



ÓBUDAI EGYETEM

Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Villamosenergetikai Intézet

SZAKDOLGOZAT

ÓE-KVK

Hallgató neve:

Bencsik József

2021.

Hallgató törzskönyvi száma:

T007948/F112904/K

Kötelezően választható tantárgycsoport: Villamosenergia-rendszerek modul



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Villamosenergetikai Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Bencsik József

Szakedolgozat száma: SZD21090213459196

Törzskönyvi száma: T007948/FI12904/K

Neptun kódja: XXXXXXXXXX

Szak: villamosmérnöki (magyar nyelven)

Specializáció: Villamosenergetikai specializáció

A dolgozat címe: Nagytranszformátorok tervezése

A dolgozat címe angolul: Design of Power Transformers

A feladat részletezése: 1. Szűgy térségében létesülő új transzformátorállomás főtranszformátorának

ajánlatkészítéséhez szükséges feladatok ismertetése.

2. Aktív rész tervezése: Munkapont meghatározása, vasmag és tekercsek műszaki kivitelezése, zárlati erőkre történő méretezés.

3. Elkészült aktív rész költségoptimalizálása, megfelelő hűtés megtervezése, lökö feszültségpróbákra történő méretezés.

4. Tenderhez szükséges tervdokumentációk ismertetése.

Intézményi konzulens neve: Morva György Ádám

A kiadott téma elévülési határideje: -

Beadási határidő: 2021. 12. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2021. 11. 29.

P.H

.....
Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom:

.....
belső konzulens

.....
külső konzulens



HALLGATÓI NYILATKOZAT

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

Budapest, 2021. 11. 30.

.....
hallgató aláírása



Tartalomjegyzék

1.Bevezetés.....	4
2.Transzformátor adatai	6
2.1.Megrendelő specifikációja.....	6
2.2.Transzformátor paraméterei.....	8
2.3.Fokozatkapcsoló kiválasztása.....	22
3.Transzformátor aktív része.....	24
3.1.Üresjárási jellemzők [9].....	24
3.1.1.Vasmag anyagok.....	26
3.1.2.Vasmag veszteségeinek csökkentése [12]	28
3.2.Vasmag megtervezése.....	31
3.2.1.Menetfeszültség.....	31
3.2.2.Indukció.....	34
3.2.3.Vasmag elrendezés [14].....	36
3.3.Tekercselések	38
3.3.1.Vezetőanyag típusok [15].....	38
3.3.2.Tekercsek kivitelezési módjai	42
3.4.Tekercsek megtervezése	43
3.4.1.Tercier „T” tekercs	43
3.4.2.Kisfeszültségű „K” tekercs	45
3.4.3.Nagyfeszültségű „N” tekercs	47
3.4.4.Szabályozó „S” tekercs	49
Szabályozótekercsünk adatai a következők:	50
3.5.Rövidzárási impedancia és veszteségek	51
4.Költségoptimalizálás.....	54
4.1.Ideális veszteség pár meghatározása	55
4.2.Ideális veszteség pár meghatározása	56



5.Feszültségpróbák [16].....	59
5.1.Igénybevételek típusai és jellemzői	59
5.1.1.Szigetelésvizsgálat célja	60
5.1.2.Ipari frekvenciás próbafeszültség	60
5.1.3.Lökőfeszültségű próba.....	61
5.2.Tekercsek közötti igénybevétel.....	62
5.3.Tárcsák közötti igénybevétel	65
5.4.Point stress	66
6.Transzformátor melegedés számítása [17]	67
6.1.Hűtéssel kapcsolatos adatok	67
6.2.Radiátoros üzem hűtésének megtervezése.	68
6.3.Ventilátoros üzem hűtésének megtervezése.	71
6.4.Radiátorok és ventilátorok	71
7.Méreték és tervezés.....	75
7.1.Körvonalrajz	75
7.2.Alkalmazott átvezetők	76
7.Konklúzió	77
Összefoglaló	78
Abstract	79
Köszönetnyilvánítás.....	80
Hivatkozások.....	81



1.Bevezetés

Szakdolgozatom célja egy Magyarországon létesülő új alállomáshoz tartozó 63 MVA főtranszformátor megtervezése. A fő hangsúly a transzformátor aktív részének és hűtésének kialakítása lesz.

Jelenleg a Ganz Transzformátor és Villamos forgógépgyártó Kft.-nél dolgozom ajánlatadó mérnökként. Munkám során a transzformátor aktív részének megtervezésével, a lökö igénybevételek előzetes számításával, megfelelő hűtés megtervezésével és a Tenderhez szükséges ajánlati dokumentációk elkészítésével foglalkozok.

Szakdolgozatomban meg fogom tervezni a transzformátor aktív részét. Ehhez megfelelő vasmag átmérőt választok és a feszültség szint alapján meghatározom az ideális tekercs kialakítást. A transzformátor rövidzárási impedanciáját az ügyél által kért értékre állítom be.

Az előzetes aktív rész megtervezése után megvizsgálom több hasonló kivitelezést költségoptimalizálás miatt. Mivel tervezés során kezdetben elég sok paramétert kell megválasztani, így az eddigi tapasztalataimat felhasználva veszem fel a helyes kiindulási értékeket. Nem biztos, hogy az első kialakítás a legoptimálisabb, ezért további változatok megvizsgálása szükséges, hogy a legideálisabb változatot kapja meg az ügyfél.

A véglegesnek tekinthető aktív részt megvizsgálom a lökö igénybevételekre is, hogy az adott elrendezés, illetve menetkeverés megfelel-e az IEC 60076-3 szabványban foglalt előírásoknak. Amennyiben axiálisan, vagy radiálisan túlzott igénybevételek lépnek fel, úgy vagy helyi megoldást kell alkalmazni, vagy más kialakítást kell választani.



A végleges aktív rész esetén megtervezem a hűtőrendszert, ami elvezeti az üzem közben keletkező hőmennyiséget. A transzformátor olajának kettős szerepe van, egyrészt szigetelési célokat szolgál, másrészt a hűtést segíti elő. A meleg olajat radiátorokba vezetjük és ott természetes úton, vagy pedig ventilátorok segítségével ismét lehűtjük.

A számításokhoz a Ganz saját aktív rész számító programját használom. A körvonalrajz elkészítéséhez pedig a CadKey program lesz a segítségemre.



2. Transzformátor adatai

Az ajánlatkészítés és az aktív rész számításának elkezdéséhez nélkülözhetetlen a transzformátor specifikációjának megismerése és a tervezéshez szükséges adatok meghatározása. Dolgozatom első részében az általánosan megadott paramétereket fogom ismertetni, valamint azokat a tényezőket, amiket adott előírás esetén figyelembe kell venni.

2.1. Megrendelő specifikációja

A transzformátor egy jelenleg is épülő 48 MW-os napelemes kiserőmű üzemeltetéséhez szükséges. Az ügyfél által benyújtott specifikáció információtartalma elégséges az aktív rész megtervezéséhez, viszont a nem definiált mennyiségeket IEC szabványok és Ganz tapasztalatok alapján fogom megválasztani.

Megrendelő által előírt paraméterek:

• Telepítési ország:	Magyarország
• Nagyfeszültségű oldal névleges feszültsége	126 kV
• Nagyfeszültségű oldal maximális feszültsége	145 kV
• Kisfeszültségű oldal névleges feszültsége	22 kV
• Kisfeszültségű oldal maximális feszültsége	24 kV
• Kiegyenlítő tercier tekercs feszültsége	6.3 kV
• Névleges frekvencia	50 Hz
• Hűtési mód:	ONAF/ONAN
• Kapcsolási csoport	YNyn6+d
• Névleges teljesítmény ONAF üzemben:	63 MVA
• Névleges teljesítmény ONAN üzemben:	50 MVA
• Tercier tekercselés teljesítménye:	ONAF/3
• Névleges rövidzárási impedancia ONAF 63 MVA esetén	15 %



- Névleges rövidzárási impedancia ONAN 50 MVA esetén 12 %
- Nagyfeszültségű oldal zárlati árama 31.5 kA
- Kisfeszültségű oldal zárlati árama 16 kA
- Szabályozási tartomány $\pm 13 \times 1.15385 \%$
- A nagyfeszültségű oldal csillagpontja mereven földelt, a kisfeszültségűé pedig ellenálláson keresztül van földelve.

Specifikációval szemben nincsenek formai követelmények mert azok megrendelőnként változnak. Az előbbi tényből kiindulva szinte lehetetlen, hogy mindegyik megrendelő megadja az összes szükséges adatot, hiszen ha nincs tapasztalatuk a tervezésben, akkor nem is tudhatják a paraméterek listáját. Jelenleg egy eléggé bő adatlappal rendelkezünk és a legfontosabb adatok szerepelnek is rajta, viszont néhány adat hiányzik, ezeket az adatok bevitelénél megadom. Amennyiben kérdéses valamelyik paraméter esetén a megrendelő pontos elképzelése, úgy további egyeztetés szükséges, hogy az elvárásainak megfelelő ajánlatot kaphasson.

A jelenlegi ajánlat esetén nem kértek sem kapitalizációs összeget, sem maximális hangnyomást, sem pedig besugárzást, viszont a szakdolgozatom kellő kidolgozásához -meg a tervezés ismertetéséhez- felvettem ezeket is többnyire átlagos értékűekre.

- ONAN hangteljesítmény 1 méter távolságra 60 dB
- ONAF hangteljesítmény 2 méter távolságra 80 dB
- Üresjáris veszteség kapitalizációs összege 5000 Euró/kW
- Rövidzárási veszteség kapitalizációs összege 2000 Euro/kW
- Nap általi besugárzás 1000 W/m²



2.2. Transzformátor paraméterei

A specifikáció áttanulmányozása és az esetlegesen felmerülő kérdések tisztázása után a tervezéshez szükséges adatokat rögzíteni kell a tervezőszoftverben. Ezek az adatok tartalmazzák az üzemi körülményeket, feszültség szinteket, valamint az elvárt veszteség- és rövidzárási feszültség értékeket.

Általános adatok:

- | | |
|--------------------------|---------------------|
| • Tekercselés típusa | Különálló tekercsek |
| • Alkalmazott szabványok | IEC |
| • Transzformátor típusa | HOKSV 63000/145 |
| • Európai Ecodesign | Igen |

Kezdeként a transzformátor általános paramétereire kell kitérnem ezért megadom, hogy hogyan kell kialakítani a tekercseket, milyen szabványokat és típusjelöléseket kell alkalmaznom, valamint az EcoDesign alkalmazását is fel kell tüntetnem.

Tekercselés típusa lehet különálló tekercselésű, ilyenkor mind a kisfeszültségű- mind pedig a nagyfeszültségű részt teljes értékű axiálisan végigfuttatott tekercsként veszem fel. Másik lehetséges kivitelezés az autotranszformátor, ebben az esetben nincs teljes értékű kisfeszültségű tekercs.

Transzformátor tervezése során szinte kivétel nélkül az IEC szabványoknak felelünk meg. Amennyiben adott mérésnél vagy tervezésnél az IEC nem tér ki kellő mértékűen, vagy pedig a megrendelő máshogy kéri, úgy alkalmazható még az IEEE szabvány is.



Típus esetén rövidítéseket használunk, így a HOKSV 63000/145 aminek a jelentése a következő:

- Háromfázisú
- Olajhűtésű
- Kiegyenlítő tercier tekercses
- Szabályozható
- Ventilátoros (ONAF) transzformátor
- 63000 kVA teljesítménnyel
- 145 kV maximális feszültséggel.

Európai Unió országokba telepítendő transzformátorok esetén kötelező alkalmazni a csúcshatásfok tényezőt. A minimális csúcshatásfok a jelenlegi 2021 Júliusában bevezetett Tier 2-es szabvány szerint legalább 99.745%-nak kell lennie. A PEI értékét a következőképpen tudjuk meghatározni: [1]

$$PEI = 1 - \frac{2 \times (P_0 + PC_0)}{St \times \sqrt{\frac{P_0 + PC_0}{P_k}}} \quad [2.2.1]$$

Ahol:

- P_0 : Üresjárási veszteség névleges feszültségen, frekvencián és középállásban.
- PC_0 : Segédüzem energiaigénye.
- P_k : Rövidzárási veszteség névleges feszültségen, frekvencián és középállásban a +75 Celsius fokos referenciahőmérsékleten.
- St : Transzformátor névleges teljesítménye.



Környezetre vonatkozó adatok:

• Üzemeltetés helyszíne	Kültéri
• Külső hőmérséklet	-25...+40 Celsius
• Maximális üzemeltetési magasság	<1000 m
• Nap általi besugárzás	1000 W/m ²
• Klíma	Átlagos
• Korrozíó elleni védelem	C4:Magas
• Maximális szélsősebesség	100 km/h

Az újonnan létesülő transzformátor egy kültéri alállomáson belül fog üzemelni, így az üzemeltetési környezetet kültériként kell felvennem. Beltéri elhelyezés esetén ügyelnem kell a megfelelő hűtés megtervezésére, mivel zárt térben gyengébb a légáramlat, így a transzformátor melegedése is jelentősebb.

Más ajánlattal kapcsolatos adatot nem adott meg számomra az ügyfél, de mivel a megrendelő magyar és Magyarországon lesz az üzemeltetés, így alapadatokat fel tudok venni. Külső hőmérséklet tekintetében a minimális és a maximális hőmérséklet a döntő. Amennyiben a minimális hőmérséklet kisebb, mint -25 Celsius fok, úgy speciális berendezéseket kell választani a segédüzemhez. A magasabb maximális hőmérséklet a megengedhető melegedésre van hatással, ha nagyobb mint +40 C, úgy csökkenteni kell a megengedhető melegedés értékét. Jelenleg az alapértékeket adtam meg a számításhoz, vagyis a minimális -25 C és a maximális +40 C fokos hőmérsékletet.



Maximális tengerszint feletti magasságot tekintve nem adták meg a pontos értéket, viszont az alállomás tervezett helye bőven 1000 méteres magasság alatt van. Fontos megjegyezni, hogy 1000 méteres magasság fölött csökkenteni kell a megengedhető maximális melegedési értékeket, 500 méterenként 3%-al [2]. A magasabb környezetben történő telepítés hátránya, hogy a ritkább levegő nehezebben vezeti a hőmérsékletet, így a melegedésekkel kapcsolatosan is szigorúbbak az előírások.

Korrózió elleni védelem esetén a környezet szennyezettségét szoktam figyelembe venni, így sorolom őket különböző kategóriákba, ahol a magasabb szám magasabb szintű védelmet jelent. Általánosságban C3 kategóriát szoktak kérni az ügyfelek. Amennyiben nem írják elő a számukra fontos korrózió elleni védelem mértékét, úgy C4-es szintet biztosítok. Tűzihorganyzást nem kért az ügyfél, így ilyen védelmet nem adok sem a szekrényen, sem pedig a radiátorokon.

Általános paraméterek a környezeti klíma, valamint a maximális szélsébség.

Üzemeltetési adatok:

- | | |
|----------------------------|-------------|
| • Fázisok száma | 3 |
| • Frekvencia | 50 Hz |
| • Záraltí áram időtartalma | 1 s |
| • Zárlat aszimmetriája | IEC |
| • Túlfeszültségek | IEC |
| • Túlterhelés | IEC 60076-7 |



Üzemeltetés szempontjából a megrendelő egy darab háromfázisú transzformátort szeretne, a többi paraméter szempontjából csak a zárlati időt adta meg, minden más standard értékű lesz.

A transzformátor kialakítása lehet egy- vagy háromfázisú kivitel is. Egyfázisú egységek jellemzően a nagy teljesítményű (több száz MVA) és nagyfeszültségű (400...750 kV) kivitelűek szoktak lenni.

Névleges frekvencia esetén választhatunk, hogy 50 vagy 60 Hz-es típust szeretnék megvalósítani. Magyarországon az 50 Hz-es változatot használjuk, de a világ másik végén (pl.Amerika) a 60Hz-es frekvenciát alkalmazzák.

A zárlati áram időtartama nagymértékben befolyásolja az aktív rész tervezését, mivel a megadott -vagy a szabványokban foglalt- zárlati teljesítményt el kell viselnie a transzformátornak. Általánosságban kettő másodperc a jellemző, nagyobb zárlati teljesítmények esetén szokták az egy másodpercet megadni.

