



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Joonas Heikkinen

Muuntajan sydämen ja puristusrakenteiden kiertovirtalaskenta vakiotuoterakenteella

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö
Diplomityö
Sähkötekniikka

Vaasa 2026

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen yksikkö**

Tekijä:	Joonas Heikkinen		
Tutkielman nimi:	Muuntajan sydämen ja puristusrakenteiden kiertovirtalaskenta vakiotuoterakenteella		
Tutkinto:	Diplomi-insinööri		
Oppiaine:	Sähkötekniikka		
Työn valvoja:	Kimmo Kauhaniemi		
Työn ohjaaja:	Hasse Nordman		
Työn tarkastaja:	Hannu Laaksonen		
Valmistumisvuosi:	2026	Sivumäärä:	105

TIIVISTELMÄ:

Muuntajalla jännitetaso muunnetaan käyttökohteelle tarkoituksenmukaiseksi. Tässä työssä tarkastelun kohteena ovat öljyeristetyt tehomuuntajat, joita tyypillisesti käytetään sähkönsiirto- ja jakeluverkoissa, voimalaitoksissa ja teollisissa kohteissa. Muuntajan käämien hajavuo sekä suurivirtaisten kiskotusten tai johdosten aiheuttamat magneettikentät aiheuttavat haasteita muuntajan suunnitteluun ja valmistukseen liittyen. Käämeistä ja sisäisestä johdotuksesta aiheutuvat magneettikentät aiheuttavat rakenteissa lisähäviöitä ja niiden seurauksena lämpenemistä. Lisäksi käämeistä ja sisäisestä johdotuksesta aiheutuvat magneettikentät indusoivat suljettuihin silmukoihin kiertäviä virtoja. Näitä virtoja kutsutaan termillä kiertovirta. Muuntajassa tällaisia suljettuja piirejä muodostuu esimerkiksi sydämen ikkunoista sekä aktiiviosan puristusrakenteista. Kiertovirrat voivat aiheuttaa lisähäviöitä sekä paikallisia kuumia pisteitä. Näistä kahdesta paikalliset kuumat pisteet ovat suuri ongelma. Kuumia pisteitä voi esiintyä etenkin huonoissa sähköisissä liitoksissa. Kiertovirtojen kulkiessa huonon sähköisen liitoksen läpi voi liitos alkaa kuumenemaan ja johtaa muuntajan kaasuttamiseen. Huonoja sähköisiä liitoksia ovat esimerkiksi muuntajan sydämessä ikeiden ja pylväiden saumakohtat sekä muut metalli-metalli kontaktipinnat. Sydämen ja puristusrakenteiden luotettava kiertovirtalaskenta on tärkeä osa onnistuneen muuntajan suunnittelu- ja valmistusprosessia.

Tässä työssä tavoitteina oli tuottaa kiertovirtalaskennan referenssituloksia usein toistuville muuntajamalleille, analysoida saatuja tuloksia ja selvittää mahdollisia kriittisiä kohtia suunnitteluun liittyen. Työssä oli myös tavoitteena oppia käyttämään uusia kiertovirtalaskentaan tehtyjä ohjelmia sekä arvioimaan niiden toimintaa. Työn alun teoriaosuudessa hyödynnettiin tieteellisiä artikkeleita, kirjallisuutta sekä tutkimuksia. Tutkimusvaihetta alustettiin esittämällä ja vertailemalla sisäisissä ohjeistuksissa esitettyjen projektien mittaus- ja laskentatuloksia, minkä avulla havainnollistettiin laskentatyökalun tarkkuutta sekä toimintaa. Tutkimusvaiheessa tehtiin kiertovirtalaskenta yhdeksälle eri projektille. Projekteista osa oli toimitettu ja osa vielä suunnitteluvaiheessa. Kiertovirtalaskenta toteutettiin kaikille projekteille Exceliin ohjelmoidulla laskentaohjelmalla. Lisäksi osalle projekteista tehtiin elementtimenetelmään perustuvia simulointeja Simcenter Magnet-ohjelmistolla. Työssä vertailtiin Excel-laskentaohjelman sekä Magnet-simulointiohjelman laskemien tulosten eroavaisuuksia. Työhön valituille projekteille ei ollut tehty kiertovirtamittauksia, joten saadut tulokset ovat laskennallisia. Työn tuloksena saatiin luotua taulukot, joissa on esitetty projektikohtaiset kiertovirtalaskennan tulokset. Taulukoista voidaan saada jatkossa vertailupohjaa suunnittelua varten. Lisäksi tuloksiksi saatiin taulukot Excel- ja Magnet-ohjelmien tulosten eroavaisuuksista. Saatujen laskentatulosten ja niiden analyysin perusteella tehtiin myös jatkokehitysehdotuksia.

AVAINSANAT: Kiertovirta, muuntaja, muuntajasydän, hajavuo

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty Hitachi Energy Oy:n Transformers-yksikölle. Haluan kiittää Hitachi Energyä mahdollisuudesta tehdä diplomityö mielenkiintoisesta ja haastavasta aiheesta. Kiitokset etenkin työpaikan ohjaajalleni Hasse Nordmanille kaikesta saamastani avusta, kärsivällisyydestä sekä mielenkiintoisista tarinoista ja kokemusesimerkeistä liittyen diplomityöaiheeseen. Kiitokset myös työn valvojalle professori Kimmo Kauhaniemelle. Lopuksi kiitokset kaikille, jotka ovat jollain tavalla olleet mukana auttamassa minua diplomityössäni.

Sisällys

1	Johdanto	12
1.1	Työn tavoite ja tutkimuskysymykset	13
1.2	Työn rakenne	14
2	Muuntajan rakenne ja toiminta	15
2.1	Aktiiviosan rakenne	15
2.1.1	Sydän	16
2.1.2	Käämit ja sisäinen johdotus	17
2.1.3	Aktiiviosan puristusrakenteet	18
2.2	Sähkömagneettiset kentät	19
2.2.1	Faradayn laki	19
2.2.2	Lenzin laki	20
2.2.3	Ampèren laki	20
2.2.4	Väliaine yhtälöt	21
2.3	Muuntajan toiminta	22
2.3.1	Muuntajan kytkentäkerroin ja induktanssit	24
2.3.2	Muuntajan sijaiskytkentä	25
2.3.3	Muuntajan magneettipiiri	26
3	Muuntajan tehohäviöt	29
3.1	Tyhjäkäyntihäviöt	29
3.1.1	Pyörrevirtahäviöt	29
3.1.2	Hystereesihäviöt	30
3.2	Kuormitushäviöt	32
4	Muuntajan sydämen kiertovirrat	34
4.1	Kiertovirtojen teoreettinen esittäminen	37
4.2	Muuntajan sydämen kiertovirtojen pienentäminen	39
4.2.1	Käämisuunnittelu	40
4.2.2	Sisäisen johdotuksen suunnittelu	42
4.2.3	Sydämen eristystason valinta	42

4.2.4	Kuparikehikko	43
5	Sydämen kiertovirrat vakiotuoterakenteella	44
5.1	Kiertovirtalaskennan pääpiiri vakiotuoterakenteella	44
5.2	Käämien vaikutus kiertovirtoihin	47
5.3	Sisäisen johdotuksen vaikutus kiertovirtoihin	50
6	Kiertovirtalaskennan tulokset ja analyysi	51
6.1	Aikaisempien projektien mitatut ja lasketut tulokset	51
6.2	Ryhmän 1 tulokset ja analyysi	60
6.2.1	Projektien 1–6 tulokset	61
6.2.2	Projektin 3 Magnet-simulointi	70
6.2.3	Projektin 4 Magnet-simulointi	73
6.3	Ryhmän 2 tulokset ja analyysi	75
6.3.1	Projektin 7 tulokset	76
6.3.2	Projektin 7 Magnet-simuloinnit	85
6.3.3	Projektin 8 tulokset	88
6.3.4	Projektin 9 tulokset	91
6.3.5	Projektin 9 Magnet-simuloinnit	97
7	Johtopäätökset ja jatkotutkimuskohteet	99
	Lähteet	102

Kuvat

Kuva 1. Kolmipylväisen muuntajan aktiiviosa (Thango ja Bokoro, 2022, s. 2).	15
Kuva 2. Step-lap ladonta (ABB, 2007, s. 15).	16
Kuva 3. Muuntajan käämit ja sisäinen johdotus (Dawood ja muut, 2019, s. 214).	18
Kuva 4. 1-vaiheisen muuntajan periaatekuva (Mohan, 2003, s. 52).	22
Kuva 5. 1-vaiheisen kuormitetun muuntajan sijaiskytkentä (Ćalasan ja muut, 2019, s.3).	25
Kuva 6. Magneettipiiri esitettynä virtapiirianalogialla.	26
Kuva 7. 1-vaiheisen muuntajan esimerkki magneettipiiri (Wang ja Yuan, 2018, s. 1669).	27
Kuva 8. Periaatekuva kolmipylväisen muuntajan magneettivuon jakautumiselle (Zou ja muut, 2017, s. 918)	28
Kuva 9. Hystereesikäyrä (ABB, 2004, s. 142).	31
Kuva 10. Sydämen ikkunan lävistävä magneettivuo (ABB, 2013, s. 3).	37
Kuva 11. Sydämessä kiertävät virrat (ABB, 2013, s. 4).	38
Kuva 12. Kaksikerroksinen alajännitekäämi.	40
Kuva 13. Periaatekuva käämin jakamisesta kahteen aksiaaliseen osaan (Hitachi, 2025, s. 24).	41
Kuva 14. Kiertovirtalaskennan pääpiiri (ABB, 2013, s. 13).	44
Kuva 15. Käämien aiheuttama magneettikenttä (Hitachi, s. 7, 2021).	48
Kuva 16. Mitatun kolmikäämimuuntajan käämijärjestys (Hitachi, 2021, s. 27).	54
Kuva 17. Yläjännitekäämin sisemmän kerroksen kytkentä.	55
Kuva 18. Yläjännitekäämin uloimman kerroksen kytkentä.	56
Kuva 19. Kolmiokytketyn alajännitekäämin kytkentä.	56
Kuva 20. Tähtikytketyn alajännitekäämin kytkentä	57
Kuva 21. Projektin 1 alajännitekytkentä.	64
Kuva 22. Projektin 2 alajännitekytkentä.	65
Kuva 23. Projektien 3–5 alajännitekytkentä.	67
Kuva 24. Projektin 6 alajännitekytkentä.	68
Kuva 25. Johdotusgeometria konfiguraatiolle 2.	69

Kuva 26. Projektin 3 simulointimalli.	71
Kuva 27. Projektin 4 Magnet-geometria.	73
Kuva 28. Projektin 7 käämijärjestys.	76
Kuva 29. Alajännitekäämin 2 kytkentä, kun nollakisko on tuotu ylös.	78
Kuva 30. Alajännitekäämin 3 kytkentä, kun nollakisko on tuotu ylös.	80
Kuva 31. Alajännitekäämin 2 kytkentä, kun nollakisko on tuotu ikkunan keskelle.	82
Kuva 32. Projektin 8 käämijärjestys.	88
Kuva 33. Projektin 9 käämijärjestys.	91
Kuva 34. Projektin 9 alajännitekäämin 3 kytkentä.	92
Kuva 35. Projektin 9 yläjännitekäämin kytkentä.	93

Taulukot

Taulukko 1. Vikakuvauksien ja kaasujen yhteys (IEC 60599, 2022, s. 14).	35
Taulukko 2. Sydämen kiertovirtoihin liittyvä kaasutusjärjestys.	36
Taulukko 3. Mittaustulokset: 140 MVA kolmivaihemuuntaja (Hitachi, 2021, s. 24) ja (ABB, 2002, s. 31).	52
Taulukko 4. Mittaustulokset: 448 MVA yksivaihemuuntaja (Hitachi, 2021, s. 25–26).	53
Taulukko 5. Mittaustulokset: 172 MVA yksivaihemuuntaja (Hitachi, 2021, s. 26).	53
Taulukko 6. Itse lasketut käämikohtaiset tulokset.	57
Taulukko 7. Kolmikäämimuuntajan laskennalliset tulokset.	58
Taulukko 8. Kolmikäämimuuntajan lasketut ja mitatut tulokset.	59
Taulukko 9. Ryhmän 1 projektit.	60
Taulukko 10. Tulokset ryhmän 1 projekteille 1–3.	62
Taulukko 11. Tulokset ryhmän 1 projekteille 4–6.	63
Taulukko 12. Magnet-simuloinnin tulokset projektille 3.	72
Taulukko 13. Projektin 4 Magnet-simuloinnin tulokset.	74
Taulukko 14. Ryhmän 2 projektit.	75
Taulukko 15. Projektin 7 tulokset, kun molemmat nollakiskot ovat alaikeen rinnalla.	77
Taulukko 16. Projektin 7 tulokset, kun alajännitekäämin 2 nollakisko on tuotu käämin yläpuolelle.	79

Taulukko 17. Projektin 7 tulokset, kun alajännitekäämin 3 nollakisko on tuotu käämin yläpuolelle.	81
Taulukko 18. Projektin 7 tulokset, kun alajännitekäämin 2 nollakisko on tuotu ikkunan keskelle.	83
Taulukko 19. Projektin 7 tulokset, kun alajännitekäämin 3 nollakisko on tuotu ikkunan keskelle.	83
Taulukko 20. Magnet-simuloinnin tulokset alajännitekäämille 2.	85
Taulukko 21. Magnet-simuloinnin tulokset alajännitekäämille 3.	87
Taulukko 22. Projektin 8 tulokset.	89
Taulukko 23. Projektin 9 tulokset plus-asennossa.	94
Taulukko 24. Projektin 9 tulokset miinus-asennossa.	95
Taulukko 25. Projektin 9 Magnet-simulointien tulokset.	97

Kreikkalaiset symbolit

ε	Permittiivisyys [F/m]
ε_0	Tyhjiön permittiivisyys [F/m]
Λ	Permeanssi [H]
μ	Permeabiliteetti [H/m]
μ_0	Tyhjiön permeabiliteetti [H/m]
σ	Sähkönjohtavuus [S/m]
ϕ	Magneettivuo [Wb]
ω	Kulmataajuus [rad/s]

Muut symbolit

A	Pinta-ala [m ²]
a	Suorakulmion sivun 1 pituus [m]
B	Magneettivuon tiheys [T]
b	Suorakulmion sivun 2 pituus [m]
D	Sähkövuon tiheys [C/m ²]
d	Sydänlevyn paksuus [m]
E	Sähkökentän voimakkuus [V/m]
f	Taajuus [Hz]
F_m	Magnetomotorinen voima [A, ampeerikierros]
H	Magneettikentän voimakkuus [A/m]
h	Johtimen pituus [m]
I	Virta [A]
I_{c-y}	Ikeen virta [A]
I_m	Magnetointivirta [A]
I_{rauta}	Rautahäviövirta [A]
I_{TP}	Vetotankoryhmän virta [A]
I_0	Tyhjäkäyntivirta
J	Virrantiheys [A/m ²]
k	KytKentäkerroin/vakiokerroin

L	Induktanssi [H]
l	Pituus [m]
M	Keskinäisinduktanssi [H]
N	Käämikierrosten määrä
P_k	Käämin virtalämpöhäviöt [W]
P_{0h}	Hystereesihäviöt [W]
P_{0p}	Sydämen pyörrevirtahäviöt [W]
R	Resistanssi [Ω]
r	Säde [m]
R_{ilma}	Ilmavälin reluktanssi [1/H]
R_{kab}	Käämien välisen ilmavälin reluktanssi [1/H]
R_{k1}	Uloimman käämin ja ikeen ilmavälin reluktanssi [1/H]
R_m	Reluktanssi [1/H]
R_l	Hajavuon reluktanssi [1/H]
R_{rauta}	Rautahäviöresistanssi [Ω]
R_y	Ikeen reluktanssi [1/H]
s	Neliön sivun pituus [m]
t	Aika [s]
U	Jännite [V]
V	Tilavuus [m ³]
X	Reaktanssi [Ω]
X_m	Magnetointireaktanssi / keskinäisinduktanssien reaktanssi [Ω]
X_δ	Hajareaktanssi [Ω]
Z	Impedanssi [Ω]

Lyhenteet

AJ	Alajännite
DGA	Liunneen kaasun analyysi (engl. Dissolved gas analysis)
IEC	Kansainvälinen sähköteknillinen komissio
Smv	Sähkömotorinen voima
TP	Vetotanko (engl. Tie Plate)
YJ	Yläjännite

1 Johdanto

Tässä työssä käsitellään muuntajan sydämen kiertovirtoja, niiden seurannaisvaikutuksia sekä kiertovirtojen aiheuttamia haasteita. Muuntajan sydämen kiertovirroilla tarkoitetaan rautasydämessä ja sydämen ikkunoiden ympärillä olevissa suljetuissa silmukoissa kiertäviä virtoja. Muilla suljetuilla silmukoilla tarkoitetaan esimerkiksi puristusosien muodostamia sähköisiä piirejä. Sydämen kiertovirrat ovat ilmiö, joka esiintyy kaiken kokoisissa ja mallisissa muuntajissa, mutta kiertovirtojen aiheuttamat ongelmat ilmenevät usein suurivirtaisissa muuntajissa. IEC 60076-1 (2011, s. 59) standardissa on tiedostettu kiertovirtojen aiheuttamat haasteet. Standardissa todetaan, että suurivirtaisia kiskotuksia sisältävissä muuntajissa voi esiintyä odottamattomia kiertovirtoja esimerkiksi säiliössä ja kannessa. Standardissa ei kuitenkaan mainita sydämessä tai puristusrakenteissa kiertäviä virtoja. Sydämen ja puristusrakenteiden kiertovirrat ovat haaste, joka pitää myös osata huomioida.

Liian suureksi päässeet kiertovirrat voivat aiheuttaa lisääntyneitä häviöitä sekä ylikuumenemista sydämessä ja sitä ympäröivissä osissa. Kahdesta edellä mainitusta ongelmasta paikalliset ylikuumenemiset ovat suurin ongelma. Paikalliset kuumat kohdat voivat johtaa esimerkiksi kaasun muodostukseen koestuksen tai käytön yhteydessä. Bargate ja muut (2025, s. 1387) määrittelevät julkaisussaan, että kaasun muodostukseen tehomuuntajassa vaikuttavat termiset ja sähköiset epävakaudet. Gibeault ja Kirkup (1995) kertovat julkaisussaan, että muuntajan vikakaasujen varhainen havaitseminen ja seuraaminen voivat antaa varoituksen kehittyvistä vioista. Gibeault ja Kirkup (1995, s. 291–292) esittävät julkaisussaan myös esimerkkejä kaasunmuodostuksen seurannalla havaituista vioista. Muuntajan kaasutus voi johtaa muuntajan avaamiseen ja mahdollisesti kalliiseen ja aikaa vievään korjaukseen. Kiertovirtojen aiheuttama ylikuumeneminen voi johtaa myös poltettuihin kohtiin sydämessä.

Girgis ja teNyenhuis (2009) kertovat artikkelissaan tilanteesta, jossa muuntajan sydämen paikalliset kuumat kohdat johtivat lievään kaasun muodostukseen kuudessa samanmallisessa muuntajassa. Vaikka artikkelissa esitetyssä esimerkissä kaasun

muodostus oli suhteellisen pientä, se aiheutti pidemmällä ajanjaksolla ongelman ja tarpeen aloittaa selvitystyö. Artikkelin esimerkki antaa kuvan, kuinka muuntajan kaasutus voi aiheuttaa aikaa vievän selvitystyön. Lisäksi isojen muuntajien kuljetus asennuspaikalta takaisin tehtaalle voi osoittautua haastavaksi. Jos samaa muuntajamallia on tehty useampi kappale voi korjauskulut nousta nopeasti erittäin suuriksi.

Aiemmin mainittiin, että kiertovirrat ilmiönä ei aiheuta ongelmia kaikissa muuntajissa. Suunnittelutyötä tehtäessä on kuitenkin tärkeää ymmärtää, milloin on tarve tehdä tarkempi tarkastelu liittyen kiertovirtoihin. Kiertovirtojen mallintamisen ongelmia ovat sen hidastava vaikutus suunnitteluprosessiin sekä teoreettinen haastavuus.

1.1 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset

Työssä tehdään muuntajan sydämen kiertovirtalaskelmia jo tehdyille sekä vielä suunnitteluvaiheessa oleville muuntajille. Ensimmäisenä työn tavoitteena on tuottaa kiertovirtalaskennan referenssituloksia usein toistuville muuntajamalleille. Toisena tavoitteena on analysoida laskettuja tuloksia ja selvittää mahdollisia kriittisiä kohtia suunnitteluprosessin kannalta. Kolmantena tavoitteena on oppia käyttämään uusia laskentaohjelmia sekä arvioimaan niiden toimintaa.

Referenssitulosten avulla kiertovirtalaskenta nopeutuu sekä selkeytyy yleisimpien muuntajamallien tapauksissa. Referenssitulokset ja niihin liittyvät analyysit tuottavat vertailupohjan, kun siirrytään suunnittelemaan ja valmistamaan suurempia muuntajia.

Työn tutkimuskysymyksiä ovat:

- Mitkä tekijät vaikuttavat kiertovirtojen syntyyn?
- Mitkä tekijät aiheuttavat vaaran kiertovirtoihin liittyen?
- Millä suunnitteluratkaisuilla voidaan hallita kiertovirtoja?
- Miten kiertovirtalaskenta toteutetaan uusilla laskentaohjelmilla?
- Mitä johtopäätöksiä saaduista kiertovirtalaskennan tuloksista voidaan tehdä?

1.2 Työn rakenne

Luvussa 2 tarkastellaan muuntajan rakennetta sekä toimintaperiaatetta. Luvussa 3 tarkastellaan muuntajissa esiintyviä tehohäviöitä. Luvussa 4 esitetään kiertovirratt teoreettisena ilmiönä ja avataan tarkemmin kiertovirtoihin vaikuttavia tekijöitä sekä tarkastellaan aihetta muuntajan suunnitteluun liittyen. Luvussa 5 esitetään kiertovirtalaskennan teoria vakiotuoterakenteella. Luvussa 6 on esitetty muutamia sisäisessä ohjeistuksessa esitettyjä mittaustuloksia kiertovirroille ja vertailtu niitä laskentaohjelmalla laskettuihin tuloksiin. Luvussa 6 esitetään myös työhön valittujen projektien kiertovirtalaskelmien tulokset sekä niiden analyysit. Luvussa 7 on esitetty työn keskeiset johtopäätökset sekä ehdotettu mahdollisia jatkotutkimusaiheita ja kehityskohteita.

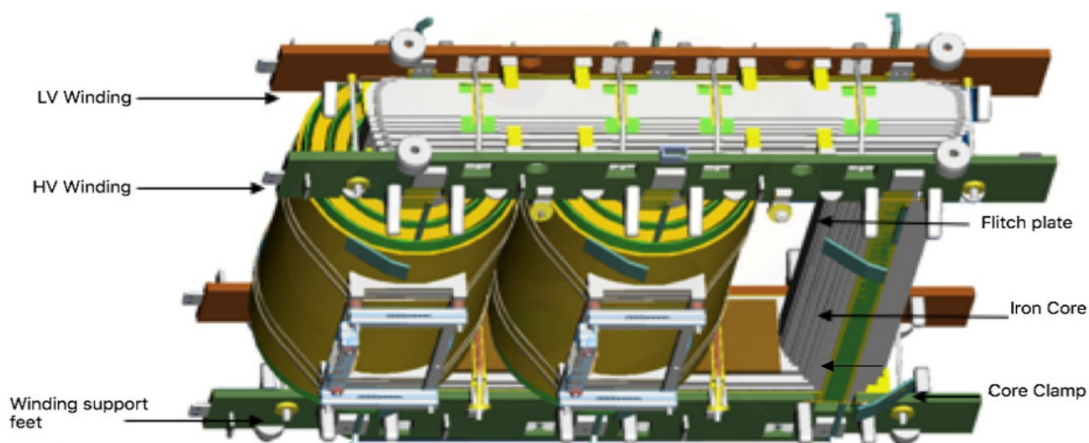
2 Muuntajan rakenne ja toiminta

Gieras (2017, s. 41) määrittelee, että muuntaja on staattinen sähkömagneettinen laite, jolla voidaan muuntaa vaihtovirtajärjestelmän sähköenergiaa yhdestä piiristä toiseen käyttäen samaa taajuutta, mutta eri jännite- ja virta-arvoja. Muuntaja on keksintönä vanha ja sillä on useita sovelluksia eri käyttötarkoituksiin. Muuntajalla voidaan sähköenergian siirrossa sekä jakelussa sovittaa jännite tarvittua tasoa vastaavaksi. Muuntajilla on myös muita sovellutuksia esimerkiksi mittalaitteistoissa.

Tässä työssä käsitellään öljyeristettyjä sydäntyyppisiä tehomuuntajia. Muuntajan rakenne voidaan jakaa aktiiviosaan ja säiliöön. Aluvuossa 2.1 esitetään aktiiviosan rakenne ja siihen liittyvät ominaisuudet.

2.1 Aktiiviosan rakenne

Aktiiviosaan kuuluu muuntajan sydän, käämit, sisäinen johdotus sekä puristusosat. Kuvassa 1 on esitetty periaatekuva kolmipylväisen sydäntyyppisen muuntajan aktiiviosasta. Jokaisen vaiheen käämit on asennettu omalle pylväälleen ja pylväät yhdistyvät ylä- ja alaikeen kautta. Kuvasta 1 voidaan myös havaita aktiiviosan tuki- ja puristusrakenteita.



Kuva 1. Kolmipylväisen muuntajan aktiiviosa (Thango ja Bokoro, 2022, s. 2).

2.1.1 Sydän

Muuntajan sydämen tehtävä on ohjata magneettivuo ϕ kulkemaan haluttujen käämitysten kautta. ABB:n (1998, s. 30) koulutusmateriaalissa kerrotaan, että rautasydän muodostetaan suunnatuista muuntajalevyistä, joissa magneettivuo pääsee kulkemaan hyvin pituussuunnassa, mutta poikittaissuunnassa se kohtaa suuren vastuksen. Päästääkseen tähän on muuntajalevyjen päät leikattava saumakohtissa 45 asteen kulmaan.

Amoiralis ja muut (2009, s. 2013) kertovat artikkelissaan, että sydämen materiaaliin liittyen on tapahtunut tasaista kehitystä läpi viime vuosisadan. Artikkelissa kehityksen syyksi esitetään energian hinnan huomattavaa nousua viimeisten vuosikymmenten aikana. Sydämen häviöiden pienentäminen ja energiatehokkaampien muuntajien valmistaminen on tärkeä osa energiatehokasta sähkö- ja energijärjestelmää. Uusien sydänmateriaalien kehittäminen voi myös antaa kilpailuedun, sillä nykymuuntajille on usein annettu häviöarvostuksia. Tämän seurauksena muuntajan häviöillä on merkittävä vaikutus myös tarjouskilpailussa.

Sydämen ladonnassa käytetään tavallisesti step-lap tapaa. Kuvassa 2 on esitetty havainnekuva step-lap ladonnasta.



Kuva 2. Step-lap ladonta (ABB, 2007, s. 15).

ABB:n (2007, s. 15) ohjeistuksessa kerrotaan, että step-lap tavassa ladotaan 2 sydänlevyä kerrallaan, jonka jälkeen pylväs- ja ieslevyjen sauma siirtyy eteenpäin. Kuudennen askeleen jälkeen aloitetaan taas samasta kohdasta kuin ensimmäisessä askeleessa. Da Luz ja muut (2014, s. 1009) toteavat artikkelissaan, että step-lap tavalla voidaan vaikuttaa muuntajan tyhjäkäyntihäviöihin sekä äänitasoon.

2.1.2 Käämit ja sisäinen johdotus

Muuntajassa on vähintään kaksi käämistystä: ensiö- ja toisiokäämi, joiden materiaalina on joko kupari tai alumiini. Näiden lisäksi yläjännitepuolella on usein erillinen säätökäämi, joka on kytketty yläjännitekäämin jatkeeksi. Sivulla 15 esitetystä kuvasta 1 voidaan havaita kuinka 3-vaiheisen muuntajan käämit ovat asennettuna kolmelle erilliselle pylväälle. Sisimpänä eli lähimpänä sydäntä oleva käämi on usein alajännitekäämi, sillä se on helpompi eristää sydäimestä. Alajännitekäämin jälkeen tulee eristysrakenteita, jonka jälkeen tulee usein yläjännitekäämi. Uloimpana käämistyksenä on usein säätökäämi. Käämistysten määrä ja järjestys voi kuitenkin poiketa edellä esitetystä perusrakenteesta.

Käämien välisiä, käämeiltä läpivienneille sekä käämeiltä mahdolliselle käämi- tai väliottokytkimelle lähteviä johdotuksia tai kiskotuksia kutsutaan sisäiseksi johdotukseksi. Sisäisessä johdotuksessa joudutaan huomioimaan esimerkiksi jännitelujuus, riittävä tuenta oikosulkuvoimia vastaan sekä lämpeneminen. ABB:n (1998, s. 35) koulutusmateriaalissa kerrotaan, että sisäisessä johdotuksessa käytetään usein kuparikaapeleita, poikkeuksena suurivirtaiset johdotukset voidaan joutua tekemään vahvoista kuparikiskoista tilanteessa, jossa kaapeleilla ei saavuteta riittävää poikkipinta-alaa eikä riittävää oikosulkulujuutta.

Kuvassa 3 on esitetty esimerkkikuva muuntajan aktiiviosasta. Kuvasta voidaan havaita käämit yhdistävä sekä käämeiltä läpivienneillä lähtevä johdotus.



Kuva 3. Muuntajan käämit ja sisäinen johdotus (Dawood ja muut, 2019, s. 214).

2.1.3 Aktiiviosan puristusrakenteet

Puristusosien tehtävä on tukea aktiiviosaa ja niiden avulla aktiiviosa myös kiinnitetään säiliöön (ABB, 1998, s. 35). Muuntajan puristusrakenteiden avulla muuntaja saadaan pidettyä kasassa oikosulkujen aikana. Muuntajan pääpuristusosiin kuuluu esimerkiksi puristuspalkit, ylä- ja alasillat, ryhtipalkki, vaarnaruuvit sekä prespaanilieriöt ja käämipeti (ABB, 1998, s. 34). Puristusosia valmistetaan tavallisesti metallista, prespaanista sekä puusta (ABB, 1998, s. 34).

2.2 Sähkömagneettiset kentät

Tässä alaluvussa tarkastellaan tärkeimpiä muuntajiin liittyviä sähkömagneettisen kenttäteorian lakeja.

2.2.1 Faradayn laki

Vuonna 1831 Faraday osoitti, että magneettikentän muutos aiheuttaa sähkövirtoja metallilankasilmukkaan. Faradayn kehittämä laki saatiin myöhemmin vektorianalyysin avulla esitettyä yhtälönä

$$\nabla \times \mathbf{E}(r, t) = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B}(r, t), \quad (1)$$

missä $\mathbf{E}(r, t)$ tarkoittaa sähkökentän voimakkuusvektoria ja $\mathbf{B}(r, t)$ tarkoittaa magneettivuon tiheysvektoria (Sihvola & Lindell, 2013, s. 8–9). Sihvola ja Lindell (2013, s. 9) kertovat kirjassaan, että magneettivuon tiheyden muutos aiheuttaa ympärilleen sähkökentän pyörteen. Soveltamalla Stokesin integraalilauseetta saadaan yhtälö

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \int_A \nabla \times \mathbf{E} \cdot d\mathbf{S} = -\int_A \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}, \quad (2)$$

missä yhtälön vasen puoli kuvaa suljetulle reitille C indusoitunutta sähkömotorista voimaa ja oikea puoli ajan derivaattaa magneettivuolle, mikä kulkee suljetun reitin C eli pinta-alan A läpi (Sihvola & Lindell, 2013, s. 9). Näiden perusteella voidaan kirjoittaa seuraavat yhtälöt:

$$U_{smv} = \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \quad (3)$$

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (4)$$

$$U_{smv} = -\frac{d}{dt} \cdot \Phi \quad (5)$$

2.2.2 Lenzin laki

Sihvola ja Lindell (2013, s. 10) toteavat, että Lenzin laki voidaan ymmärtää luonnon pyrkimyksenä kohti tasapainotilaa. Suljettuun metallilankasilmukkaan indusoitunut virta aiheuttaa magneettikentän. Syntynyt magneettikenttä pyrkii vastustamaan silmukan läpi kulkevan magneettivuon muutosta (Sihvola & Lindell, 2013, s. 10). Indusoituneen virran aiheuttama magneettikenttä on siis vastakkainen alkuperäisen magneettikentän muutoksen suhteen (Sihvola & Lindell, 2013, s. 10).

