



Tehdasmuuntamon uudistamis- suunnitelma

Tehtaan sähköjärjestelmä

Marko Suntinen 1800047

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2020

Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu

Sähkövoimatekniikka

Marko Suntinen

Tehdasmuuntamon uudistamissuunnitelma

Opinnäytetyö 74 sivua, joista liitteitä 6 sivua

Toukokuu 2020

Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella Amerplastin tehtaan vanhan muuntamon uudistus. Uudistussuunnitelmaan sisältyi muuntamokennoston ja muuntamon suojalaitteiden uusiminen sekä muuntamokaapeleiden mahdollinen uudelleen sijoittelu. Muuntamoille suunniteltiin malliverkkoja, joissa on esitetty muuntamon suojausta erilaisilla laiteratkaisuilla. Tarkoituksena oli myös selvittää sähkökatkon toteutus ja uudistustyön mahdollinen ajallinen kesto. Lisäksi tutustuttiin lyhyesti tehdasmuuntamon sähköjakelun toteutukseen Amerplastin tehtaalla.

Opinnäytetyöraportti sisältää teoriaa muuntajista ja erilaisista muuntamon sähköjakeluun liittyvistä suojalaitteista. Yhdelle tehtaan muuntajista tehtiin virtoihin ja tehoihin liittyvät laskelmat. Opinnäytetyössä käytiin läpi myös muuntamoissa tyypillisesti käytetyt suojalaitteet ja niiden toimintaperiaatteet ja selostettiin tehtaan muuntamon toimintaa.

Tarkastelun kohteena oli lisäksi tehtaan sähköjakelun toteutus eli millaisia lähtöjä pääkeskuksilta on toteutettu tehtaan kuormalaitteille ja minkä vuoksi nämä ratkaisut ovat tehtaalla käytössä. Oikosulkua ja -virtaa sekä jännitteen alenemaa käsiteltiin opinnäytetyössä lähinnä teoreettisella tasolla.

Opinnäytetyö tulee aikanaan toimimaan ohjeena varsinaiselle muuntamon uudistamiselle. Osana opinnäytetyötä on selvitetty muun muassa tarvittavien kojeiden minimimäärä, muuntamon jakeluverkkoon tarvittava minimisuojaus ja muita urakoinnin aloittamisessa huomioitavia asioita.

Asiasanat: muuntamo, muuntaja, suojalaite, kaapelointi, sähkö jakelu

Opinnäytetyössä on arvioitu sähkökatkon kestoja, sen aiheuttamia tuotannollisia menetyksiä ja mahdollisuuksia niiden minimoimiseen. Myös kennostojen rakennetta vaihtoehtoja pohdittiin materiaalikustannusten minimointia ajatellen. Uudistamissuunnitelman lisäksi pohdittiin muuntajien tämänhetkistä kuntoa ja mahdollisuuksia kunnan selvittämiseen.

Tekniset kuvat on toteutettu CADS 18 -opiskelijaversiolla, joten kuvien kaupallinen käyttö on kielletty.

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences

Electrical engineering

Marko Suntinen

Renovation plan for factory transforming station

Bachelor's 74 pages, appendices 6 pages

May 2020

The purpose of the thesis was to plan the renovation of the old transformer station at the Amerplast factory. The renovation plan included the renewal of transformer cells and transformer station's safety devices and the possible re-routing of the transformer cables. Model grids were designed for the transforming stations, which demonstrates the transformer's protection with different types of device solutions. The goal was also to figure the execution of the power outage and the possible duration of the renovation work. In addition, we briefly got acquainted the execution of the electricity distribution of the Amerplast factory.

The thesis contains a theory about transformers and various safety devices related to the electricity distribution of the transformer station. Calculations related to current and power were performed for one of the factory's transformers. The thesis also examined the safety devices typically used in the transformer stations and their operating principles and explained the function of the factory's transformer station.

In addition, the execution of the plant's electricity distribution was also subject of inspection. In other words, which types of outputs have been implemented from the power centrals and why these solutions are in use. The short circuit and short circuit current and voltage drop were treated mainly at theoretical level.

