

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikka

Tutkintotyö

Juha Setälä

PAPERITEHTAAN 20 KV VERKKO-OSUUDEN SYÖTÖN MUUTTAMINEN

Työn ohjaaja
Työn teettäjä

Tampere 2005

Lehtori Seppo Järvi
UPM-Kymmene Oyj Rauma, valvojana käyttöpäällikkö Timo
Pitkänen

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkötekniikka

Sähkövoimatekniikka

Setälä Juha

Tutkintotyö

Työn ohjaaja

Työn teettäjä

Paperitehtaan 20 kV verkko-osuuden syötön muuttaminen

59 sivua + 33 liitesivua

Lehtori Seppo Järvi

UPM-Kymmene Oyj Rauma, valvojana käyttöpäällikkö Timo Pitkänen

Joulukuu 2005

Hakusanat

keskijänniteverkko, kolmivaihemuuntaja, oikosulkuvirta, jännitteenalenema, nykyarvo

TIIVISTELMÄ

Tämän tutkintotyön aiheena oli paperitehtaan 20 kV verkko-osuuden syötön muuttaminen. Työssä piti selvittää teknistaloudelliset vaihtoehdot nykyisin syöttävän 30 MVA muuntajan korvaamiseksi.

Työssä tutkittiin eri muuntajavaihtoehtoja tekniseltä ja taloudelliselta kannalta. Tekniseltä kannalta perehdyttiin muuntajien rakenteisiin ja ominaisuuksiin, sekä verkon oikosulkuvirtoihin ja jännitteenalenemiin. Taloudelliselta kannalta perehdyttiin muuntajien häviötehoihin ja investointikustannuksiin. Näitä vertailemalla pyrittiin löytämään oikea vaihtoehto nykyisen muuntajan tilalle.

Verkkoa nykyisin syöttävää 30 MVA muuntajan vaihtoa ei voitu taloudellisuudella perustella, koska nykyarvo oli vanhalla muuntajalla yli puolet pienempi kuin uusissa muuntajaratkaisuisissa. Jos vanha muuntaja joka tapauksessa vaihdettaisiin uuteen, niin uuden päämuuntajan ratkaisu olisi taloudellisempi kuin välimuuntajan ratkaisu. Oikosulkuvirrat uuden päämuuntajan tapauksessa olivat kuitenkin melkein puolta suuremmat kuin välimuuntajan tapauksessa.

Uusien muuntajien tekniset tiedot ja laskelmat pitivät varmasti likipitäen paikkaansa. Suurin virhemarginaali tuli kuitenkin muuntajien taloudellisuuslaskelmissa, koska muuntajan investointiin liittyviä kustannuksia ei voitu tarkalleen tietää ennen varsinaisia tarjouspyyntöjä.

Tämä työ antoi suuntaa sille, että millä perusteella ja millä keinoin tätä asiaa kannattaisi tarkastella tulevaisuudessa.

TAMPERE POLYTECHNIC

Electrical Engineering

Electrical Power Engineering

Setälä Juha

The change of the paper mill's 20 kV input from the network

Engineering Thesis

59 pages, 33 appendices

Thesis Supervisor

Lecturer Seppo Järvi

Commissioning Company

UPM-Kymmene Oyj Rauma. Supervisor: Production Manager
Timo Pitkänen

December 2005

Keywords

medium voltage network, three-phase transformer, short-circuit
current, voltage drop, value today

ABSTRACT

The purpose of this study was the change of the paper mill's 20 kV input from the network. Technical and economical options to replace the 30 MVA transformer were studied.

Different kinds of transformers were studied from technical and economical points of view. Transformer's structure and quality, networks short-circuit current and voltage drops were studied in the technical point of view.

Transformers's power loss and investment costs were studied in the economical point of view. The right choice to replace the current transformer was investigated by comparing the different potential alternatives.

The change of the 30 MVA transformer that currently inputs the network was not economically justified because its value today is half of the new transformer solution's value. If the old transformer will anyway be changed the new main transformer solution would be more economical than the sub transformer solution. In the main transformer solution the possibility of short circuit current is twice as big as in the sub transformer solution.

The technical information and calculations of the new transformers were almost accurate. The biggest possible miscalculation was in the transformer's economical calculation because the costs related to transformer investments were not available before the real offer requests. This study gives direction how this matter should be observed in the future.

ALKUSANAT

UPM-Kymmene Oyj Rauman tehdas on tarjonnut minulle jo useana kesänä erilaisia sähköön liittyviä työtehtäviä, jotka ovat tukeneet vahvasti opiskelemaani sähkövoimatekniikan alaa. Työtehtävistä arvokkaimpana voidaan kuitenkin pitää tätä opinnäytetyötä, joka käsittelee Rauman paperitehtaan 20 kV verkko-osuuden syötön muuttamista.

Opinnäytetyön toteutumisesta haluan kiittää käyttöpäällikkö Timo Pitkästä ja kehitysinsinööri Iiro Karia, jotka ovat jaksaneet ohjata ja neuvoa opinnäytetyöhön liittyvissä asioissa. Kiitokset kuuluvat myös kaikille kesätöissä tutuksi tulleille työtovereille. Kiitokset kuuluvat myös lehtori Seppo Järvelle, joka on toiminut Tampereen ammattikorkeakoulun puolesta opinnäytetyöni ohjaajana.

Työni valmistumisesta ja opintojeni tukemisesta kiitos kuuluu äidilleni Eeva Setälälle, isälleni Markku Setälälle ja isoveljelleni Ari Setälälle. Suuren kiitoksen haluan osoittaa myös avopuolisolleni Jenni Ylöselle, joka jaksoi kannustaa ja tukea minua työn eri vaiheissa.

Tampereella 30. joulukuuta 2005

Juha Setälä

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

ALKUSANAT

SISÄLLYSLUETTELO	5
1 JOHDANTO	8
1.1 Tehtävän asettaminen	8
1.2 Työn tavoite ja tarkoitus	8
1.3 UPM-Kymmene Oyj Rauma	8
2 TEHTAAN JAKELUVERKKO	9
2.1 Jakeluverkon yleisesittely /1/	9
2.2 Keskijänniteverkko 20 kV	11
3 MUUNTAJAT	12
3.1 Yleistä	12
3.2 Muuntajatyypit	12
3.3 Neste-eristeinen ja kuivaeristeinen muuntaja	13
3.3.1 Neste-eristeinen muuntaja /4/	13
3.3.2 Kuivaeristeinen muuntaja /4/	14
3.4 Kolmivaihemuuntaja	15
3.5 Kolmikäämimuuntaja	16
3.6 Jännitteen säätö	17
3.6.1 Väliottokytkin /3/	17
3.6.2 Käämikytkin /3/	18
4 TEHTAAN 20 KV VERKON NYKYTILAN SELVITTÄMINEN	19
4.1 Kuormitus	19
4.1.1 Tehtaan oma kuorma	19
4.1.2 Aker Finnyardsin kuorma	21
4.1.3 Metsä-Botnian kuorma	23
4.2 Varayhteyksien tulevaisuus ja tarve	24
4.3 Muuntaja M4	25
5 PÄÄMUUNTAJAN M4 KORVAUSVAIHTOEHDOT	27

5.1	Uuden muuntajan tarvittava teho.....	27
5.2	Uusi päämuuntaja	28
5.3	Välimuuntaja	28
5.4	Syöttö Rauman Energialta.....	29
6	KORVAAVAN MUUNTAJATYYPIN MÄÄRITTELY.....	30
6.1	Neste-eristeinen vai kuivaeristeinen muuntaja /4/.....	30
6.2	Käämikytin vai väliottokytin.....	31
6.3	Suhteellinen oikosulkuimpedanssi	31
6.4	Uusi päämuuntaja	31
6.5	Välimuuntaja	32
7	LASKENTA.....	33
7.1	Oikosulkuvirtojen tarkastelu	33
7.1.1	Yleistä.....	33
7.1.2	Oikosulkuvirtojen laskeminen 20 kV kiskostossa.....	35
7.1.3	Tulokset	44
7.1.4	Suojareleiden muutostarpeiden määrittäminen	44
7.2	Jännitteenalenemien tarkastelu.....	46
7.2.1	Yleistä.....	46
7.2.2	Jännitteenalenemien laskeminen 0,69 kV kiskostossa.....	47
7.2.3	Tulokset	50
7.2.4	Jännitteen asetellut 20 kV verkossa.....	51
7.3	Taloudellisuuslaskelmat	52
7.3.1	Muuntajan häviöt /2/.....	52
7.3.2	Muuntajan kustannuslaskelma /4/	54
8	TULOSTEN TARKASTELU	56
8.1	Omat päätelmät.....	56
8.2	Tulosten ja tavoitteiden saavuttamisen arviointi	57
8.3	Käyttökelpoisuuden arviointi	58
8.4	Soveltamis- ja jatkomahdollisuuksien selvittäminen	58
9	YHTEENVETO	58
10	LÄHTEET	59

LIITTEET

- 1 6 kV, 10 kV ja 110 kV jakeluverkon pääkaavio
- 2 20 kV jakeluverkon pääkaavio
- 3 Paperitehtaan kartta
- 4 Esimerkkilaskenta oikosulkuvirrasta uudella päämuuntajalla
- 5 Oikosulkuvirta välimuuntajalla
- 6 Esimerkkilaskenta jännitteenalenemasta uudella päämuuntajalla
- 7 Jännitteenalenema välimuuntajalla
- 8 Esimerkkilaskenta muuntajien taloudellisuudesta

1 JOHDANTO

1.1 Tehtävän asettaminen

Tein tutkintotyöni UPM-Kymmene Oyj Rauman tehtaalle. Työn aiheeksi valittiin paperitehtaan 20 kV verkko-osuuden syötön muuttaminen. Työssä piti selvittää teknistaloudelliset vaihtoehdot nykyisin syöttävän 30 MVA muuntajan korvaamiseksi. Työ koostuu aiheeseen liittyvän materiaalin ja tiedon hankkimisesta, ja työn suunnittelusta.

1.2 Työn tavoite ja tarkoitus

Työn tavoitteena on paperitehtaan 20 kV verkko-osuuden syötön muuttaminen. Työ pohjautuu siihen, että nykyisin verkkoa syöttävä 30 MVA muuntaja on jo huomattavan iäkäs, ja tehtaan 20 kV verkko-osuuden kuormitus on vähentynyt huomattavasti vuosien varrella. Työssä tullaan vertailemaan myös eri vaihtoehtoja keskenään tekniikan ja taloudellisuuden kannalta.

1.3 UPM-Kymmene Oyj Rauma

UPM on maailman tämän hetken johtavia painopaperinvalmistajia. Aikakauslehtipaperimarkkinoilla yhtiö on selkeästi markkinajohtaja. UPM:n liikevaihto vuonna 2004 oli 9,8 miljardia euroa. UPM:llä on tuotantolaitoksia 16 maassa ja konsernin tuotteita myydään maailman kaikilla markkinoilla. Tärkeimmät markkina-alueet ovat EU-maat ja Pohjois-Amerikka. Näiden osuus liikevaihdosta on noin 85 %. Yhtiön yleisenä tavoitteena on olla alansa paras ja kiinnostavin yritys.

Raumalla on valmistettu paperia jo aina vuodesta 1969 lähtien. Näiden vuosien varrella tehdas on kasvanut yhdeksi maailman suurimmista aikakauslehtipaperitehtaista. Nykyään UPM:n Rauman tehtaalla PK1 ja PK4 valmistaa päällystettyjä LWC- papereita, ja PK 2 ja PK 3 päällystämättömiä SC-papereita mm. aikakauslehtiin, myyntikuvastoihin ja erilaisiin mainospainotuotteisiin. Rauman tehtaan tuotantokyky on 1 250 000 tonnia paperia vuodessa. Lisäksi Raumalla jatkojalostetaan sellua imukykyiseksi fluff- eli revintäselluksi, jota käytetään hygieniatuotteiden valmistukseen. Rauman tehtaalla työskentelee tällä hetkellä noin 1100 henkilöä. Liikevaihto oli 676 miljoonaa euroa vuonna 2004.

2 TEHTAAN JAKELUVERKKO

2.1 Jakeluverkon yleisesittely /1/

Tehdas liittyy valtakunnan sähkönjakeluverkkoon kahdella 110 kV avojohtolinjalla. 110 kV kytkinlaitoksilta sähkö siirretään kaapeleita pitkin päämuuntajille, jotka muuntavat jännitteen edelleen 20 kV, 10 kV ja 6 kV tasoille. Liitteessä 1 on esitetty pääkaavio 6 kV, 10 kV ja 110 kV jakeluverkosta Rauman tehdasalueella.

20 kV, 10 kV ja 6 kV jakeluverkkoja kutsutaan yleisesti keskijänniteverkoiksi. Järjestelmät ovat maadoittamattomia, joten yksivaiheinen maasulun suojaus voi olla hälyttävä. Keskijänniteverkon avulla sähkö siirretään edelleen jakelumuuntajille, jotka muuntavat jännitteen 690 V, 500 V, 400 V ja 230 V tasoille.

690 V ja 500 V jännitetasoa käytetään Rauman tehtaalla yleisesti moottorijännitteenä. Järjestelmät ovat maadoittamattomia, joten maasulun suojaus on toteutettu hälyttävänä ja siitä seuraa hälytys energiavalvomoon.

400 V ja 230 V jännitetasoa käytetään rakennusten sähköistykseen, kuten valaistukseen ja työmaasähköistykseen, sekä prosesseja ohjaaviin automaatiojärjestelmiin ja eräillä alueilla myös moottorijännitteenä. Tämä järjestelmä on maadoitettu. Tällä jännitteellä on huomattava erityisesti uusien teollisuusasennusten 5-johdinjärjestelmän niveltymisen vanhoihin 4-johdinjärjestelmiin. Uusilla osuuksilla käytetään hälytystä joka ilmaisee nollajohdon ja suojamaan yhteenkytkeytymisen kyseisen hälytyspiirin jälkeen.

Tehtaalla olevien laitteistojen laajuus on seuraavanlainen:

- Liittymäteho kantaverkkoon n. 450 MVA
- Keskimääräinen kuorma täydellä tuotannolla n. 300 MW
- 110 kV kytkinlaitokset 2 kpl
- 110 kV päämuuntajat 13 kpl
- 20 kV kytkinlaitokset 6 kpl
- 10 kV kytkinlaitokset 5 kpl
- 6 kV kytkinlaitokset 27 kpl
- Jakelumuuntajat 158 kpl
- Generaattorit 6 kV 2pl (72 MVA)
- Tahtimoottorit 10 kV, 6 kV 29 kpl
- Oikosulkumoottorit 10 kV, 6 kV 67 kpl.

Kaikki edelliset laitteistot ja niihin liitetyt alempijännitteiset laitteistot ovat UPM-Kymmene Oyj:n omistuksessa, hallinnassa ja vastuu niiden määräysten mukaisesta hoidosta kuuluu näin ollen yhtiölle itselleen.

Tehtaalla on myös varayhteyksiä, joita voidaan käyttää mahdollisissa häiriötilanteissa. Rauman Energian, Aker Finnyardsin ja Metsä-Botnian kanssa on 20 kV varayhteydet.

2.2 Keskijänniteverkko 20 kV

Keskijänniteverkko alkaa sähköasemalta, johon tuodaan kanta- tai alueverkossa useimmiten 110 kV jännite. UPM:n tehtaalla 110 kV jännite tulee omalta sähköasemalta kolmikäämimuuntajalle M4, joka muuntaa 110 kV jännitteen 20 kV ja 6 kV tasolle. 20 kV verkko on kolmivaiheinen ja sen jännite on hieman yli 20 kV. Liitteessä 2 on esitetty 20 kV jakeluverkon pääkaavio.

Sähkönjakeluverkot on rakennettu teollisuudessa usein renkaaksi, mutta niitä käytetään usein säteittäisinä. Tämä johtuu suojauksen toteuttamisesta ja tällöin myös häiriöiden rajaaminen on huomattavasti helpompaa. Säteittäisessä verkossa oikosulkuvirrat ovat pienempiä ja jännitteen säätö on helpompaa, kun taas rengasverkossa häviöt ovat pienempiä. Rengasverkkoja käytetään kuitenkin säteittäisinä jakamalla ne erottimin. Rengasverkon kalliimmat rakentamiskustannukset verrattuna säteittäiseen verkkoon saadaan takaisin, kun keskeytyskustannukset pienenevät häiriöalueen pienentyessä. Keskeisimmiltä osiltaan rengasverkko on huomattavan varmakäyttöinen.

Tehtaalla muuntajan M4 syöttämän 20 kV pääkytkinaseman 1B jälkeen 20 kV verkko jakautuu keskuskonttorille ja puutyötehtaalalle, josta se edelleen jakautuu Tikkalaan ja jätevesilaitokselle. Jätevesilaitokselta on myös varayhteydet Metsä-Botniaan ja Rauman Energian verkkoon. Pääkytkinasemalta 1B on myös varayhteys suoraan Aker Finnyardsin telakalle. Telakalle on varayhteys myös sahan ulkokytkeöstä. Liitteessä 3 on esitetty paperitehtaan kartta.

3 MUUNTAJAT

3.1 Yleistä

Muuntajalla muunnetaan jännite toiseksi jännitteeksi, ja niitä käytetään yleisesti sekä heikkovirta- että vahvavirtatekniikassa. Muuntajan ensiö- eli primäärikäämiin syötetään sähköenergiaa ja muuntajan toisio- eli sekundäärikäämi antaa energian kuormalle. Jännitteen suuruuden mukaan käämejä nimitetään yläjännite- ja alajännitekäämeiksi. Muuntajan sydän on useimmiten rautalevyä tai ferriittiä. Sydämen tehtävänä on johtaa magneettivuo kulkemaan molempien käämien läpi.

1900-luvun alussa muuntaja aiheutti sen, että vaihtosähkö syrjäytti melkein kokonaan tasasähkön. Muuntajat ovat hinnaltaan verraten edullisia ja niiden käyttö tulee suhteellisen halvaksi, koska niiden huoltotarve ja –kustannukset ovat melko pienet. Tämä taas johtuu siitä, että muuntaja on rakenteeltaan melko yksinkertainen, koska siinä ei ole liikkuvia osia. Nykyään muuntajia valmistetaan laajalla tehoalueella alkaen pienistä signaalimuuntajista aina sähkövoiman tehomuuntajiin asti. Sähkölaitostekniikassa muuntajien tärkeimmät tehtävät ovat jännitteen asettelu voimansiirron ja jakelun kannalta edulliseen arvoon sähköverkon eri osissa, eri jänniportaiden galvaaninen erottaminen toisistaan sekä jakeluverkkojen oikosulkuvirran rajoittaminen. /2/

3.2 Muuntajatyypit

Muuntajat voidaan niiden tehtävien perusteella jakaa seuraaviin ryhmiin:

- Tehomuuntajat, joiden tehtävänä on muuntaa jännite toiseksi jännitteeksi sähköenergian siirron vaatimien tarpeiden mukaisesti.
- Suojamuuntajat, joiden tehtävänä on eristää jokin sähkölaite yleisestä sähköverkosta.

- Mittamuuntajat eli jännite- tai virtamuuntajat, joiden tehtävänä on muuntaa jännite tai virta mittakojeille tai releille sopivaan arvoon. /3/

Voimamuuntajat voidaan jaotella rakenteensa perusteella seuraavasti: paisuntasäiliölliset öljyeristeiset muuntajat, hermeettiset muuntajat, valuharts- ja ilmaeristeiset kuivamuuntajat. Nykyään käytetyistä voimamuuntajista pääosa on öljyeristeisiä muuntajia. Hermeettisesti suljetussa muuntajassa verrattuna öljyeristeiseen muuntajaan ei ole paisuntasäiliötä.

3.3 Neste-eristeinen ja kuivaeristeinen muuntaja

3.3.1 Neste-eristeinen muuntaja /4/

Neste-eristeiset muuntajat jaetaan yleisesti kahteen ryhmään, hermeettisesti suljettuihin muuntajiin ja paisuntasäiliöllä varustettuihin muuntajiin.

Hermeettisesti suljetussa muuntajassa nestettä sisältävä tila on ilmatiivis ja se on täytetty kokonaan eristenesteellä. Muuntajan säiliön seinämät antavat periksi, kun muuntajan eristysaineena käytetty öljy tai mahdollisesti myös jokin muu eristeneste laajenee muuntajan lämpötilan kohoamisen vaikutuksesta. Lämpötilan noustessa ja eristenesteen laajentuessa syntyy muuntajan säiliön seinämiin painetta, jolloin lämmön siirtyminen nestesäiliön aallotetusta metallikuoresta ulkoilmaan paranee. Aallotettu muuntajan säiliö tehostaa muuntajan jäähdytystä korkeammissa lämpötiloissa ja sallii säiliönrakenteen joustamisen muuntajan sisäisten painenvaihteluiden mukaan. Säiliön sisätilat ovat kokonaan eristetty ulkoilmasta, jolloin rakenne estää tehokkaasti myös hapen pääsyn muuntajasäiliöön. Tämän vuoksi muuntajanesteen hapettuminen on hidasta ja säiliöön ei pääse ilmasta myöskään epäpuhtauksia. Huonoina puolina hermeettisestä muuntajasta voidaan mainita paineen aiheuttamat rasitukset muuntajarakenteisiin sekä kalliit eristenesteen vaihtamiskustannukset.