2.2.3 Ampèren laki

Ampèren laki määrittelee, että magneettikentän voimakkuuden tangentialisen komponentin viivaintegraali suljetun reitin ympärillä on yhtä suuri kuin suljetun reitin sisällä kulkeva kokonaisvirta (Edminister, 1993, s. 137). Tämän määrittelyn perusteella voidaan johtaa yhtälö,

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_{enc}, \quad (6)$$

missä \mathbf{H} on magneettikentän voimakkuuden vektori ja I_{enc} suljetun reitin sisällä kulkeva kokonaisvirta. Pitkälle ja suoralle johtimelle voidaan johtaa yhtälö

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = H \cdot (2\pi r) = I_{enc}, \quad (7)$$

missä Biot-Savartin lain mukaan jokaisessa pisteessä r säteisellä ympyrällä magneettikentän voimakkuus \mathbf{H} on tangentialinen ja yhtä suuri (Edminister, 1993, s. 137).

Ampèren lakiin liittyy myös siirrosvirta termi. Siirrosvirta termi sitoo sähkö- ja magneettikentät toisiinsa (Sihvola & Lindell, 2013, s. 38).

Huomioitaessa siirrosvirtatermi saadaan yhtälö

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{D}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{J}(\mathbf{r}, t), \quad (8)$$

missä \mathbf{D} kuvaa sähkövuon tiheyden vektoria ja \mathbf{J} virrantiheysvektoria. Ilman Maxwellin lisätermiä vain muuttuva magneettikenttä aiheuttaisi sähkökentän, mutta ei päinvastoin (Sihvola & Lindell, 2013, s. 38).

2.2.4 Väliaine yhtälöt

Sähkömagneettisessa kenttäteoriassa on tärkeää myös ymmärtää väliaine yhtälöiden merkitys. Väliaine yhtälöt kuvaavat materiaa lineaarisissa tapauksissa, joissa sähkö- ja magneettikentät vaikuttavat. Sähkökenttiin liittyen voidaan esittää väliaine yhtälö

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E}, \quad (9)$$

missä ε tarkoittaa suhteellista permittiivisyyttä. Suhteellinen permittiivisyys saadaan tyhjiön permittiivisyyden ε_0 ja aineen permittiivisyyden ε_{aine} tulolla. Sihvola ja Lindell (2013, s. 176) kertovat kirjassaan, että permittiivisyyteen vaikuttaa sähkökentän suunta, lämpötila sekä sähkömagneettisen värähtelyn taajuus.

Magneettikenttiin liittyen voidaan esittää väliaine yhtälö

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H}, \quad (10)$$

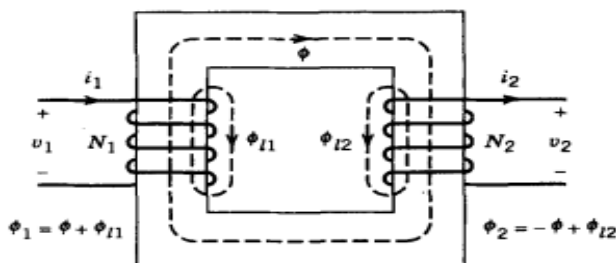
missä μ tarkoittaa suhteellista permeabiliteettiä. Suhteellinen permeabiliteetti voidaan laskea tyhjiön permeabiliteetin μ_0 ja aineen permeabiliteetin μ_{aine} tulolla. Muuntajan rautasydän on ferromagneettista ainetta eli $\mu \gg \mu_0$. Ferromagneettisten aineiden magnetoitumiskäyttäytyminen on usein epälineaarista (Lindell & Sihvola, 2002, s. 158). Yhtälö 10 pätee vain lineaariselle tilanteelle. Sihvola ja Lindell (2013, s. 178) kertovat

kirjassaan, että aineen magneettisen käyttäytymisen tarkempaan kuvaukseen tarvitsee usein hystereesikäyrän. Lisäksi kirjassa mainitaan, että permeabilisuuskäsitteitä voidaan määrittää käyrästä differentiaaleista tai keskiarvokulmakertoimista.

2.3 Muuntajan toiminta

Muuntajassa voidaan hyödyntää sähkömagneettista induktiota siirtämään sähkövirtaa virtapiiristä toiseen ilman galvaanista yhteyttä magneettivuon ϕ avulla. Muuttuva magneettikenttä indusoi sähkövirran. Muuntajassa vaihtosähkövirran avulla voidaan siis aiheuttaa toiseen piiriin muuttuva sähkövirta (Sihvola & Lindell, 2013, s. 13).

Muuntajaan tarvitaan vähintään kaksi virtapiiriä. Näistä virtapiireistä käytetään nimityksiä ensiö ja toisiö. Ensiöllä ja toisiolla on omat galvaanisesti erillään olevat käämit. Sihvola ja Lindell (2013, s. 13) kertovat kirjassaan, että mahdollisimman suuri osa ensiökäämin magneettivuosta täytyy kulkea toisiökäämin kierrosten läpi saavuttaakseen mahdollisimman tehokkaan muuntajan. Sihvola ja Lindell (2013, s. 13) toteavat, että asettamalla käämit samalle rautasydämelle, jonka permeabiliteetti μ on mahdollisimman suuri, saadaan sydämen ulkopuolella kulkevan magneettivuon osuus mahdollisimman pieneksi. Muuntajan rakenne ja tekniset ominaisuudet voivat vaihdella vaatimusten mukaan, mutta se muodostuu vähintään kahdesta magneettisesti kytketyneestä käämistä. Kuvassa 4 on esitetty periaatekuva yksivaiheisesta muuntajasta.



Kuva 4. 1-vaiheisen muuntajan periaatekuva (Mohan, 2003, s. 52).

Kuvasta 4 voidaan havaita sydän sekä ensiö- ja toisiokäämit. Lisäksi kuvaan on merkitty muuntajalle ominaisia suureita. Kuvasta voidaan havaita käämien virrat, jännitteet sekä kierrosmäärät. Kuvassa alaindeksi 1 tarkoittaa ensiön suureita ja alaindeksi 2 toision suureita. Lisäksi kuvasta voidaan havaita sydämessä kulkeva magneettivuo ϕ , käämien vuot ϕ_1 ja ϕ_2 sekä käämien hajavuot ϕ_{l1} ja ϕ_{l2} .

Sydämessä kiertävä magneettivuo ϕ , joka yhdistää käämit voidaan laskea yhtälöllä

$$\Phi = \frac{N_1 \cdot i_1 - N_2 \cdot i_2}{R_m} = \frac{N_1 \cdot i_m}{R_m}, \quad (11)$$

missä R_m on reluktanssi eli magneettinen vastus (Mohan, 2003, s. 53). Reluktanssi kuvaa magneettipiirissä magneettivuon kulkua vastustavaa suuretta. Suuren i_m tarkoittaa magnetointivirtaa. Reluktanssille voidaan esittää yhtälö

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot A}, \quad (12)$$

missä l tarkoittaa magneettipiirin keskimääräistä pituutta, A tarkoittaa poikkipinta-alaa ja μ tarkoittaa permeabiliteettia (Sihvola & Lindell, 2013, s. 13). Ottamalla reluktanssista käänteisluku saadaan laskettua suure permeanssi Λ .

Hajavoille voidaan esittää yhtälöt,

$$\begin{cases} \Phi_{l1} = \frac{N_1 \cdot i_1}{R_{l1}} \\ \Phi_{l2} = \frac{N_2 \cdot i_2}{R_{l2}} \end{cases}, \quad (13)$$

joissa R_l kuvaa hajavuon kulkeman reitin reluktanssia (Mohan, 2003, s. 53).

Muuntajan ensiön ja toision liittimissä näkyvien jännitteiden laskennalle voidaan esittää yhtälöt

$$\begin{cases} u_1 = R_1 \cdot i_1 + N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} = R_1 \cdot i_1 + \frac{N_1^2}{R_{l1}} \cdot \frac{di_1}{dt} + \frac{N_1^2}{R_m} \cdot \frac{di_m}{dt} \\ u_2 = -R_2 \cdot i_2 - N_2 \cdot \frac{d\Phi_2}{dt} = -R_2 \cdot i_2 - \frac{N_2^2}{R_{l2}} \cdot \frac{di_2}{dt} + \frac{N_1 \cdot N_2}{R_m} \cdot \frac{di_m}{dt} \end{cases} \quad (14)$$

missä resistanssit R_1 ja R_2 kuvaavat käämien resistiivisiä häviöitä (Mohan, 2003, s. 53).

2.3.1 Muuntajan kytkentäkerroin ja induktanssit

Sähkömotoristen voimien laskenta induktanssien avulla voidaan esittää yhtälöllä

$$u_{smv,i} = -L_{i1} \frac{di_1}{dt} - L_{i2} \frac{di_2}{dt} \quad (i = 1,2), \quad (15)$$

missä riippuen i :n arvosta, induktanssi L tarkoittaa joko itseinduktanssia tai keskinäisinduktanssia (Sihvola & Lindell, 2013, s. 15). Itse- ja keskinäisinduktansseille voidaan esittää yhtälöt

$$L_{11} = \frac{N_1^2}{R_m}, \quad L_{12} = L_{21} = \frac{N_1 \cdot N_2}{R_m}, \quad L_{22} = \frac{N_2^2}{R_m}, \quad (16)$$

missä L_{11} sekä L_{22} tarkoittavat itseinduktansseja ja L_{12} sekä L_{21} tarkoittavat keskinäisinduktanssia (Sihvola & Lindell, 2013, s. 15). Yhtälössä 16 esitetyt induktanssit toteuttavat yhtälön

$$L_{12} = \sqrt{L_{11} \cdot L_{22}}, \quad (17)$$

mikä tarkoittaa sitä, että kaikki magneettivuosta kulkee sekä käämin 1 että käämin 2 läpi (Sihvola & Lindell, 2013, s. 15). Todellisuudessa vain osa käämin 1 magneettivuosta

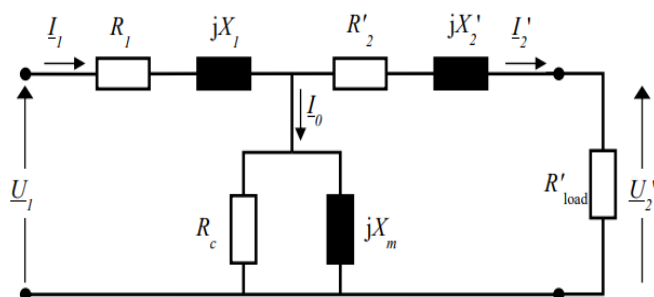
kulkee käämin 2 läpi, jonka seurauksena kytkentäkerroin k on pienempi kuin yksi (Sihvola & Lindell, 2013, s. 15). Tämän perusteella voidaan esittää yhtälö

$$k = \frac{L_{12}}{\sqrt{L_{11} \cdot L_{22}}}, \quad (18)$$

missä kytkentäkerroin saadaan selvitettyä induktanssien avulla (Sihvola & Lindell, 2013, s. 15). Kytkentäkertoimen pieneneminen aiheuttaa muuntajassa muuntosuhteen pienenemistä sekä tehokkuuden heikkenemistä. Koska muuntajan sydämen permeabiliteetti on kuitenkin suuri, jäävät hajakentät usein pieniksi (Sihvola & Lindell, 2013, s. 15).

2.3.2 Muuntajan sijaiskytkentä

Muuntaja voidaan esittää yksinkertaisemmassa muodossa sijaiskytkennän avulla. Kuvassa 5 on esitetty 1-vaiheisen kuormitetun muuntajan sijaiskytkentä. Kuvassa U_1 kuvaa ensiöjännitettä, I_1 ensiövirtaa, R_1 ensiökäämin resistanssia ja X_1 ensiökäämin reaktanssia. Toisiopuolen suuret on vastaavasti esitetty ensiöön redusoituna. Sijaiskytkennässä I_0 kuvaa muuntajan tyhjäkäyntivirtaa. Suure R_c kuvaa sydämen rautahäviöresistanssia ja suure X_m magnetointireaktanssia. Sijaiskytkentään on myös merkitty kuorman resistanssi R'_{load} . Elleuch ja Poloujadoff (2003, s. 975) toteavat artikkelissaan, että tyhjäkäyntivirta I_0 on hystereesivirran ja magnetointivirran summa. Hystereesivirran toinen nimitys on rautahäviövirta.

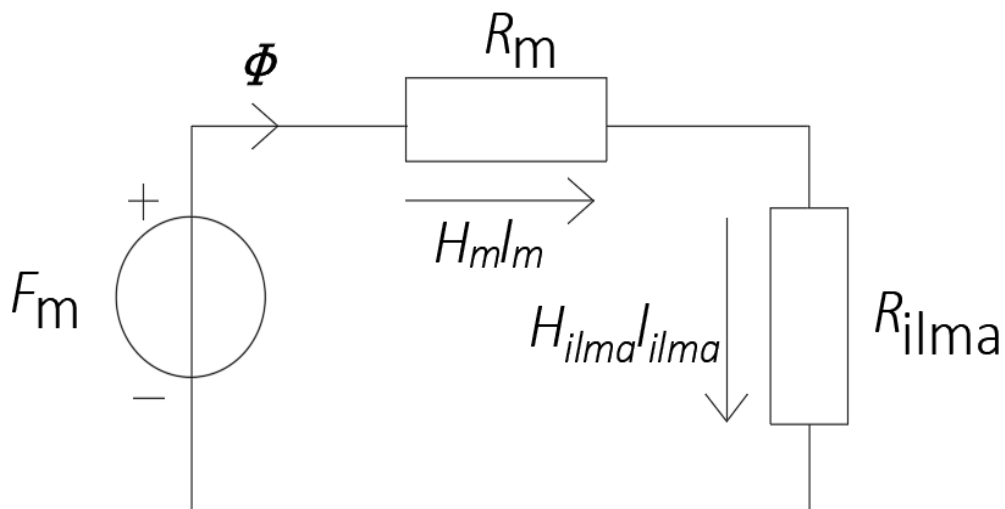


Kuva 5. 1-vaiheisen kuormitetun muuntajan sijaiskytkentä (Ćalasan ja muut, 2019, s.3).

2.3.3 Muuntajan magneettiipiiri

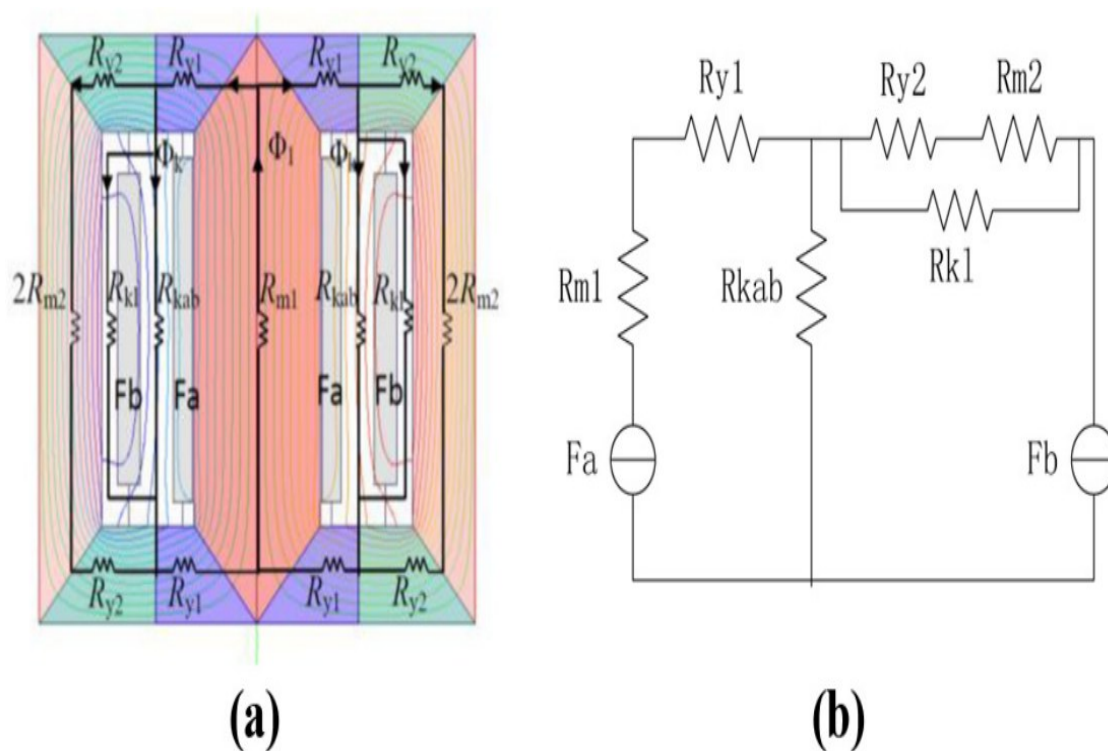
Magneettiipiireihin voidaan soveltaa virtapiirianalogiaa. Sovellettaessa virtapiirianalogiaa magneettiipiireihin magnetomotorinen voima F_m vastaa jännitelähdettä, reluktanssi R_m vastaa resistanssia ja magneettivuo ϕ vastaa piirissä kulkevaa sähkövirtaa. Sihvola ja Lindell (2013, s. 13) toteavat kuitenkin, että virtapiirianalogia on voimassa vain, jos piirin permeabiliteetti voidaan olettaa lineaariseksi eli kentänvoimakkuudesta riippumattomaksi vakioksi.

Kuvassa 6 on esitetty yksinkertainen magneettiipiiri virtapiirianalogian avulla. Kuvassa R_{ilma} kuvaa magneettiipiirissä esiintyvän ilmapälin reluktanssia. Lisäksi kuvaan on merkitty myös magnetomotorisen voiman alenemat, jotka saadaan selvitettyä magneettikentän voimakkuuden H ja keskimääräisen pituuden l avulla.



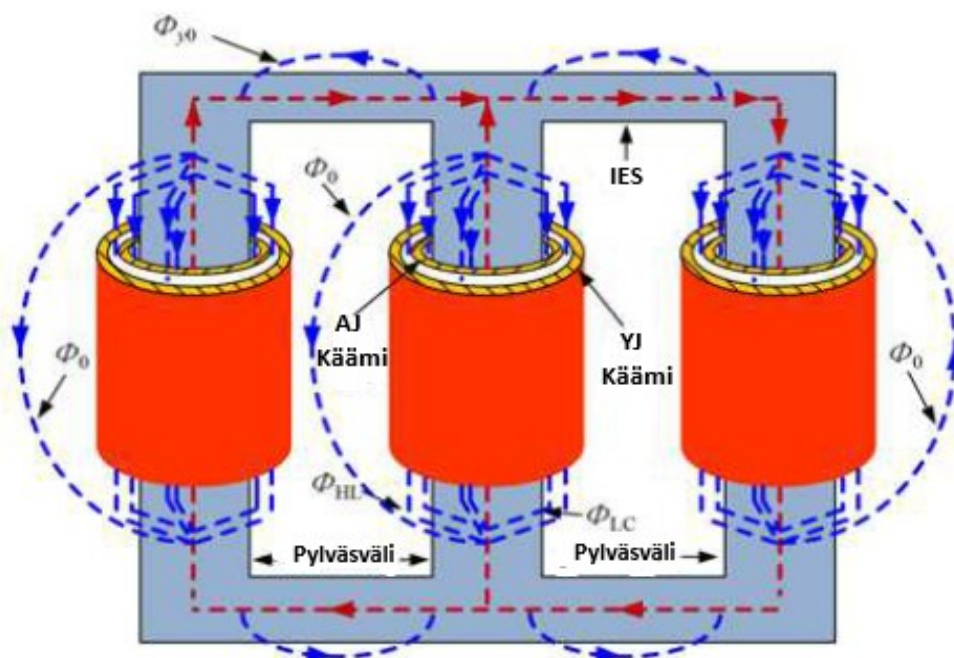
Kuva 6. Magneettiipiiri esitettyä virtapiirianalogialla.

Kuvassa 7 on esitetty esimerkki 1-vaiheisen muuntajan magneettiipiiristä. Wang ja Yuan (2018, s. 1669) ovat jakaneet artikkelissaan muuntajan magneettiipiirin useaan eri osaan. Wangin ja Yuanin (2018, s. 1669) magneettiipiirin esimerkissä magneettivuo on oletettu vakioksi jokaisessa osassa. Kuvassa R_{m1} kuvaa keskipylvään reluktanssia ja R_{m2} sivupylväiden reluktansseja. Ikeet on jaettu kahteen osaan ja osien reluktansseja kuvaavat R_{y1} ja R_{y2} . Reluktanssi R_{kab} kuvaa käämien välistä ilmapäliä. Reluktanssi R_{k1} taas kuvaa uloimmaisen käämin ja pylväiden välistä ilmaosuutta. Magnetomotorisia voimia kuvaavat suureet F_a ja F_b . Kuvassa 7 vasemmalla on esitetty muuntajan magneettiipiirin osat ja oikealla on osista muodostettu virtapiirianalogian avulla esitetty magneettiipiiri.



Kuva 7. 1-vaiheisen muuntajan esimerkki magneettiipiiri (Wang ja Yuan, 2018, s. 1669).

Zou ja muut (2017) ovat tutkineet artikkelissaan matalataajuisten muuntajien mallintamista. Kuvassa 8 on artikkelissa esitetty periaatekuva kolmipylväisen muuntajan magneettivuon jakautumisesta. Kuvassa punaisilla nuolilla on merkitty sydämessä kiertävää magneettivuota. Suure ϕ_0 tarkoittaa käämeistä aiheutuvaa hajavuota ja ϕ_{y0} tarkoittaa ikeen rinnalla ilmassa kulkevaa hajavuota. Suure ϕ_{HL} tarkoittaa pylväiden ja käämien välisen tilan välistä hajavuota. Suure ϕ_{LC} kuvaa pylväiden ja sisimmäisten käämien välistä hajavuota.



Kuva 8. Periaatekuva kolmipylväisen muuntajan magneettivuon jakautumiselle (Zou ja muut, 2017, s. 918)

Zoun ja muiden (2017) artikkelissa esittämässään mallissa on oletettu, että magneettikenttä rajoittuu yksinomaan magneettivuon kulkureitteihin. On kuitenkin tärkeää huomioida, että magneettivuo voi kytkeytyä myös esimerkiksi säiliön tai tukirakenteiden kautta.

3 Muuntajan tehohäviöt

Tässä luvussa käsitellään muuntajan tehohäviöitä. Pidlisniy ja Lushchin (2020, s. 34) kertovat artikkelissaan, että muuntajan tehohäviöt jakautuvat sähköisiin häviöihin käämeissä, magneettisiin häviöihin magneettiipiirissä sekä lisähäviöihin. Tavallisemmin puhutaan sydämessä syntyvistä tyhjäkäyntihäviöistä sekä kuormituksen aikana syntyvistä kuormitushäviöistä. Muuntajan tehohäviöt ovat erittäin tutkittu aihe, ja niillä on keskeinen merkitys energiatehokkaassa sähkön siirrossa sekä kilpailukykyisten muuntajien tarjoamisessa. Olivares-Galvánin ja muiden (2009) artikkeliin on kasattu noin 50 eri tutkimuksen havaintoja ja tuloksia liittyen muuntajan häviöihin. Artikkelin kasatut tutkimukset käsittelevät muuntajan häviötä esimerkiksi laskennan, mittaamisen sekä häviöiden vähentämisen näkökulmista.

3.1 Tyhjäkäyntihäviöt

Muuntajan tyhjäkäyntihäviöt nimensä mukaisesti kuvaavat tyhjäkäyntitilanteessa ilmeneviä häviöitä. Tyhjäkäynnissä muuntajan ensiö on kytketty verkkoon, mutta toisio on jätetty avoimeksi. Hasan ja muut (2013, s. 619) kertovat artikkelissaan, että magneettisten materiaalien tehohäviöt jakautuvat hystereesi-, pyörrevirta-, ja dielektrisiin häviöihin. Artikkelissa todetaan, että suurin osuus häviöistä muodostuu hystereesi- ja pyörrevirtahäviöistä.

3.1.1 Pyörrevirtahäviöt

ABB:n (2004, s. 143) ohjeistuksessa kerrotaan, että ajan suhteen muuttuva magneettivuo indusoi virtoja, jotka kulkevat kohtisuoraan magneettivuon suuntaan nähden ja aiheuttavat häviöitä sydänlevyissä. Indusoituneet virrat aiheuttavat myös sydämen lämpenemistä. Sydämen pyörrevirtahäviöille voidaan esittää yhtälö

$$P_{0p} = k \cdot \sigma \cdot \omega^2 \cdot d^2 \cdot B_{max}^2 \cdot V, \quad (19)$$

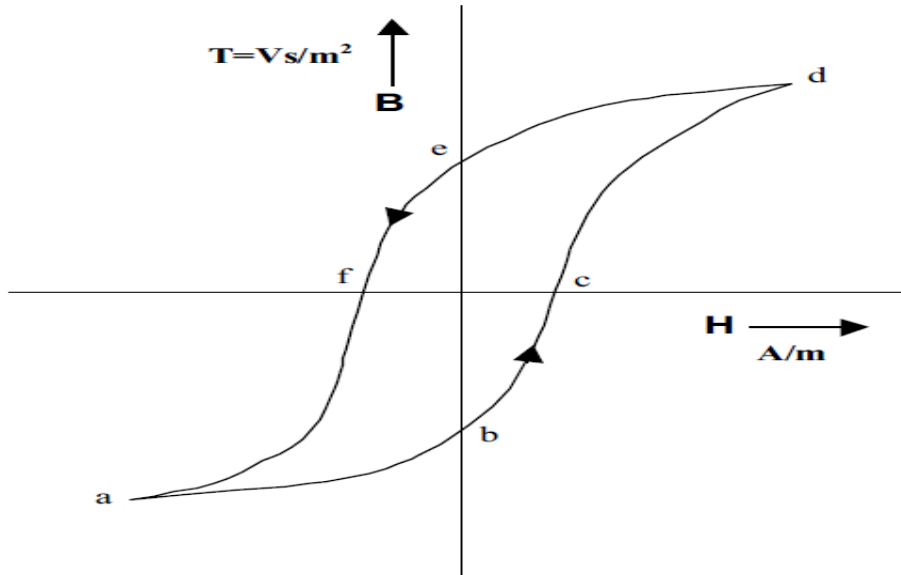
missä σ tarkoittaa sydänmateriaalin sähkönjohtavuutta, ω tarkoittaa kulmataajuutta, k on vakiokerroin, d tarkoittaa sydänlevyn paksuutta, B_{\max} tarkoittaa vuontiheyden huippuarvoa ja V tarkoittaa sydämen tilavuutta (ABB, 2004, s. 143).

Hawezy (2017, s. 1561) kertoo artikkelissaan, että sydämeen indusoituneita pyörrevirtoja voidaan pienentää lisäämällä teräkseen silikonia. Artikkelissa kerrotaan, että silikonin lisääminen kasvattaa resistiivisyyttä eli pienentää sydänlevyn sähkönjohtavuutta. Hawezy (2017, s. 1561) kuitenkin mainitsee, että teräksen työstäminen vaikeutuu huomattavasti, kun silikonin osuus ylittää yli 3 prosenttia. Artikkelissa myös todetaan, että teräksen magneettiset ominaisuudet heikkenevät, kun silikonin osuus kasvaa. Silikonin lisääminen teräksen sekaan on ollut hyvä keksintö, jolla voidaan vähentää pyörrevirtahäviöitä, mutta sen käyttämisellä on rajoituksensa.

3.1.2 Hystereesihäviöt

Ge ja muut (2022, s. 2) kertovat artikkelissaan, että hystereesihäviöitä syntyy magneettisessa materiaalissa, kun materiaaliin vaikuttaa muuttuva magneettikenttä. Artikkelissa todetaan, että magneettidipolit värähtelevät muuttuvan navan napaisuuden mukaisesti, mikä aiheuttaa kitkaa ja sen seurauksena lämpöhäviöitä.

Hystereesihäviöihin liittyen on tärkeää ymmärtää hystereesikäyrän toimintaa. Kuvassa 9 on esitetty esimerkki hystereesikäyrästä.



Kuva 9. Hystereesikäyrä (ABB, 2004, s. 142).

Kuvan 9 pisteessä a , magneettivuon tiheys ja magneettikentän voimakkuus saavat suurimmat negatiiviset arvonsa. Pisteessä b magneettikentän voimakkuus on nolla, mutta sydämessä esiintyy edelleen magneettivuo, jota kutsutaan myös remanenssivuoksi. Pisteessä c magneettivuon tiheys on nolla ja sen suunta on muuttumassa. Pisteessä d magneettivuontiheys on saavuttanut huippuarvonsa, jolloin voidaan sanoa sydämen olevan kyllästynyt kuten pisteessä a . Pisteessä e magneettikentän voimakkuus on jälleen nolla, mutta sydämeen on jäänyt remanenssivuo. Pisteessä f magneettivuontiheys on nolla ja magneettikenttä on negatiiviseen suuntaan. Kuvan 9 hystereesikäyrä esittää syötetyn vaihtojännitteen jaksonajan aikana esiintyvät magneettivuon tiheyden ja magneettikentän voimakkuuden muutokset.

Hystereesihäviöt ovat verrannollisia hystereesikäyrän pinta-alaan, koska mitä leveämpi hystereesikäyrä on, sitä vaikeammin dipolit kääntyilevät (Verkkonen 2005, s. 11). Hystereesihäviöille voidaan esittää yhtälö

$$P_{oh} = k \cdot f \cdot B_{max}^2, \quad (20)$$

missä k on kerroin, johon vaikuttaa käytetty materiaali sekä hystereesikäyrän pinta-ala (Verkkonen, 2005, s. 11). Hystereesihäviöt ovat myös verrannollisia taajuuteen sekä magneettivuon tiheyden huippuarvon toiseen potenssiin. Oikeasti potenssin arvo vaihtelee välillä 1.6–2.0 ja se on riippuvainen kyllästymisestä (Verkkonen, 2005, s. 11).

3.2 Kuormitushäviöt

Kuormitustilanteessa muuntajan käämeissä syntyy lämpöhäviöitä. Häviöt syntyvät käämin resistanssin seurauksena. Käämin resistanssin seurauksena syntyvät lämpöhäviöt voidaan laskea käämeittäin yhtälöllä

$$P_k = R \cdot I^2, \quad (21)$$

missä R on resistanssi ja I käämin virta. Verkkonen (2005, s. 37) kertoo, että tarkoissa laskuissa resistanssiksi on valittava vaihtovirtaresistanssi, koska virranahdon takia vaihtovirtaresistanssi on vähän suurempi kuin tasavirtaresistanssi.

Kuormitustilanteessa käämien resistanssin aiheuttamien häviöiden lisäksi syntyy myös pyörrevirtahäviöitä. Käämissä kulkeva vaihtovirta synnyttää ajan mukaan vaihtelevan magneettikentän sen ympärille. ABB:n (2004, s. 146) ohjeistuksessa kerrotaan, että syntynyt magneettikenttä synnyttää pyörrevirtoja käämin johtimiin ja pyörrevirtojen seurauksena syntynyt virtojen epätasainen jakautuminen johtimien poikkileikkaukseen verrattuna vielä lisää häviöitä. Käämien pyörrevirtahäviöiden rajoittamiseksi johtimen kohtisuoran mitan magneettikentän suhteen on oltava pieni. Tämä tarkoittaa, että pyörrevirtahäviöiden pienentämiseksi valitaan korkea ja ohut käämilanka.

