



SZAKDOLGOZAT



ÓE-KVK

Hallgató neve: Orgován Kinga Nikoletta

2021.

Hallgató törzskönyvi száma: T004343/FI12904/K

Modul csoport: Villamosenergia- rendszerek



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. december 15.

Orgován Kinga
hallgató aláírása



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Villamosenergetikai Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Orgován Kinga Nikoletta
Szakdolgozat száma: SZD21121308204634
Törzskönyvi száma: T004343/FI12904/K

Neptun kódja: XXXXXXXXXX

Szak: villamosmérnöki (Budapest)
Specializáció: Villamos-energetikai
Villamosenergia-rendszerek modul

A dolgozat címe: Nagyteljesítményű transzformátorok hűtési közegének és rendszereinek az összehasonlítása

A dolgozat címe angolul:

A feladat részletezése: 1. Röviden mutassa be a nagyteljesítményű transzformátorokban használt szigetelőanyagokat és azok öregedését!
2. Mutassa be a nagyteljesítményű transzformátoroknál alkalmazott hűtési rendszereket!
3. Részletesen mutassa be a tervezés során használt termikus modellt, majd térjen ki az OFAF és ODAF hűtési módok közelítő, hőtechnikai tervezésére!
4. Mutassa be a Computational Fluid Dynamics (CFD) elemzést és a Thermal-Hydraulic Network Modelling (THNM) eljárást!
5. Hasonlítsa össze a különböző hűtési módszereket és fogalmazzon meg ajánlásokat, javaslatokat az élettartammal, megbízhatósággal és hatékonysággal kapcsolatban!

Intézményi konzulens neve: Szén István

Külső konzulens neve: Dr. Nádor Gábor

Munkahelye: Ganz Transzformátor- és Villamos Forgógépgyártó Kft

A kiadott téma elévülési határideje: -

Beadási határidő: 2021. 12. 15.

A szakdolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Budapest, 2021. 12. 15.

P.H

.....
Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom:

.....
belső konzulens


.....
külső konzulens

Tartalomjegyzék

Köszönetnyilvánítás	6
Bevezetés	7
1. Hőtan alapok bemutatása a szigetelőanyagok kapcsolatában.....	8
1.1. A transzformátor melegedése	8
1.2. Szigetelő anyagok öregedése és ennek hatása a transzformátor élettartamára	10
1.2.1 Papír szigetelés	10
1.2.2. Olaj szigetelés – Transzformátor olaj jellemzőinek bemutatása	11
1.2.2.1. A transzformátor olaj jellemzői	11
1.2.2.2. A transzformátor olaj öregedése	13
1.2.2.3. A transzformátor olaj kezelése	15
1.2.3. Olaj -papír szigetelés	16
2. Transzformátor hűtési rendszerek bemutatása.....	19
2.1. A transzformátorok hűtési osztályai	19
2.2. Az olaj-transzformátorok hűtési módok szerinti csoportosítása.....	20
3. Melegedési számítások a különböző hűtési rendszer összehasonlításában	21
3.1 Melegedési modell	21
3.2 A melegedés számítás közelítő módszere.....	22
3.3 OFAF hűtésű transzformátor közelítő hőtechnikai tervezése.....	24
3.4 ODAF hűtésű transzformátor közelítő hőtechnikai tervezése	31
3.5 A CFD elemzés és a THMN modell bemutatása	35
4. Hűtési módszerek gyakorlatban való összehasonlítása	39
4.1 Melegedések és hőmérsékletek a transzformátorban.....	39
4.1.2. A transzformátor melegponti hőmérsékletének meghatározása	41
4.2 A különböző hűtési módok összehasonlítása.....	42

4.2.1. ONAN hűtési rendszer.....	43
4.2.2. ONAF hűtési rendszer	44
4.2.3. OFAF hűtési rendszer	44
4.2.4. ODAF hűtési rendszer	46
Összefoglaló.....	48
Summary.....	50
Irodalomjegyzék	52
Ábrajegyzék	53
Függelék.....	54

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani iparági konzulensemnek, Dr. Nádor Gábornak, aki a kellő időt rám szánva, szakértelmével, hasznos magyarázataival, iránymutatásával végig vezette, biztosította a dolgozatom elkészülését. A Ganz-gyár transzformátorgyártó üzemében az általa biztosított látogatással pedig a dolgozatom gyakorlati hátterére is rálátást adott.

Hálás köszönettel tartozom intézményi konzulensemnek, Szén Istvánnak, aki hasznos tanácsaival, biztatásával és töretlen kitartásával mellettem, nélkülözhetetlen volt a dolgozatom megírásában.

Köszönöm továbbá oktatóinknak és intézményi dolgozóinknak a lelkiismeretes, kitartó munkájukat, amivel támogatnak minket a versenyképes tudásunk megszerzésében.

Végül köszönöm Andreának, aki a beszélgetéseink alkalmával kedvességével támogat és ezzel hozzásegít céljaim eléréséhez.

Bevezetés

Munkám során a transzformátor alállomás kivitelezési területen szereztem tapasztalatot. Elmondható, hogy a transzformátor költsége egy nagyfeszültségű alállomás kivitelezése kapcsán igen jelentős rész az egész kivitelezés tekintetében, így annak élettartamának megóvása, abszolút elsődleges szempont kell, hogy legyen, mind a beruházás mind az üzemeltetés szempontjából.

A dolgozatomban szeretném bemutatni a transzformátor várható élettartamának csökkenésének az okait, valamint megóvásának, illetve növelésének a lehetőségeit.

A transzformátorok hűtési rendszereit bemutatva pedig szeretnék eljutni oda, hogy látható legyen, hogy napjainkban melyik hűtési rendszer választása esetén kapjuk a leghatékonyabb teljesítményt, szem előtt tartva a gazdaságossági szempontokat és természetesen a várható élettartam megóvását is.

Nagyteljesítményű transzformátorok hűtési közegének és rendszereinek az összehasonlítása

„A transzformátor a kölcsönös indukció elvén működő készülék, és általában arra szolgál, hogy a kisfeszültségű villamos teljesítményt nagyfeszültségűvé, illetve a nagyfeszültségű villamos teljesítményt kisfeszültségűvé alakítsa. Az üzemszerűen használható első transzformátor, Déri, Bláthy és Zipernowsky Ganz gyári mérnökök szabadalma alapján 1885-ben, a Ganz gyárban készült. A transzformátor megjelenésétől lehet számítani a villamos energia felhasználásának a szó szoros értelmében vett elterjedését. Ugyanis a transzformátor alkalmazása tette lehetővé a villamos energia nagyfeszültségen való gazdaságos átvitelét.” (Uray Vilmos – Villamos gépek üzeme 1961.)

1. Hőtani alapok bemutatása a szigetelőanyagok kapcsolatában

1.1. A transzformátor melegevé

A transzformátorok működésekor nem elhanyagolható mennyiségű veszteség képződik hő formájában, amit a környezetüknek át kell adni.

Ilyen a *vasveszteség*, mely a vasmagban kialakuló örvényáramok és a hiszterézis veszteség miatt alakul ki, a *rézveszteség*, ami a tekercsek ohmos ellenállása következtében alakul ki, a szórt mágneses tér által a szerkezeti elemekben keltett örvényáramú veszteségek, valamint a *dielektromos veszteség*. Normál üzemi hőmérsékleten az 50 Hz-es transzformátoroknál a dielektromos veszteség elhanyagolható, így a méretezésnél elhagyható. A transzformátorban keletkezett hő nem megfelelő elvezetése esetén kárt okozhat a papírszigetelésben és a folyadék közegében. Ezt megakadályozva a keletkezett veszteség hatékony elvezetésére hűtőcsatornákat alakítanak ki a tekercsekben, szükség esetén a vasmagban is.

A meleg testről a hő átadása annál hatékonyabb, minél nagyobb a hőfokkülönbség és a hatékonyság függ a közvetítő közegtől is. A folyadék hőelvonása hatékonyabb a levegőnél, a keringtetett levegő vagy folyadék, pedig hatékonyabban von el hőt, mint a nyugvásban lévő.

Az olajtranszformátorokban az olaj a közvetítő hűtőközeg szerepét is betölti a szigetelő szerepen kívül. Az aktív részben keletkezett hőt az olaj veszi fel és szállítja el a radiátorba vagy hőcserélőbe. A radiátorban vagy hőcserélőben az olaj átadja a hőt a külső - általában levegő vagy víz - hűtőközegnek.

Melegedésen a transzformátor valamely része és a külső hűtőközeg közötti hőmérséklet különbségét értjük.

A transzformátor maximális terhelhetősége függ a névleges teljesítményétől, a hűtőközegének és szilárd szigetelésének hőmérsékletétől és az üzemeltető azon döntésétől, hogy a szigetelőanyagok hőmérséklet és időtartam hatására bekövetkező öregedését lassítani kívánja-e. [1] [2]

A szigetelő anyagoknak a megengedettnél nagyobb hőfokra való melegedése elkerülendő a fentieket figyelembe véve. Ehhez a veszteségeknek a minimálisra való csökkentését kell előírni, ami mellett a természetes léghűtéssel állandó/állandósult állapotban¹ sem melegszik túl a szigetelés a megengedett értékhez képest. Amennyiben a veszteségek műszaki és/vagy gazdaságossági okok miatt ilyen kis értéken nem tarthatók, a hőátadást, illetve a hűtés hatásosságát kell fokozni. A hatásosság fokozása létrejöhet a ventilátorokkal elért erős légáramlat létrehozásával, valamint az olajba helyezett vasmaggal és tekercsekkel. Ez a transzformátorok két fő csoportjának, a száraz- és az olajtranszformátoroknak a kialakulásának oka. [8]

Az olaj szerepe láthatóan kettős, a szigetelő és a hőelvezető képességével van jelen a transzformátor működésében. A vasmag és a tekercsek hatékonyabb hűtését teszi lehetővé a száraz transzformátorokkal ellentétben, így az olajjal töltött transzformátorok kisebb méretűek, aminek a szerepe jelentős a nagyteljesítményű transzformátorokat tekintve.

A transzformátor üzeme közbeni veszteségek okozta mindenkorai hőelvezetést olyan módon kell megoldani, hogy a hő leadásához szükséges hőfokkülönbség ne érjen el olyan magas hőfokot, ami a szigetelőanyagok tartósságát veszélyezteti. [1] [2]

¹ Állandó/állandósult vagy nyugalmi állapot: Ha valamely testben meleg fejlődik, akkor ennek a hőfoka mindaddig emelkedik, amíg a hőfokkülönbségnek megfelelően másodpercenként ugyanannyi meleg adódik át a környezetnek, mint amennyi benne fejlődik. Az így elért egyensúlyi állapotot tekintjük állandó vagy nyugalmi állapotnak.

(Kellner József és S. Pöschl Imre – Elektrotechnika II: rész; Athenaeum nyomda-1922 - 33oldal)

1.2. Szigetelő anyagok öregedése és ennek hatása a transzformátor élettartamára

A transzformátor belső szigetelései, helyük és szerepük alapján négy kategóriába sorolhatók. *Menetszigetelés*, ami a transzformátortekercsek különböző potenciálon levő meneteit választja el egymástól. *Tekercsen belüli szigetelés*, a tárcsák és rétegek közötti szigetelés. *Főszigetelés*, a tekercsek között, illetve az egyes tekercsek és a földelt részek között. A tekercsek *belső összeköttetéseinek és kivezetéseinek szigetelése*. A transzformátorok külső szigetelése átvezető szigetelőkön keresztül valósul meg. [1] [2]

1.2.1 Papír szigetelés

A transzformátorokban szigetelésre használt papír fontos jellemzője a szakítószilárdság, ami kN/m-ben van kifejezve². A villamos tulajdonságai közül a legfontosabb az 50 Hz-es villamos szilárdsága, ami száraz állapotban, vékony rétegen 100-150 kV/cm.

A papír öregedését a *hő*, a *nedvesség* és az *oxigén* hatása okozza. Egyéb tényező, mint a villamos tér is közre játszhat a folyamatban, de ennek az előzőkhez képest a mértéke kisebb. A papír szigetelőanyag öregedése elsődlegesen a mechanikai tulajdonságok romlását okozza, a villamos szilárdság csökkenése másodlagos. Amíg nem veszíti el mechanikai szilárdságát, nem szenesedik, töredezik el, addig villamos szempontból megfelelő. Az öregedés a polimerizációs fok (cellulóz egymáshoz kapcsolódó glukózgyűrűinek a száma) alapján is megítélhető, ami egy kémiai jellemző, minél kisebb ez a száma, annál kisebb a papír szakítószilárdsága. Ezeken kívül az öregedés jellemzésére a degradációs tényező használatos, ami a cellulózláncban az öregedés hatására létrejött gyűrűszakadások számával arányos.

Üzemeltetési szempontból kritikus fontosságú a transzformátor *hőmérséklete*, mely a terheléssel hozható összefüggésbe. Terhelés következtében kialakuló 6°C-os hőmérsékletemelkedés, az IEC 60076-7 nemzetközi szabvány szerint a transzformátor szigetelési rendszerének (vagyis a gép egészének) az élettartamát a felére csökkenti.

² Adott vastagságú, 1 méter széles papírt mekkora erővel kell húzni annak szakadásáig.

A *nedvesség* az öregedési folyamatot a papír szigetelésben jelentősen gyorsítja.³ A papír 4% -os nedvességtartalommal, 130 °C -on hússzor gyorsabban öregedik, mint 0,5% -os nedvességtartalom esetén. Az öregedési folyamaton felül a papír nedvességtartalma annak veszteségi tényezőjének növekedését is okozza. A $tg \delta$ értéke, nagy nedvességtartalom esetén akkora lehet, hogy az a szigetelésben termikus instabilitást és átütést válthat ki. A transzformátor kezdeti víztartalmát és az üzem közbeni nedvességtartalom felvételét, a minimálisra kell szorítani. Az élettartam szempontjából a káros hatások a víztartalom 0,5%-alatt tartásával elkerülhetők.

Az *oxigén* jelentősége a három tényező közül a legkisebb a papír öregedése szempontjából. Laboratóriumi kísérletekben, legfeljebb kétszeres öregedés gyorsulást értek el. [1] [2] [3] [9]

1.2.2. Olaj szigetelés – Transzformátor olaj jellemzőinek bemutatása

A transzformátor olaj, mint ahogy már korábban említésre került, szigetelő és hűtő szerepet tölt be a transzformátorban. Az analitikus tényezői mellett, elsősorban a villamos jellemzők és az öregedésre / várható élettartamra vonatkozó jellemzői a mértékadók. Az idő előrehaladtával nagyobb lett az transzformátor olaj igénybevétele, amit az indokolt, hogy a megnövekedett transzformátor teljesítmények ellenére a transzformátornak a méreteit a vasúti úrszelvény méretein belül kell tartani. [9]

1.2.2.1. A transzformátor olaj jellemzői

A transzformátor olaj alapanyaga a finomított ásványi olaj. Ahhoz, hogy elérje az igényelt tulajdonságokat, további finomításon és kezelésen kell keresztül mennie. A transzformátorban üzem közben számos tényező befolyásolja az olaj állapotát – pl. hő és villamos erőter, vörösréz katalitikus hatása-, ami hatására az olaj *nedvességtartalma*, *savassága* megnövekedhet, valamint *kátrányos kiválások* is előfordulhatnak. Ezen változások negatív hatással lehetnek a hűtő és szigetelő tulajdonságaira, a savtartalom

³ 100%-os relatív nedvesség tartalmú, szoba-hőmérsékletű levegővel érintkezve a papír, ~ 15%, ~ 60% -os nedvesség tartalmú levegővel érintkezve, abból ~8%, relatív 20%-os nedvesség tartalmú levegőből, ~ 4% nedvességet képes magába szívni. (Karsai – Kerényi Kis- Nagy transzformátorok; Műszaki Könyvkiadó - 1973; 237 oldal)

pedig a szigetelést is károsíthatja. Emiatt mentesnek kell lennie a szervetlen savtól és a kéntartalomtól is ami az áramot vezető érintkező felületeket is megtámadhatja. Szerves savat azonban minden olaj tartalmaz kisebb mennyiségben, amely száma az öregedés következtében nő. Erre a folyamatra a szervessavszám mérőszám jellemző.