A zárlat aszimmetriája, túlfeszültségek és túlterhelések esetén mindig az IEC szabványokban foglalt értékeket alkalmazom.

Tekercselés adatai:

- | | |
|---------------------------------|-----|
| • Vezető anyaga | Réz |
| • Gyanta alkalmazása | Nem |
| • Nagy hőfokú papír alkalmazása | Nem |



Tekercseléssel kapcsolatos paramétereket nem adott meg számomra az ügyfél, így a tapasztalataimnak megfelelően kell eljárnom. A tekercs anyaga esetemben réz, de kisebb transzformátorok esetén alkalmazhatnak alumínium vezetőt is. A vezetőket nem szükséges sem gyantával, sem pedig magas hőállóságú papírral bevonni. Utóbbinak az a különlegessége, hogy ugyanazt az öregedési mutatót magasabb hőmérsékleten éri el, mint a hagyományos papír szigetelés. A szabványos értékeknél nagyobb melegedést nem írok elő ebben az esetben sem, tehát ugyanazzal a hőmérséklettel terheljük a magasabb hőállóságú papírt is ezáltal az öregedése is lassabb.

Lassabb öregedésű szigeteléssel megnövelhető a transzformátor várható élettartalma és ennek a papírnak az alkalmazása nem jelent jelentős többletköltséget, így véleményem szerint egy nagyon hasznos fejlesztés.

Hűtés adatai:

- | | |
|------------------------|----------------|
| • Hűtés típusa | Radiátorokkal |
| • Hűtési anyag fajtája | Inhibitálatlan |
| • Hűtési anyag típusa | Ergon Hyvolt I |

A transzformátor hűtésének ONAN/ONAF üzeműnek kell lennie. Az ONAN (Oil Natural Air Natural) természetes olaj- és légáramlású üzem, valamint az ONAF (Oil Natural Air Forced) természetes olaj- mesterséges légáramlású [3] kivitelezés. A természetes olajáramlást az olaj keringetése teszi lehetővé, vagyis a tekercseknél felmelegedő olaj a zárt rendszerben felfelé fog áramolni, majd a radiátorokon keresztül lehűl és a hűvösebb olaj visszaáramlik a radiátorok aljánál a szekrénybe. A hűtés elve, hogy radiátorokon keresztül hűtjük le a szekrényben felmelegedett olajat, így a hűtés típusaként ezt is adom meg.



Olaj típusánál nem adott meg a megrendelő semmilyen előírást, így a legköltséghatékonyabb típust választottam.

Az olaj fajtájánál kettő típust különböztetünk meg, inhibitált vagy pedig inhibitálatlan. Inhibitálatlan olaj esetén az ásványi olaj nem tartalmaz adalékanyagokat, de megőrzi a tervezési karakterisztikáit. Az inhibitált olaj tartalmaz kis mennyiségű adalékot, ezáltal kémiaiilag stabilabb állapotot tudunk elérni [4].

Ennek a kiválasztása esetén figyelnem kell arra, hogy az ügyfél milyen típust szeretne. Amennyiben nem írja elő az olajat, úgy a legolcsóbb ajánlatot választom.

Szekrény adatai:

• Kivitelezés típusa	Fedeles
• Hegesztett vagy szegecselt	Hegesztett
• Konzervátor gumizsák	Nincs
• Kerekek	Nincs

A transzformátor szekrényének típusa lehet fedeles, vagy harang kialakítású. Fedeles kivitel esetén a szekrény teteje levehető és felülről tudjuk kivenni az aktív részt. Harang kialakítás esetén a szekrény lényegében leemelhető a vasmagról pont úgy, mint egy harang, tehát a fedél és az oldalfal egy egységet képez. Az Európai Unióban a fedeles kivitelt részesítik előnyben a megrendelők, a harang kialakítást meg jellemzően Oroszországban kérnek.

Szekrényünk hegesztett típusú. Itt nincs érdemi különbség aközött, hogy hegesztett, vagy pedig szegecselt a szekrény összeszerelés során.



Konzervátorban lévő gumizsákot nem kért a megrendelő, így ez nem képezi az ajánlat részét. A gumizsáknak az a feladata, hogy megakadályozza a konzervátorban lévő olaj érintkezését a levegővel, ezzel is lelassítva az olaj öregedését.

Amennyiben a transzformátorokat síneken szeretné az ügyfél tárolni, vagy pedig olyan kialakítás van az alállomáson, hogy a transzformátorokat síneken viszik az egyik pontból a másikba, úgy felszerelhető a szekrény aljára négy kerék. A szabványos távolságok betartásával így biztosítható, hogy a transzformátor alkalmas legyen sínen való tárolásra és mozgatásra.

Nagyfeszültségű oldal adatai:

• Névleges feszültség	126 kV
• Kötési mód	Csillag
• Hálózathoz való csatlakozás	Igen
• Mögöttes hálózat zárlati teljesítménye/árama	31.5 kA
• Maximális feszültség, N és NY esetén	145-52 kV
• Fokozatkapcsoló típusa	OLTC
• Szabályozási tartomány	+/-13x1.15385 %
• Lökő feszültségű próba N és NY esetén	650-250 kV
• AC feszültségű próba N és NY esetén	275-95 kV

A nagyfeszültségű oldal névleges feszültsége 126 kV. Az ehhez tartozó maximális feszültség szint az IEC 60076-3 szerint 145 kV. A szabvány megadja, hogy milyen feszültségtartományok között mekkora a rendszer -ezáltal a tervezési- maximális feszültsége, valamint a lökő próbafeszültségek esetén alkalmazandó feszültség szintek[5].

Hazai telepítés esetén elmondható, hogy a kért 126 kV tipikus nagyfeszültségű hálózati szint.



A hálózati oldal kapcsolási csoportja földelt csillag. Eddigi munkáim során szinte mindig földelt csillagpontú volt a nagyfeszültségű oldal és csak ritkán szigetelt csillag.

Tervezés során fontos definiálni, hogy az adott tekercs csatlakozik-e a hálózathoz, vagy csak kiegyenlítő funkciókat lát el. Ez a szempont a tercier tekercs esetén szokott releváns lenni.

A hálózatunk maximális zárlati teljesítménye -vagy pedig árama- általában a szabványokban foglalt értékű. Jelen esetben az ügyfél külön megadta, hogy mekkora zárlati áramot kell elviselnie a transzformátornak a korábban definiált zárlati időtartamig. A magasabb zárlati áram nagyobb erőhatást eredményez, így a zárlati igénybevételek is magasabbak. Amennyiben nem teljesen egyértelmű, hogy milyen értéket kell definiálni, úgy a biztonság javára történő tévedés miatt érdemesebb inkább a lehetséges opciók közül a magasabbat figyelembe venni. Abban az esetben, ha ezt képes a transzformátor elviselni károsodás nélkül, úgy a kisebb zárlatot is biztosan el fogja tudni viselni.

A nagyfeszültségű oldal csillagpontja lépcsős szigetelésű, tehát a feszültség szintje kisebb, mint a vonali végeké. Itt kettő típust különböztetünk meg: lehet teljes- vagy lépcsős szigetelésű a csillagpont. Teljes szigetelés esetén megegyezik a szigetelési szint a vonali végekkel. Az ügyfél nem írta elő számunkra, hogy milyen legyen a csillagpont kezelése, viszont a megrendelővel kapcsolatos korábbi tapasztalatok alapján lépcsős szigetelést választottam.



A szigetelési szint meghatározása a következőképpen történik:

- Meghatározom a vonali végek ipari frekvenciás lökő feszültségét a szabványoknak megfelelően
- A kapott ipari frekvenciás szint harmadát veszem
- Megkeresem a szabványban, hogy a kapott eredmény melyik feszültségshinthez tartozik

A vonali végek ipari frekvenciás lökő feszültsége 275 kV. Ennek az értéknek a harmada 91 kV. A kapott eredmény a 95 kV-os szinthez áll a legközelebb, hiszen itt mindig a nagyobb szintet kell választanom. A 95 kV-os szint az 52 kV-os maximális feszültségshinthez tartozik.

Fokozatkapcsolóból kettő típust különböztetünk meg:

- OLTC (On Load Tap Changer)
- DTC (De-energized Tap Changer)

Az OLTC sajátossága, hogy üzem közben is képes az áttételt változtatni, míg a DTC csak feszültségmentes állapotban képes ezt megtenni. A korábban kiszámolt csillagponti feszültségshint jelentősége itt nyer értelmet, mivel a fokozatkapcsoló maximális feszültségshintje is a csillagponthoz igazodik. Jelen elrendezés szerint, vagyis lépcsős szigetelésű csillagpont esetén elég lenne egy 72.5 kV-os névleges feszültségű fokozatkapcsoló, míg teljes szigetelés esetén már magasabbra lenne szükség.

A feszültségshabályozási tartományunkat megadta a megrendelő.

A fokozatszám még egy fontos tényezőt meghatároz nekünk, mégpedig azt, hogy a fokozatkapcsoló kialakítása milyen lehet.



Itt három típust különböztetünk meg[6]:

- Lineáris
- Irányváltós
- Durva-Finom

A lineáris szabályozás előnye, hogy a hűtendő veszteség mértéke kisebb, mint az irányváltós típus esetén fellépő mennyiség, valamint a durva-finom szabályozáshoz képest kevesebb réz szükséges a kivitelezéséhez. Hátránya, hogy az irányváltós kialakításhoz képest több réz szükséges és a maximális fokozatszám is csak 18 darab lehet.

Irányváltós szabályozás esetén nagyobb a hűtendő veszteségünk mértéke, mint a lineáris vagy a durva-finom elrendezésnél, viszont kevesebb réz mennyiség szükséges hozzá. A maximális fokozatszámunk itt 35 is lehet. Mivel általában 18 fokozatnál többet szokott kérni az ügyfél, így az irányváltós kialakítást szoktam előnyben részesíteni.

Durva-finom szabályozásnál ugyancsak kicsi a veszteségünk, viszont itt kell a legtöbb rézmennyiség. Maximális fokozatszáma megegyezik az irányváltós változattal. Nagyobb transzformátorok esetén szoktam használni ezt az elrendezést, ahol irányváltós kialakítás esetén már túlságosan nagy a tekercs hővesztesége.

A jelenlegi 63 MVA transzformátoregység nem mondható kifejezetten nagy teljesítményű darabnak, így az adott fokozatszámú áttételhez elég lesz az irányváltós kivitel is.



Kisfeszültségű oldal adatai:

• Névleges feszültség	22 kV
• Kötési mód	Csillag, 6 órás
• Hálózathoz való csatlakozás	Igen
• Mögöttes hálózat zárlati teljesítménye/árama	16 kA
• Maximális feszültség, K és KY esetén	24-24 kV
• Lökő feszültségű próba K és KY esetén	125-125 kV
• AC feszültségű próba K és KY esetén	50-50 kV

Kisfeszültségű oldalunk névleges feszültsége 22 kV. A szabvány által rögzített maximális feszültség szint 24 kV és az ehhez tartozó lökő feszültség szint 125 kV, valamint 50 kV ipari frekvenciás próbafeszültség.

A tekercs kapcsolási csoportja csillag és 6 órás kivitelű. Ez azt jelenti, hogy a kisfeszültségű oldalon lévő fázisok $6 \times 30 = 180$ fokos eltérésben vannak a nagyfeszültségű oldaléhoz képest. Deltakapcsolás esetén kialakíthatunk 1, 5 és 9 órás kivitel is, vagyis a fázisforgatásunk mértéke lehet 30, 150 és 270 fok. Csillagkapcsolásnál 0 és 6 órás megoldásokat tudunk alkalmazni, ha a nagyfeszültségű oldal csillagba van kötve. Ilyenkor vagy 0, vagy pedig 180 fokos a fázisforgatás.

A kisfeszültségű tekercsünk itt is kapcsolódik a hálózathoz, mivel az energiaátvitelben aktív szerepet fog betölteni.

A hálózatunk zárlati árama az ügyfél által volt definiálva, így az ő általuk megadott értékkel történik a számítás.

A csillagpont feszültség szintje megegyezik a vonali végek szintjével, ugyanis 72.5 kV-os maximális feszültség szint alatt teljes szigetelést alkalmazok.



Mivel ugyanarra a feszültségszintre méretezzük a csillagpontot, mint a vonali végeket, így a lökő- és ipari frekvenciás próbafeszültség is megegyezik.

Tercier oldal adatai:

• Névleges feszültség	6.3 kV
• Kötési mód	Delta
• Hálózathoz való csatlakozás	Nem
• Maximális feszültség	7.2 kV
• Lökő feszültségű próba	60 kV
• AC feszültségű próba	20 kV

A megrendelő definiálta számomra a tercier tekercselés névleges feszültségét, így az előírásnak megfelelően 6.3 kV-nak vettem fel.

A tekercs kapcsolása delta típusú mivel csak kiegyenlítő funkciókat fog ellátni, emiatt nem is kapcsolódik a hálózatunkhoz.

Kiegyenlítő tercier tekercselés esetén azt értjük, hogy az aszimmetrikus zárlatok esetén fellépő zárlati áramok ellen ampermenet révén feszültséget és áramot indukálnak a delta tekercselésben. A folyamat során kiszűri a szinuszban lévő felharmonikusokat, ezzel is javítva a hálózati feszültség minőségét.

A szabványban foglalt maximális feszültségérték 7.2 kV és az ehhez tartozó lökő- és ipari frekvenciás próbafeszültség pedig 60- és 20 kV.



Hűtés [7]:

- | | |
|-------------------------|------|
| • Felső olaj melegedése | 60 K |
| • Tekercsek melegedése | 65 K |
| • Melegpont melegedése | 78 K |

Melegedésnél a maximális és minimális környezeti hőmérséklet a mérvadó. Jelen esetben a maximális külső hőmérséklet +40 Celsius fok. Ehhez adjuk hozzá a szabványban foglalt melegedési értéket, ami az olaj felső hőmérsékleténél +60 K, tekercsek esetén +65 K és a melegpont esetén +78 K. Amennyiben a külső hőmérséklet eltér a +40 Celsius foktól, úgy a melegedési értékeket is korrigálni kell.

-Üresjárási és rövidzárási veszteségek

Az ügyfél nem írt elő számomra maximális veszteség párokat, így a PEI értékét kell egyedül tartanom. Amennyiben előírják ezeket az értékeket, úgy szabvány szerint a rövidzárási és üresjárási veszteségekre +15%-os toleranciával tudok dolgozni. Összes veszteség esetén ez a toleranciaérték csak +10% lehet.

-Zaj előírás és segédüzem vesztesége

A transzformátor maximális hangnyomása adott külön ONAN és külön ONAF esetre. ONAN esetén maximum 60 dB a megengedett érték és ezt a transzformátortól 1 méter távolságra mérjük. ONAF esetén 80 dB a maximális érték amit 2 méter távolság esetén mérünk meg. Előírható még a transzformátor hangteljesítménye is. A hangteljesítmény független a távolságtól és az értéke is magasabb, mint a hangnyomásé.



2.3.Fokozatkapcsoló kiválasztása

Előírt adatok a fokozatkapcsolóval kapcsolatosan:

- +-13 fokozat és egy középállás ami összesen 27 pozíció.
- Fokozatonként a névleges feszültséget 1.15385%-al változtatjuk.

Fokozatkapcsoló kiválasztásánál a következő szempontokat kell figyelembe vennem:

- Milyen legyen a fokozatkapcsoló típusa?
- Mekkora legyen a maximális feszültsége?
- Mekkora legyen a maximális árama?

Gyártókat tekintve kettő fő beszállítónk van, az ABB és az MR. Az északi skandináv államok előnyben részesítik az ABB kapcsolókat, míg a közép- és nyugat Európaiak inkább az MR-t írják elő. Jelen ajánlat esetén nem volt megkötés a gyártóval kapcsolatosan, így kedvezőbb költségek miatt az MR-t választottam.

Fokozatkapcsoló kiválasztásához szükséges adatok:

- Névleges tervezési áram 340 Amper.
- Fokozatonkénti feszültség 839 Volt.
- Fokozatonkénti teljesítmény 285 kVA.
- Szigetelési szint 52 kV névleges, 95 kV AC és 250 kV lökö.
- Fokozatok száma 27.
- 1x3 fázisú kivitel.