In time, the thesis will serve as a guide for the actual renovation of the transformer station. As part of the thesis, the minimum number of components needed, the minimum protection required for the transformer's distribution grid and other issues at the start of the contract process have been taken into account.

The duration of power outage, the production losses it causes and the possibilities to minimize them have been evaluated in the thesis. The cell structure options were also considered to minimize material costs. In addition to the renovation plan, the current state of transformers and the possibilities of clarifying their condition.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	MUUNTAJA	9
	2.1 Tyhjäkäyntijännite	14
	2.2 Tyhjäkäyntikoe yksivaiheiselle muuntajalle	16
	2.3 Oikosulkukoe yksivaiheiselle muuntajalle	19
	2.4 Muuntajan hyötysuhde	22
	2.5 Kuormitettu yksivaiheinen muuntaja.....	23
3	KOLMIVAIHEMUUNTAJA	24
	3.1 Kolmivaihemuuntajan tyhjäkäynti- ja oikosulkukoe.....	25
	3.2 Tehtaan muuntaja	27
	3.2.1 Kolmivaihemuuntajan laskelmat	30
4	TEHDASMUUNTAMOT	32
	4.1 Alamuuntamo	35
	4.2 Ylämuuntamo	37
	4.3 Suojalaitteet.....	39
	4.3.1 Kuormanerotin	39
	4.3.2 Varokekuormanerotin.....	40
	4.3.3 Vähäöljykatkaisin.....	41
	4.3.4 Jännitemuuntaja.....	42
	4.3.5 Virtamuuntaja.....	43
	4.3.6 Paineilmakatkaisin.....	45
	4.3.7 Loistehon kompensointi.....	46
	4.3.8 Maasulkusuojaus.....	50
	4.4 MUUNTAMON TOIMINNAN SELOSTUS.....	53
	4.5 OIKOSULKUVIRRAT	55
	4.6 JÄNNITTEEN ALENEMA.....	58
	KENNOSTON SUUNNITTELU.....	60
	SF6-KOJEISTOT JA -KATKAISIJAT.....	65
	MALLIVERKON SUUNNITTELU.....	66
	PROJEKTIN ALOITUS.....	72

KATKON SUUNNITTELU.....	73
5 POHDINTA	74
LÄHTEET	75
LIITTEET	75
Liite 1. Muuntajan kytkentätaulukko	75
Liite 2. Kompensointilaitteiston kytkentäkuvat.....	76
Liite 3. TKS:n jakeluverkkoon liittymisen ohje.....	77
Liite 4. Asiakasmuuntamon releohjaus	78
Liite 5. Muuntajan datalehti	80
Liite 6. SPAD 346 C- Differentiaalireleen liitântäkaavio (ABB).....	80