Az olaj további általános jellemzőihez tartozik a *fajsúlya*, a *lobbanáspontja*, a *dermedés pontja*, a *viszkózitása* és a *dielektromos veszteségi tényezője*.

A szigetelés szempontjából az *átütési szilárdsága* kiemelt tényező, ami a víztartalom függvénye. Alapvető követelmény, hogy a transzformátor olajnak a vízmentesnek kell lennie, hogy az átütési szilárdsága a szükséges villamos követelményeknek megfeleljen.

Az általános jellemzőiről elmondható, hogy az olaj *fajsúlya* kisebb, mint a vízé, a megfagyott víz fajsúlya pedig még a víznél is kisebb, ezért az olaj fajsúlyánál fontos, hogy valóban kicsi legyen. Így érhető el, hogy a vízréteg vagy a megfagyott jégkristályok jól elválasztottan az olajtól, a tartály alján helyezkedjen el. Az olaj kisebb fajsúlya azt is biztosítja, hogy a nagy olaj áramlási sebességnél a transzformátor feszültség alatti részeihez ne kerüljön biztosan megfagyott jégkristály. Az olaj *lobbanás pontja* a tűzveszély szempontjából kedvező lenne, ha nagy lenne. A transzformátor olaj lobbanáspontja viszont viszonylag kicsi, így tűzveszélyes anyagnak tekinthető.

A *viszkózitásának* elsősorban üzemi hőmérsékleten van jelentősége, a hűtőhatás szempontjából. A természetes levegőhűtésű transzformátorokban fontos, hogy már kis hőmérséklet különbség hatására is meginduljon az olajáramlás. A nagyobb viszkózitású olajnak a lobbanáspontja kisebb és az öregedésállandósága is kedvezőtlenebb.

Az *átütési szilárdsága* az olaj pillanatnyi víztartalmára jellemző. Ez szállítás és tárolás közben is változhat, üzem közben a levegővel érintkezik az olajkiegyenlítő edényben és a levegőből vizet vehet fel. A transzformátor olajjal való feltöltése előtt az transzformátor olajból a nedvességet ki kell vonni. A transzformátor olaj erősen nedvszívó, ha hőmérséklete alacsonyabb, vagy közel azonos, mint a környezeti hőmérséklet, akkor a levegő nedvességéből az olaj vizet von el. Emiatt a betöltés előtt az olajat a környezeténél magasabb hőmérsékletre kell melegíteni. Az üzemben lévő transzformátorok olajhőmérséklete általában nagyobb, mint a környezeté, így ez kedvező, valamint az tapasztalható, hogy amennyiben nincs a raktározás helyén nagy hőmérséklet ingadozás az üzemen kívül álló transzformátor olajtöltésének átütési szilárdsága hosszabb tárolás során

sem változik. Mint üzemzavari tartalékokként tárolt transzformátorok esetében ez igen kedvező jellemző.

A víz az olajban jelen lehet oldott állapotban, emulziót képezve – *finom eloszlásban* vagy, *cseppalakban* – durva eloszlásban. Az olaj nagyobb hőmérsékleten több nedvességet képes oldott állapotban tartani, ami a villamos szilárdságot nagymértékben befolyásolja. Emulziót képezve a nedvesség az olaj színét zavarossá teszi és a *dielektromos* tulajdonságai lerontásával pedig akár használhatatlanná is teheti. A csepp formájában lévő nedvesség a legmélyebb pont felé igyekszik, és itt a villamos szilárdság nagymértékű helyi csökkenését okozza, ami közvetlen sérüléshez vagy a szigetelés villamos szilárdságának teljes letörésére, átütéséhez vezethet.

Az előregedett olajban az olaj és a víz közötti határfeszültség különbség kisebb, ebből következik, hogy a *határfelületi feszültség* számértéke az öregedés mérőszámának is tekinthető.

A transzformátor olaj *dermedéspontjának* -35- -45 °C között kell lennie a szabványban meghatározottak alapján. [8]

Fontos szempont, hogy üzemben kívül álló transzformátor a szokásos környezeti viszonyokban télen se dermedjen meg. A dermedt olajjal üzembe helyezett transzformátornál előfordulhat, hogy a tekercsek környezetében az olaj felmelegszik, híg folyóssá válik, de a hűtőben lévő olaj nem, így az olajáramlás nem tud kialakulni. Ekkor a tekercsek közelében lévő olaj túlmelegszik, ami a transzformátor károsodásához is vezethet. [1] [2] [3] [9]

1.2.2.2. A transzformátor olaj öregedése

A transzformátorokban használt olaj öregedési folyamatán a hőfokkal fokozódó oxidációs folyamat érhető, ami hatására az olaj megsűrűsödik. A szén és a kátrány kiválasztódik, ez az olaj keringését lassítja, a hőfok tovább emelkedik, hatására az olaj tovább sűrűsödik. Ennek elkerülése céljából olyan összetételű olajfajták kerültek használatban, ahol ez a folyamat nem tud létrejönni

A transzformátor olaj mindig tartalmaz öregedés gátló anyagokat. Az üzemi hőmérséklet, az oxigén, a villamos térerősség, valamint a transzformátor anyagai, különösképpen a réz anyagának katalizáló hatására alakul ki az transzformátor olaj

öregedési folyamata. A természetes öregedés gátló anyagokon kívül külön öregedés gátló adalékanyagokat – *inhibitorokat* - is hozzáadnak a fokozott igénybevételű olajhoz. Ez csak a természetes öregedésgátló anyagokkal rendelkező olaj esetén hatásos, a nem megfelelő alapanyagú olaj inhibitálása is gyenge minőségű marad.

Az öregedési folyamat *iszapkiválást* is okozhat, ami okozhatja a hűtőhatást csökkentését, mert az lerakódva csökkentheti az áramlási sebességet. Az iszap eltávolítása nehéz feladat, mert iszaplerakódás még az alapos olajiszap eltávolítás után is marad iszapmaradék, ami az olajat „fertőzi”. Ez ellen az inhibitorral jelentősen túladagolt olajjal lehet védekezni.

Az olajban lévő *gázok* is az olaj villamos szilárdságát csökkentik, amik hasonló eloszlásban lehetnek jelen: oldatban, finom eloszlásban és durva eloszlásban. A gázzal telített olajban - hőmérsékletváltozás hatására, vagy nyomáscsökkenés illetve, a változó kémiai folyamatok hatására- a telített állapotban oldott gáz mennyisége csökken. Ennek egy része felszabadul, ez általában finom eloszlásban jelenik meg. Ez az állapot az olaj zavaros színét idézi elő, a jelenség átmeneti, ugyanis a mikroszkopikus gázbuborékok nagyobb zárványokká egyesülhetnek. Végül a buborékok mozgásnak indulnak a folyadék felszín irányába. A gázzárványok nagy térerősségű helyre kerülve, a transzformátor hibáját okozó villamos sérüléseket okozhatnak.

Az olajban lévő *mechanikai szennyeződések* - papír, vagy fonaldarabok - vezető hidat képeznek transzformátor különböző potenciálon lévő részei között. Amennyiben az olaj még nedvességgel is szennyezett az tovább ront a kialakult állapoton. Az így létrejövő esetleges átütésektől a transzformátor tönkre is mehet.

Tehát az olajban lévő gázok, az olaj élettartamára negatív hatással vannak, azt rövidíthetik. Az olajban lévő levegő vagy oxigén, olyan kémiai változást indíthat el, ami az olaj villamos tulajdonságainak tartós romlását és öregedését okozhatja.

A nedvesség az olaj élettartamát nem befolyásolja, azonban a papírba jutva annak öregedését okozhatja.

Az transzformátor olaj öregedési hajlamát mesterséges öregítési folyamat elvégzésével lehet megítélni, ami után az olaj nem változhat meg akkora mértékben, hogy utána a szabványban megengedett határértékeket túllépné. [1] [2] [3] [9]

1.2.2.3. A transzformátor olaj kezelése

A transzformátorolaj időszakos ellenőrzésekor mért jellemzők amennyiben határértéken kívül esnek, különböző kezelési folyamatokkal kell azokat a szükséges értékek közé visszaállítani. A víztartalma, ami nem kizárólag az öregedési folyamat mellékterméke, származhat külső behatásból is. A nedvességet *szárítással* tudják kivonni az olajból, olajfilmet képezve, vákuum hatására nedvesség kilép az olajból. A szárítás fokozását a hőmérséklet és a vákuum fokozásával lehet elérni, ekkor már figyelni kell, hogy az olajból olyan párlatok ne távozzanak, melyek hiánya már az olaj összetételét megváltoztatná.

A tekercsek papírszigetelésében felszívódott víz az olajba szívárog át, így az olaj szárítása a transzformátor egész szigetelés állapotát javítja

Az olaj *regenerálásaként* az abból az öregedés hatására keletkező iszap, szerves sav, üledék, egyéb kiválási termék eltávolítása történik. Ekkor az oxidálódott olajat nagy aktív felületű granulált derítőföldön vezetik keresztül, ami az öregedés termékeit abszorbeálja.

Az olaj *szűrése* a fenti két eljárással egyidejűleg vagy azt megelőzően még elvégzendő feladat. Ekkor az olajban lévő szennyeződések kerülnek eltávolításra. Szűrőpapírt helyezve az olaj áramlás irányába és azon áteresztve az olajat nem csak a szilárd szennyeződések fogja fel, hanem a vízben lévő szilárd, ill. nedves szennyeződések is felszívja, ezzel a nedvességtartalmát is.

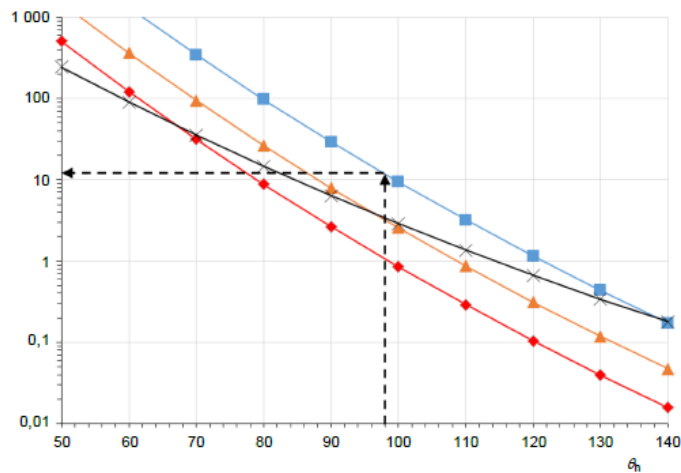
Normál üzemi körülmények között az ásványolajok élettartalma 20-25 évre becsülhető, de többszörös regenerálással akár háromszorozható is ez az életkor. Az olajregnálás nemcsak gazdaságosabb megoldás az olajcseréhez képest, hanem műszakilag és környezetvédelmi okok miatt is hatékonyabb megoldás. [2] [9]

1.2.3. Olaj -papír szigetelés

Az olajjal impregnált rétegzett papír villamos szilárdsága sokkal nagyobb, mint a két komponensé külön- külön. Ebben a kivitelen a papír szerepe az, hogy az olajat szakaszokra bontja fel. A papír rostjai, rétegei közé bekerülve az olaj vékony hártát képez, aminek a villamos szilárdsága nagyobb, mint az olaj vastagabb rétegei között. Ebben a kombinációban az olajhárták villamos szilárdsága a mértékadó, mivel az olaj villamos szilárdsága kisebb, mint a papír rostjainak szilárdsága, valamint az olaj permittivitása is kisebb, ebből következik, hogy a villamos igénybevételek nagyobb részét az olaj veszi magára. A villamos szilárdságot a nedvességtartalom elsősorban meleg állapotban befolyásolja.

A transzformátor élettartama egyenlő a szilárd szigetelésének élettartamával. Szilárd szigetelésen az olajjal impregnált papírt értjük. A papír élettartama meghatározza a transzformátor élettartamát, ezért ennek állapotmegőrzése elsődleges fontosságú. A nedvességtartalmat a papírban 0,5% alatt, az olajban pedig 20 ppm alatt célszerű tartani a villamos szilárdság és az öregedési folyamat szinten tartása végett. Az olaj- papír- víz rendszerben adott hőmérséklethez adott víztartalom lehet jelen mind a papírban, mind az olajban. Az egyensúly megbomlásakor a víz az olajon keresztül átvándorol a papírba, vagy fordítva. A transzformátor vízállománya különböző hőmérsékleten más és más, magasabb hőmérsékleten az olaj több, a papír kevesebb nedvességet képes oldatban tartani. [2]

Az olaj- papír szigetelés élettartamának hőmérséklet-függésére az IEC 60076-7-es szabvány ad információt.



1. ábra- Nem magas hőállóságú papír várható élettartam függése a nedvesség, oxigén és hőmérsékelt viszonyában. -

IEC 60076-7:2018

□: 5% nedvesség, alacsony oxigén szint

Δ: 1,5% nedvesség, alacsony oxigén szint

◇: 3,5% nedvesség, alacsony oxigén szint

×: 0,5% nedvesség, magas oxigén szint

Az Y tengely a várható élettartamot mutatja meg, az X tengelyen vett melegponti hőmérsékletéhez képest.

Az olaj alapvető feladata tehát a jó villamos tulajdonsága mellett a transzformátor hatékony hűtése és a szilárd szigetelés- papír védelmének ellátása. A nagyteljesítményű transzformátorok olaj – papír szigetelésűek. Nem magas hőállóságú papír esetén a papír szigetelés élettartama a fenti ábra szerint kb. 11,7 év. Azonban a gyakorlatban a környezeti hő-, valamint a terhelés sincs állandóan a maximumon, ezért élettartamuknak a becsült értéke meghaladhatja az 50 évet.

A jelenlegi gyártásban elterjedt olajos -papír és olaj-prespán szigetelést a mai napig semmiféle műanyag szigetelésnek sem sikerült kiszorítani. Nagy villamos szilárdsága, jó hűtő tulajdonsága és viszonylag egyszerű regenerálhatósága okán ez a szigetelési rendszer van jelen a legnagyobb teljesítményű transzformátorokban.

Továbbá szót kell ejteni a térben korlátozott kiterjedésű – villamos, termikus, mechanikai túl-igénybevétel miatt fellépő helyi romlásokról, roncsolásokról, melyek szintén a szigetelésen keresztül a transzformátor élettartamára lehetnek negatív hatással:

Villamos túl-igénybevétel- részleges kisülést okoz, ami által roncsolja a környező szigetelést, ez idővel teljes átütést okozhat.