A fenti adatokat figyelembe véve kell kiválasztanom a megfelelő kapcsolót.

Az MR már csak vákuum szigetelésű kapcsolókat gyárt, így ennek tudatában a katalógusból a következőt választottam:

- Gyártó: MR.
- Típus: VM III 350 Y.
- Kapcsolása 14-27-1W.
- Rendszerfeszültsége 72.5 kV.
- AC próbaszintje 140 kV.
- Lökő próbaszintje 350 kV.
- Kialakítása: Irányváltós.

Fontos paraméter még a fokozatkapcsoló esetén, hogy milyen választóhenger szükséges nekünk. A típusa lehet B, C, D, vagy pedig E. Ezek közül a B kialakítás a legolcsóbb, az E pedig a legdrágább.

A kiválasztásához a következő képletet tudjuk alkalmazni[8]:

$$Li \times 2 \times \frac{s}{1-s} = 650 \times 2 \times \frac{0.15}{1-0.15} = 229.5 \quad [2.3.1]$$

Ahol:

- Li: A lökő igénybevétel mértéke.
- s: A szabályozási tartomány nem százalékos alakban.

A végeredményünket összevetve a katalógusban szereplő adatokkal azt kapjuk, hogy az adott fokozatkapcsolóhoz megfelelő egy B típusú választóhenger is.



3. Transzformátor aktív része

A fejezet során megtervezem a transzformátor aktív részét, a vasmagot és a tekercseket. A tervezés során demonstrálom azokat az eljárásokat, amelyekkel érdemben lehet csökkenteni az üzemeltetés során fellépő veszteségeket.

3.1. Üresjárási jellemzők [9]

A transzformátor működési alapelve, hogy a primer tekercselés által létrehozott mágneses fluxust a vasmag a nagy mágneses vezetőképessége lévén magába zárja, majd továbbítja a szekunder tekercselés felé. Maga a vasmag nem tömör anyagból áll, hanem lemezelt vasanyagból építik meg. A lemezelés lényege, hogy csökkentsük az örvényáramok mértékét, ezáltal kisebb lesz a veszteség és a melegedés is.

A transzformátor maximális teljesítménye meghatározza nekem, hogy mekkora vasmag átmérőre lesz szükségem. A nagyobb teljesítményű transzformátorokhoz nagyobb átmérő szükséges, vagyis a vasmag mérete is növekedni fog. Másik fontos tényező a menetfeszültség értéke. Kisebb menetfeszültséghez kevesebb indukció tartozik, így a vasmag tömege is csökkenthető.

A vasmag tömege nem csak az aktív rész teljesítményét adja meg nekem, hanem az üresjárási veszteség értékét is. A transzformátorunknak üresjárási árama kettő komponensből épül fel:

- Hatásos összetevő.
- Meddő összetevő.



A meddő összetevő értéke többszöröse a hatásos összetevőének, így azt kapjuk, hogy az üresjárási áramunk nagyjából megegyezik a meddő összetevő abszolút értékével.

Vasvesztésünket úgy kapjuk meg, hogy meghatározom az örvényáram veszteséget, valamint a hiszterézis veszteséget.

$$P_o = \frac{1.65 \times f^2 \times Bm^2 \times \nu^2}{\varrho \times d} \times m = \sigma \times (f \times Bm \times \nu)^2 \times m \quad [3.1.1]$$

3.1.1. Örvényáram veszteség számítása

Ahol:

- P_o Örvényáram veszteség. (W)
- f Frekvencia. (Hz)
- Bm Mágneses indukció csúcsértéke. (T)
- ν Mágneses indukcióvonalakra merőleges legkisebb méret. (m)
- ϱ Vaslemez fajlagos ellenállása. (Ωm)
- d Vaslemez sűrűsége. (kg/m^3)
- m Vaslemez tömege. (kg)
- σ Egyszerűsítés, $200 \dots 1000 \frac{m^2}{\Omega \times kg}$.



3.1.1. Vasmag anyagok

A lemezelés során felhasznált anyagtípusoknak különböző a veszteségük. Az alacsonyabb veszteségű vasmaganyagnak magasabb a költsége, így tervezés során az alábbi szempontokat kell figyelembe vennem:

- Adtak-e meg maximális indukciót?
- Adott-e a maximális zaj?
- Definiálták-e a maximális üresjárási veszteséget?
- Előírtak-e maximális tömeget?

A korszerű vasmaganyagok telítése 2.05 T körül van, viszont a hálózaton fellépő túlfeszültségek miatt nem érdemes 1.75 T fölé menni tervezés során. A vasmaganyagok esetén megadják az 1.7 T indukcióhoz tartozó fajlagos veszteséget.

Néhány anyagtípus[10]:

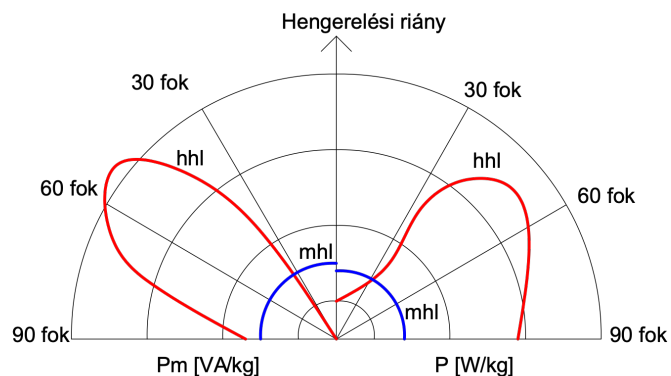
- M120-30.
- M115-30.
- M075-23DR.

Ahol a jelölések a következőket jelentik:

- M: Mágneses anyag.
- A három darab szám a kilogrammonkénti veszteség 100 szoros értékét, vagyis 120 esetén 1.2 W/kg, 075 esetén pedig 0.75 W/kg.
- Az utána következő kettő szám a lemez vastagságát adja meg. Amennyiben a szám 30, úgy 0.3 mm, 23 esetén pedig 0.23 mm vastag egy darab lemez.
- A DR jelölés a Domain Refined, lézerkezelés rövidítése.



A vasmaganyagok jellemzően kettő különféle kialakításban készülnek, melegen hengerelt és hidegen hengerelt lemezként. A lenti ábra bemutatja, hogy hogyan változik a vasvesztés értéke a rájuk eső erővonalak beesési szögének függvényében[11].



3.1.1.1 Vasmaganyag veszteségek

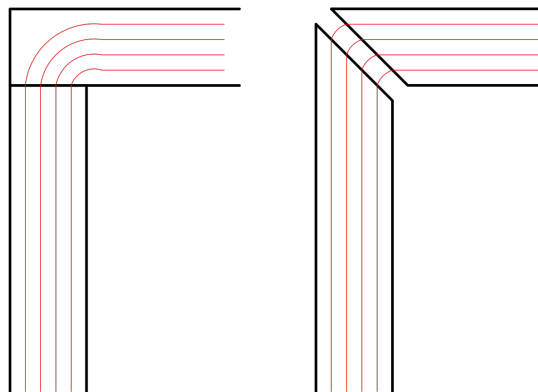
Régebben a melegen hengerelt lemezek (mhl) voltak előnyben részesítve, mivel ezeknek a vesztesége független a fluxus irányától és mindig ugyanakkora a vasvesztésük. Mostani modern transzformátorok esetén hidegen hengerelt lemezeket (hhl) alkalmazunk. Ennek a típusnak sokkal nagyobb a vesztesége, ha a ráeső fluxus nem nulla fokban esik. Ha ki tudjuk küszöbölni ezt a problémát, akkor a veszteségünk sokkal kisebb, mint a melegen hengerelt változat esetén. Mivel a vasmag járomjaiban a mágneses fluxusnak többnyire csak axiális összetevője van, -radiális komponens értéke elhanyagolható- így többnyire a nulla fokos tartományban vagyunk, tehát a vasvesztésünk ebben az esetben kisebb, mint a melegen hengerelt lemez esetén.



3.1.2. Vasmag veszteségeinek csökkentése [12]

Az indukcióvonalak beesési szöge akkor okoz nekünk problémát, amikor a vasanyagban nem pont a hengereléssel párhuzamosan halad, hanem attól eltérően. Ilyenkor többletvesztés keletkezik és az adott pont -jelen esetben a transzformátor sarkai- jobban fog melegedni.

A mágneses fluxus beesési szögének csökkentése érdekében a vaslemezeket átlósan kell elvágni. Amennyiben megfelelően illesztettjük a vasmag lemezeket, úgy kisebb vasvesztés mellett jobb fluxuselozást és kisebb zajszintet tudunk elérni.



3.1.2.1. Indukcióvonalak iránya

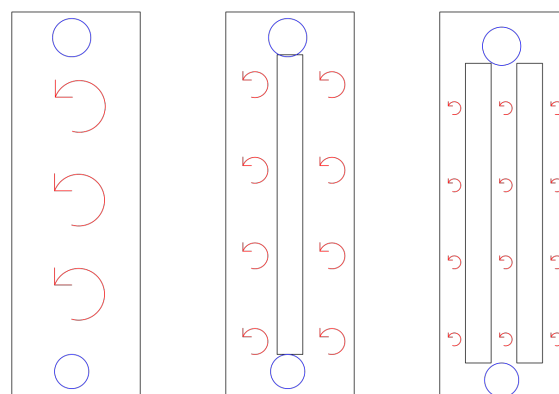
A vasmag több különböző méretű lemezből áll, hogy az örvényáramokat csökkenteni tudjuk, ezzel is kisebb a veszteség értéke.

Amennyiben a tekercshez közelebbi vasmag lemezekben jelentős mértékű az örvényáram, úgy különböző részekre kell osztani, hogy ne tudjon akkora zárt hurok kialakulni, ezzel is csökkentjük a veszteséget és a melegedést is.



A lemezek felosztásához különböző módszerek használatosak, ezek közül az alábbiak az ismereteseek:

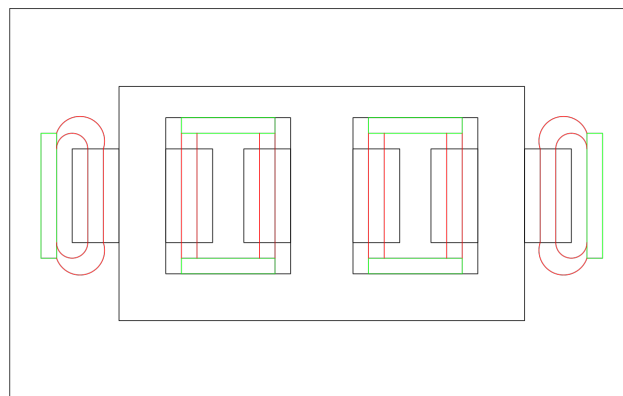
- Az osztás a lemez aljától a tetejéig történik.
- A lemezt teljesen kettévágjuk.
- A lemezt két oldalról nagyjából a közepéig bevágjuk és középen egy részt képez a lemez.



3.1.2.2. Örvényáramok csökkentése

A legutolsó megoldást nem célszerű használni, mivel veszteség szempontjából előnyösebb az, hogy nem hagyunk középen teret az örvényáramoknak. A lemezek teljes szétvágása csupán gyártástechnikai okok miatt nem előnyös. A fenti problémák miatt az ábrán (3.1.2.2) látható elrendezést alkalmazzuk.

Nagy névleges teljesítményű Transzformátorok esetén -jellemzően 40 MVA fölött- elég nagy a szórt fluxus, ami jelentős mértékben záródik a szekrény fém szerkezetében, ezért fluxuscsapdákat kell elhelyezni. Ezek nagy permeabilitású anyagból készült fém lemezek, amiknek az anyaga jellemzően megegyezik a vasmagével. Feladatuk, hogy a szórt fluxust magukban zárják, ezzel is megakadályozva, hogy a szekrény falában többletvesztéseket okozzanak. [13]



3.1.2.2. Fluxuscsapdázás

Ennek a módszernek az az előnye, hogy a szórt mágneses teret a tervezés során tudom kialakítani. A veszteségeink viszonylag tág határok között fognak mozogni, ezeknek az értékeit a csapdázás keresztmetszetének megváltoztatásával tudom módosítani.

Többletvesztést nem csak a transzformátor szekrény oldalfalában tud fellépni, hanem a nagyáramú átvezetők kivezetéseinél is. Ilyen esetben a kivezetések között ferromágneses részt helyezünk el. Az itt elhelyezett anyagot megszakítjuk, majd a megszakított részt antimágneses anyaggal helyettesítjük.



3.2. Vasmag megtervezése

A vasmaganyag kiválasztását és a veszteségek csökkentését követően kiválasztom a szükséges vasmag keresztmetszetet. Ehhez elsősorban ismernem kell a menetfeszültség értékét, majd ennek segítségével kiszámolom a maximális indukciót. A későbbi számítások során látható lesz, hogy a fluxus és a vasmag átmérő értékével határozom meg az indukciót. A számítás során vagy az indukciót, vagy pedig a vasmag átmérőt kell előre definiálnom, én az utóbbi mellett döntöttem. Itt a szakmai tapasztalatomra hagyatkozok, hogy adott teljesítményhez és rövidzárási feszültséghez mekkora átmérő szükséges, majd ehhez felveszek egy egy fokozatonkénti menetszámot és úgy ellenőrzöm le, hogy a kapott indukció megfelelő-e. Itt maximális értéként 1.7...1.75 T-t vehetek fel. Későbbi vasmag átmérő és menetfeszültség változtatás a rövidzárási feszültség függvényében történik.

3.2.1. Menetfeszültség

Névleges vonali feszültségünk primer oldalon 126 kV, szekunder oldalon pedig 22 kV.

A tercier tekercselés feszültsége 6.3 kV, ez viszont deltában van, így nem kell átszámolnunk a fázisfeszültség értékére.

Primer oldal fázisfeszültség meghatározása:

$$U_{pf} = \frac{U_p}{\sqrt{3}} = \frac{126kV}{\sqrt{3}} = 72.53kV \quad [3.2.1.1]$$

Ahol:

- U_{pf} : Primer oldal fázisfeszültség értéke.
- U_p : Primer oldal vonali feszültsége.



Szekunder oldal fázisfeszültségének meghatározása

$$U_{szf} = \frac{U_{sz}}{\sqrt{3}} = \frac{22kV}{\sqrt{3}} = 12.66kV \quad [3.2.1.2]$$

Ahol:

- U_{szf} : Szekunder oldal fázisfeszültsége.
- U_{sz} : Szekunder oldal vonali feszültsége.

A szabályozási tartományunk a következő:

$$Stekercs = \pm 13 \times 1.153\% = \pm 15\% \quad [3.2.1.3]$$

Ahol:

- $Stekercs$: A tekercs szabályozási tartománya.

Ez azt jelenti, hogy a végállásban lévő maximális feszültségünk a következő:

$$StekercsVeg = Upf \times Stekercs = 72.53 \times 0.15 = 10.879kV \quad [3.2.1.4]$$

Ahol:

- $StekercsVeg$: A Szabályozótekercs végállásában lévő plusz feszültség.

Következő lépésként meghatározzuk a fokozatonkénti menetszámot, ez jelen esetünkben 9 lesz. A meghatározása lehetne tetszőleges érték is, viszont a maximális indukció -ami esetünkben 1.75 T- fog gátat szabni. Mivel csak ellenőrzéssel tudjuk megállapítani, hogy a választott fokozatonkénti menetszám megfelelő-e, így a tapasztalataimat használva határoztam meg az értékét.



Meghatározzuk a végállásban lévő extra menetszámot:

$$N_v = 13 \times 9 = 117 \quad [3.2.1.5]$$

Ahol:

- N_v : Végállásban lévő menetszám.

Így minden adott, hogy kiszámoljuk a menetfeszültség értékét:

$$U_N = \frac{StekercsVeg}{N_v} = \frac{10.879kV}{117} = 92.982 \frac{V}{menet} \quad [3.2.1.6]$$

Ahol:

- U_N : Menetfeszültség.