Paisuntasäiliöllistä muuntajarakennetta käytetään nykyään lähinnä suurilla tehoalueilla. Paisuntasäiliöllisessä muuntajassa säiliön rakenne ei jousta, vaan eristenesteen tilavuuden muuttuessa ylimääräinen neste varastoituu paisuntasäiliöön. Paisuntasäiliön pinnan korkeus siis vaihtelee nesteen lämpötilan ja laajenemiskertoimen mukaisesti. Tämä rakenne sallii muuntajanesteen tilavuuden muuttumisen vapaasti ilman muuntajasäiliöön kohdistuvia rasituksia ja näin ollen paine pysyy vakiona muuntajan sisällä. Muuntajan eristenesteen tilavuuden vaihdellessa paisuntasäiliössä, vaihtelee myös ilman määrä paisuntasäiliössä. Koska tässä rakenteessa ilma pääsee suoraan kosketukseen muuntajaöljyn kanssa, sitoutuu muuntajan eristeaineisiin happea, kosteutta ja erilaisia epäpuhtauksia. Tämä nopeuttaa puolestaan muuntajassa käytettävien eristeaineiden vanhenemisreaktioita ja vähentää niiden elinikää.

3.3.2 Kuivaeristeinen muuntaja /4/

Kuivaeristeinen muuntaja valmistetaan palamattomista tai ainakin vaikeasti syttyvistä materiaaleista, joiden palokuorma on hyvin pieni. Eräs yleisesti käytetty materiaali on epoksi-lasikuitueriste, joka voidaan mitoittaa kestämään samat koestusjännitteet kuin öljymuuntaja. Kuivamuuntaja voidaan valmistaa myös ilmaeristeiseksi, mutta silloin muuntajan ylijännitekestoisuus on pienempi kuin hartssieristyksellä.

Kuivamuuntajien jäähdystystapa on usein AN, mikä tarkoittaa luonnollista ilmajäähdystystä. Toinen yleinen jäähdystystapa on ANAN, mikä tarkoittaa koteloitua luonnollista jäähdystystä. Jossain kohteissa käytetään myös tehostettua jäähdystystä, joka toteutetaan tuulettimien ja puhaltimien avulla. Tällöin muuntajan kuormitusta voidaan nostaa jopa 50 % jatkuvassa käytössä.

3.4 Kolmivaihemuuntaja

Sähköenergia siirretään voimalaitoksilta kuluttajille käytännössä kolmivaihejärjestelmää käyttäen. Kolmivaihemuuntaja toimii kuten yksivaihemuuntaja, mutta se eroaa yksivaihemuuntajasta rakenteensa puolesta. Kolmivaiheinen muuntaja saadaan esimerkiksi kytkemällä kolme yksivaihemuuntajaa tähtikytkentään. Kolmivaihemuuntajan rautasydän koostuu tällöin kolmesta pylväästä ja niitä toisiinsa yhdistävistä ikeistä. Kolmivaihemuuntajassa jokaisen muuntajan magneettivuo kulkee omassa rautasydämässä. Kolmivaihejärjestelmässä jännitteet ovat 120 asteen vaihesiirrossa keskenään ja myös vuot noudattavat samaa 120 asteen vaihesiirtoa. /2/

Kytkenät

Kolmivaihemuuntajan vaihekäämit voidaan kytkeä joko tähti-, kolmio-, tai hakatähtikytkentään. Tähti- ja kolmiokytkentää käytetään molemmissa sekä ylä- että alajännitekäämityksissä. Hakatähtikytkentää käytetään puolestaan vain alajännitekäämityksissä. Seuraavassa kuvassa 1 on näistä kytkennöistä muodostetut kolmivaihemuuntajien standardoidut kytkennät.

Tunnusluku	Kytkenä	Osoitinkuvat		Kytkenät	
		YJ	AJ	YJ	AJ
0	Dd0				
	Yy0				
	Dz0				
5	Dy5				
	Yd5				
	Yz5				
6	Dd6				
	Yy6				
	Dz6				
11	Dy11				
	Yd11				
	Yz11				

Kuva 1 Kolmivaihemuuntajien standardoidut kytkennät /2/

Standardoidut kytkennät jakautuvat neljään kytkentäryhmään, joiden tunnusluvut ovat 0, 5, 6 ja 11. Jokaisessa kytkentäryhmässä on kolme kytkentää, joten muuntajissa on käytännössä valittavissa 12 erilaista kytkentävaihtoehtoa.

3.5 Kolmikäämimuuntaja

Kolmikäämimuuntajassa on yksi tulo ja kaksi lähtöä. Tämä on toteutettu asentamalla muuntajaan kolme käämiä. Muuntaja toimii tällöin aivan normaalisti poikkeuksena vain, että se syöttää kahta eri lähtöä, joiden jännite on erisuuri. Kolmikäämimuuntaja vähentää näin ollen tarvittavien laitteiden määrää sellaisessa tilanteessa, joissa yljännite on sama, mutta tarvitaan kuitenkin kaksi erillistä

lähtöä. Kolmikäämimuuntajan käyttö vähentää myös kokonaishäviöitä ja vähentää huollettavien laitteiden määrää kyseisessä verkossa.

3.6 Jännitteen säätö

Sähköverkossa tapahtuvien jännitevaihteluiden pienentämiseksi muuntajan jännitettä pitäisi pystyä säätämään. Muuntajan jännitettä säädetään muuntajan muuntosuhdetta muuttamalla. Yleensä muutetaan johdinkierroslukua yläjännitekäämissä, koska virta on pienempi yläjännitepuolella kuin alajännitepuolella. Jännitteen säätö toteutetaan käyttämällä joko käämikytintä tai väliottokytintä. /3/

3.6.1 Väliottokytin /3/

Väliottokytkimellä voidaan muuttaa muuntajan muuntosuhdetta vain ja ainoastaan muuntajan ollessa jännitteetön. Muuntaja on turvallisesti jännitteetön silloin, kun se on sekä ylä- että alajännitepuolelta irti sähköverkosta. Väliottokytкимиä käytetään käytännössä vain sellaisissa tapauksissa, jolloin muuntajan teho voidaan katkaista jännitteen säädön ajaksi. Väliottokytin ei siis sovellu jatkuvaan jännitteen säätöön. Esimerkkinä voidaan mainita, että jakelumuuntajissa käytetään yksinomaan väliottokytкимиä jännitettä säädettäessä.

Väliottokytintä ohjataan ohjaimella muuntajan kannelta. Väliottokytin on siirrettävä täydellisesti asennosta toiseen eikä sitä siis saa koskaan jättää kahden asennon väliin, koska silloin riskinä on muuntajan vioittuminen. Väliottokytkimen avulla voidaan toisiopuolen jännitteen tasoa tarvittaessa korjata. Säätöalue on tavallisesti $\pm 5\%$ tai $\pm 2 \cdot 2,5\%$.

3.6.2 Käämikytkin /3/

Käämikytkimellä voidaan muuntajan muuntosuhdetta muuttaa muuntajan ollessa jännitteellinen ja kuormitettu. Tästä johtuen käämikytkin soveltuu jatkuvaan jännitteen säätöön, jolloin se jännitemittaukseen yhdistettynä sähkölaitteena pitää sähköverkon jännitteen vakiona halutussa arvossa. Suurmuuntajissa, joissa tehoa ei voida katkaista, käytetään yleensä jännitteen säätöön käämikytkimiä.

Tähtikytkentää varten on olemassa nollapistekäämikytkimiä ja kolmiokytkentää varten vaihekäämikytkimiä. Nollapistekäämikytkin rakennetaan yleensä kolmivaiheisena eli siinä on yksi kolmivaiheinen kytkin.

Nollapistekäämikytkimessä sisäiset jännitteet ovat pieniä, joten eristysvaikeuksia ei kolmivaiherakenteisenakaan ole. Vaihekäämikytkimen eri vaiheiden välillä puolestaan vaikuttaa kolmiokytkennän vuoksi pääjännite. Tästä johtuvien eristysvaikeuksien vuoksi ne rakennetaan yksivaiheisiksi eli niissä on kolme yksivaiheista kytkintä. Näin ollen jokaisella vaiheella on oma käämikytkimensä.

Käämikytkintä käytettäessä kuorman saama jännite ei saa katketa säädön aikana. Käämikytkimen asennon vaihtoon kuluu aikaa noin 1/25 sekuntia. Jotta askelvastus mahdollisen vian sattuessa ei pääse palamaan, valvoo aikarele, että säätötoiminnot tapahtuvat määräajassa loppuun saakka. Poikkeustapauksissa myös käsikammella tehty säätö on myös vietävä loppuun saakka. Käämikytkintä ohjataan yleensä joko moottori- tai jousiohjaimen avulla. Moottoriohjaimessa moottori säätää välityksen avulla käämikytkintä. Jousiohjaimessa moottori puolestaan virittää ensin jousen, jonka avulla säätö tapahtuu.

Käämikytkimen säätöporras on usein n. 1,5 % ja portaita on useampia. Tavallisesti käytettyjä säätöalueita ovat esimerkiksi $+6 \cdot 1,67 \% = \pm 10 \%$, $+9 \cdot 1,67 \% = \pm 15 \%$ ja $\pm 9 \cdot 1,33 \% = \pm 12 \%$.

4 TEHTAAN 20 KV VERKON NYKYTILAN SELVITTÄMINEN

4.1 Kuormitus

Tehtaan 20 kV verkkoa syöttää vuonna 1960 valmistettu kolmikäämimuuntaja M4. Tämä syöttää 20 kV verkkoa, joka jakautuu keskuskonttorille ja puutyötehtaalle. Puutyötehtaalta verkko jakautuu edelleen kahteen osaan eli Tikkalaan ja sen kautta kalliosäilöön, sekä sahan ulkokytkeksen kautta jätevesilaitokselle, ratapölkkyalueelle ja itäportille. Lisäksi tehtaan 20 kV jakeluverkolla on varayhteydet Aker Finnyardsin telakalle, Metsä-Botnian sellutehtaalle sekä Rauman energiaan. 20 kV jakeluverkon pääkaavio löytyy liitteestä 2.

20 kV verkko-osuuden kuormitus on pienentynyt vuosien varrella huomattavasti. Tämä johtuu lähinnä siitä, että ennen muuntaja M4 syötti päätoimisesti myös telakkaa, mutta nykyään telakalle on jäljellä vain varayhteydet. Telakalle tulee nykyään oma syöttö Rauman Energialta.

4.1.1 Tehtaan oma kuorma

Muuntajan mitoituksen kannalta piti selvittää tehtaan 20 kV verkon nykyinen kuormitus. Tämän sai helpoiten selville tarkastelemalla muuntajan M4 lähtöjä. Niinpä jo aikaisemmin kesätöissä tutuksi tulleen sähköasentajan kanssa käytiin mittaamassa muuntajan M4 virtoja virtamuuntajan takaa virtapihtimittarin avulla. Mittasimme myös muuntajan toisiojännitteen Fluken yleismittarin avulla. Lisäksi asensimme Hiokin piirturin muuntajan tulokennoon, jotta näkisimme, että miten paljon 20 kV verkon kuormitus vaihtelee vuorokauden eri aikojen mukaan. Seuraavassa taulukossa 1 on mitatut arvot lähdeittäin, sekä lasketut arvot, joissa on otettu huomioon virtamuuntajien muuuntosuhteet.

Taulukko 1 Muuntaja M4 lähtöjen virta-arvot

LÄHDÖT	muuntosuhde A	mitattu I / A	laskettu I / A
Tulo M4	600 / 5	0,84	100,8
Puutyötehdas Kalliosäilö	300 / 5	1,65	99
Keskuskonttori	300 / 5	0,02	1,2

Taulukosta nähdään, että keskuskonttorille menevän virran osuus on huomattavan pieni verrattuna puutyötehtaalle ja kalliosäilöön menevästä virran osuudesta. Ennen mittauksia olikin jo tiedossa, että suurin kuormittaja 20 kV verkossa on jätevesilaitos, joten voidaan olettaa, että virtojen jakautuminen meni oikein. Lisäksi muuntajan toisiojännitteeksi mittasimme eri vaiheiden väliltä keskimäärin 105,8 V. Kun edellisen jännitteen arvo kerrotaan jännitemuuntajan muuntosuhteella (20 000 / 5 A), saadaan todelliseksi jännitteen arvoksi 21 160 V.

Kun tiedetään 20 kV verkon virrat ja jännite, niin saadaan laskettua verkon kokonaiskuorma eli verkon näennäisteho. Verkon näennäisteho lasketaan seuraavalla kaavalla

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (1)$$

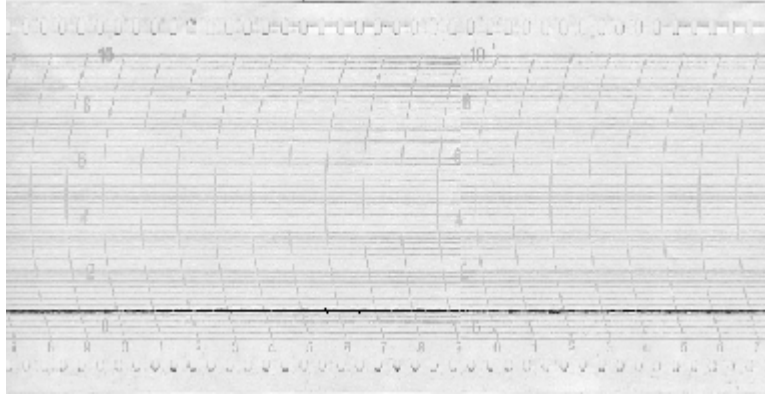
jossa

$U = 20$ kV verkon jännite

$I = 20$ kV verkon virta.

Jännitteen ollessa 21 160 V ja virran arvon ollessa 100,8 A saadaan verkon näennäistehoksi edellisen kaavan perusteella noin 3,7 MVA.

Hiokin piirturi oli muuntajan tulokennossa kiinni 48 tuntia eli kaksi vuorokautta. Piirturi piirsi kahden päivän aikana seuraavan kuvan 2 mukaista piirtoa.



Kuva 2 Hiokin piirturin piirtämä virtakäyrä

Kuvasta huomaamme, että 20 kV verkon kuormitus ei vaihtele juuri lainkaan huolimatta vuorokauden eri ajankohdista. Voidaan siis olettaa, että kuormitus on tasaista ja jatkuvasti lähellä laskemaani tehoa 3,7 MVA.

Tulevaisuudessa kuorma tulee kuitenkin jonkun verran kasvamaan, koska jätevesilaitokselle on suunnitteilla uusia moottoreita. Moottoreiden koosta tai lukumäärästä ei ole vielä tietoa, mutta ne täytyy kuitenkin huomioida muuntajaa mitoitettaessa.

4.1.2 Aker Finnyardsin kuorma

Aker Finnyardsin kuormitus ja varayhteyksien tarpeet selvisivät haastattelemalla kyseisen yrityksen sähköasioista vastaavaa henkilöä. Aikoinaan Aker Finnyardsin 20 kV verkkoa syötettiin täysipäiväisesti muuntajalla M4. Vuoden 2000 alussa kuitenkin Aker Finnyards sai Rauman Energialta omat kaksi 20 kV syöttöä, ja levy 1:lle ja konepajaan tulevat syötöt muuttuivat vain varayhteyksiksi.

Rauman Energialta tulee tällä hetkellä siis kaksi syöttöä Aker Finnyardsille. Toinen tulee pohjoisreuna 1:lle ja toinen materiaalivarastoon. 20 kV verkko on toteutettu säteittäisenä verkkona, mutta lähivuosien aikana on tarkoitus muuttaa verkko

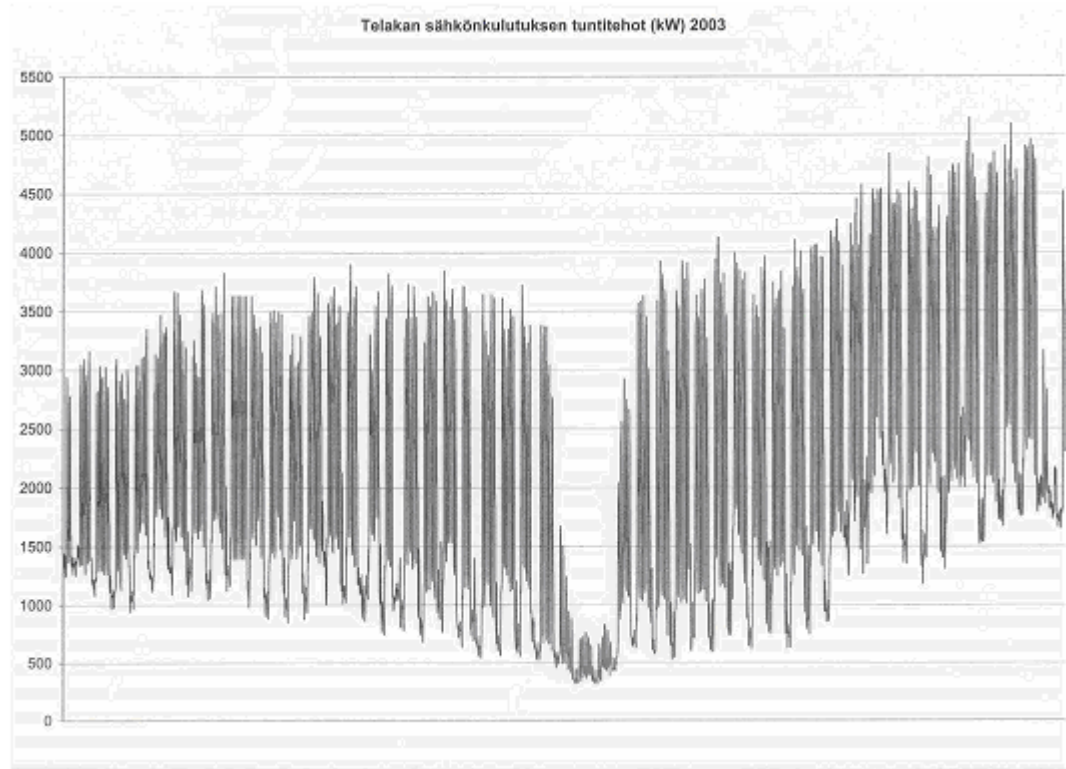
rengasverkoksi yhdistämällä levy 1 ja konepaja. Tämä muuttaa myös UPM:ltä tulevien varasyöttöjen tarvetta.

Tällä hetkellä on käytössä käytännössä kaksi varasyöttöä, koska yhden varasyötön kaapeli on rikki ja kalliosäilöstä tuleva varasyöttö on irroitettu Aker Finnyardsin puolelta. Tämä johtuu siitä, että kalliosäilöstä tulevan varasyötön kenno vapautettiin Rauman Energialta tulevan uuden syötön tarpeisiin.

Rengasverkko uudistuksen myötä myös varasyöttöjen tarve muuttuu. Levy 1:lle ja konepajaan tulevia syöttöjä ei enää tarvita. Sahan ulkokytkeöstä tuleva varasyöttö lohkohallille puolestaan pidetään. Lisäksi olisi tarve yhdistää uudelleen kalliosäilöstä tuleva varasyöttö. Tämä mahdollistuu, koska materiaalivarastoa ja pohjoisreuna 2:sta yhdistävä kaapeli käy tarpeettomaksi rengasverkon myötä. Näin ollen siitä vapautuu kenno kalliosäilöstä tulevaa varasyöttöä varten. Toki kalliosäilön kohtalosta ei vielä tiedetä. Jos kalliosäilö joskus puretaan, niin silloin varasyöttö voidaan vetää siinä tapauksessa suoraan Tikkalasta kalliosäilölle tulevaa nykyistä kaapelia hyväksi käyttäen. Käytännössä kyseistä kaapelia siis jatkettaisiin.

Aker Finnyards tarvitsee varasyöttöjä mahdollisten kaapelivikojen varalta tai jos tehdään joitakin muutoksia 20 kV verkkoon eli sitä ns. rempataan. Lisäksi yhtenä verkon heikkoutena on, että Rauman Energialta tulevat kaksi syöttöä tulevat samalta kojeistolta. Jos tämä kojeisto jostakin syystä hajoaisi, niin 20 kV verkko tulee alas täysin ilman näitä varasyöttöjä.

Aker Finnyardsin 20 kV verkon kuormitus vaihtelee aika lailla riippuen vuoden- ja vuorokaudenajoista. Talvella kuormitus on huomattavasti suurempi kuin esimerkiksi kesällä. Kuormitukseen vaikuttaa hyvin oleellisesti myös laivan rakennuksen työvaiheet. Vuonna 2003 sähkönkulutuksen tuntitehot olivat seuraavan kuvan 3 mukaiset.



Kuva 3 Telakan sähkönkulutuksen tuntitehot 2003

Kuvasta nähdään, että kuormituksen huippuarvo on noin 5,2 MW. Näennäistehona tämä on noin 7,5 MVA, kun tässä teollisuusverkossa $\cos \varphi$ on 0,7.

4.1.3 Metsä-Botnian kuorma

Metsä-Botnian kuormitus ja varayhteyden tarpeet selvisivät haastattelemalla kyseisen yrityksen sähköasioista vastaavaa henkilöä. Metsä-Botnian varayhteys on rakennettu noin pari vuotta sitten ja se on kaksi suuntainen, eli kumpi vain joko UPM tai Metsä-Botnia saa virtaa tarpeen vaatiessa. Käytännössä varayhteys on kuitenkin olemassa UPM:n jätevesilaitosta varten.

Seisokin aikana Metsä-Botnia voi kuitenkin tarvita varasyöttöä UPM:ltä.

Tällöinkin vaihtoehtona on ostaa sähköä joko Rauman Energialta tai UPM:ltä.