Termikus túl-igénybevétel- meleg pontokat képez, ami fokozatosan degradálja a papírszigetelést és elősegíti az olaj korai oxidációs öregedését.

Mechanikai túl-igénybevételek- ezeket elsősorban rezgések, zárlatok erőhatásai okozzák a papír fizikai roncsolódását és emiatt, villamos túl-igénybevételt is okozhatnak. Ennek a következménye lehet a menetzárlat. [1] [2] [3] [4]

2. Transzformátor hűtési rendszerek bemutatása

2.1. A transzformátorok hűtési osztályai

Az **első betű** a belső tekercsekkel érintkező hűtőközeget jelöli:

- O Ásványi olaj, vagy szintetikus szigetelő folyadék 300 °C alatti gyulladáspont
- K Szigetelő folyadék 300 °C feletti gyulladásponttal
- L Szigetelő folyadék nem mérhető gyulladásponttal

A **második betű** a belső hűtőközeg cirkulációs mechanizmusát jelöli:

- N Természetes áramlás a hűtőberendezésen és a tekercsekben
- F Kényszerített áramlás a hűtőberendezésben, természetes áramlás a tekercsekben
- D Kényszerített áramlás a hűtő berendezésben, – közvetlenül a hűtőberendezésből legalább a fő tekercsbe

A **harmadik betű** a külső hűtőközeget jelöli:

- A Levegő
- W Víz

A **negyedik betű** a külső hűtési mechanizmust jelöli:

- N Természetes hőáramlás
- F Kényszerített hőáramlás [6]

2.2. Az olaj-transzformátorok hűtési módok szerinti csoportosítása

Olajtranszformátorok	ON	Természetes olaj hűtés	Oil Natural
	ONAN	Természetes olaj és természetes levegő	Oil Natural Air Natural
	ONAF	Természetes olaj és kényszer levegő	Oil Natural Air Forced
	OFAN	Kényszer olaj és természetes levegő hűtés	Oil Forced Air Natural
	OFAF	Kényszer olaj és kényszer levegő hűtés	Oil Forced Air Forced
	ODAF	Kényszer olaj és kényszer levegő- a tekercsen belül az olajáramlás irányítva van	Oil Direct Air Forced
	ONWF	Természetes olaj és kényszer vízű hűtés	Oil Natural Water Forced
	OFWF	Kényszer olaj és kényszer vízű hűtés	Oil Forced Water Forced

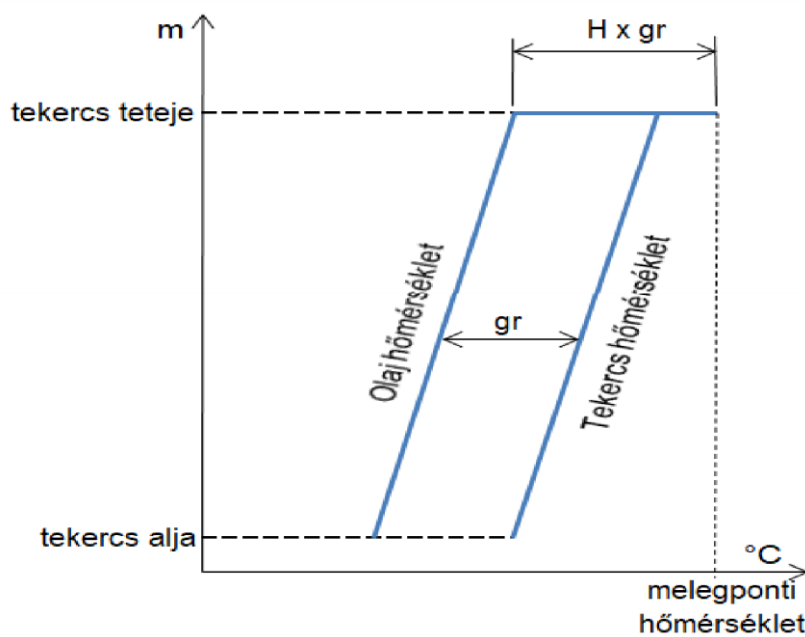
A hazai legnagyobb teljesítményű (500MVA) transzformátorokat a következő hűtési rendszerekkel tervezik – ONAN/ ONAF / ODAF [6]

3. Melegedési számítások a különböző hűtési rendszer összehasonlításában

3.1 Melegedési modell

Melegedési modell állandósul állapotra a következő egyenlettel írható fel: [8]

$$\vartheta_{\text{melegpont}} = \vartheta_{\text{környezet}} + \Delta\vartheta_{\text{felső olaj tekercsben}} + H \times gr$$



Az ábra alapján feltételezzük, hogy:

- ismerjük az olaj hőmérsékletét a tekercs alján és tetején; ismerjük a tekercs hőmérsékletét;
- az olaj hőmérséklet lineárisan növekszik a tekercs aljától a tetejéig;
- gr tekercs gradiens a tekercs magassága mentén állandó;
- H melegpont tényező ismert. [7]

2. ábra: Melegedési modell – IEC 60076-7:2018

A melegponti hőmérséklet emelkedése magasabb, mint a vezető hőmérséklet emelkedése a tekercs tetején.

Az olaj melegedése az összes veszteség 'X'-edik hatványával változik.

Melegponti gradiens = melegponti hőmérséklet – legnagyobb olaj hőmérséklet- a terhelésnek az 'Y'-edik hatványával változik. Állandósult állapotra ezt az alábbi egyenletek mutatják be.

$$\vartheta_{\text{olaj}} = \vartheta_{\text{körny}} + \left[\Delta\vartheta_{\text{olajnévl}} * \left(\frac{\text{összes veszteség}}{\text{névleges veszteség}} \right)^X \right]$$

$$\Delta\vartheta_{\text{melegpont}} = H * g_{\text{névl}} * K^Y$$

ahol

$g_{n\acute{e}vl}$ – a névleges terheléshez tartozó tekercs-olaj gradiens

H – a melegponti tényező

K – a terhelési tényező, mely azt mutatja meg, hogy a névlegesnek hányszorosa a terhelés

	ONAN	ONAF	OF	OD
X	0,8	0,8	1,0	1,0
Y	1,3	1,3	1,3	2,0

Forrás: IEC 60076-7:2018; Tábla 4

A tábla adatai statisztikai nagy átlagra ad adatokat. Egy konkrét transzformátorra ezen adatokat a gyártó tudja megadni.

3.2 A melegedés számítás közelítő módszere

Egy transzformátor terhelhetőségét annak melegedése korlátozza. A névleges teljesítménynél nagyobb terhelés esetén, a gyártó által megadott terhelési diagramok vagy - egyéb információ hiányában - az *IEC 60076-7 – Loading Guide for Oil-Immersed Transformers*- terhelési irányelv használható. Meghatározó adat a *transzformátorok hűtésrendszere*, melynek osztályai a 2. pontban kerültek bemutatásra, a szabványi előírások ismerete, adatai.

A közelítő hőtechnikai ellenőrzéshez az alábbi adatok szükségesek:

1. Az IEC 60076-1 szabvány által megadott határértékek
 - a tekercs megengedett legnagyobb átlagmelegedése
 - az olaj megengedett legnagyobb melegedése
 - a hűtőközeg legnagyobb hőmérséklete
2. A hűtés rendszere - a méretezést valamelyik hűtési rendszerre kell elvégezni.

3. A tekercselés és a vasmag adatai

Geometriai jellemzők

A tekercsoszlopok méretei, az egyes vezetők méretei, a hűtőcsatornák mérete és elhelyezkedése, a tekercsen belüli olajjáratok kialakítása (axiális, radiális vagy cikk-cakk), a tekercselés teljes A felülete és betéttakarás nélküli A_k konvekciós felülete.

A vasmag mérete, a vasmag hűtőcsatornáinak mérete, a hűtőcsatornák teljes és betéttakarás nélküli felülete, a külső teljes felület és a takarás nélküli szabad konvekciós felület.

Hőteljesítmények

$P_{\text{ü}}$ - a transzformátor üresjárási vesztesége (W),

P_{rZ} – a transzformátor rövidzárási vesztesége (W),

valamint ezen veszteségek transzformátoron belüli eloszlása úgy, mint az egyes tekercsoszlopokban keletkező veszteség-hőáram, a transzformátor tervbe vett üzemi hőmérsékletére számítva. A tekercsekben keletkező egyenáramú és örvényáramú fajlagos hőteljesítmények nagysága és helye, a vasmagban keletkező fajlagos hőteljesítmények nagysága és helye.

4. Egyéb (inaktív) szerkezeti elemek és egységek:

Geometriai jellemzők

A külső hőleadó felületek, mint tartály és fedél méretei, a transzformátor burkolóméretének közelítő értéke. A különböző hűtőteljesítményű radiátorok vagy kompakthűtők, szivattyúk, ventilátorok, visszacsapószelepek, pillangószelepek, áramlásjelzők és csövezések méretei.

Hidraulikus jellemzők

A kompakthűtők tömegáram-nyomás karakterisztikái mind az olajoldalra, mind a hűtőközegoldalra különböző hőmérsékletű közegekre. A radiátorelemek olajoldali hidraulikai átmérője, a radiátorcsoportok különböző irányú légáramláshoz tartozó levegőoldali hidraulikai átmérője. A szivattyúk, ventilátorok tömegáram-nyomás karakterisztikái, különböző hőmérsékletű és sűrűségű anyag szállítására vonatkozóan. A visszacsapószelepek, pillangószelepek, olajáramlás-jelzők, tolózárak, csőívek alaki ellenállástényezői. A hidraulikai jellemzők előzetes kísérletek során meghatározott adatai.

Hőtechnikai jellemzők

A különböző hosszúságú radiátorelemek és különböző teljesítményű kompakt hűtők T_{oh} (P_k) karakterisztikái. Ahol a T_{oh} - az olaj átlagmelegedése a hűtőben a (P_k) – konevekciós teljesítmény. [9]

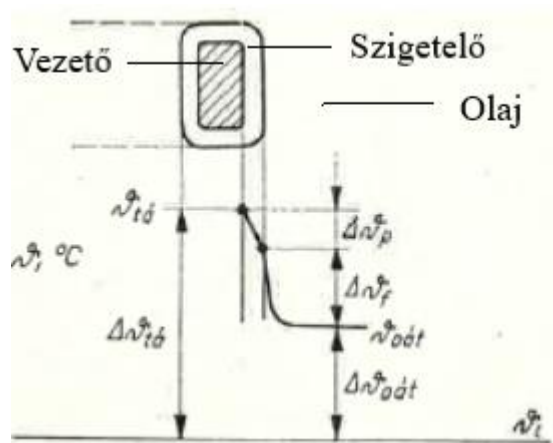
3.3 OFAF hűtésű transzformátor közelítő hőtechnikai tervezése⁴

A fejezethez tartozó jelölések magyarázata a függelék 1.sz. mellékletében található.

1. A Δt_{t-o} (tekercsátlag-olajátlag) hőmérsékletesítés kiszámítása.

A tárcsatekercsek melegedésszámításának egyszerűsítése érdekében a tárcsák görbületétől eltekintünk.

A tekercs olaj feletti átlagmelegedését megkapjuk, ha a felületi hőesési értéket és a szigetelésen át létrejövő hőesés értékét összegezzük. A tekercs átlagmelegedését a környezeti hőmérséklet felett pedig úgy kapjuk meg, ha az olaj feletti átlag melegedéshez hozzáadjuk az olajmelegedés értékét, melyet az alábbi ábra mutat be. [2]



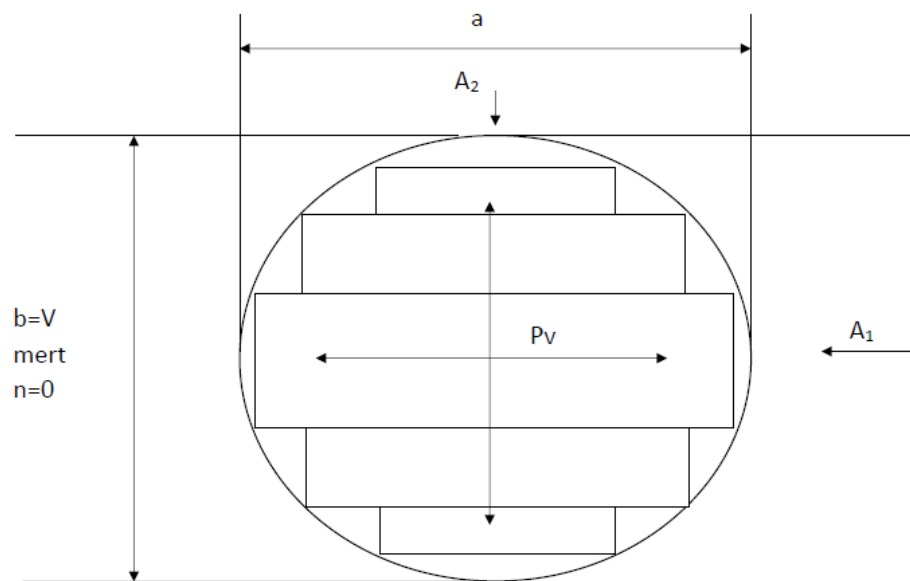
3. ábra: Hőesések, melegedések a tárcsatekercs környezetében – a Jelölések a függelék 2.sz. mellékletében láthatók-

⁴ Dr. Kiss László – Dr. Szemerey Zoltán – Hálózati transzformátorok – Műszaki Könyvkiadó, 1984 (163-177. oldal)

2. A vasmag felületi hőmérsékletesése

A vasvesztés az alábbi ábrán látható módon két irányba tud távozni: a lemez síkjában, illetve az arra merőlegesen.

A lemezek síkjában (a rajzon vízszintesen) jobb a hővezetés, mint az arra merőlegesen, ahol a lemezek közötti szigetelésen is át kell jutnia.

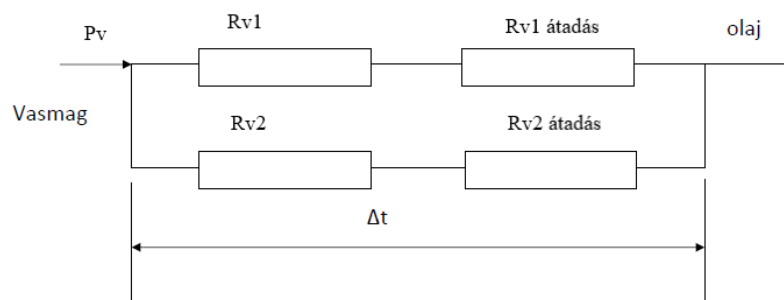


A fenti ábra az alábbi kapcsolási képlettel fejezhető ki, melynek villamos analógiája:

$I - P_v$ veszteség, hőáram

$R - R_v + R_{\text{átadás}}$ hőellenállások

$U - \Delta t$ vasmag-olaj hőlépcső



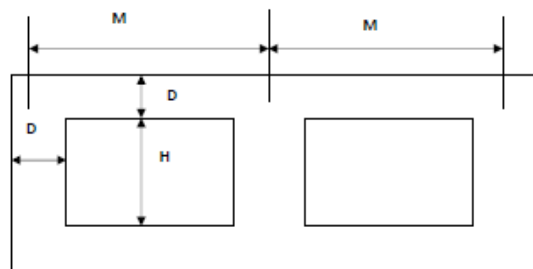
A vasmag olaj hőlépcső megadja, hogy a vas legmelegebb pontja mennyivel lesz melegebb, mint az olaj.