A menetfeszültség értékének ismeretében meg tudom határozni a névleges feszültségshinthez szükséges ideális menetszámot. Mivel szinte lehetetlen, hogy egész menetszám értéket kapjak, így a végeredményt kerekítenem kell. A pontosabb áttétel miatt érdemes a matematika szabályai szerint eljárnom.

$$N_N = \frac{U_{pf}}{U_N} = \frac{72.53kV}{92.982 \frac{V}{menet}} = 780.04menet \quad [3.2.1.7]$$

$$N_K = \frac{U_{pf}}{U_N} = \frac{12.66kV}{92.982 \frac{V}{menet}} = 136.15menet \quad [3.2.1.8]$$

$$N_T = \frac{U_{pf}}{U_N} = \frac{6.3kV}{92.982 \frac{V}{menet}} = 67.75menet \quad [3.2.1.9]$$



Ahol:

- NN: Nagyfeszültségű oldal menetszáma.
- NK: Kisfeszültségű oldal menetszáma.
- NT: Tercier oldal menetszáma.

Tervezés során a következő menetszám értékeket választottam:

$$NN = 779menet \quad [3.2.1.10]$$

$$NK = 136menet \quad [3.2.1.11]$$

$$NT = 67menet \quad [3.2.1.12]$$

3.2.2.Indukció

A számításhoz szükséges a vasmag átmérőjének meghatározása. A munkám során szerzett tapasztalataimat felhasználva 58 cm értékben határoztam meg. Amennyiben szükséges az indukció miatt változtatni az értékét, úgy a számítások végeztével utólag korrigálhatom az értéket.

Az indukció számára hatásos keresztmetszet meghatározása:

$$A = \frac{\pi}{4} \times D^2 = \frac{\pi}{4} \times (58cm)^2 = 2640.74cm^2 \quad [3.2.2.1]$$

Ahol:

- A: Vasmag keresztmetszete.
- D: Vasmag átmérő.



Mivel a vasmag nem tökéletes kör, így a tényleges keresztmetszet nagyjából 7...8.5 %-al kisebb, mint a számított érték. Az eltérés további okozója a vasmag közepében elhelyezett hűtőcsatorna.

Korrigált keresztmetszet értéke:

$$A_k = A \times (1 - 0.084) = 2640.74 \times 0.916 = 2418.91 \text{ cm}^2 \quad [3.2.2.2]$$

Ahol:

- A_k : Korrigált keresztmetszet.

Fluxus sűrűség meghatározása:

$$\phi = \frac{U_{pf}}{4.44 \times f \times NN} = \frac{72.53 \text{ kV}}{4.44 \times 50 \text{ Hz} \times 779 \text{ menet}} = 0.4194 \text{ Wb} \quad [3.2.2.3]$$

Ahol:

- ϕ : Mágneses fluxus.

Indukció számítása:

$$B = \frac{\phi \times 10000}{A_k} = \frac{0.4194 \text{ Wb} \times 10000}{2418.91 \text{ cm}^2} = 1.733 \text{ T} \quad [3.2.2.4]$$

Ahol:

- B : Indukció

Az indukciónk értéke bár magas, még benne vagyok az 1.75 T maximális határban, így a vasmag átmérőnek az értéke megfelelő, vagy esetlegesen korrigálható 58.5 cm értékre.



3.2.3. Vasmag elrendezés [14]

Vasmag elrendezési típusoknál kettő fő kategóriát különböztetünk meg:

- Mag típusú.
- Köpeny típusú.

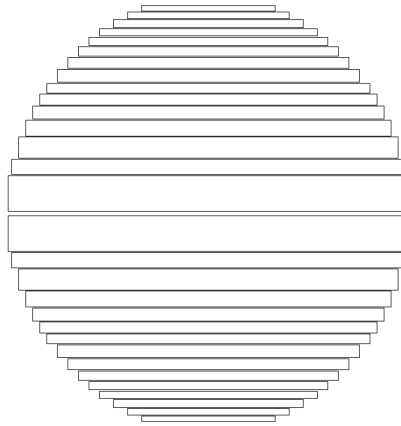
Háromfázisú transzformátor esetén kettő elrendezési módot alakíthatunk ki:

- Type 3.
- Type 5.

A Type 3 a köpeny típusú transzformátorok ismertetője, ebben az esetben a tekercsek a külső vasmag járom helyezkedik el. Mag típusú transzformátorok esetén, tehát Type 5 kivitelezésnél kívül elhelyezkedik 1-1 járom, aminek a vastagsága a középső járomok felének felelnek meg. A mag típusú elrendezés előnye, hogy alacsonyabb aktív rész alakítható ki, így kifejezetten előnyös az alkalmazása ott, ahol szigorú előírások vannak a magasságokkal kapcsolatosan. A köpeny típus előnye, hogy olcsóbb a kialakítása, mint a mag típusúnak.

Ahol a járomok találkoznak, ott kerüljük a derékszögben történő csatlakozást, a korábban kifejtett többletveszteségek miatt. Ilyen esetben 45 fokban történik a kivágás, a középső járom esetén pedig mind a kettő irányba elvégezzük ezt a bevágást. A járomok csatlakozásánál a lemezeket átlapolással helyezzük el, mert ezzel a megoldással is tudjuk csökkenteni a veszteségeket. A lemezeket tudjuk kettő-, három- valamint négy rétegenként átlapolni.

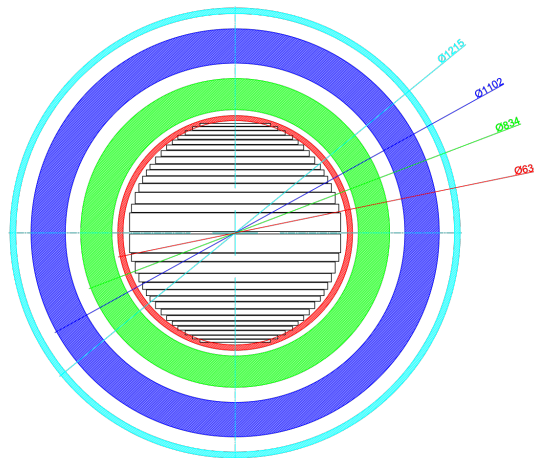
A kör alakú vasmag azért is fontos, mivel a meggombolyított tekercseket így tudjuk a legoptimálisabban elhelyezni a járomon.



3.2.3.1. Vasmag járom keresztmetszete

Négyzet alakú vasmag esetén nagy lenne a légrés, mivel csak a járom sarkainál lenne kicsi a vasmag és tekercs közötti távolság.

Általános tervezési irányelv, hogy a vasmaghoz legközelebb eső tekercs legyen a legkisebb feszültségű és így haladjunk lépcsőzetesen egyre távolabb. Mivel a tercier tekercsünk névleges feszültsége a legkisebb, így közte és a vasmag között nem szükséges jelentős mértékű szigetelés beiktatása. A nagyfeszültségű tekercsünk kívül helyezkedik el, viszont közte és a vasmag között már van kettő tekercs, valamint a köztük lévő főszigetelés, így alpból kapunk egy viszonylag nagy szigetelési távolságot a tekercs és a járom között. Amennyiben a nagyfeszültségű tekercs lenne legbelül elhelyezve, úgy a főszigetelés vastagságát jelentősen meg kellene növelni, valamint a kis- és tercier tekercset is negatívan érinteni, hogy sokkal távolabb helyezkednek el a vasmaghoz képest. A megnövelt távolságok miatt több anyag szükséges, hogy megtekercseljük ezeket a tekercseket.



Tekercsek elrendezése a vasmag körül

3.3. Tekercselések

A nagytranszformátorok tekercselése alatt az egy feszültségshinthez tartozó menetek összességét értjük. Jelen fejezetben a tervezés során alkalmazott eljárásokat, anyagkiválasztásokat és elrendezéseket ismertetem, majd az ajánlat igényeinek megfelelően kiválasztom a kiindulási értékeket.

3.3.1. Vezetőanyag típusok [15]

A tekercselések esetén alkalmazott vezetőanyagok kivitelezése szerint az alábbi megoldásokat ismerjük:

- Egy erű vezetőanyag
 - Kettős axiális vezető
 - Kettős radiális vezető
 - Hármás radiális vezető
 - CTC vezető -Continously Transposed Conductor vagy fonott vezető-
- CTC vezető esetén kettő típust különböztetünk meg, a hálós és a papír szigetelésű kivitel.



A vezetőanyagok esetén a vezeték szélei lekerekítettek, mivel így kedvezőbb a villamos erőtér eloszlása, valamint az éles sarkak gombolyítás során megsérthetik a szomszédos szigetelőket.

A vezetősál esetünkben nem kör alakú, hanem lapos kivitelű téglalap. Ennek előnye a jobb helykihasználás, szorosabb és stabilabb tekercselés készíthető.

Méretezések során figyelembe kell vennem a gyártástechnikai ajánlásokat, így nem készíthető bármilyen arányú vezeték. Továbbá a beszállítók igényeit is figyelembe kell venni, így az alap méretek között maradva jelentős anyagi költséget lehet megspórolni.

A következő szempontokat kell figyelembe vennem az egyes vezetékek esetén:

- Egy erű vezeték esetén az axiális érték 1-től 5 mm-ig, a radiális 3-tól 15 mm-ig terjedjen, figyelve az 1:3-hoz arányra. Amennyiben szükséges és megengedhető, úgy 1:2-höz arány is alkalmazható.
- Kettős és hármas vezetők esetén axiálisan érdemes legalább 10 mm magasságot tartani, de maximum 12.5 mm. Radiálisan legalább 1.3 mm, de maximum 2 mm legyen elemszálanként.
- CTC papír szigetelésű vezető esetén axiálisan ne legyen kisebb a magassága, mint 4 mm, maximális értéke pedig 8 mm körüli. Radiális méreteit tekintve legalább 1.2, de maximum 1.5 mm legyen. Elemszám tekintetében legalább 11, de maximum 47 legyen.
- Hálós CTC vezeték esetén is hasonló követelmények vannak, mint a papír szigetelésű kivitelnél.

Típus kiválasztásánál a hálózati feszültség, valamint a transzformátor névleges teljesítménye és ezáltal pedig az árama a meghatározó. Mivel a méretek valamennyire adottak az egyes vezetéktípusok esetén, így nagyobb



teljesítményhez több radiális vezetőpárt kell alkalmazni. Ugyanakkor a tekercs gombolyítása során, valamint menetkeverés során problémát okozhat, ha sok radiális vezető van egymás mellett, így ilyen esetben érdemes radiális ikervezetőt, vagy CTC vezetőt alkalmazni.

Jelen ajánlat esetén a névleges teljesítményünk 63 MVA, nagyfeszültségű oldal névleges feszültsége 126 kV, kisfeszültség oldal pedig 22 kV. A nagyfeszültségű oldalon akkor folyik a legnagyobb áram, ha a fokozatkapcsoló mínusz állásban van, vagyis a feszültségünk kisebb, konstans teljesítmény esetén pedig az áramunk nagyobb lesz. Esetünkben ez -15%-os feszültségszintet jelent, tehát a számítási feszültségünk 107.1 kV.

Nagyfeszültségű oldal névleges árama

$$I_N = \frac{S_n}{\sqrt{3} \times U_n} = \frac{63 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 107.1 \text{ kV}} = 339.6 \text{ A} \quad [3.3.1.1]$$

Kisfeszültségű oldal névleges árama

$$I_K = \frac{S_n}{\sqrt{3} \times U_n} = \frac{63 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 22 \text{ kV}} = 1653 \text{ A} \quad [3.3.1.2]$$

A tekercsekben folyó áramsűrűség hatással van a transzformátor rövidzárási feszültségére, így a pontos beállításuk a tervezés során lesz végleges. Mivel 15%-os drop-ot kérnek 63 MVA esetén, így egy átlagos tekercsmagassággal számolva nagyjából 3.5 A/mm² áramsűrűség megengedhető a kisfeszültségű tekercs esetén, a nagyfeszültségűnél meg valamivel kisebb, ott kezdésnek 3 A/mm² értéket állítok be.



Nagyfeszültségű oldal vezetőinek tervezett keresztmetszete:

$$A_N = \frac{I_N}{J_N} = \frac{339.6A}{3 \frac{A}{mm^2}} = 113.2 mm^2 \quad [3.3.1.3]$$

Kisfeszültségű oldal vezetőinek tervezett keresztmetszete:

$$A_K = \frac{I_K}{J_K} = \frac{1653A}{3.5 \frac{A}{mm^2}} = 472.28 mm^2 \quad [3.3.1.4]$$

Mivel a nagyfeszültségű oldalon is elég magas a maximális áram értéke, így vagy hármass radiális vezetőt, vagy pedig CTC-t érdemes alkalmazni. Költséghatékonysági szempontokat figyelembe véve hármass radiális vezető fogok alkalmazni és amennyiben nem kivitelezhető az alkalmazása, úgy áttérek CTC-re.

Hármass radiális esetén felveszek egy középértéket a megadott határértékek között, axiálisan 11 mm, radiálisan pedig 1.5 mm széles vezetőt alkalmazok. Ebben az elrendezésben a névleges keresztmetszetünk $3 \times 11 \times 1.5 = 49.5 mm^2$. Kettő párhuzamos hármass radiális vezetőanyag esetén $99 mm^2$ keresztmetszetet kapunk, ami már majdnem a számolt érték. Amennyiben megnöveljük a radiális szélességet 1.75 mm-re, úgy már $115.5 mm^2$ keresztmetszetet kapunk.

Kisfeszültség esetén viszont mindenképpen CTC vezetőt kell alkalmazunk. Itt is egy középértéket felvéve, legyen 35 elemszámú, axiálisan 5 mm, radiálisan pedig 1.4 mm széles vezető. Ezzel a konstrukcióval $245 mm^2$ keresztmetszetet kapunk, de amennyiben itt is kettő radiális vezető párt alkalmazunk, akkor $490 mm^2$ értéket kapunk. Az így kapott értékünk már nagyobb, mint a számított keresztmetszet, így csökkenthetjük a CTC elemszámát. Amennyiben csak 33 db elemszámú vezetőt alkalmazunk, úgy a számított keresztmetszet $462 mm^2$.



3.3.2. Tekercsek kivitelezési módjai

Kivitelezési módok alatt a tekercselések gombolyítási módjait, illetve azoknak az elrendezését értjük.

A feszültség szint függvényében a következő tekercs típusokat választhatjuk

Fő tekercsek esetén

- Betét nélküli spirális
- Betétes spirális
- Buktatott tárcsás tekercs
- Betét nélküli tárcsás tekercs
- Belső védőmenetet tárcsás tekercs
- Menetkevert tárcsás tekercs
- Kevertszálú menetkevert tárcsás tekercs

Szabályozó tekercsek esetén

- Megcsapolt spirális
- Sokbekezdéses spirális
- Kevert réteges
- Tárcsás szabályozó

Betétes tekercselések esetén sugárirányban több vezetőt helyezünk el, közvetlenül egymáson. A tárcsákat tengelyirányában prespán betéteket helyezünk el, ezek biztosítják a megfelelő elválasztást.

Az alkalmazott betétek hármas feladatai a következők:

- Biztosítják a megfelelő szigetelést.
- Kitámasztják a tárcsákat az erőhatásokkal szemben
- Segítik a hűtést azzal, hogy hűtőcsatornát képeznek.



Tárcsás tekercselésű tekercset villamosan sorba kapcsolt, egymás felett lévő lévő tárcsák alkotják. Ott alkalmazhatók, ahol a tárcsánkénti menetszám több, mint 1. Ilyenkor az egy menetre jutó hely kevesebb, mint egy tárcsa minimális helyszükséglete.

A különböző sorokban elhelyezett tárcsák villamos kötését tárcsaközi váltók biztosítják. Ilyenkor az anyagot nem szakítjuk meg.

Kezdését tekintve kettő típust különböztetünk meg: lehet külső vagy belső kezdésű tekercs attól függően, hogy az első menet belülre, vagy pedig kívülre esik.

3.4. Tekercsek megtervezése

Miután felvettem az alapvető aktív részt jellemző mennyiségeket, így már meg tudom tervezni a tekercseket és azoknak a kialakítását. Az elrendezések kiválasztásánál a feszültség szinteket, valamint a saját szakmai tapasztalatomat vettem alapul.

3.4.1. Tercier „T” tekercs

Kiegyenlítő tercier tekercs esetén az alábbi kialakítást választottam

Típusát illetően egyréteges, betét nélküli spirális tekercs, mivel a feszültség szintje csupán 6.3 kV, tehát a feszültségünk igencsak a nagyfeszültségű hálózatok szintje alatt található .