Seisokin aikana kuormitus on 4 – 6 MW luokkaa. Näennäistehona tämä on noin 8,6 MVA, kun tässä teollisuusverkossa $\cos \varphi$ on 0,7.

Pahin tilanne olisi, jos Metsä-Botnian tehdas pitäisi saada kunnolla käyntiin UPM:n 20 kV verkon avulla. Tämä tarkoittaisi käytännössä sitä, että Metsä-Botnian 110 kV ja 20 kV syötöt olisivat samanaikaisesti alhaalla. Tämä on kuitenkin todella epätodennäköistä ja lähinnä vain teoreettinen ajatus. Tarvittava teho nousisi tässä tapauksessa päälle 20 MW, koska soodakattila, syöttövesipumput ja oma energiantuotanto pitäisi saada käyntiin. Käynnistykseen kuluisi aikaa noin yksi vuorokausi. Tässä tapauksessa muuntajan koko nousisi huomattavan suureksi, sekä UPM:n 20 kV verkko ei todennäköisesti kestäisi tätä. Tätä vaihtoehtoa ei siis kannattane sen enempää tarkastella todellisena vaihtoehtona.

4.2 Varayhteysien tulevaisuus ja tarve

Tulee vääjäämättä mieleen, että mikä on UPM:n tarve säilyttää ylipäättänsä varayhteys Metsä-Botniaan ja telakkaan. Ilman varayhteyksiään tarvittavan muuntajan koko tippuisi noin kolmannekseen.

UPM ja Metsä-Botnia ovat hyvässä yhteistyössä jo metsä-Botnialta tulevan sellunkin takia, joten varayhteys säilyminen on ehkä luonnollista. Metsä-Botnian kanssa oleva varayhteys on järkevää säilyttää, koska pääosin tämän varayhteys avulla UPM varmistaa jätevesilaitoksen sähkön saannin. Jätevesilaitoksen sähkön saanti on turvattu, koska muuten syntyy huomattavia ongelmia jäteveden käsittelyssä. Myös konttoreiden valaistukset on turvattu, jotta normaali työnteke mahdollistuu.

Telakan varasyöttöjen olemassaoloa voidaankin kyseenalaistaa enemmän, koska telakalla ja UPM:llä ei muuten ole enää hirveästi yhteistyötä. Telakka tarvitsi varasyöttöä viimeksi kesällä kaapelin rikkoutumisen takia, mutta siitä on aikaa, kun UPM olisi tarvinnut sähköä telakalta. Voidaan kuitenkin ajatella, että telakan varasyötön avulla saadaan edelleen varmemmaksi jätevesilaitoksen sähkön saanti. Jos Metsä-Botnialta ei saataisiinkaan sähköä varasyöttöä pitkin, niin sitten sitä saadaan telakalta. Telakan syöttö onkin lähinnä varmennus varmennukselle.

4.3 Muuntaja M4

Muuntaja M4 on kolmivaihemuuntaja, jossa on yksi tulo, mutta kaksi lähtöä. Tulojännite on 110 kV ja lähdöt ovat 20 kV ja 6 kV. Kyseessä on siis muuntaja, jossa on kolme käämiä. Tällaista muuntajaa kutsutaan kolmikäämimuuntajaksi. Teholtaan muuntaja on 30/20/20 MVA. Seuraavassa kuvassa 4 on esitetty kyseisen muuntajan arvokilpitiedot.

ABB Transmit Oy		ABB					
3 -v. muuntaja	Laji	KTRU 2612 K 803	Nro	548101	Valmistusvuosi	1980	CE
Standardit	VDE	Kytkenä	YNyn0d11	Jäähdytystapa	ONAF	50	Hz
U-V-W	30000	kVA	110600	+ - 9 x 1.6 %	V	137 - 157 - 184	A
u _n -v _n -w _n	20000	kVA	21500		V	537	A
u-v-w	20000	kVA	6300		V	1833	A
Eristystaso				Symm. oikosulkukestoisuus			
U-V-W-MP	LI 550 AC 230			kV		x I _N	s
u _n -v _n -w _n -mp _n	LI 125 AC 50			kV		x I _N	s
u-v-w	LI 75 AC 28			kV		x I _N	s
Suunta	U-V-W/u _n -v _n -w _n		U-V-W/u-v-w		u _n -v _n -w _n /u-v-w		
Tehoperusta	20000		20000		20000		
Säätöasento	1	10	19	10	1		
Oikosulkuimpedanssi	13.71		9.47		3.56		
Oikosulku-resistanssi	0.44		0.45		0.41		
Nollaimpedanssi							
Tyhjäkäyntihäviöt	29.7	kW	Kokonaispaino	79400	kg	Nostettavan laatikon paino	
Tyhjäkäyntiteho	70	kVA	Öljyn paino	26000	kg	Kuljetuspaino öljyineen	69000
Jäähdyttimien tehontarve	3.5	kW	Aktiivisen osan paino	39500	kg	Kuljetuspaino öljyittä	45500
Laatikko	ei tyhjänkestävä						
Pääsuhteita suhteita v. 1992. Puollon työnnumero 2770RA							

Kuva 4 Muuntajan M4 arvokilpitiedot

Nykyiseen käyttöön eli 20 kV jakeluverkon syöttämiseen muuntaja on jo aika lailla ylimitoitettu, koska Aker Finnyardsin kuorma on jäänyt pois vain varayhteyksien varaan. Lisäksi 6 kV verkko-osuutta syötetään nykyään muualta, joten se yhteys on myös tarpeeton.

Huolto

Muuntaja on valmistettu jo vuonna 1960. Valmistumisen jälkeen muuntajalle on tehty lukuisia erilaisia huoltotoimenpiteitä seuraavan taulukon 2 mukaisesti.

Taulukko 2 Muuntajan M4 huollot

M4 huollot			
Vuosi	Tarkastus	Lisätietoja	Tarkastaja
2002	Yleishuolto ja -tarkastus	Säiliön tiiviste 1 kpl	ABB
2002	Muuntajaöljyn analyysi	Öljy käyttökelpoista ja muuntaja kunnossa	ABB
2001	Eristysöljyn laboratoriotesti	Kunnossa	Vattenfall
2001	Muuntajaöljyn kaasuanalyysi	Kunnossa	Vattenfall
1997	Yleishuolto ja -tarkastus	Muuntajan suojalaitteet kojeistettu, käämikytkimen säiliön tiiviste uusittu	ABB
1992	Muuntajaöljyn tutkiminen	Muuntaja kunnossa	Strömberg
1992	Täyshuolto	Muuntaja kunnossa	ABB Strömberg
1987	Yleishuolto ja -tarkastus	Ohjaimen liittimet pahoin hapettuneet	Strömberg
1982	Yleishuolto ja -tarkastus + öljynäyte	Tiivisteet vuotivat useasta paikasta, öljy käyttökelpoista	Strömberg
1975	Yleishuolto ja -tarkastus	Ilmankuivaimen patteri vaihdettava, kansiluukkujen ruuveista pientä vuotoa	Strömberg
1970	Yleishuolto ja -tarkastus	Muuntajassa jonkin verran vuotoja ja ruostetta, vaihdettiin korkeampi öljysäiliö	Strömberg
1964	Yleishuolto ja -tarkastus	Kunnossa	Strömberg

Yleishuolloissa on tarkastettu mm. muuntajan suojalaitteet, pintakäsittely, öljynäytteet, varusteet ja vuodot. Käämikytkimen osalta on tarkastettu tehokytkin, käyttöakselisto, ruuvien lukitus ja voitelu. Ohjaimen osalta on tarkastettu puolestaan sähköiset toiminnot, mekaaniset toiminnot, ruuvien lukitus ja voitelu.

Täyshuolto muuntajalle on suoritettu 1992, jolloin tarkistettiin kytkentäryhmä, käämitykset, resistanssit, oikosulkuhäviöt ja –impedanssit, tyhjäkäyntihäviöt ja –teho, kapasitanssit, eristysvastukset sekä tehtiin vaihtojännitekokeet.

Muuntaja on ollut käytössä jo 45 vuotta, joten se on jo melko iäkäs muuntajaksi. Tulevaa elinikää sille on vaikea ennustaa, mutta elinikää voisi olla vielä jäljellä arviolta noin 20 vuotta. Toisaalta tämän hetkinen muuntajan kuormitus on vain reilut 20 % muuntajan nimellisestä tehosta, joten elinikää voisi olla vielä enemmänkin jäljellä.

5 PÄÄMUUNTAJAN M4 KORVAUSVAIHTOEHDOT

5.1 Uuden muuntajan tarvittava teho

Edellä on uuden muuntajan mitoittamista varten selvitetty UPM:n oman 20 kV verkon kuormitus, sekä lisäksi Metsä-Botnian ja Aker Finnyardsin mahdolliset kuormitukset, jos varayhteyksiä tarvitaan. Seuraavassa taulukossa 3 on esitetty nämä kuormitukset.

Taulukko 3 UPM:n, Metsä-Botnian ja Aker Finnyardsin kuormitukset

Kuormittaja	S / MVA
UPM	3,7
Aker Finnyards	7,5
Metsä-Botnia	8,6

Kuitenkaan uutta muuntajaa ei mitoiteta näiden kaikkien kuormien summan mukaan, vaan UPM:n ja toisen suuremman kuorman mukaan, eli UPM:n ja Metsä-Botnian mukaan. Tämä siksi, että on hyvin epätodennäköistä, että UPM joutuisi syöttämään samanaikaisesti varayhteyksien kautta sekä Metsä-Botniaa että telakkaa.

UPM:n ja Metsä-Botnian kuormitusten summa on 12,3 MVA. Muuntajaa mitoitettaessa täytyy kuitenkin aina laskea myös hieman varaa tulevaisuutta varten, jos kuormitus jostain syystä tuleekin vähän kasvamaan. Nyt onkin jo tiedossa, että jätevesilaitokselle on tulevaisuudessa tulossa lisää moottoreita, mutta niiden koosta tai määrästä ei ole vielä tarkempaa tietoa. Muuntajan sopivaksi kooksi voitaisiin näin ollen valita esimerkiksi 16 MVA.

5.2 Uusi päämuuntaja

Yhtenä vaihtoehtona on, että vanha 30 MVA päämuuntaja korvattaisiin uudella pienemmällä kolmivaiheisella päämuuntajalla, joka muuttaa 110 kV jännitteen 20 kV jännitteeksi. Kolmikäämimuuntajaa ei enää tarvittaisi, koska 6 kV kiskostoa syötetään nykyään muualta, joten tavallinen kolmivaiheinen muuntaja riittäisi nykyiseen tarkoitukseen. Muuntajan teho tulisi olemaan noin 16 MVA.

Positiivista tässä vaihtoehdossa olisi, että uusi päämuuntaja vaihdettaisiin vain vanhan päämuuntajan tilalle. Näin ollen ei tulisi huomattavia muutoksia verkon rakenteeseen, ja myös rakennuskustannukset jäisivät melko pieniksi, koska vanhaa muuntajarakennusta voitaisiin käyttää hyväksi, kuten myös vanhoja tulo- ja lähtökennoja.

Negatiivista tässä vaihtoehdossa tulee todennäköisesti olemaan lähinnä tarvittavan muuntajan hinta. Lisäksi myös se, että jos muuntajan paikkaa tarvittaisiin johonkin muuhun tarkoitukseen, niin se ei olisi enää tämän vaihtoehdon myötä mahdollista.

5.3 Välimuuntaja

Toisena vaihtoehtona olisi, että 20 kV verkon syöttö toteutettaisiinkin välimuuntajan avulla. Tässä tapauksessa välimuuntaja voitaisiin sijoittaa esimerkiksi puutyötehtaalle, joka on jäänyt nykyisin lähinnä vain varastotilaksi. Muuntajan teho tulisi olemaan sama kuin edellisessäkin vaihtoehdossa eli 16 MVA.

Syöttö välimuuntajalle otettaisiin 6 kV kiskostosta (ks. Liite 1, 15 D), koska siellä olisi tällä hetkellä tähän varaa. Muuntajan M13 teho on 30 MVA, mutta sen kuormitus on tällä hetkellä vain noin 3,3 MVA. Välimuuntaja tulisi siis olemaan sellainen, että se muuttaa 6 kV jännitteen 20 kV jännitteeksi.

Tämän vaihtoehdon mahdollisesta toteutuksesta tulee kuitenkin enemmän rakennustöitä kuin edellisessä vaihtoehdossa. Täytyy vetää syöttökaapeli 15 D:stä puutyötehtaalalle. 15 D:hen pitää rakentaa lisää myös yksi lähtökenno ja puutyötehtaalalle yksi uusi tulokenno. Lisäksi puutyötehtaalalle täytyy rakentaa muuntajalle oma muuntajatila, vaikka se voitaisiinkin ehkä sijoittaa puutyötehtaan sisälle.

Huonoa tässä vaihtoehdossa kuitenkin on, että muuntajan M13 syöttämässä 6 kV kiskostossa on tällä hetkellä varaa, mutta entä tulevaisuudessa. Entäpä jos tulevaisuudessa kuormitus nousisikin niin suureksi, että muuntajan M13 teho ei enää nykyisellään riittäisikään. Siinä tapauksessa jouduttaisiinkin lisäämään uusi muuntaja rinnalle tai järjestelemään tehtaan syöttöjä uudelleen. Edellinen johtuisi todennäköisesti vain ja ainoastaan siitä, että 20 kV verkon syöttö päätettiin siirtää otettavaksi sieltä.

Positiivista tässä vaihtoehdossa olisi kuitenkin se, että nykyisen päämuuntajan paikka vapautuisi johonkin muuhun käyttöön tarpeen niin vaatiessa. Myös välimuuntajan hinta tulee todennäköisesti olemaan pienempi kuin uuden päämuuntajan.

5.4 Syöttö Rauman Energialta

Tehtaalla on vain yksi 20 kV verkko ja sen kuormitus on melko pientä. Voitaisiin siis ehkä myös ajatella, että nykyisen 20 kV verkon syöttö tilattaisiinkin esimerkiksi Rauman Energialta. Näinhän tapahtuu nykyään jo esimerkiksi Aker Finnyardsilla. Tässä vaihtoehdossa tulee kuitenkin vastaan UPM:n ns. periaate, että aitojen sisäpuolella pyritään tekemään kaikki itse. Näin ollen pystytään itse vaikuttamaan sähkön saantiin ja varmuuteen, eikä olla muista niin riippuvaisia. Rauman Energian puolella olisi varmasti saman verkon takana myös muuta kuormaa ja tämän perusteella sähkökatkokset tulisivat varmasti lisääntymään moninkertaisesti nykyiseen verrattuna. Toki syötön toimivuudesta ja

varayhteydestä olisi vastuussa varmasti Rauman Energia. Mutta voidaan kyllä pohtia, että miten tämä uudistus vaikuttaisi UPM:n toimintatapoihin? Toisaalta Rauman Energia ei varmastikaan ottaisi tällaista teollisuuden keskijänniteverkkoa hoitaakseen, josta löytyy niinkin isoja kuin 800 kW oikosulkumoottoreita. Käynnistyessään edelliset moottorit aiheuttaisivat niin isoja virtapiikkejä verkossa, että Rauman Energian muut kuormat kärsisivät tästä liiaksi. Tämän vaihtoehdon käsittelemisen todellisenä vaihtoehtona voi siis tällä hetkellä vielä unohtaa vedoten edellisiin käytännön asioihin.

6 KORVAAVAN MUUNTAJATYYPIN MÄÄRITTELY

6.1 Neste-eristeinen vai kuivaeristeinen muuntaja /4/

Öljyeristeinen muuntaja tarjoaa hyvän teknisen ratkaisun keskijännitealueelle, vaikka se aiheuttaakin mahdollisen paloturvallisuus- sekä ympäristöriskin. Riskinä on, että muuntajarakenteessa voi syntyä öljyvuohto esimerkiksi jonkin pitkäaikaisen rasituksen seurauksena tai että muuntajaöljy voi syttyä palamaan liian korkean lämpötilan seurauksena.

Kuivamuuntajien haittapuolina voidaan pitää korkeampaa hankintahintaa, suurempia tyhjäkäyntihäviöitä sekä suurempaa melutasoa verrattuna öljymuuntajiin. Hyviä puolia kuivamuuntajassa puolestaan ovat pieni palokuorma, ympäristöystävällisyys sekä parempi lyhytaikainen kuormitettavuus.

6.2 Käämikytkin vai väliottokytkin

Käämikytkimen ja väliottokytkimen rakennetta sekä niiden teknisiä ominaisuuksia on käsitelty jo edellä kohdassa 3.5.

Uuden päämuuntajan tapauksessa kyseeseen tulee käämikytkimellä varustettu muuntaja, koska päämuuntajassa on yleisen periaatteen mukaan oltava käämikytkin. Välimuuntajan tapauksessa riittää väliottokytkimellä varustettu muuntaja, koska välimuuntajaa syöttää toinen päämuuntaja, jossa on jo jännitteen säätö.

6.3 Suhteellinen oikosulkuimpedanssi

Suhteellinen oikosulkuimpedanssi Z_k valittiin niin pieneksi kuin tämän kokoisella muuntajalla se on kohtuullisella hinnalla ja työllä mahdollista. Edellinen siksi, että jännitteenalenema saataisiin pysymään mahdollisimman pienenä. Oikosulkuimpedanssiksi Z_k valittiin näin ollen 6 %.

6.4 Uusi päämuuntaja

Uuden päämuuntajan näennäisteho on 16 MVA ja se vaihtaa 110 kV jännitteen 20 kV jännitteeksi. Öljyeristeinen muuntaja tarjoaa hyvän teknisen ratkaisun keskijännitealueelle, vaikka se aiheuttaakin mahdollisen paloturvallisuus- sekä ympäristöriskin. Suhteelliseksi oikosulkuimpedanssiksi valittiin 6 %, jotta jännitteenalenema muuntajassa saataisiin mahdollisimman pieneksi kohtuullisella hinnalla. Muuntajassa on myös käämikytkin, jolla voidaan muuttaa muuntajan muuntosuhdetta muuntajan ollessa jännitteellinen ja kuormitettu. Käämikytkimen säätöalue on $\pm 9 \cdot 1,67$ % eli siinä on yhteensä 19 eri asentoa. Muuntajan jäähdytystä voitaisiin lisätä käyttämällä tuulettimia eli muuntajan jäähdytystapa

olisi ONAF, jolloin muuntajaa voisi tarpeen vaatiessa kuormittaa hieman suuremmallakin teholla.

6.5 Välimuuntaja

Välimuuntajan näennäisteho on 16 MVA ja se vaihtaa 6 kV jännitteen 20 kV jännitteeksi. Öljyeristeinen muuntaja tarjoaa hyvän teknisen ratkaisun keskijännitealueelle, vaikka se aiheuttaakin mahdollisen paloturvallisuus- sekä ympäristöriskin. Suhteelliseksi oikosulkuimpedanssiksi valittiin 6 %, jotta jännitteenalenema muuntajassa saataisiin mahdollisimman pieneksi kohtuullisella hinnalla. Muuntajassa on väliottokytkin, jolla voidaan muuttaa muuntajan muuntosuhdetta vain muuntajan ollessa jännitteetön. Säätoalue on tavallisesti $\pm 2 \cdot 2,5$ %. Muuntajan jäähdytystä voitaisiin lisätä käyttämällä tuulettimia eli muuntajan jäähdytystapa olisi ONAF, jolloin muuntajaa voisi tarvittaessa kuormittaa hieman suuremmallakin teholla.

Muut työt

Välimuuntaja vaihtoehdon mahdollisesta toteutuksesta tulee kuitenkin enemmän rakennustöitä kuin edellisessä vaihtoehdossa. 15 D:hen pitää rakentaa lisää yksi 6 kV lähtökenno, ja puutyötehtaan välimuuntajalle yksi uusi tulokenno. Lisäksi puutyötehtaalle täytyy rakentaa muuntajalle oma muuntajatila, vaikka se voitaisiinkin ehkä sijoittaa puutyötehtaan sisälle.

Lisäksi täytyy vetää syöttökaapeli 15 D:stä puutyötehtaalle. Välimuuntajan tehon ollessa 16 MVA ja jännitteen ollessa 6 kV saadaan yhtälön 1 perusteella kaapelissa kulkevan virran arvoksi maassa noin 1540 A. Tämän virran perusteella kaapeliksi voidaan valita seuraava virran arvoltaan suurempi maakaapeli. Tämä voisi olla esimerkiksi Pirellin alumiinijohtiminen PEX-eristeinen 1-johtiminen 10 kV voimakaapeli, joka on AHXCMK-WTC 2 · 3 · 1 · 800 Al /35 Cu. Edellinen

tarkoittaa siis sitä, että siinä on kaksi kolmen kaapelin nippua tasossa maassa, jossa jokainen yksittäinen kaapeli on AHXCMK-WTC 1 · 800 Al / 35 Cu. Tarvittava kaapelin pituus voisi olla tehdasalueen kartan mukaan noin 210 m.