A lemezelés síkjára merőleges hőleadó felület a hosszirányú áramhoz az alábbi egyenlet adja meg:

$$A_h = \frac{(3H + 4M + 1.3D) \cdot (V - 0.0005n) \cdot 2}{n + 1}$$

A lemezelés síkjára párhuzamos hőleadó felület a keresztirányú hőáramhoz az alábbi egyenlet adja meg:

$$A_k = \frac{(3H + 4M + 2D) \cdot 2D(1 + 0.85n)}{n + 1}$$



n = hűtőcsatornák száma

D = vasmag átmérő

M = fázisosztás

V = vasmag vastagság összesen

H = Ablakmagasság

Forrás: Vasmagmelegedés számítás 3 oszlopos vasmagra - HOSV 26000/145

3. A $T_{o\dot{a}h}$ – az (olaj átlagos melegedése a hűtőben) értékét közelítő egyenlőnek tekintjük a $T_{o\dot{a}t}$ értékével:

$$T_{o\dot{a}t} = T_{o\dot{a}h}$$

A szabvány által megengedett $T_{t\dot{a}}^+$ (maximális tekercsátlag) melegedés értékétől kivonva az 1. pont szerint kiszámított Δt_{t-0} értékét, a $T_{o\dot{a}t}$ melegedést kapjuk:

$$T_{oát} = T_{tá}^+ - \Delta t_{t-0}^5$$

4. Az olaj maximális T_{om} melegedésének számítása. Az olaj Tom maximális melegedésének kiszámítás módja, A $T_{oát}$ értékéhez hozzá kell adni a tekercselésből kilépő és abba belépő olaj Δt_{to} hőmérséklet-különbségének a felét.

$$T_{om} = T_{oát} + \frac{\Delta t_{to}}{2}$$

5. Az aktív részek tömegáramának meghatározása. Mindegyik aktív részhez (tekercsek és vasmag) fel kell venni egy, az aktív részből kilépő és abba belépő olajra egy hőmérséklet – különbséget, Δt_{to} -t, ennek értéke aktív részenként különböző nagyságú lehet. A felvett Δt_{to} –val az aktív részben keletkező hőteljesítmény ismeretében kiszámítható az aktív rész Φ_{mto} tömegárama és az adott aktív részre adódó hidrosztatikai nyomáskülönbség:

$$\Delta p = (\gamma_{ohki} - \gamma_{oát}) h_t$$

$\gamma_{ohki} = Q_{ohki} g$, a tartályba a hűtőből kilépő olaj fajsúlya

$\gamma_{oát} = Q_{oát} g$, a tekercselésben áramló olaj fajsúlya a $t_{oát}$ hőmérsékleten

h_t – a tekercsoszlop magassága

Kiszámolandó az aktív rész súrlódási nyomásesése Φ_{mto} tömegáram esetére. Amennyiben helyesen lett felvéve a kérdéses aktív rész Φ_{mto} értéke, akkor a két nyomás egyenlő. A számítást külön-külön mindegyik aktív részre addig folytatandó, míg a nyomások egyenlők lesznek.

Az olaj még megengedett, legnagyobb átlagmelegedése a tekercselésben:

$$T'_{oát} = T_{tá}^+ - \Delta t'_{t-o} = T'_{oáh}$$

A tekercselésből kilépő olaj maximális melegedése:

$$T'_{om} = T'_{oát} + \frac{\Delta t'_{to}}{2}$$

A számítás eredménye: különböző nagyságú nyomások az aktív részek csatornáiban, különböző nagyságú tömegáramok és a tekercsolaj különböző ki- és belépési hőmérséklet –különbségei.⁶

⁵ A különböző nagyságú Δt_{t-0} értékek közül mértékadónak a legnagyobbat kell venni. (A vasmagra a Δt_{fv} mindig kisebb, mint a Δt_{t-0} mértékadó értéke.)

⁶ Egymástól (nem sokkal) különböző nyomások azért jöhetnek létre, mert nincs közvetlen kapcsolat az egyes

Az OFAF hűtés egyik jellemzője a tartályon belüli olajkeveredés.

A fedél alatti elszívó csomópontokon keresztül t_{ohbe} kevert olajhőmérsékletű, c_{obe} fajhőjű, Φ_{moh} tömegáramú olaj áramlik a motorszivattyúkon keresztül a hűtőkbe, ahonnan t_{ohki} hőmérséklettel áramlik vissza a tartály aljába. A tartályon belül létrejövő hőmérséklet – emelkedés azonos a hűtőben bekövetkező hőmérséklet – csökkenéssel.

Δt_o a hőmérséklet különbség jelölése

$$\Delta t_o = \frac{P - (P_{SF} + P_{ST} + P_{KF} + P_{KT})}{\Phi_{mho} c_{oh}}$$

6. Az olajmelegedés meghatározása. A tartály falairól és a fedélről sugárzással és konvekcióval a környezetbe a környezetbe átadott hőáramot elhanyagolva az aktív részekben áramló olaj felmelegedését egységesen Δt_{ot} -vel jelölve az alábbi viszonyszám értelmezhető:

$$\frac{\Delta t_{ot}}{\Delta t_o} = 1 + \frac{\Phi_{mso}}{\Phi_{mto1} + \Phi_{mto2} + \dots + \Phi_{mov}}$$

Az aktív részek hűtőcsatornáiból távozó olaj melegedése. A hűtőből kilépő olaj melegedése:

$$T_{ohki} = T_{oah} - \frac{\Delta t_{ot}}{2}$$

Ami alapján az aktív részekből kilépő olaj maximális melegedései:

$$T_{om1} = T_{ohki} + \Delta t_{ot1}$$

$$T_{oms} = T_{ohki} + \Delta t_{ot2}$$

.

.

.

$$T_{omv} = T_{ohki} + \Delta t_{otv}$$

Az aktív részek átlagos melegedései:⁷

$$T_{ta1} = T_{om1} - \frac{\Delta t_{ot1}}{2} + \Delta t_{t1-o1}$$

$$T_{ta2} = T_{om2} - \frac{\Delta t_{ot2}}{2} + \Delta t_{t2-o2}$$

aktív részek hűtőcsatornáinak között, valamint a tartályon belüli olajkeveredés olyan nagy mértékű, hogy nagyobb nyomású helyről kisebb nyomású helyre való visszaáramlás nem jön létre.

⁷ A Δt_{t1-o1} ben az 1-el jelölt tekercselésben a tekercs átlagos és az olaj átlagos hőmérséklete közti hőlépcső.

$$\begin{aligned} & \cdot \\ & \cdot \\ & \cdot \\ T_{vá} &= T_{omv} \frac{\Delta t_{ot1}}{2} + \Delta t_{v-o} \end{aligned}$$

A legfelső tekercstárcsák melegedései:

$$T_{tm1} = T_{om1} + \Delta t_{t1-o1}$$

$$\begin{aligned} & \cdot \\ & \cdot \\ & \cdot \\ T_{tmi} &= T_{omi} + \Delta t_{ti-oi} \end{aligned}$$

A legmelegebb pont hőmérsékletének közelítő értéke:

$$t_c = t_1 + T_{tm} + \Delta t_c$$

8. A hőcserélők közelítő számítása:

A szivattyúk tömegáram –nyomás karakterisztikája segítségével ellenőrizhető az üzemi olaj tömegárama és a kompakt hűtő olajoldali hőátadási tényezője.

A hőcserélőben elvonandó névleges hőteljesítmény:

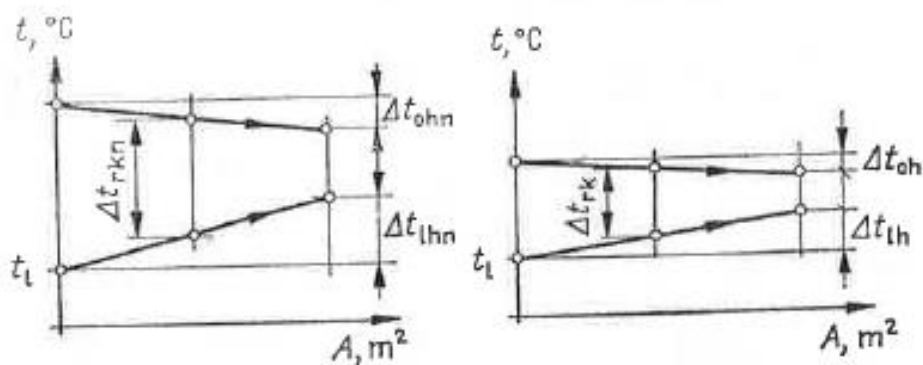
$$P_{hn} = k_n A_h \Delta t_{rkn} = \Phi_{moh} C_{ohn} \Delta t_{ohn} = \Phi_{mlh} C_{lhn} \Delta t_{lhn}$$

A névlegestől eltérő P_h esetén az olaj és a levegő tömegáramait változatlannak tekintjük, az egyes hőmérsékletlépcső azonban változnak:

$$\Delta t_{rk} = \frac{P_h}{P_{hn}} \Delta t_{rkn}$$

$$\Delta t_{oh} = \frac{P_h}{P_{hn}} \Delta t_{ohn}$$

$$\Delta t_{lh} = \frac{P_h}{P_{hn}} \Delta t_{lhn}$$



4. ábra: A kompakt hőcserélő hőmérséklet lépcsői P_{hn} és ennél kisebb P_h teljesítmény elvitele esetén

A fenti ábra a hőcserélő hőmérsékletlépcsőit mutatja P_{hn} és ennél kisebb P_h hőteljesítmény elvitele esetén. A hőcserélők méretezési hőteljesítménye a transzformátor $P_{\bar{u}}$ üresjárási veszteségének, az üzemmeleg állapotra átszámított P_z rövidzárási veszteségének, a motorszivattyúk P_{sz} veszteségteljesítményének összegéből kivonva a fedél és a tartály sugárzásával a konvekcióval leadott hőteljesítményét:

$$P = P_h = P_{\bar{u}} + P_{rz} + P_{sz} - (P_{SF} + P_{ST} + P_{KF} + P_{KT})$$

P_{sz} – a szivattyú teljesítménye.

A tartályra szerelt z darab, egyenként P_{hn}^+ névleges hőteljesítményű kompakt hűtő összes névleges hőteljesítménye nagyobb lesz, mint a konvekcióval átadandó hőteljesítmény:

$$P_{hn} = z P_{hn}^+ > P$$

Meg kell jegyezni, hogy a transzformátor gyártók már nem gyártanak hőcserélőt. Ők az erre szakosodott cégeknek megadják a specifikációkat – környezeti hőmérséklet, elvárt legnagyobb olajmelegedés, elhűtendő vesztesés, esetleges méret és zaj korlátok- és az alapján gyártásba került általuk.

9. A fedél és a tartály sugárzással és konvekcióval a környezetbe átadott hőteljesítményének számítása. A hűtőből kilépő olaj melegedése:

$$T_{ohki} = \frac{P_h}{P_{hn}} \left(\frac{\Delta t_{lhn}}{2} + \Delta t_{rkn} - \frac{\Delta t_{ohn}}{2} \right)$$

A fedél hőmérséklete úgy kapható meg, ha a környezeti t_1 hőmérséklethez hozzá kell adni a kompakt hűtőből kilépő olaj melegedését és az olaj hőmérséklet- emelkedését a tartályon belül:

$$t_{ohbe} = t_1 + T_{ohki} + \Delta t_o$$

azaz a fedél hőmérsékletét egyenlőnek tekinti a hűtőbe belépő olaj hőmérsékletével.

A fedél melegedése:

$$T_{ohbe} = T_{ohki} + \Delta t_o$$

A tartály oldalának hőmérséklete azonos a tartályba a hűtőből belépő olaj hőmérsékletével, azaz t_{ohki} -vel.

A tartályfal melegedése: T_{ohki}

A környezeti hőmérsékletet $t = 20^\circ\text{C}$ –nak, a fektetési fokot $\varepsilon = 0,95$ –nek véve fel, a környezeti sugárzással átadott hőteljesítmény:

$$P_S = P_{FS} + P_{ST} = C_{32} \left(\left(C_{33} + \frac{T_{ohbe}}{100} \right)^4 - C_{33}^4 \right) A_F + \left(\left(C_{33} + \frac{T_{ohki}}{100} \right)^4 - C_{33}^4 \right) A_T$$

A fedél és a tartályfal konvekcióval átadott hőteljesítménye:

$$P_K = P_{KF} + P_{KT} = C_{34} T_{ohbe}^{4/3} A_F + C_{35} T_{ohki}^{4/3} A_T$$

A tartály és a fedél sugárzással és konvekcióval átadott hőteljesítménye:

$$P' = P_S + P_K$$

[9]

3.4 ODAF hűtésű transzformátor közelítő hőtechnikai tervezése⁸

A fejezethez tartozó jelölések a függelék 1.sz. mellékletében találhatók.

1. A tekercselés és a vasmag felületi hőáram- sűrűségének meghatározását; - a tekercsek menetszigetelésén át létrejövő hőmérsékletesés számítását az előzőekben a 3.3 fejezetben ismertettek alapján végezhetjük.

A tekercs felületén létrejövő hőmérsékletlépcső általában:

$$\Delta t_f = C_{1q1} L^{0,5} d_h^{-0,14} w^{-0,64}$$

A felületi hőmérsékletesés már néhány tized ms^{-1} olajsebesség esetén is elég kicsi, ebben a hűtési módban jóval nagyobb felületi hőterhelés engedhető meg.

2. Az olaj legnagyobb, még megengedhető átlagos melegedését a tekercsben ugyanúgy számítjuk, mint más hűtésű transzformátoroknál, a 3.3 pontban lett bemutatva.

3. Az olajtömegáramok közelítő számítása. A Δt_f számításához felvett w sebesség és az aktív részek hűtőcsatornáinak keresztmetszete alapján meghatározható az egyes aktív részekhez tartozó olajtömegáramok. Ez alapján az aktív részek veszteségáramait ismerve kiszámítható az olaj felmelegedése az aktív részekben. Aminek a szokásos értéke: $5 \dots 8^\circ\text{C}$.

⁸ Dr. Kiss László – Dr. Szemerey Zoltán – Hálózati transzformátorok – Műszaki Könyvkiadó, 1984 (163-177. oldal)

4. Az olajtömegáramok és a hűtőcsatornák geometriájának ismeretében meghatározható a tekercscsatornák nyomásesése, ami a súrlódási és az iránytörések okozta nyomásesések összege. A súrlódási nyomásesést Mihejev nem izotermikus áramlásra vonatkozó összefüggése adja.⁹

A nyomáseséseket párhuzamos hűtőcsatornák vagy fojtóelemek segítségével közelítőleg egyformára kell beállítani. Előnyös, ha az aktív részek nyomásesése kicsi, mert a kisebb a résvesztés és kisebb a szigetelőcsövek mechanikai igénybevétele is, mivel a benyomott olaj áramcsöveit határoló szigetelőcsövek túlsó oldalán az aktív részekben létrejövő nyomáseséssel csökkentett nyomású olaj van.

Az aktív részek olajtömegáramainak Φ_{mto} összegét a résvesztéssel megnövelve megkapható a hőcserélők tömegárama.

5. Az üresjárási veszteség és az üzemi hőmérsékletre számított rövidzárási veszteség összegéből kivonva a tartály és a fedél sugárzással és konvekcióval átadott hőteljesítményét kapható meg a hőcserélők méretezési hőteljesítménye.