A tercier tekercsünkön csupán aszimmetrikus zárlatok esetén van igénybevetel, így tervezés során nem szükséges a kis- és nagyfeszültségű tekercsel megegyező szigorúságú előírásokat tartani.



A gombolyítás iránya bal menetirányú, pontosabban ellentétes a többi tekercsével. Erre azért van szükség, mivel megegyező menetirány esetén a zárlatkor fellépő erőhatások a tekercseket egymáshoz képest szétrepítené, így pedig összerántja. Ez kedvezőbb feltételeket biztosít és a zárlati erők, valamint a lökő igénybevételek esetén.

A tekercs hűtését tekintve nincs szükség a cikk-cakk hűtésre tekintettel arra, hogy csak zárlat esetén melegszik a tekercs és erre a rövid időre megengedhető magasabb hőmérséklet is.

Vezető keresztmetszet számításához felvesszünk kezdő értéknek egy 4 A/mm^2 értéket, valamint élére gombolyított egy erő vezetőt. A szoftveres számítások során a drop értékének megfelelően történő beállításához a tercier tekercselésnek legalább 1.6 m magasnak kell lennie. Ez az értéket elérni relatív kevés menetszámmal csak úgy tudjuk elérni, hogy axiálisan több vezetőpárt alkalmazunk.

Szigetelés vastagság esetén legalább 0.5 mm vastag papír szigetelést adtam meg, ez elég nagy mechanikai védelmet biztosít, hogy sem a papír, sem pedig a vezeték ne sérüljön meg gombolyítás során, természetesen üzemi körülmények között.

Tercier tekercselés végleges adatai:

- Egyréteges.
- Bal irányú tekercselés a zárlati erők miatt.
- Axiális hűtőcsatorna.
- 67 menet.
- 4.35×13.05 vezető keresztmetszet.
- 5 axiális vezető.
- 0.5 mm vastag szigetelés.



- Áramsűrűség 4 A/mm^2
- Keresztmetszet 280 mm^2
- Mágneses magasság 1613 mm .
- Mechanikai magasság 1638 mm .
- Radiális szélesség 14 mm .

3.4.2. Kisfeszültségű „K” tekercs

Kisfeszültségű tekercsünk esetén a nagy névleges áram és számított keresztmetszet esetén mindenképpen CTC vezetőt kell alkalmazni. Hálós kivitel nem használható a feszültség miatt, így papír szigetelésű vezető szükséges.

A 22 kV -os névleges feszültség miatt többréteges kivitelűt választottam, ez a megoldás megfelelő szilárdságot fog adni a lökő igénybevételekkel szemben.

Tekercselés iránya ellentétesnek kell lennie a tercier tekercsével, hiszen így tudom elérni a korábban kifejtett pozitív hatást.

Magas névleges áramérték és áramsűrűség miatt mindenképpen zeg-zug hűtést kell alkalmaznom, mivel az axiális hűtőcsatorna nem lenne képes megfelelő hűtést biztosítani a tekercsnek.

Vezeték elrendezés szempontjából ideálisabbnak találtam azt az elrendezést, hogy nem használok 8 mm -nél nagyobb értéket axiálisan, inkább kettő axiális vezetőpárt alkalmazok 4 mm magassággal. A vezeték elemszámának drasztikus megnövelése sem hozott volna pozitív hatást a melegpont hőmérsékleténél, így itt célszerűbbnek találtam azt, hogy legyen itt is kettő radiális vezető, de kevesebb elemszámmal.



Zárlati igénybevételek miatt a CTC-t lakkal láttam el, valamint kapott külön epoxy bevonatot is. Ezek egyben tartják a sok elemi szálát és nagyobb ellenállást biztosítanak a vezetéknek a zárlat dinamikus erőhatásaival szemben.

Több elemi szálát tartalmazó vezető esetén is érvényes a tercier tekercselés esetén alkalmazott szabály, hogy nem lehet 0.5 mm-nél vékonyabb papírt használni.

Kisfeszültségű tekercsünk adatai:

- Többréteges kivitel.
 - Jobb irányú tekercselés.
 - Zeg-zug hűtőcsatorna.
 - 136 menet, 68 menet rétegenként.
 - 2 axiális és 2 radiális vezető.
 - CTC vezető, 21 elemszámú, 4x1.35 mm.
 - 0.5 mm kábelszigetelés, 0.08 mm emanel és 0.04 mm epoxy.
 - 80 mm² szilárdság.
 - 40 mm betét vastagság.
-
- Áramsűrűség: 3.8 A/mm²
 - Vezető keresztmetszet: 435 mm²
 - Mágneses magasság 1626 mm.
 - Mechanikai magasság 1648 mm.
 - Radiális szélesség 84 mm.

Tervezés során fontos paraméter a tekercsek mágneses magassága. Zárlati erő szempontjából az az ideális állapot, ha a kis- és nagyfeszültségű tekercsek esetén ez az érték közel azonos.



A tekercsek kivezetései miatt a nagyfeszültségű tekercs magassága mindig alacsonyabb, de érdemes arra törekedni, hogy a kettő érték minél jobban megegyezzen. A tercier tekercs magassága tapasztalatok alapján akkor ideális, ha egy 10...20...30 mm-el alacsonyabb, mint a kisfeszültségű tekercs mágneses magassága.

3.4.3. Nagyfeszültségű „N” tekercs

Nagyfeszültségű tekercsünknel a magas feszültség szint miatt alkalmaznunk kell valamilyen speciális kialakítást, hogy a lökő igénybevételeknek ellenálljon. CTC vezető esetén nem célszerű a menetkeverés alkalmazása, mivel a sok elemszámú vezetőt nehéz megforrasztani minden egyes átkötésnél. A korábban kiszámolt hármás radiális vezetőnél ilyen probléma nem lép fel, de több -legalább 3- radiális vezető pár esetén már itt is megfontolandó a védőmenet alkalmazása.

Az előzetes számítások során kapott kettő radiális vezető párral rendelkező hármás radiális vezető esetén alkalmazható a tárcsás menetkeverés. Tapasztalatok azt mutatják, hogy amennyiben nincsenek nagy lökő igénybevételek, úgy elég a tekercsnek csak egy bizonyos részét menetkeverni, nagyjából a teljes tekercs harmada elég szokott lenni.

A megfelelő áramsűrűség értékének tartása mellett a magasság beállítása úgy is történhet, hogy változtatom a tárcsánkénti menetszámot. A vezető dimenziói esetén érvényes előírások mellett nekem a 8 menet/tárcsa értékkel jött ki a kisfeszültségű tekercséhez hasonló magasság, így ezt alkalmaztam a későbbiekben.

Menetirányát tekintve megegyezik a kisfeszültségű tekercs gombolyítási irányával. Ellentétes irány esetén túlzott igénybevételeket fogok kapni a lökő igénybevételek számításánál.



Tekercsünk hűtése itt is Zeg-Zug elrendezésű, a magas áramsűrűség miatt indokolt ennek az alkalmazása.

Zárlati erők miatt itt is lakkozott vezetőket alkalmaztam, amelyek epoxy bevonattal vannak ellátva. A zárlat során fellépő erőhatásokkal szemben így megfelelő lesz a tekercs szilárdsága.

Nagyfeszültségű tekercsünk adatai:

- Menetkevert tárcsás kivitel.
- 779 menet.
- 100 tárcsa, abból 36 darab menetkevert és 64 darab sima.
- 8 menet tárcsánként.
- Jobbos menetirány.
- Zeg-zug hűtés.
- hármas radiális ikervezető.
- 1 axiális és 2 radiális párral.
- 11.65x1.6 mm.
- 0.5 mm papír, 0.1 mm enamel és 0.04 mm epoxy.
- 150 N/mm² szilárdság.

- Áramsűrűség 3.1 A/mm²
- Vezető keresztmetszet 110.5 mm²
- Mágneses magasság 1622 mm.
- Mechanikai magasság 1622 mm.
- Radiális szélesség 92.5 mm.



3.4.4. Szabályozó „S” tekercs

Szabályozó tekercsünk kialakítása során figyelniünk kell a maximális feszültségszintre, valamint a transzformátor névleges áramára, hiszen a különböző kivitelek nem csak a lökő igénybevételekkel szemben nyújtanak megfelelő szilárdságot, hanem meghatározzák a maximális áramot is. Gyártástechnikai okok miatt a különböző kivitelezések esetén adottak a kialakítással kapcsolatos ajánlások, ezeknek a figyelembevételével kell megválasztani a vezetők magasságát, szélességét és a maximális áramsűrűséget.

Tervezési irányelvek szerint a magasságot úgy kell megválasztani, hogy a lehető legközelebb legyen a nagyfeszültségű tekercs magasságához, viszont megfelelő mennyiségű helyet kell biztosítani a nagyfeszültségű tekercs kivezetéseinek. Ez jellemzően 200...300 mm magasságkülönbséget szokott jelenteni.

A tekercs radiális szélessége a végbetétek miatt legalább 10 mm-nek kell lennie, valamint a maximális áramsűrűségnek is akkorának kell lennie, hogy a tekercs melegpontja ne haladja meg a szabványokban foglalt értékeket.

Számítás során a sokbekezdéses spirális megoldást találtam ideálisnak. Ez megfelelő szilárdságot biztosít számomra a lökő igénybevételekkel szemben, valamint az élére gombolyított vezetők esetén elérhető az a mértékű áramsűrűség, aminél a tekercs hűtése megfelelő és a gyártás során sem okoz problémát.

Gombolyítás menetiránya megegyező a kis- és nagyfeszültségű tekercsével, itt sem indokolt ellenkező menetirányt felvenni.



Hűtés szempontjából megfelelő az axiális hűtőcsatornák alkalmazása. A Zeg-Zug hűtés azért nem előnyös a szabályozó tekercsek esetén, mivel akkor a hűtés kivitelezéséhez betétek alkalmazása szükséges, amik miatt nem lehet a tekercset élére gombolyított vetőkkel megtekercselni. Lapjára gombolyított elrendezés esetén problémák merülhetnek fel gyártás során, valamint a betétek alkalmazása rontja a tekercs kitöltési tényezőjét.

Mivel a szabályozó tekercsünk esetén nincsenek nagy igénybevételek, így költséghatékonyság szempontjából sima, egy erű vezetőt alkalmaztam.

Szabályozótekercsünk adatai a következők:

- Több bekezdéses kivitel.
- Jobb menetirány.
- Axiális hűtőcsatorna.
- 126 menet.
- Sima mágneses vezető.
- 4.05x14 mm dimenzió.
- 2 axiális és 1 radiális vezető.
- 0.6 mm vastag szigetelés.
- 80 N/mm² szilárdság.

- Áramsűrűség: 3.04 A/mm²
- Vezető keresztmetszete 111.68 mm²
- Mágneses magasság 1162 mm.
- mechanikai magasság 1310 mm.
- Radiális szélesség 15 mm.

Transzformátorunk tekercseinek előzetes megtervezése után ellenőrzöm, hogy a tekercsek melegedése megfelelő-e, illetve a zárlat dinamikus hatásainak mennyire áll ellen. Amennyiben az ellenőrzések során azt a



visszajelzést kapom, hogy megfelelő a tekercselések kialakítása, úgy a rövidzárási impedancia pontosabb beállítása és a költségoptimalizálás képezi a feladataim további részeit a lökő igénybevételek ellenőrzése mellett.

3.5. Rövidzárási impedancia és veszteségek

Az aktív rész megtervezésénél nagy gondossággal kell eljárnom a maximális veszteségekkel, valamint a rövidzárási impedancia értékével.

A transzformátor veszteségei esetén az Európai hatásfok direktíva a mérvadó. Amennyiben az ott foglalt követelményeknek nem tesz eleget a transzformátor, úgy nem helyezhető üzembe az Európai Unió területén.

A csúcshatásfok számítása a következőképpen történik:

$$PEI = 1 - \frac{2 \times (P_0 + P_{c0})}{S_t \times \sqrt{\frac{P_0 + P_{c0}}{P_k}}} \quad [3.5.1]$$

Ahol:

- P_0 : Üresjárási veszteség névleges feszültségen, frekvencián és középállásban.
- P_{c0} : Segédüzem energiaigénye.
- P_k : Rövidzárási veszteség névleges feszültségen, frekvencián és középállásban a +75 Celsius fokos referenciahőmérsékleten.
- S_t : Transzformátor névleges teljesítménye.



A megtervezett transzformátor paraméterei a következők:

- Névleges teljesítmény 63 MVA.
- Üresjárási veszteség értéke 17.8 kW.
- Segédüzem energiaigénye jelenleg 0 kW, mivel ONAN/ONAF hűtéssel rendelkezik.
- Rövidzárási veszteség értéke 331 kW.

A képletünkbe [3.5.1] behelyettesítve az alábbi értéket kapjuk:

$$PEI = 1 - \frac{2 \times (17.8 \text{ kW} + 0 \text{ kW})}{63 \text{ MVA} \times \sqrt{\frac{17.8 \text{ kW} + 0 \text{ kW}}{331 \text{ kW}}}} = 0.99756 = 99.756 \% \quad [3.5.2]$$

Az Európai direktíva esetén előírt minimális PEI érték 99.745 %, tehát a transzformátor teljesíti a hatásfokkal kapcsolatos előírásokat.

Transzformátorunk rövidzárási feszültségét az alábbi képlettel határozhatjuk meg:

$$\varepsilon_s = 2 \times \pi \times f \times \mu_0 \times \frac{l_k \times (\delta f_{sz} + \frac{a_1 + a_2}{3})}{h_t \times U_m^2} \times \frac{S_n}{3} \quad [3.5.3]$$

Ahol:

- ε_s : Rövidzárási impedancia.
- f : Frekvencia.
- μ_0 : vákuum permeabilitása.
- l_k : Dropcsatorna közepes hossza.
- δf_{sz} : Főszigetelés vastagsága.
- a_1 : Kisfeszültségű tekercs vastagsága.
- a_2 : Nagyfeszültségű tekercs vastagsága.
- h_t : Tekercsmagasság.
- U_m^2 : Menetfeszültség.
- S_n : Névleges teljesítmény.



Jelen tervezés során a következő értékeket kaptam:

- Hálózatunk frekvenciája 50 Hz.
- Vákuum permeabilitása $4 \times \pi \times 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$.
- Dropcsatorna közepes hossza 1626 mm.
- Főszigetelés vastagsága 99.7 mm.
- Kisfeszültségű tekercs vastagsága 84 mm.
- Nagyfeszültségű tekercs vastagsága 92.5 mm.
- Tekercsmagasság 1648 mm.
- Menetfeszültség 92.982 V/menet.
- Névleges teljesítmény 63 MVA.

$$\varepsilon s = 2 \times \pi \times 50Hz \times 4 \times \pi \times 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \times \frac{1626mm \times (99.7mm + \frac{84mm + 92.5mm}{3})}{1648mm \times 92.982^2} \times \frac{63MVA}{3} = 0.15$$

A számított végeredmény összhangban van a Ganz tervezőszoftvere által kapott értékkel.

Amennyiben szeretnénk a számítást elvégezni az ONAN állapotra, ahol 50 MVA teljesítményre kértek 12 % drop értéket, úgy a következő eredményt kapjuk:

$$\varepsilon s' = 2 \times \pi \times 50Hz \times 4 \times \pi \times 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \times \frac{1626mm \times (99.7mm + \frac{84mm + 92.5mm}{3})}{1648mm \times 92.982^2} \times \frac{50MVA}{3} = 0.12$$

A transzformátorunk rövidzárási impedanciája megfelel mind a 63 MVA, mind pedig az 50 MVA üzemre.



4. Költségoptimalizálás

A transzformátor aktív részének megtervezése után a következő fontos lépés a költségoptimalizálás. Ez a transzformátor végső árának minél kisebb szintre történő csökkentése úgy, hogy műszakilag ugyanúgy megfelelő maradjon. Számításaim során öt különböző változatot vizsgáltam meg, ezeknek az ismertetése és elemzése fog következni.

