjáig, így a probléma forrásánál történik a beavatkozás. Ez a módszer akkor előnyös, ha a transzformátor földelésébe építendő DC-blokkoló eszköz alkalmazása technikailag nehéz vagy költséges lenne. Ezt a soros kompenzálást általában nem a GIC-re, hanem a monopólusú HVDC rendszerek kósza áramának AC hálózatba való

injektálódásának megakadályozására használják. A megoldás viszont igen hatékonyan véd a geomágneses zavarok által okozott áramok ellen is. [7]

5.2.2 Csillagpontba szerelhető DC blokkoló eszközök

A csillagpontba szerelhető DC-blokkoló berendezéseket transzformátorok csillagpontján alkalmazkazzák, központi eleme egy nagy kapacitású kondenzátor. Hasonlóan a soros kompenzáló kondenzátorokhoz, itt is megakadályozza az egyenáram áramlását. Ennek eredményeként az egyenáram nem képes a transzformátor tekercsein keresztül folyni, így a transzformátor védve marad a DC áram hatásaitól.



25. ábra: Csillagpontba köthető DC blokkoló eszköz

A kondenzátor védelme érdekében a DC-blokkoló eszközt egy párhuzamos tirisztoros körrel és kiefeszültségű megszakítóval egészítik ki. Ezek a védelmi elemek megakadályozzák, hogy egy zárlat esetén fellépő nagy áram tönkre tegye a kondenzátort. A megszakító egy újraindító mechanizmussal is rendelkezik, amely lehetővé teszi a berendezés távoli vezérlését és automatikus visszkapcsolását.

Mivel a beépített kondenzátor megszakítja a transzformátor szilárd földelését, egy esetleges egyfázisú földzárlat során a csillagpont nagyobb feszültségre kerülhet a földhöz képest, ezért a transzformátor neutrálpontjának szigetelési szintjét meg kell növelni, és a védelmi rendszer beállításait is ennek megfelelően kell módosítani. [7]

5.2.3 DC kompenzáló berendezés

A DC kompenzáló berendezés lényege, hogy ellengerjesztést biztosítson a GIC fluxusával szemben. Egyfázisú transzformátorok esetén úgy működik, hogy a vasmagra egy kompenzáló segédtekercset helyeznek, amelybe elektronikával vezérelt egyenáramot fecskendeznek be. Ez az egyenáram úgy van beállítva, hogy mindig ellentétes mágneses teret hozzon létre, így kiegyenlíti a GIC mágneses hatását a magban. A kompenzáló áramot előállító áramkör a segédtekercsben indukált feszültséget használja áramforrásnak, majd tirisztoros fázisszög vezérléssel szabályozza a beinjektált egyenáram nagyságát. A rendszer célja, hogy a kompenzáló áram teljes mértékben kiegyenlítse a GIC hatását. Egyes DC kompenzáló rendszerek már teljesen szabványosított egységként is elérhetők egy és háromfázisú kivitelben is. A háromfázisú kivitel annyiban különbözik a fent leírtaktól, hogy a három fázis oszlopára kerülnek a segédtekercsek, és a csillagpontba helyezett detektor DC jelével arányosan fázisonként a teljes áram 1/3 részét fecskendezzük azokba.

Habár a kompenzáló berendezések közül már megjelentek az olcsóbb kivitelek, az ára még így is igen magas lehet. Az is egy fontos szempont, hogy nem akadályozza meg a GIC bekerülését a rendszerbe, csak lokálisan kompenzálja a mágneses torzítást a transzformátorban. Utólagos beépítés a legtöbb esetben nem is lehetséges, mert a segédtekercset már tervezéskor figyelembe kell venni, és számolni vele. [7]

5.2.4 Kezelőszemélyzet általi beavatkozások

Bizonyos esetekben, ha a villamosenergia-irányító személyzet úgy ítéli meg, különféle intézkedéseket hajthatnak végre egy geomágneses zavar esetén. A hálózat stabilitása érdekében lekapcsolhatnak bizonyos fogyasztókat, bekapcsolhatnak kompenzáló tartalékokat, átírányíthatják a terhelést más távvezetésekre. Azt is látják, hogy egy transzformátor részleges telítésben van, ilyenkor pedig különféle beavatkozásokat végezhetnek az alállomási berendezéseken is.