A hőcserélők és a motorszivattyúk kiválasztása és ezek darabszámának a meghatározása után a hőcserélők tömegáramainak ismeretében fel kell venni a külső hűtési kör csővezetékének az átmérőjét. Ki kell választani az elzáró szerelvényeket, valamint a hőcserélő és a csővezeték nyomásesését kiszámítva meghatározható a külső hűtési kör teljes nyomásesése. Ezt hozzáadva a belső kör nyomáseséséhez, a teljes hűtési rendszer nyomásesése megkapható.

A szivattyúk tömegáram- nyomás karakterisztikájának ismeretében ellenőrizhető, hogy a szivattyúk képesek-e az $1,2 \Phi_{mto}$ nagyságú olaj- tömegáram szállítására.

A tartály alsó részén belépő $1,2 \Phi_{mto}$ tömegáramú és T_{ohki} melegedésű olaj Φ_{mto} része az aktív részeken keresztül áramolva a Δt_{to} -val melegszik fel.

A $0,2 \Phi_{mto}$ tömegáramú T_{ohki} melegedésű része pedig a tömítetlenségeken keresztül, melegedés nélkül jut el a felső elszívócsonkok közelébe, ahol keveredik az aktív részekből

⁹ Ganz Villamossági Művek Szerkezeti Laboratórium: Gyűrűs vasmag mágnesezési görbéjének felvétele, mágnesezőáramának vizsgálata. Mérési jkv. MLAV 678, Budapest, 1981.

távozó felmelegedett olajjal.

A tartályból kilépő olaj melegedése az alábbi szerint írható fel:

$$c_o \Phi_{mto} (T_{ohki} + \Delta t_o) + c_o 0,2 \Phi_{mto} T_{ohki} = c_o 1,2 \Phi_{mto} T'_{ohbe}$$

$$T'_{ohbe} = T_{ohki} + \frac{\Delta t_o}{1,2}$$

A hűtőbe belépő olaj melegedése:

$$T_{ohbe} = T_{ohki} + \frac{\Delta t_o}{1,2} - \frac{P_S + P_K - P_{Sz}}{1,2 \Phi_{mto} c_o}$$

A P_s és a P_k számítása a 3.3 fejezet alapján.

A hűtőbe belépő és onnan kilépő olaj melegedésének a különbsége:

$$T_{ohbe} - T_{ohki} = \Delta t_o = \frac{\Delta t_o}{1,2} - \frac{P_S + P_K - P_{Sz}}{1,2 \Phi_{mto} c_o}$$

Figyelembe véve, a következőt:

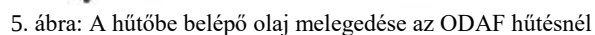
$$P_{\ddot{u}} + P_{rz} = c_o \Phi_{mto} \Delta t_o$$

ebből kifejezve

$$\frac{1}{c_o \Phi_{mto}} = \frac{\Delta t_o}{P_{\ddot{u}} + P_{rz}}$$

behelyettesítve

$$\Delta t_o = \frac{\Delta t_o}{1,2} \left(1 - \frac{P_S + P_K - P_{Sz}}{P_{\ddot{u}} + P_{rz}} \right)$$


$$T_{ohbe} = T_{tá}^+ - \Delta t_{t-o} + \frac{\Delta t_{to}}{1,2} \left(0,4 - \frac{P_S + P_K - P_{sz}}{P_{\ddot{u}} + P_{rz}} \right)$$
$$T_{ohki} = T_{ta}^+ - \Delta t_{t-o} - \frac{\Delta t_{to}}{2}$$
$$P - P_h = P_{\ddot{u}} + P_{rz} + P_{sz} - (P_s + P_k)$$
$$P_{hn} = Z P_{hn}^+ > P$$

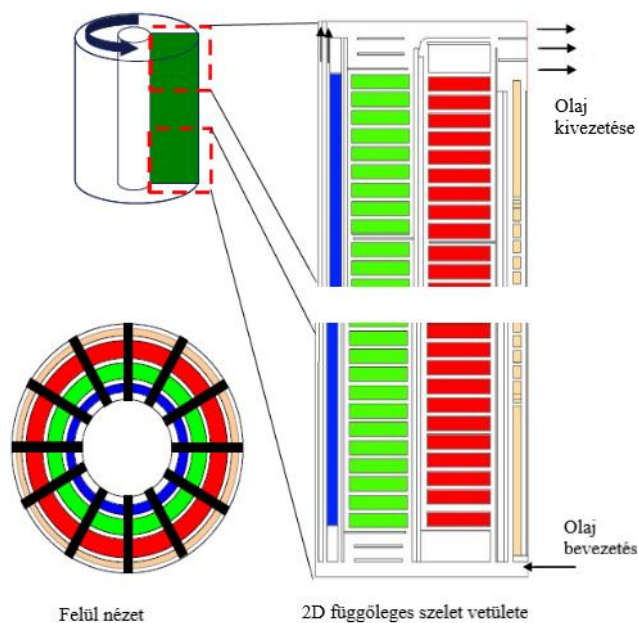
34

3.5 A CFD elemzés és a THMN modell bemutatása

Mint már szó esett róla, a tekercsek között keletkező hőt jellemzően ásványi olaj keringtetésével távolítják el. Az olajcsatornák geometriai rendszere határozza meg az olajáramlás eloszlását a transzformátor mentén, ez befolyásolja a hőelvonás hatékonyságát és a melegpontok helyzetét. Az ODAF típusú transzformátoroknál a tekercsek között több olajcsatorna konfiguráció van jelen. A CFD – *számítógépes áramlás vizsgálat* – egy megfelelő eszköz a transzformátor belsejében lévő áramlás elemzésére, mert a kísérleti mérések összetettek és csak korlátozott számú különálló pontot tudnak mérni.

Kísérleti méréseket – PIV- Particle Image Velocimetry- hasonlítottak össze a szimulációs eredményekkel, ezzel igazolták az CFD-t, mint a transzformátorok melegezési viszonyainak elemzési eszközét. Miután igazolták az olajutak geometriai konfigurációjának optimalizálására használták, a hőelvezetés javítása és a melegpontok minimalizálása érdekében.

A mag típusú transzformátorokban a tekercsek körkörösén oszlanak el a mag körül, melyet az alábbi ábra szemléltet: [5]



6. ábra: Mag típusú transzformátor geometriai vázlata

A mag típusú transzformátoroknál használt részletes melegedési modellek 2 fő megközelítése a THNM – *termohidraulikus hálózati modellek* és a CFD elemzés.

A CFD vizsgálatok időigényesebbek, előnyük viszont, hogy részletesebb információkkal rendelkeznek és általánosabb fizikai egyenletekre épülnek, amiknek tágabb körülmények között is érvényesnek kell lenniük. Az áramlási, és a hő átviteli törvényeket differenciálegyenlettel írja le.

Minden modellnek egyszerűsíteni kell azokat a jelenségeket, amik jelentősége nem dominál a számítás egyszerűsítése érdekében.

A CFD elemzések sok számítást igényelnek, a leggyakoribb egyszerűsítések a 2D-tengelyszimmetrikus tartományt veszik figyelembe, folyamatos hőáramot feltételezve a tekercsek felületén, anélkül, hogy figyelembe vennék a szilárd hővezetést. Becsült hővezető képességgel szimulálja a szilárd hővezetést. [5][11]

Annak érdekében, hogy a transzformátornak CFD elemzéssel az olajáramát szimulálják, a geometriai modellnek a lehető legrészletesebbnek kell lennie. Az olaj és a szilárd alkotórészek fizikai tulajdonságait helyesen kell meghatározni és a megbízható eredmények elérése érdekében megfelelően kell meghatározni a határfeltételeket is.

A CFD szimuláció 1. része a védelmi számítások elvégzése, melynek pontossága befolyással van az eredmény pontosságára, erre külön szoftvereket használnak.

A transzformátor henger alakú és tengelyszimmetrikus. A 2D-tengelyszimmetrikus szimuláció a prespán távtartókat nem veszi figyelembe, amelyek radiálisan vagy tengelyirányban vannak elhelyezve a hűtést és a szigetelést biztosító olajcsatornák létrehozása érdekében. Ezek a távtartók csökkentik a hőátadási felületet és az olajáramlási területet.

A 2D CFD modellezés jól megfeleltethető mindaddig amíg a tárcsa veszteségek és tömegáramok megfelelően skálázottak ahhoz, hogy figyelembe vegyék a horizontális és vertikális távtartók hatását. A számítási kapacitás számottevő növekedése nem teszi kézenfekvővé a teljes 3D CFD elemzést, kivéve olyan esetekben, ahol a horizontális és vertikális távtartók hatásán kívül egyéb szimmetria megtörő tényezőkkel is számolni kell. [16]

A 3D szimulációs modell annak érdekében született, hogy ezeket a részleteket is

figyelembe lehessen venni. [5]

A CFD szimulációkkal kikövetkeztethető összefüggések vizsgálatával a THNM számítások pontosságát lehet növelni. A szimulációk pontosságának vizsgálata optikai szálás mérésekkel is ellenőrizve van.

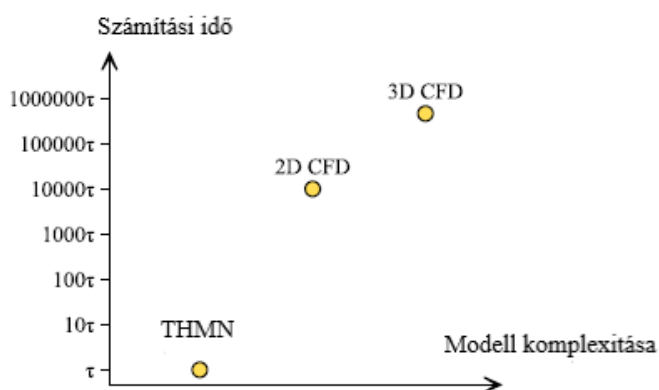
[15]

A CDF modellek állandósul állapotra használhatók, felhasználása eseti jelleggel történik.

[11]

A hálózati modellek – THMN- rövidebb szimulációs időt tesz lehetővé és számos empirikus korreláció támasztja alá. Egyszerű algebrai egyenletekkel, részletes vizsgálatokon alapuló tapasztalati tényezőkkel dolgozik. Ez a módszer az állandósult állapot mellett a tranziens állapotra is használható. A tervezési folyamat fontos alapját képezi. [11]

Az alább ábra mutatja a számítási idő és a modellezés komplexitás skáláján elhelyezve a bemutatott modelleket:



7.ábra: Számítási idő különböző modellezési komplexitásokhoz

A THMN módszere azonban nem feltétlenül érvényesek az új, nem tanulmányozott transzformátor konfigurációkra, ahol a méretek vagy a helyi feltételek nem a korelációk érvényességi tartományában vannak. Ajánlás készült már, hogy a THNM modellnek az összes olyan transzformátor komponensre le kell írnia, mely releváns az adott

transzformátor termikus és hidraulikus viselkedésével kapcsolatban. Ellenőrizni kell, hogy a használt összefüggések megfelelőek legyenek a paraméterek elvárt eltérési tartományában. Mivel különböző transzformátor gyártók eltérő tervezési szabályzattal és gyártási létesítményekkel rendelkeznek, a tényleges tekercselési geometriák, olaj áramlási sebességek stb. eltérhetnek. Az egyik gyártóra felállított összefüggések alkalmatlanok lehetnek egy másikonál, ha a geometria vagy az olajáramlási különbségek túl nagy eltérést mutatnak. [15]

Elkezdőtek már a fejlesztések, hogy a tesztelt hálózati modellezési technikát a transzformátor egyéb alkatrészereire is kiterjesszék. A globális és integrált termikus modell megfontoltabb tervezési döntéseket tesz lehetővé, és jelentős lépés a transzformátorok termikus Digitális Twinjének- *virtuális modell, mely egy fizikai objektum pontos leképezése* -. Ez úgy lehetséges, hogy a számításokhoz szükséges határfeltételeket fokozatosan lazítva lennének és fokozatosan lenne közelítve az egyes kivitelezési fázisok – tervezés, üzemeltetés- meglévő adataihoz. Az erről szóló tanulmányban bemutatott THMP – Terhmohidraulikus Menedzsment Platform- bizonyítottan képes volt megjósolni egy 40 MVA teljesítményű, ODAF hűtésű, magtípusú háromfázisú transzformátor hőmérséklet növekedését. [13] [14]

4. Hűtési módszerek gyakorlatban való összehasonlítása

4.1 Melegedések és hőmérsékletek a transzformátorban

Arról már korábban volt szó, hogy a *melegedés* alatt a transzformátor valamely része és a külső hűtőközeg közötti különbség érthető.

Az IEC 60076 -7; 2018 előírás alapján

- a transzformátor tekercselésének ellenállásméréséből számított átlagmelegedése a hűtőközeg hőmérséklete fölött nem lehet nagyobb 65°C -nál,
- az *olaj maximális melegedése* a fedél alatti méréssel, nem lehet nagyobb 60°C -nál,
- a tekercselés *melegpontjának melegedése* (a tekercsoszlop tetején elhelyezett tárcsa legmelegebb vezetőjének melegedése) nem lehet nagyobb 78°C -nál.

Ezek az értékek azon transzformátorokra érvényesek, amelyek üzemeltetési helye az 1000 m tengerszint feletti magasságot nem éri el és a *hűtőközeg maximális hőmérséklete* levegőhűtés esetén nem lehet nagyobb 40°C -nál. Amennyiben ennél magasabb tengerszint feletti magasságra készítik a transzformátort, és a vizsgálat magassága ez alatt az érték alatt van, akkor meg van adva, hogy hány %-kal kell csökkenteni a melegedési határokat, az üzemelési magasságot figyelembe véve.