Jelen ajánlat esetén adottak voltak a kapitalizációs összegek, tehát megadták nekem, hogy egységnyi rövidzárási és üresárási veszteségnek mekkora a költsége. A tapasztalat azt mutatja, -és itt is ez volt tapasztalható- hogy kapitalizáció esetén nem érdemes a PEI csúcshatásfokra tervezni, mivel összköltség szempontjából kedvezőbb, ha kisebb veszteségekkel dolgozunk.

A hatásfok növelése értelemszerűen a transzformátor költségének növelését fogja okozni, viszont a kapitalizációs összegek egy pontig csökkenteni fogják a végső ár nagyságát.

A fejezet célja, hogy megtaláljam azt az optimális veszteség párt, ahol a kisebb veszteségek okozta többletköltség ellensúlyozva van a kapitalizációban megadott költségekkel.



4.1. Ideális veszteség pár meghatározása

Az elkészült öt verzió üresjárási és rövidzárási veszteség párok változását az alábbi táblázat mutatja be:

Verziók száma	Üresjárási veszteség	Rövidzárási veszteség
1.	17,8 kW	331 kW
2.	20,4 kW	277,2 kW
3.	22 kW	235 kW
4.	22 kW	229 kW
5.	22,1 kW	225 kW

4.1.1. Veszteségek változása

Látható, hogy a rövidzárási veszteség csökken és az üresjárási pedig nő. Alacsonyabb veszteség pár nagyobb költséget is jelent, hiszen a kisebb üresjárási veszteséghez jobb minőségű vasmag anyag vagy kisebb indukció szükséges. A rövidzárási veszteség csökkentését úgy tudom elérni, hogy nagyobb vezeték keresztmetszetet alkalmazok, így csökkentve az áramsűrűséget. Nagyobb keresztmetszet több beépítendő anyaggal jár, tehát a költségek növekedni fognak.

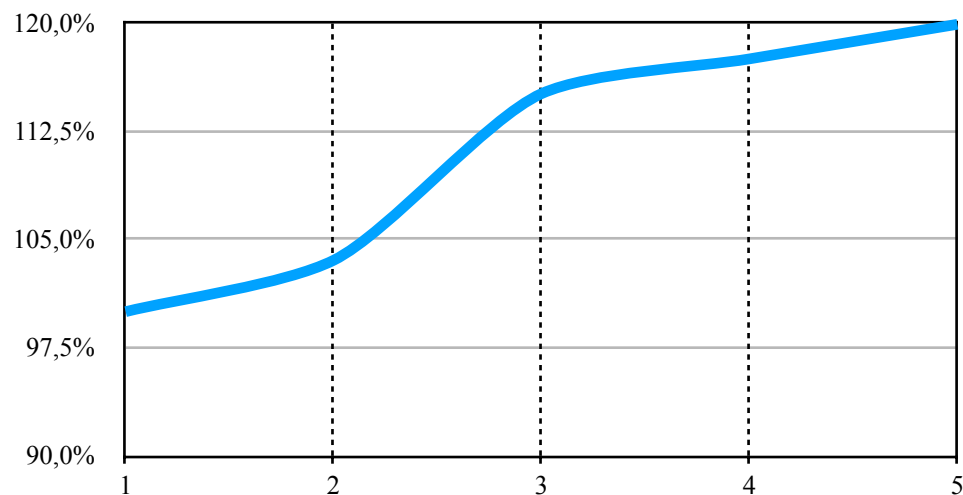
Fontos, de nem számottevő előnye a kisebb veszteségeknek, hogy a vasmag és a tekercsek kevésbé melegednek, ezáltal a hűtése is olcsóbb lesz. Itt ami fontos az a kisebb zajszint és a radiátorok optimálisabb elhelyezése, különösen abban az esetben, ha méretkorlátozások is vannak az adott ajánlat esetén.



4.2. Ideális veszteség pár meghatározása

Számításaim során a harmadik változat bizonyult a legoptimálisabb konstrukciónak, itt tudtam elérni azt a munkapontot, ahol még a kapitalizációból származó többlet ellensúlyozza az anyagár növekedését.

A transzformátor költségeinek növekedését az alábbi diagrammal szeretném szemléltetni:



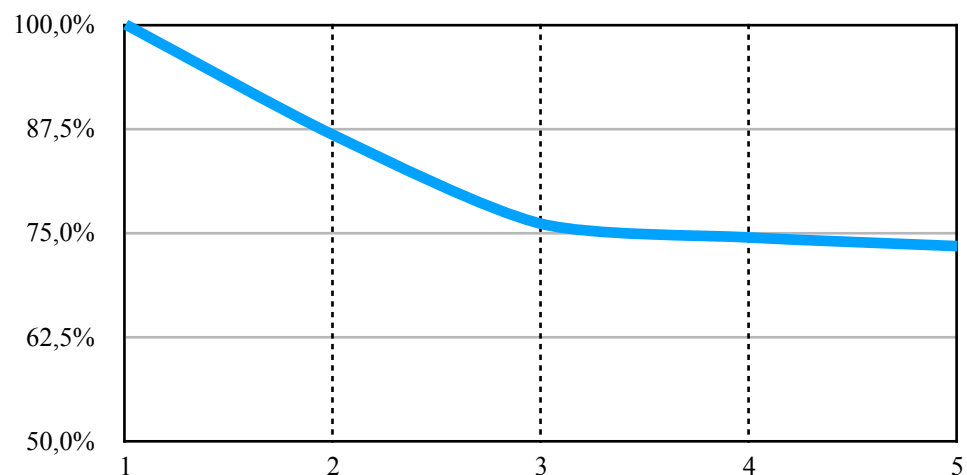
4.2.1. Transzformátor költségének változása

Függőleges tengelyen láthatjuk az eredeti változathoz képest kapott árváltozást relatív egységben, míg vízszintes tengelyen az adott verziókat. Láthatjuk, hogy a második konstrukció költsége alig valamivel több, mint 4 % az eredeti verzióhoz képest, ellenben sikerül lecsökkenteni az üresjárási veszteséget 2,6 kW-al, a rövidzárásit pedig 53,5 kW-al. Mivel itt a függvényünk meredeksége eléggé alacsony, viszont relatív nagy mennyiségű veszteséget tudunk megspórolni, így az összköltségünk nagy mennyiségben csökkent. Harmadik verzió esetén már jelentősen megemelkedett a kivitelezéshez szükséges összeg és itt már nem tudtunk arányosan akkora veszteségcsökkentés elérni, mint az előző esetben. Ezek után már csak kis mértékű változás történt, mivel itt már nem történik



jelentős mértékű veszteség csökkenés, így a kapitalizációból kapott nyereség már nincs arányban a beépített anyaggal.

A transzformátor veszteségcsökkenése miatt bekövetkezett kapitalizációs költség csökkenés a lenti diagramm szemlélteti:

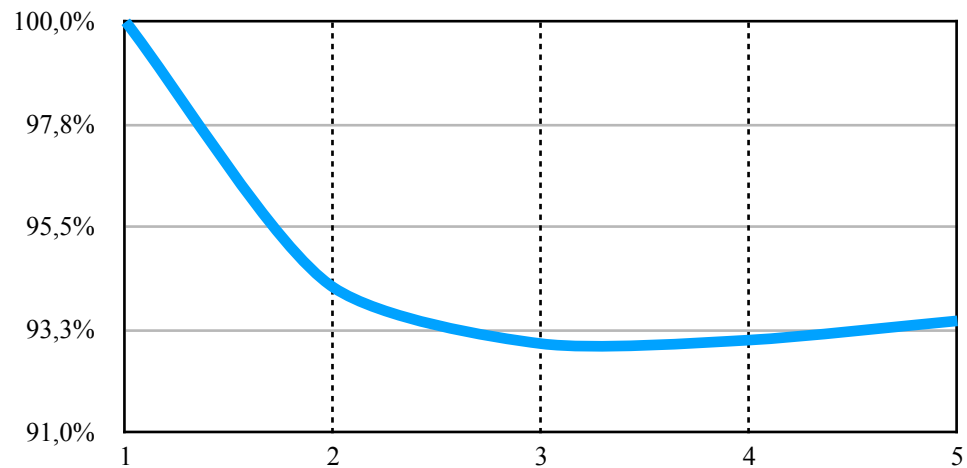


4.2.2 Kapitalizációs költségek változása

Ahogy azt a transzformátor költségénél is láttuk, eleinte az anyagár alig növekedett, viszont jelentős mennyiségű veszteségcsökkenést tudtam elérni. Ennek megfelelően a kapitalizációs költség is jelentős mértékben csökkent, tehát egy kevés alapanyag hozzáadásával egy sokkal optimálisabb transzformátort kaptam. Még a harmadik konstrukció esetén volt jelentős költségcsökkenés, utána viszont már nem volt számottevő változás.



Végső ár szempontjából a harmadik verzió adja a legoptimálisabb kialakítást, itt tudtuk elérni a legkisebb költséget. Ezek után már annyira megnövekednek a beépítendő alapanyagoknak az árai, hogy nem tudja kompenzálni a megspórolt veszteségek.



4.2.3 Összköltség változása



5.Feszültségpróbák [16]

Az optimalizált aktív rész kivitelezése után a transzformátor lökő igénybevételekre történő méretezése a következő tervezései pont.

Az aktív résznek megfelelő szilárdságot kell biztosítani a túlfeszültségekkel szemben. Megvizsgálom, hogy a végső kivitelezés esetén hogyan reagál a transzformátor a lökő igénybevételekre.

A vizsgálathoz a Ganz tervezőprogramját használtam amely részletesen megmutatja számomra, hogy milyen és mekkora igénybevételek vannak.

5.1.Igénybevételek típusai és jellemzői

Feszültségpróbák esetén az alábbi típusokat különböztetjük meg:

- Ipari frekvenciás próbafeszültség
- Lökő próbafeszültség
- Vágott hullámú próbafeszültség

Az ajánlatom esetén nem kérte az ügyfél, hogy számoljak vágott hullámú próbafeszültséggel, így egyszerűsítés végett elhagytam ezt a méretezési lépést.

Transzformátorunk csillagpontjának a szigetelése lépcsős kivitelű, vagyis a csillagpont igénybevétele nem egyenlő a vonali végek igénybevételével.



5.1.1.Szigetelésvizsgálat célja

Szigetelésvizsgálatok esetén azt ellenőrizzük, hogy a transzformátorunk szigetelése megfelelő-e. A feszültségpróbákkal megvizsgáljuk, hogy az elkészült transzformátorunk képes lesz-e elviselni az üzemeltetés során fellépő feszültség-igénybevételeket. Másik célja, hogy a szigetelések állapotáról kapjunk eredményeket, így kiszűrhetőek a hibás részek, ezzel is javítva a transzformátor élettartamát.

5.1.2.Ipari frekvenciás próbafeszültség

A transzformátor szigetelésének ellenőrzésére ipari frekvenciás próbafeszültséget használunk. Ilyenkor a tekercselések között a főszigetelést és a menetek közötti szigetelést vizsgáljuk. Amennyiben a próba során használt feszültségünket egy külső transzformátor állítja elő, úgy a transzformátorunk tekercseléseit rövidre kell zárni. A nem vizsgált tekercseket is rövidre zárjuk, majd földeljük a szekrénnel együtt. Mérésünk során a tekercsek és a föld között lévő szigetelést egy percre vizsgáljuk.

Az ajánlat során megtervezett transzformátor szigetelési szintje lépcsős szigetelésű, így a külső feszültségforrásunkat csak a transzformátor nulla kapcsára előírt, a vonali végek értékéhez képest kisebb feszültség szinttel lehet mérni. Mivel ez nem elégséges szint a vonali végek méréséhez, így ott gerjesztett próbával ellenőrzik a szigetelést.

Külső szigetelések vizsgálata esetén a feszültség szint nagyobb, mint a belső szigetelések vizsgálata esetén.



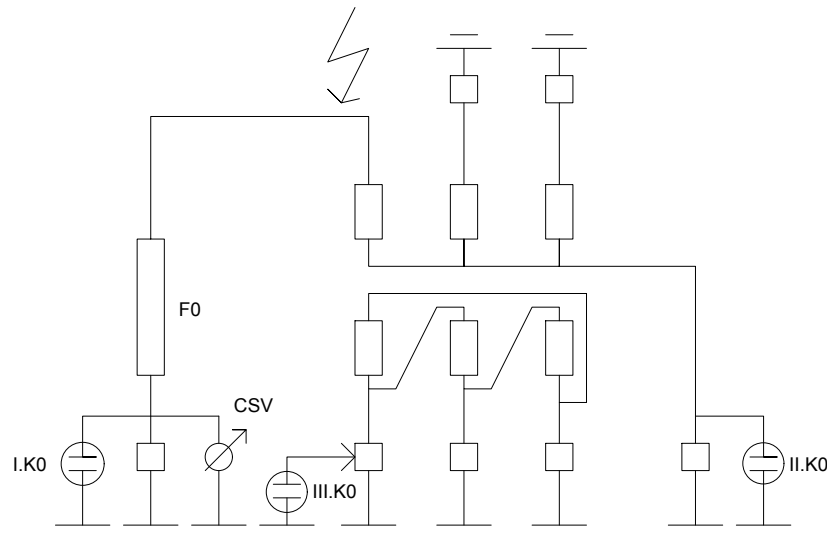
5.1.3.Lökőfeszültségű próba

A transzformátor üzemi állapotának megfelelő kapcsolásban érdemes a mérést elvégezni, hogy a legpontosabb adatokat tudjuk megkapni. A háromfázisú transzformátorunkat a próba során fázisonként mérjük meg. Ilyenkor az egyik fázisra adjuk a próbafeszültségünket és a másik kettőt közvetlenül, vagy ellenálláson keresztül földeljük.

81/61. oldal



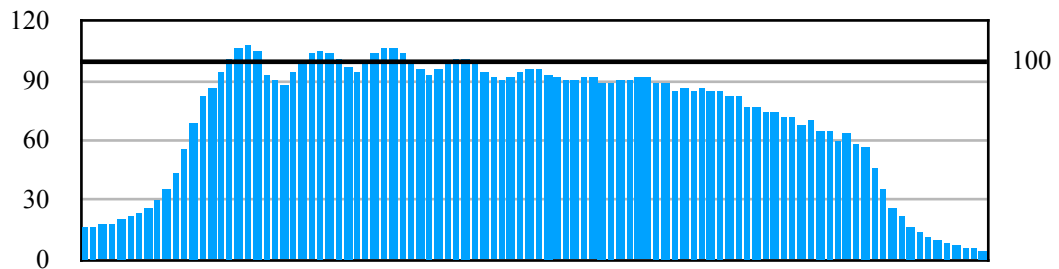
Szabadvezetékes csatlakozás esetén a hullámellenállás értéke nagyjából 500 Ohm, míg kábelek esetén csak 50. Ezeknek az értékeknek megfelelően választjuk ki a mérés során alkalmazott ellenállások értékeit.



5.1.3.1. Lökőfeszültség próba mérési elrendezése

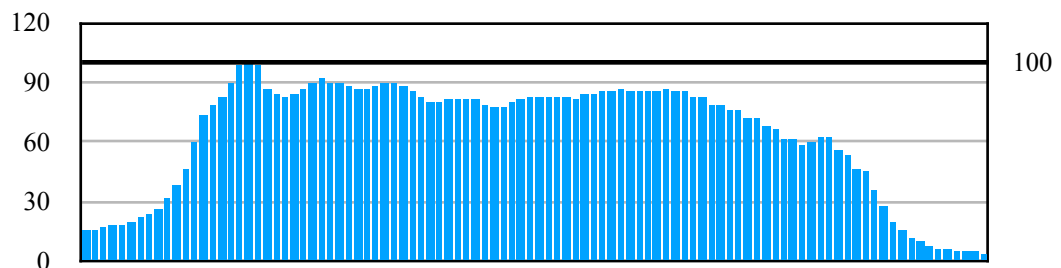
5.2. Tekercsek közötti igénybevétel

Tekercsek közötti igénybevétel csökkentésének leghatásosabb módja a köztük lévő szigetelés növelése. A távolság növelésének negatív hatása, hogy növekszik a transzformátor rövidzárási feszültsége. Másik működő megoldás, hogy menetkevert nagyfeszültségű tekercset alkalmazunk. Ilyen esetben nem növekszik a tekercsek közötti szigetelés vastagsága, ezáltal optimálisabb konstrukciót kapunk. Hátránya, hogy romlik a tekercs kitöltési tényezője.