Lisäksi sydämen ulkopuolella osittain ilmassa kulkeva hajavuo aiheuttaa lisähäviöitä. ABB:n (1998, s. 83) koulutusmateriaalissa todetaan, että hajavuo sulkeutuu sydämen, säiliön ja puristusosien kautta. Jos osat ovat magneettista materiaalia hajavuo aiheuttaa niihin myös hystereesihäviöitä. Paikallisten lisähäviöiden osalta tärkeimpiä ovat kuitenkin hajakenttien aiheuttamat pyörrevirtahäviöt (ABB, 1998, s. 83). Säiliön suojaamiseen hajakentiltä on olemassa erilaisia ratkaisuja kuten säiliöshuntit. Díaz-Chacón ja muut (2016) toteavat artikkelissaan, että magneettisia shuntteja käytetään vähentämään hajakenttien aiheuttamia lisähäviöitä sekä estämään kuumia pisteitä säiliössä. Artikkelissa kerrotaan, että magneettiset shuntit tarjoavat korkea permeabiliteettisen tien hajavuolle ja niiden ohuuden takia niihin indusoituneet pyörrevirtahäviöt jäävät lähes olemattomiksi.

4 Muuntajan sydämen kiertovirrat

Muuntajan sydämen kiertovirroilla tarkoitetaan sydämessä sekä sitä ympäröivissä suljetuissa silmukoissa kiertäviä virtoja. Hitachin (2021, s. 3) ohjeistuksessa todetaan, että sydämen kiertovirtojen syntyyn vaikuttaa kaksi alkutekijää, jotka ovat käämit sekä sisäinen johdotus. Sisäiseen johdotukseen kuuluu käämit toisiinsa yhdistävä johdotus sekä johdotukset käämikytkimelle sekä läpivienneille.

Käämien ja sisäisen johdotuksen synnyttämän muuttuvan magneettikentän lävistäessä sydämen ikkunan, indusoituu sydämen ikkunan ympärille jännitteitä (Hitachi, 2021, s. 3). Tämän seurauksena sydämessä ja sydän ikkunoita ympäröivissä muissa suljetuissa silmukoissa alkaa kiertämään virtoja.

Kiertovirtojen seurauksena voi syntyä lisähäviöitä, mutta ne eivät yleensä ole kriittisin ongelma. Suurimmat haasteet liittyvät paikallisiin kuumiin pisteisiin. Kuumia pisteitä voi esiintyä etenkin ikeiden ja pylväiden saumakohdissa sekä metalli-metalli kontaktipinnoilla. Paikalliset kuumat pisteet voivat aiheuttaa kaasutusta sekä vahingoittaa rakenteita. Muuntajan kaasutuksen tai aktiiviosan varioitumisen seurauksena olevat korjaus- tai muutostyöt voivat olla aikaa vieviä ja kalliita. Lisäksi muuntajatoimituksen viivästyminen voi johtaa sakkoihin sekä mainehaittaan. Kiertovirtojen aiheuttamien haasteiden huomioimisella on merkittävä taloudellinen vaikutus.

IEC 60076-2 (2011, s. 11) standardissa kerrotaan, että liuenneen kaasun analyysi (DGA, engl. dissolved gas analysis) voi olla keino selvittää ei toivottuja ylikuumenemisia. DGA tehdään lämpökokeen yhteydessä. IEC 60076-2 (2011, s. 41–42) ohjeistaa rajoja kaasun muodostumiselle ja pienimmille havaittaville arvoille. Eri kaasutyyppit voidaan osaltaan liittää tiettyihin materiaaleihin tai vikatyyppeihin. De Faria ja muut (2015) esittelevät ja vertailevat artikkelissaan IEC 60599 standardin ja tärkeimpien kaasujen tapaa (engl. key gas method) luokitella vikatyyppejä kaasun muodostumisen perusteella. Artikkelissa

kerrotaan, että IEC 60599 standardin tapa perustuu kaasujen suhteeseen ja tärkeimpien kaasujen tapa taas yksittäisiin avainkaasuihin.

Taulukossa 1 on esitetty IEC 60599 (2022, s. 14) standardissa oleva vikakuvauksien ja niihin liittyvien kaasujen jakautuminen. IEC 60599 standardissa (2022, s. 25) on kerrottu, että vikatapaus T2 voi johtua esimerkiksi ikeiden puristuspalkkien ja pulttien sekä puristuspalkkien ja laminoinnin välillä kulkevien kiertovirtojen seurauksena. Vikatapauksen T3 syynä voi olla suuret kiertovirrat säiliössä ja sydämessä (IEC 60599, 2022, s. 25).

Taulukko 1. Vikakuvauksien ja kaasujen yhteys (IEC 60599, 2022, s. 14).

Tapaus	Vikakuvaus	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
PD	Osittaispurkaukset (katso huomautukset 3 ja 4)	Ei merkittävä	< 0,1	< 0,2
D1	Pienienergiset purkaukset	> 1	0,1–0,5	> 1
D2	Suurienergiset purkaukset	0,6–2,5	0,1–1	> 2
T1	Lämpövika t < 300 °C	Ei merkittävä	> 1 mutta ei merkittävä	< 1
T2	Lämpövika 300 °C < t < 700 °C	< 0,1	> 1	1–4
T3	Lämpövika t > 700 °C	< 0,2 (b)	> 1	> 4

Huomautus 1: Joissakin maissa käytetään suhdetta C₂H₂/C₂H₆ sen sijaan, että käytettäisiin suhdetta CH₄/H₂. Joissakin maissa käytetään myös hieman erilaisia raja-arvoja.

Huomautus 2: Kaasusuhteiden laskemisen edellytykset on esitetty kohdassa 6.1 c).

Huomautus 3: Arvo CH₄/H₂ < 0,2 viittaa osittaispurkauksiin mittamuuntajissa. Arvo CH₄/H₂ < 0,07 viittaa osittaispurkauksiin läpivienneissä.

Huomautus 4: Osittaispurkauksia muistuttavia kaasun hajoamismalleja on raportoitu syntyneen myös öljyn satunnaisesta kaasuuntumisesta (ks. kohta 4.3).

b: Kasvava C₂H₂-kaasun määrä voi viitata siihen, että kuumen pisteen lämpötila on yli 1000 °C

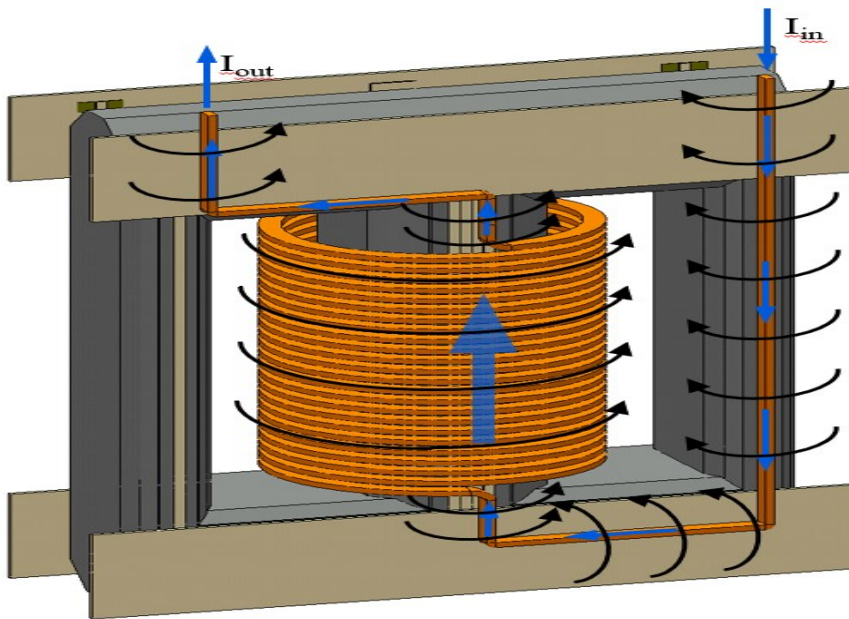
Kohdeyrityksen aikaisempien kokemusten perusteella voidaan esittää sydämen kiertovirtojen aiheuttamaan kaasutukseen liittyvä keskeinen kaasutusjärjestys sekä kaasujen suhteet. Kaasujen suhteet ovat esitetty suhteessa eteeniin. Kyseiset kaasut ja niiden suhteet on esitetty taulukossa 2. Eteeni on hallitseva kaasu, jota seuraa metaani, sitten etaani ja lopuksi asetyleeni. Taulukossa esitetty asetyleenin suhde kuvastaa kuitenkin vaikeita tapauksia. Kohdeyrityksen kokemusten perusteella on havaittu, että sama kaasutusjärjestys ja kaasujen suhde esiintyy sekä midel- että mineraaliöljyllä.

Taulukko 2. Sydämen kiertovirtoihin liittyvä kaasutusjärjestys.

Kaasu	Kaasun suhde
Eteeni C ₂ H ₄	100 %
Metaani CH ₄	40 %
Etaani C ₂ H ₆	10 %
Asetyleeni C ₂ H ₂	10 % (suhde vaikeissa tapauksissa)

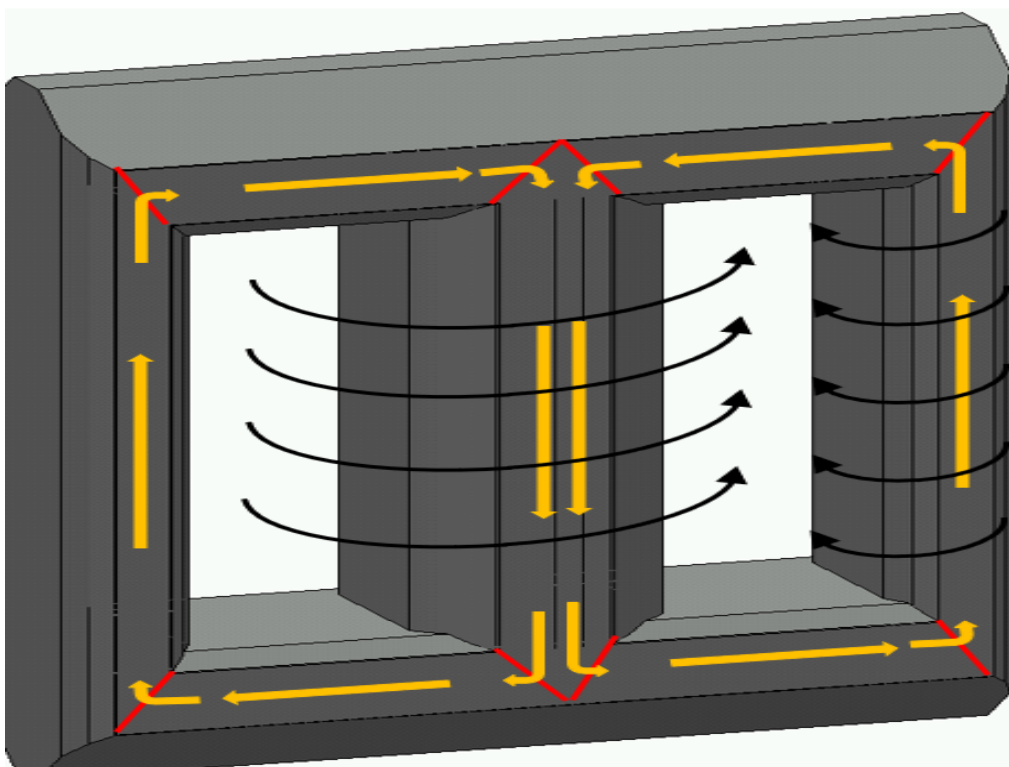
4.1 Kiertovirtojen teoreettinen esittäminen

Muuttuva magneettikenttä ei luo sähkömotorista voimaa pelkästään käämiin, vaan kaikkialle missä vaihteleva vuo lävistää johdemateriaalin (Aura & Tonteri, 2002, s. 137). Kun johtimeen tai käämiin syötetään vaihtovirtaa, synnyttää se ympärilleen ajan suhteen muuttuvan magneettikentän. Virran tai virrantiheyden yhteyttä magneettikenttään voidaan kuvata Ampéren lain mukaisesti. Faradayn laki taas määrittelee, että magneettivuontiheyden B muutos aiheuttaa ympärilleen aina sähkökentän E pyörteen. Faradayn lain avulla voidaan siis todeta, että ajasta riippuvaan magneettikenttään liittyy aina myös sähkökenttä. Kuvassa 10 on esitetty havainnollistava kuva käämin ja johdotuksen vaikutuksesta sydämen ikkunan läpäisevään magneettivuohon. Kuvassa siniset nuolet kuvaavat virran kulkua johdotuksessa ja käämissä. Oikean käden säännön mukaisesti mustat nuolet kuvaavat magneettikentän suuntaa.



Kuva 10. Sydämen ikkunan lävistävä magneettivuo (ABB, 2013, s. 3).

Kuvassa 11 on esitetty tarkempi kuva sydämessä kiertävistä virroista. Kuvassa keltaisilla nuolilla on kuvattu sydämessä kiertäviä virtoja. Sydämen ikkunat ovat suljettuja metallisia silmukoita, joten ikkunan lävistävä muuttuva magneettikenttä indusoi ikkunan ympärille jännitteitä. Jännitteet aiheuttavat kiertäviä virtoja suljetuissa silmukoissa. Sydämessä kiertävien virtojen täytyy kulkea pylväiltä ikeisiin ja toisin päin. Ikeiden ja pylväiden väliset liitokset ovat kuitenkin sähköisen liitoksen näkökulmasta huonoja ja saumakohdissa voi esiintyä virtojen seurauksena paikallisia kuumia kohtia (ABB, 2013, s. 4). Lisäksi sydämessä kiertävät virrat eivät jakaannu tasaisesti vaan keskittyvät sydämen pinnalle (ABB, 2013, s. 4). Sydämessä kiertävien virtojen lisäksi myös puristusrakenteissa kiertävät virrat voivat aiheuttaa ongelmia. Erityisesti puristusrakenteissa olevat huonot sähköiset liitokset, kuten metalli-metalli pinnat voivat aiheuttaa vaaranpaikan virran kulkiessa liitoksen kautta.



Kuva 11. Sydämessä kiertävät virrat (ABB, 2013, s. 4).

4.2 Muuntajan sydämen kiertovirtojen pienentäminen

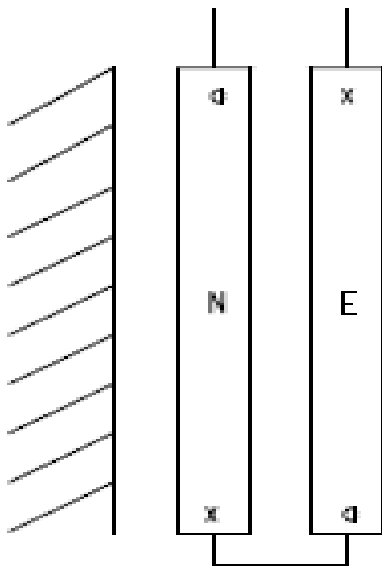
Muuntajan suunnitteluprosessi alkaa tarjousvaiheen suunnittelulla. Tarjousvaiheessa ensimmäisenä tehdään muuntajan sähkösuunnittelu, joka toteutetaan asiakkaan vaatimusten mukaisesti. Tarjousvaiheen suunnittelussa on tärkeä pyrkiä lähelle lopullista suunnitelmaa, sillä sähkösuunnittelun perusteella taataan muuntajan häviöt, oikosulkuimpedanssi ja mahdollisesti muita arvoja kuten äänitaso tai jäähdytyksen tehohäviöt. Näin ollen tarjousvaiheen sähkösuunnittelu rajoittaa loppusuunnitteluvaiheessa tehtäviä muokkaustoimenpiteitä. Kustannusnäkökulmasta loppusuunnitteluvaiheessa tehdyt isot muokkaukset johtavat usein korkeampiin kustannuksiin, mikä voi tarkoittaa rahallisia tappioita.

Onnistuneen suunnittelun kannalta on tärkeää tunnistaa tilanteet, joissa sydämen ja puristusrakenteiden kiertovirrat voivat aiheuttaa ongelmia. Ongelman tunnistamisen jälkeen on osattava toteuttaa riittävät toimenpiteet, joilla voidaan välttää liian suuret virrat sydämen ja puristusrakenteiden virtasilmuissa. Oikeiden toimenpiteiden toteuttaminen on myös tärkeää kustannusnäkökulmasta, koska tarpeettomat suojaustoimenpiteet aiheuttavat ylimääräisiä kuluja ja riittämättömät toimenpiteet voivat johtaa kalliiseen korjaus- tai muutostyöhön. Seuraavissa alaluvuissa on käsitelty suunnitteluvaiheessa keskeisiä pohdittavia asioita, mikäli sydämen kiertovirrat osoittautuvat mahdolliseksi ongelmaksi.

4.2.1 Käämisuunnittelu

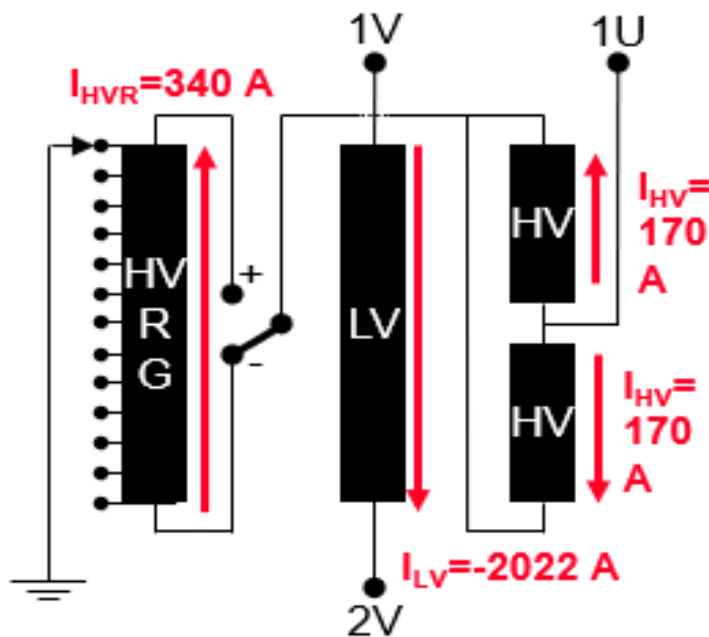
Tässä aluvussa käämisuunnittelulla tarkoitetaan sähkösuunnitteluvaiheessa tehtäviä käämityyppien valintaa koskevia suunnittelupäätöksiä. Käämin aksiaalisuuntaiset virtakomponentit ovat yksi ikkunan läpäisevään magneettivuohon liittyvä alkutekijä. Ampéren lain mukaisesti magneettikentän voimakkuus on suoraan verrannollinen virtaan.

Sydämessä ja puristusrakenteissa kiertävien virtojen kannalta oleellisimpia tarkastelukohteita ovat suurvirtaiset käämit sekä usean silmukan (engl. loop) sisältävät säätökäämit. Yksi tapa ehkäistä käämin vaikutusta kiertovirtoihin on käyttää kaksikerroksista edestakaista käämiä. Kuvassa 12 on esitetty periaatekuva kaksikerroksisesta käämistä. Kaksikerroksista käämiä käytettäessä vain käämin ulosottojohtimilla on merkittävä vaikutus kiertovirtoihin.



Kuva 12. Kaksikerroksinen alajännitekäämi.

Toinen tapa kompensoida käämien vaikutusta kiertovirtoihin on jakaa käämi kahteen aksiaaliseen osaan ja tehdä kytkentä osien keskellä. Kuvassa 13 on esitetty esimerkki käämin jakamisesta kahteen aksiaaliseen osaan. Kuvasta 13 voidaan havaita, että yläjännitekäämi (HV, engl. High Voltage) on jaettu kahteen aksiaaliseen osaan ja tarkasteltaessa summavirtaa voidaan havaita virtojen referenssisuuntien kumoavan toisensa.



Kuva 13. Periaatekuva käämin jakamisesta kahteen aksiaaliseen osaan (Hitachi, 2025, s. 24).

Säätökäämin osalta suurin silmukoiden summavirta tulee normaalissa plusmiinus säädössä miinus-asennosta. Tarkasteltaessa kuvaa 13 voidaan havaita, että miinus-asennossa yhden silmukan virta on 340 A. Kuvan 13 esimerkissä säätökäämin silmukoiden määrä on 12, jonka seurauksena säätökäämin summavirta tulee olemaan 4080 A. Kyseisessä plusmiinus säädössä säätökäämin kierrokset ovat kytkettynä niin kutsutusti vastaan, jolloin kyseinen virta on miinusmerkkinen kuten alajännitekäämissä. Kuvan 13 esimerkin summavirraksi tulee näin ollen noin -6102 A. Tässä työssä myöhemmin esitettävissä säätökäämin sisältävissä laskuesimerkeissä on pääasiassa

käsitelty miinus-asentoa, sillä se tuottaa suurimman summavirran. Mikulić ja Žarko (2026, s. 2) toteavat artikkelissaan, että muuntajan lämpenemäkoetehdään tyypillisesti ääriminuss-asennossa, jossa on isoimmat kuormitushäviöt. Artikkelissa kuitenkin kerrotaan, että hajakenttien rakenteissa aiheuttamat häviöt ovat yleisesti isoimpia ääriplus-asennossa.

4.2.2 Sisäisen johdotuksen suunnittelu

Sisäisellä johdotuksella on merkittävä vaikutus sydämen sekä puristusrakenteiden kiertovirtoihin. Merkittävin vaikutus kiertovirtoihin on pylväiden ja ikeiden rinnalla kulkevilla johto-osuuksilla. Tuotaessa kiskot tai johdot sydämen ikkunoiden keskeltä saadaan ikkunan läpäisevä magneettikenttä minimoitua. Myös johdotusten etäisyys sydämeen on merkittävä tekijä kiertovirtoihin liittyen. Kasvattaessa johdotuksen etäisyyttä sydämeen voidaan saada vähennettyä kiertovirtojen suuruutta. Johdotuksen etäisyyden kasvattaminen ei kuitenkaan ole paras tapa estää kiertovirtojen aiheuttama ongelma. Etäisyyden kasvattaminen on myös usein rajallista säiliössä olevan tilan takia. Lisäksi johtojen tai kiskojen tuominen lähelle säiliön seinämää aiheuttaa haasteita säiliön häviöiden ja lämpenemisen takia. On siis muistettava, että paras johdotusvaihtoehto kiertovirtoihin liittyen ei välttämättä ole paras vaihtoehto lisähäviöiden tai tankin lämpenemisen suhteen. Suurivirtaisten johdotusten tai kiskojen vaikutus ilmenee luvussa 6 esitetyissä laskentatuloksissa. Luvussa 6 käsitellään myös johdotuksen geometrian ja reitityksien vaikutusta tuloksiin.

4.2.3 Sydämen eristystason valinta

Yksi tärkeä vaihe suunnittelussa on sydämen oikean eristystason valinta. Sydämen eristystaso kuvaa mitä osia puristusrakenteista on kytketty yhteen tai eristetty toisistaan sekä millä tavalla ne on toteutettu. Tässä työssä ei esitetä sisäisissä ohjeistuksissa esitettyjä eristystasoihin liittyviä kytkentöjä ja rakenteita vaan käsitellään valintaan liittyviä kriteereitä sekä huomioitavia asioita.

Vakiotuotteen sydänrakenteella sydämen eristystason valintakriteereinä ovat syöksyjännitteen eristystaso sekä käämeistä aiheutuva hajavuo, mutta sen lisäksi kriteerejä on asetettu sydämen ja puristusrakenteiden kiertovirtoihin liittyen (Hitachi, 2023, s. 25). Haaste eristystason valintaan liittyy usein sydämen ja puristusrakenteiden kiertovirtoihin, koska sähkösuunnittelussa käytettävä laskentaohjelma ei laske niitä. Sähkösuunnittelijan on suositeltavaa laskea käämeistä aiheutuva summavirta eri säätöasennoissa. Summavirran ylittäessä ± 3.5 kA on suositeltavaa tehdä kiertovirtatarkastelu. Yksi ongelma kiertovirtatarkastelussa sähkösuunnittelu vaiheessa on se, että sisäisen johdotuksen suunnittelua ei ole vielä tehty. Tämän seurauksena johdotuksesta aiheutuva vaikutus sydämen kiertovirtoihin on paras mahdollinen arvio. Kiertovirtoihin liittyvissä kriittisissä projekteissa on suositeltavaa varmistuslaskea kiertovirrat, kun lopullinen johdotuksen suunnittelu on valmistunut. Hitachin (2023, s. 26) ohjeistuksessa kerrotaan, että vetotankojen virtojen ylittäessä sallitun rajan on syytä yrittää kompensoida käämien vaikutusta alaluvussa 4.2.1 esitettyjen keinojen mukaisesti tai käyttää kuparikehikkoa.

4.2.4 Kuparikehikko

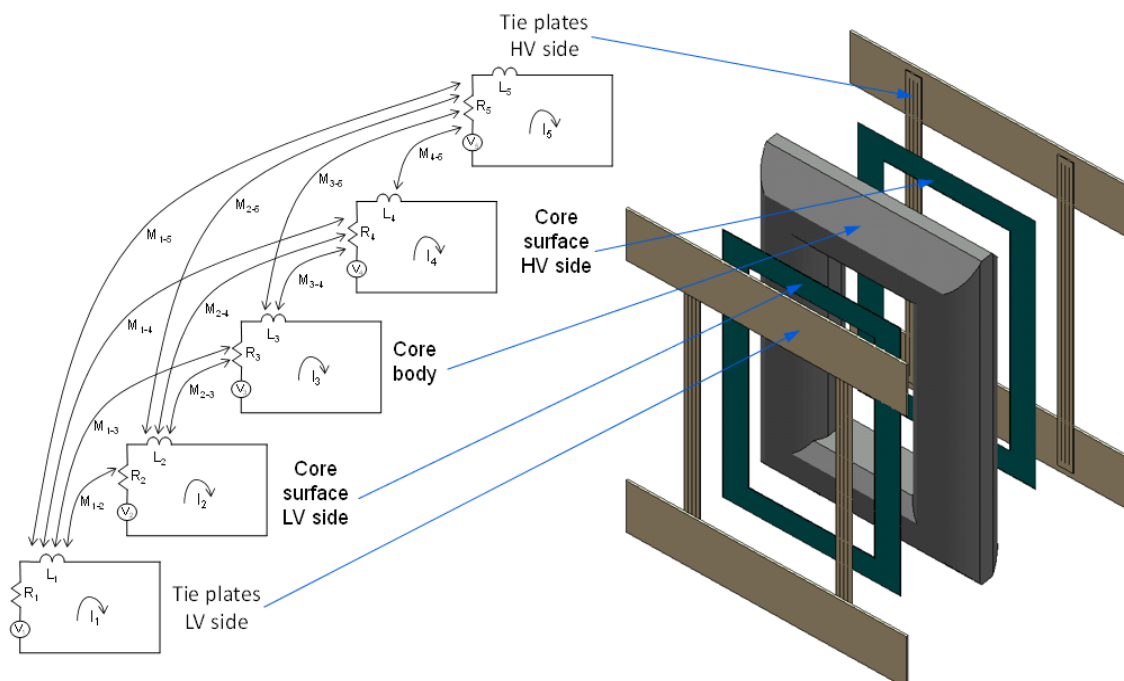
Sydämen pintaan asennettava kuparikehikko on tapa hallita kiertovirtojen aiheuttamia haasteita. Kuparikehikon tarkoituksena on tuottaa matala impedanssinen tie kiertovirroille (Hitachi, 2022, s. 15). Kuparikehikon käyttöä kannattaa miettiä, kun vetotankojen virrat ovat sallitun rajan lähellä. Vetotankojen virtojen aiheuttama ongelma poistuu, kun ne eristetään sydämen puristuspalkeista ja sen tilalle virtatieksi valitaan kuparikehikko. Kuparikehikon käytöllä pitäisi olla myös vähentävä vaikutus sydämen virtoihin, vaikka sen keskeinen tarkoitus on suojata vetotankojen muodostamia piirejä. Kuparikehikko muodostetaan ohuista kupari liuskoista. Käämeistä aiheutuva radiaalinen magneettikenttä osittain ohittaa kuparikehikon sydämen pylväillä.

5 Sydämen kiertovirrat vakiotuoterakenteella

Tässä luvussa esitetään kiertovirtalaskentaan liittyvää teoriaa. Luvussa esitetään kiertovirtalaskennan pääpiiri sekä tapa laskea käämitysten ja sisäisen johdotuksen vaikutus sydämen kiertovirtoihin.

5.1 Kiertovirtalaskennan pääpiiri vakiotuoterakenteella

Kiertovirtalaskentaa varten on kohdeyrityksessä kehitetty laskentaohjelma. Kehitetty apuohjelma on tehty vakiotuoterakennetta varten. Apuohjelma on analyttinen ja sen avulla on tarkoitus pystyä laskemaan sydämessä sekä puristusrakenteissa kiertävät virrat. Käytössä olevassa apuohjelmassa sydämen ikkunoita käsitellään sähköisesti erillisinä. Laskennan perusteena käytetään kiertovirtalaskentaan kehitettyä pääpiiriä. Kuvassa 14 on esitetty kiertovirtalaskennan pääpiiri.



Kuva 14. Kiertovirtalaskennan pääpiiri (ABB, 2013, s. 13).

Kuvasta 14 voidaan havaita, että sydämen ikkuna on jaettu viiteen erilliseen sähköiseen piiriin. Sähköiset piirit muodostuvat sydämen rungosta (engl. core body), sydämen ulkopinnoista (engl. core surface) ala- ja yläjännitepuolilla sekä vetotankojen muodostamista piireistä (engl. tie plate) molemmilla puolilla.

Hitachi (2021, s. 3) ohjeistuksessa todetaan, että käämien ja johtimien indusoimat jännitteet sydämen ikkunoiden ympärillä lasketaan yhteen ikkunakohtaisesti. Sydämen ikkunan ympärillä olevat jännitteet aiheuttavat kiertäviä virtoja kuvan 14 mukaisiin suljettuihin piireihin. Virran kulkua kyseisissä piireissä vastustaa piirien resistanssi R , itseinduktanssi L sekä piirien väliset keskinäisinduktanssit M_{x-y} . On huomioitava, että sydämen eri piirit ovat eristettyjä toisistaan pois lukien kytkeytyminen keskinäisinduktanssien kautta (Hitachi, 2021, s. 3). Lisäksi kiertovirtalaskennan laskentaohjelmassa on tehty oletus, että magneettinen kytkeytyminen keskinäisinduktanssien kautta koskee vain saman sydänikkunan sähköisiä piirejä. Kuvassa 14 esitetyille sähköisille piireille voidaan esittää yhtälöt

$$\begin{cases} U_1 = (R_1 + j\omega L_1) \cdot I_1 + j\omega M_{1-2} \cdot I_2 + j\omega M_{1-3} \cdot I_3 + j\omega M_{1-4} \cdot I_4 + j\omega M_{1-5} \cdot I_5 \\ U_2 = j\omega M_{1-2} \cdot I_1 + (R_2 + j\omega L_2) \cdot I_2 + j\omega M_{2-3} \cdot I_3 + j\omega M_{2-4} \cdot I_4 + j\omega M_{2-5} \cdot I_5 \\ U_3 = j\omega M_{1-3} \cdot I_1 + j\omega M_{2-3} \cdot I_2 + (R_3 + j\omega L_3) \cdot I_3 + j\omega M_{3-4} \cdot I_4 + j\omega M_{3-5} \cdot I_5 \\ U_4 = j\omega M_{1-4} \cdot I_1 + j\omega M_{2-4} \cdot I_2 + j\omega M_{3-4} \cdot I_3 + (R_4 + j\omega L_4) \cdot I_4 + j\omega M_{4-5} \cdot I_5 \\ U_5 = j\omega M_{1-5} \cdot I_1 + j\omega M_{2-5} \cdot I_2 + j\omega M_{3-5} \cdot I_3 + j\omega M_{4-5} \cdot I_4 + (R_5 + j\omega L_5) \cdot I_5 \end{cases}, \quad (22)$$

missä jokaisen piirin jännitteen laskenta on toteutettu erillisinä. Yhtälöissä on myös huomioitu keskinäisinduktanssit.