A rövid ideig tartó túlterhelésekre az IEC 60076-7 „Loading Guide for Oil - immersed Transformers” szabvány ajánlása 140°C -ban határozza meg a legnagyobb melegpont hőmérsékletet. Zárlat esetén a legfelső tekercs átlaghőmérséklete maximum 250°C vörösréz tekercselés esetén. [2]

Melegedések és hőesések

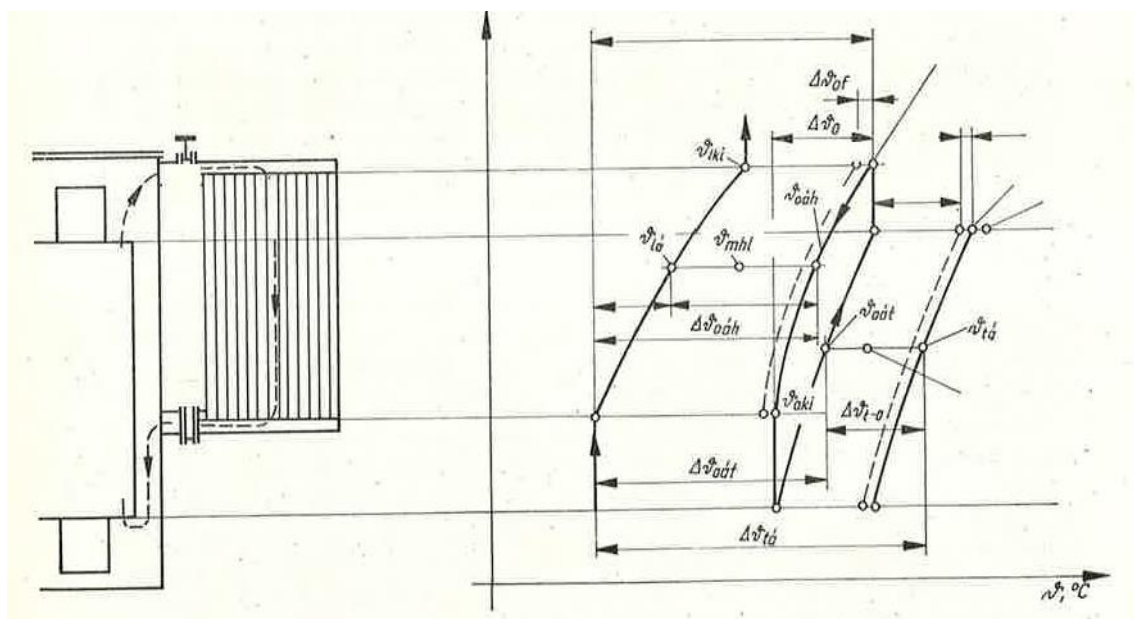
A tekercsek felülete mentén áramló olaj melegedésén az *olaj átlagmelegedése* értendő. A tekercsoszlop alján a belépő olaj hőmérséklete arányosan nő a megtett út hosszával. Természetes olajáramlás esetén a tekercselésből kilépő olaj hőmérséklete egyenlő az olaj maximális hőmérsékletével. Az olaj maximális melegedéséből levonva a tekercselésből kilépő és belépő olaj hőmérséklet különbségének a felét, az *olaj átlagmelegedése* határozható meg.

A hűtött olaj és a hűtőlevegő közötti hőmérséklet -különbségén a *hűtő átlagmelegedése*

értendő. A *hűtőolaj átlaghőmérséklete*, a környezeti hőmérséklethez a hűtőben áramló levegő közepes melegedését és a hűtő átlagmelegedését hozzáadva határozható meg.

A tekercsoszlopban magasabban elhelyezett tárcsákhoz magasabb hőmérsékletű olaj áramlik, így azok még akkor is melegebbek lesznek, ha ugyanolyan hőessel tudják átadni a veszteséget az olajnak, mint az alattuk lévők.

Természetes olajáramlás esetén a hűtőolaj átlaghőmérséklete és a tekercselésben áramló olaj átlaghőmérséklete közti különbség nem jelentős. Ez mesterséges olajáramlás esetén már változik, ez esetben a tekercselésben áramló olaj átlaghőmérséklete nagyobb. A tekercs -átlagmelegedéséből kivonva az olaj-átlagmelegedését a *tekercsátlag – olajátlag-hőlépcsőt* kapjuk. A hőlépcső a tekercselési anyag szigetelésén létrejövő hőesésből és a szigetelés külső felülete és a tekercset körülvevő olaj közötti felületi hőesésből áll. A következő ábra egy ONAN hűtésű transzformátor hőmérsékleteit, melegedéseit és hőlépcsőit mutatja be. [2]

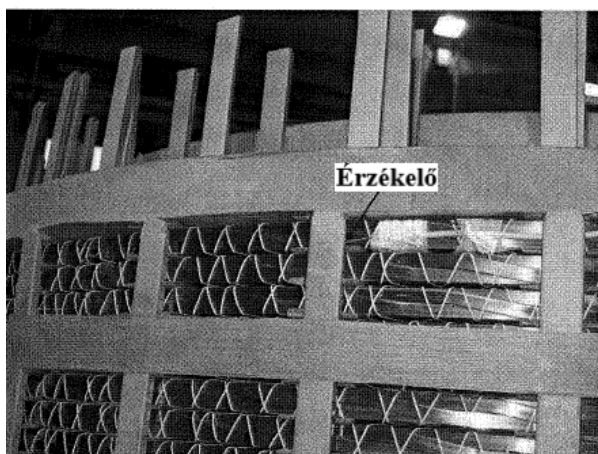


8. ábra: ONAN transzformátor hőmérsékleteit, melegedéseit és hőlépcsőit mutatja be -
(Az ábrán található jelöléseket a Függelék 2.sz. mellékelte mutatja be.)

4.1.2. A transzformátor melegponti hőmérsékletének meghatározása

Az 1.2 fejezetben szó esett arról, hogy a transzformátor élettartama elsősorban a szigetelő rendszer élettartamától függ. Az öregedés elsősorban a kémiai reakciók okozta folyamat, mely legfőképpen a hőmérséklettől és időtől függ. A melegponti hőmérséklet figyelembe van véve a transzformátor élettartamának vizsgálatakor.

A melegponti hőmérséklet az egyik legfontosabb paraméter a transzformátor hőviszonyok és a túlterhelési képesség meghatározásakor. A szigetelés romlásának ideje megduplázódik minden 6 °C hőmérséklet emelkedés mellett. Ezért mind a gyártók, mind az üzemeltetők számára nagyon fontos a melegponti hőmérséklet pontos előrejelzése. A melegponti hőmérséklet mérésére léteznek módszerek. Az egyik ilyen, mikor a tekercsek előre jelzett melegpontján helyeznek el száloptika hőmérséklet érzékelőket. Az optikai szálhoz erősített hőérzékelőket általában a szigetelt vezető és a távtartó közé helyezik el, a jelüket az optikai szálon keresztül továbbítják a tartályból. [10]



9. ábra: Optikai szál érzékelő alkalmazása a mag típusú transzformátor lemeztekercsénél

A melegpont a közvetlen mérésen kívül meghatározható a veszteség eloszlást, áramlási és hőátadási folyamatokat is figyelembe vevő számítással is.

A melegpont helye a transzformátor tekercseinél terhelés és hűtési állapot függő. [11]

A melegpont helyzete ODAF hűtés esetén a rosszabbul hűlő alsó tárcsák felé tolódhat. Kis olajáramlásnál, ON... hűtésnél a belépéstől távolabbi tárcsákhoz nem jut el az olaj, a legfelső tárcsa lényegesen melegebb.

4.2 A különböző hűtési módok összehasonlítása

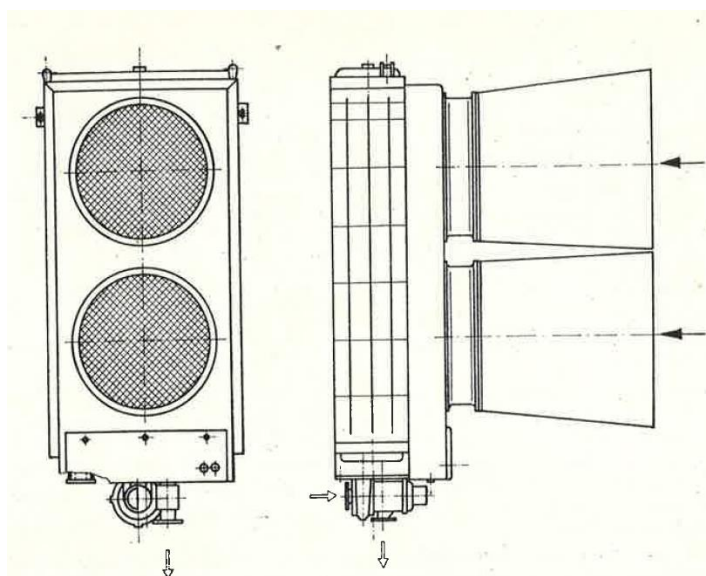
A *természetes olajáramlás* esetében az olajat gravitációs felhajtóerő áramoltatja. Az aktív részekben keletkező hő felületi hőátadással kerül az azt körülvevő olajba. Az olaj az átadott hő hatására felmelegszik, fajsúlya csökken, az aktív részek környezetében felfelé áramlik, a kiáramló meleg olaj helyére alulról hideg olaj áramlik be. A radiátorokba vagy olaj-levegő hőcserélőkbe bekerülő meleg olaj a hűtők hidegebb fala mentén a hozott hőt leadja, fajsúlya megnő ezáltal lefelé áramlik. Így létrejön a hűtőkben az aktív részekhez képest az ellentétes áramlási irány.

Irányított olajáramlás esetén az olaj nagy sebességgel áramlik a külső kényszerítő erő hatására, aminek a következtében javul a felületi hőátadása.

A *levegő áramlás* a radiátorok fala mentén a meleg levegő kisebb fajsúlya miatt létrejöhet *természetes úton*, vagy az áramlást ventilátorokkal is lehet erősíteni, ez esetben *mesterséges levegőáramlásról* van szó.

A nagyteljesítményű transzformátorok egy részét nagy hőátbocsátó képességű *kompakt – olaj - levegő; olaj – víz – hűtőkkel* szerelik fel. A kompakt elnevezés utal a kis helyfoglalásra. Ebben az esetben a hűtőkkel összeépítik a hűtők levegő ellátását biztosító ventilátorokat. Ebben a kialakításban számottevő természetes levegőáramlás nincs jelen a hűtésnél.

A ventilátorok kiválasztásakor a zajszint nagyságát is figyelembe kell venni. [2]

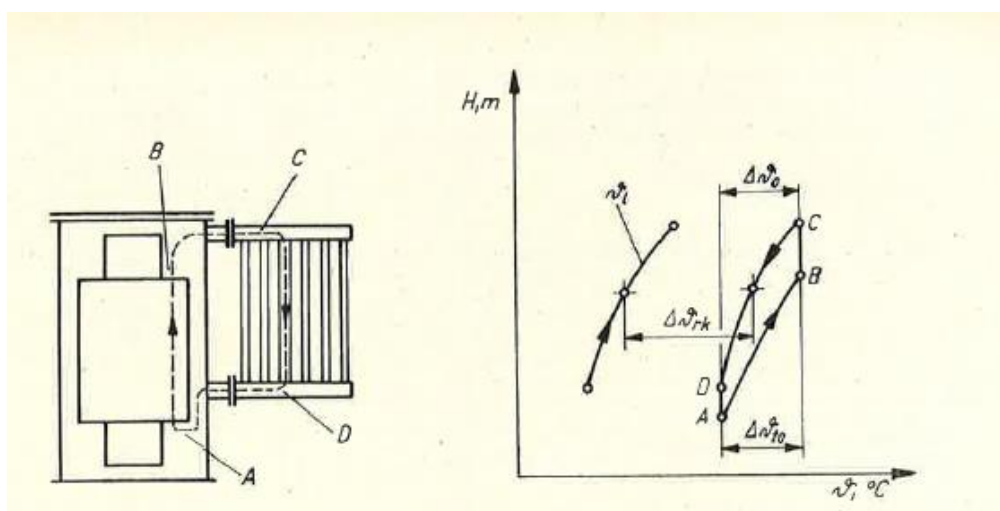


10. ábra: Kompakt hűtő

4.2.1. ONAN hűtési rendszer

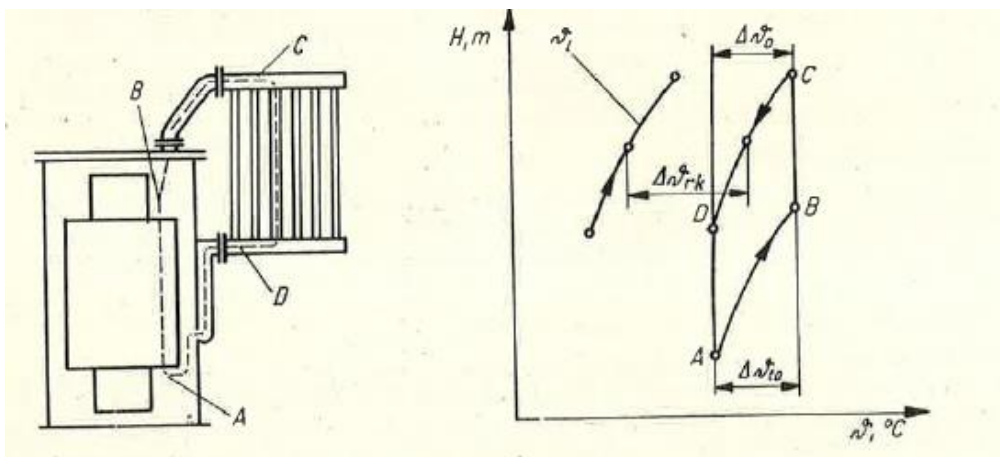
Az ONAN hűtésű transzformátor elvi sémája a következő ábrán látható. Az A ponton a tekercsbe belépő olaj a tekercselésben felmelegszik, felfelé áramlik és a B pontban elhagyja a tekercselést. A B és C pont közti hőmérséklet különbség nem jelentős, kis mértékben ugyan hűl az olaj a hűtőbe jutásig. Az olaj hűlése a C és a D pontok között történik, miközben lefelé áramlik.

Ebben a kialakításban a tekercsben lévő és a radiátorban lévő hőközepe hőmérséklet közel azonos.



11. ábra: ONAN hűtés transzformátor elvi sémája

A radiátorok magasra helyezése, úgynevezett „hattyúnyakas” kialakítás a hőközepek közti különbségek növelését szolgálja, az intenzívebb áramlás elősegítésével. Az olaj áramlási sebessége a hűtési körben nagyobb lesz. [2]

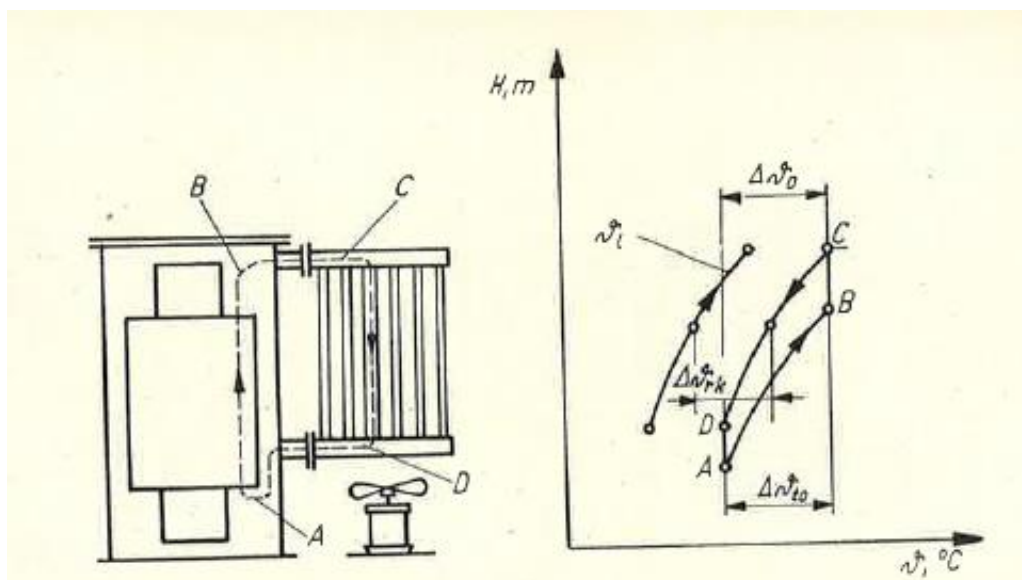


12. ábra: ONAN hűtés transzformátor elvi sémája – „hattyúnyakas” kialakításban

4.2.2. ONAF hűtési rendszer

Az ONAF hűtési rendszerben a radiátorok alá helyezett ventilátor a radiátorok közé fújja a levegőt. A nagy légsebesség miatt a felületi hőátadási tényező megnő, így ugyanazon hőteljesítmény átadásához ebben a kialakításban kisebb levegőoldali hőesés is elegendő. Az ONAN kialakítással összehasonlítva, egyforma veszteség elvezetése esetén a levegőoldali jobb hőátadási tényező miatt, a hűtőben gyorsabban hűl le az olaj.