5.2.1. Menetkeverés előtti igénybevétel N-S között

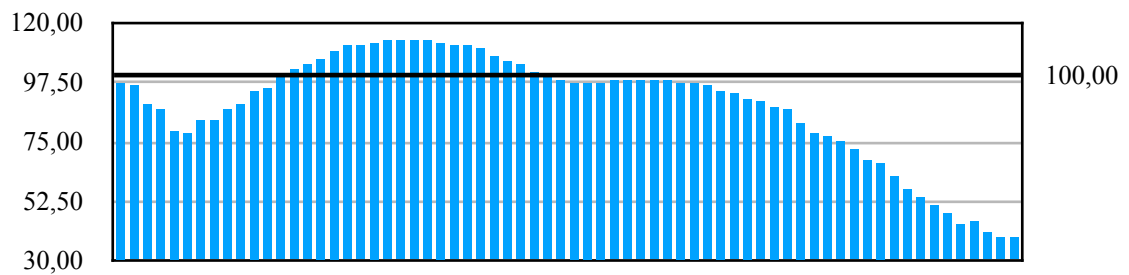
Az igénybevételi ábrán megfigyelhetjük, hogy a nagyfeszültségű- és a szabályozó tekercs között leginkább a tekercsek tetejénél találhatunk nem megengedhető igénybevételeket, míg lefele haladva az igénybevétel értéke csökken. Mivel relatíve nincs nagy kiterjedésű területen probléma, így nem is feltétlenül kell a földszigetelés vastagságát megnövelni, menetkeverés alkalmazásával is orvosolható a probléma.



5.2.2. Menetkeverés utáni igénybevétel N-S között

Menetkeverés alkalmazása után már megfelelő mértékű a nagyfeszültségű- és a szabályozó tekercs közötti igénybevétel. Ilyen típusú vizsgálatok esetén sokat tud javítani a helyzeten, ha a tekercsek tekercselési irányát megfelelően választjuk meg.

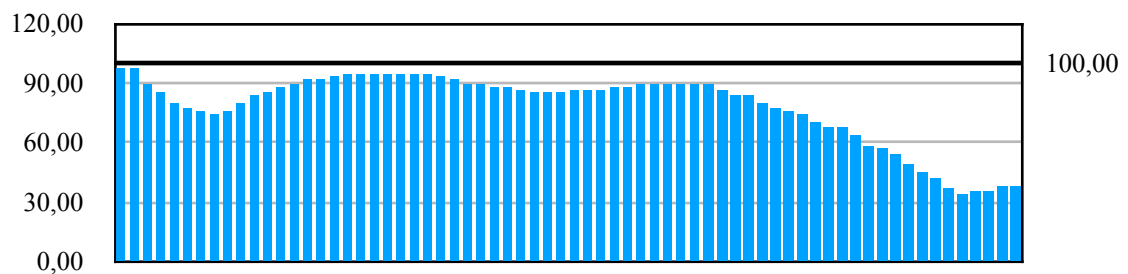
A nagyfeszültségű- és a szabályozó tekercs közötti igénybevétel helyrehozását követően a másik problémás tekercs pár esetén is korrigálni kell a terhelést. Jelen esetben a kisfeszültségű- és a nagyfeszültségű tekercs közötti igénybevételt.



5.2.3. Menetkeverés előtti igénybevétel K-N között

A kisfeszültségű- és a nagyfeszültségű tekercs között sincsen jelen esetben nagy mértékű túlzott igénybevétel. Hasonlóan, mint a korábbi elrendezésnél, itt sem feltétlen indokolt a fűszigetelés növelése, inkább menetkeveréssel érdemes helyrehozni a túlzott igénybevételeket.

A nagyfeszültségű tekercs menetkeverését követően jelentős mértékben csökkent a kis- és nagyfeszültségű tekercsek közötti igénybevétel mértéke.



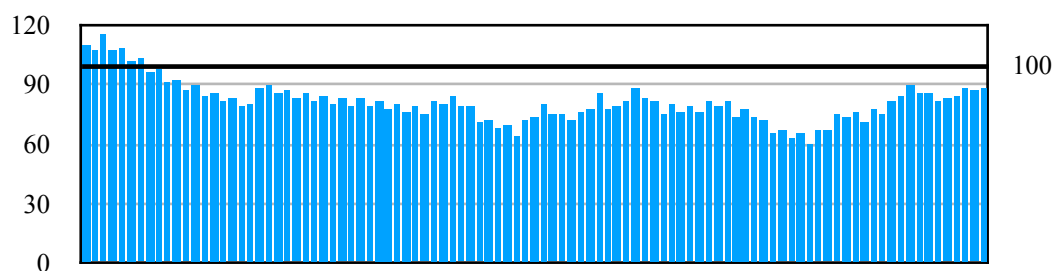
5.2.4. Menetkeverés utáni igénybevétel K-N között

Látható, hogy a menetkeverés miatt egyenletesebb lett a tekercsek közötti igénybevétel.



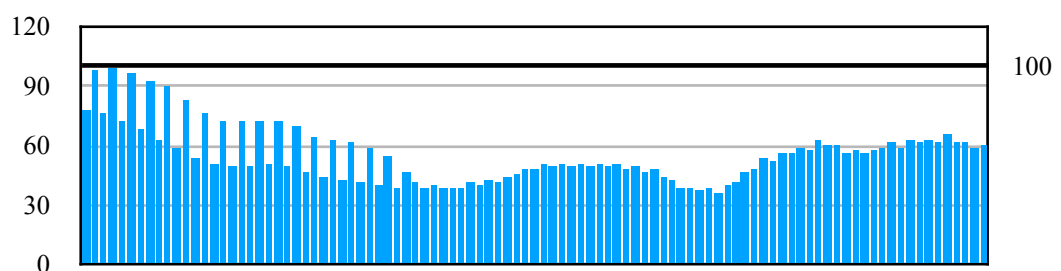
5.3. Tárcsák közötti igénybevétel

A tekercsek közötti igénybevételek vizsgálata után következik számunkra a tekercseléseken belüli tárcsák közötti igénybevételek vizsgálata. Mivel a jelenlegi transzformátor konstrukciónk esetén csak a nagyfeszültségű tekercs lett tárcsás kialakítású, így csak itt kell ezeket az igénybevételeket számítanunk.



5.3.1. Menetkeverés előtti igénybevétel az N tekercs tárcsái között

A nagyfeszültségű tekercs felső tárcsái túllépik a megengedhető maximális igénybevételt. Ilyenkor külön-külön lehet az egyes tárcsa párokat helyrehozni úgy, hogy további szigetelést adunk hozzá, vagy pedig menetkeverést alkalmazunk.



5.3.2. Menetkeverés utáni igénybevétel az N tekercs tárcsái között

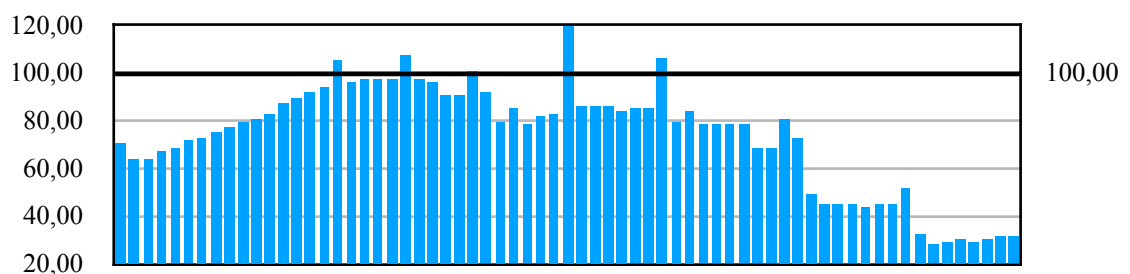
A teljes tekercsnek csupán egy kis százaléknyi részét menetkeveréssel ellátva máris jelentős javulást tapasztalhatunk a tárcsa párok között. A tekercs tetején megszűnt a nem megengedhető mértékű igénybevétel, míg a többi tárcsa pár esetén csökkent a terhelés. Mivel mindegyik tárcsa pár megfelel a tervezési előírásoknak, így nem kell külön-külön csökkenteni a



helyi maximális igénybevétel értékét, elég volt a teljes tekercs bizonyos részét menetkeveréssel ellátni.

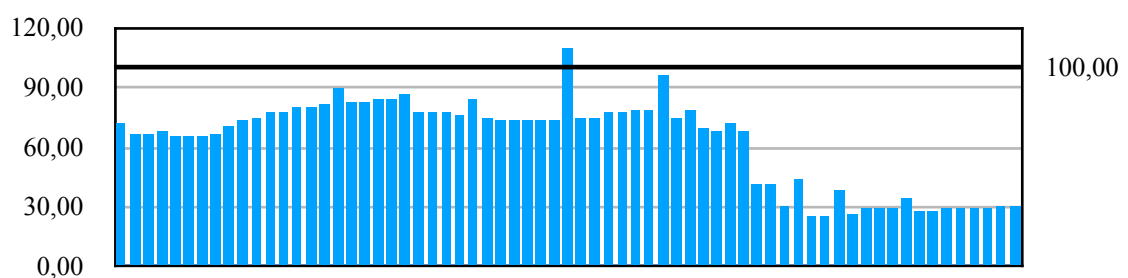
5.4.Point stress

Point stress vizsgálat esetén az egyes menet párokat vizsgáljuk meg, hogy az ott fellépő maximális térerősség hány százaléka a tervezési irányelvekben foglaltakhoz képest.



5.4.1.Menetkeverés előtti Point stress igénybevétel a K tekercs menetei között

Ez a vizsgálati típus jellemzően a kisfeszültségű tekercs esetén szokott gondot okozni. A mostani tervezés esetén is látható, hogy a tekercs közepén több menet pár is túllépi a megengedhető maximális igénybevétel értékét.



5.4.2.Menetkeverés utáni Point stress igénybevétel a K tekercs menetei között

Menetkeverést alkalmazva ennél a vizsgálati típusnál nem figyelhetünk meg olyan mértékű javulást, mint a többi vizsgálat esetén. Ilyen esetben helyi megoldást kell alkalmazunk, hogy itt se lépjük túl a megengedhető igénybevételt.



6. Transzformátor melegedés számítása [17]

A transzformátor hűtését elsősorban a benne lévő olaj biztosítja.

Ennek az olajnak a kiválasztása az alábbi szempontok szerint történik:

- Szükséges-e a az átlagos értékektől magasabb gyulladáspont?
- Inhibitált, vagy Inhibitálatlan ásványi olaj szükséges?
- Olaj vagy Észter szükséges szigetelőközegként?

Az iparban gyakran használt gyártók a következők:

- Ergon.
- Nynas.
- Shell.

Illetve szintetikus észtereket az alábbi gyártó készít:

- Midel

A megfelelő gyártó kiválasztása vagy a rendelői igényeknek megfelelően történik, vagy pedig az Ő általuk előírt típust használjuk.

6.1. Hűtéssel kapcsolatos adatok

A Ganz tervezőszoftverének alkalmazása során a következő értékeket kaptam melegedés számítás során:

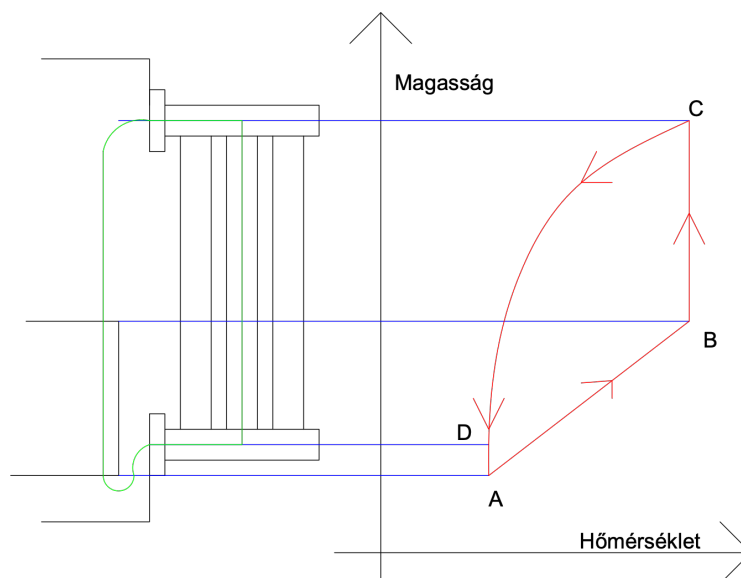
- | | |
|--|--------|
| • Tercier tekercs átlagos melegedési gradiense | 45.5 K |
| • Tercier melegpont hőmérséklete | 45.7 K |
| • Kisfeszültségű tekercs gradiense | 15.3 K |
| • Kisfeszültségű tekercs melegpontja | 16 K |
| • Nagyfeszültségű tekercs melegedési gradiense | 14.5 K |
| • Nagyfeszültségű tekercs melegpontja | 17.7 K |
| • Szabályzótekercs melegedési gradiense | 20.1 K |



• Szabályzótekercs melegpontja	20.4 K
• ONAF üzemben lévő összes veszteség	376.5 kW
• ONAN üzem összes vesztesége	244.5 kW
• Napsugárzás általi veszteség	26.8 kW
• ONAF üzem hődisszipációja	13.8 kW
• ONAN üzem hődisszipációja	16 kW

6.2. Radiátoros üzem hűtésének megtervezése.

Radiátoros hűtés esetén csak a természetes olajáramlás biztosítja a szükséges hűtést, így ennek megfelelően kell a tervezésnél eljárni. A hideg olaj lefelé, míg a meleg olaj felfelé áramlik, ez egy zárt körben áramlást idéz elő.



6.3.1. Olajáramlás a transzformátor radiátoraiban

Olajunk maximális hőmérséklete a radiátor tetejében található. Ahogy áramlik lefelé a radiátorokban, a nagy hőleadó felületnek köszönhetően hamar veszít a saját hőmérsékletéből és az aljában már egy hűvösebb hőmérsékletű olaj található. A vasmag és a tekercsek melegedése miatt a köztük átáramló olaj ismét felmelegszik, majd a meleg olaj újra a radiátor



tetejénél fogja elindítani ezt a folyamatot. A mechanizmust ismerve könnyű belátni, hogy az olaj legmelegebb pontja a szekrény tetejénél található. A tekercsek esetén is a melegpont a legfelső menetek esetén lesz megfigyelhető, mivel ebben az esetben már egy melegebb hőmérsékletű olajjal fog találkozni nem úgy, mint az alsó tekercsek, így nem lesz képes olyan hatékonyan átadni a saját hőmérsékletét.

Hűtésszámításunkhoz ismernünk kell az olaj átlagos gradiensét, a melegpontot, a tekercseknél, valamint a szekrény tetejénél lévő olaj hőmérsékletét.

Ezeknek az ismeretében tudunk olyan ONAN hűtőrendszert kiépíteni, ami a szabványoknak megfelelő hűtést tud biztosítani a transzformátor részére.

Radiátoros hűtés tervezésének lépései a következők:

- Első lépésként szükséges megállapítani a transzformátorunk összes veszteségét és ezeken a türését figyelembe véve a biztonság javára kell felvennünk. Ez lesz a hűtés számára a mértékadó összes veszteség.
- Meghatározzuk a tekercsátlag és az olajátlag hőlépcsőjét, itt is a legnagyobb érték lesz a mérvadó.
- A mértékadó tekercs hőlépcsőt kivonjuk a szabványokban definiált tekercs átlagmelegedés értékéből, jelen esetünkben a 65 C fokból.
- Szükséges lesz a transzformátor szerkevény méreteinek ismerete, mivel természetes hűtés során maga a szekrény is hűtőtestként funkcionál. A leadott sugárzási teljesítmény becsült értékével már meg tudjuk tervezni a szekrényre elhelyezendő radiátor csoportokat és a radiátorok számát is.
- Kiszámítjuk a felső- és alsó olaj hőmérsékletének különbségét.
- A maximális olajmelegedésünk értékét a radiátor olajának átlagmelegedése és a radiátorokban lévő felső és alsó olaj hőmérséklet különbségének felének az összege adja. Ennek a maximális melegedésnek



kisebbsnek kell lennie, mint a szabványokban előírt maximális olajmelegedés, azaz a 60 C.