Yhtälöstä 22 voidaan johtaa yhtälössä 23 esitetty matriisi (Hitachi, 2021, s. 5)

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 + j\omega L_1 & j\omega M_{1-2} & j\omega M_{1-3} & j\omega M_{1-4} & j\omega M_{1-5} \\ j\omega M_{1-2} & R_2 + j\omega L_2 & j\omega M_{2-3} & j\omega M_{2-4} & j\omega M_{2-5} \\ j\omega M_{1-3} & j\omega M_{2-3} & R_3 + j\omega L_3 & j\omega M_{3-4} & j\omega M_{3-5} \\ j\omega M_{1-4} & j\omega M_{2-4} & j\omega M_{3-4} & R_4 + j\omega L_4 & j\omega M_{4-5} \\ j\omega M_{1-4} & j\omega M_{2-4} & j\omega M_{3-4} & j\omega M_{4-5} & R_5 + j\omega L_5 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

määritetty suhteellinen permeabiliteetti sydämen induktanssilaskennalle, mutta myös vetotankojen muodostamien piirien induktanssilaskennalle.

Sydämen ikkunan ja vetotankojen muodostamia piirejä voidaan laskennallisesti analysoida kahtena neliön muotoisena piirinä, jotka ovat samankeskisiä. Grover (1973, s. 68) on esittänyt kirjassaan tavan laskea samankeskisten ohuesta langasta muodostettujen neliöiden välisen keskinäisinduktanssin. Groverin (1973, s. 68) esittämä yhtälö

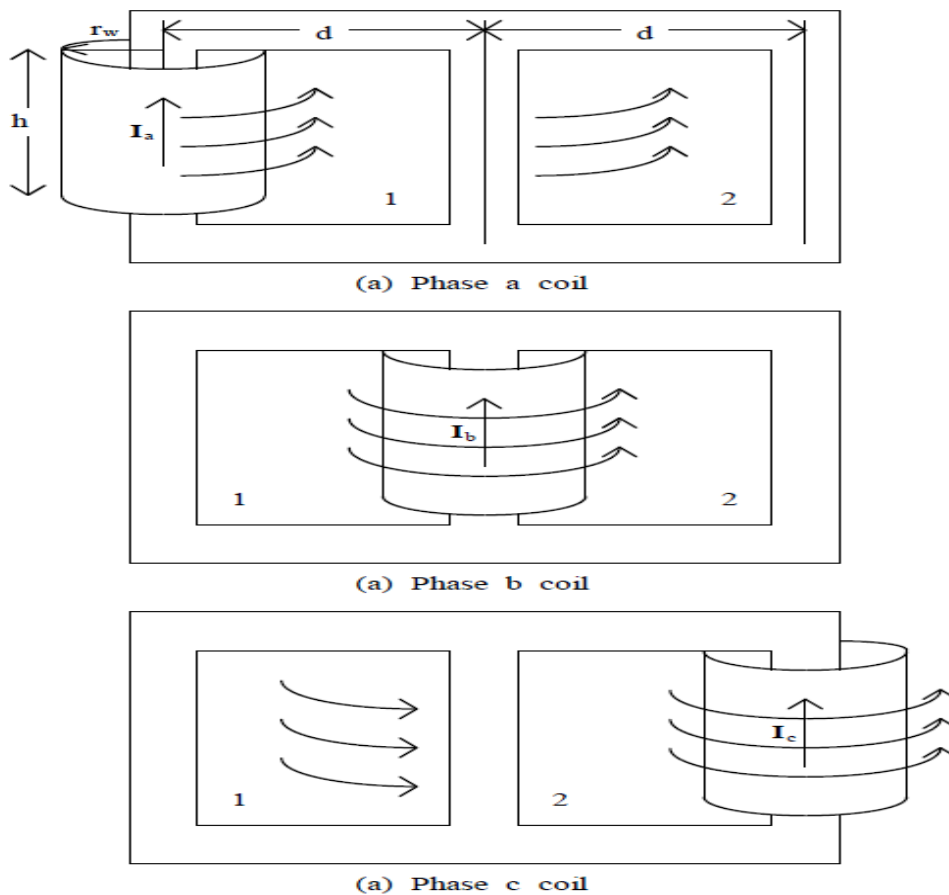
$$M = 0.008 \cdot s \cdot \left[\ln\left(\frac{s}{d}\right) - 0.7740 + \frac{d}{s} - 0.0429 \cdot \left(\frac{d}{s}\right)^2 - 0.109 \cdot \left(\frac{d}{s}\right)^4 + \dots \right] \quad (26)$$

pätee monikulmaisista langoista muodostetuille piireille, mutta sitä voidaan käyttää myös pyöreistä langoista muodostetuille piireille. Yhtälössä 26 suure s tarkoittaa neliön sivun pituutta ja d tarkoittaa niiden välistä etäisyyttä.

5.2 Käämien vaikutus kiertovirtoihin

Sydäntyyppisessä muuntajassa käämit ovat sijoitettuna pylväille. Osassa sydäntyyppisen muuntajan käämeissä virta saattaa kulkea ylhäältä alas ja osassa alhaalta ylös. Laskettaessa näiden samalla pylväällä olevien käämitysten virrat yhteen saadaan selvitettyä niin kutsuttu summavirta. Hitachin (2021, s. 6) ohjeistuksessa kerrotaan, että summavirran voidaan kuvitella kulkevan yhden sylinterin muotoisen käämin kautta, jonka säde on laskettu käämien virtojen suuruuksien mukaisella painotetulla keskiarvolla. Magneettikentän voimakkuus H voidaan selvittää Ampèren lain avulla. Laskennassa on huomioitava, että virta on vaihesuure.

Kuvassa 15 on esitetty havainnollistava kuva sylinterinmuotoisen käämin aiheuttamasta magneettikentästä, joka lävistää muuntajan sydämen ikkunat. Kuvassa 15 käämin summavirta kulkee alhaalta ylös. Kuvasta voidaan havaita, että eri vaiheiden käämien synnyttämien muuttuvien magneettikenttien suunnat pitää ottaa huomioon, kun tarkastellaan käämien vaikutusta kiertovirtoihin. Sydämen ikkunan lävistävä magneettikenttä indusoi jännitteen ikkunan ympärillä oleviin sydän- ja puristusrakenteisiin.



Kuva 15. Käämien aiheuttama magneettikenttä (Hitachi, s. 7, 2021).

Käämin aiheuttama muuttuva magneettivuoto ja muuttuvan magneettivuon indusoima jännite sydämen ikkunan ympärillä voidaan laskea (Hitachi, 2021, s. 7). Kuvan 15

mukaisesti voidaan johtaa yhtälö vaiheen a käämin aiheuttamalle magneettivuolle vasemmanpuoleisen ikkunan läpi

$$\phi_{a1} = \int B_{\varphi} \cdot dA = \frac{\mu_0 \cdot h \cdot I_a}{2\pi} \cdot \int_w^d \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0 \cdot h \cdot I_a}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{d}{r_w}\right), \quad (27)$$

missä h kuvaa painotetun keskiarvon avulla laskettua käämin korkeutta, r_w tarkoittaa painotetulla keskiarvolla laskettua käämin sädettä, d tarkoittaa etäisyyttä pylväiden keskikohtien välillä (Hitachi, 2021, s. 8). Hitachin (2021, s. 8) ohjeistuksessa kuitenkin painotetaan, että kyseessä on likimääräinen arvio, koska vuoviivat poikkeavat ideaalisesta säteittäisestä riippuvuudesta lähellä keskimmäistä pylvästä.

Vaiheen a käämin aiheuttamalle magneettivuolle oikeanpuoleisen ikkunan läpi voidaan esittää yhtälö

$$\phi_{a2} = \int B_{\varphi} \cdot dA = \frac{\mu_0 \cdot h \cdot I_a}{2\pi} \cdot \int_d^{2d} \frac{dr}{r} = \frac{\mu_0 \cdot h \cdot I_a}{2\pi} \cdot \ln(2), \quad (28)$$

mikä on integrointirajoja lukuun ottamatta sama kuin yhtälö 27. Samaa periaatetta noudattaen voidaan laskea magneettivuot vaiheiden b ja c tapauksissa. Vaiheiden b ja c magneettivoille voidaan esittää yhtälöt

$$\left\{ \begin{array}{ll} \phi_{b1} = -\frac{\mu_0 \cdot h \cdot I_b}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{d}{r_w}\right), & \phi_{b2} = \frac{\mu_0 \cdot h \cdot I_b}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{d}{r_w}\right) \\ \phi_{c1} = -\frac{\mu_0 \cdot h \cdot I_c}{2\pi} \cdot \ln(2), & \phi_{c2} = -\frac{\mu_0 \cdot h \cdot I_c}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{d}{r_w}\right) \end{array} \right. , \quad (29)$$

joissa täytyy huomioida kuvan 15 mukaiset integrointirajat sekä magneettivuon suunta ikkunan läpi. Miinusmerkki yhtälöissä selittyy vuon referenssisuunnalla.

Laskettujen magneettivoiden avulla voidaan laskea niiden indusoimat jännitteet sydämen ikkunan ympärillä. Voidaan esittää yhtälöt

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{a1} = -\frac{\mu_0 \cdot \omega \cdot h \cdot I_a}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{d}{r_w}\right), \quad V_{a2} = -\frac{\mu_0 \cdot \omega \cdot h \cdot I_a}{2\pi} \cdot \ln(2) \\ V_{b1} = \frac{\mu_0 \cdot \omega \cdot h \cdot I_b}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{d}{r_w}\right), \quad V_{b2} = -\frac{\mu_0 \cdot \omega \cdot h \cdot I_b}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{d}{r_w}\right), \\ V_{c1} = \frac{\mu_0 \cdot \omega \cdot h \cdot I_c}{2\pi} \cdot \ln(2), \quad V_{c2} = \frac{\mu_0 \cdot \omega \cdot h \cdot I_c}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{d}{r_w}\right) \end{array} \right. \quad (30)$$

joissa on huomioitu eri vaiheiden käämien indusoimat jännitteet sydämen ikkunoihin (Hitachi, 2021, s. 8).

5.3 Sisäisen johdotuksen vaikutus kiertovirtoihin

Kiertovirtalaskentaa varten muuntajan sisäinen johdotus jaetaan vaaka- ja pystysuoriin johtimiin. Vaaka- ja pystysuorien johtimien sydämen ikkunaan indusoimille jännitteille voidaan esittää yhtälö

$$U_{\text{johto}} = \mu_0 \cdot f \cdot I \cdot h \cdot \ln\frac{d}{D}, \quad (31)$$

missä I tarkoittaa johtimen virtaa, h tarkoittaa johtimen pituutta ja d ja D tarkoittavat etäisyyttä johtimesta ikkunan tilannekohtaisiin rajoihin (Hitachi, 2021, s. 9).

6 Kiertovirtalaskennan tulokset ja analyysi

Tässä luvussa tarkastellaan vakiotuoterakenteella tehtyjä projekteja ja niille laskettuja kiertovirtoja. Alaluvussa 6.1 on havainnollistettu laskentaohjelman toimintaa sisäisessä ohjeistuksessa esitettyjen esimerkkiprojektien sekä niiden mittaustulosten avulla. Alaluvuissa 6.2 ja 6.3 esitetään työhön valittujen projektien laskentatulokset sekä niiden analyysi.

Työhön valittujen projektien valintakriteereinä käytettiin yli 3 kA käämivirtaa tai yli 3.5 kA summavirtaa. Kaikissa valituissa muuntajissa sydän oli kolmipylväinen. Lähes kaikille valituille projekteille oli tehty valmis sisäisen johdotuksen suunnittelu, jonka ansioista saatiin tarkat johdotusten mitat sekä etäisyydet sydämeen nähden. On kuitenkin todettava, että saadut tulokset ovat laskennallisia eikä niitä ole vahvistettu projektikohtaisilla kiertovirtamittauksilla.

Työhön valitut projektit on jaettu kahteen ryhmään. Ensimmäisessä ryhmässä tarkastellaan muuntajia, joissa on vain yksi huomioitava käämi. Huomioitava käämi on suurivirtainen alajännitekäämi. Yksi suurivirtainen alajännitekäämi on tyypillinen piirre generaattorimuuntajille. Toisessa ryhmässä tarkastellaan projekteja, joissa on useita huomioitavia käämityksiä. Kaikki toisen ryhmän projektit ovat kolmikäämimuuntajia.

6.1 Aikaisempien projektien mitatut ja lasketut tulokset

Hitachin (2021, s. 11) sisäisessä ohjeistuksessa todetaan, että kiertovirtalaskentaan kehitetty Excel-laskentaohjelma perustuu likimääräiseen laskentaan ja tulosten ei ole tarkoitus olla erittäin tarkkoja. Saatujen tulosten on tarkoitus toimia suuntaa-antavina arvoina, joiden avulla voidaan ennustaa kiertovirtojen aiheuttamien ongelmien vakavuutta sekä virtojen jakautumista sydämässä ja puristusrakenteissa. Hitachin (2021, s. 11) ohjeistuksessa kerrotaan, että tulosten tarkkuus riippuu vahvasti syötettyjen

tietojen tarkkuudesta. Tuloksiin vaikuttaa erityisesti kaapeleiden ja kiskotusten geometria.

Tässä alaluvussa esitetään Hitachin (2021) sisäisessä ohjeistuksessa esitettyjen projektien mittaustuloksia. Mitattujen projektien osalta mittaustuloksia verrataan kyseisen projektin laskennallisiin tuloksiin. Lisäksi oma osaaminen ja laskentaohjelman toiminta varmistetaan suorittamalla yhden mitatun projektin kiertovirtalaskenta itse alusta lähtien.

Taulukossa 3 on esitetty laskennalliset sekä mitatut tulokset 140 MVA tehoiselle kolmivaiheiselle generaattorimuuntajalle. Muuntajan sydämen tyyppi on T-sydän. T-sydän tarkoittaa, että muuntajan sydän on kolmipylväinen. Laskennassa huomioitavan alajännitekäämin virta on noin 3.5 kA. Huomioitavan käämin kytkentä on d1.

Taulukko 3. Mittaustulokset: 140 MVA kolmivaihemuuntaja (Hitachi, 2021, s. 24) ja (ABB, 2002, s. 31).

Projektin tiedot	Lasketut tulokset [A]	Mittaustulokset [A]
140 MVA, 3-vaihe, T-sydän Huomioitava käämi: AJ 3482 A (d1)	(Vetotankojen virrat) (pylväs: 1/2/3) 469 / 625 / 701 (AJ) 154 / 134 / 200 (YJ)	(Vetotankojen virrat) (pylväs1/2/3) 484 / 683 / 679 (AJ) 214 / 209 / 281 (YJ)

Muuntajan kiertovirtamittauksessa on mitattu vetotankojen virrat eri pylväillä. Taulukosta 3 voidaan havaita, että laskennalliset tulokset ovat suhteellisen lähellä mitattuja tuloksia. Alajännitepuolella reunimmaisten pylväiden laskennalliset ja mitatut virrat ovat erittäin lähellä toisiaan. Alajännitepuolen keskimmaisella pylväällä esiintyy noin 60 A ero. Yläjännitepuolella laskennalliset ja mitatut tulokset ovat myös suhteellisen lähellä toisiaan. Kaikki mitatut tulokset yläjännitepuolella kuitenkin ylittävät laskennalliset arvot. Suurin ero yläjännitepuolella on pylväällä 3, jossa mitattu tulos on noin 80 A suurempi kuin laskennallinen arvo.

Taulukossa 4 on esitetty mittaustulokset yksivaihemuuntajalle, jonka nimellisteho on 448 MVA. Muuntajan sydän on DY-tyyppinen. DY-sydämessä on neljä pylvästä, joista vain kahdelle keskimmaiselle on asennettu käämit. Taulukossa 4 esitetyn muuntajan kiertovirtalaskennassa on huomioitu tertiäärikäämi, jonka virta on noin 6 kA. Eri pylväiden vetotangot oli yhdistetty kuparikaapeilla toisiinsa. Vetotankojen virrat mitattiin pylväiden välisistä kaapeista. Taulukon 4 tuloksista voidaan havaita, että laskennalliset tulokset vastasivat suhteellisen hyvin mitattuja arvoja.

Taulukko 4. Mittaustulokset: 448 MVA yksivaihemuuntaja (Hitachi, 2021, s. 25–26).

Projektin tiedot	Lasketut tulokset [A]	Mittaustulokset [A]
448 MVA, 1-vaihe, DY-sydän Huomioitava käämi: AJ (tertiäärikäämi) 5939 A	(Vetotankojen virrat) (pylväs: 1-2, 2-3, 3-4) 140 / 1162 / 267 (AJ) 27 / 310 / 12 (YJ)	(Vetotankojen virrat) (pylväs: 1-2, 2-3, 3-4) 186 / 1225 / 199 (AJ) 21 / 351 / 60 (YJ)

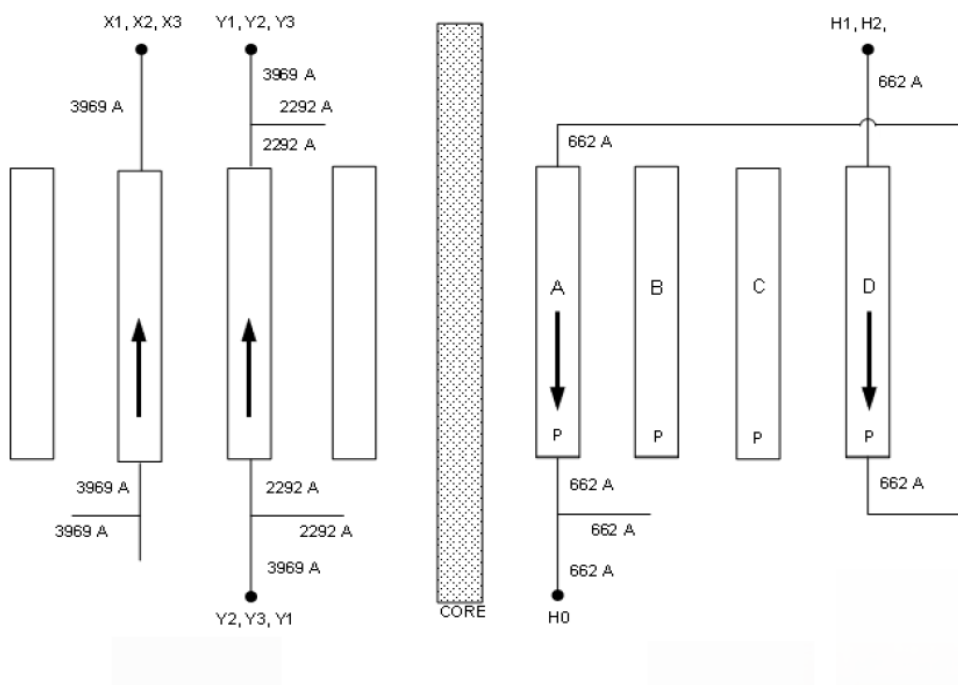
Taulukossa 5 on esitetty mittaustulokset yksivaihemuuntajalle, jonka nimellisteho on 172 MVA. Muuntajan sydän on DY-tyyppinen. Muuntajan vetotangot olivat eristettyjä sydämen puristuspalkeista ja yläjännitepuolella oli käytössä kuparikehikko.

Taulukko 5. Mittaustulokset: 172 MVA yksivaihemuuntaja (Hitachi, 2021, s. 26).

Projektin tiedot	Lasketut tulokset [A]	Mittaustulokset [A]
172 MVA, 1-vaihe, DY-sydän Huomioitava käämi: YJ-säätökäämi 10 400 A Kuparikehikko YJ-puolella	(kuparikehikon virta oikean puoleisella sivupylväällä) 1954 (YJ)	(kuparikehikon virta oikeanpuoleisella sivupylväällä) 1766 (YJ)

Kuparikehikon virta mitattiin oikeanpuoleiselta sivupylväältä. Laskettu tulos oli noin 200 A suurempi kuin mitattu tulos.

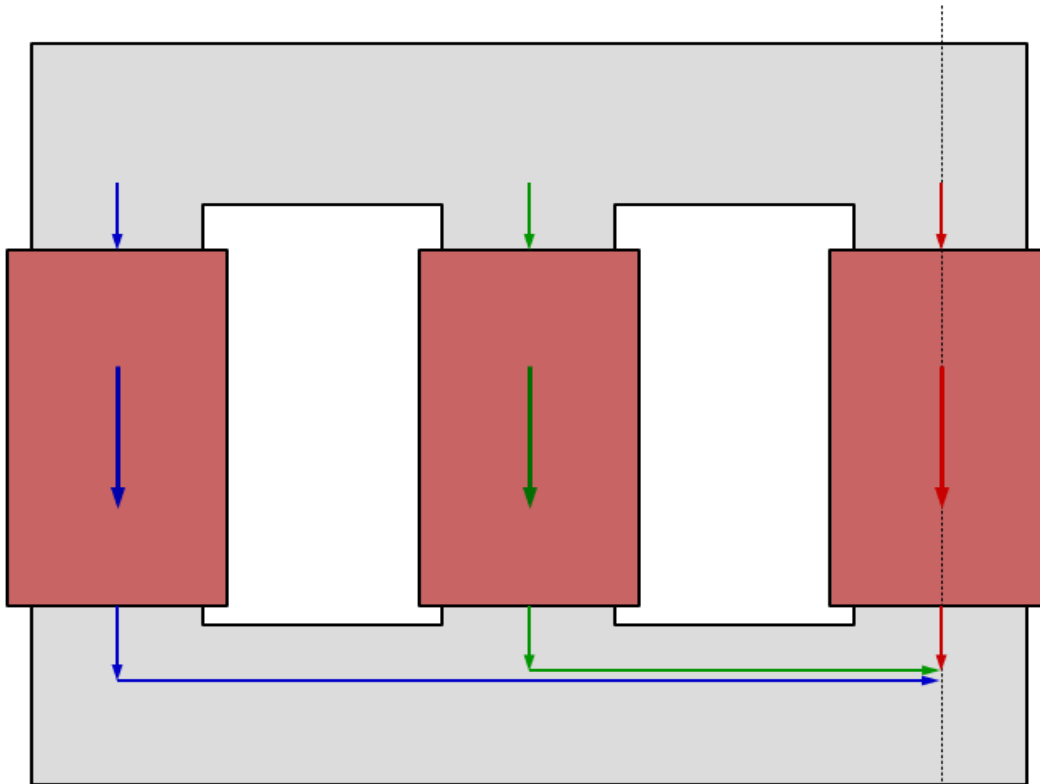
Tarkastellaan seuraavaksi 250 MVA tehoista kolmikäämimuuntajaa, jolle on suoritettu kiertovirtamittaus. Kuvassa 16 on esitetty mitatun kolmikäämimuuntajan käämijärjestys, käämien virrat sekä virtojen referenssisuunnat. Kuvassa oikealla puolella on esitetty tähtikytketyn yläjännitekäämin virrat ja referenssisuunnat. Kyseisessä muuntajassa yläjännitekäämi on jaettu kahteen kerrokseen ja eri kerroksien virtojen referenssisuunnat ovat samaan suuntaan. Muuntajan kaikilla käämeillä on sama kiertosuunta.



Kuva 16. Mitatun kolmikäämimuuntajan käämijärjestys (Hitachi, 2021, s. 27).

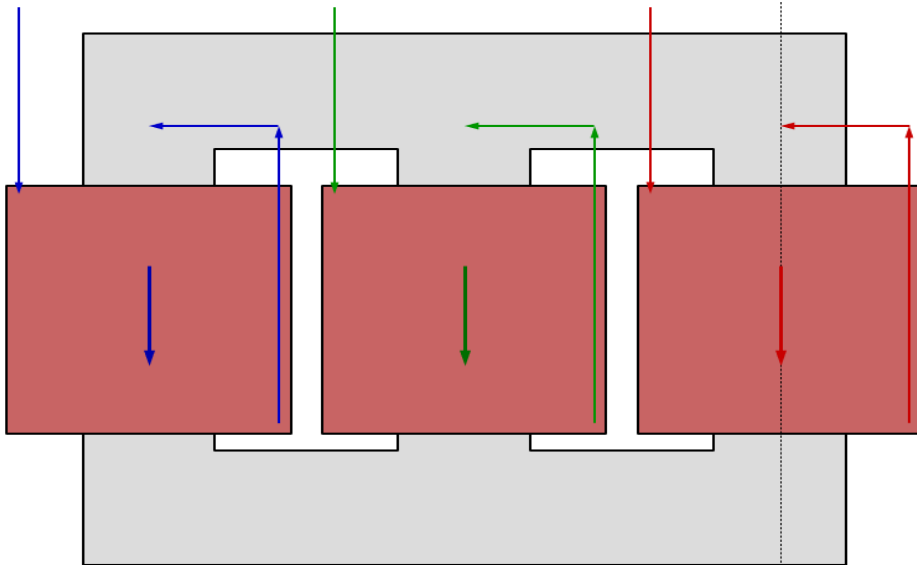
Kuvassa 16 vasemmalla on esitetty alajännitekäämien virrat ja referenssisuunnat. Toiseksi lähimpänä sydäntä on kolmiokytketty alajännitekäämi, jonka käämivirta on 2292 A. Toiseksi uloimpana kääminä on tähtikytketty alajännitekäämi, jonka käämivirta on 3969 A.

Hitachin (2021) sisäisessä ohjeistuksessa on esitetty laskentaohjelmaan vaaditut lähtötiedot sekä sisäisen johdotuksen geometria. Esitettyjen lähtötietojen perusteella on toteutettu kiertovirtalaskenta myös itse alusta alkaen. Muuntajan lähtötiedot ovat kuitenkin osittain puutteellisia johdotuksen ja sydämen väliseen etäisyyteen liittyen. Annetuissa lähtötiedoissa on kuitenkin esitetty sydämen ja käämien mitat sekä 3D-piirros. Näiden perusteella sydämen ja johdotuksen välisen etäisyyden voi arvioida. Kuvassa 17 on esitetty yläjännitekäämin sisemmän kerroksen kytkentä. Kytkenä on rakennettu vastaamaan sisäisessä ohjeistuksessa esitettyä kytkentäkuvaa.



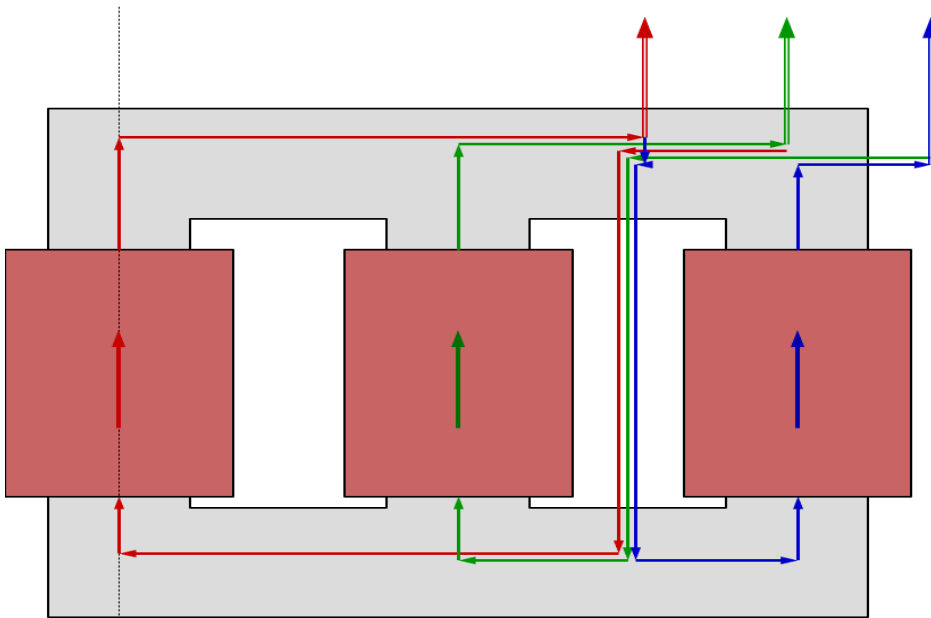
Kuva 17. Yläjännitekäämin sisemmän kerroksen kytkentä.

Kuvassa 18 on esitetty yläjännitekäämin uloimman kerroksen kytkentä.



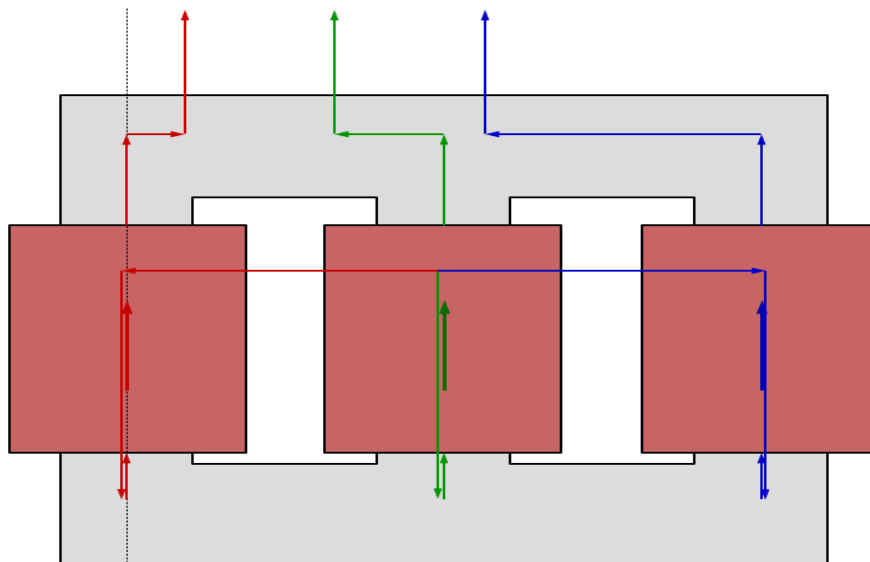
Kuva 18. Yläjännitekäämin uloimman kerroksen kytkentä.

Kuvassa 19 on esitetty kolmiokytketyn alajännitekäämin kytkentä.



Kuva 19. Kolmiokytketyn alajännitekäämin kytkentä.

Kuvassa 20 on esitetty tähtikytketyn alajännitekäämin kytkentä.



Kuva 20. Tähtikytketyn alajännitekäämin kytkentä

Taulukossa 6 on esitetty kolmikäämimuuntajan käämikohtaiset itse lasketut tulokset.

Taulukon 6 käämikohtaisten tuloksien perusteella voidaan laskea yhdistetyt tulokset.

Taulukko 6. Itse lasketut käämikohtaiset tulokset.