LYHENTEET JA TERMIT

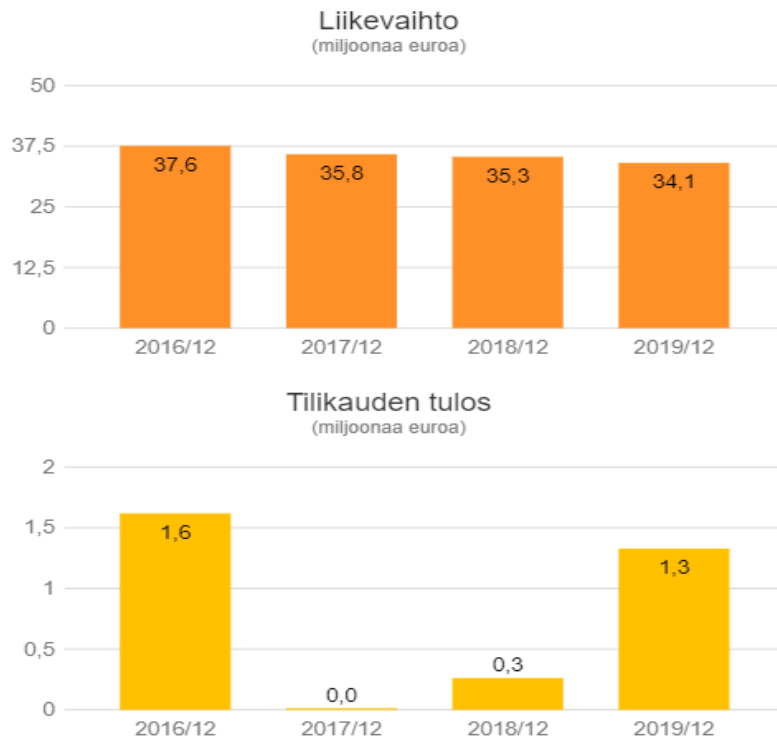
TAMK	Tampereen ammattikorkeakoulu
op	opintopiste
KJ	Keskijännite
PJ	Pienjännite
U_1	Ensiöjännite (U)
U_2	Toisiojännite (U)
N_1	Ensiökäämin kierroslukumäärä
N_2	Toisiokäämin kierroslukumäärä
I_1	Ensiökäämin virta (A)
I_2	Toisiokäämin virta (A)
S_N	Näennäisteho (VA)
f	Taajuus (Hz)
U_k	Suhteellinen oikosulkuimpedanssi (%)
Z_k	Oikosulkuimpedanssi (Ω)
U_o	Tyhjäkäyntijännite (V)
I_o	Tyhjäkäyntivirta (A)
W_o	Tyhjäkäyntihäviö/rautahäviö (W)
P_k	Kuormitushäviö (W)
P_o	Tyhjäkäyntihäviö (W)
R	Resistanssi (Ω)
Z	Impedanssi (Ω)
ρ	Ominaisvastus (Ωm)
I_k	Oikosulkuvirta (A)

1 JOHDANTO

Amerplast Ltd on erilaisia muovipakkauksia valmistava yritys, joka perustettiin vuonna 1952. Amerplastilla on kolme tehdasta, joista yksi sijaitsee Suomessa ja kaksi Puolassa. Lisäksi yrityksellä on neljä myyntipistettä Suomessa, Ruotsissa, Venäjällä ja Puolassa. Amerplastin tuotteita toimitetaan yli 25:en maahan ja yritys työllistää yhteensä noin 450 henkilöä.

Amerplastin liikevaihto vuonna 2019 oli 31,4 miljoonaa euroa, josta liikevoittoa kertyi 4,1 %. Tilikauden tulos 2019 oli 1,3 miljoonaa euroa.

Taloustiedot



	2016/12	2017/12	2018/12	2019/12
Liikevaihto (tuhatta euroa)	37577	35833	35313	34067
Liikevaihdon muutos %	6,7%	-4,6%	-1,5%	-3,5%
Käyttökate %				
Liikevoitto %	2,8%	-0,1%	1,3%	4,1%
Tilikauden tulos (tuhatta euroa)	1618	13	262	1328
Henkilöstö	148	150	166	167

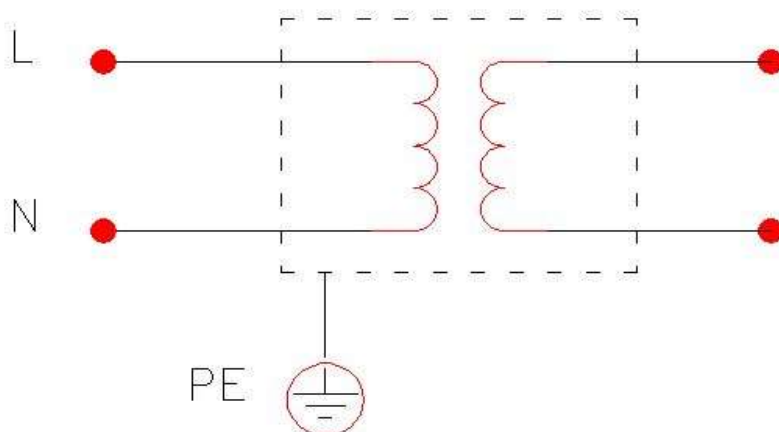
KUVA1. Taloustietoja (Lähde: Suomen Asiakastieto)

Tampereella sijaitseva tehdas on valmistunut 1950-1960 välillä. Tehdasta laajennettiin myöhemmin vuonna 1987. Tehtaan sähkönjakelu on toteutettu omilla muuntamoilla.