Nagy előnyt jelent, ha van biztonsági tartalék a transzformátor hűtésében, mint például az extra radiátor vagy a tartalék ventilátor, melyet manuálisan lehet kapcsolgatni, de akár egy redundáns transzformátor bekapcsolásával is komoly eredményeket érhetnek el. Ha nagyon kritikus helyzet következne be, a transzformátort kivehetik az üzemből, ezáltal védve azt a káros hatásoktól. Bár nincs tökéletes megoldás, a bemutatott öt mérséklési módszer kombinációját és összehangolt alkalmazását érdemes alkalmazni a transzformátorokat és a villamosenergia-rendszert fenyegető negatív hatások megelőzése érdekében. [7]

ÖSSZEFOGLALÁS

A diplomatervben bemutattam, hogy a napkitörések és koronakidobódások során nagyenergiájú részecskék, protonok és elektronok érkeznek a Földre, amelyek zavarják a földi mágneses teret, időben változó mágneses tér jön létre, ami feszültséget indukál a Föld felszínén. A felszín mentén létrejövő potenciálkülönbség geomágnesesen indukált áramokat hoz létre. Ezek az áramok pedig károsíthatják az elektromos hálózatot, például rádiójeleket zavarhatnak, műholdakat, csővezetékeket és transzformátorokat tehetnek tönkre. Tüzetesebben foglalkoztam a transzformátorra gyakorolt hatásokkal, megvizsgáltam a vasmagra, illetve a tekercselésre gyakorolt hatásokat, és Python segítségével (Jupyter Notebook) szimuláltam azok működését DC komponens jelenlétében. Kitértem tervezési szempontokra, melyek befolyásolhatják a transzformátor viselkedését geomágneses zavarok közben, majd ismertettem a transzformátort melegedés és a zaj szempontjából is a jelenség alatt. Téma volt a monitoring rendszerek szükségessége is, mellyel észrevehetjük a problémát és időben cselekedhetünk.

Összességében elmondható, hogy ez a téma egy, a mai napig aktív kutatási terület, és az alálomások tervezésénél - főleg a jelenségnek jobban kitett országokban (Svédország, Norvégia, Kanada) - egyre nagyobb figyelmet szentelnek. Nem csoda, hiszen a villamosenergia-rendszer egy olyan rendszer, mely látszólag stabil, ám könnyen ki lehet billenteni az egyensúlyából, és akkor előre megjósolhatatlan események sorozata indulna be. A mai modern világ elképzelhetetlen lenne elektromos áram nélkül. Hiányában leállna a közlekedés, a kommunikáció, a világítás. Nem működnének a számítógépek, nem lehetne kártyával fizetni, vagy tranzakciókat elvégezni, mondhatni egy középkori hangulat köszöntene be. A napviharak okozta végzetes rendszerösszeomlások már történtek korábban, ám ekkor civilizációnk még nem függött ilyen nagymértékben az elektromos áramtól. A mai technológiai fejlettség mellett elengedhetetlen, hogy foglalkozzunk a jelenséggel, és megoldásokat dolgozzunk ki a védekezésre.

SUMMARY

In this thesis, I have demonstrated how solar flares and coronal mass ejections release high-energy particles—protons and electrons—that reach the Earth and disturb its magnetic field. This leads to a time-varying magnetic field, which in turn induces voltages at the Earth's surface. The resulting potential differences across the surface generate geomagnetically induced currents (GICs). These currents can cause damage to electrical infrastructure, such as disrupting radio signals, harming satellites, pipelines, and power transformers.