Projekti	Excel (käämit) (itse tehty)			Excel (käämit+johdotus) (itse tehty)		
	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)
YJ-käämi sisäkerros 662 A	15 / 13 / 15 (AJ) 22 / 27 / 22 (YJ)	21 / 21	186 / 186 (AJ) 320 / 320 (YJ)	23 / 20 / 23 (AJ) 88 / 114 / 88 (YJ)	33 / 33	315 / 316 (AJ) 1262 / 1261 (YJ)
YJ-käämi ulkokerros 662 A	11 / 5 / 11 (AJ) 15 / 14 / 15 (YJ)	12 / 12	151 / 151 (AJ) 222 / 222 (AJ)	5 / 12 / 12 (AJ) 22 / 39 / 23 (YJ)	7 / 9	71 / 179 (AJ) 293 / 300 (YJ)
Alajännitekäämi kolmiokytketty 2292 A	68 / 76 / 68 (AJ) 47 / 34 / 47 (YJ)	59 / 59	990 / 990 (AJ) 607 / 607 (YJ)	418 / 506 / 321 (AJ) 95 / 83 / 80 (YJ)	127 / 103	6049 / 4677 (AJ) 1417 / 1184 (YJ)
Alajännitekäämi tähtikytketty 3969 A	109 / 117 / 109 (AJ) 77 / 50 / 77 (YJ)	91 / 91	1601 / 1601 (AJ) 1013 / 1013 (YJ)	39 / 165 / 130 (AJ) 47 / 51 / 70 (YJ)	15 / 61	613 / 1846 (AJ) 776 / 1150 (YJ)

Taulukon 6 sarakkeissa on esitetty vetotankoryhmän virta I_{TP} , sydämen ikeissä kulkeva virta I_{C-Y} sekä sydämen pinnan virrantiheys $J_{sydän}$. Vetotankoryhmien virrat on esitetty jokaiselle pylväälle ja ikeiden virrat sekä sydämen pinnan virrantiheydet on esitetty molemmille ikkunoille. Vetotankojen ja sydämen pinnan virrantiheyksien virtatulokset on annettu sekä ylä- että alajännitepuolella. Sarakkeissa esitettyjen suureiden tarkempi kuvaus ja merkitys on avattu alaluvussa 6.2.

Kaikkien käämien tulokset yhdistettiin laskentaohjelman toiminnallisuutta hyväksi käyttäen. Saadut yhdistetyt tulokset on taulukossa 7. Taulukossa 7 on esitetty myös Hitachin (2021, s. 33) sisäisessä ohjeistuksessa esitetyt yhdistetyt tulokset.

Taulukko 7. Kolmikäämimuuntajan laskennalliset tulokset.

Excel (yhdistetyt tulokset) Itse lasketut tulokset			Excel (yhdistetyt tulokset) Sisäisessä ohjeistuksessa esitetyt tulokset		
I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)
386 / 525 / 405 (AJ) 74 / 28 / 46 (YJ)	102 / 123	5223 / 5825 (AJ) 1199 / 881 (YJ)	424 / 589 / 428 (AJ) 93 / 56 / 51 (YJ)	117 / 140	7054 / 7417 (AJ) 1493 / 774 (YJ)

Taulukosta 7 voidaan havaita, että sisäisessä ohjeistuksessa esitetyt yhdistetyt laskennalliset tulokset ovat suurempia, mitä on saatu itse laskemalla. Tuloksia tutkiessa voidaan kuitenkin todeta, että saadut arvot ovat suhteellisen lähellä toisiaan ja tulosten jakautuminen sekä käyttäytyminen on samanlaista. Koska tulosten jakautuminen on samanlaista, todennäköinen syy tulosten eroihin on hieman väärin arvioidut johdotuksen etäisyydet sydämeen itse suoritettussa laskennassa.

Taulukossa 8 on esitetty kolmikäämimuuntajan lasketut ja mitatut tulokset. Kolmikäämimuuntajasta oli mitattu vain alajännitepuolen sivupylväiden vetotankojen virrat. Mittaustulokset on esitetty Hitachin (2021, s. 33) sisäisessä ohjeistuksessa. Taulukosta 8 voidaan havaita, että mitatut tulokset vastaavat lähes täysin sisäisessä ohjeistuksessa esitettyjä laskennallisia arvoja. Mitatut tulokset ovat myös suhteellisen lähellä itse laskettuja arvoja.

Taulukko 8. Kolmikäämimuuntajan lasketut ja mitatut tulokset.

Lasketut tulokset [A] (itse tehty)	Lasketut tulokset [A] (sisäinen ohjeistus)	Mitattaustulokset [A]
(Vetotankojen virrat, pylväs: 1/2/3) 386 / 525 / 405 (AJ)	(Vetotankojen virrat, pylväs: 1/2/3) 424 / 589 / 428 (AJ)	(Vetotankojen virrat, pylväs: 1/2/3) 425 / - / 422 (AJ)

6.2 Ryhmän 1 tulokset ja analyysi

Ryhmän 1 projektien tiedot on esitetty taulukossa 9. Ryhmään 1 on valittu kuusi eri projektia.

Taulukko 9. Ryhmän 1 projektit.

Projekti	Kytkentäryhmä, sydämen eristystaso ja vetotankojen määrä	Nimellisarvot	Huomioidut käämit
1.	YNd11 2A 2 vetotankoa/pylväs/puoli	140 MVA (1) 118($\pm 9 \times 1.67\%$) / (2) 10.5 kV	(2) 4444 A (vain johtimet)
2.	YNd11 2A, kuparikehikko 2 vetotankoa/pylväs/puoli	150 MVA (1) 147 / (2) 10.5 kV	(2) 4762 A
3.	YNd11 2A, kuparikehikko 2 vetotankoa/pylväs/puoli	150 MVA (1) 118($\pm 1 \times 5\%$) / (2) 10.5 kV	(2) 4762 A
4.	YNd11 2A 1 vetotankoa/pylväs/puoli	175 MVA (1) 118 / (2) 15.75 kV	(2) 3704 A
5.	YNd11 2A, kuparikehikko 2 vetotankoa/pylväs/puoli	200 MVA (1) 118($\pm 2 \times 2.5\%$) / (2) 10.5 kV	(2) 6349 A
6.	YNd1 2A, kuparikehikko 2 vetotankoa/pylväs/puoli	215 MVA (1) 154($\pm 2 \times 2.5\%$) / (2) 15.75 kV	(2) 4550 A

Taulukon 9 ensimmäisessä sarakkeessa on esitetty projektinumero. Toisessa sarakkeessa on esitetty projektin kytkentäryhmä, käytetty sydämen eristystaso sekä vetotankojen määrä pylvästä kohden. Alalukujen 6.2 ja 6.3 analyysissä käytetään termiä vetotankoryhmän virta, kun tarkoitetaan tietyn pylvään vetotankojen kokonaisvirtaa joko ala- tai yläjännitepuolella. Toisessa sarakkeessa on myös mainittu, jos on käytetty kuparikehikkoa. Kolmannessa sarakkeessa on esitetty muuntajan nimellisarvot.

Neljännessä sarakkeessa on esitetty, mitkä käämit ovat huomioitu kiertovirtalaskennassa sekä niiden virrat.

6.2.1 Projektien 1–6 tulokset

Taulukoissa 10 ja 11 on esitetty kiertovirtalaskennan tulokset ensimmäisen ryhmän muuntajille. Taulukoiden ensimmäisessä sarakkeessa on esitetty projektin numero sekä mistä tapauksesta on kysymys. Käytännössä yksi projekti on jaettu kolmeen riviin. Ensimmäinen rivi esittää 3D mallin mukaisella johdotusgeometrialla laskettuja tuloksia. Toinen rivi esittää laskentatyökalun valmiilla johdotusgeometrialla laskettuja tuloksia. Valmiissa johdotusgeometriassa kytkennän geometria on sama kuin oikeasti käytetty, mutta kytkentämalli on luotu muutaman etäisyys ja pituus parametrin avulla. Kolmas rivi kuvaa parhaan mahdollisen johdotusgeometrian antamia tuloksia. Parhaan johdotusgeometrian testaamiseen on käytetty laskentatyökalun valmiita johdotusgeometrioita.

Pääotsikkorivin ”Excel (käämit)” alla olevissa sarakkeissa on esitetty vain käämien aiheuttama vaikutus kiertovirtoihin. Sarakkeissa kuvataan vetotankoryhmässä kulkeva virta I_{TP} , sydämen ikeissä kulkeva virta I_{C-Y} sekä sydämen pinnan virrantiheys $J_{\text{sydän}}$. Vetotankoryhmien virrat jokaiselle pylväälle on esitetty erikseen ylä- sekä alajännitepuolella. Ikeiden virrat ja sydämen pinnan virrantiheys on esitetty molemmille sydämen ikkunoille. Sydämen pinnan virrantiheys kuvaa ikeen pinnalla esiintyvää virrantiheyttä. Myös virrantiheys on esitetty ylä- sekä alajännitepuolella. Ikkuna 1 kuvaa vasenta ikkunaa ja ikkuna 2 oikeaa ikkunaa referenssipuolelta katsottuna.

Pääotsikkorivin ”Excel (käämit+johdotus)” alla olevissa sarakkeissa on huomioitu sekä käämien että suurivirtaisten kiskotusten aiheuttamat vaikutukset. Näin ollen voidaan havainnoida myös johdotuksesta aiheutuvaa vaikutusta. Sarakkeissa olevat tulokset on esitetty samalla periaatteella kuin vain käämien osuuden huomioivissa sarakkeissa.

Taulukossa 10 on esitetty projektien 1–3 tulokset. Projektissa 1 on käytetty kaksikerroksista alajännitekäämiä, jolloin vain johdotuksen osuus on huomioitu. Laskentaohjelmassa ei ole ohjelmituna valmiita johdotusgeometrioita kaksikerroksiselle käämille, joten rivit ”valmis kytkentä” ja ”paras kytkentä” ovat tyhjiä.

Taulukko 10. Tulokset ryhmän 1 projekteille 1–3.

Projekti	Excel (käämit)			Excel (käämit+johdotus)		
	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)
1. Itsetehty kytkentä (4444 A)	-	-	-	415 / 432 / 430 (AJ) 69 / 66 / 63 (YJ)	77 / 76	5644 / 5816 (AJ) 1127 / 1044 (YJ)
1. Valmis kytkentä	-	-	-	-	-	-
1. Paras kytkentä	-	-	-	-	-	-
2. Itsetehty kytkentä (4762 A)	154 / 168 / 154 (AJ) 111 / 76 / 111 (YJ)	115 / 115	1790 / 1790 (AJ) 1070 / 1070 (YJ)	495 / 982 / 1023 (AJ) 142 / 130 / 228 (YJ)	111 / 201	5174 / 11 008 (AJ) 1516 / 2505 (YJ)
2. Valmis kytkentä				399 / 1048 / 1064 (AJ) 135 / 141 / 233 (YJ)	81 / 197	3790 / 11 768 (AJ) 1506 / 2631 (YJ)
2. Paras kytkentä (konfiguraatio 2)				386 / 784 / 399 (AJ) 80 / 117 / 47 (YJ)	89 / 68	4200 / 4456 (AJ) 800 / 534 (YJ)
3. Itsetehty kytkentä (4762 A)	173 / 182 / 173 (AJ) 128 / 85 / 128 (YJ)	126 / 126	2216 / 2216 (AJ) 1415 / 1415 (YJ)	707 / 899 / 682 (AJ) 181 / 152 / 200 (YJ)	166 / 157	8739 / 8415 (AJ) 2188 / 2433 (YJ)
3. Valmis kytkentä				660 / 1023 / 713 (AJ) 167 / 151 / 194 (YJ)	144 / 155	7739 / 8527 (AJ) 2063 / 2385 (YJ)
3. Paras kytkentä (konfiguraatio 2)				348 / 712 / 365 (AJ) 99 / 124 / 50 (YJ)	96 / 71	4084 / 4445 (AJ) 1172 / 597 (YJ)

Taulukossa 11 on esitetty projektien 4–6 tulokset. Projektissa 6 käytetylle johdotusgeometrialle ei ollut vastaavaa valmista geometriaa.

Taulukko 11. Tulokset ryhmän 1 projekteille 4–6.

Projekti	Excel (käämit)			Excel (käämit+johdotus)		
	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)
4. Itsetehty kytkenä (3704 A)	133 / 127 / 133 (AJ) 107 / 62 / 107 (YJ)	94 / 94	2011 / 2011 (AJ) 1365 / 1365 (YJ)	496 / 564 / 397 (AJ) 143 / 97 / 150 (YJ)	129 / 113	7000 / 5626 (AJ) 1923 / 2010 (YJ)
4. Valmis kytkenä				433 / 669 / 439 (AJ) 126 / 108 / 152 (YJ)		6092 / 6275 (AJ) 1719 / 2056 (YJ)
4. Paras kytkenä (konfiguraatio 2)				198 / 388 / 239 (AJ) 75 / 85 / 28 (YJ)		2784 / 3428 (AJ) 995 / 385 (YJ)
5. Itsetehty kytkenä (6349 A)	240 / 269 / 240 (AJ) 171 / 123 / 171 (YJ)	181 / 181	2774 / 2774 (AJ) 1638 / 1638 (YJ)	1020 / 1432 / 1038 (AJ) 233 / 235 / 279 (YJ)	249 / 270	11 376 / 11 855 (AJ) 2387 / 3014 (YJ)
5. Valmis kytkenä				889 / 1362 / 957 (AJ) 223 / 211 / 258 (YJ)		9816 / 10 772 (AJ) 2436 / 2824 (YJ)
5. Paras kytkenä (konfiguraatio 2)				479 / 972 / 493 (AJ) 122 / 165 / 65 (YJ)		5311 / 5655 (AJ) 1202 / 627 (YJ)
6. Itsetehty kytkenä (4550 A)	166 / 183 / 166 (AJ) 119 / 82 / 119 (YJ)	127 / 127	1965 / 1965 (AJ) 1172 / 1172 (YJ)	1003 / 929 / 471 (AJ) 233 / 137 / 148 (YJ)	216 / 121	11 595 / 5331 (AJ) 2601 / 1647 (YJ)
6. Valmis kytkenä				-		-
6. Paras kytkenä (konfiguraatio 8)				387 / 752 / 369 (AJ) 54 / 127 / 100 (YJ)		4450 / 4087 (AJ) 553 / 1089 (YJ)

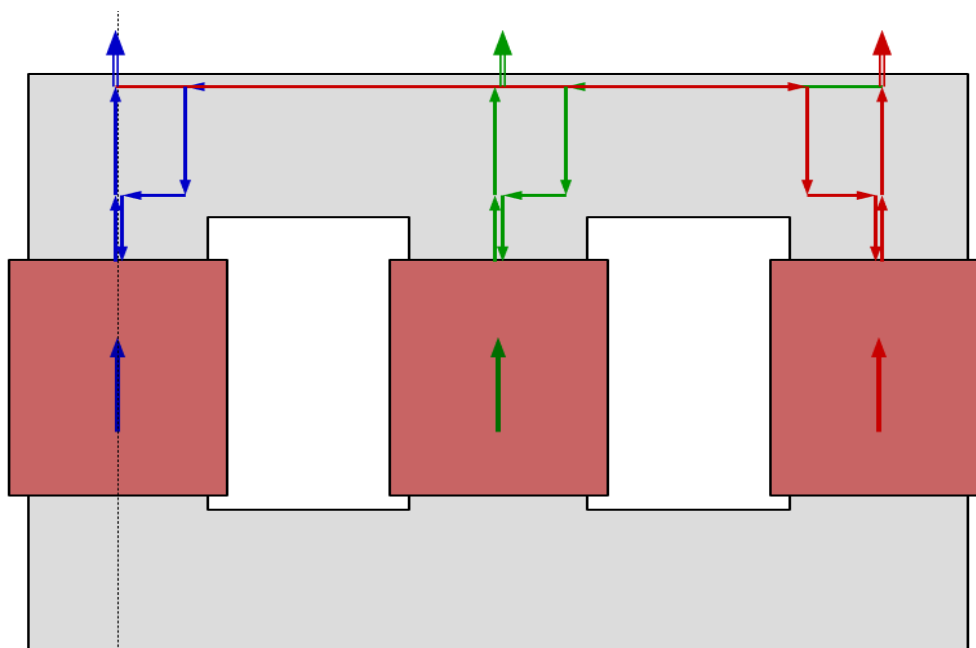
Tarkasteltaessa taulukoissa 10 ja 11 esitettyjä tuloksia voidaan havaita, että alajännitekäämin virralla on merkittävä vaikutus saatujen tulosten suuruuteen. Lisäksi vertailemalla pelkkien käämien aiheuttamia virtoja käämien sekä johdotuksen yhdistettyihin tuloksiin, voidaan havaita, että suurivirtaisilla johdotuksilla on merkittävä vaikutus saatuihin kokonaistuloksiin. Taulukoista voidaan myös havaita, että itsetehdyn kytkennän ja valmiin kytkennän tulokset ovat suhteellisen lähellä toisiaan. Itse tehdyn kytkennän ja Excelin valmiin kytkennän tulosten erot johtuvat mahdollisesti hieman erilaisesta kiskotusten tai johdotusten reitityksestä sekä Excel-laskentaohjelman tavasta laskea lyhyemmät etäisyydet sydämen keskitasoon ensimmäisille ulosottojohtimille.

Kaikilla muuntajilla vaihejärjestys alajännitepuolelta katsoen oli c-b-a. Projekti 1 oli hieman poikkeava muihin projekteihin verrattuna. Projektissa 1 alajännitekäämi oli

kaksikerroksinen edestakainen ruuvikäämi. Tämän seurauksena molemmat ulosotot tulivat käämin yläpäätyyn. Käämin osuus projektissa 1 on kompensoitu, jolloin ainoastaan johdotuksen osuus on huomioitu.

Projektissa 2 vaiheiden c ja a pitkät pystysuorat osuudet tuotiin keskeltä ikkunaa 1 ja vaiheen b pitkä pystysuora osuus keskeltä ikkunaa 2. Analysoitavilla projekteilla 3–5 oli samanlainen johdotusgeometria lukuun ottamatta johto-osuuksien pituuksia ja etäisyyksiä. Projekteilla 3–5 kaikkien kolmen vaiheen pitkät pystysuorat johto-osuudet tuotiin vaiheiden c ja b välistä keskeltä ikkunaa 1. Projekti 6 oli ainoa, jossa kytkentä ryhmä oli YNd1. Projektin 6 osalta vaihe b tuotiin ikkunan 1 keskeltä ja vaiheet c ja a keskeltä ikkunaa 2.

Kuvassa 21 on esitetty projektin 1 alajännitekytkentä. Kaksikerroksisen käämin takia kiertovirtalaskennassa huomioitiin vain johdotuksen osuus.

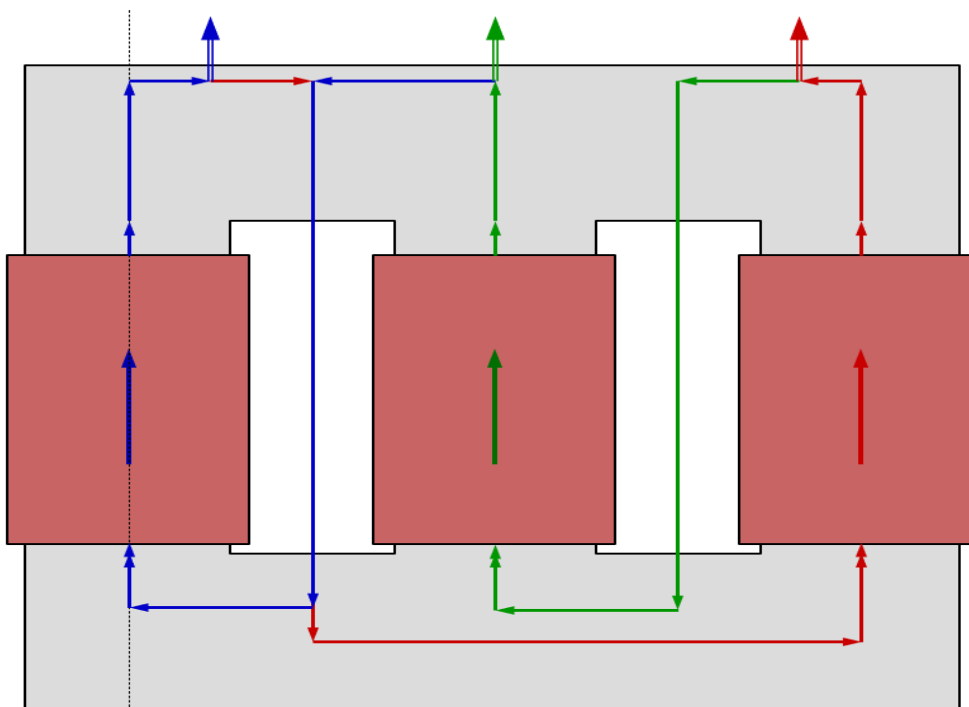


Kuva 21. Projektin 1 alajännitekytkentä.

Projektin 1 tuloksia tarkasteltaessa keskitytään alajännitepuolen tuloksiin. Tarkastellaan ensin vetotankojen virtoja. Alajännitepuolella vetotankoryhmien laskettu virta oli noin

430 A pylvästä kohden. Vetotankojen kokonaisvirta pylväillä ei vaikuta kriittiseltä, sillä jokaisella pylväällä on kaksi vetotankoa kummallakin puolella sydäntä. Ikeiden virrat ovat selvästi alle sallitun rajan ja ne ovat jakautuneet tasaisesti molempien ikkunoiden välillä. Sydämen pinnan virrantiheydet ovat merkittäviä alajännitepuolella, mutta selvästi alle ohjeistetun rajan. Projektin 1 tulokset ovat merkittävästi pienempiä verrattuna muihin projekteihin, joissa alajännitekäämi on yksikerroksinen ja myös käämin osuus tulee huomioida. Projektissa 1 olisi todennäköisesti pitänyt käyttää kuparikehikkoa, jos alajännitekäämi olisi ollut yhdessä kerroksessa.

Kuvassa 22 on esitetty projektin 2 alajännitekytkentä. Kuvasta voidaan havaita, että vaiheiden c ja a pitkät pystysuorat osuudet on tuotu keskeltä ikkunaa 1. Vaiheen b pitkä pystysuora johto-osuus on tuotu keskeltä ikkunaa 2.



Kuva 22. Projektin 2 alajännitekytkentä.

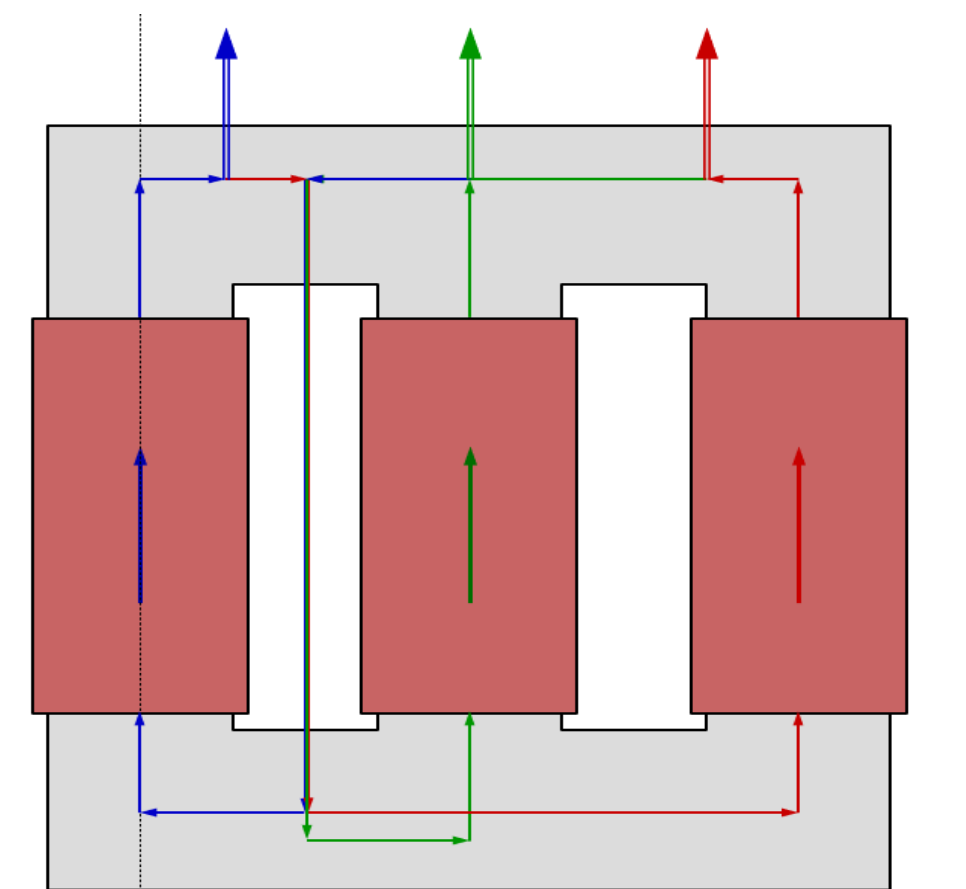
Voidaan havaita, että projektissa 2 ikkunan 2 tulokset ovat huomattavasti suurempia verrattuna ikkunan 1 tuloksiin. Laskettu sydämen pinnan virrantiheys ikkunassa 2 on $11\,000\text{ A/m}^2$, kun ikkunassa 1 se on hieman yli 5000 A/m^2 . Sydämen ikeissä kulkevien

virtojen osalta ikkunan 2 virta on lähes kaksinkertainen verrattuna ikkunaan 1. Ikeissä kulkeva virta ei silti ylitä sallittua rajaa.

Vetotankoryhmien osalta tulokset käyttäytyvät samalla tavalla kuin sydämen pinnan virrantiheys. Pylvään yksi vetotankoryhmän virta on noin 500 A, mikä on huomattavasti pienempi verrattuna pylväiden 2 ja 3 tuloksiin. Vetotankoryhmien virta pylväillä 2 ja 3 on noin 1000 A. Pylväiden 2 ja 3 vetotankojen kokonaisvirrat ovat huomattavasti yli sallitun rajan. Projektissa 2 on kuitenkin kuparikehikko alajännitepuolella. Näin ollen kiertovirrat kulkevat kuparikehikon kautta suojaten vetotankojen ja sydämen puristusalkin välistä kontaktipintaa.

Tulosten epätasainen jakautuminen ikkunoiden välillä selittyy osaltaan sillä, että ikkunan 1 keskeltä tulee vaiheiden a ja c pitkät pystysuorat johto-osuudet, jolloin niiden laskennallinen vaikutus ikkunan 1 tuloksiin on nolla. Vaiheiden a ja c pystysuorat osuudet kuitenkin vaikuttavat ikkunan 2 tuloksiin. Alaikeen rinnalla kulkeva a-vaiheen pitkä vaakasuora johto-osuus vaikuttaa myös lisäävästi ikkunan 2 tuloksiin.

Kuvassa 23 on esitetty projektien 3–5 alajännitekytkentä. On tärkeää huomioida, että projekteissa 3–5 johdotusten pituudet sekä etäisyydet sydämen keskitasoon vaihtelevat projektikohtaisesti. Projektien 3–5 tuloksia tutkiessa voidaan todeta, että saadut tulokset jakautuvat tasaisesti ikkunoiden välillä. Vetotankoryhmien virtoja tarkasteltaessa voidaan kuitenkin havaita, että jokaisessa projektissa suurin laskennallinen virta kulkee keskimmaisella pylväällä.



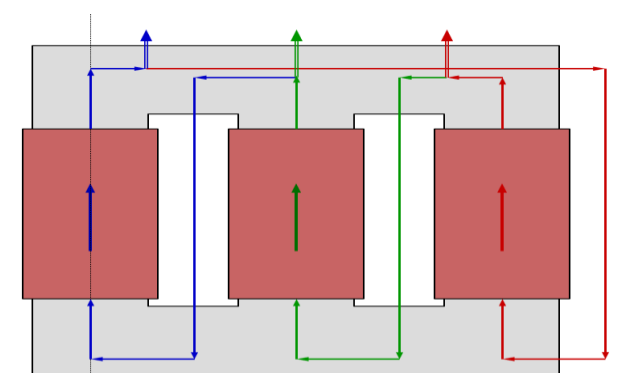
Kuva 23. Projektien 3–5 alajännitekytkentä.

Projektien 3–5 sydämen pinnan virrantiheyden tulokset käyttäytyvät samalla tavalla, mutta tulosten suuruus vaikuttaa riippuvan huomioon otettavasta käämin virrasta. Projektien 3 ja 4 osalta pysytään alle ohjeistetun virrantiheyden rajan, mutta projektissa 5 ohjeistettu raja ylitetään. Projektissa 5 käämivirta on 6349 A, joka selittää saatuja tuloksia. Projekteissa 3–5 ylitettiin myös vetotankojen virtarajat. Projekteissa 3 ja 5 oli kuitenkin

suuremmat kuin ikkunan 2. Vetotankoryhmien virrat pylväillä 1 ja 2 ovat yli 900 A, kun pylvään 3 virta jää lähes puolet pienemmäksi. Projektissa 6 käytettiin kuparikehikkoa, jolloin vetotangoille lasketut virrat kuvaavat kuparikehikossa kulkevia virtoja.

Projektin 6 sydämen pinnan virrantiheyttä tarkasteltaessa voidaan havaita, että ikkunan 1 tulos on noin $11\,600\text{ A/m}^2$. Ikkunan 2 tulos on lähes puolet pienempi. Sydämen ikeiden virtojen osalta saadut tulokset jäävät selvästi alle sallitun. Ikeiden virta ikkunassa 1 on lähes kaksinkertainen verrattuna ikkunan 2 tulokseen.

Analysoitaessa sisäisen johdotuksen reititystä voidaan havaita, että sillä on merkittävä vaikutus sydämessä ja vetotangoissa kulkeviin kiertovirtoihin ja niiden jakautumiseen. Taulukoissa 10 ja 11 mainittu ”Paras kytkentä (konfiguraatio 2)” tarkoittaa laskentatyökalussa valmiina olevaa johdotusgeometriaa, jolla tuloksiksi saatiin matalimmat virta-arvot. Kuvassa 25 on esitetty konfiguraation 2 geometria. Kyseisessä johdotusgeometriassa vaiheiden c ja b pitkät pystyosuudet on tuotu omista vaiheväleistä ja vaiheen a pystyosuus pylvään 3 oikealta puolelta. Projektin 6 alajännitekytkentä oli d1, jolloin paras kytkentä oli konfiguraatio 8. Konfiguraatiossa 8 vaiheen c pitkä pystyosuora osuus tulee pylvään 1 vasemmalta puolelta, vaihe b keskeltä ikkunaa 1 ja vaihe a keskeltä ikkunaa 2.



Kuva 25. Johdotusgeometria konfiguraatiolle 2.