Tehtaan muuntamot on jaettu siten, että pakkaustehtaan puolella on oma muuntamo, jossa on 3 muuntajaa ja kassitehtaan puolella on kaksi muuntamoa, joissa on yhteensä kolme muuntajaa kahdessa erillisessä muuntamossa. Alamuuntamon muuntaja uusittu vuonna 1975. Muuntamon kennosto ja suojalaitteisto alkaa olla elinkaarensa lopussa, joten se olisi tarkoitus uudistaa. Uudistaminen ja laitehankinnat suunnitellaan ja lopuksi suunnitelma tulisi käydä läpi urakoitsijan kanssa.

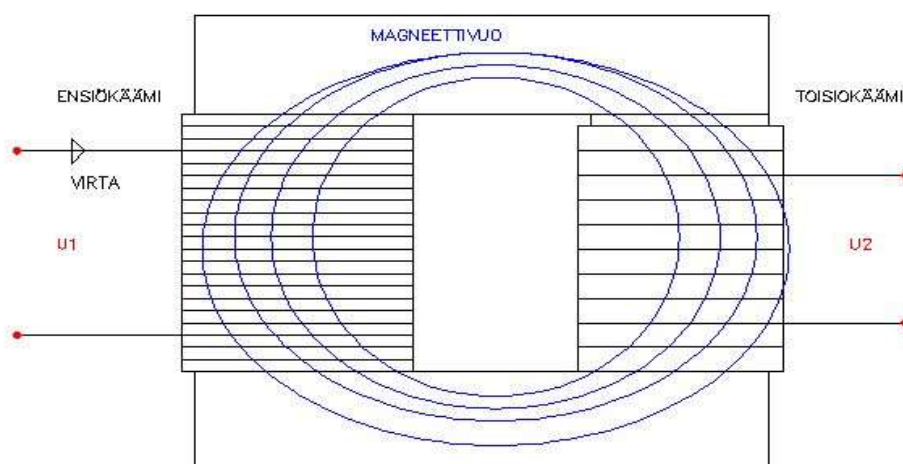
2 MUUNTAJA

Muuntaja on laite, jonka avulla vaihtojännitettä voidaan alentaa, nostaa tai pitää samana, jos halutaan vain galvaaninen erotus muusta piiristä. Tässä tapauksessa toisiopiiriä ei maadoiteta, jolloin saadaan estettyä vikatapauksissa virran kulku.



KUVA 2. Galvaanisen erotuksen periaate. (Suntinen. 2020)

Muuntaja koostuu rautasydämen ympärillä olevista käämityksistä, joita kutsutaan ensiökäämiksi ja toisiokäämiksi. Ensiökäämiin yleensä kytketään syöttöjännite ja toisiokäämistä saadaan muunnettu jännite ulos. Esim. isojen jakelumuuntajien oikosulkukokeessa oikosuljetaan yläjännitepuoli, koska nimellisvirta on pienempi verrattuna alajännitepuoleen, jolloin nimellisvirran synnyttämiseksi tarvitaan pienempi jännite.



KUVA 3. Magneettivuon muodostuminen rautasydämessä. (Suntinen. 2020)

Muuntajan toiminta perustuu virrallisen johtimen kehittämään magneettikenttään (KUVA 3). Syntynyttä magneettikenttää voidaan vahvistaa kiertämällä johdinta silmukalle. Magneettikenttä vahvistuu entisestään, kun silmukan sisälle tuodaan rautakappale. Rautakappale kehittää magneettivuon, joka kulkee rautakappaleen läpi. Kun rauta tehdään kehikoksi, jonka toiseen pylvääseen tehdään vastaavanlainen käämitys, saadaan periaatteellinen muuntaja, jossa raudan vuo indusoi jännitteen muuntajan toisiokäämitykseen.



KUVA 4. Yksivaihemuuntaja (Kuva: Suntinen. 2020)

Muuntajia käytetään jännitteen alentamiseen esimerkiksi latureissa, jolloin verkkojännite saadaan pienennettyä sopivaksi. Sähköjakeluverkostoissa muuntajilla nostetaan jännitettä, jolloin voidaan käyttää pienempiä virtoja sekä kapeampia johtimia. Amerplastilla nostojännitemuuntajia käytetään sähköisyyden poistajien virtalähteissä, joissa muuntajan toisiojännite voi olla useita kilovoltteja.