7 LASKENTA

7.1 Oikosulkuvirtojen tarkastelu

7.1.1 Yleistä

Oikosulku tarkoittaa pienen impedanssin kautta olevaa yhteyttä kahden potentiaaliltaan erisuuruisen tai erivaiheisen johtimen tai rakenteen välillä. Oikosulun seurauksena käyttötaajuinen virta voi saavuttaa ainakin kertalukua suurempia tai jopa 30-40 kertaisia nimellisvirtoja kyseisessä virtapiirissä. /5/

Oikosulkuvirtojen hallinnalla on keskeinen merkitys erityisesti juuri teollisuuden sähköjakeluverkoissa, koska etäisyydet ovat lyhyitä ja oikosulkuvirrat yleensä suuria. Teollisuuslaitosten jakeluverkoissa on muuntajia, omia generaattoreita ja paljon esimerkiksi oikosulkumoottoreita, minkä takia oikosulkuvirrat pyrkivät kasvamaan suuriksi. Oikosulkuvirtojen olisi kuitenkin oltava mahdollisimman pieniä turvallisen toiminnan takaamiseksi ja vaurioiden välttämiseksi. /6/

Sähköjakeluverkon eri osat on mitoitettava kestäämään oikosulkuvirtojen termiset ja sähködynaamiset vaikutukset. Mitoittamista varten on tunnettava oikosulkuvirtojen suuruudet verkon eri osissa. Suojauksen kannalta on tärkeää tuntea oikosulkuvirtojen suuruus erilaisissa syöttötilanteissa nykyhetkellä. Mitoituksessa on otettava huomioon myös mahdollisesti tulevaisuudessa tapahtuva kehitys. /6/

Kolmivaihejärjestelmässä oikosulku voi käsittää kaikki vaiheet, jolloin puhutaan kolmivaiheisesta oikosulusta. Puolestaan kaksivaiheinen oikosulku käsittää kaksi vaihetta, ja yksivaiheinen oikosulku muodostuu maadoitetun verkon vaiheen ja maan väliin. Oikosulun tavallisimpia aiheuttajia ovat ylijännitteet sekä virheelliset tai epätarkoituksenmukaiset kytkennät, tai virheelliset käyttötoimenpiteet. Eristeiden vanheneminen, likaantuminen ja kostuminen lisäävät myös oikosulun riskiä. Avojohtoilla puolestaan puun oksat ja linnut ovat niitä tavallisimpia oikosulun aiheuttajia, ja ilkvallankaan mahdollisuutta ei voi laskea pois. /6,5/

Oikosulun välittömät vaikutukset ovat oikosulkuvirran aiheuttamina mekaanisia ja termisiä. Mekaaniset vaikutukset koostuvat erilaisista sähkölaitteisiin vaikuttavista voimista, ja termisiä vaikutuksia ovat puolestaan esimerkiksi johtimien ja eristimien lämpenemiset ja lämpölaajenemiset. Välillisiä vaikutuksia ovat esimerkiksi valokaari-ilmiöt. Normaalitylanteessa oikosulkuvirran vaikutukset eivät ylitä laitteiston oikosulkulujuutta. Jos suojaus toimii, niin vikapaikka eroaa nopeasti muusta verkosta ja näin ollen vaikutukset jäävät usein vähäisiksi. Laajempaan seurauksena voi tulla kuitenkin käyttöhäiriö, jolloin vika paikallistetaan ja erotetaan terveestä verkosta. Se, että saadaanko vikapaikan takana olevalle verkon osalle toimitettua sähköä, riippuu verkon rakenteesta. Sähkön jakelun keskeytymisen lisäksi oikosulku aiheuttaa jänniteheilahteluja rinnakkaisissa ja ylemmissä verkon osissa ja siten myös sähkön laadun huononemista. Jänniteheilahtelut voivat aiheuttaa ongelmia esimerkiksi moottorikäyttöissä ja valaistuksessa. /5/

Jos oikosulkuvirta aiheuttaa muuallakin vaurioita kuin itse alkuperäisessä vikapaikassa, on kyseessä silloin oikosulkulujuuden ylittyminen. Jos tällainen tapahtuu, on se yleensä merkki siitä, että suunnittelussa tai sen toteutuksessa on tapahtunut virhe tai suunnittelun pohjalla olevat lähtötiedot ovat olleet väriä. Oikosulkulujuuden ylittyessä oikosulun seurausten luonne muuttuu merkittävästi. Oikosulkuvirta voi tässä tapauksessa aiheuttaa vaurioita hyvinkin kaukana verkon alkuperäisestä vikapaikasta. Tästä puolestaan seuraa häiriöiden laajeneminen ja niiden keston lisääntyminen vian paikallistamisvaikeuksien vuoksi. Näin syntyvät laitevauriot ovat usein vaikeasti korjattavia. Tällaisia vaurioita ovat esimerkiksi

katkaisimien tuhoutuminen, virtamuuntajan tai erottimen vaurioituminen, avojohtojen köysijatkosten aukeaminen ja kaapeleiden kunnan huononeminen. Usein edellisiin vauriotapoihin liittyy myös riski henkilöturvallisuuden huononemisesta. /5/

Tavallisin oikosulkulujuuden ylittymisen syy on laitosten kasvusta johtuva liian suurten muuntajien käyttö. Toinen syy on verkkojen laajenemisen ja konetehton lisääntyminen, jolloin oikosulkuvirrat kasvavat niiden seurauksena. Myös muuntajien rinnankäyttö lisää oikosulkuvirtoja. /5/

7.1.2 Oikosulkuvirtojen laskeminen 20 kV kiskostossa

Teollisuussähköverkot ovat yleensä mm. käyttövarmuussyistä maasta erotettuja, joten verkon oikosulkutapaukset rajoittuvat kaksi- ja kolmivaiheisiin oikosulkuihin. Oikosulkuvirtoja laskettaessa ominaisoikosulkutehooon perustuva menetelmä on ehkä helpoin, mutta kun halutaan laskea oikosulkuvirrat tarkemmin ja saada selville myös vaihekulmat, on käytettävä Theveninin menetelmää.

Esimerkkilaskenta UPM:n 20 kV kiskoston oikosulkuvirroista on liitteessä 4. Siinä vanha päämuuntaja on korvattu uudella päämuuntajalla. Liitteessä 5 on taas toinen esimerkki, jossa välimuuntaja on sijoitettu puutyötehtaalle.

7.1.2.1 Syöttävä verkko

Syöttävästä verkosta tunnetaan joko alkuoikosulkuvirta I_{kv}'' tai näennäinen alkuoikosulkuteho S_{kv}'' . Tällöin syöttävän verkon impedanssi Z_{kv} saadaan laskettua seuraavalla kaavalla

$$Z_{kv} = \frac{cU_n^2}{S_{kv}''} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I_{kv}''} \quad (2)$$

jossa

Z_{kv} = syöttävän verkon impedanssi

U_n = syöttävän verkon pääjännite

S_{kv}'' = syöttävän verkon näennäinen alkuoikosulkuteho

I_{kv}'' = syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta muuntajan ensiöpuolella

c = jännitekerroin taulukon 4 mukaan.

Syöttävän verkon impedanssilaskussa tarvittavan jännitekerroimen c arvo saadaan seuraavasta taulukosta 4.

Taulukko 4 Jännitekerroimen c arvoja /6/

Nimellisjännite U_n	Suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa c_{maks}	Pienintä oikosulkuvirtaa laskettaessa c_{min}
Pienjännite 100 V - 1000 V		
a) 230/400 V	1,00	0,95
b) muut jännitteet	1,05	1,00
Keskijännite 1 kV - 35 kV	1,10	1,00
Suurjännite 35 kV - 230 kV	1,10	1,00

Kun verkon resistanssia ei tunneta, voidaan impedanssi jakaa resistanssi- ja reaktanssiosaan seuraavasti

$$X_{kv} = j0,995 \cdot Z_{kv} \quad (3)$$

$$R_{kv} = 0,1 \cdot X_{kv} \quad (4)$$

jossa

Z_{kv} = syöttävän verkon impedanssi

X_{kv} = syöttävän verkon reaktanssi

R_{kv} = syöttävän verkon resistanssi.

Näin ollen kokonaisimpedanssi 110 kV verkossa saadaan seuraavalla kaavalla

$$Z_{kv110} = R_{kv} + X_{kv} \quad (5)$$

jossa

Z_{kv110} = kokonaisimpedanssi 110 kV verkossa

X_{kv} = syöttävän verkon reaktanssi

R_{kv} = syöttävän verkon resistanssi.

Kun syöttävän verkon kokonaisimpedanssi halutaan redusoida 20 kV tasolle, niin se lasketaan seuraavalla kaavalla.

$$Z_{kv20} = \mu^2 \cdot Z_{kv110} \quad (6)$$

jossa

Z_{kv20} = verkon kokonaisimpedanssi redusoituna 20 kV tasolle

μ = jännitteiden muuntosuhde

Z_{kv110} = kokonaisimpedanssi 110 kV verkossa.

7.1.2.2 Muuntaja

Muuntajan oikosulkuimpedanssi voidaan laskea seuraavalla kaavalla

$$Z_k = \frac{z_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (7)$$

jossa

Z_k = muuntajan oikosulkuimpedanssi

z_k = muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi

U_n = muuntajan nimellispääjännite

S_n = muuntajan nimellinäennäisteho.

Muuntajan impedanssi on melkein yksinomaan reaktanssia, mutta kun muuntajan resistanssia ei tunneta, voidaan impedanssi jakaa resistanssi- ja reaktanssiosaan seuraavasti

$$X_k = j0,995 \cdot Z_k \quad (8)$$

$$R_k = 0,1 \cdot X_k \quad (9)$$

jossa

Z_k = muuntajan impedanssi

X_k = muuntajan reaktanssi

R_k = muuntajan resistanssi.

Muuntajan kokonaisimpedanssi ensiöpuolella saadaan näin ollen seuraavalla kaavalla

$$Z_k = R_k + X_k \quad (10)$$

jossa

Z_k = muuntajan kokonaisimpedanssi

X_k = muuntajan reaktanssi

R_k = muuntajan resistanssi.

Jos muuntajan kokonaisimpedanssi redusoidaan 20 kV tasolle, niin se lasketaan seuraavalla kaavalla

$$Z_{k20} = \mu^2 \cdot Z_k \quad (11)$$

jossa

Z_{k20} = muuntajan kokonaisimpedanssi redusoituna 20 kV tasolle

μ = jännitteiden muuntosuhde

Z_k = muuntajan kokonaisimpedanssi ensiöpuolella.

7.1.2.3 0,69 kV verkko

Yhden moottorin teho saadaan laskettua seuraavalla kaavalla

$$S_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \quad (12)$$

jossa

S_1 = yhden moottorin teho

U = moottorin nimellisjännite

I = moottorin nimellisvirta.

Näin ollen kolmen samankokoisen moottorin teho saadaan laskettua seuraavalla kaavalla

$$S_T = S_3 = 3 \cdot S_1 \quad (13)$$

jossa

S_T = summateho

S_1 = yhden moottorin teho.

0,69 kV oikosulkutehon syöttöimpedanssi sijaiskytkentää varten lasketaan seuraavalla kaavalla

$$Z_S = \frac{U_n^2}{S_T} \quad (14)$$

jossa

$Z_S = 0,69$ kV oikosulkutehon syöttöimpedanssi

$U_n =$ oikosulun jännite

$S_T = 0,69$ kV summateho.

Kun resistanssia ei tunneta, voidaan impedanssi jakaa resistanssi- ja reaktanssiosaan seuraavilla kaavoilla

$$X_S = j0,922 \cdot Z_S \quad (15)$$

$$R_S = 0,42 \cdot X_S \quad (16)$$

jossa

$Z_S = 0,69$ kV oikosulkutehon syöttöimpedanssi

$X_S =$ syöttöreaktanssi taulukon 5 mukaan

$R_S =$ syöttöresistanssi taulukon 5 mukaan.

Edellinen reaktanssin ja resistanssin suhde oikosulkumoottoreille saadaan seuraavasta taulukosta 5

Taulukko 5 Epätahtimoottoreiden R_m/X_m ja X_m/Z_m suhteita /6/

U_n/kV	$P_n/p/\text{MW}$	R_m/X_m	X_m/Z_m
≥ 1	≥ 1	0,10	0,995
≥ 1	< 1	0,15	0,989
< 1	kaikki	0,42	0,922

0,69 kV verkon kokonaisimpedanssi saadaan näin ollen seuraavalla kaavalla

$$Z_{S20} = R_S + X_S \quad (17)$$

jossa

$Z_{S20} = 0,69$ kV verkon kokonaisimpedanssi

$X_S =$ syöttöreaktanssi

$R_S =$ syöttöresistanssi.

7.1.2.4 Syöttöverkosta oikosulkuun tuleva virta

Jännitekerroin saadaan kohdan 7.1.2.1 taulukon 4 mukaan. Verkosta oikosulkuun tuleva alkuoikosulkuvirta saadaan laskettua seuraavalla kaavalla

$$I_{k110}'' = c \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot (Z_{kv20} + Z_{k120})} \quad (18)$$

jossa

$I_{k110}'' =$ syöttöverkosta oikosulkuun tuleva alkuoikosulkuvirta

$c =$ jännitekerroin

$U_n =$ pääjännite

$Z_{kv20} =$ syöttöverkon impedanssi 20 kV tasolla

$Z_{k120} =$ muuntajan M1 impedanssi 20 kV tasolla.

Syöttävän verkon pysyvän tilan oikosulkuvirta oletetaan syöttävän verkon alkuoikosulkuvirran suuruiseksi. Sysäysoikosulkuvirran sysäyskerroin saadaan kuvasta 5. Verkosta oikosulkuun tuleva sysäysoikosulkuvirta saadaan puolestaan laskettua seuraavalla kaavalla

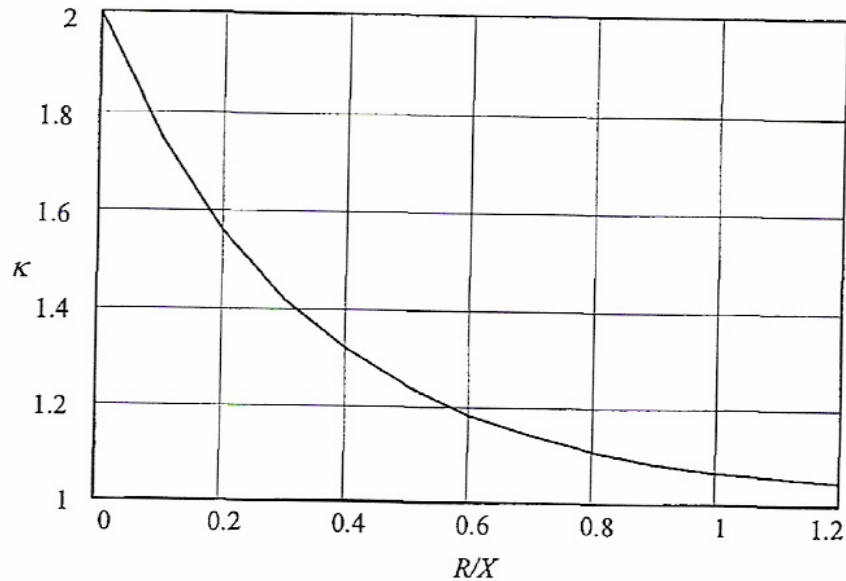
$$i_{s110} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k110}'' \quad (19)$$

jossa

$i_{s110} =$ verkosta oikosulkuun tuleva sysäysoikosulkuvirta

$\kappa =$ sysäyskerroin

$I_{k110}'' =$ syöttöverkosta oikosulkuun tuleva alkuoikosulkuvirta.



Kuva 5 Sysäysoikosulkuvirran sysäyskertoimen κ riippuvuus oikosulkupiirin resistanssin ja reaktanssin suhteesta. /6/

7.1.2.5 0,69 kV verkosta oikosulkuun tuleva virta

Jännitekerroin saadaan kohdan 7.1.2.1 taulukon 4 mukaan. 0,69 kV verkosta oikosulkuun tuleva alkuoikosulkuvirta saadaan laskettua kaavalla

$$I_{k0,69}'' = c \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot (Z_{S20} + Z_{k20})} \quad (20)$$

jossa

$I_{k0,69}''$ = 0,69 kV verkosta oikosulkuun tuleva alkuoikosulkuvirta

c = jännitekerroin

U_n = pääjännite

Z_{S20} = 0,69 kV verkon impedanssi 20 kV tasolla

Z_{k20} = muuntajan M2 impedanssi 20 kV tasolla.

Oikosulkumoottoreilla ei ole vaikutusta pysyvän tilan kolmivaiheiseen oikosulkuvirtaan. Sysäysoikosulkuvirran sysäyskerroin saadaan kuvasta 5. 0,69 kV verkosta oikosulkuun tuleva sysäysoikosulkuvirta saadaan laskettua seuraavalla kaavalla

$$i_{s0,69} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k0,69}'' \quad (21)$$

jossa

$i_{s0,69}$ = 0,69 kV verkosta oikosulkuun tuleva sysäysoikosulkuvirta

κ = sysäyskerroin

$I_{k0,69}''$ = 0,69 kV verkosta oikosulkuun tuleva alkuoikosulkuvirta.

7.1.2.6 Oikosulkuvirta 20 kV kiskostossa

Alkuoikosulkuvirta 20 kV kiskostossa saadaan, kun syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta ja 0,69 kV verkosta tuleva alkuoikosulkuvirta summataan yhteen seuraavan kaavan mukaisesti

$$I_{k20}'' = I_{k110}'' + I_{k0,69}'' \quad (22)$$

jossa

I_{k20}'' = alkuoikosulkuvirta 20 kV kiskostossa

I_{k110}'' = syöttöverkosta tuleva alkuoikosulkuvirta

$I_{k0,69}''$ = 0,69 kV verkosta tuleva alkuoikosulkuvirta.

Sysäysoikosulkuvirta 20 kV kiskostossa saadaan puolestaan laskettua seuraavan kaavan mukaisesti

$$I_{s20} = I_{s110} + I_{s0,69} \quad (23)$$

jossa

i_{s20} = sysäysoikosulkuvirta 20 kV kiskostossa

i_{s110} = syöttöverkosta oikosulkuun tuleva sysäysoikosulkuvirta

$i_{s0,69}$ = 0,69 kV verkosta oikosulkuun tuleva sysäysoikosulkuvirta.

7.1.3 Tulokset

Liitteessä 3 on laskettu oikosulkuvirta 20 kV kiskostossa, kun vanha päämuuntaja on korvattu uudella 16 MVA päämuuntajalla. Saatu maksimi alkuoikosulkuvirta 20 kV kiskostossa on 8,08 kA. Sysäysoikosulkuvirran arvoksi saatiin 19,95 kA. Minimi alkuoikosulkuvirraksi 5,94 kA.

Liitteessä 5 on kuva tilanteesta, kun 20 kV verkon syöttö toteutetaan saman tehoisen välimuuntajan avulla. Saatu maksimi alkuoikosulkuvirta 20 kV kiskostossa on 4,39 kA. Sysäysoikosulkuvirran arvoksi saatiin 10,81 kA. Minimi alkuoikosulkuvirraksi 3,50 kA.

Saatujen tulosten perusteella oikosulkuvirtojen arvot ovat pienempiä välimuuntajalla toteutetussa ratkaisussa. Pelkästään oikosulkuvirtalaskennan perusteella kannattaisi siis valita välimuuntajalla varustettu verkkomalli.

7.1.4 Suojareleiden muutostarpeiden määrittäminen

Säteittäisen keskijänniteverkon oikosulkusuojaus pitäisi olla selektiivinen ja se voidaan periaatteessa toteuttaa vakioaikaylivirtareiden avulla. Jos johdot ovat niin pitkiä, että vikavirta riippuu voimakkaasti oikosulun paikasta, voidaan käyttää virtaselektiivisyyttä. Jos releenä käytetään esimerkiksi ylivirtarelettä, täytyy virtaselektiivisyyteen perustuvissa suojuksissa suojuksen toiminta varmistettava aina myös erillisellä varasuojauksella. Lyhyillä johdoilla, kuten yleensä

teollisuusalueilla, on vikavirta yleensä lähes yhtä suuri joka paikassa. Tällaisessa tapauksessa selektiivisyys voidaan saavuttaa suojarleiden erilaisilla toimintahidastuksilla. Tätä kutsutaan yleisesti aikaselektiivisyydeksi. /6/

Releiden rajoitetun toimintatarkkuuden vuoksi peräkkäisten releiden aikaporrastus on oltava riittävä. Mekaanisilla releillä tyypillinen porrassaika on 0,5 sekuntia, staattisilla releillä 0,3 sekuntia ja numeerisilla releillä 0,15 sekuntia. UPM:n 20 kV verkko on toteutettu mekaanisilla releillä, joten porrassaikana kannattaa käyttää 0,5 sekuntia. Suojauksessa on pyrittävä kuitenkin selviämään mahdollisimman vähillä aikaportailta, etteivät syöttöpisteen läheisyydessä laukaisuajat ja termiset rasitukset kasva liian suuriksi.

Syöttöjohdon lähtöpään ylivirtareleen hetkellislaukaisun virta-asettelu saadaan pienimmän 20 kV kiskostossa esiintyvän oikosulkuvirran perusteella, joka uuden päämuuntajan tapauksessa on noin 5,94 kA ja välimuuntajan tapauksessa 3,50 kA. Kun edelliset oikosulkuvirta-arvot jaetaan vielä virtamuuntajan muuntosuhteella (300 / 5 A) saadaan hetkellislaukaisun virta-asetteluksi uuden päämuuntajan tapauksessa noin 99 A ($I \gg 99$) ja välimuuntajan tapauksessa noin 58,3 A ($I \gg 58$).