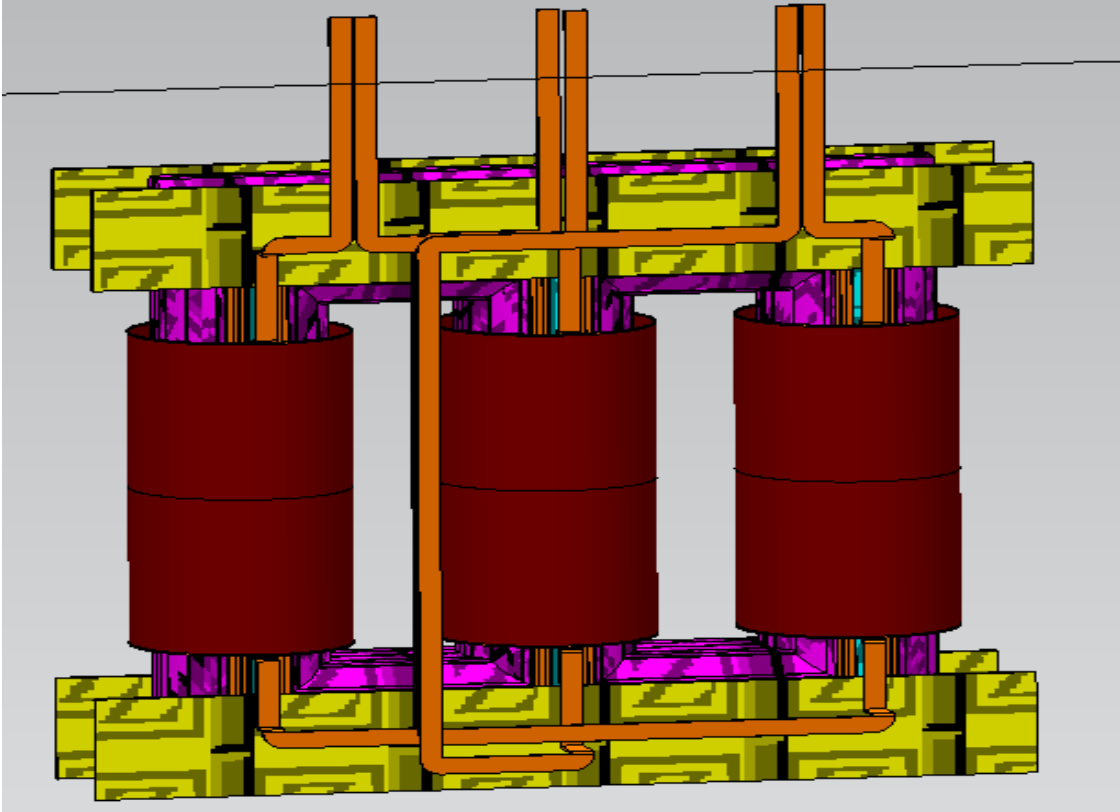
On tärkeää kuitenkin muistaa, että konfiguraatio 2 on ohjelmaan rakennettu valmis geometria, joka käyttää keskimääräisiä etäisyyksien arvoja rakentaessaan lopullista

kytkentää. Lisäksi verrattuna valmiiseen kytkentään, jossa kaikki vaiheet on tuotu samasta vaihevälistä, on konfiguraatiossa 2 lisäparametri D. Kyseinen parametri kuvaa vaakatason etäisyyttä pylvään keskikohdasta pitkään pystykiskoon. Lasketuissa projekteissa parametrin D arvona on käytetty etäisyyttä pylvään keskikohdasta ikkunan keskikohtaan. Todellisuudessa pitkä pystyosuus saatetaan tuoda lähempää käämiä. Parametrilla D on merkittävä vaikutus saatuihin tuloksiin. Konfiguraation 2 tuloksia tutkittaessa voitaisiin tehdä johtopäätös, että sitä voi olla hyödyllistä käyttää projekteissa, joissa muut kiertovirtoja rajoittavat toimenpiteet osoittautuvat riittämättömiksi. On kuitenkin todettava, että paras johdotusgeometria kiertovirtojen näkökulmasta ei ole aina paras muista näkökulmista. Etenkin lyhyet etäisyydet säiliön ja suurivirtaisten johdotuksien tai kiskotuksien välillä voivat aiheuttaa haasteita säiliön häviöiden sekä lämpenemisen kannalta. Vaihevirran ylittäessä 3.5 kA on yleisenä ohjeistuksena pidetty, että kaikkien vaiheiden pitkät pystyosuudet tuodaan samasta vaihevälistä, jotta niiden hajakenttien vaikutukset kumoavat osittain toisensa.

6.2.2 Projektin 3 Magnet-simulointi

Projektin 3 osalta toteutettiin myös simulointi Simcenter Magnet-ohjelmalla. Magnet on matalataajuisten sähkömagneettisten kenttien simulaatio-ohjelma, joka soveltuu ennustamaan minkä tahansa kestopagneeteilla tai käämeillä varustetun komponentin toimintaa (Siemens, n.d.). Magnet-simulointiohjelma perustuu elementtimenetelmään. Simuloinnissa käytettiin hyödyksi sydämen ja tukirakenteiden kiertovirtalaskentaan tehtyä laskentamoduulia. Laskentamoduuliin voi ladata valmiin sähkösuunnittelutiedoston. Laskentamoduuli luo ladatun tiedoston perusteella sydämen, käämin ja puristorakenteiden 3D-geometrian. Kiskotuksen geometria on luotu simulointimalliin itse. Kiskotuksen osalta on pyritty mahdollisimman lähelle oikeasti käytettyä, mutta simulointimallissa on tehty muutamia yksinkertaistuksia.

Projektissa 3 käytettiin kuparikehikkoa alajännitepuolella. Myös kuparikehikon geometria on luotu simulointimalliin itse. Kuvassa 26 on esitetty simulointimallin geometria.



Kuva 26. Projektin 3 simulointimalli.

Laskentamoduuli loi 3D-geometriaan myös virtojen mittaukset. Mittauksien avulla saatiin virta-arvot sydämelle sekä vetotangoille. Simulointimallissa sydän on jaettu levymäisiin osiin. Näin ollen pystytään myös tarkastelemaan sydämen pinnalla sekä rungossa kulkevia virtoja. Simulointi toteutettiin aikaharmonisella ratkaisijalla.

Taulukossa 12 on esitetty Magnet-simuloinnilla sekä Excel-laskentaohjelmalla saadut tulokset. Magnet-simuloinnilla on esitetty kahdet eri tulokset. Ilman kuparikehikkoa tarkoittaa tilannetta, jossa kuparikehikkoa ei ole ja vetotangot ovat galvaanisessa kontaktissa sydämen puristuspaikoihin. Kolmannessa sarakkeessa on esitetty tulokset, kun on käytetty kuparikehikkoa. Kuparikehikkoa käytettäessä vetotangot alajännitepuolella on eristetty, jolloin kyseessä on avoin piiri. Yläjännitepuolen vetotangot ovat kuitenkin galvaanisessa kontaktissa puristuspaikoihin, kun kuparikehikkoa käytetään vain alajännitepuolelle.

Taulukko 12. Magnet-simuloinnin tulokset projektille 3.

Laskentatyökalu	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)
Excel (käämit+johdotus)	707 / 899 / 682 (AJ) 181 / 152 / 200 (YJ)	8739 / 8415 (AJ) 2188 / 2433 (YJ)
Magnet (ilman kuparikehikkoa)	728 / 560 / 701 (AJ) 197 / 137 / 183 (YJ)	13 960 / 13 603 (AJ) 4107 / 4554 (YJ)
Magnet (kuparikehikko)	950 / 970 / 919 (AJ) 183 / 130 / 172 (YJ)	9021 / 7572 (AJ) 3952 / 4300 (YJ)

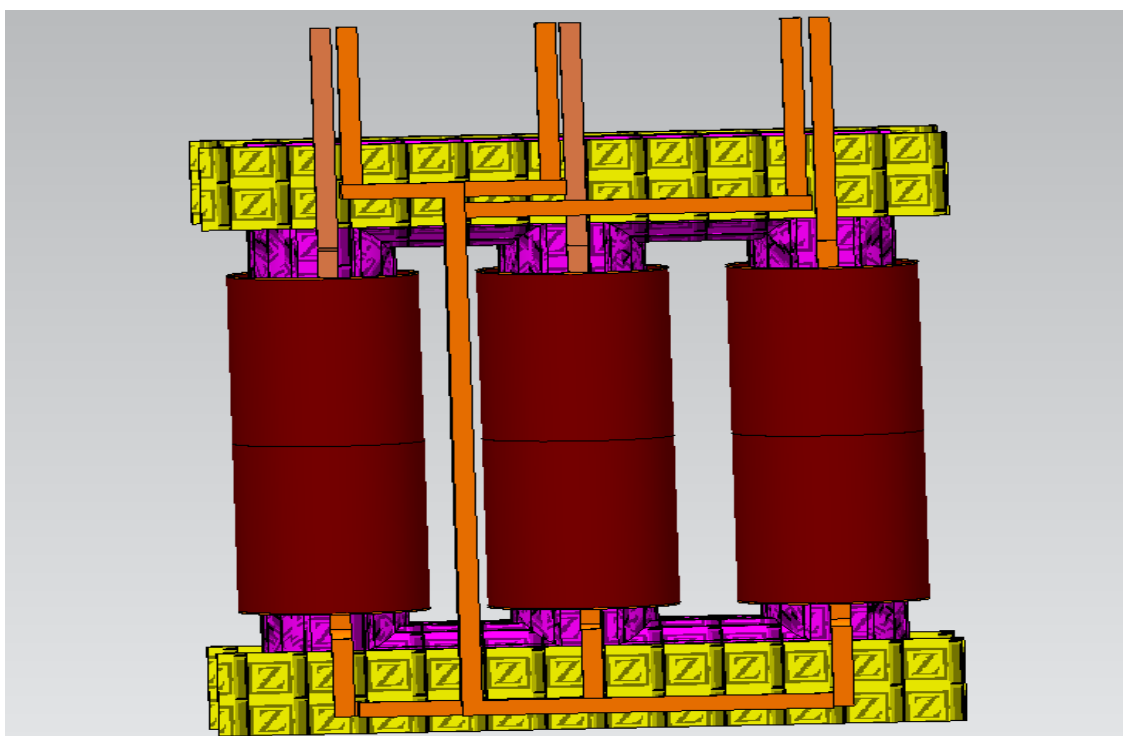
Taulukon 12 tuloksia tarkasteltaessa voidaan havaita, että ilman kuparikehikkoa toteutetussa Magnet-simuloinnissa, reunapylväiden vetotankoryhmien virta vastaa lähes Excelillä laskettuja. Keskimmäisen pylvään vetotankoryhmän laskettu virta on kuitenkin merkittävästi pienempi. Kuparikehikkoa käytettäessä vetotankojen virrat ovat huomattavasti suurempia kuin Excelillä tai Magnetilla ilman kuparikehikkoa saaduissa tuloksissa.

Tuloksia tarkasteltaessa on tärkeää huomata, että Excelin ja Magnet-ohjelmaan perustuvan laskentamoduulin tapa laskea sydämen pinnan virrantiheys on hieman erilainen. Magnetilla saaduissa virrantiheyden tuloksissa keskitytään sen takia vain niiden jakautumiseen ikkunoiden välillä. Simulointitulokset viittaavat siihen, että

kuparikehikon käytöllä on myös vaikutus sydämen virtaosuuteen. Aiemmin tehdyt simuloinnit puoltavat myös kyseistä käyttäytymistä.

6.2.3 Projektin 4 Magnet-simulointi

Myös projektille 4 toteutettiin Magnet-simulointi. Kuvassa 27 on esitetty projektin 4 simulointigeometria. Simulointi toteutettiin aikaharmonisella ratkaisijalla. Magnet simuloinnin ja Excel-laskentaohjelman osalta tarkastellaan kuitenkin vain vetotankojen virtoja, sillä sydämen pinnan virrantiheyden laskutapa eroaa hieman kahden laskentatyökalun välillä.



Kuva 27. Projektin 4 Magnet-geometria.

Taulukossa 13 on esitetty Magnet-simuloinnin sekä Excel-laskentatyökalun tulokset. Taulukkoa tarkasteltaessa voidaan havaita, että saadut tulokset eri laskentaohjelmilla vastaavat suhteellisen hyvin toisiaan. Poikkeuksena on alajännitepuolen keskimmäisen pylvään vetotankoryhmän virta, joka on Magnet-simuloinnissa yli 200 A pienempi.

Taulukko 13. Projektin 4 Magnet-simuloinnin tulokset.

Laskentatyökalu	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)
Excel (käämit+johdotus)	496 / 564 / 397 (AJ)
	143 / 97 / 150 (YJ)
Magnet	465 / 345 / 435 (AJ)
	141 / 92 / 131 (YJ)

6.3 Ryhmän 2 tulokset ja analyysi

Ryhmän 2 projektit koostuivat kolmikäämimuuntajista, joissa on useita huomioitavia käämejä. Ryhmän 2 projektien nimellistiedot on esitetty taulukossa 14. On ymmärrettävä kasvava mahdollisuus laskentavirheeseen, kun tehdään kiertovirtalaskentaa muuntajille, joissa on useita huomioitavia käämityksiä.

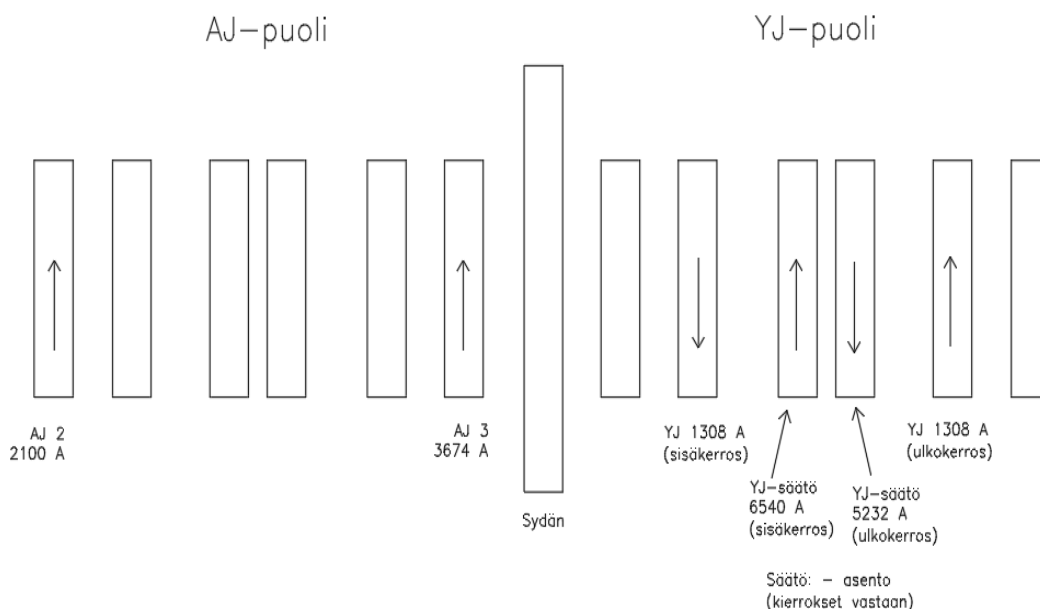
Nykyisessä laskentaohjelmassa on mahdollista yhdistää yksittäisten käämitysten ja niiden johdotusten antamia tuloksia yhdeksi lopulliseksi versioksi. Lisäksi on keskeistä ymmärtää, että kuten alaluvassa 6.2 esitettyjen projektien tulokset myös tässä alaluvussa esitetyt tulokset ovat laskennallisia arvoja. Ilman tehtyjä mittauksia ja niiden tuloksia ei voi tehdä lopullista ja tarkkaa johtopäätöstä.

Taulukko 14. Ryhmän 2 projektit.

Projekti	Kytkentäryhmä, sydämen eristystaso ja vetotankojen määrä	Nimellisarvot	Huomioidut käämit
7.	Dyn11yn11 2A 2 vetotankoa/pylväs/puoli	110 / 40 / 70 MVA (1) 33(±9x1.67%) kV (2) 11 kV (3) 11 kV	(1) 1308 A (vain johtimet) (1-säätö) 1308 A (vain käämi) (2) 2100A (3) 3674 A
8.	YNyn0yn0 2A 2 vetotankoa/pylväs/puoli	113/63/50 MVA (1) 145(±9x1.67%) kV (2) 44 (±9x1.67%) kV (3) 11 kV	(1) 529.5 A (1-säätö) 4765.5 A (vain käämi) (2) 973 A (3) 2624 A *(2-säätö kompensoitu)
9.	Dyn1yn1 2A 2 vetotankoa/pylväs/puoli	160 / 110 / 50 MVA (1) 15 kV (2) 33 kV (3) 11(±9x1.67%) kV	(1) 3556 A (vain johtimet) (2) 1925 A (3) (+) 2281 A / (-) 3089 A (3-säätö) (+) 2880 A / (-) 3906 A *(tehostinmuuntaja-säätö)

6.3.1 Projektin 7 tulokset

Projektin 7 muuntaja on Dyn11yn11 kytketty kolmikäämimuuntaja. Projektin 7 muuntajalle ei ollut vielä tehty johdotussuunnittelua, joten kiertovirtalaskennassa on käytetty arvioituja johdotuksen mittoja ja etäisyyksiä. Muuntajan yläjännitepuolella on plusmiinus-säätö. Muuntajassa on siis kolme huomioitavaa peruskäämiä sekä säätökäämi yläjännitepuolella. Muuntajan käämijärjestys on esitetty kuvassa 28. Lähimpänä sydäntä on toinen alajännitekäämi, jonka virta on lähes 3.7 kA. Yläjännitekäämi on jaettu kahteen kerrokseen ja sen kerrokset ovat säätökäämin molemmin puolin. Yläjännitekäämin välissä oleva säätökäämi on jaettu myös kahteen kerrokseen. Säätökäämin kerroksien eri virrat selittyvät sillä, että sisemmässä kerroksessa on ääriminutus-asennossa viisi virrallista silmukkaa ja uloimmassa kerroksessa on neljä virrallista silmukkaa. Miinus-asennossa säätökäämin kierrokset kytkeytyvät vastaan. Uloimpana kääminä on toinen alajännitekäämi, jonka virta on 2.1 kA. Kiertovirtalaskenta on tehty säädön ollessa miinus-asennossa. Projektin 7 kiertovirtalaskentaa varten tehtiin viisi eri johdotusvaihtoehtoa.



Kuva 28. Projektin 7 käämijärjestys.

Ensimmäisessä johdotusvaihtoehdossa molempien tähtikytkettyjen alajännitekäämien nollakisko tuotiin käämin alapuolelle ja alaikeen rinnalle. Tämän vaihtoehdon tulokset on esitetty taulukossa 15. Alajännitekäämien osalta huomioitiin käämin sekä sen johdotuksen vaikutus. Yläjännitepuolen säätökäämin osalta huomioitiin vain käämin aiheuttama vaikutus. Yläjännitekäämin osalta huomioitiin pelkästään johdotuksen osuus, sillä yläjännitekäämi oli jaettu kahteen kerrokseen. Kiertovirtalaskennassa käytetty yläjännitekäämin johdotus voi erota merkittävästi lopullisesta suunnitelmasta, sillä yläjännitekäämin molemmat ulosotot ovat käämin yläpäässä ja läpiviennit on tuotu säiliön oikeaan reunaan katsottuna yläjännitepuolelta. Lopullinen johdotussuunnitelma riippuu esimerkiksi tilan määrästä säiliössä. Yläjännitekäämin johdotuksen virran ollessa noin 1.3 kA sen vaikutus ei todennäköisesti ole kriittinen tekijä lopullisille tuloksille.

Taulukko 15. Projektin 7 tulokset, kun molemmat nollakiskot ovat alaikeen rinnalla.

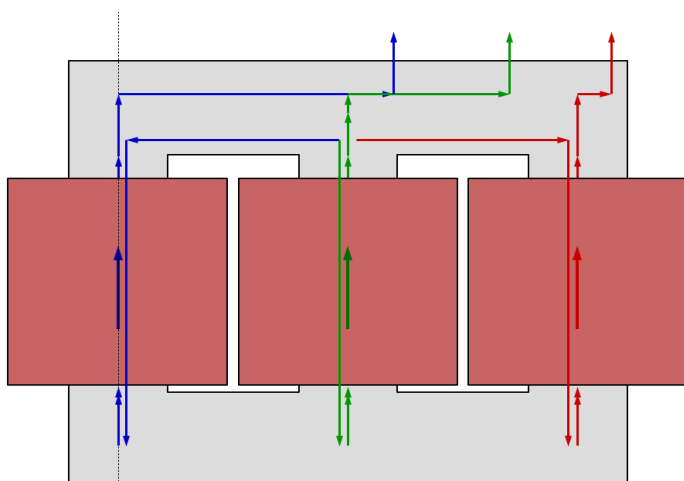
Projekti	Excel (käämit)			Excel (käämit+johdotus)			Excel (yhdistetyt tulokset)		
	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{CY} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{CY} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{CY} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)
7. Käämi (1) (vain johtimet) 1308 A	-	-	-	14 / 15 / 1 (AJ) 95 / 94 / 5 (YJ)	22 / 1	275 / 20 (AJ) 1462 / 88 (YJ)	987 / 1237 / 994 (AJ) 375 / 293 / 285(YJ)	310 / 295	15 747 / 15 746 (AJ) 5642 / 4335 (YJ)
7. Käämi (1-säätö) (vain käämi) 1308 A	21 / 13 / 21 (AJ) 29 / 28 / 29 (YJ)	20 / 20	329 / 329 (AJ) 431 / 431 (YJ)	-	-	-			
7. Käämi (2) nolla alhaalla 2100 A	49 / 36 / 49 (AJ) 42 / 15 / 42 (YJ)	31 / 31	788 / 788 (AJ) 592 / 592 (YJ)	339 / 383 / 280 (AJ) 87 / 65 / 74 (YJ)	83 / 71	5339 / 4465 (AJ) 1322 / 1104 (YJ)			
7. Käämi (3) nolla alhaalla 3674 A	125 / 142 / 125 (AJ) 98 / 82 / 98 (YJ)	104 / 104	2058 / 2058 (AJ) 1356 / 1356 (YJ)	620 / 854 / 697 (AJ) 167 / 173 / 184 (YJ)	191 / 204	9943 / 11 029 (AJ) 2467 / 2750 (YJ)			

Tarkastellaan seuraavaksi taulukossa 15 esitettyjä tuloksia. Tutkittaessa yläjännitekäämin eli käämin 1 tuloksia voidaan havaita, että sen vaikutus kriittiselle alajännitepuolelle on vähäinen. Tämä on seurausta sen virran suuruudesta sekä sen etäisyydestä alajännitepuolelle. Käämin 1 vaikutus yhdistettyihin tuloksiin on oletettu olevan lisäävä, mutta yläjännitepuolella olevan kaksikerroksisen käämin vaikutus yhdistettyihin tuloksiin vaatii vielä jatkotutkimusta. Yläjännitepuolen säätökäämin vaikutus lopullisiin tuloksiin on myös vähäinen, sillä säätökäämi on jaettu kahteen kerrokseen. Tämän takia huomioitavaksi virraksi tulee vain yhden silmukan virta. Tuloksiin merkittävästi vaikuttavat molemmat alajännitekäämit. Suurin vaikutus tuloksiin on sisimpänä olevalla

käämillä 3, jonka virta on lähes 3.7 kA. Käämin 3 ja sen johdotukselle saadut tulokset menevät alajännitepuolella yli sallitun vetotankojen sekä sydämen pinnan virrantiheyden osalta. Huomioitaessa pelkästään käämin 3 tulokset voidaan todeta, että projekti 7 on kriittinen kiertovirtojen näkökulmasta. Käämin 2 tulokset jäävät alle sallittujen rajojen, mutta niillä on lisäävä vaikutus lopullisiin alajännitepuolen tuloksiin.

Käämien yhdistetyt tulokset näyttävät hälyttäviltä. Vetotankoryhmien virrat ennustavat kuparikehikon tarvetta alajännitepuolella. Projekti 7 on kuitenkin suunnitteluvaiheessa, joten tarvittavat toimenpiteet ja päätökset kiertovirtojen rajoittamiseen ovat mahdollisia.

Toisessa johdotusvaihtoehdossa alajännitekäämin 2 nollakisko on tuotu käämin yläpuolelle. Tämä vaihtoehto on lisätty havainnollistamaan nollakiskon siirtämisen vaikutusta kokonaistuloksiin. Nostettaessa nollakisko ylös saadaan aikaan edestakaisuus saman vaiheen pystysuorille osuuksille. Pystysuoran johto- tai kisko-osuuden tuominen käämin päältä voi kuitenkin aiheuttaa haasteita liittyen käytössä olevaan säiliön tilaan. Yksi mahdollinen vaihtoehto on nostaa nollakisko ikkunan keskelle, mutta myös tässä vaihtoehdossa säiliön tila voi aiheuttaa haasteita. Kuvassa 29 on esitetty alajännitekäämin 2 kytkentä, kun nollakisko on nostettu ylös.



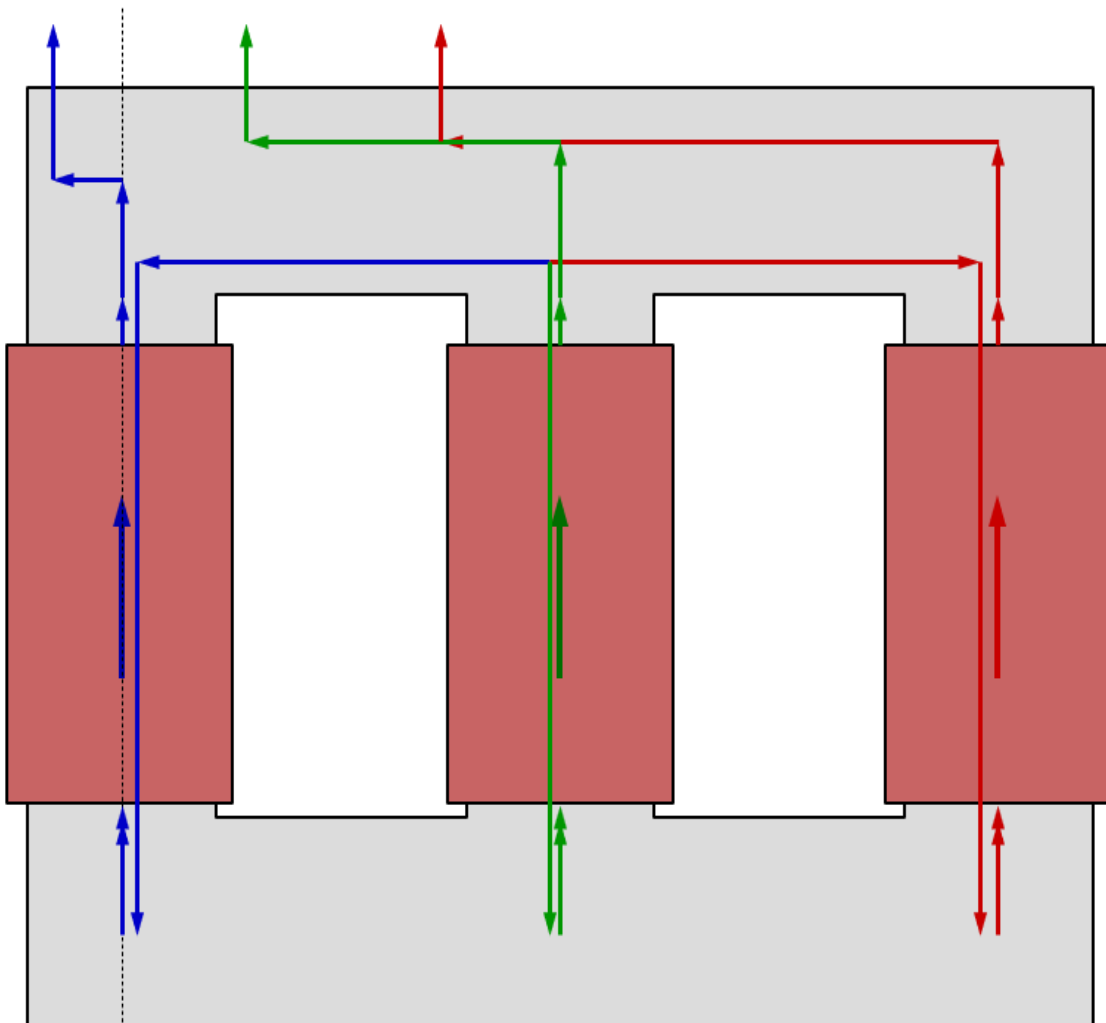
Kuva 29. Alajännitekäämin 2 kytkentä, kun nollakisko on tuotu ylös.

Taulukossa 16 on esitetty tulokset, kun alajännitekäämin 2 nollakisko on tuotu ylös kuvan 29 esittämällä tavalla. Taulukon 16 tulokset ovat alajännitekäämiä 2 lukuun ottamatta samat kuin taulukossa 15. Käämin 2 tulokset ovat tippuneet selvästi verrattuna ensimmäisen johdotusvaihtoehdon antamiin tuloksiin. Myös yhdistetyt tulokset ovat huomattavasti pienemmät ja kuparikehikko vetotankojen suojaksi ei näytä enää pakolliselta. Sydämen pinnan virrantiheydet ovat myös ohjeistetun rajan alapuolella. Tuloksia analysoitaessa on kuitenkin kyseenalaistettava käämin 2 vaikutus yhdistettyihin tuloksiin. Käämin 2 tulokset toimivat vähentävästi yhdistettyihin tuloksiin. Käämin 2 tulosten pieneminen edestakaisten vaiheosuuksien takia oli odotettua, mutta käämin 2 tulosten vaikutus yhdistettyihin tuloksiin olisi olettamuksen mukaisesti ollut lisäävä. Jatkotutkimuksena voi olla hyödyllistä selvittää, että onko käämin 2 vaikutus oikeasti vähentävä yhdistettyihin tuloksiin ja kääntyykö vaikuttava aksiaalisuuntainen virta 180 astetta.

Taulukko 16. Projektin 7 tulokset, kun alajännitekäämin 2 nollakisko on tuotu käämin yläpuolelle.

Projekti	Excel (käämit)			Excel (käämit+johdotus)			Excel (yhdistetyt tulokset)		
	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)
7. Käämi (1) (vain johtimet) 1308 A	-	-	-	14 / 15 / 1 (AJ) 95 / 94 / 5 (YJ)	22 / 1	275 / 20 (AJ) 1462 / 86 (YJ)	568 / 704 / 576 (AJ) 302 / 231 / 211 (YJ)	221 / 206	8882 / 8916(AJ) 4545 / 3225 (YJ)
7. Käämi (1-säätö) (vain käämi) 1308 A	21 / 13 / 21 (AJ) 29 / 28 / 29 (YJ)	20 / 20	329 / 329 (AJ) 431 / 431 (YJ)	-	-	-			
7. Käämi (2) nolla ylhäällä 2100 A	49 / 36 / 49 (AJ) 42 / 15 / 42 (YJ)	31 / 31	788 / 788 (AJ) 592 / 592 (YJ)	92 / 178 / 140 (AJ) 16 / 16 / 1 (YJ)	11 / 21	1705 / 2412 (AJ) 246 / 22 (YJ)			
7. Käämi (3) nolla alhaalla 3674 A	125 / 142 / 125 (AJ) 98 / 82 / 98 (YJ)	104 / 104	2058 / 2058 (AJ) 1356 / 1356 (YJ)	620 / 854 / 697 (AJ) 167 / 173 / 184 (YJ)	191 / 204	9943 / 11 029 (AJ) 2467 / 2750 (YJ)			

Kolmannessa johdotusvaihtoehdossa alajännitekäämin 2 nollakisko on alhaalla ja käämin 3 nollakisko on tuotu ylös. Myös tähän johdotusvaihtoehtoon pätee mahdolliset haasteet säiliön rajalliseen tilaan liittyen. Lisäksi haasteita alajännitekäämin 3 nollakiskon nostoon voi aiheutua siitä, että käämi 3 on sisin käämi. Voi olla haasteellista tuoda pystysuorat ylöspäin lähtevät johto-osuudet käämin 2 nollakiskon ohi. Kuvassa 30 on esitetty käämin 3 kytkentä, kun nollakisko on nostettu ylös.



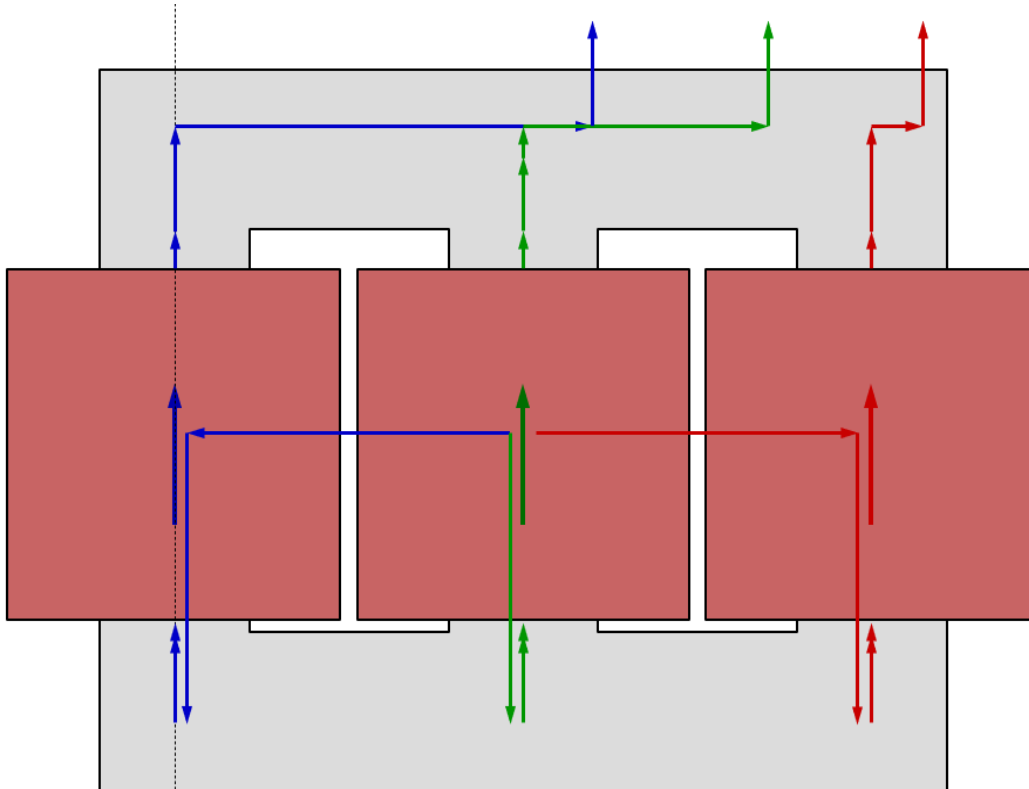
Kuva 30. Alajännitekäämin 3 kytkentä, kun nollakisko on tuotu ylös.