I focused in more detail on the effects of GIC on power transformers, examining their impact on the core and windings, and used Python (via Jupyter Notebook) to simulate transformer behavior in the presence of a DC component. I also addressed design considerations that influence transformer performance during geomagnetic disturbances, and analyzed transformer heating and acoustic noise under such conditions. Finally, I discussed the importance of monitoring systems that can help detect issues early and enable timely response.

Overall, it can be said that this topic remains an active field of research today. In countries that are more exposed to these phenomena—such as Sweden, Norway, and Canada—growing attention is being paid to such effects in substation and transformer design. This is understandable, given that the power grid is a system that may seem stable on the surface, but can be easily thrown out of balance, potentially triggering a chain of unpredictable events. In today's world, life without electricity is hard to imagine. Without it, transportation, communication, and lighting would come to a halt. Computers wouldn't work, digital payments or transactions couldn't be performed—essentially, we would be pushed back into a medieval state of living.

Although major grid failures due to solar storms have occurred in the past, our civilization was not as dependent on electricity as it is today. With our current level of technological development, it is essential that we address these phenomena and develop solutions for effective mitigation.

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: <https://www.swpc.noaa.gov/> - NOAA
2. ábra: <https://siriustechnology.net/solar-granules/> - Vasco Henriques and Ainar Drews;
European Solar Telescope
3. ábra: <https://csillagvilagom.hu/nap-2/naptevenysegek/>
4. ábra: <https://magyarasztrofotosok.hu/eszleloret/?a=im&i=2856> - Komka Péter
5. ábra: <https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression> - NOAA
6. ábra: https://www.vilaglex.hu/Lexikon/Html/Magnetos_.htm - Horváth Miklós
7. ábra: saját kép
8. ábra: <https://www.swpc.noaa.gov/> - NOAA
9. ábra: <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/satellite-drag> -NOAA
10. ábra: saját rajz
11. ábra: saját rajz
12. ábra: saját rajz
13. ábra: saját rajz
14. ábra: saját rajz
15. ábra: saját rajz
16. ábra: saját rajz
17. ábra: Jupyter Notebookban készített saját diagram
18. ábra: saját rajz
19. ábra: Jupyter Notebookban készített saját diagram
20. ábra: Jupyter Notebookban készített saját diagram
21. ábra: saját rajz
22. ábra: <https://web.archive.org/web/20240305030528/https://www.oikla.com/post/perception-equal-loudness-contour-correction-smartphone-sensor> - ISO 226:2003 szabvány
23. ábra: saját rajz (ISO 226:2003 alapján)
24. ábra: saját rajz (ISO 226:2003 alapján)
25. ábra: saját rajz

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Csillagvilágom. *Nap*. <https://csillagvilagom.hu/nap-2/>
- [2] Csillagvilágom. *A Nap tulajdonságai*. <https://csillagvilagom.hu/nap-2/naptevekenysegek/>
- [3] Világlexikon. *Nap*. <https://www.vilaglex.hu/Csillag/Html/Nap.htm>
- [4] Csillagvilágom. *Naptevékenységek*. <https://csillagvilagom.hu/nap-2/naptevekenysegek/>
- [5] NOAA Space Weather Prediction Center. *Homepage*. <https://www.swpc.noaa.gov/>
- [6] Világlexikon. *Magnetoszféra*. https://www.vilaglex.hu/Lexikon/Html/Magnetos_.htm
- [7] CIGRE. (2023). *Effects of DC bias on power transformers* (Technical Brochure No. 944). <https://www.e-cigre.org/publication/944-effects-of-dc-bias-on-power-transformers.html>
- [8] Barnett, B. (1993). *Geomagnetically Induced Currents and Their Effect on Pipelines*. University of Alaska. <https://scholarworks.alaska.edu/bitstream/handle/11122/3607/GI%20Reports%20109.pdf>
- [9] NOAA NESDIS. (2024, May 24). *NOAA Scales Explanation*. <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>
- [10] Climate.gov. *Climate Change & Incoming Sunlight*. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-incoming-sunlight>
- [11] NASA Earth Observatory. *Orbits Catalog*. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/OrbitsCatalog>
- [12] NOAA SWPC. *Satellite Drag*. <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/satellite-drag>
- [13] Webbeteg. *A napkitörés egészségügyi hatásai*. <https://www.webbeteg.hu/cikkek/egeszseges/11446/a-napkitores-egeszsegugyi-hatasai>
- [14] NOAA SWPC. *HF Radio Communications Impacts*. <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/hf-radio-communications>
- [15] NOAA SWPC. *Electric Power Transmission Impacts*. <https://www.swpc.noaa.gov/impacts/electric-power-transmission>