KUVA 5. Nostojännitemuuntaja (Kuva: Suntinen. 2020)

Lisäksi muuntajalla voidaan pitää syöttöjännite ja ulostulojännite samana, jos halutaan erottaa jännitteet galvaanisesti toisistaan. Tällöin puhutaan suojaerotusmuuntajasta, joita käytetään muun muassa erilaisissa laitekorjauksissa (KUVA 2).

Koska muuntajassa ei ole liikkuvia osia, sitä nimitetään staattiseksi sähkölaitteeksi. Samasta syystä muuntaja on periaatteessa huoltovapaa ja melko toimintavarma.

Ensiökäämin ja toisiökäämin jännitteet ovat suoraan verrannolliset käämikierrosten lukumäärään seuraavasti:

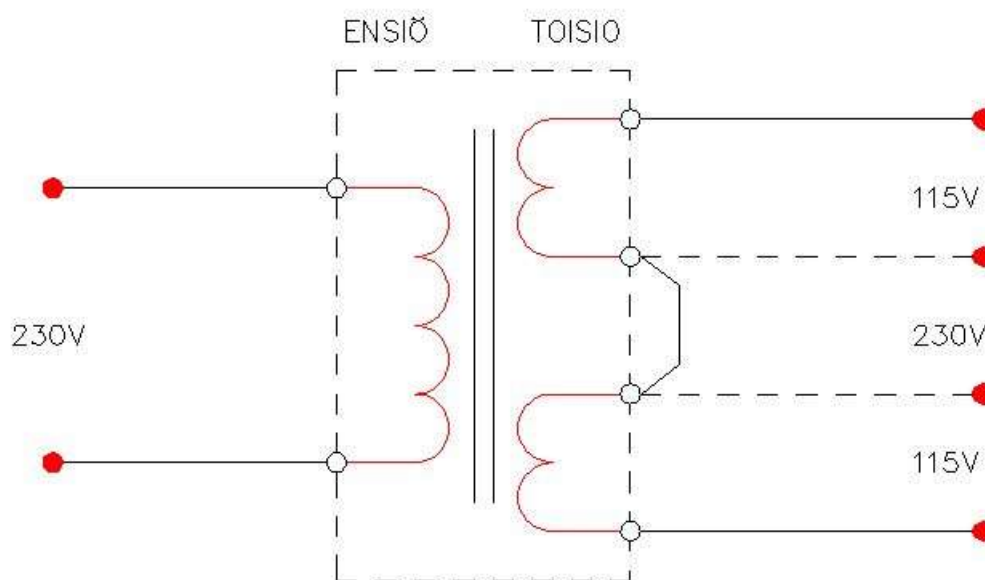
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1)$$

Kaavasta selviää, että lisäämällä käämin kierroslukua (N_1 ja N_2) nostetaan samalla käämin jännitettä (U_1 ja U_2). Kaava kertoo myös, että pienempi jännite ja pienempi johtimen kierrosmäärä kasvattaa virtaa (I_1 ja I_2), koska pienemmällä

johdinmäärällä resistanssi pienenee. Kaava 1 pätee ideaaliselle muuntajalle, jossa ei esiinny lainkaan häviöitä.

Todellisuudessa muuntajassa syntyy lämpöhäviöitä ja rautahäviöitä. Rautahäviöt ovat vakioita, jotka esiintyvät kuormittamattomassa muuntajassa. Lämpöhäviöt kasvavat muuntajan kuormituksen kasvaessa. (Ahoranta. Sähkötekniikka)

Joissakin muuntajissa on mahdollista käyttää eri osia käämityksestä. Tällöin muuntajan ensiöpuolella ja toisiopuolella on vapaita napoja, joita voidaan kytkeä halutulla tavalla erilaisten jännitteiden aikaan saamiseksi (KUVA 6 ja KUVA 7).