Azonos Δv_{rk} esetén természetes légűtésről áttérve a mesterséges légűtésre, a hűtőtéljesítmény 2,6 – szerese érhető el. [2]



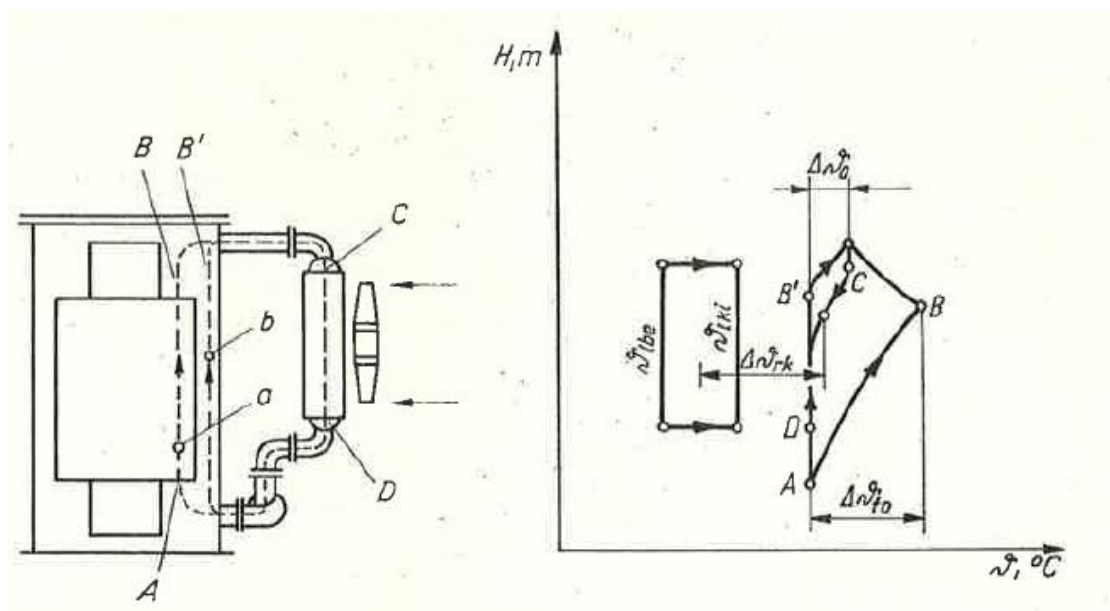
13. ábra: ONAF hűtés transzformátor elvi sémája

4.2.3. OFAF hűtési rendszer

A nagyteljesítményű transzformátoroknál az OFAF hűtés vált szükségessé. Ezen transzformátorok aktív részében keletkező nagy veszteségnek az elvezetésére nagy terjedelmű radiátortelepek beépítése szükséges. Konstruktív okok miatt, a radiátortelepek nem minden esetben emelhetők elég magasra ahhoz, hogy a szükséges olaj áramlási sebesség elérhető legyen.

E transzformátorok esetén a nagy helyfoglalású radiátortelepek helyett kompakt hűtők beépítése célszerű. Az olajoldali jó hőátadás tényező elérése érdekében az olajat nagy sebességgel kell áramoltatni, az áramlási ellenállás legyőzésére az olajoldalon szivattyú van a körbe kapcsolva. A tekercsen belül ebben a kialakításban is az olaj a

gravitációs felhajtóerő és az áramló olaj sűrűlódása által megszabott sebességgel áramlik. A szivattyú elsősorban a hűtőben lévő olaj sebességére van hatással. A következő ábrán látható a mesterséges olajáramlású transzformátor hűtésének elvi vázlata. [2]

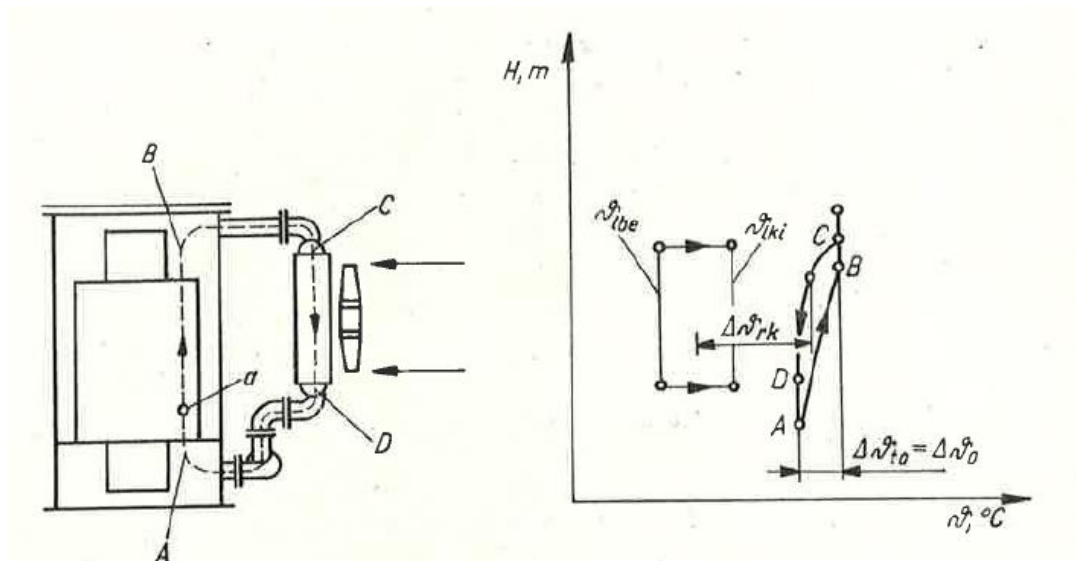


14. ábra: OFAF hűtés transzformátor elvi sémája

A képen az látszik, hogy az a úton a tekercselésen átmenő - *a tekercsen annyi olaj megy át, amit az a vesztesége következtében magába szív- és ott felmelegedett olaj a kiáramláskor keveredik a b söntúton, a tartály fala mentén áramló olajjal.* Emiatt közvetlenül nem mérhető a tekercselésből felszálló olaj hőmérséklete, ehelyett egy „kevert”, alacsonyabb olajhőmérsékletet lehet mérni a fedélen elhelyezett hőmérséklet mérővel. Ebből következik, hogy a hűtőkbe is kisebb hőmérsékletű olaj lép be, a hűtők így a maximális olajhőmérsékletnél kisebb hőmérsékletű olajat hűtenek. [2]

4.2.4. ODAF hűtési rendszer

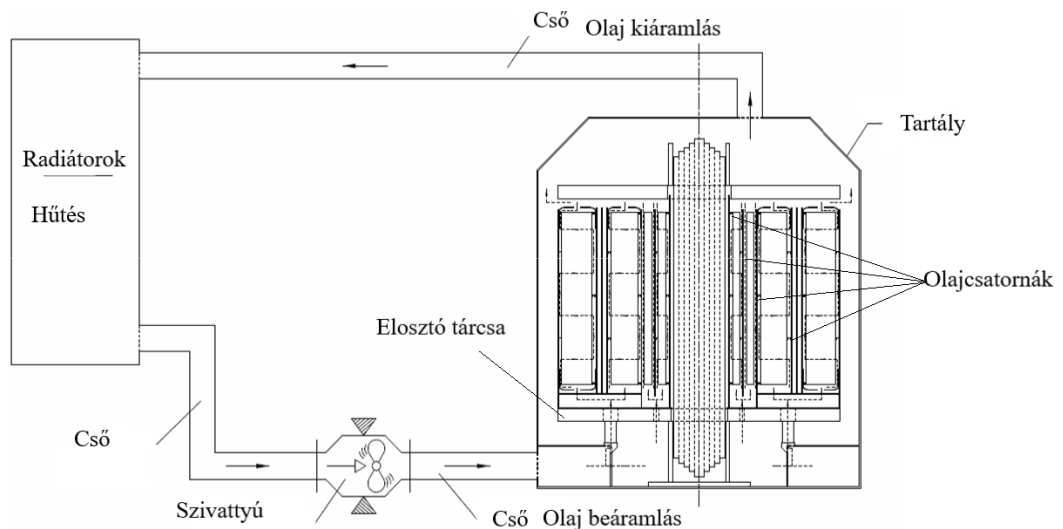
ODAF hűtési rendszer esetén, azaz irányított olajáramláskor a teljes olajmennyiséget átvezetjük a transzformátor aktív részén, emiatt előző rendszerben lévő söntút megszűnik.



15. ábra: ODAF hűtés transzformátor elvi sémája

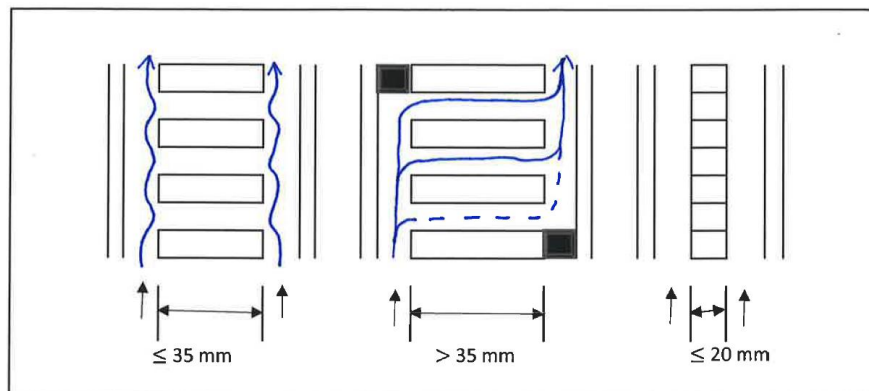
Ebben az esetben a szivattyú csak az aktív részekben átvezetett és ott felmelegedett olajat, valamint a tömítetlenségeken keresztül úgynevezett szivárgási olajat szállítja. Ebből következik, hogy a hűtő ebben a kialakításban a maximális olajhőmérsékletnek megfelelő olajat kapja. Megfelelő méretezés esetén a nagyobb $\Delta \vartheta_{rk}$ hőlépcső miatt kisebb térfogatú hűtőre van szükség, az OFAF hűtési rendszerrel összehasonlítva, azonos veszteség átadása esetén. A tekercselés belsejében a hűtőfelületek mentén az olajsebesség nagyobb, a felületi hőátadási tényező megnő, felületi hőesés csökken, a felületi hőterhelés növelhető anélkül, hogy a tekercs megengedett átlagmelegedését túllépne, természetesen gazdasági és műszaki terület ennek határt szab. Ebben az esetben van a legnagyobb olajáram 1 kW veszteségre vetítve.[2]

Az olaj direkt áramoltatása a tekercsen belül különböző módokon keresztül valósulhat meg. Az egyik kialakítás, amikor a tekercsek alján úgynevezett elosztótárcsákon keresztül áramlik az olaj a tekercsekbe, amit a következő ábra szemléltet.



16. ábra: ODAF hűtésű transzformátor hűtési rajza

Nem teljesen zárt a rendszer, kb.: 20-25% a rendszerben lévő szivárgási olaj, ami az „ODAF kényszeráramoltatásba be nem kötött” tekercseket (pl. stabilizáló és/vagy szabályzó tekercs), vasmagot, szekrény falon elhelyezett fluxuscspadákat és a szerkezeti részeket hűti. A tekercsek között fojtásokkal szabályozható az olaj útja, így kialakítható a tekercsek közötti „cikk-cakk” áramoltatás, jellemzően >35mm esetén.



17. ábra: Az olaj áramlása a tekercsek között ODAF hűtés esetén a tekercs méretei szerint

Összefoglaló

Megállapításra került, hogy az olaj-papír szigetelésű transzformátorok élettartalmát a cellulóz alapú szigetelés öregedése határozza meg. Az öregedés sebességét pedig a hőmérséklet, nedvesség és az oxigén befolyásolja. A nem magas hőállóságú papír várható élettartam függése a nedvesség, oxigén és hőmérsékelt viszonyában grafikonon keresztül szemléletesre került.

A dolgozatomban a különböző nagyteljesítményű transzformátorok hűtési rendszereit mutattam be, ezért mint másik szigetelő közegre, a transzformátor olaj jellemzőire öregedésére és kezelésére is kitértem. A vízhűtésű rendszerekről nem esett szó, azok a 2. *fejezetben* csak felsorolásban szerepelnek.

Összehasonlításra került a CFD elemzés és a THMN modellezés, amik a várható hőmérsékleti viszonyok előre jelzésére szolgálhatnak a transzformátorok tervezésénél. Bemutatva az idő és komplexitás skáláján, hol helyezkednek el egymáshoz képest.

Ezt követően a különböző hűtési rendszerek a melegedési modelljeiken keresztül kerültek bemutatásra, amik alapján az alábbi megállapítások tehetők:

Az OFAF hűtési rendszernek az előnye a csökkentett helyfoglalása, beruházási költsége alacsonyabb, valamint a hűtők tetszőleges magasságra szerelhetők.

Hátránya a különböző olajutak és az azokon kialakuló különböző olajhőmérsékletekből adódik, mert számítással és hagyományos hőmérséklet méréssel nehezen kontrolálható. Javasolt ebben az esetben a *Direkt- melegpont mérés* a melegedés bizonytalansága miatt.

Ebben az esetben a gyorsan áramló olaj miatt a hűtőben az *olajolló* kisebb lesz, míg a hűtőben az olaj középhőmérséklete gyakorlatilag megegyezik az *ONAF hűtésnél* kialakulóval, így a tekercsbe beömlő alsó olajhőmérséklet magasabb lesz. A tekercs ezért magasabb olajhőmérsékletéről indulva melegszik, ezért a hőmérséklete emelkedik.

A hátrányokhoz sorolható még, a kevésbé hatékony hőleadása ami szintén a „kevert” olajhőmérsékletből adódik, mert nem a legmelegebb olaj kerül a hűtőkbe.

OFAF hűtés csak abban az esetben javasolt, ha nincs lehetőség kellő magasságba emelni a radiátort.

Összehasonlítva a kompakt hűtőkel szerelt transzformátorokat a természetes olajhűtéshez alkalmazott radiátor- hűtőcsoportok beruházási költségével az állandó üzemköltségű kompakt hűtők alkalmazása még így is kedvezőbb. Illetve a kompakt hűtők esetében a transzformátor állomás transzformátor mezőinek nagyságát is csökkentheti, amivel további költségcsökkentést okozhat.

A radiátorokkal szerelt OFAF és ODAF hűtési rendszer méretei és költségei ugyan bizonyos esetekben meghaladják a kompakt hűtőkkel szerelt rendszerét, de mindenképpen előnye, hogy a szivattyú vagy a ventilátor meghibásodása esetén tud ONAN üzemen tovább működni.

A transzformátor hűtésének kiválasztásakor gazdasági, hatásossági és megbízhatósági szempontokat kell figyelembe venni. Egyértelműen megállapítható, hogy megbízhatóság szempontjából ONAN hűtési rendszer van az élen, mivel működése a fizikai törvényszerűségeken alapszik, nincs benne meghibásodásra lehetőséget adó további eszköz beépítve. Ezzel szemben a hatásosságot vizsgálva már a kényszer olajáramoltatású hűtési rendszerek az ODAF hűtési rendszerek vették át a vezető szerepet. Ennek oka, hogy maximális hőmérsékletű olaj kerül át a hűtőbe, ezáltal - *a levegő és az olaj közti hő különbsége miatt* - a hőleadás ebben a rendszerben hatékonyabb mint az OFAF, és egyben az összes levegős hűtés közül a leghatékonyabb.