- [16] NERC. (1990). *Quebec Disturbance Report*. https://www.nerc.com/pa/stand/geomagnetic%20disturbance%20resources%20dl/nerc_1989-quebec-disturbance_report.pdf
- [17] UNOOSA. (2017). *ISWI Boston Day 3 Presentation*. <https://www.unoosa.org/documents/pdf/psa/activities/2017/ISWI%20Boston/ISWIBostonDay3/41.pdf>
- [18] Encyclopedia.pub. *Geomagnetically Induced Currents*. <https://encyclopedia.pub/entry/36661>
- [19] Li, C., Wang, Y., Zhang, Y., & Liu, J. (2024). *Study on GIC in transformers*. *Applied Sciences*, 15(1), 264. <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/1/264>
- [20] Hamzهبahmani, M., & Griffiths, H. *Earthing Requirements for HVDC Systems*. <https://www.semanticscholar.org/paper/Earthing-requirements-for-HVDC-systems-Hamzهبahmani-Griffiths/560ec5882a27f9a5fbaee3c798ff0ce21a91d5a0>
- [21] TC Energy. *Cathodic Protection Overview*. <https://www.tcenergy.com/siteassets/pdfs/commitment/safety/pipelines-and-operations/tc-cathodic-protection.pdf>
- [22] ENTSO-E. (2002). *Final Report: Effects of Geomagnetic Disturbances*. https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/ce/report_2002_6.pdf
- [23] Seb, A. *Capacitor Behavior Under GIC*. https://indico.global/event/427/contributions/5275/attachments/1701/2829/Seb_CAP_Off.pdf
- [24] Karsai, K., Kerényi, D., & Kiss, L. *Nagytranszformátorok [Large Power Transformers]*. (Nyomtatott könyv)
- [25] EE Power. *Magnetizing and Exciting Currents in Transformers*. <https://eepower.com/technical-articles/magnetizing-and-exciting-currents-waveshapes-in-transformers/>
- [26] Li, J., Zhang, T., & Zhao, X. (2024). *Modelling DC Impact on Transformers*. *Space Weather*, 22(5). <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2024SW004235>
- [27] Green Power Control. (2017). *Effect of Direct Current on Transformers*. <https://greenpowercontrol.com/wp-content/uploads/2017/08/T9-Effect-of-Direct-Current.pdf>
- [28] Tenbohlen, S., et al. (2014). *Ageing Rate of Paper Insulation in Transformers*. https://www.researchgate.net/publication/260587340_Ageing_Rate_of_Paper_Insulation_used_in_Power_Transformers_Part_1_Oilpaper_System_with_Low_Oxygen_Concentration

- [29] ISO. (2003). *ISO 226:2003 – Acoustics – Normal Equal-Loudness-Level Contours*. International Organization for Standardization.
- [30] Britannica. *Hall Effect*. <https://www.britannica.com/science/Hall-effect>
- [31] Lumiker. *Optical Current Transformers (OCTs)*. <https://www.lumiker.com/en/optical-current-transformers-octs-fibre-optic-or-glass/>
- [32] Valverde, V., Martínez, J. A., & Castro, P. (2007). *Power quality and resonance problems due to capacitor banks and transformers*. <https://www.icrepq.com/icrepq07/317-valverde.pdf>
- [33] Dranetz-BMI. *Harmonics and power systems*. Elérhető: <https://web.archive.org/web/20091229052719/http://www.dranetz-bmi.com/pdf/harmonicsall.pdf>