Syötön tulopään ylivirtareleen aikahidastettu laukaisu ei saa toimia tapauksessa, kun suurinta kiskostoon kytkettyä oikosulkumoottoria käynnistetään, jolloin virta on noin 179,9 A. Lisäksi täytyy ottaa mukaan vielä kiskostossa esiintyvä suurin kuormitusvirta, mikä on 100,8 A. Näin ollen kun edelliset virrat lasketaan yhteen ja saatu virta-arvo (280,7 A) jaetaan virtamuuntajan muuntosuhteella (300 / 5 A), saadaan ylivirtareleen aikahidastetun laukaisun virta-asetteluarvoksi noin 4,7 A ($I > 4,7$).

7.2 Jännitteenalenemien tarkastelu

7.2.1 Yleistä

Kuormitusvirran I kulkiessa johtimessa syntyy sen impedanssissa jännitteenalenema. Edellisestä johtuen jännite johdon loppupäässä on pienempi kuin johdon alkupäässä. Jännitteenalenema on siis johdon alkupään jännitteen ja johdon loppupään jännitteen erotus. Jännitteenalenemalla on tärkeä merkitys erityisesti verkkoja mitoittaessa, ja se ilmoitetaan usein prosentuaalisena arvona. /7/

Jakeluverkot mitoitetaan suurimpien sallittujen jännitteenalenemien mukaan, ellei taloudellisten tai muiden asioiden perusteella vaadita vieläkin vahvempaa mitoitusta. Suurilla jännitteillä voidaan suuretkin jännitteenalenemat hallita muuntajien käänkytkinten avulla. Sen sijaan 20 ... 0,4 kV jakeluverkoissa syntyvät jännitteenalenemat on pidettävä suhteellisen ahtaissa rajoissa, joita kulutuskojeet vaativat. Syöttöaseman ja kuluttajan välistä jännitteenalenemaa voidaan ainakin osittain kompensoida jakelumuuntajien väliottokytkimillä, joissa käytetään tavallisimmin $\pm 2 \cdot 2,5 \%$ asetteluporrasta. Teollisuudessa ohjauskojeiden, kuten kontaktorien, täytyy standardin mukaan toimia vielä 85 % jännitteellä. /8/

Yleisesti jännitteenalenemat tulisi pyrkiä pitämään seuraavissa rajoissa.

Valtajohdot 400 kV, 220 kV ja 110 kV	5 ... 15 %
Maakuntajohdot 45 kV ja 30 kV	5 ... 8 %
Pitäjäjohdot 10 kV ja 20 kV	5 ... 10 %
Kaupunkien suurjännitejohdot	0,5 ... 2 %
Kaupunkien pienjännitejohdot 400 / 230 V	2 ... 3 %
Maaseudun pienjännitejohdot	5 ... 10 % /8/

7.2.2 Jännitteenalenemien laskeminen 0,69 kV kiskostossa

7.2.2.1 Käynnistysvirta

Jännitteenalenema 0,69 kV kiskostossa lasketaan sellaisella virralla, joka tulee siitä, kun yhtä 800 kW:n moottoria käynnistetään.

Yhden moottorin teho S_1 saadaan laskettua kaavalla 12.

Käynnistyvän oikosulkumoottorin teho saadaan laskettua seuraavalla kaavalla

$$S_k = \sqrt{3} \cdot U \cdot (I_s / I_n \cdot I_n) \quad (24)$$

jossa

S_k = käynnistyvän moottorin teho

U = moottorin nimellisjännite

I_s/I_n = moottorin käynnistysvirtakerroin

I_n = moottorin nimellisvirta.

Verkossa kulkeva virta voidaan laskea edellisestä tehosta seuraavalla kaavalla

$$I_1 = \frac{S_k}{\sqrt{3} \cdot U} \quad (25)$$

jossa

I_1 = verkossa kulkeva virta

S_k = käynnistyvän moottorin teho

U = moottorin nimellisjännite.

Edellinen virta täytyy vielä redusoida 20 kV tasolle, jossa jännitteenalenemia lasketaan. Virta 20 kV tasolla saadaan laskettua kaavalla

$$I'_{20} = \left(\frac{U_{1n}}{U_{2n}} \right) \cdot I_1 \quad (26)$$

jossa

I'_{20} = virta 20 kV tasolla

U_{1n} = jännite, josta redusoidaan

U_{2n} = jännite, johon redusoidaan

I_1 = virta, josta redusoidaan.

7.2.2.2 Impedanssit

Muuntajan M1 ja muuntajan M2 impedanssin arvot saadaan liitteestä 4 kohdasta

1.2.1. Kaapeleiden impedanssit saadaan seuraavasta taulukosta 6.

Taulukko 6 Kaapeleiden tiedot

kaapeli	R Ω/km	s km	L mH	R_k Ω	X_k Ω	Z_k Ω
APYAKMM 3*185	0,175	0,01	0,01	0,00175	3,14E-05	0,00175+j0,0000314
APYAKMM 3*150	0,217	0,56	0,56	0,12152	0,09852	0,12152+j0,09852
APYAKMM 3*120	0,262	0,38	0,6	0,09956	0,071628	0,09956+j0,071628
AXKJ 3*185	0,169	0,38	1	0,06422	0,119381	0,06422+j0,119381
AHXAMK-W 3*185	0,169	0,06	0,1	0,01014	0,001885	0,01014+j0,001885
AHXAMK-W 3*185	0,169	0,35	0,1	0,05915	0,010996	0,05915+j0,010996
APYAKMM 3*185	0,175	0,35	0,01	0,06125	0,0011	0,06125+j0,0011
AHXAMK-W 3*185	0,169	0,35	0,1	0,05915	0,010996	0,05915+j0,010996
AHXAMK-W 3*185	0,169	0,06	0,1	0,01014	0,001885	0,01014+j0,001885

Edellisen taulukon vaihejohtimien vaihtovirtaresistanssit R ja induktanssit vaihetta kohti L on saatu kaapeleiden teknisistä tiedoista. Kaapelien pituudet s on saatu liitteestä 2.

7.2.2.3 Kokonaisjännitteenalenema

Kuormitusvirran \underline{I} kulkiessa verkossa syntyy sen impedanssissa jännitehäviö, jonka vuoksi verkon loppupään jännite \underline{U}_2 on eri suuri kuin verkon alkupään jännite \underline{U}_1 . Verkon alkupään jännite \underline{U}_1 on

$$\underline{U}_1 = 20000 \angle 0^\circ V$$

Jännitehäviö on verkon loppupään jännitteen ja verkon alkupään jännitteen jännitevektoreiden erotus. Tässä tapauksessa käynnistyvän oikosulkumoottorin $\cos \varphi = 0,2$, joten $\varphi = 78,46^\circ$. Jännitehäviö saadaan laskettua seuraavalla kaavalla

$$\underline{U}_h = \sqrt{3} \cdot \underline{I}Z$$

(27)

jossa

\underline{U}_h = jännitehäviö

\underline{I} = käynnistysvirta 20 kV tasolla

\underline{Z} = muuntajan M1, muuntajan M2 ja kaapeleiden impedanssien summa.

Loppupään jännite saadaan laskettua seuraavan yhtälön avulla

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 - \underline{U}_h \quad (28)$$

jossa

\underline{U}_2 = verkon loppupään jännite

\underline{U}_1 = verkon alkupään jännite

\underline{U}_h = jännitehäviö.

Sähkönjakeluverkossa on tärkeä tietää jännitteenalenema, joka on jännitteiden \underline{U}_1 ja \underline{U}_2 itseisarvojen erotus. Jännitteenalenema saadaan laskettua seuraavan yhtälön avulla

$$U_h = |U_1| - |U_2| \quad (29)$$

jossa

U_h = jännitteenalenema

U_1 = verkon alkupään jännite

U_2 = verkon loppupään jännite.

Verkon jännitteenalenema ilmoitetaan usein prosentteina pääjännitteestä ja se saadaan laskettua seuraavalla yhtälöllä

$$U_h \% = \frac{U_h}{U} \cdot 100\% \quad (30)$$

jossa

$U_h\%$ = verkon jännitteenalenema prosentteina

U_h = verkon jännitteenalenema voltteina

U = verkon pääjännite.

7.2.3 Tulokset

Liitteessä 6 on laskettu jännitteenalenema 0,69 kV kiskostossa, kun vanha päämuuntaja on korvattu uudella 16 MVA päämuuntajalla.

Kokonaisjännitteenalenemaksi saatiin 15,98 %. Suurin osa tästä jännitteenalenemasta tapahtuu jakelumuuntajassa (20/0,69 kV), jossa jännitteenalenema on noin 13,1 %. Uudella päämuuntajalla jännitteenalenema puolestaan on noin 2,3 %, ja kaapeleilla noin 0,6 %.

Liitteessä 7 on kuva tilanteesta, kun 20 kV verkon syöttö toteutetaan saman tehoisen välimuuntajan avulla. Kokonaisjännitteenalenemaksi saatiin tässä tapauksessa 15,80 %. Suurin osa tästä jännitteenalenemasta tapahtuu jakelumuuntajassa (20/0,7 kV), jossa jännitteenalenema on noin 13,1 %. Välimuuntajalla jännitteenalenema puolestaan on noin 2,3 %, ja kaapeleilla noin 0,4 %.

Saatujen tulosten perusteella jännitteenalenema on aivan vähän pienempi välimuuntajalla toteutetussa ratkaisussa verrattuna uuden päämuuntajan ratkaisuun. Tämä ero on kuitenkin niin pieni, että sillä ei ole käytännössä mitään merkitystä. Kokonaisjännitteenalenema koostuu käytännössä lähes pelkästään muuntajien jännitteenalenemista, koska kaapeleiden jännitteenalenemat ovat suhteessa niin mitättömän pienet verrattuna muuntajiin.

7.2.4 Jännitteen asettelut 20 kV verkossa

Jännitteenalenemasta UPM:n keskijänniteverkossa ajatellaan yleisesti niin, että jännitteenalenema pitäisi olla alle 15 %. Edellisistä laskuista kuitenkin huomataan, että molemmissa tapauksissa jännitteenalenemat moottoria käynnistettäessä ovat hieman suurempia kuin jännitteenaleneman sallittu arvo. Suuri jännitteenaleneman arvo johtuu lähinnä jakelumuuntajan suuresta jännitteenalenemasta, joten verkon jännitteen asettelua kannattaisi ehkä hieman muuttaa.

Jakelumuuntajan M2 toisiopuolen jännitettä voitaisiin nostaa väliottokytkimellä $\pm 2 \cdot 2,5$ % eli 5 % ylöspäin, jolloin verkon jännite ei tippuisi niin alas moottoria käynnistettäessä vaan se jäisi 5 % ylemmäs. Enempää ei jakelumuuntajan jännitteenaleneman korjaamiseksi voi oikein tehdä nykyisellä muuntajalla.

Nykyinen 20 kV verkon kuormitus (n. 3,5 MVA) on noin 22 % uuden muuntajan M1 (S = 16 MVA) tehosta. Näin ollen 20 kV kiskoston jännite voidaan säätää olemaan 20 000 V, kun muuntajan kuormitus on noin 22 % maksimista.

7.3 Taloudellisuyslaskelmat

Muuntajan kustannuksista suurin osa muodostuu muuntajan investointi- ja käyttökustannuksista. Investointikustannukset koostuvat muuntajan hankintahinnasta sekä muuntajan asentamisesta sähköverkkoon, kun taas käyttökustannukset koostuvat pääosin käytöstä aiheutuneista tyhjäkäynti- sekä kuormitushäviöistä. Lisäksi muuntajasta johtuvia pienempiä kustannuseriä muodostuu muuntamon huollosta ja kunnonvalvonnasta, sekä muuntamojen huolto- ja korjaustöistä. Verkon suunnittelun kannalta kuitenkin oleelliset kustannukset ovat lähinnä investointi- ja häviökustannukset, jotka otetaan laskennassa huomioon. /4/

7.3.1 Muuntajan häviöt /2/

Muuntajan häviöt aiheutuvat muuntajan toiminnasta ja niiden kustannukset riippuvat kulutetun sähköenergian hinnasta. Tyhjäkäynti- eli rautahäviöt P_0 ovat hystereesi- ja pyörrevirtahäviöitä, jotka aiheutuvat magneettivuon vaihtelusta rautasydämessä. Tyhjäkäyntihäviöt riippuvat jännitteestä, mutta eivät kuormituksesta, joten tyhjäkäyntihäviöiden suuruus pysyy koko ajan vakiona. Kuormitus- eli virtalämpöhäviöt P_k syntyvät puolestaan käämien vastuksissa virran vaikutuksesta. Muuntajan kilpiarvoissa ilmoitetaan yleensä muuntajan nimelliset kuormitushäviöt, jotka tarkoittavat muuntajan häviöitä nimelliskuormalla. Tämän arvon perusteella voidaan laskea kuormitushäviöt kuormalle S kaavan 33 avulla, kun tiedetään muuntajan nimellisteho S_n

$$P_k = \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 \cdot P_{kn} \quad (31)$$

jossa

P_k = muuntajan kuormitushäviöt

S = kuorman teho

S_n = muuntajan nimellisteho

P_{kn} = muuntajan kuormitushäviöt nimellisellä kuormalla.

Muuntajan kokonaishäviöt saadaan, kun muuntajan tyhjäkäyntihäviöt ja kuormitushäviöt summataan yhteen seuraavan yhtälön avulla

$$P_{kok} = P_o + P_k \quad (32)$$

jossa

P_{kok} = muuntajan kokonaishäviöt

P_o = muuntajan tyhjäkäyntihäviöt

P_k = muuntajan kuormitushäviöt.

Edellinen kokonaishäviö tarkoittaa muuntajan häviöitä tunnissa. Koska kuormitus on vuodenaajoista riippumatta hyvin tasaista, saadaan muuntajan häviöt vuorokaudessa laskettua seuraavalla yhtälöllä

$$P_{kok/d} = 24h \cdot P_{kok} \quad (33)$$

jossa

$P_{kok/d}$ = muuntajan kokonaishäviöt vuorokaudessa

P_{kok} = muuntajan kokonaishäviöt tunnissa.

Vielä kun halutaan tietää, että kuinka suuret muuntajan häviöt ovat vuodessa, saadaan häviöt laskettua yhtälöllä 36 seuraavasti

$$P_{kok/a} = 365d \cdot P_{kok/d} \quad (34)$$

jossa

$P_{\text{kok/a}}$ = muuntajan kokonaishäviöt vuodessa

$P_{\text{kok/d}}$ = muuntajan kokonaishäviöt vuorokaudessa.

Sähköenergian hinnaksi sovittiin 32 € / MWh. Muuntajan häviöiden hinta vuodessa saadaan näin ollen laskettua seuraavan yhtälön avulla

$$K_{\text{häv,1}} = P_{\text{kok/a}} / MWh \cdot 32 \text{ €} / MWh \quad (35)$$

jossa

$K_{\text{häv,1}}$ = muuntajan häviöiden hinta vuodessa

$P_{\text{kok/a}}$ = muuntajan kokonaishäviöt vuodessa.

7.3.2 Muuntajan kustannuslaskelma /4/

Investointien kannattavuutta arvioidessa voidaan käyttää monia erilaisia laskentakorkokantaan perustuvia menetelmiä. Näistä yleisempiä ovat nykyarvomenetelmä ja annuiteettimenetelmä.

Nykyarvomenetelmässä kaikki investoinnit, kustannukset ja tuotot diskontataan valitun laskentakorkokannan mukaisesti tarkasteluhetkeen. Muuntajainvestoinnin ja muuntajan häviökustannusten nykyarvo voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä

$$NA = K_{\text{inv}} + \kappa \cdot K_{\text{häv,1}} \quad (36)$$

jossa

NA = muuntajainvestoinnin nykyarvo

K_{inv} = muuntajasta aiheutunut investointikustannus

κ = diskonttauskerroin

$K_{\text{häv},1}$ = ensimmäisen vuoden aikana syntyneet häviöt.

Muuntajan investointikustannukset saadaan suoraan muuntajan hinnasta ja muuntajan asennuskuluista. Ensimmäisen vuoden häviöt voidaan laskea kuormitushäviöille kilpiarvojen ja kuormitusmallin mukaan ja tyhjäkäyntihäviöille kilpiarvojen mukaan, kun tiedetään sähköenergian hinta.

Oletetaan, että jännite pysyy vakiona koko tarkasteluajanjakson ja etteivät häviöt muuntajassa kasva vanhenemisen vuoksi. Tällöin κ huomioi laskentavälin ja se saadaan laskettua seuraavalla kaavalla

$$\kappa = \psi \cdot \frac{\psi^{t_1} - 1}{\psi - 1} \quad (37)$$

jossa

κ = diskonttauskerroin

ψ = kuormituksen ja laskentakorkokannan vaikutus laskennassa

t_1 = pitoaika.

Edellisessä yhtälössä esiintyvä ψ määrittää kuormituksen ja laskentakorkokannan vaikutukset laskennassa ja se saadaan laskettua seuraavalla kaavalla

$$\psi = \frac{1 + \left(\frac{r}{100}\right)^2}{1 + \frac{p}{100}} \quad (38)$$

jossa

ψ = kuormituksen ja laskentakorkokannan vaikutus laskennassa

r = keskimääräinen kuormituksen kasvuprosentti

p = laskentakorkokanta.

Liitteessä 8 on laskettu ja vertailtu UPM:n keskijänniteverkon eri muuntajaratkaisujen taloudellisuutta keskenään.

8 TULOSTEN TARKASTELU

Uuden päämuuntajan tapauksessa saatu maksimi alkuoikosulkuvirta (I_{kmax}) 20 kV kiskostossa on 8,08 kA. Sysäysoikosulkuvirran (i_s) arvoksi saatiin 19,95 kA. Minimi alkuoikosulkuvirran (I_{kmin}) arvoksi saatiin 5,94 kA. Jännitteenalenemaksi puolestaan saatiin 0,69 kV kiskostossa 15,98 %, josta suurin osa tapahtuu jakelumuuntajassa (301 TNA), jossa jännitteenalenema on noin 13,1 %. Uudella päämuuntajalla jännitteenalenema puolestaan on noin 2,3 %, ja kaapeleilla noin 0,6 %. Uuden päämuuntajan investoinnin ja häviöiden nykyarvo olisi noin 285 115 euroa.

Välimuuntajan tapauksessa saatu maksimi alkuoikosulkuvirta (I_{kmax}) 20 kV kiskostossa on 4,39 kA. Sysäysoikosulkuvirran (i_s) arvoksi saatiin 10,81 kA. Minimi alkuoikosulkuvirran (I_{kmin}) arvoksi saatiin 3,50 kA. Jännitteenalenemaksi puolestaan saatiin 0,69 kV kiskostossa 15,80 %, josta suurin osa tapahtuu jakelumuuntajassa (301 TNA), jossa jännitteenalenema on noin 13,1 %. Välimuuntajalla jännitteenalenema puolestaan on noin 2,3 %, ja kaapeleilla noin 0,4 %. Uuden välimuuntajan investoinnin ja häviöiden nykyarvo olisi noin 328 013 euroa.

Vanhan päämuuntajan M4 häviöiden nykyarvo olisi 74 561 euroa, joka käsittää vain muuntajan tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt.

8.1 Omat päätelmät

Minun mielestäni vanhaa päämuuntajaa M4 ei kannata vaihtaa ennen kuin sen elinikä on lopussa. Vanhan muuntajan häviökustannukset ovat suhteessa huomattavasti isommat kuin uuden päämuuntajan ja välimuuntajan tapauksessa.

Investointikustannuksia vanhan päämuuntajan tapauksessa ei kuitenkaan synny, kuten uuden päämuuntajan ja välimuuntajan tapauksessa. Vanhan päämuuntajan M4 nykyarvo on yli kolme kertaa pienempi kuin toisissa tapauksissa.

Jos vanha päämuuntaja halutaan edellisestä huolimatta vaihtaa uuteen, esimerkiksi varmuuden vuoksi, suosittelisin tähän tarkoitukseen uutta 16 MVA päämuuntajaa. Tässä tapauksessa oikosulkuvirrat ovat kyllä melkein kaksinkertaiset verrattuna välimuuntajan ratkaisuun, mutta muuntajainvestoinnin nykyarvo on reilut 40 000 euroa pienempi.

Jos vanhan päämuuntajan M4 paikka halutaan esimerkiksi johonkin muuhun käyttöön, täytyy silloin 20 kV verkon syöttö toteuttaa välimuuntajan avulla. Tässä tapauksessa oikosulkuvirrat laskevat kyllä melkein puoleen verrattuna uuden päämuuntajan tapaukseen, mutta muuntajainvestoinnin nykyarvo on reilut 40 000 euroa kalliimpi. Tämän vaihtoehdon toteuttamisesta tulee myös huomattavasti enemmän rakennustöitä kuin edellisestä vaihtoehdosta, joka kannattaa myös huomioida. Joka tapauksessa tämäkään vaihtoehto ei ole huono, jos investoinnin taloudellisuudelle ei anneta niin suurta painoarvoa.

Tuloksia katsellessa tulee auttamatta mieleen, että kuinka suuri arvo UPM:n varayhteyksillä Metsä-Botniaan ja Aker Finnyardsin telakalle oikeasti on. Jos niitä ei tarvitsisi ottaa muuntajan mitoituksessa huomioon, niin muuntajan koko tippuisi lähes puoleen, vaikka moottoreiden käynnistys otettaisiinkin huomioon. Tämä muuntajatehon aleneminen vaikuttaisi varmasti myös aika lailla muuntajan hintaan, jolloin muuntajainvestoinnin nykyarvo tulisi huomattavasti pienemmäksi kuin edellä laskemissani tapauksissa.