Taulukossa 17 on esitetty tulokset, kun alajännitekäämin 3 nollakisko on nostettu ylös. Vain käämin 3 tulokset ovat muuttuneet taulukossa 15 esitettyihin tuloksiin verrattuna. Käämin 3 tulokset ovat laskeneet merkittävästi ensimmäisellä vaihtoehdolla saatuihin tuloksiin. Myös yhdistetyt tulokset ovat laskeneet huomattavan mataliksi. Käämin 3 vaikutus on samankaltainen kuin käämin 2 vaikutus johdotusvaihtoehdossa 2. Käämillä 3 on vähentävä vaikutus alajännitepuolen yhdistettyihin tuloksiin. Alajännitepuolella on 2 erillistä käämiä ja niiden johdotukset. Virtojen suuruuksia katsoessa on vaikea uskoa johdotusvaihtoehdon 3 tuloksia, vaikka käämin 3 johdotuksessa tapahtuu osittainen kompensointi. Projektille 7 ei ole vastaavaa referenssiprojektia, joten on haastavaa tehdä selkeää päätelmää yhdistetyistä tuloksista.

Taulukko 17. Projektin 7 tulokset, kun alajännitekäämin 3 nollakisko on tuotu käämin yläpuolelle.

Projekti	Excel (käämit)			Excel (käämit+johdotus)			Excel (yhdistetyt tulokset)		
	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{CY} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{CY} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{CY} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)
7. Käämi (1) (vain johtimet) 1308 A	-	-	-	14 / 15 / 1 (AJ) 95 / 94 / 5 (YJ)	22 / 1	275 / 20 (AJ) 1462 / 86 (YJ)	224 / 275 / 234 (AJ) 244 / 184 / 153 (YJ)	150 / 134	3317 / 3360 (AJ) 3689 / 2369 (YJ)
7. Käämi (1-säätö) (vain käämi) 1308 A	21 / 13 / 21 (AJ) 29 / 28 / 29 (YJ)	20 / 20	329 / 329 (AJ) 431 / 431 (YJ)	-	-	-			
7. Käämi (2) nolla alhaalla 2100 A	49 / 36 / 49 (AJ) 42 / 15 / 42 (YJ)	31 / 31	788 / 788 (AJ) 592 / 592 (YJ)	339 / 383 / 280 (AJ) 87 / 65 / 74 (YJ)	83 / 71	5339 / 4465 (AJ) 1322 / 1104 (YJ)			
7. Käämi (3) nolla ylhäällä 3674 A	125 / 142 / 125 (AJ) 98 / 82 / 98 (YJ)	104 / 104	2058 / 2058 (AJ) 1356 / 1356 (YJ)	159 / 174 / 78 (AJ) 39 / 59 / 52 (YJ)	48 / 44	2749 / 1556 (AJ) 566 / 783 (YJ)			

Neljännessä johdotusvaihtoehdossa käämin 2 nollakisko on tuotu ikkunan keskelle, jolloin saadaan aikaan osittainen kompensointi saman vaiheen pystysuorien osuuksien välillä. Lisäksi nollakiskon ollessa ikkunan keskellä, on sen vaikutus ikkunan läpäisevään magneettivuohon vähäinen. Kuvassa 31 on esitetty kytkentäkuva, kun alajännitekäämin 2 nollakisko on tuotu ikkunan keskelle.



Kuva 31. Alajännitekäämin 2 kytkentä, kun nollakisko on tuotu ikkunan keskelle.

Taulukossa 18 on esitetty tulokset, kun alajännitekäämin 2 nollakisko on tuotu ikkunan keskelle. Tuloksista voidaan havaita, että yhdistetyt tulokset ovat tippuneet verrattuna tilanteeseen, jossa molempien alajännitekäämien nollakiskot ovat alaikeen rinnalla. Saadut tulokset ovat silti huomattavasti suuremmat kuin tilanteessa, jossa alajännitekäämin 2 nollakisko on tuotu käämin yläpuolelle.

Taulukko 18. Projektin 7 tulokset, kun alajännitekäämin 2 nollakisko on tuotu ikkunan keskelle.

Projekti	Excel (käämit)			Excel (käämit+johdotus)			Excel (yhdistetyt tulokset)		
	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)
7. Käämi (1) (vain johtimet) 1308 A	-	-	-	14 / 15 / 1 (AJ) 95 / 94 / 5 (YJ)	22 / 1	275 / 20 (AJ) 1462 / 86 (YJ)	772 / 962 / 779 (AJ) 336 / 259 / 245 (YJ)	266 / 250	12 236 / 12 254 (AJ) 5044 / 3731 (YJ)
7. Käämi (1-säätö) (vain käämi) 1308 A	21 / 13 / 21 (AJ) 29 / 28 / 29 (YJ)	20 / 20	329 / 329 (AJ) 431 / 431 (YJ)	-	-	-			
7. Käämi (2) nolla keskellä ikkunaa 2100 A	49 / 36 / 49 (AJ) 42 / 15 / 42 (YJ)	31 / 31	788 / 788 (AJ) 592 / 592 (YJ)	128 / 129 / 66 (AJ) 48 / 32 / 34 (YJ)	39 / 27	1911 / 1018 (AJ) 728 / 500 (YJ)			
7. Käämi (3) nolla alhaalla 3674 A	125 / 142 / 125 (AJ) 98 / 82 / 98 (YJ)	104 / 104	2058 / 2058 (AJ) 1356 / 1356 (YJ)	620 / 854 / 697 (AJ) 167 / 173 / 184 (YJ)	191 / 204	9943 / 11 029 (AJ) 2467 / 2750 (YJ)			

Viidennessä johdotusvaihtoehdossa käämin 3 nollakisko on ikkunan keskellä. Taulukossa 19 on esitetty tulokset, kun alajännitekäämin 3 nollakisko on tuotu keskelle ikkunaa.

Taulukko 19. Projektin 7 tulokset, kun alajännitekäämin 3 nollakisko on tuotu ikkunan keskelle.

Projekti	Excel (käämit)			Excel (käämit+johdotus)			Excel (yhdistetyt tulokset)		
	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)
7. Käämi (1) (vain johtimet) 1308 A	-	-	-	14 / 15 / 1 (AJ) 95 / 94 / 5 (YJ)	22 / 1	275 / 20 (AJ) 1462 / 86 (YJ)	582 / 727 / 589 (AJ) 304 / 233 / 213 (YJ)	228 / 212	9172 / 9191(AJ) 4563 / 3250 (YJ)
7. Käämi (1-säätö) (vain käämi) 1308 A	21 / 13 / 21 (AJ) 29 / 28 / 29 (YJ)	20 / 20	329 / 329 (AJ) 431 / 431 (YJ)	-	-	-			
7. Käämi (2) nolla alhaalla 2100 A	49 / 36 / 49 (AJ) 42 / 15 / 42 (YJ)	31 / 31	788 / 788 (AJ) 592 / 592 (YJ)	339 / 383 / 280 (AJ) 87 / 65 / 74 (YJ)	83 / 71	5339 / 4465 (AJ) 1322 / 1104 (YJ)			
7. Käämi (3) nolla keskellä ikkunaa 3674 A	125 / 142 / 125 (AJ) 98 / 82 / 98 (YJ)	104 / 104	2058 / 2058 (AJ) 1356 / 1356 (YJ)	221 / 358 / 293 (AJ) 96 / 110 / 113 (YJ)	112 / 121	3478 / 4499 (AJ) 1398 / 1664 (YJ)			

Taulukon 19 yhdistetyistä tuloksista voidaan havaita, että tulokset ovat merkittävästi pienemmät kuin tilanteessa, jossa molemmat nollakiskot ovat alaikeen rinnalla. Yhdistetyt tulokset ovat kuitenkin huomattavasti suurempia kuin tilanteessa, jossa alajännitekäämin 3 nollakisko on tuotu käämin yläpuolelle.

Kolmikäämitysmuuntajien kiertovirtalaskenta on haastavaa ja niihin liittyviä mittaustuloksia on vähän. Projekti 7 on mahdollinen ongelmatapaus liittyen kiertovirtailmiöön. Koestuksen yhteydessä voi olla hyödyllistä toteuttaa myös kiertovirtamittaukset ja verrata saatuja tuloksia laskettuihin. Mittaukset voivat olla hyödyllinen tapa selvittää kuinka tarkasti nykyinen laskentatapa ennustaa kolmikäämitysmuuntajien tuloksia.

6.3.2 Projektin 7 Magnet-simuloinnit

Projektin 7 molemmille alajännitekäämeille tehtiin myös Magnet-simuloinnit. Magnet-simuloinneilla pyrittiin vertailemaan kahden eri laskentamenetelmän antamia tuloksia. Tuloksissa on esitetty vetotankoryhmien ja sydämen pinnan virrantiheyden tulokset. Sydämen pinnan virrantiheyksien osalta tarkastellaan tulosten käyttäytymistä eri kiskotusvaihtoehdoissa. Kuten aiemmin mainittiin, Magnet- ja Excel-ohjelmien tapa laskea sydämen pinnan virrantiheys on hieman erilainen.

Taulukossa 20 on esitetty tulokset alajännitekäämin 2 eri kiskotusvaihtoehdoille. Taulukossa on esitetty myös Excel-laskentaohjelmalla lasketut tulokset. Kun käämin nollakisko on alhaalla alaikeen rinnalla, vetotankoryhmien lasketut virrat sivupylväillä ovat suhteellisen lähellä toisiaan eri laskentamenetelmien välillä. Keskimmaisella pylväällä esiintyy kuitenkin merkittävä ero tulosten välillä. Virrantiheyksien osalta voidaan havaita, että Magnet-ohjelmalla saadut tulokset eri ikkunoissa ovat lähes samat. Excelillä on kuitenkin laskettu isompi ero ikkunoiden välisille virrantiheyksille.

Taulukko 20. Magnet-simuloinnin tulokset alajännitekäämille 2.

	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)
Käämi (2) 2100 A nolla alhaalla Excel (käämit+johdotus)	339 / 383 / 280 (AJ) 87 / 65 / 74 (YJ)	5339 / 4465 (AJ) 1322 / 1104 (YJ)
Käämi (2) 2100 A nolla alhaalla Magnet	308 / 213 / 315 (AJ) 86 / 68 / 93 (YJ)	5028 / 5359 (AJ) 1706 / 1918 (YJ)
Käämi (2) 2100 A nolla ylhäällä Excel (käämit+johdotus)	92 / 178 / 140 (AJ) 16 / 16 / 1 (YJ)	1705 / 2412 (AJ) 246 / 22 (YJ)
Käämi (2) 2100 A nolla ylhäällä Magnet	15 / 28 / 28 (AJ) 65 / 63 / 66 (YJ)	96 / 547 (AJ) 1398 / 1479 (YJ)
Käämi (2) 2100 A nolla keskellä ikkunaa Excel (käämit+johdotus)	128 / 129 / 66 (AJ) 48 / 32 / 34 (YJ)	1911 / 1018 (AJ) 728 / 500 (YJ)
Käämi (2) 2100 A nolla keskellä ikkunaa Magnet	144 / 108 / 144 (AJ) 74 / 65 / 77 (YJ)	2277 / 2361 (AJ) 1525 / 1666 (YJ)

Tarkastellaan seuraavaksi tilannetta, jossa alajännitekäämin 2 nollakisko on tuotu käämin yläpuolelle. Vetotankoryhmien virtoja tarkasteltaessa voidaan havaita, että tulosten suuruudessa sekä käyttäytymisessä esiintyy eroja kahden eri laskentaohjelman välillä. Alajännitepuolen vetotankoryhmien virtoja tarkasteltaessa voidaan havaita, että tulokset pylväille 2 ja 3 ovat suurempia verrattuna pylvään 1 virtaan. Tämä on todennäköisesti seurausta siitä, että läpiviennit ovat aktiiviosan oikeassa reunassa katsottuna alajännitepuolelta. Saatujen virtojen suuruudessa on kuitenkin merkittävä ero kahden eri laskentaohjelman välillä. Myös yläjännitepuolen vetotankojen virroissa on selvä ero. Sydämen pinnan virrantiheydet ovat lähes käänteiset eri laskentaohjelman välillä. Excelin laskemat tulokset virrantiheydelle ovat suurempia alajännitepuolella, kun Magnet-simuloinnilla on saatu suuremmat tulokset yläjännitepuolella. Olettamuksena on, että Excel-laskentaohjelma on mahdollisesti lähempänä totuutta, sillä alajännitekäämissä on kohtalaisen suuruinen virta ja käämin sekä sen kiskotuksen etäisyys yläjännitepuolelle on iso.

Tarkasteltaessa seuraavaksi tilannetta, jossa alajännitekäämin 2 nollakisko on tuotu ikkunan keskelle. Taulukossa 20 esitetyistä tuloksista voidaan havaita, että eri laskentaohjelmien antamat tulokset ovat jälleen paljon lähempänä toisiaan verrattuna tilanteeseen, jossa nollakisko oli tuotu käämin yläpuolelle. Alajännitepuolen vetotankoryhmien virtoja tarkasteltaessa voidaan havaita, että pylväiden 1 ja 2 osalta tulokset vastaavat suhteellisen hyvin toisiaan. Pylvään 3 osalta excel-laskentaohjelma laskee selvästi pienemmän tuloksen verrattuna Magnet-simuloinnilla saatuun tulokseen. Läpivientien sijoittaminen aktiiviosan reunalle voi puoltaa virtojen epätasaista jakautumista. Yläjännitepuolen vetotankoryhmien virtoja tarkasteltaessa voidaan havaita, että Magnet-simuloinnilla saadut tulokset ovat hieman isommat verrattuna excelillä laskettuihin. Sydämen pinnan virrantiheyksien osalta Excel-laskentaohjelma laskee isomman eron eri ikkunoiden välillä verrattuna Magnet-simuloinnilla saatuihin tuloksiin.

Taulukossa 21 on esitetty Magnet-simuloinnin tulokset alajännitekäämin 3 eri kiskotusvaihtoehdoille. Tulosten käyttäytymisessä esiintyy samoja piirteitä, kun alajännitekäämin 2 tapauksessa. Lasketut vetotankoryhmien virrat vastaavat sivupylväillä suhteellisen hyvin toisiaan, kun nollakisko on alhaalla. Magnet-simuloinnilla saatu keskimmäisen pylvään vetotankojen virta on jälleen huomattavasti pienempi verrattuna Excelillä laskettuun. Sydämen pinnan virrantiheyden tulosten käyttäytyminen on samankaltaista kahden eri laskentatavan välillä, kun nollakisko on alhaalla.

Taulukko 21. Magnet-simuloinnin tulokset alajännitekäämille 3.

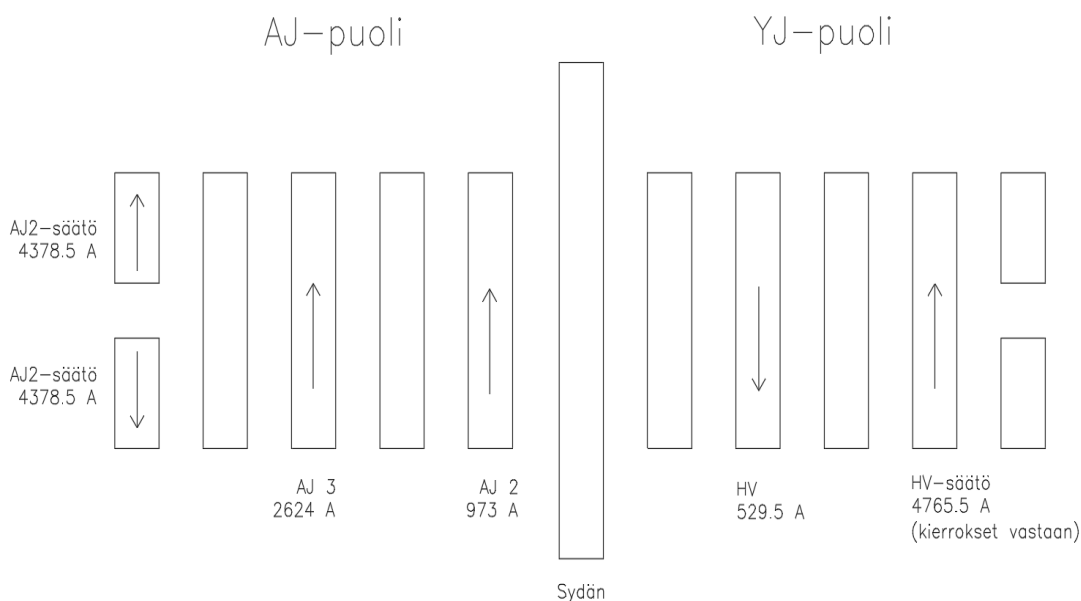
	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)
Käämi (3) 3674 A nolla alhaalla Excel (käämit+johdotus)	620 / 854 / 697 (AJ) 167 / 173 / 184 (YJ)	9943 / 11 029 (AJ) 2467 / 2750 (YJ)
Käämi (3) 3674 A nolla alhaalla Magnet	611 / 439 / 615 (AJ) 153 / 119 / 165 (YJ)	9845 / 10 465 (AJ) 3066 / 3465 (YJ)
Käämi (3) 3674 A nolla ylhäällä Excel (käämit+johdotus)	159 / 174 / 78 (AJ) 39 / 59 / 52 (YJ)	2749 / 1556 (AJ) 566 / 783 (YJ)
Käämi (3) 3674 A nolla ylhäällä Magnet	64 / 102 / 74 (AJ) 115 / 114 / 118 (YJ)	395 / 1154 (AJ) 2507 / 2655 (YJ)
Käämi (3) 3674 A nolla keskellä Excel (käämit+johdotus)	221 / 358 / 293 (AJ) 96 / 110 / 113 (YJ)	3478 / 4499 (AJ) 1398 / 1664 (YJ)
Käämi (3) 3674 A nolla keskellä Magnet	294 / 245 / 287 (AJ) 131 / 116 / 138 (YJ)	4399 / 4533 (AJ) 2720 / 2978 (YJ)

Tarkastellaan seuraavaksi tilannetta, jossa alajännitekäämin 3 nollakisko on tuotu käämin yläpuolelle. Vetotankojen virtojen sekä sydämen pinnan virrantiheyden tulosten käyttäytyminen poikkeaa kahden eri laskentaohjelman välillä.

Kahden eri laskentatavan tulokset vastaavat jälleen kohtalaisen hyvin toisiaan, kun nollakisko on tuotu ikkunan keskelle. Merkittävin ero esiintyy jälleen alajännitepuolella keskimmäisen pylvään vetotankojen virrassa.

6.3.3 Projektin 8 tulokset

Projektin 8 nimellistiedot on esitetty alaluvun 6.3 taulukossa 14. Kyseessä on YNyn0yn0 kytketty kolmikäämimuuntaja, jossa on plusmiinus-säätö sekä yläjännite- että alajännitepuolella. Projektin 8 muuntajassa on siis kolme peruskäämiä sekä kaksi säätökäämiä. Alajännitepuolen säätökäämin osuus on jätetty huomioimatta, sillä käämin osuus on kompensoitu ja käämikytkimelle menevät pitkät vaakasuorat osuudet kompensoivat osittain toisensa. Kuvassa 32 on esitetty projektin 8 käämijärjestys sekä virtojen referenssisuunnat. Kuvassa 32 on huomioitava, että yläjännitepuolen säätökäämin referenssisuunnan nuoli on käännetty vastaan kytkettyjen kierrosten mukaisesti.



Kuva 32. Projektin 8 käämijärjestys.

Projektille 8 lasketut tulokset on esitetty taulukossa 22. Taulukossa on esitetty käämien erilliset tulokset sekä niiden yhdistetyt tulokset.

Taulukko 22. Projektin 8 tulokset.

Projekti	Excel (käämit)			Excel (käämit+johdotus)			Excel (yhdistetyt tulokset)		
	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)
8. Käämi (1) 529.5 A	13 / 9 / 13 (AJ) 17 / 17 / 17 (YJ)	12 / 12	197 / 197 (AJ) 258 / 258 (YJ)	16 / 18 / 13 (AJ) 51 / 96 / 58 (YJ)	16 / 16	266 / 202 (AJ) 764 / 875 (YJ)	741 / 814 / 728 (AJ) 244 / 145 / 269 (YJ)	228 / 229	11 626 / 11 408 (AJ) 3640 / 3997 (YJ)
8. Käämi (1-säätö, -asento) 4765.5 A	87 / 35 / 87 (AJ) 112 / 84 / 112 (YJ)	67 / 67	1354 / 1354 (AJ) 1647 / 1647 (YJ)	-	-	-			
8. Käämi (2) 973 A	35 / 40 / 35 (AJ) 28 / 25 / 28 (YJ)	29 / 29	589 / 589 (AJ) 397 / 397 (YJ)	196 / 254 / 193 (AJ) 52 / 48 / 52 (YJ)	55 / 55	3041 / 2995 (AJ) 776 / 786 (YJ)			
8. Käämi (3) 2624 A	69 / 58 / 69 (AJ) 59 / 30 / 59 (YJ)	45 / 45	1124 / 1124 (AJ) 830 / 830 (YJ)	481 / 542 / 467 (AJ) 128 / 99 / 128 (YJ)	123 / 120	7614 / 7387 (AJ) 1942 / 1928 (YJ)			

Tarkastellaan ensin yläjännitepuolen vaikutusta eli käämin 1 sekä sen säätökäämin tuloksia. Yläjännitekäämin virran ollessa vain hieman yli 500 A voidaan havaita, että sen laskettu vaikutus on vähäinen. Säätökäämin osalta vaikutus on merkittävämpi. Säätökäämi on yksikerroksinen, joten käämin huomioitavaksi virraksi tulee silmukoiden määrän ja miinus asennon virran tulo. Laskettaessa useamman käämin vaikutuksia yhteen on tärkeää huomioida virran referenssisuunta. Ylä- ja alajännitepuolen virran referenssisuunnat ovat vastakkaiset. Tämä tarkoittaa, että käämin 1 vaikutus on heikentävä alajännitepuolen saatuihin tuloksiin. Yläjännitepuolen säätökäämi sen sijaan miinus asennossa kasvattaa alajännitepuolen tuloksia. Tämä johtuu siitä, että miinus asennossa säätökäämin kierrokset ovat kytkettynä vastaiseen suuntaan.

Tarkastellaan seuraavaksi alajännitepuolen käämien tuloksia. Käämin 2 virta on miinus asennossa 973 A. Käämin 2 tuloksia katsoessa voidaan havaita, että saadut tulokset ovat yllättävän suuria suhteutettuna virran suuruuteen. Tulosten suuruus voi osittain selittyä sillä, että käämi 2 on sisin käämi. Lisäksi käämin 2 johdotus on alajännitepuolella lähimpänä sydäntä. On myös mahdollista, että tähtikytkentä vaikuttaa tuloksiin, sillä

kaikki johdotuksen osuudet kulkevat joko pylväiden tai ikeiden rinnalla eikä ikkunoiden keskeltä.

Käämin 3 virta on noin 2.6 kA ja sillä on suurin vaikutus saatuihin kokonaistuloksiin. Käämin 3 tulokset olivat suurimmat, mutta myös sen tulokset vaikuttivat suuremmilta kuin oli odotettu. Käämin 3 tuloksia voi osaltaan selittää tähtikytkentä. Verrattaessa ryhmän 1 tuloksiin, käämin 3 tulokset vastasivat suuruusluokan puolesta lähes 3.7 kA kolmiokytkettyä alajännitekäämiä projektissa 3. On toki huomioitava, että saatuihin tuloksiin vaikuttavat myös muut tekijät kuin käämin virta ja kytkentäryhmä.

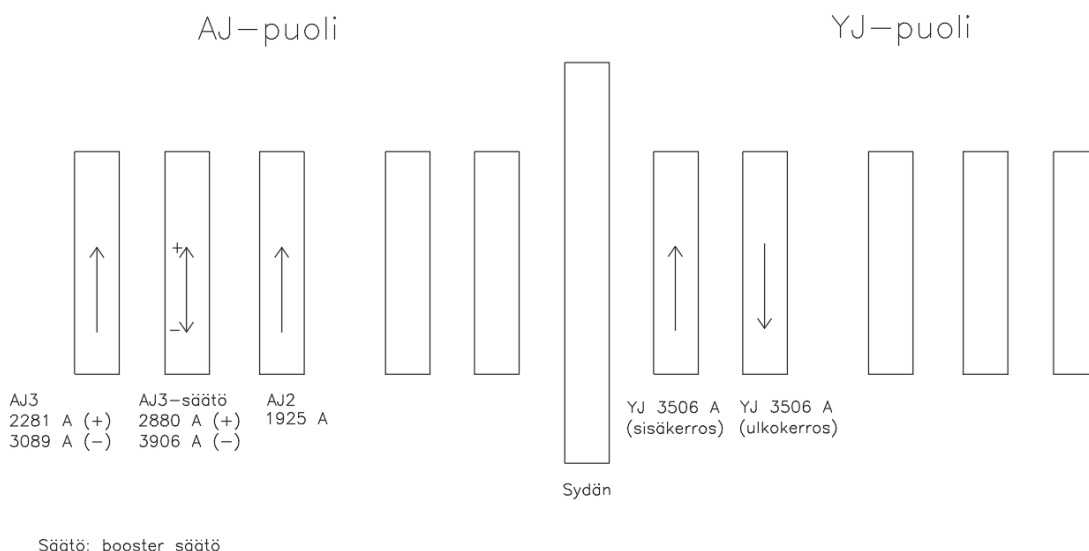
Tarkastellaan yhdistetyistä tuloksista ensin vetotankoryhmien virtoja. Voidaan huomata, että keskimmaiselle pylväälle on laskettu hieman yli 800 A ja reunimmaisille pylväille yli 700 A.

Tarkastellaan seuraavaksi sydämen pinnan virrantiheyksiä. On huomioitava, että sydämen pinnan virrantiheyden laskenta ei anna tarkkaa tulosta vaan sen tarkoitus on antaa kuva virran epätasaisesta jakautumisesta sekä toimia havainnollistavana tuloksena kuinka kriittinen tapaus on kyseessä. Taulukosta 22 voidaan havaita, että saadut tulokset alajännitepuolella sydämen pinnan virrantiheydeksi ovat korkeita, mutta ovat samaa suuruusluokkaa molemmissa ikkunoissa. Yläjännitepuolen virrantiheydet ovat huomattavasti pienempiä.

On tärkeää ymmärtää, että huomioitaessa kiertovirtalaskennassa useita käämityksiä sekä johdotuksia, mahdollisuus laskentavirheeseen kasvaa. Projektin 8 osalta ei ole tehty kiertovirtamittauksia, joten on haastavaa arvioida kuinka lähelle lasketut arvot todellisuudessa osuvat.

6.3.4 Projektin 9 tulokset

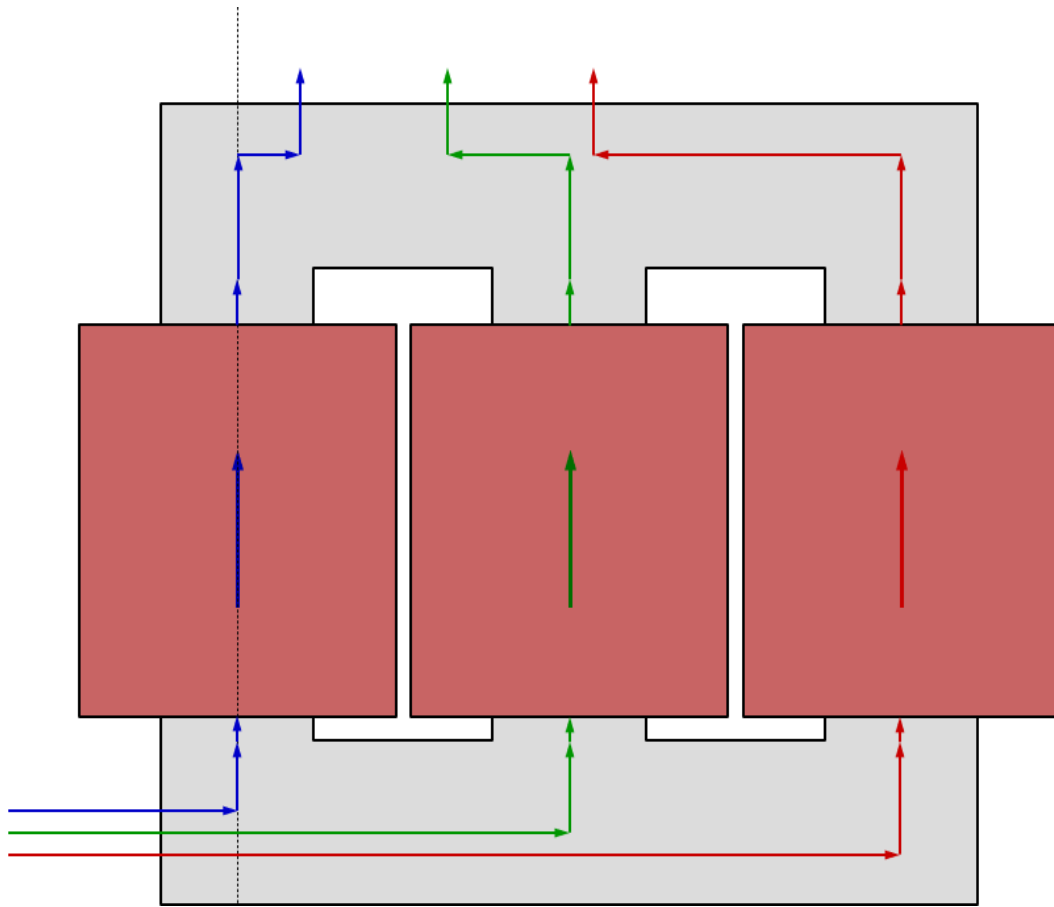
Projektin 9 muuntaja on Dyn1yn1 kytketty kolmikäämimuuntaja. Muuntajassa on plusmiinus-säätö alajännitekäämissä 3. Projektissa 9 on siis kolme huomioitavaa peruskäämiä sekä säätökäämi. Yläjännitekäämissä on merkittävä virta, mutta se on jaettu kahteen kerrokseen. Yläjännitekäämin osalta huomioidaan vain sisäisen johdotuksen osuus. Alajännitekäämissä 2 kulkee lähes 2 kA virta. Alajännitekäämin 3 osalta on huomioitu sekä ääriminus että -plus-asento. Alajännitekäämin 3 säätö on toteutettu tehostinmuuntajan (engl. booster-transformer) avulla. Käämillä 3 ja sen säätökäämillä on lisäävä vaikutus alajännitepuolen tuloksiin plus asennossa. Miinus asennossa säätökäämin virran referenssisuunta muuttuu, jolloin sen vaikutus lopullisiin alajännitepuolen tuloksiin on vähentävä. Säätökäämin osalta tarkastellaan vain käämin aiheuttamaa vaikutusta. Kuvassa 33 on esitetty projektin 9 käämijärjestys sekä virtojen referenssisuunnat.