- Környezetünk hőmérsékletét 20 C fokban határozzuk meg, így kiszámítható a maximális olajhőmérséklet és a radiátorok falainak átlagos hőmérséklete.
- Meghatározzuk a sugárzással elvitt veszteségrészt a felső vetületek esetén.
- Kiszámítjuk a szekrény palástjának területét és az általa elsugárzott veszteség értékét.
- A szekrény által konvekciával elvitt veszteség értékét úgy tudjuk megkapni, hogy vesszük a maximális olajhőmérséklet és a fedél területének szorzatát, majd a szekrény palástjának területének és a radiátor átlaghőmérsékletéhez tartozó fajlagos hőteljesítmény szorzatát.
- Ezt az értéket és a sugárzással elvitt teljesítményt kivonjuk az összes veszteség értékéből.
- Ellenőrizni kell, hogy a radiátorok elviszik-e a szükséges hőmennyiséget.
- Kiszámítjuk a nyomásterület nagyságát.
- Meghatározzuk a tekercselésekre vonatkozó olajáramlás nagyságát.
- A tekercseken eső mértékadó nyomást kiszámítjuk.
- Szükséges meghatározni azt az olajáramot, ami elvezeti az összes veszteséget.
- Ehhez az olajáramhoz kiszámoljuk a radiátorokon eső nyomást.
- Ellenőrizzük az elrendezést, hogy megfelelő-e a hűtés.



6.3. Ventilátoros üzem hűtésének megtervezése.

Az ONAN hűtés megtervezését követően egy nagyobb teljesítményű üzemre kell méreteznünk, ebben az esetben viszont nem csak radiátorokat, hanem ventilátorokat is alkalmazunk.

Ventilátorok elhelyezésénél fontos szempont, hogy egymás között megfelelő távolságot kell tartanunk. Erre azért van szükség, hogy a levegőáramoltatás határfoka kielégítő legyen. Nagyobb berendezések esetén a földhöz képest is szükséges a minimális magasság betartása a megfelelő áramlás miatt.

Elrendezésüket tekintve célszerű cikk-cakk módon kivitelezni, hiszen így ugyanannyi és ugyanolyan ventilátorokkal jobb hűtést tudunk biztosítani a transzformátor számára. Amennyiben adott a maximális hangnyomás, mint ahogy az esetünkben is, úgy érdemes inkább kisebb maximális légáramlású ventilátort alkalmazni, mivel ezeknek az esetében túlnyomórészt alacsonyabb zajszinttel rendelkező típusok vannak.

6.4. Radiátorok és ventilátorok

A munkám során alkalmazott tervezőprogram alapján a következő elrendezést alakítottam ki a transzformátor hűtésére

ONAN hűtés esetén:

- 2 csoport kialakítása
- csoportonként 7 darab radiátor, összesen 14
- Magasságuk 2600 mm, ebből 600 mm hattyúnyak
- elemszám 28 darab



A radiátorok elemszámát 28 darabban határoztam meg, mivel a 30 elemszám fölötti értékek már nem biztosítanak annyira hatásos hűtést, mint 20 és 30 elemszám között. Jelen ajánlat esetén nem voltak szélességgel kapcsolatos méretbeli előírások, így nem volt ilyen téren korlátozás az elemszám megválasztásával kapcsolatosan.

A radiátorok magassága a maximális teljesítmény növelésével nagyobb lesz. Nagyobb teljesítményű transzformátorok esetén érdemes a radiátorokat hattyúnyakas kivitelben elkészíteni, mivel így jobb hűtési értékek érhetőek el. A hattyúnyak lényege, hogy a szekrény legmagasabb pontjánál is feljebb helyezkedik el a radiátor teteje. Kezdsnek egy átlagos magasságot alkalmaztam a radiátorok esetén, így vettem fel az összes magasságot 2600 mm-nek, amelyből 600 mm a hattyúnyak.

A kiválasztott mennyiségű elemszámmal és magassággal azt kaptam, hogy 14 darab radiátor megfelelő hűtést tud biztosítani a transzformátornak ONAN üzemben. Ennyi radiátort nem lehet elhelyezni egy oldalt, így kettő csoportra bontottam, tehát oldalanként 7 darab radiátort helyeztem el. Ez reális darabszámnak tekinthető. A radiátorok mennyiségét úgy tudnánk csökkenteni az aktív rész megváltoztatása nélkül, hogy több elemszámot és magasabb radiátorokat alkalmazunk. Ebben az esetben már nem érdemes nagyobb és szélesebbet választani, mivel aránytalanul széles és magas lesz a radiátor.

ONAN üzem esetén az alábbi melegedései értékeket kaptam:

- Tekercsek melegedése $53.1\text{ K} + 2.8\text{ K}$ tartalék, összesen 55.9 K .
- Átlagos olaj hőmérséklet $41\text{ K} + 2.8\text{ K}$ tartalék.
- Felső olaj hőmérséklete $54.2\text{ K} + 3.9\text{ K}$ tartalék, itt tartalékkal 58.1 K .
- Melegpont hőmérséklete $68.2\text{ K} + 3.9\text{ K}$ tartalék, összesen 72.1 K .



A szabvány által előírt értékek:

- Maximális felső olaj hőmérséklete 60 K.
- Maximális tekercs melegedés 65 K.
- Maximális melegpont 78 K.

Biztonsági szempontok miatt a kapott értékekhez hozzáadunk bizonyos mennyiségű tartalékot. Látható, hogy még így is megfelel az összes előírásnak, tehát a radiátorok mennyisége elegendő.

ONAF hűtés esetén az alábbi kialakítást választottam a ventilátorok számára:

- Összesen kettő darab ventilátor, csoportonként 1.
- A ventilátorok óránkénti áramlása 36500 m³/h.

Ventilátor kiválasztása esetén figyelembe kell venni a maximális hangnyomás értékét, mivel maximalizálták az értékét ONAF esetén 80 dB értékre, kettő méter távolság esetén.

A ventilátorok ára nem arányos az áramlási teljesítményükkel, vagyis egy kétszer erősebb ventilátor nem kerül kétszer annyiba. Költséghatékonyság szempontjából érdemes úgy megválasztani a típust, hogy minél kevesebb darabszámot kelljen alkalmazni, vagyis az áramlása minél nagyobb legyen.

A radiátoraink eléggé szélesek a maguk 28 darab elemszámukkal, így a nagyobb típusokból is választhatok. Kiválasztás során a hangnyomás lesz a meghatározó tényező.



A kiválasztott ventilátor hangnyomás szempontjából megfelelő, az ennél nagyobb típus már túlságosan zajos lenne, ezáltal nem megfelelő az alkalmazása. Jelen típussal csupán kettő darab alkalmazása szükséges, így költségek szempontjából is optimális az alkalmazása.

ONAF üzem esetén az alábbi melegezéseket kaptam:

- Tekercsek hőmérséklete $50.7\text{ K} + 3.2\text{ K}$ tartalék, összesen 53.9 K .
- Átlagos olaj hőmérséklet $35.3\text{ K} + 3.2\text{ K}$ tartalék.
- Felső olaj hőmérséklet $53\text{ K} + 3.5\text{ K}$ tartalék, összesen 56.5 K .
- Melegpont hőmérséklete $73.4 + 3.5\text{ K}$ tartalék, összesen 76.9 K .

Melegedés tekintetében itt is megfelelnek az értékek, még a tartalékkal együtt is, így a tervezés megfelelő.

Ellenőrizni kell az ONAN és ONAF üzem esetén fellépő hangnyomás értékeket, hogy megfelelnek-e az ügyfél által kívánt előírásoknak.

Hangnyomás értékek a következőképpen alakulnak:

- ONAN üzem hangnyomása üresjárásban 1 méter távolság esetén $57.24\text{ dB} + 2\text{ dB}$ tartalék.
- ONAF üzem hangnyomása üresjárásban 2 méter távolság esetén $69.07\text{ dB} + 1.05\text{ dB}$ tartalék.

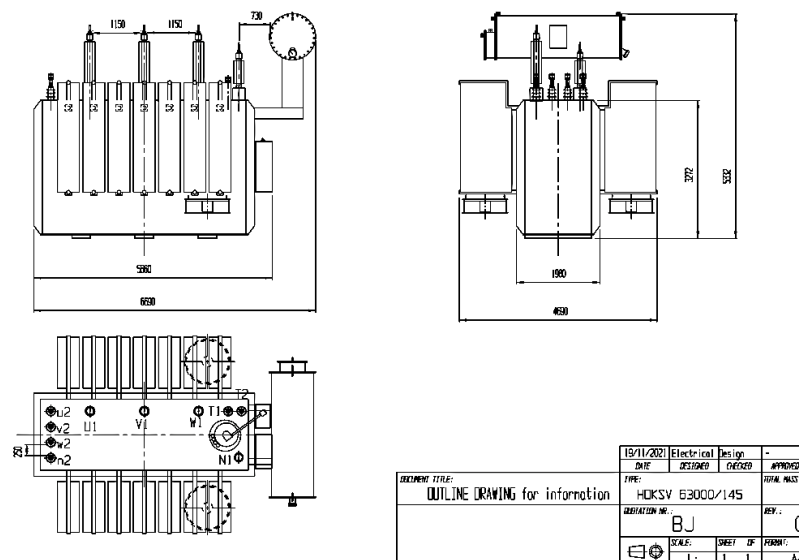
Az előírt maximális hangnyomás 60 dB ONAN, 80 dB pedig ONAF üzem esetén. Az előzetesen számított értékek megfelelnek az előírásoknak, így a transzformátor hűtése megfelelő.



7.1.Körvonalrajz

- Tartani kell az IEC szabványban foglalt távolságokat a fázis és fázis, valamint a fázis és föld között.
- Az átvezetőket a szekrény hosszú oldalaira helyezzük el, kivéve ha az ügyfél mást nem kér, mint jelen ajánlat esetén is.

A nagyfeszültségű átvezetők között a szabvány szerint legalább 1100 mm távolságot kell tartani[18], a biztonság kedvéért megnőveltem ezt az értéket. Amennyiben nem elegendő a szekrény tetején a hely, úgy az átvezetőket meg kell dönteni.



7.1.1. Transzformátor körvonalrajz

Csillagpontunk szigetelési szintje alacsonyabb, mint a vonali végeké, így ott kisebb átvezetőt tudok alkalmazni.

Kisfeszültségű oldalon DIN típusú átvezetők alkalmazása a jellemző, az ügyfél is ezt a változatot kérte az ajánlatban.



7.2. Alkalmazott átvezetők

Átvezetők kiválasztása esetén -ha nincs külön előírás a típusát illetően- OIP típusú, porcelántestű átvezetőket alkalmazok.

A pontos típus meghatározásánál fontos a névleges áram, valamint a lökő feszültség szint értéke.

Nagyfeszültségű vonali átvezetők esetén az alábbi típust választottam:
Trench COT 550-800

Az 550 kV lökő feszültség szint és a 800 A névleges áram megfelelő a transzformátor vonali végeihez. A gyártó kiválasztása esetén pedig a legalacsonyabb ár adott kiindulási pontot.

Csillagponti átvető esetén pedig az alábbi típust alkalmaztam:
Trench COT 325-800

Az átvezető paraméterei itt is kielégítik az összes igénybevételt.

Kisfeszültségű átvezetők esetén a DIN típusú csatlakozást részesítjük előnyben. Jelen ajánlat esetén a Cedaspe gyártmányú átvezetőket alkalmaztam, mivel ezek a legolcsóbbak ezen a feszültség- és áramszinten.



7.Konklúzió

A szakdolgozatomban sikeresen megterveztem az ügyfél által kért transzformátort.

Az aktív rész megfelel minden tervezési irányelvnek, az IEC szabványokban foglalt lőkő igénybevételeknek, valamint a költségoptimalizálás során sikerült egy sokkal optimálisabb végeredményt kapnom. A hűtés megtervezése során tartottam az ügyfél által előírt hangnyomásszint értékeket.

A transzformátor megfelel az Európai hatásfok direktívának, tehát alkalmas arra, hogy Szügy térségében üzembe helyezzük és az alállomás részét képezze.

Szakdolgozatom során nagyobb betekintést nyertem a magyar transzformátorok tervezésére, így a későbbiekben nagyobb tapasztalattal fogom tudni megtervezni a transzformátoroknak.



Összefoglaló

Szakdolgozatom témájaként az erőátviteli nagytranszformátorok tervezését választottam. Ismertetem, hogy a Ganz Transzformátor- és Villamos Forgógépgyártó Kft-n belül hogyan történik egy árajánlat előkészítése, a vevő által elvárt adatok rögzítése és feldolgozása, a transzformátor aktív részének megtervezése és a tenderhez szükséges dokumentumok előkészítése.

A Transzformátor aktív részének tervezésekor a saját számítási módszereimet fogom alkalmazni. Miután kiszámítottam a főbb paramétereket, utána meghatározom a transzformátor melegedését, illetve az előírások szerint a szükséges hűtést. A túlfeszültség vizsgálat hosszadalmas mivolta miatt érdemesebb előrébb venni az optimalizálást, mivel a tekercsek kialakításának változtatásával jelentősen változik a próbafeszültségek esetén tapasztalható erőviszonyok nagysága.

Optimalizálás során mérvado paraméterek az anyagköltség, kapitalizáció összege, valamint az Európai csúcshatásfok tényező, a PEI.

Dolgozatomhoz egy háromfázisú, fázisonként három teljes axiális tekercselésű transzformátort választottam, amelyben megadták a maximális hangnyomások értékeit, valamint a kapitalizációs összeget.

Mostani munkám csak ajánlati szinten foglalkozik a transzformátorok tervezésével, egyszerűsítés miatt a választott tervezet során a transzformátor nem lesz zárlatpróbás. Tervezés szempontjából elengedhetetlen az alapfogalmak tisztázása, valamint egy elméleti áttekintő az alkalmazott megoldásokról.



Abstract

As the subject of my thesis, I chose the design of powertrains. I present how a quotation is prepared within Ganz Transformer and Electric Rotary Machine Manufacturing Ltd., the recording and processing of the data expected by the customer, as well as the design of the active part of the transformer and the preparation of the documents necessary for the tender.

When designing the active part of the Transformer, I will use my own calculation methods. After calculating the main parameters, the next step is to determine the heating of the transformer and the necessary cooling according to the regulations. Due to the lengthy nature of the surge test, it is better to take the optimization forward, since by changing the design of the coils, the magnitude of the power conditions in the case of test voltages changes significantly.

The parameters relevant for optimisation are the cost of materials, the sum of capitalization and the European peak efficiency factor, PEI.

For my thesis, I chose a three-phase transformer with three full axial windings per phase, in which the maximum sound pressure values and the capitalization amount were given.

My current work deals only at the tender level with the design of transformers, due to simplification, the transformer will not be a short circuit tester during the chosen draft. From the point of view of planning, it is essential to clarify the basic concepts, as well as a theoretical overview of the solutions used.



Köszönetnyilvánítás

Ezúton is szeretnék köszönetet mondani Párkányi Csaba és Angyal László kollégáimnak, hogy segítették a szakmai fejlődésemet, valamint a szakdolgozatom elkészülését.

Köszönetet szeretnék mondani Dr.Morva György tanár úrnak, hogy segítségemre volt a szakdolgozat és az egyetemi tanulmányaim során.



Hivatkozások

Európai hatások direktíva

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1783&from=EN> [1]

Nagytranszformátorok-Dr.Karsai Károly-Dr.Kerényi Dénes-Dr.Kiss László

[2] 285.oldal,[3] 297.oldal ,[9] 28.oldal,[11] 33.oldal,[12] 45.oldal,[13] 85.oldal,[14] 55. oldal,[16] 261.oldal,[17] 361.oldal,

Inhibitált és Inhibitálatlan olajok

<https://www.electricaloilservices.com/?faq=what-is-the-difference-between-uninhibited-and-inhibited-electrical-oils>

[4]

Erőátviteli transzformátorok tekercstípusai-Dr Ujházy Géza

[6],[15]

Ganz Transzformátor- és Villamos Forgógépgyártó KFT belső anyaga

[7],[8],[10],[15],

IEC 60076-3

[5] 17. oldal [18] 40.oldal