8.2 Tulosten ja tavoitteiden saavuttamisen arviointi

Työn avulla saatiin selville, että kannattaako vanhaa päämuuntajaa vaihtaa uuteen. Jos vanha muuntaja vaihdetaan joka tapauksessa, niin saatiin myös selville uusien muuntajavaihtoehtojen tekniset ratkaisut ja taloudellisuudet.

8.3 Käyttökelpoisuuden arviointi

Uusien muuntajien tekniset tiedot ja laskelmat pitävät varmasti likipitäen paikkaansa. Suurin virhemarginaali tulee kuitenkin muuntajien taloudellisuuslaskelmissa, koska muuntajan investointiin liittyviä kustannuksia ei voi tarkalleen tietää ennen varsinaisia tarjouspyyntöjä. Tarjouspyyntöjen ja tehtävien töiden urakkasopimusten mukaan muuntajien investointikustannukset voivat tulla huomattavastikin laskettuja arvoja pienemmiksi. Lisäksi taloudellisuuslaskelmissa ei ole otettu huomioon pienempiä kustannuseriä, kuten muuntajan huolto- ja korjaustöitä.

8.4 Soveltamis- ja jatkomahdollisuuksien selvittäminen

Tämä työ antaa suuntaa sille, että millä perusteella ja millä keinoin tätä asiaa kannattaa tarkastella tulevaisuudessa. Jos vanha päämuuntaja päätetään vaihtaa, on peruste sille sitten mikä tahansa, täytyy ainakin muuntajien investointien hinnat selvittää vielä huomattavasti tarkemmin kuin tässä työssä. Tämän kokoisen investoinnin kustannukset koostuvat niin monesta palasta, että sen tarkka hinta saadaan todellisuudessa selville vasta silloin, kun muutostyö on kokonaan tehty.

9 YHTEENVETO

UPM:n 20 kV verkko-osuuden syötön muuttamisen tarpeellisuudesta voidaan olla montaa mieltä. Se, että vaikuttaako tulevaisuuden päätökseen enemmän tekniset vai taloudelliset seikat, tai kenties ihan muut asiat, eivät ole minun päätettävissäni.

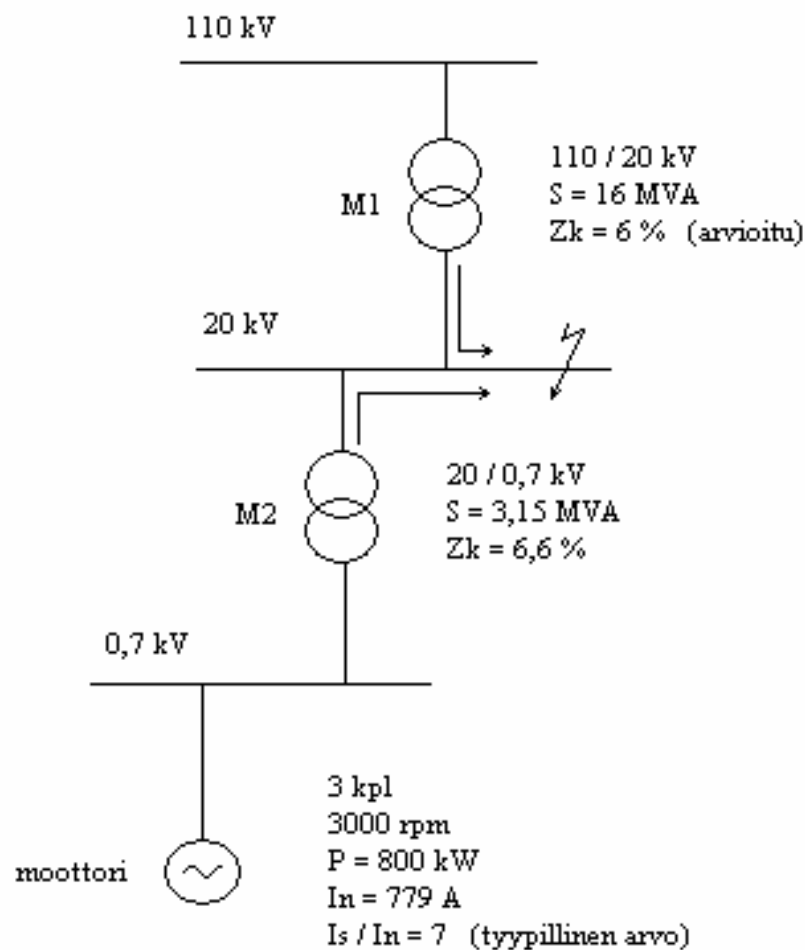
Juuri tällä hetkellä en näe kuitenkaan tarvetta muuttaa 20 kV verkko-osuuden syöttöä.

10 LÄHTEET

1. Kari Iiro. Rauman tehtaalla käytettävät jännitteet ja maadoitustavat. 2002.
2. Muuntajat ja sähkölaitteet. Saatavissa:
<http://leeh.ee.tut.fi/svtopus/teksti/luku9.html>
3. Aura, L; Tonteri, A. Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet, ensimmäinen painos. WSOY. Porvoo 1996. 544 s.
4. Pylvänäinen, J. Jakelumuuntajan seurantamenetelmien kehittäminen. TESLA raportti 68/02. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Sähkövoimatekniikka. Tampere 2002. 142 s. Saatavissa:
http://www.vtt.fi/pro/tutkimus/tesla/tshrapkooste/tesla_68_02_pylvanainen.pdf
5. Sähkövoimajärjestelmien erityiskysymyksiä. Saatavissa:
<http://leeh.ee.tut.fi/tuotanto/sivu17.html>
6. Huotari kari, Partanen Jarmo. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Diplomityö. LTKK, sähkötekniikan osasto, 1998. Saatavissa:
http://www.vtt.fi/pro/tutkimus/tesla/tshrapkooste/huotari_partanen_1998.pdf
7. Sähköverkkojen laskentaa. Saatavissa:
<http://leeh.ee.tut.fi/svtopus/teksti/luku4.html>
8. Aura, L; Tonteri, A. Sähkölaitostekniikka, ensimmäinen painos. WSOY. Porvoo 1993. 433 s

ESIMERKKILASKELMA OIKOSULKUVIRRASTA UUDELLA PÄÄMUUNTAJALLA

Kuvassa 1 on esitetty laskennan kohteena oleva 20 kV teollisuusverkko uuden päämuuntajan M1 kanssa.



Kuva 1 Teollisuusverkko uudella päämuuntajalla

Kuvasta nähdään, että 110 kV verkko syöttää muuntajan M1 avulla 20 kV verkkoa. Muuntaja M2 taas muuttaa 20 kV jännitteen oikosulkumoottoreille sopivaksi 0,69 kV (660 V) jännitteeksi. Oikosulkumoottoreita on kolme kappaletta ja teholtaan ne ovat 800 kW kukin. Kuvasta nähdään myös mm. muuntajien ja oikosulkumoottorien tekniset arvot. Uuden päämuuntajan M1 tarvittavan tehon tarve on arvioitu kohdassa 5.1. Muuntajan suhteellisen impedanssin arvo on

arvioitu ja se on samalla pienin järkevä impedanssin arvo tämän kokoisessa muuntajassa. Muuntajan M2 suhteellisen impedanssin arvo on saatu on muuntajan kilpiarvotiedoista. Lisäksi oikosulkumoottorin käynnistysvirtakerroin on arvioitu.

1 KOLMIVAIHEINEN OIKOSULKUVIRTA 20 KV KISKOSTOSSA

1.1 Syöttävä verkko

Syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta muuntajan ensiöpuolella on $I_{kv}'' = 26,6$ kA. Syöttävän verkon impedanssiksi kohdan 7.1.2.1 mukaisesti yhtälöllä 2 saadaan

$$Z_{kv} = \frac{cU_n^2}{S_{kv}''} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I_{kv}''} = \frac{1,1 \cdot 110 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 26,6 \text{ kA}} = 2,6263 \Omega$$

Kun tämä jaetaan resistanssiksi ja reaktanssiksi yhtälöiden 3 ja 4 avulla, saadaan

$$X_{kv} = j0,995 \cdot Z_{kv} = j0,995 \cdot 2,6263 \Omega = j2,6132 \Omega$$

$$R_{kv} = 0,1 \cdot X_{kv} = 0,1 \cdot 2,6132 \Omega = 0,2613 \Omega$$

Kokonaisimpedanssi 110 kV kiskossa yhtälön 5 avulla on tällöin

$$Z_{kv110} = (0,2613 + j2,6132) \Omega$$

Kun edellinen impedanssi redusoidaan 20 kV tasolle, saadaan laskevan impedanssin arvoksi yhtälön 6 avulla

$$\begin{aligned} Z_{kv20} &= \mu^2 \cdot Z_{kv110} = \left(\frac{20}{110}\right)^2 \cdot (0,2613 + j2,6132) \Omega \\ &= (0,0086 + j0,0864) \Omega = 0,0868 \angle 84,29^\circ \Omega \end{aligned}$$

Lasketaan myös R/X suhde huippuarvokertoimen määrittämiseksi

$$\frac{R}{X} = \frac{0,0086\Omega}{0,0864\Omega} = 0,0995$$

1.2 Muuntajat

1.2.1 Muuntaja M1

Muuntajan oikosulkuimpedanssi lasketaan kohdan 7.1.2.2 mukaisesti yhtälöllä 7, ja saadaan

$$Z_{k_1} = \frac{z_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{6}{100} \cdot \frac{(110\text{ kV})^2}{16\text{ MVA}} = 45,3750\Omega$$

Kun edellinen jaetaan resistanssiksi ja reaktanssiksi yhtälöillä 8 ja 9, saadaan

$$X_{k_1} = j0,995 \cdot Z_{k_1} = j0,995 \cdot 45,3750\Omega = j45,1481\Omega$$

$$R_{k_1} = 0,1 \cdot X_{k_1} = 0,1 \cdot 45,1481\Omega = 4,5148\Omega$$

Muuntajan kokonaisimpedanssi ensiöpuolella on tällöin yhtälön 10 mukaisesti

$$Z_{k_110} = (4,5148 + j45,1481)\Omega$$

Kun edellinen impedanssi redusoidaan 20 kV tasolle, saadaan laskevan muuntajan impedanssin arvoksi yhtälöllä 11

$$\begin{aligned} Z_{k_120} &= \mu^2 \cdot Z_{k_1} = \left(\frac{20}{110}\right)^2 \cdot (4,5148 + j45,1481)\Omega \\ &= (0,1492 + j1,4925)\Omega = 1,5000 \angle 84,29^\circ \Omega \end{aligned}$$

1.2.2 Muuntaja M2

Muuntajan oikosulkuimpedanssi lasketaan kohdan 7.1.2.2 mukaisesti yhtälöllä 7, ja saadaan

$$Z_{k_2} = \frac{z_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{6,6}{100} \cdot \frac{(20 \text{ kV})^2}{3,15 \text{ MVA}} = 8,3810 \Omega$$

Kun tämä jaetaan resistanssiksi ja reaktanssiksi yhtälöillä 8 ja 9, saadaan

$$X_{k_2} = j0,995 \cdot Z_{k_2} = j0,995 \cdot 8,3810 \Omega = j8,3391 \Omega$$

$$R_{k_2} = 0,1 \cdot X_{k_2} = 0,1 \cdot 8,3391 \Omega = 0,8339 \Omega$$

Muuntajan kokonaisimpedanssi ensiöpuolella on tällöin yhtälöllä 10

$$Z_{k_2,20} = (0,8339 + j8,3391) \Omega$$

1.3 0,69 kV oikosulkutehon impedanssi

Kolme 800 kW oikosulkumoottoria käy. Yhden moottorin teho saadaan laskettua kohdan 7.1.2.3 mukaisesti yhtälöllä 12, saadaan

$$\begin{aligned} S_1 &= \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 660 \text{ V} \cdot 779 \text{ A} = 890516,6022 \text{ VA} \\ &= 890,5166 \text{ kVA} \end{aligned}$$

Kolmen moottorin syöttämä teho saadaan, kun kerrotaan yhden moottorin teho kolmella yhtälön 13 mukaisesti

$$S_T = S_3 = 3 \cdot S_1 = 2671,5498 \text{ kVA} = 2,6715 \text{ MVA}$$

0,69 kV oikosulkutehon syöttöimpedanssi sijaiskytkentää varten saadaan yhtälön 14 mukaisesti

$$Z_s = \frac{U_n^2}{S_T} = \frac{(20 \cdot 10^3)^2 V}{2,6715 \cdot 10^6 VA} = 149,7286 \Omega$$

Kun tämä jaetaan resistanssiksi ja reaktanssiksi yhtälöiden 15 ja 16 mukaisesti, saadaan

$$X_s = j0,922 \cdot Z_s = j0,922 \cdot 149,7286 \Omega = j138,0500 \Omega$$

$$R_s = 0,42 \cdot X_s = 0,42 \cdot 138,0500 \Omega = 57,9810 \Omega$$

0,69 kV verkon kokonaisimpedanssi saadaan näin ollen yhtälön 17 avulla seuraavasti

$$Z_{s20} = (57,9810 + j138,0500) \Omega$$

Lasketaan myös R/X suhde huippuarvokertoimen määrittämiseksi

$$\frac{R}{X} = \frac{57,9810 \Omega}{138,0500 \Omega} = 0,4200$$

1.4 Syöttöverkosta oikosulkuun tuleva virta

Maksimi alkuoikosulkuvirran kertoimeksi saadaan kohdan 7.1.2.1 taulukon 4 mukaan 1,1. Verkosta oikosulkuun tuleva maksimi alkuoikosulkuvirta saadaan laskettua kohdan 7.1.2.4 yhtälön 18 mukaan seuraavasti

$$\begin{aligned}
I_{k110\max}'' &= 1,1 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot (Z_{kv20} + Z_{k_1,20})} \\
&= 1,1 \cdot \frac{(20 \cdot 10^3)V}{\sqrt{3} \cdot [(0,0086 + j0,0865)\Omega + (0,1492 + j1,4925)\Omega]} \\
&= (795,9556 - j7964,6005)A \\
&= (0,7960 - j7,9646)kA = 8,0043 \angle -84,29 kA
\end{aligned}$$

Sysäysoikosulkuvirran sysäyskertoimeksi saadaan kohdan 7.1.2.4 kuvan 5 mukaan 1,75, kun R/X suhde on 0,1. Verkosta oikosulkuun tuleva sysäysoikosulkuvirta saadaan laskettua kohdan 7.1.2.4 yhtälön 19 mukaan seuraavasti

$$\begin{aligned}
i_{s110} &= \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k110}'' = 1,75 \cdot \sqrt{2} \cdot (8,0043 \angle -84,29 kA) \\
&= 19,8096 \angle -84,29 kA
\end{aligned}$$

1.5 0,69 kV verkosta oikosulkuun tuleva virta

Maksimi alkuoikosulkuvirran kertoimeksi saadaan kohdan 7.1.2.1 taulukon 4 mukaan 1,1. Verkosta oikosulkuun tuleva maksimi alkuoikosulkuvirta saadaan laskettua kohdan 7.1.2.5 yhtälön 20 mukaan seuraavasti

$$\begin{aligned}
I_{k0,69\max}'' &= 1,1 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot (Z_{s20} + Z_{k_2,20})} \\
&= 1,1 \cdot \frac{(20 \cdot 10^3)V}{\sqrt{3} \cdot [(57,9810 + j138,0500)\Omega + (0,8339 + j8,3391)\Omega]} \\
&= (30,0153 - j74,7075)A \\
&= (0,0300 - j0,0747)kA = 0,0805 \angle -68,11^\circ kA
\end{aligned}$$

Sysäysoikosulkuvirran sysäyskertoimeksi saadaan kohdan 7.1.2.4 kuvan 5 mukaan 1,3, kun R/X suhde on 0,42. Verkosta oikosulkuun tuleva sysäysoikosulkuvirta saadaan laskettua kohdan 7.1.2.5 yhtälön 21 mukaan seuraavasti

$$\begin{aligned}
i_{s0,69} &= \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k0,69}'' = 1,3 \cdot \sqrt{2} \cdot (0,0805 \angle -68,11^\circ kA) \\
&= 0,1480 \angle -68,11^\circ kA
\end{aligned}$$

1.6 Oikosulkuvirta 20 kV kiskostossa

Maksimi alkuoikosulkuvirta 20 kV kiskostossa saadaan laskettua kohdan 7.1.2.6 mukaisesti yhtälöllä 22

$$\begin{aligned}
 I_{k20\max}'' &= I_{k110\max}'' + I_{k0,69\max}'' \\
 &= (8,0043 \angle -84,29^\circ \text{ kA}) + (0,0805 \angle -68,11^\circ \text{ kA}) \\
 &= 8,0816 \angle -84,13^\circ \text{ kA} = (0,8264 - j8,0393) \text{ kA}
 \end{aligned}$$

Sysäysoikosulkuvirta 20 kV kiskostossa saadaan laskettua kohdan 7.1.2.6 mukaisesti yhtälöllä 23

$$\begin{aligned}
 I_{s20} &= I_{s110} + I_{s0,69} = (19,8096 \angle -84,29^\circ \text{ kA}) + (0,1480 \angle -68,11^\circ \text{ kA}) \\
 &= 19,9518 \angle -84,17^\circ \text{ kA} \\
 &= (2,0261 - j19,8486) \text{ kA}
 \end{aligned}$$

2 KAKSIVAIHEINEN OIKOSULKUVIRTA 20 KV KISKOSTOSSA

Kaksivaiheisessa oikosulussa otetaan huomioon vain syöttävä verkko ja muuntaja M1.

2.1 Syöttävä verkko

Syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta päämuuntajan ensiöpuolella on $I_{kv}'' = 4,73$ kA. Syöttävän verkon impedanssiksi kohdan 7.1.2.1 mukaisesti yhtälöllä 2 saadaan

$$Z_{kv} = \frac{cU_n^2}{S_{kv}''} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I_{kv}''} = \frac{1,0 \cdot 110 \text{ kV}}{\sqrt{3} \cdot 4,73 \text{ kA}} = 13,4268 \Omega$$

Kun tämä jaetaan resistanssiksi ja reaktanssiksi yhtälöillä 3 ja 4, saadaan

$$X_{kv} = j0,995 \cdot Z_{kv} = j0,995 \cdot 13,4268 \Omega = j13,3597 \Omega$$

$$R_{kv} = 0,1 \cdot X_{kv} = 0,1 \cdot 13,3597 \Omega = 1,3360 \Omega$$

Kokonaisimpedanssi 110 kV kiskossa saadaan yhtälöllä 5 seuraavasti

$$Z_{kv110} = (1,3360 + j13,3597) \Omega$$

Kun edellinen impedanssi redusoidaan 20 kV tasolle, saadaan laskevan impedanssin arvoksi yhtälön 6 avulla

$$\begin{aligned} Z_{kv20} &= \mu^2 \cdot Z_{kv110} = \left(\frac{20}{110}\right)^2 \cdot (1,3360 + j13,3597) \Omega \\ &= (0,0442 + j0,4416) \Omega = 0,4438 \angle 84,29^\circ \Omega \end{aligned}$$

2.2 Muuntaja

Muuntajan M1 impedanssin arvo ei muutu kaksivaiheista oikosulkua laskettaessa verrattuna kolmivaiheiseen oikosulkuun. Muuntajan M1 impedanssin arvo on siis sama ja se on laskettu jo edellä kohdassa 1.2.1

$$\begin{aligned} Z_{k_1,20} &= \mu^2 \cdot Z_{k_1} = \left(\frac{20}{110}\right)^2 \cdot (4,5148 + j45,1481)\Omega \\ &= (0,1492 + j1,4925)\Omega = 1,5000 \angle 84,29^\circ \Omega \end{aligned}$$

2.3 Syöttöverkosta oikosulkuun tuleva virta

Minimi alkuoikosulkuvirran jännitekertoimeksi saadaan kohdan 7.1.2.1 taulukon 4 mukaan 1,0. Minimi alkuoikosulkuvirta saadaan laskettua kohdan 7.1.2.4 yhtälön 18 mukaan seuraavasti

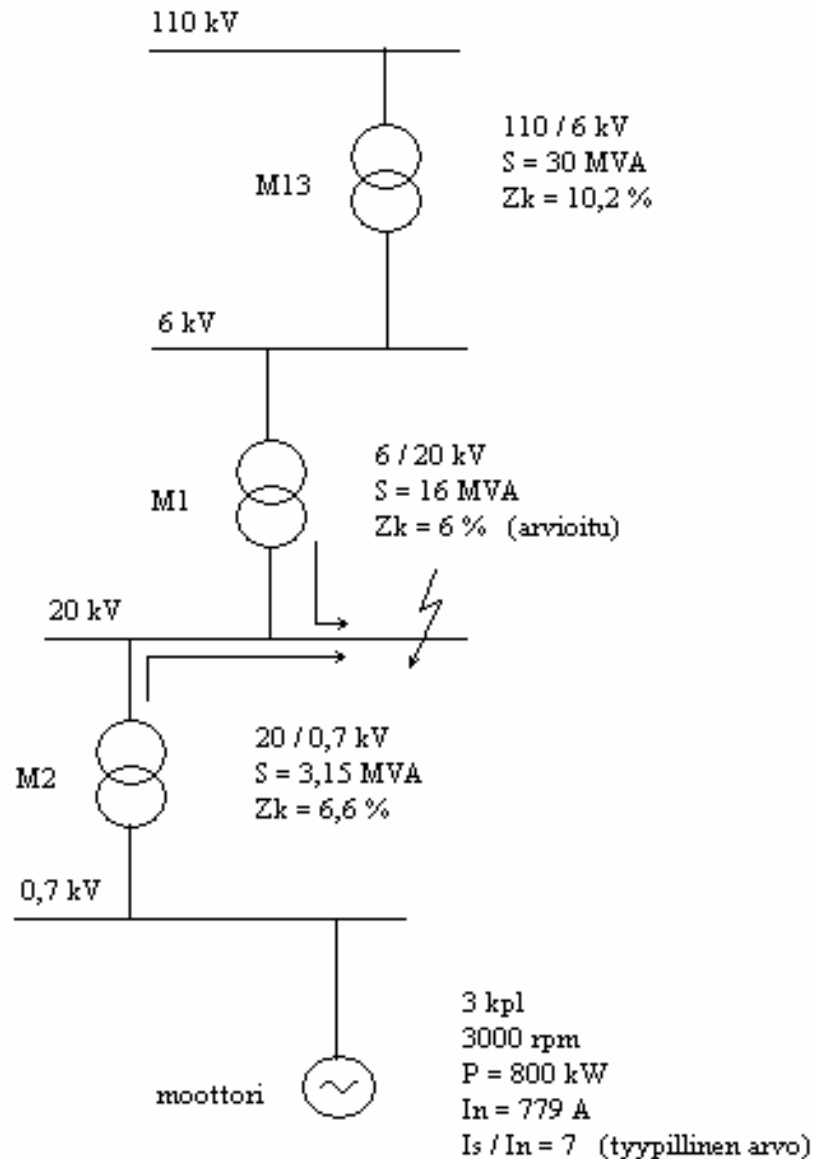
$$\begin{aligned} I_{k_{20\min}}' &= 1,0 \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot (Z_{kv20} + Z_{k_1,20})} \\ &= 1,0 \cdot \frac{(20 \cdot 10^3)V}{\sqrt{3} \cdot [(0,0442 + j0,4416)\Omega + (0,1492 + j1,4925)\Omega]} \\ &= (591,0811 - j5911,1164)A \\ &= (0,5911 - j5,9111)kA = 5,9406 \angle -84,29^\circ kA \end{aligned}$$

Vastaimpedanssit ja myötäimpedanssit ovat yhtäsuuret muuntajilla, johdoilla, ei pyörivillä koneilla sekä epätahtimoottoreilla. Kaksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan laskea myös suoraan kolmivaiheisen oikosulkuvirran perusteella seuraavasti

$$\begin{aligned} I_{k20\min}'' &= \frac{\sqrt{3}}{1 + \frac{Z_2}{Z_1}} \cdot I_{k20\max}'' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k20\max}'' = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (8,0816 \angle -84,13^\circ \text{ kA}) \\ &= 6,9989 \angle -84,13 \text{ kA} \end{aligned}$$

Oikosulkuvirta välimuuntajalla

Kuvassa 1 on esitetty laskennan kohteena oleva 20 kV teollisuusverkko välimuuntajan kanssa.