Summary

It has been found that the service life of oil-paper insulated transformers is determined by the aging of cellulose-based insulation. And the rate of aging is affected by temperature, humidity, and oxygen. The extent to which the life expectancy of not-too-high heat resistance paper depends from humidity, oxygen and temperature has been illustrated by a graph.

In my paper I have demonstrated the cooling systems of different high-performance transformers; therefore, as another insulating medium, I have also covered the aging and treatment characteristics of transformer oil. Water-cooled systems have not been mentioned, they are only listed in Chapter 2.

CFD analysis and THMN modelling, which can be used to predict expected temperature conditions in transformer design, have been compared, indicating where they are located compared to each other on a scale of time and complexity.

Following this various cooling systems have been presented through their warming models, on the basis of which the following statements can be made:

The advantage of the OFAF cooling system is its reduced space requirement, lower investment costs and the fact that the coolers can be mounted at any height.

Its disadvantage is due to the different oil routes and the different oil temperatures that form on them, because they are difficult to control by calculation and conventional temperature measurement. In this case, a direct hot spot measurement is recommended due to the uncertainty of warming.

In this case, due to the fast-flowing oil, the *oil shears* in the cooler will be smaller, while the average oil temperature in the cooler will be practically the same as that generating in the ONAF cooling, so the base oil temperature entering the coil will be higher. The coil therefore heats up from a higher oil temperature, so its temperature increases.

Another disadvantage is the less efficient thermal dissipation, which is also due to the "mixed" oil temperature, because it is not the warmest oil that gets into the coolers.

OFAF cooling is only recommended if it is not possible to raise the radiator to a sufficient height.

Comparing transformers assembled using compact coolers with the investment costs of the groups of radiator-coolers used for natural oil cooling, it is still more favourable to use compact coolers the operating cost of which is permanent.

Also, in the case of compact coolers the size of the transformer fields of the transformer station can be reduced, which can lead to further cost savings.

Although the dimensions and costs of the OFAF and ODAF cooling systems with radiators are in some cases higher than those with compact radiators, their definite advantage is that they can continue to operate on ONAN mode in the event of a pump or fan failure.

Economic, efficiency and reliability considerations must be taken into account when selecting transformer cooling. It is clear that the ONAN cooling system is at the forefront in terms of reliability, as its operation is based on physical laws and does not include any additional devices that allow for failure.

In contrast, in terms of effectiveness, it is the forced oil-flow cooling systems, the ODAF cooling systems that have taken the lead. This is due to the fact that the highest temperature oil is transferred to the cooler, so that due to the *difference between the heat of the air and the oil*, heat dissipation in this system is more efficient than in the OFAF and the most efficient of all air coolers.

Irodalomjegyzék

- [1] Kellner József és S. Pöschl Imre – Elektrotechnika; Athenaeum nyomda 1922
- [2] Karsai Kerényi Kis - Nagy transzformátorok; Műszaki Könyvkiadó 1973
- [3] Csépes Gusztáv, Diagnostics Kft. - Olaj – papír szigetelésű transzformátorok helyszíni szárítási lehetőségei (XVI. Szigetelésdiagnosztikai Konferencia, Sümeg, 2016. 10.19-21.)
- [4] Németh Bálint: Komplex transzformátor diagnosztika az OVIT Zrt.-nél - *file:///C:/Users/win10/Desktop/dolgozat/magyar/conf08_nemeth_b.pdf*-
- [5] Detailed CFD analysis of ODAF power transformers – Conference Paper – January 2009
- [6] MSZ EN – 60076-2: 2011; Teljesítménytranszformátorok 2. rész: Folyadéktöltésű transzformátorok melegevése
- [7] Újdonságok a transzformátorok termikus viszonyainak megismerésében- Diagnosztikai Konferencia, Bika, 2018. - Dr. Nádor Gábor
- [8] IEC 60076 – 7 :2018; Loading Guide for Oil-Immersed Transformers
- [9] Dr. Kiss László – Dr. Szemerey Zoltán – Hálózati transzformátorok – Műszaki Könyvkiadó, 1984
- [10] Transformer Hotspot Temperature Calculation using IEEE Loading Guide - 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-24, 2008
- [11] Dr. Nádor Gábor- CG Electric System Hungary Transformer BU- Transformer Electrical Design – 2018. ppt
- [12] MSZ EN 60076 – 1: 2012; Teljesítménytranszformátorok 1. rész Általános előírások
- [13] A2 – 101 - Development of a dynamic thermal hydraulic network model for core-type power transformers windings - CIGRE 2018
- [14] A2 – 102 - Experimental Validation of a Thermal Hydraulic Management Platform for Core-Type Power Transformers - CIGRE 2018
- [15] A2-103 - Improved THNM models for power transformers using new correlations set up with CFD simulations - CIGRE 2018
- [16] A2-105 - Selecting the right level of complexity for thermal modelling of transformer windings - CIGRE 2018

Ábrajegyzék

1. ábra – Forrás: IEC 60076-7:2018; 4. ábra
2. ábra – Forrás: IEC 60076-7:2018; 6. ábra
3. ábra – Forrás: Karsai - Kerényi Kis- Nagy transzformátorok; Műszaki Könyvkiadó - 1973 – 330. old. 5.24 ábra
4. ábra – Forrás: Dr. Kiss László – Dr. Szemerey Zoltán – Hálózati transzformátorok – Műszaki Könyvkiadó, 1984; 173 old. 6.2 ábra
5. ábra – Forrás: Dr. Kiss László – Dr. Szemerey Zoltán – Hálózati transzformátorok – Műszaki Könyvkiadó, 1984; 176 old. 6.3 ábra
6. ábra – Forrás: Detailed CFD analysis of ODAF power trnasformers – Conference Paper – January 2009 ; 1. ábra
7. ábra – Forrás: A2-105- Selecting the right level of complexity for thermal modelling of transformer windings - CIGRE 2018; 6. ábra
8. ábra – Forrás: Karsai - Kerényi Kis- Nagy transzformátorok; Műszaki Könyvkiadó - 1973; 288 old. 5.1 ábra
9. ábra – Forrás: MSZ EN – 60076-2: 2011; E.1 ábra
10. ábra – Forrás: Karsai - Kerényi Kis- Nagy transzformátorok; Műszaki Könyvkiadó - 1973; 431 old. 5.98 ábra
11. ábra – Forrás: Karsai - Kerényi Kis- Nagy transzformátorok; Műszaki Könyvkiadó - 1973; 296 old. 5.4 ábra
12. ábra – Forrás: Karsai - Kerényi Kis- Nagy transzformátorok; Műszaki Könyvkiadó - 1973; 296 old. 5.5 ábra
13. ábra – Forrás: Karsai - Kerényi Kis- Nagy transzformátorok; Műszaki Könyvkiadó - 1973; 297 old. 5.6 ábra
14. ábra – Forrás: Karsai - Kerényi Kis- Nagy transzformátorok; Műszaki Könyvkiadó - 1973; 298 old. 5.7 ábra
15. ábra – Forrás: Karsai - Kerényi Kis- Nagy transzformátorok; Műszaki Könyvkiadó - 1973; 299 old. 5.8 ábra
16. ábra – Forrás – Dr. Nádor Gábor- CG Electric System Hungary Transformer BU-Transformer Electrical Design – 2018. Ppt
17. ábra - Forrás: Saját ábra

Függelék

1.számú melléklet

A 3.3. és 3.4. fejezetekhez tartozó jelölésmagyarázat

Jelölések

a	egy tekercsfél axiális irányú mérete, m
A	felület, m^2
A_k	a tekercselés konvekciós felülete, m^2
b	radiális irányú méret, m
c	fajhő, W/kg^{-1}
d_1	a szigetelt kör keresztmetszetű huzal átmérője, m
d_h	hidraulikus átmérő, m
f	a térfogategységre vonatkoztatott egyenáramú és örvényáram-veszteség összege, Wm^{-3}
h	magasság, m
h_1	hőközep szintkülönbség, m
h_r	radiátorhossz, m
I	az áramerősség effektív értéke, A
J	áramsűrűség, Am^{-2}
k_t	a tekercs térfogategységre vonatkoztatott töltőtényezője
l	hossz, m
m	menetszám egyrétegben
p	térfogategységre vonatkoztatott hőteljesítmény, Wm^{-3}
P_{ca}	a rövidzárási veszteség egyenáramú veszteség része, W
P_u	a transzformátor üresjárási vesztesége, W
P_o	a rövidzárási veszteség örvényáramú veszteség része, W
P_{rx}	a transzformátor rövidzárási vesztesége, W
P_t	a tekercs hőteljesítménye, W
P_v	a vasmag hőteljesítménye, W
q_t	a tekercselés felületi hőterhelése, Wm^{-2}
t	hőmérséklet, $^{\circ}C$
t_c	a tekercselés melegpontjának hőmérséklete, $^{\circ}C$
t_1	a környezeti hőmérséklet, amely általában azonos a hűtőbe belépő levegő hőmérsékletével, $^{\circ}C$
t_{1be}	a hűtőbe belépő levegő hőmérséklete, $^{\circ}C$
t_{1ki}	a hűtőből kilépő levegő hőmérséklete, $^{\circ}C$

t_m	határréteg-hőmérséklet, °C
t_{0m}	az olaj maximális hőmérséklete, amely a tekercselésből kilépő olaj hőmérséklete, természetes olajáramlás esetén jó közelítéssel azonos a hűtőbe belépő olaj hőmérsékletével, °C
t_{tm}	a tekercoszlop legfelső tárcsájának átlaghőmérséklete, °C
t_v	a hűtőbe belépő víz hőmérséklete, °C
T_c	a tekercselés melegpontjának melege, °C
T_{jk}	a hűtőben áramló levegő átlagos melege, °C
$T_{o\dot{a}h}$	az olaj átlagmelege a hűtőben, °C
$T_{o\dot{a}t}$	az olaj átlagmelege a tekercsben, °C
T_{om}	az olaj maximális melege, °C
$T_{\dot{a}}$	a tekercs átlagmelege, °C
v	a tömegegységre vonatkoztatott egyenáramú és örvényáram veszteség összege, Wkg^{-1}
w	közegsebesség, ms^{-1}
α	felületi hőátadási tényező, $Wm^{-2} °C^{-1}$
δ	a menetszigetelés egyoldali vastagsága, m
Δp	nyomásesés, Nm^{-2}
Δt_f	a szigetelés külső felülete és a felület mentén áramló olaj közötti felületi hőesés, °C
Δt_k	a kisebb olajhűtőközeg közötti hőmérséklet-különbség, °C
Δt_l	a hűtőből kilépő és abba belépő levegő hőmérséklet-különbsége, °C
Δt_n	a nagyobb olajhűtőközeg közötti hőmérséklet-különbség, °C
Δt_o	a hűtőbe belépő és onnan kilépő olaj hőmérséklet-különbsége, °C
Δt_{of}	a radiátor olajoldali felületi hőesése, °C
Δt_p	a szigetelésen át létrejövő hőesés, °C
Δt_{rk}	az olaj és hűtőközeg közötti logaritmikus hőmérséklet-különbség, °C
Δt_{tm-o}	tekercsmaximum-olajátlag hőesés, °C
Δt_{to}	a tekercselésből felül távozó és a tekercselésbe alul belépő olaj hőmérséklet-különbsége, °C
Δt_{t-o}	tekercsátlag-olajátlag hőesés, °C
Δt_v	a hűtőből kilépő és abba belépő víz hőmérséklet-különbsége, °C
Δt_{vo}	a vasmag hűtőcsatornáiból kilépő és abba belépő olaj hőmérséklet-különbsége, °C
Φ_{mto}	a tekercselés olajtömegárama, kgs^{-1}
Φ_{mvo}	a vasmag olajtömegárama, kgs^{-1}
λ_p	az olajos papír hővezető képessége, $Wm^{-1} °C^{-1}$
v	kinematikai viszkozitás, m^2s^{-1}
ρ	sűrűség, kgm^{-3}
ρ_t	a tekercselési anyag fajlagos ellenállása, $VA^{-1}m$
σ	fajlagos vezetés, $AV^{-1}m^{-1}$

2. számú melléklet

A8. ábrán jelölt hőmérsékletek, melegedések és hőesések megnevezése [2]

Jelölés	Megnevezés
H	magasság
ϑ	hőmérséklet
ϑ_1	a környezeti hőmérséklet, amely általában azonos a hűtőbe belépő levegő hőmérsékletével
ϑ_{1be}	a hűtőbe belépő levegő hőmérséklete
ϑ_{1ki}	a hűtőből kilépő levegő hőmérséklete
$\vartheta_{1á}$	a hűtőben áramló levegő átlaghőmérséklete
$\Delta\vartheta_{1k}$	a hűtőben áramló levegő átlagos melegedése a belépő levegő hőmérsékletéhez képest
ϑ_{om}	az olaj maximális hőmérséklete, amely a tekercselésből kilépő olaj hőmérséklete, természetes olajáramlás esetén jó közelítéssel azonos a hűtőbe belépő olaj hőmérsékletével
ϑ_{obe}	a hűtőbe belépő olaj hőmérséklete
$\Delta\vartheta_{om}$	az olaj maximális melegedése
ϑ_{oki}	a hűtőből kilépő olaj hőmérséklete, amely azonos a tekercselésbe alul belépő olaj hőmérsékletével
$\vartheta_{oát}$	tekercselés felületei mentén áramló olaj átlaghőmérséklete
$\Delta\vartheta_{oáh}$	a hűtőben áramló olaj átlagmelegedése
$\vartheta_{oáh}$	a hűtőben áramló olaj átlaghőmérséklete
$\Delta\vartheta_{rk}$	a hűtőben áramló olaj és a levegő logaritmikus hőfokkülönbsége
$\Delta\vartheta_{of}$	a hűtőben áramló olaj és a hűtő fala közötti hőesés
ϑ_{mbl}	a hűtőben áramló levegő közepes határréteg-hőmérséklete
ϑ_c	a tekercselés melegpontjának hőmérséklete
ϑ_{tm}	a legfelső tekercs átlaghőmérséklete
$\vartheta_{tá}$	a tekercselés átlaghőmérséklete
$\Delta\vartheta_{tá}$	a tekercselés átlagmelegedése
$\Delta\vartheta_{t-o}$	a tekercsátlag—olajátlag hőlépcső
ϑ_{mto}	a tekercselés felületei mentén áramló olaj közepes határréteg-hőmérséklete
$\Delta\vartheta_p$	a tekercselés szigetelésében létrejövő hőesés
$\Delta\vartheta_f$	a tekercsszigetelés külső felülete és az olaj közötti felületi hőesés
$\Delta\vartheta_o$	a hűtőbe belépő és kilépő olaj hőmérséklet-különbsége. Természetes olajáramlás esetén azonos a tekercselésből kilépő és belépő olaj hőmérséklet-különbségével, $\Delta\vartheta_{to}$ -val
$\Delta\vartheta_{oát}$	a tekercselés felületei mentén áramló olaj átlagmelegedése