Kuva 33. Projektin 9 käämijärjestys.

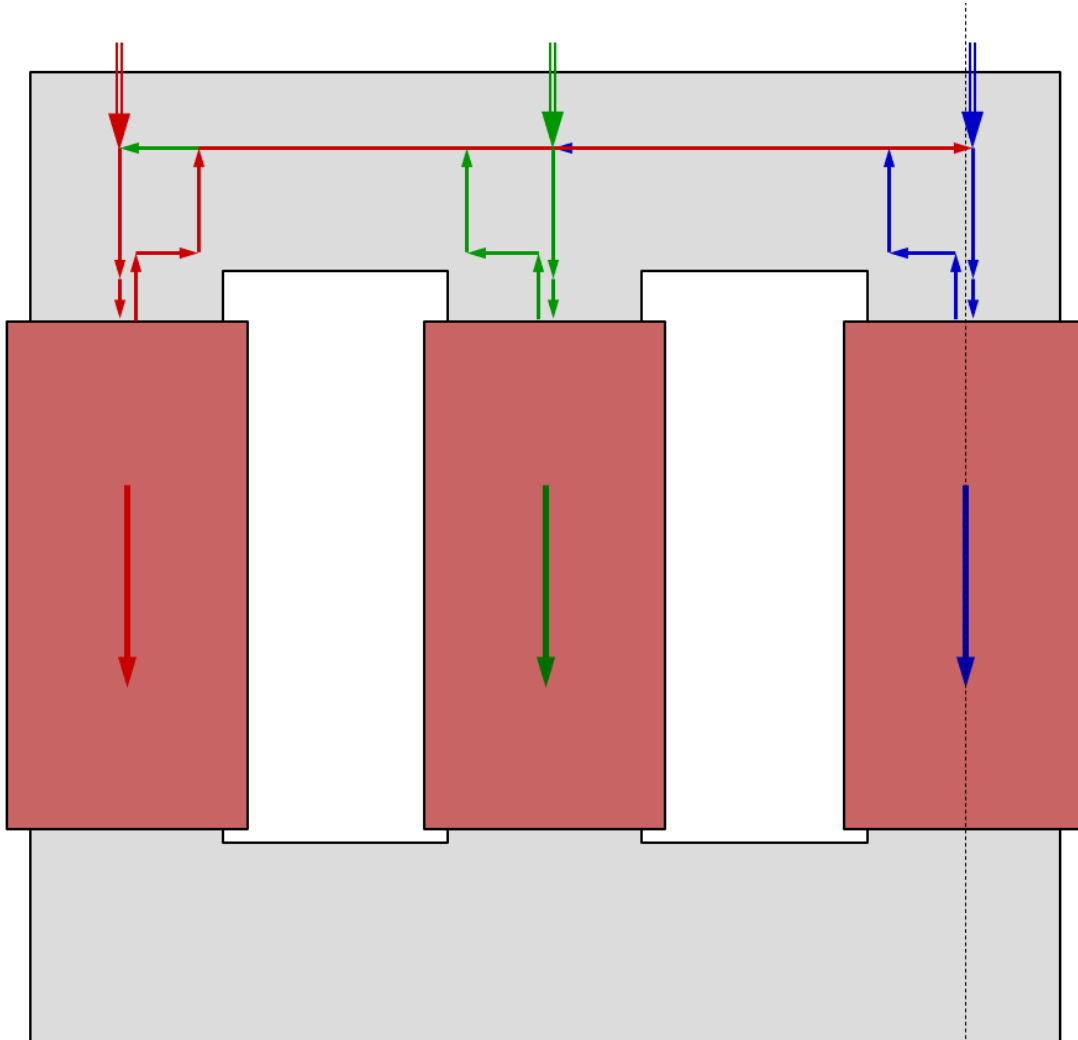
Sisäisen johdotuksen geometria, mitat sekä etäisyydet on arvioitu, koska projektille 9 ei ollut vielä valmista johdotussuunnittelua. Molemmat alajännitekäämit ovat tähtikytkettyjä. Alajännitekäämin 2 nollakisko on käämin alapuolella ja läpiviennit

aktiiviosan oikeassa reunassa katsottuna alajännitepuolelta. Alajännitekäämin 3 kytkentä on merkittävä tekijä tulosten epätarkkuudessa. Alajännitekäämin 3 säädössä on käytetty tehostinmuuntajaa. Käämin 3 alapäästä lähtevien johdotusten reititys tehostinmuuntajan aktiiviosalle on arvioitu kulkevan alaikeen rinnalla. On kuitenkin mahdollista, että lopullinen johdotuksen reititys poikkeaa arvioidusta. Alajännitekäämin 3 kytkentä on esitetty kuvassa 34.



Kuva 34. Projektin 9 alajännitekäämin 3 kytkentä.

Projektin 9 yläjännitekäämi on kaksikerroksinen ja sen molemmat ulosotot ovat käämin yläpäädyssä. Yläjännitekäämin kytkentä on esitetty kuvassa 35.



Kuva 35. Projektin 9 yläjännitekäämin kytkentä.

Tarkastellaan ensin plus-asennon tuloksia. Plus-asennossa käämeillä 2, 3 sekä säätökäämillä on vahvistava vaikutus alajännitepuolen tuloksiin. Projektin 9 tulokset on esitetty taulukossa 23, kun säätö on plus-asennossa.

Taulukko 23. Projektin 9 tulokset plus-asennossa.

Projekti	Excel (käämit)			Excel (käämit+johdotus)			Excel (yhdistetyt tulokset)		
	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	I_{C-Y} [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)
9. Käämi (1) (vain johtimet) 3556 A	-	-	-	50 / 50 / 49 (AJ) 320 / 288 / 283 (YJ)	67 / 68	779 / 742 (AJ) 4083 / 3741 (YJ)	727 / 928 / 787 (AJ) 518 / 420 / 475 (YJ)	254 / 270	10 538 / 11 445 (AJ) 6670 / 6276 (YJ)
9. Käämi (2) 1925 A	62 / 61 / 62 (AJ) 49 / 30 / 49 (YJ)	43 / 43	901 / 901 (AJ) 600 / 600 (YJ)	352 / 431 / 331 (AJ) 95 / 79 / 89 (YJ)	93 / 90	5040 / 4861 (AJ) 1254 / 1185 (YJ)			
9. Käämi (3-säätö, + asento) 2800 A (vain käämi)	43 / 38 / 43 (AJ) 35 / 17 / 35 (YJ)	28 / 28	626 / 626 (AJ) 433 / 433 (YJ)	-	-	-			
9. Käämi (3, +asento) 2281 A	57 / 44 / 57 (AJ) 48 / 17 / 48 (YJ)	35 / 35	822 / 822 (AJ) 592 / 592 (YJ)	297 / 431 / 371 (AJ) 82 / 68 / 99 (YJ)	75 / 91	4320 / 5320 (AJ) 1074 / 1316 (YJ)			

Tarkastellaan ensin yläjännitekäämin 1 tuloksia. Projektissa 9 myös yläjännitekäämissä kulkee merkittävä virta. Voidaan huomata, että käämin 1 johdotus aiheuttaa yläjännitepuolen vetotankoryhmiin noin 300 A virrat pylvästä kohden. Käämi 1 aiheuttaa myös merkittävät tulokset sydämen pinnan virrantiheydelle yläjännitepuolelle. Käämi 1 on kaksikerroksinen ja sen johdotuksella on oletettu olevan lisäävä vaikutus yhdistettyihin tuloksiin, mutta yläjännitepuolella olevan kaksikerroksisen käämin vaikutuksen arvioiminen vaatii jatkotutkimusta. Tilanteessa, jossa käämin vaikutus yhdistettyihin tuloksiin on epävarma, hyvä käytäntö on toteuttaa suunnittelu suurimpien saatujen tulosten mukaisesti.

Alajännitekäämi 2 on toiseksi sisin käämi. Alajännitekäämi 2 aiheuttaa sen virtaan suhteutettuna yllättävän suuret tulokset. Alajännitekäämi on kuitenkin tähtikytketty ja sen kaikki johto-osuudet on oletettu kulkevan ikeiden ja pylväiden rinnalla. Säätökäämin osalta tarkastellaan vain käämin aiheuttamaa vaikutusta. Säätökäämin summavirta jää suhteellisen pieneksi, koska se on toteutettu tehostinmuuntajan avulla. Säätökäämillä on lisäävä vaikutus alajännitepuolen kokonaistuloksiin plus-asennossa. Alajännitekäämi

3 on uloin käämi. Käämillä 3 ja sen johdotuksella on merkittävä vaikutus kokonaistuloksiin. Käämin 3 suurin laskettu vetotankoryhmän virta on keskimmaisella pylvällä.

Yhdistettyjä tuloksia tarkasteltaessa voidaan huomata, että alajännitepuolen tulokset ovat suuria. Vetotankoryhmien kokonaisvirrat reunimmaisilla pylvällä ovat yli 700 A. Keskimmaiselle pylvälle laskettu kokonaisvirta ylittää 900 A ja se aiheuttaa tarpeen pohtia kuparikehikon käyttämistä. Yhdistettyjen tuloksien virrantiheydet sydämen pinnalla ylittävät sallitun, mutta ylitys ei ole suuri. On myös ymmärrettävä, että virrantiheyden oikeaan laskentaan vaikuttaa merkittävästi johdotusten geometria sekä sen etäisyys sydämeen. Käyttäessä arvioituja sijainti ja etäisyys tietoja mahdollisuus laskentavirheeseen kasvaa. Projektin 9 osalta on syytä varmistaa lopulliset kiertovirtalaskennan tulokset, kun lopullinen johdotussuunnittelu on valmis.

Tarkastellaan seuraavaksi miinus-asennon tuloksia. Miinus-asennossa alajännitekäämin 3 sekä sen säätökäämin virrat nousevat. Säätökäämin referenssisuunta kuitenkin muuttuu, jolloin sen vaikutus lopullisiin alajännitepuolen tuloksiin on vähentävä. Projektin 9 tulokset miinus-asennossa on esitetty taulukossa 24.

Taulukko 24. Projektin 9 tulokset miinus-asennossa.

Projekti	Excel (käämit)			Excel (käämit+johdotus)			Excel (yhdistetyt tulokset)		
	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	$I_{C.Y}$ [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	$I_{C.Y}$ [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	$I_{C.Y}$ [A] (ikkuna 1/2)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)
9. Käämi (1) (vain johtimet) 3556 A	-	-	-	50 / 50 / 49 (AJ) 320 / 288 / 283 (YJ)	67 / 68	779 / 742 (AJ) 4083 / 3741 (YJ)	732 / 988 / 818 (AJ) 464 / 402 / 437 (YJ)	214 / 236	10 601 / 11 880 (AJ) 6021 / 5844 (YJ)
9. Käämi (2) 1925 A	62 / 61 / 62 (AJ) 49 / 30 / 49 (YJ)	43 / 43	901 / 901 (AJ) 600 / 600 (YJ)	352 / 431 / 331 (AJ) 95 / 79 / 89 (YJ)	93 / 90	5040 / 4861 (AJ) 1254 / 1185 (YJ)			
9. Käämi (3-säätö, - asento) 3906 A (vain käämi)	58 / 52 / 58 (AJ) 48 / 23 / 48 (YJ)	38 / 38	849 / 849 (AJ) 587 / 587 (YJ)	-	-	-			
9. Käämi (3, -asento) 3089 A	77 / 59 / 77 (AJ) 65 / 23 / 65 (YJ)	47 / 47	1113 / 1113 (AJ) 802 / 802 (YJ)	402 / 584 / 502 (AJ) 111 / 92 / 134 (YJ)	101 / 123	5850 / 7204 (AJ) 1455 / 1782 (YJ)			

Voidaan huomata, että alajännitekäämin 3 tulokset ovat nousseet virran kasvun seurauksena. Vetotankoryhmän virta pylväällä 1 nousi noin 100 A, pylväällä 2 noin 150 A ja pylväällä 3 noin 130 A. Myös sydämen pinnan virrantiheydet kasvoivat miinus-asennossa. Ikkunassa 1 virrantiheys nousi noin 1500 A/m^2 ja ikkunassa 2 noin 2000 A/m^2 . Vetotankojen ja sydämen pinnan virrantiheyksien tulokset ovat suurempia ikkunan 2 puolella. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että läpiviennit on sijoitettu aktiiviosan vasemmalle reunalle katsottuna alajännitepuolelta. Tämän seurauksena vaiheelta a tulee pitkä vaakasuora johto-osuus ikeen rinnalla.

Tarkastellaan seuraavaksi miinus-asennon yhdistettyjä tuloksia. Vetotankoryhmien virtojen osalta pylväälle 1 laskettu tulos on noin 730 A, pylväälle 2 noin 990 A ja pylväälle 3 noin 820 A. Virran suuruudet ennustavat plus-asentoon verrattuna entistä vahvemmin kuparikehikon tarvetta. Sydämen pinnan virrantiheyksiä tutkittaessa voidaan huomata, että ero plus-asennon tuloksiin ei ole iso. Projektille 9 on syytä tehdä vielä tarkempi varmistuslaskenta, kun sisäisen johdotuksen suunnittelu on valmistunut.

6.3.5 Projektin 9 Magnet-simuloinnit

Projektin 9 alajännitekäämien 2 ja 3 osalta toteutettiin Magnet-simuloinnit. Alajännitekäämin 3 osalta simuloinnit on toteutettu sekä miinus- että plus-ääriasennoissa.

Taulukossa 25 on esitetty projektin 9 Magnet-simulointien sekä Excel-laskentaohjelman tulokset. Tarkastellaan ensin alajännitekäämin 2 tuloksia. Vertailtaessa vetotankoryhmien virtoja voidaan havaita, että reunimmaisten pylväiden tulokset ovat suhteellisen lähellä toisiaan eri laskentamenetelmien välillä. Keskimmäisen pylvään tulos Magnet-simuloinnilla on kuitenkin huomattavasti pienempi kuin Excelillä laskettu. Sydämen pinnan virrantiheydet ovat jakautuneet suhteellisen tasaisesti kahden ikkunan välille molemmilla laskentamenetelmillä.

Taulukko 25. Projektin 9 Magnet-simulointien tulokset.

	I_{TP} [A] (Pylväs 1/2/3)	$J_{sydän}$ [A/m ²] (ikkuna 1/2)
9. Käämi (2) 1925 A Excel (käämit+johdotus)	352 / 431 / 331 (AJ) 95 / 79 / 89 (YJ)	5040 / 4861 (AJ) 1254 / 1185 (YJ)
9. Käämi (2) 1925 A Magnet	290 / 200 / 301 (AJ) 78 / 59 / 84 (YJ)	4625 / 4962 (AJ) 1434 / 1595 (YJ)
9. Käämi (3, +asento) 2281 A Excel (käämit+johdotus)	297 / 431 / 371 (AJ) 82 / 68 / 99 (YJ)	4320 / 5320 (AJ) 1074 / 1316 (YJ)
9. Käämi (3, +asento) 2281 A Magnet	312 / 214 / 318 (AJ) 95 / 71 / 103 (YJ)	4910 / 5193 (AJ) 1735 / 1963 (YJ)
9. Käämi (3, -asento) 3089 A Excel (käämit+johdotus)	402 / 584 / 502 (AJ) 111 / 92 / 134 (YJ)	5850 / 7204 (AJ) 1455 / 1782 (YJ)
9. Käämi (3, -asento) 3089 A Magnet	423 / 289 / 431 (AJ) 129 / 95 / 139 (YJ)	6648 / 7031 (AJ) 2350 / 2658 (YJ)

Tarkastellaan seuraavaksi alajännitekäämin 3 tuloksia plus-asennossa. Myös plus-asennossa sivupylväiden vetotankojen virrat ovat saman suuntaisia molemmilla

laskentamenetelmillä, mutta keskimmäisen pylvään osalta Magnet-simuloinnin tulos on huomattavasti pienempi. Sydämen pinnan virrantiheyksien osalta esiintyy hieman eroavaisuuksia Magnet-simuloinnin ja Excel-laskentaohjelman välillä. Excelillä lasketut tulokset ennustavat hieman isompaa eroa virranjakautumisessa ikkunoiden välillä verrattuna Magnet-simulointiin.

Alajännitekäämin 3 ollessa miinus-asennossa, käämin virta nousee yli kolmen kiloampeerin. Myös miinus-asennossa vetotankoryhmien virrat sivupylväillä vastaavat suhteellisen hyvin toisiaan kahden eri laskentamenetelmän välillä, mutta keskimmäisen pylvään vetotankojen virta on merkittävästi pienempi Magnet-simuloinnissa. Sydämen pinnan virrantiheyksien osalta voidaan todeta, että Excel-laskentaohjelma on laskenut paljon isomman eron eri ikkunoiden välillä verrattuna Magnet-simulointiin. Virran epätasaista jakaantumista tukee läpivientien sijoittaminen aktiiviosan reunoille.

7 Johtopäätökset ja jatkotutkimuskohteet

Esitetyt esimerkkiprojektien mittaustulokset sekä kiertovirtalaskennan tulokset työhön valituille yhdeksälle projektille tarjoavat vertailupohjaa suunnittelutyölle. On tärkeää kuitenkin ymmärtää, että näiden yhdeksän projektin tulokset ovat laskennallisia arvoja. Tarkan ja luotettavan analyysin tekeminen vaatii projektikohtaisia mittaustuloksia. Tuloksia tarkasteltaessa voidaan kuitenkin tehdä muutama yleinen johtopäätös ja havainto.

Tutkimusosiota alustettiin Hitachin (2021) sisäisessä ohjeistuksessa esitettyjen muutamien esimerkkiprojektien mittaustuloksien ja laskennallisten arvojen avulla. Mittaustulokset olivat saatavilla vain vetotankoryhmille. Laskennallisia ja mitattuja tuloksia vertailtiin ja lisäksi yhdelle mitatulle kolmikäämimuuntajalle toteutettiin kiertovirtalaskenta itse alusta alkaen. Laskennallisten ja mittaustulosten vertailu antaa kuvan, että laskentaohjelmalla on suhteellisen hyvä kyky ennustaa kiertovirtoja.

Työssä esitettiin kuuden eri kaksikäämimuuntajan kiertovirtalaskennan tulokset. Kyseisissä kuudessa valitussa muuntajassa oli yksi suurivirtainen alajännitekäämi. Saatuja tuloksia analysoitaessa pystyttiin huomaamaan, että virran suuruus oli keskeinen vaikuttava tekijä saatujen tulosten suuruuteen. Lisäksi saaduista tuloksista pystyttiin näkemään eri johdotusgeometrioiden vaikutus laskettujen virtojen suuruuksiin sekä niiden jakautumiseen. Esimerkiksi tuotaessa kaikkien kolmen vaiheen pitkät pystysuorat kiskot samasta vaihevälistä, vetotankoryhmien sekä sydämen pinnan virrantiheydet jakautuivat suhteellisen tasaisesti pylväiden ja ikkunoiden välillä. Tuotaessa kahden vaiheen pitkät pystysuorat kisko-osuudet toisen ikkunan keskeltä ja kolmas vaihe toisen ikkunan keskeltä, esiintyi saaduissa virtatuloksissa huomattava epätasainen jakautuminen. Excel-laskentaohjelman valmiita geometrioita hyödyntäen havaittiin myös, että tuotaessa jokaisen vaiheen pitkä pystysuora osuus erikseen, saadaan pienimmät lasketut tulokset kiertovirroille. Kahdelle ryhmän 1 muuntajalle toteutettiin myös Magnet-simulointi. Vertailtaessa Magnet-simuloinnilla sekä Excelillä saatuja tuloksia pystyttiin havaitsemaan eroavaisuuksia ja yhtäläisyyksiä laskentamenetelmien

välillä. Keskeisin havainto eri laskentatapojen välillä liittyi keskimmäisen pylvään vetotankoryhmän virtaan. Magnet-simuloinnilla saadut tulokset keskimmäisen pylvään vetotankoryhmän virralle olivat huomattavasti pienempiä verrattuna Excelillä saatuihin tuloksiin. Olisi syytä tehdä tarkempi selvitys kumpi laskentamenetelmä on lähempänä totuutta. Lisäksi projektin 3 osalta toteutetussa Magnet-simuloinnissa havaittiin eroavaisuus laskentamenetelmien välillä, kun käytetään kuparikehikkoa. Magnet-simuloinnilla saatiin huomattavasti suuremmat virrat kuparikehikolle verrattuna Excelillä laskettuihin tuloksiin.

Ryhmässä 2 esitettiin kolmen eri kolmikäämimuuntajan kiertovirtalaskennan tulokset. Jokaisen vaikuttavan käämin osuus laskettiin erikseen ja lopuksi niiden tulokset yhdistettiin hyödyntäen laskentaohjelman toiminnallisuutta. Saaduista tuloksista pystyttiin havaitsemaan, että yhdistetyt tulokset voivat olla suuria, vaikka yhdenkään yksittäisen käämin virta ei näytä hälyttävältä. Lisäksi kolmikäämimuuntajien tuloksia analysoitaessa vaikutti siltä, että tähtikytketty käämi voi aiheuttaa isomman haasteen verrattuna kolmiokytkettyyn käämiin. Yleisessä vaihtoehdossa tähtikytkennän kaikki kisko- tai johto-osuudet kulkevat pylväiden ja ikeiden rinnalla, kun kolmiokytketyssä osa kiskoista saattaa kulkee keskeltä ikkunaa. Projektin 7 osalta tutkittiin nollakiskon paikan vaikutusta laskennallisiin tuloksiin. Nollakiskon nostolla käämin yläpuolelle oli merkittävä vähentävä vaikutus laskettuihin virtatuloksiin. Nollakiskon nostamisella ikkunan keskelle oli myös vähentävä vaikutus laskettuihin virtatuloksiin.

Kolmikäämimuuntajien projekteille 7 ja 9 tehtiin myös Magnet-simulointeja. Magnet-simuloinnilla saatuja tuloksia vertailtiin Excelillä laskettuihin tuloksiin. Magnet-simuloinnilla ja Excelillä laskettujen keskimmäisen pylvään vetotankoryhmien virtojen tuloksissa esiintyi jälleen selkeä ero. Sivupylväille lasketut vetotankoryhmien virrat olivat kuitenkin samaa suuruusluokkaa. Projektin 7 osalta tutkittiin myös nollakiskon sijainnin vaikutusta. Kahden eri laskentamenetelmän antamien tuloksien välillä esiintyi selvä ero, kun nollakisko tuotiin käämin yläpuolelle. Eri laskentamenetelmien tulokset olivat samankaltaisia, kun nollakisko oli sijoitettu käämin alapuolelle tai ikkunan keskelle.

Sydämen ja puristusrakenteiden kiertovirtoihin liittyen on useita mahdollisia jatkotutkimusaiheita tai kehityskohteita. Olisi suositeltavaa toteuttaa kiertovirtamittauksia ja verrata mitattuja tuloksia laskettuihin. Hyödyllistä olisi saada mittaustuloksia esimerkiksi kaksikämmimuuntajasta, jossa: on yli 3.5 kA käämivirta, vetotangot ovat kontaktissa sydämen puristuspaikkien kanssa ja kuparikehikkoa ei ole käytetty. Kuparikehikko on merkittävä suojaustoimenpide, joten tiedon ja varmuuden lisääminen sen käyttöön liittyen on hyödyllistä.

Voi olla myös hyödyllistä tehdä selvitystyötä liittyen kuparikehikossa kulkevan virran suuruuteen ja kuparikehikon mitoitukseen. Kuparikehikossa voi kulkea erittäin suuria virtoja esimerkiksi kaksikämmimuuntajassa, jossa alajännitekäämin virta on yli 6 kA.

Yksi jatkotutkimusaihe liittyy kolmikäämmimuuntajien kiertovirtalaskentaan. Kolmikäämmimuuntajilla voi olla useampi tuloksiin merkittävästi vaikuttava käämitys. Olisi hyödyllistä lisätä tietoa eri käämitysten yhdistetystä vaikutuksesta lopullisiin tuloksiin. Lisäksi suunnitteluprosessin alussa voi olla vajavaiset tiedot kolmikäämmimuuntajan lopullisesta sisäisen johdotuksen geometriasta. Johdotuksen tai kiskotuksen lopulliset etäisyys- ja pituustiedot voivat riippua esimerkiksi käytössä olevasta säiliön tilasta ja jännite-etäisyyksistä. Sisäisen johdotuksen tai kiskotuksen geometrialla on merkittävä vaikutus kiertovirtalaskennan tuloksiin. Etenkin kolmikäämmimuuntajille olisi suositeltavaa tehdä vielä kiertovirtojen varmistuslaskenta, kun lopullinen johdotus suunnittelu on valmis.

Jatkotutkimuksena olisi myös hyödyllistä varmistaa nollakiskon paikan vaikutus yhdistettyihin tuloksiin. Esimerkiksi jos projektin 7 nollakiskon nostamisen vaikutus antaa todellisen kuvan, on sen vaikutus kiertovirtojen pienentämiseen merkittävä.

Lähteet

- ABB. (1998). *Muuntajatekninen peruskoulutus*. ABB Transmit Oy. [Rajattu pääsy].
- ABB. (2002). *Circulating currents around the window, Technical Standard* [Rajattu pääsy].
- ABB. (2004). *Transformer Handbook*. [Rajattu pääsy].
- ABB. (2007). *Muuntajatekniikan perusteet*. [Rajattu pääsy].
- ABB. (2013). *Circulating currents around core windows*. [Rajattu pääsy].
- Amoiralis, E., Tsili, M., & Kladas, A. (2009). Transformer Design and Optimization: A Literature Survey. *IEEE transactions on power delivery*, 24(4), 1999-2024. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2028763>
- Aura, L., & Tonteri, A. J. (1996). *Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet* (2. uud. p.). WSOY.
- Bargate, V., Yadav, A., & Gupta, S. (2025). Analysis of Transformer Defect using Different Dissolved Gas Analysis Techniques: A Comparative Study. *Journal of the Institution of Engineers (India). Series B, Electrical Engineering, Electronics and telecommunication engineering, Computer engineering*, 106(5), 1385-1399. <https://doi.org/10.1007/s40031-024-01156-2>
- Ćalasan, M., Mujičić, D., Rubežić, V., & Radulović, M. (2019). Estimation of Equivalent Circuit Parameters of Single-Phase Transformer by Using Chaotic Optimization Approach. *Energies (Basel)*, 12(9), 1697. <https://doi.org/10.3390/en12091697>
- da Luz, M. V. F., Dular, P., Leite, J. V., & Kuo-Peng, P. (2014). Modeling of Transformer Core Joints via a Subproblem FEM and a Homogenization Technique. *IEEE transactions on magnetics*, 50(2), 1009-1012. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2284917>
- Dawood, K., Alboyaci, B., & Cinar, M. A., Sonmez, O. (2019). Calculation of the leakage reactance in distribution transformers via numerical and analytical methods. *Journal of Electrical Systems* 15-2 (2019): 213-221
- de Faria, H., Costa, J. G. S., & Olivas, J. L. M. (2015). A review of monitoring methods for predictive maintenance of electric power transformers based on dissolved gas analysis. *Renewable & sustainable energy reviews*, 46, 201-209. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.052>

- Díaz-Chacón, J. M., Hernandez, C., & Arjona, M. A. (2016). Finite element and neural network approach for positioning a magnetic shunt on the tank wall of a transformer. *IET electric power applications*, 10(9), 827-833. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2016.0045>
- Edminister, J. A. (1993). *Schaum's outline of theory and problems of electromagnetics*. Second edition. McGraw-Hill.
- Elleuch, M., & Poloujadoff, M. (2003). Analytical model of iron losses in power transformers. *IEEE transactions on magnetics*, 39(2), 973-980. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2003.808591>
- Ge, L., Liu, X., Feng, H., Jiang, H., Zhou, T., Chu, H., . . . Wang, Z. (2022). The interaction between microwave and coal: A discussion on the state-of-the-art. *Fuel (Guildford)*, 314, 123140. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123140>
- Gibeault, J., & Kirkup, J. (1995). *Early detection and continuous monitoring of dissolved key fault gases in transformers and shunt reactors*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/EEIC.1995.482378>
- Gieras, J. F. (2017). *Electrical machines: Fundamentals of electromechanical energy conversion*. CRC Press.
- Girgis, R., & teNyenhuis, E. (2009). *Hydrogen gas generation due to moderately overheated transformer cores*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275706>
- Grover, F. W. (1973). *Inductance Calculations: Working Formulas and Tables*. Dover Publications, Inc.
- Hasan, S., Taib, S., Hardi, S., bin Abdul Razak, A. R., & Shukri, A. (2013). *Core loss characteristics analysis of power transformer under different frequencies excitation*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/PEOCO.2013.6564622>
- Hawezy, D. (2017). The influence of silicon content on physical properties of non-oriented silicon steel. *Materials science and technology*, 33(14), 1560-1569. <https://doi.org/10.1080/02670836.2017.1295519>
- Hitachi. (2021). *Circulating currents around core windows, Technical Standard* [Rajattu pääsy].
- Hitachi. (2022). *Circulating currents in core frame* [Rajattu pääsy].

- Hitachi. (2023). Core Main Dimension, Technical Standard [Rajattu pääsy]
- Hitachi. (2025). Core circulating currents, Awareness session with PL. TC CEU-Bad Honnef [Rajattu pääsy]
- IEC 60076-1. (2011). Power Transformers – Part 1: General. Edition 3.0
- IEC 60076-2. (2011). Temperature rise for liquid-immersed transformers
- IEC 60599. (2022). Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis. Edition 4.0
- Mikulić, S., & Žarko, D. (2026). Stray Losses in Structural Components of Power Transformers. *Energies (Basel)*, 19(2), 322. <https://doi.org/10.3390/en19020322>
- Mohan, N., Robbins, W. P., & Undeland, T. M. (2003). *Power electronics: Converters, applications and design* (3rd edition.). John Wiley & Sons.
- Olivares-Galván, J. C., Georgilakis, P. S., & Ocon-Valdez, R. (2009). A Review of Transformer Losses. *Electric power components and systems*, 37(9), 1046-1062. <https://doi.org/10.1080/15325000902918990>
- Pidlisniy O.S., O., & Lushchin, S. (2020). Improvement of the evaluation method of calculation of power losses in power transformer. *Elektrotehnika ta elektroenerhetyka*, 2, 32-39. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2020-2-4>
- Sihvola, A. H., Lindell, I. V., Sihvola, A., & Lindell, I. (2013). *Sähkömagneettinen kenttäteoria: 2, Dynaamiset kentät* (5. painos.). Gaudeamus Helsinki University Press.
- Siemens. (n.d.). *Simcenter MAGNET software*. Noudettu 19.3.2026 osoitteesta <https://www.siemens.com/en-us/products/simcenter/electromagnetics-simulation/magnet/>
- Thango, B. A., & Bokoro, P. N. (2022). Stray Load Loss Valuation in Electrical Transformers: A Review. *Energies (Basel)*, 15(7), 2333. <https://doi.org/10.3390/en15072333>
- Lindell, I. V., & Sihvola, A. H. (2002). *Sähkömagneettinen kenttäteoria: 1, Staattiset kentät* (4. korj. p.). Otatieto.
- Verkkonen, V. (2005). *Sähkökoneet – Muuntajat*. Kurssin oppimateriaali [Rajattu pääsy]. VAMK.

- Wang, Y., & Yuan, J. (2018). Calculation approach of reluctance in the magnetic circuit of transformer employed to convert into equivalent electric circuit. *Compel*, 37(5), 1668-1677. <https://doi.org/10.1108/COMPEL-12-2017-0552>
- Zou, M., Sima, W., Yang, M., Li, L., Yang, Q., & Sun, P. (2017). Improved low-frequency transformer model based on Jiles–Atherton hysteresis theory. *IET generation, transmission & distribution*, 11(4), 915-923. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0866>