Kuva 1 Teollisuusverkko välimuuntajalla

Kuvasta nähdään, että 110 kV verkko syöttää muuntajan M13 avulla 6 kV verkkoa. Muuntaja M1 muuttaa 6 kV jännitteen 20 kV jännitteeksi. Muuntaja M2 taas muuttaa 20 kV jännitteen oikosulkumoottoreille sopivaksi 0,69 kV (660 V) jännitteeksi. Oikosulkumoottoreita on kolme kappaletta ja teholtaan ne ovat

800 kW kukin. Kuvasta nähdään myös mm. muuntajien ja oikosulkumoottorien tekniset arvot. Muuntajan M1 tarvittavan tehon tarve on arvioitu kohdassa 5.1. Muuntajan suhteellisen impedanssin arvo on arvioitu ja se on samalla pienin järkevä impedanssin arvo tämän kokoisessa muuntajassa. Muuntajan M2 suhteellisen impedanssin arvo on saatu muuntajan kilpiarvotiedoista. Lisäksi oikosulkumoottorin käynnistysvirtakerroin on arvioitu.

Maksimi alkuoikosulkuvirta ja sysäysoikosulkuvirta, sekä minimi alkuoikosulkuvirta 20 kV kiskostossa lasketaan samalla tavalla kuin liitteessä 4. Laskennan periaate on sama, mutta pieniä poikkeuksia on, johtuen verkkojen rakenteen eroavuuksista.

Maksimi alkuoikosulkuvirta 20 kV kiskostossa on

$$I_{k20\max}'' = 4,39 \angle -84,0^\circ \text{ kA}$$

Sysäysoikosulkuvirta 20 kV kiskostossa on

$$i_{s,20} = 10,81 \angle -84,08^\circ \text{ kA}$$

Minimi alkuoikosulkuvirta 20 kV kiskostossa on

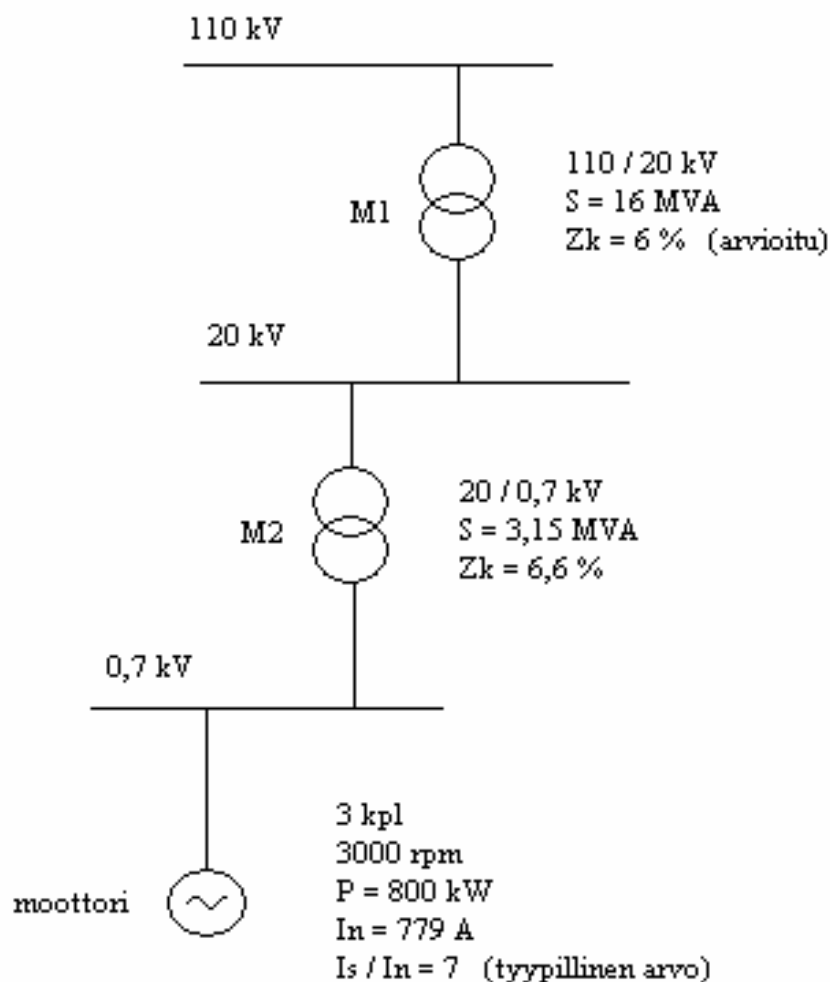
$$I_{k20\min}'' = 3,50 \angle -84,29^\circ \text{ kA}$$

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta laskettuna suoraan kolmivaiheisesta oikosulkuvirrasta

$$I_{k20\min}'' = 3,80 \angle -84,0^\circ \text{ kA}$$

ESIMERKKILASKELMA JÄNNITTEENALENEMASTA UUDELLA PÄÄMUUNTAJALLA

Kuvassa 1 on esitetty laskennan kohteena oleva 20 kV teollisuusverkko uuden päämuuntajan M1 kanssa.



Kuva 1 Teollisuusverkko uudella päämuuntajalla

Kuvasta nähdään, että 110 kV verkko syöttää muuntajan M1 avulla 20 kV verkkoa. Muuntaja M2 taas muuttaa 20 kV jännitteen oikosulkumoottoreille sopivaksi 0,69 kV (660 V) jännitteeksi. Oikosulkumoottoreita on kolme kappaletta ja teholtaan ne ovat 800 kW kukin.

Kuvasta nähdään myös mm. muuntajien ja oikosulkumoottorien tekniset arvot. Uuden päämuuntajan M1 tarvittavan tehon tarve on arvioitu kohdassa 5.1. Muuntajan suhteellisen impedanssin arvo on arvioitu ja se on samalla pienin järkevä impedanssin arvo tämän kokoisessa muuntajassa. Muuntajan M2 suhteellisen impedanssin arvo on saatu muuntajan kilpiarvotiedoista. Lisäksi oikosulkumoottorin käynnistysvirtakerroin on arvioitu.

1 JÄNNITTEENALENEMA 0,69 KV KISKOSTOSSA

1.1 Käynnistysvirta

Jännitteenalenema 0,69 kV kiskostossa lasketaan sellaisella virralla, joka tulee siitä, kun jätevesilaitoksella (301 TNA) yhtä 800 kW:n moottoria käynnistetään.

Yhden moottorin teho S_1 saadaan laskettua kaavan 12 avulla seuraavasti

$$\begin{aligned} S_1 &= \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 660 \text{ V} \cdot 779 \text{ A} = 890516,6022 \text{ VA} \\ &= 890,5166 \text{ kVA} \end{aligned}$$

Käynnistyvän oikosulkumoottorin teho saadaan laskettua kaavan 24 avulla seuraavasti

$$\begin{aligned} S_k &= \sqrt{3} \cdot U \cdot (I_s / I_n \cdot I_n) = \sqrt{3} \cdot 660 \text{ V} \cdot (7 \cdot 779 \text{ A}) \\ &= 6233616,2154 \text{ VA} = 6233,6162 \text{ kVA} \end{aligned}$$

Verkossa kulkeva virta voidaan laskea edellisestä tehosta yhtälön 25 avulla seuraavasti

$$I_1 = \frac{S_k}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{6233616,2154 \text{ VA}}{\sqrt{3} \cdot 660 \text{ V}} = 5453,0 \text{ A}$$

Kun edellinen virta redusoidaan 20 kV tasolle yhtälön 26 mukaisesti, saadaan

$$I'_{20} = \left(\frac{U_{1n}}{U_{2n}} \right) \cdot I_1 = \left(\frac{660V}{20000V} \right) \cdot 5453,0 A = 179,949 A$$

1.2 Impedanssit

Muuntajan M1 ja muuntajan M2 impedanssin arvot on saatu liitteestä 4 kohdasta 1.2.1. Kaapeleiden impedanssin arvot on saatu kohdasta 7.2.2.2. Seuraavassa taulukossa 1 on esitetty muuntajien ja kaapeleiden resistanssit, reaktanssit ja impedanssit, sekä laskettu impedanssien summa.

Taulukko 1 Muuntajien ja kaapeleiden resistanssit, reaktanssit ja impedanssit

	R / Ω	X / Ω	Z / Ω
Muuntaja M1	0,1492	1,4925	0,1492+j1,4925
Muuntaja M2	0,8339	8,3391	0,8339+j8,3391
APYAKMM 3-185	0,00175	0,0000314	0,00175+j0,0000314
APYAKMM 3-150	0,12152	0,09852	0,12152+j0,09852
APYAKMM 3-120	0,09956	0,071628	0,09956+j0,071628
AXKJ 3-185	0,06422	0,119381	0,06422+j0,119381
AHXAMK-W 3-185	0,01014	0,001885	0,01014+j0,001885
AHXAMK-W 3-185	0,05915	0,010996	0,05915+j0,010996
APYAKMM 3-185	0,06125	0,0011	0,06125+j0,0011
AHXAMK-W 3-185	0,05915	0,010996	0,05915+j0,010996
AHXAMK-W 3-185	0,01014	0,001885	0,01014+j0,001885
Kaapelit yht.	0,48688	0,3164224	0,48688+j0,3164224
Kaikki yht.	1,46998	10,148022	1,46998+j10,148022

1.3 Kokonaisjännitteenalenema

Verkon alkupään jännite on seuraavanlainen

$$\underline{U}_1 = 20000 \angle 0^\circ V$$

Käynnistyvän oikosulkumoottorin $\cos \varphi = 0,2$, joten $\varphi = 78,46^\circ$. Jännitehäviö saadaan näin ollen laskettua kohdan 7.2.2.3 mukaan yhtälöllä 27

$$\begin{aligned}\underline{U}_h &= \sqrt{3} \cdot \underline{IZ} = \sqrt{3} \cdot 179,9490 \angle -78,46^\circ \text{ A} \cdot (1,46998 + j10,148022) \Omega \\ &= 3195,9549 \angle 3,30^\circ \text{ V} = 3,1960 \angle 3,30^\circ \text{ kV}\end{aligned}$$

Loppupään jännite saadaan laskettua yhtälön 28 mukaan seuraavasti

$$\begin{aligned}\underline{U}_2 &= \underline{U}_1 - \underline{U}_h = (20000 \angle 0^\circ \text{ V}) - (3195,9549 \angle 3,30^\circ \text{ V}) \\ &= 16810,3513 \angle -0,63^\circ \text{ V} = 16,8104 \angle -0,63^\circ \text{ V}\end{aligned}$$

Jännitteenalenema on alkupään jännitteen itseisarvon ja loppupään jännitteen itseisarvon erotus. Se saadaan laskettua yhtälön 29 avulla

$$\begin{aligned}U_h &= |U_1| - |U_2| = |20000 \angle 0^\circ \text{ V}| - |16810,3513 \angle -0,63^\circ \text{ V}| \\ &= 3196,0142 \angle -3,32^\circ \text{ V} = 3,1960 \angle -3,32^\circ \text{ V}\end{aligned}$$

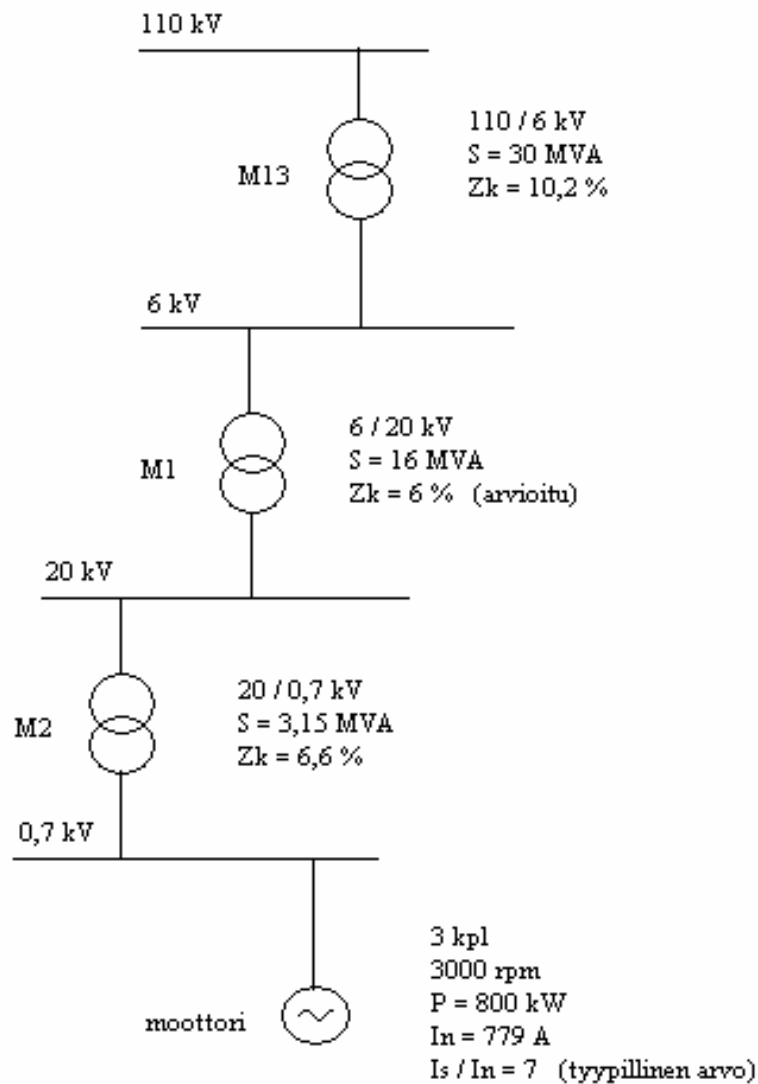
Jännitteenalenema prosentteina pääjännitteestä saadaan laskettua yhtälöllä 30

$$U_h \% = \frac{U_h}{U} \cdot 100\% = \frac{3196,0142 \text{ V}}{20000} \cdot 100\% = 15,98\%$$

Edellisestä jännitteenalenemasta muuntajan M1 osuus on noin 2,3 %, muuntajan M2 osuus noin 13,1 % ja kaapeleiden osuus noin 0,6 %.

Jännitteenalenema välimuuntajalla

Kuvassa 1 on esitetty laskennan kohteena oleva 20 kV teollisuusverkko välimuuntajan kanssa.



Kuva 1 Teollisuusverkko välimuuntajalla

Kuvasta nähdään, että 110 kV verkko syöttää muuntajan M13 avulla 6 kV verkkoa. Muuntaja M1 muuttaa 6 kV jännitteen 20 kV jännitteeksi. Muuntaja M2 taas muuttaa 20 kV jännitteen oikosulkumoottoreille sopivaksi 0,69 kV (660 V) jännitteeksi. Oikosulkumoottoreita on kolme kappaletta ja teholtaan ne ovat 800 kW kukin.

Kuvasta nähdään myös mm. muuntajien ja oikosulkumoottorien tekniset arvot. Muuntajan M1 tarvittavan tehon tarve on arvioitu kohdassa 5.1. Muuntajan suhteellisen impedanssin arvo on arvioitu ja se on samalla pienin järkevä impedanssin arvo tämän kokoisessa muuntajassa. Muuntajan M2 suhteellisen impedanssin arvo on saatu muuntajan kilpiarvotiedoista. Lisäksi oikosulkumoottorin käynnistysvirtakerroin on arvioitu.

Jännitteenalenema välimuuntajalla lasketaan samalla periaatteella kuin jännitteenalenema päämuuntajankin kanssa. Muuntajien jännitteenalenemat ovat yhtä suuria, mutta kaapeleiden jännitteenalenema hieman pienenee.

Jännitteenalenema prosentteina pääjännitteestä on

$$U_h = 15,80 \%$$

Edellisestä jännitteenalenemasta muuntajan M1 osuus on noin 2,3 %, muuntajan M2 osuus noin 13,1 % ja kaapeleiden osuus noin 0,4 %.

ESIMERKKILASKELMA MUUNTAJIEN TALOUDELLISUUDESTA

1 VANHA PÄÄMUUNTAJA M4

1.1 Häviöt

Vanhan päämuuntajan kilpiarvotiedot on esitetty jo kohdassa 4.3.

Kilpiarvotiedoissa on annettu muuntajan tyhjäkäyntihäviöt muuntajan nimellisellä kuormalla, ja tyhjäkäyntihäviöt ovat 29,7 kW. Muuntajan kilpiarvotiedoissa ei ole annettu muuntajan kuormitushäviöitä muuntajan nimellisellä kuormalla, joten ne piti kysyä ABB:n muuntajatehtaalta Vaasasta. Muuntaja on jo vanha ja sen tiedotkin ovat jo aika vanhoja, joten tietoja ei ollut helppo enää löytää. Pienen etsinnän jälkeen ABB:ltä kuitenkin ilmoitettiin ystävällisesti, että tämän muuntajan kuormitushäviöt nimellisellä kuormalla ovat 88,1 kW.

Muuntajan häviöt nimellisellä kuormalla ovat siis

$$P_{0n} = 29,7 \text{ kW}$$

$$P_{kn} = 88,1 \text{ kW}.$$

Tyhjäkäyntihäviöt riippuvat jännitteestä, mutta eivät kuormituksesta, joten tyhjäkäyntihäviöiden suuruus pysyy koko ajan vakiona. Kuormitushäviöt puolestaan riippuvat muuntajan kuormasta ja ne saadaan laskettua kohdan 7.3.1 yhtälön 31 mukaan seuraavasti

$$P_k = \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 \cdot P_{kn} = \left(\frac{3,7 \text{ MVA}}{30 \text{ MVA}} \right)^2 \cdot 88,1 \text{ kW} = 1,3 \text{ kW}$$

Kun muuntajan tyhjäkäyntihäviöt ja kuormitushäviöt lasketaan yhteen yhtälön 32 mukaisesti, saadaan muuntajan kokonaishäviöiksi

$$P_{kok} = P_o + P_k = 29,7 kW + 1,3 kW = 31,0 kW$$

Edellinen kokonaishäviö tarkoittaa häviöitä tunnissa. Koska kuormitus on vuodenaajoista riippumatta hyvin tasaista, saadaan muuntajan häviöt vuorokaudessa laskettua seuraavan yhtälön 33 avulla

$$P_{kok/d} = 24 h \cdot P_{kok} = 24 h \cdot 31,0 kW = 744 kWh/d$$

Vielä kun halutaan tietää, että kuinka suuret muuntajan häviöt ovat vuodessa saadaan se laskettua yhtälöllä 34 seuraavasti

$$\begin{aligned} P_{kok/a} &= 365 d \cdot P_{kok/d} = 365 d \cdot 744 kWh/d = 271560 kWh/a \\ &= 271,560 MWh/a \end{aligned}$$

Sähköenergian hinnaksi sovittiin 32 € / MWh. Muuntajan häviöiden hinta vuodessa saadaan näin ollen laskettua yhtälön 35 avulla

$$\begin{aligned} K_{häv,1} &= P_{kok/a} / MWh \cdot 32 e / MWh \\ &= 271,560 MWh \cdot 32 e / MWh = 8689,92 e \end{aligned}$$

1.2 Kustannuslaskelma

Muuntajan investoinneista aiheutuvat kustannukset diskontataan valitun laskentakorkokannan mukaisesti tarkasteluhetkeen nykyarvomenetelmän avulla. Ensimmäiseksi täytyy kuitenkin selvittää kuormituksen ja laskentakorkokannan vaikutukset laskennassa. Pitoajaksi valitaan vanhan päämuuntajan M4 oletettu elinikä eli 20 vuotta. Kuormitus tulee kasvamaan tulevaisuudessa ehkä noin 0,5 MVA, ja se kun jaetaan 20 vuodelle tasaisesti suhteessa nykyiseen kuormitukseen, voidaan kuormituksen keskimääräiseksi kasvuprosentiksi valita 1 %. Yrityksen laskentakorkokantana voidaan käyttää 10 %:a. Näin ollen kuormituksen ja laskentakorkokannan vaikutukset laskennassa voidaan laskea kohdan 7.3.2 mukaisesti yhtälöllä 38

$$\psi = \frac{1 + \left(\frac{r}{100}\right)^2}{1 + \frac{p}{100}} = \frac{1 + \left(\frac{1}{100}\right)^2}{1 + \frac{10}{100}} = 0,91$$

Oletetaan, että jännite pysyy vakiona koko tarkasteluajanjakson ja etteivät häviöt muuntajassa kasva vanhenemisen vuoksi. Tällöin saadaan κ , joka huomioi laskentavälin, laskettua yhtälön 37 avulla seuraavasti

$$\kappa = \psi \cdot \frac{\psi^{t_1} - 1}{\psi - 1} = 0,91 \cdot \frac{0,91^{20} - 1}{0,91 - 1} = 8,58$$

Vanhan muuntajan investointikustannukset ovat 0 euroa, kun ei oteta pienempiä kustannuseriä, kuten muuntajan huolto- ja korjaustöitä, huomioon. Muuntajan nykyarvo voidaan laskea yhtälön 36 avulla seuraavasti

$$NA = K_{inv} + \kappa \cdot K_{häv,1} = 0 + 8,58 \cdot 8689,92 e = 74560,51 e$$

2 UUSI PÄÄMUUNTAJA

2.1 Häviöt

Uuden päämuuntajan yleiset tiedot löytyvät kohdasta 5.2 ja 6.4. Tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöitä muuntajan nimellisellä kuormalla ei entuudestaan voi tietää, joten ne piti kysyä ABB:n muuntajatehtaalta Vaasasta. ABB:n muuntajatehtaalla pystyttiin arvioimaan muuntajan tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt muuntajan nimellisellä kuormalla, vaikka itse muuntajaa ei ole vielä valmistettu. Muuntajan tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt ovat

$$P_{0n} = 10,5 \text{ kW}$$

$$P_{kn} = 76,0 \text{ kW.}$$

Tyhjäkäyntihäviöt riippuvat jännitteestä, mutta eivät kuormituksesta, joten tyhjäkäyntihäviöiden suuruus pysyy koko ajan vakiona. Kuormitushäviöt puolestaan riippuvat muuntajan kuormasta ja ne saadaan laskettua kohdan 7.3.1 mukaisesti yhtälöllä 31

$$P_k = \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 \cdot P_{kn} = \left(\frac{3,7 \text{ MVA}}{16 \text{ MVA}} \right)^2 \cdot 76,0 \text{ kW} = 4,1 \text{ kW}$$

Kun muuntajan tyhjäkäyntihäviöt ja kuormitushäviöt lasketaan yhteen yhtälön 32 mukaisesti, saadaan muuntajan kokonaishäviöiksi

$$P_{kok} = P_o + P_k = 10,5 \text{ kW} + 4,1 \text{ kW} = 14,6 \text{ kW}$$

Edellinen kokonaishäviö tarkoittaa häviöitä tunnissa. Koska kuormitus on vuodenaajoista riippumatta hyvin tasaista, saadaan muuntajan häviöt vuorokaudessa laskettua seuraavan yhtälön 33 avulla

$$P_{kok/d} = 24 \text{ h} \cdot P_{kok} = 24 \text{ h} \cdot 14,6 \text{ kW} = 350,4 \text{ kWh/d}$$

Vielä kun halutaan tietää, että kuinka suuret muuntajan häviöt ovat vuodessa saadaan se laskettua yhtälöllä 34 seuraavasti

$$\begin{aligned} P_{kok/a} &= 365 \text{ d} \cdot P_{kok/d} = 365 \text{ d} \cdot 350,4 \text{ kWh/d} = 127896 \text{ kWh/a} \\ &= 127,896 \text{ MWh/a} \end{aligned}$$

Sähköenergian hinnaksi sovittiin 32 € / MWh. Muuntajan häviöiden hinta vuodessa saadaan näin ollen laskettua yhtälön 35 avulla

$$\begin{aligned} K_{häv,1} &= P_{kok/a} / \text{MWh} \cdot 32 \text{ € / MWh} \\ &= 127,896 \text{ MWh} \cdot 32 \text{ € / MWh} = 4092,67 \text{ €} \end{aligned}$$

2.2 Kustannuslaskelma

Muuntajan kuormituksen keskimääräiseksi kasvuprosentiksi voidaan valita sama arvo kuin vanhallekin päämuuntajalle eli 1 %. Yrityksen laskentakorkokantana voidaan käyttää myös samaa arvoa eli 10 %:a. Näin ollen kuormituksen ja laskentakorkokannan vaikutukset laskennassa ovat samat kuin vanhallakin muuntajalla, kuten myös laskentavälin huomioiva κ .

$$\psi = 0,92$$

$$\kappa = 8,58$$

Uuden päämuuntajan investointikustannukset koostuvat lähinnä muuntajan hinnasta, koska muuntajajätkä sekä lähtö- ja tulokennot ovat jo valmiina. Muuntajan hintaa ei tarkalleen voi tietää, koska se määräytyy muuntajatarjouksessa, joka pyydetään vasta silloin, jos muuntaja meinataan oikeasti hankkia. Sain kuitenkin tietoon tämän kokoisen muuntajan budjettihinnan ilman arvonlisäveroa, mikä on noin 250 000 €. Myöskään tässä vaihtoehdossa ei oteta pienempiä kustannuseriä, kuten muuntajan huolto- ja korjaustöitä, huomioon. Muuntajan investoinnin ja häviöiden nykyarvo voidaan näin ollen laskea yhtälön 36 avulla seuraavasti

$$NA = K_{inv} + \kappa \cdot K_{häv,1} = 250000 e + 8,58 \cdot 4092,67 e = 285115,11 e$$

3 VÄLIMUUNTAJA

3.1 Häviöt

Välimuuntajan yleiset tiedot löytyvät kohdasta 5.3 ja 6.5. Tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöitä muuntajan nimellisellä kuormalla ei entuudestaan voi tietää, joten ne piti kysyä ABB:n muuntajatehtaalta Vaasasta. ABB:n muuntajatehtaalla pystyttiin arvioimaan muuntajan tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt muuntajan nimellisellä kuormalla, vaikka itse muuntajaa ei ole vielä valmistettu. Muuntajan tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt ovat

$$P_{0n} = 11,1 \text{ kW}$$

$$P_{kn} = 63,9 \text{ kW.}$$

Tyhjäkäyntihäviöt riippuvat jännitteestä, mutta eivät kuormituksesta, joten tyhjäkäyntihäviöiden suuruus pysyy koko ajan vakiona. Kuormitushäviöt puolestaan riippuvat muuntajan kuormasta ja ne saadaan laskettua kohdan 7.3.1 yhtälön 31 mukaan seuraavasti

$$P_k = \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 \cdot P_{kn} = \left(\frac{3,7 \text{ MVA}}{16 \text{ MVA}} \right)^2 \cdot 63,9 \text{ kW} = 3,4 \text{ kW}$$

Kun muuntajan tyhjäkäyntihäviöt ja kuormitushäviöt lasketaan yhteen yhtälön 32 mukaisesti, saadaan muuntajan kokonaishäviöiksi

$$P_{kok} = P_o + P_k = 11,1 \text{ kW} + 3,4 \text{ kW} = 14,5 \text{ kW}$$

Edellinen kokonaishäviö tarkoittaa häviöitä tunnissa. Koska kuormitus on vuodenaajoista riippumatta hyvin tasaista, saadaan muuntajan häviöt vuorokaudessa laskettua yhtälön 33 avulla

$$P_{kok/d} = 24 \text{ h} \cdot P_{kok} = 24 \text{ h} \cdot 14,5 \text{ kW} = 348,0 \text{ kWh/d}$$

Vielä kun halutaan tietää, että kuinka suuret muuntajan häviöt ovat vuodessa saadaan se laskettua yhtälöllä 34 seuraavasti

$$\begin{aligned} P_{kok/a} &= 365 \text{ d} \cdot P_{kok/d} = 365 \text{ d} \cdot 348,0 \text{ kWh/d} = 127020 \text{ kWh/a} \\ &= 127,020 \text{ MWh/a} \end{aligned}$$

Sähköenergian hinnaksi sovittiin 32 € / MWh. Muuntajan häviöiden hinta vuodessa saadaan näin ollen laskettua yhtälön 35 avulla

$$\begin{aligned} K_{häv,1} &= P_{kok/a} / \text{MWh} \cdot 32 \text{ € / MWh} \\ &= 127,020 \text{ MWh} \cdot 32 \text{ € / MWh} = 4064,64 \text{ €} \end{aligned}$$

Lisäksi piti selvittää myös M13 muuntajan tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt, koska M13 syöttää sitä 6 kV kiskostoa, josta välimuuntajan syöttö otetaan. Näin ollen muuntajan M13 häviöt tulevat kasvamaan välimuuntajan myötä 3,7 MVA. Muuntajan M13 tämän hetkinen kuormitus on noin 3,3 MVA ja kuormitushäviöt ovat noin 1,7 kW. Muuntajan tyhjäkäynti- ja kuormitushäviöt nimellisellä kuormalla ovat

$$P_{0n} = 21,3 \text{ kW}$$

$$P_{kn} = 142,5 \text{ kW}.$$

Tyhjäkäyntihäviöt riippuvat jännitteestä, mutta eivät kuormituksesta, joten tyhjäkäyntihäviöiden suuruus pysyy koko ajan vakiona. Kuormitushäviöt puolestaan riippuvat muuntajan kuormasta. Muuntajan M13 tämän hetkiseen kuormitukseen 3,3 MVA täytyy siis lisätä myös välimuuntajan kuormitus 3,7 MVA, jotta saadaan selville muuntajan M13 kuormitushäviöt tässä tapauksessa. Kuormitushäviöt saadaan laskettua kohdan 7.3.1 yhtälön 31 mukaan seuraavasti

$$P_k = \left(\frac{S}{S_n} \right)^2 \cdot P_{kn} = \left(\frac{3,3 \text{ MVA} + 3,7 \text{ MVA}}{30 \text{ MVA}} \right)^2 \cdot 142,5 \text{ kW} = 7,8 \text{ kW}$$

Kun halutaan tietää vain 3,7 MVA kuormituksen kasvusta aiheutuneiden kuormitushäviöiden kasvu muuntajassa M13, täytyy edellisistä kuormitushäviöistä (7,8 kW) vähentää muuntajan M13 tämän hetkiset kuormitushäviöt (1,7 kW), jolloin kuormituksen lisäyksestä johtuvat kuormitushäviöt ovat 6,1 kW. Muuntajan tyhjäkäyntihäviöiden suuruus ei muutu.

Edellinen kuormituksen lisäyksestä johtuva häviö tarkoittaa häviöitä tunnissa. Kun halutaan tietää kuinka suuret ovat häviöt vuorokaudessa, lasketaan häviöt seuraavan yhtälön 33 avulla

$$P_{kok/d} = 24 \text{ h} \cdot P_{kok} = 24 \text{ h} \cdot 6,1 \text{ kW} = 146,4 \text{ kWh} / d$$

Vielä kun halutaan tietää, että kuinka suuret muuntajan häviöt ovat vuodessa saadaan se laskettua yhtälöllä 34 seuraavasti

$$\begin{aligned}
 P_{kok/a} &= 365 d \cdot P_{kok/d} = 365 d \cdot 146,4 kWh/d = 53436 kWh/a \\
 &= 53,436 MWh/a
 \end{aligned}$$

Sähköenergian hinta on 32 € / MWh. Muuntajan M13 kuormituksen lisäyksestä johtuva häviöiden hinta vuodessa saadaan näin ollen laskettua yhtälön 35 avulla

$$\begin{aligned}
 K_{häv,1} &= P_{kok/a} / MWh \cdot 32 e / MWh \\
 &= 53,436 MWh \cdot 32 e / MWh = 1709,95 e
 \end{aligned}$$

Kun välimuuntajan häviöiden hinta vuodessa (4064,64 €) summataan muuntajan M13 kuormituksen lisäyksen johdosta johtuvien kuormitushäviöiden hinnan (1709,95 €) kanssa, saadaan kokonaishäviöiden hinnaksi vuodessa 5774,59 €.

3.2 Kustannuslaskelma

Muuntajan kuormituksen keskimääräiseksi kasvuprosentiksi voidaan valita sama arvo kuin edellisillekin muuntajille eli 1 %. Yrityksen laskentakorkokantana voidaan käyttää myös samaa arvoa eli 10 %:a. Näin ollen kuormituksen ja laskentakorkokannan vaikutukset laskennassa ovat samat kuin edelläkin, kuten myös laskentavälin huomioiva κ

$$\psi = 0,92$$

$$\kappa = 8,58.$$

Välimuuntajan investointikustannukset koostuvat lähinnä muuntajan hinnasta, muuntajatilán rakentamisesta, 6 kV lähtökennosta, välimuuntajan tulokennosta ja kaapelista 6 kV lähtökennon ja välimuuntajan välillä. Myöskään tässä vaihtoehdossa ei oteta pienempiä kustannuseriä, kuten muuntajan huolto- ja korjaustöitä, huomioon.

3.2.1 Kaapelin investointikustannukset

Syöttökaapelin vetäminen 15 D:stä puutyötehtaalle vaikeutuu, koska näiden välissä on rautatiekisko ja maantie, jossa kuljetetaan paperirullia tehtaan ja sataman välillä. Kuljetusreittiä ei kovinkaan mielellään katkaista, koska silloin kuljetusrekkojen reittiä pitäisi väliaikaisesti muuttaa, ja myöskään juna ei pääsisi tällöin kulkemaan. Ensimmäisenä vaihtoehtona on, että kaapeli vedetään ensiksi rautatien ja maantien yli jo olemassa olevaa kuljetussiltaa pitkin HK 2:lle. Tämän jälkeen kaapeli viedään HK 2:n seinää pitkin, kunnes se kaivetaan maahan, jossa se menee jo puutyötehtaalle asti. Sellaista valmista rautatien ja maantien alitusta, jonne tämän kokoiset kaapelit mahtuisivat, ei ole.

Kun kaapeli täytyy vetää kuljetussillan kautta, niin kaapelin pituus tulee kasvamaan ehkä noin 100 m verrattuna suoraan maahan kaivuuseen. Pituudeksi tulisi kaiken kaikkiaan näin ollen noin 270 m. Kaapelin AHXCMK-WTC 3 · 1 · 800 Al /35 Cu hinta on noin 102 € / m. Kolmen kaapelin nippuja täytyy vetää kaksi (AHXCMK-WTC 2 · 3 · 1 · 800 Al /35 Cu), jolloin hinnaksi tuleekin 204 € / m. Kun kaapeleiden metrihinta kerrotaan tarvittavalla kaapelin pituudella, saadaan kaapeleiden yhteishinnaksi noin 55 080 euroa.

Maahan kaapelia pitäisi kaivaa noin 105 m. Kaapelikuoppa täyttöineen maksaa noin 40 € / m, joten koko matkan hinnaksi tulisi 4200 €. Betonilaattoja (500 · 500 mm) menee edelliselle matkalle 210 kpl. Yhden betonilaatan hinta on 6 €, joten betonilaattojen kokonaishinnaksi tulisi näin ollen 1260 €. Jos puutyötehtaalla oleva kuljetustie vaatii alleen isommat betonilaatat paremman vakauksen vuoksi, niin näiden betonilaattojen (1000 · 2000 mm) hinta on 280 € / kpl. Näin ollen pienempiä laattoja tulisi tässä tapauksessa noin 97 metrin matkalle 194 kpl, jolloin niiden hinnaksi tulisi 1164 €. Isompia laattoja tulisi noin 8 metrin matkalle 4 kpl, jolloin niiden hinnaksi tulisi 1120 €. Isompien ja pienempien laattojen yhteishinta on siis 2284 €.

Kaapelin, kaivuun ja laattojen yhteishinnaksi tulee edellisten perusteella 61 564 €.

Toisena vaihtoehtona on, että rautatiekiskon ja maantien ali mennään tunkin avulla ilman, että rautatiekiskoa ja maantietä tarvitsee katkaista väliaikaisesti. Kaapelin pituudeksi tulisi kaiken kaikkiaan noin 170 m. Kaapelin AHXCMK-WTC 3 · 1 · 800 Al /35 Cu hinta on noin 102 € / m. Kolmen kaapelin nippuja täytyy vetää kaksi (AHXCMK-WTC 2 · 3 · 1 · 800 Al /35 Cu), jolloin hinnaksi tuleekin 204 € / m. Kun kaapeleiden metrihinta kerrotaan tarvittavalla kaapelin pituudella, saadaan kaapeleiden yhteishinnaksi noin 34 680 euroa.

Rautatien ja maantien alitus tunkin avulla maksaa noin 400 € / m. Kun tien leveys on noin 13 m, saadaan alituksen hinnaksi yhteensä noin 5200 €. Edellisen lisäksi maahan pitäisi kaivaa kaapelia vielä noin 107 m. Kaapelikuoppa täyttyneen maksaa noin 40 € / m, joten koko matkan hinnaksi tulisi 4280 €. Betonilaattoja (500 · 500 mm) menee edelliselle matkalle 214 kpl. Yhden betonilaatan hinta on 6 €, joten betonilaattojen kokonaishinnaksi tulisi näin ollen 1284 €. Jos puutyötehtaalla oleva kuljetustie vaatii alleen isommat betonilaatat paremman vakauksen vuoksi, niin näiden betonilaattojen (1000 · 2000 mm) hinta on 280 € / kpl. Näin ollen tässä tapauksessa pienempiä laattoja tulisi noin 99 metrin matkalle 198 kpl, jolloin niiden hinnaksi tulisi 1188 €. Isompia laattoja tulisi noin 8 metrin matkalle 4 kpl, jolloin niiden hinnaksi tulisi 1120 €. Isompien ja pienempien laattojen yhteishinta on siis 2308 €.

Kaapelin, kaivuun, rautatien ja maantien alituksen ja laattojen yhteishinnaksi tässä tapauksessa tulee edellisten perusteella 46 468 €.

3.2.2 Muut investointikustannukset

Välimuuntajan hintaa ei tarkalleen voi tietää, koska se määräytyy muuntajatarjouksessa, joka pyydetään vasta silloin, kun muuntaja meinataan oikeasti hankkia. Sain kuitenkin tietoon tämän kokoisen muuntajan budjettihinnan ilman arvonlisäveroa, mikä on noin 150 000 €. Myöskään tässä vaihtoehdossa ei oteta pienempiä kustannuseriä, kuten muuntajan huolto- ja korjaustöitä, huomioon.

Kyseisen muuntajan puutyötehtaan sisälle tuleva muuntajatilaseininen, kattoineen ja öljykuoppineen tulisi maksamaan arviolta noin 30 000 €.

6 kV lähtökennon hinta on noin 27 000 € ja muuntajan tulokennon hinta noin 25 000 €.

3.2.3 Kustannukset yhteensä

Seuraavassa taulukossa 1 ja 2 on välimuuntajainvestointiin liittyvät kustannusten hinnat eriteltyinä, sekä välimuuntajainvestoinnin kokonaishinta molemmissa tapauksissa.

Taulukko1 Välimuuntajainvestoinnin kustannukset kuljetussillan avulla

Kohde	hinta
	€
Kaapeli	55 080
Kaapelin kaivuu	4 200
Betonilaatat	2 284
Muuntaja	150 000
Muuntajarakennus	30 000
Lähtökennon 6 kV	27 000
Muuntajan tulokennon	25 000
Yhteensä	293 564

Taulukko 2 Välimuuntajainvestoinnin kustannukset rautatien ja maantien alituksella

Kohde	hinta
	€
Kaapeli	34 680
Kaapelin kaivuu	4 280
Betonilaatat	2 308
Rautatien ja maantien alitus	5 200
Muuntaja	150 000
Muuntajarakennus	30 000
Lähtökennon 6 kV	27 000
Muuntajan tulokennon	25 000
Yhteensä	278 468

Muuntajan investoinnin ja häviöiden nykyarvo voidaan näin ollen laskea halvemman vaihtoehdon eli rautatien ja maantien alituksella yhtälön 37 avulla seuraavasti

$$\begin{aligned} NA &= K_{inv} + \kappa \cdot K_{häv,1} = 278468 e + 8,58 \cdot 5774,59 e \\ &= 328013,98 e \end{aligned}$$