KUVA 6. Muuntajan useamman käämityksen periaate. (Suntinen.2020)



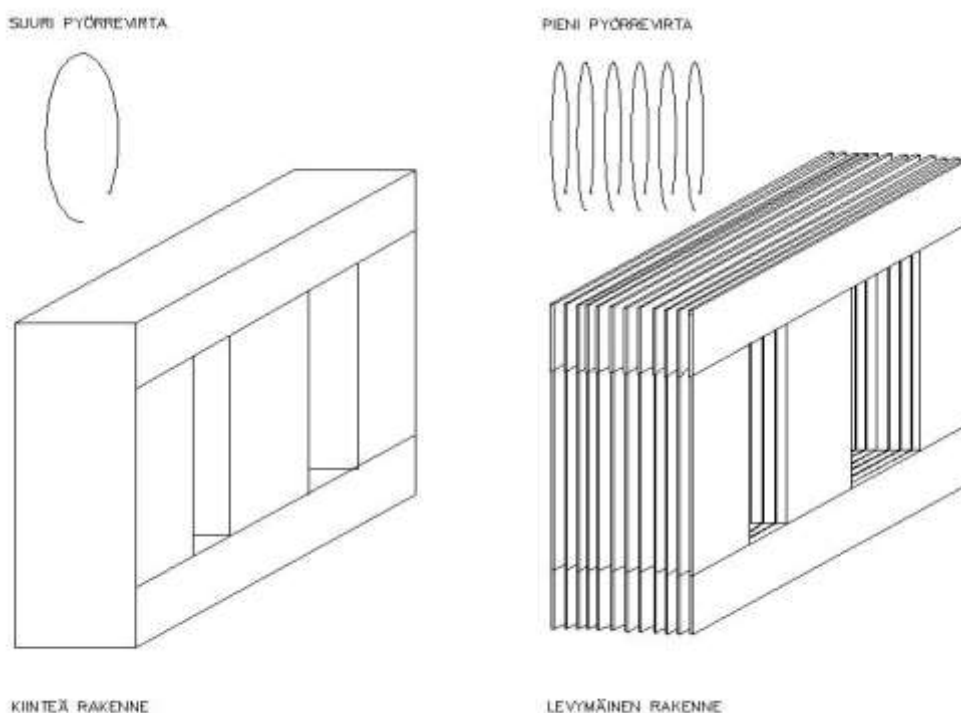
KUVA 7. Muuntajia, joissa on useamman kääminnän mahdollisuus (Kuva: Sun-
tinen. 2020)

2.1 Tyhjäkäyntijännite

Kuormittamaton muuntaja ottaa pienen ensiövirran sähkömagneettisen induktion takia, koska muuntajan rautasydämessä kulkevalla vuolla on paluureitti. Virta on pieni, koska se synnyttää vain vuon rautasydämeen ja koska toisiopuolen käämi on kuormittamattomana auki, ensiökäämi ei ota verkosta lisävirtaa. (Leena Korpinen. Muuntajat ja sähkölaitteet)

Idealisessa muuntajassa ei esiinny lainkaan häviöitä. Todellisuudessa muuntajassa syntyy häviöitä, vaikka muuntajan hyötysuhde on verrattain hyvä. Muuntajan tyhjäkäyntikokeen avulla voidaan määrittää muuntajassa esiintyviä häviöitä. Häviöitä syntyy rautasydämessä rautahäviöinä raudan resistiivisyyden vuoksi. Magneettivuon vaihteluiden vuoksi syntyy hystereesihäviöitä sekä lämpöhäviöitä. Myös raudassa syntyvät pyörrevirrat aiheuttavat lämpöhäviöitä. (Hietalahti. Sähkövoimatekniikan perusteet)

Pyörrevirrat ovat riippuvaisia vuon läpäisemästä pinta-alasta, joten kiinteä rautasydän muuntajassa lämpenisi voimakkaasti. Tämän vuoksi muuntajissa käytetään levyäistä rakennetta, jolloin pyörrevirtahäviöitä saadaan pienemmiksi.



KUVA 8. Muuntajan levyrakente ja pyörrevirrat (Suntinen. 2020)

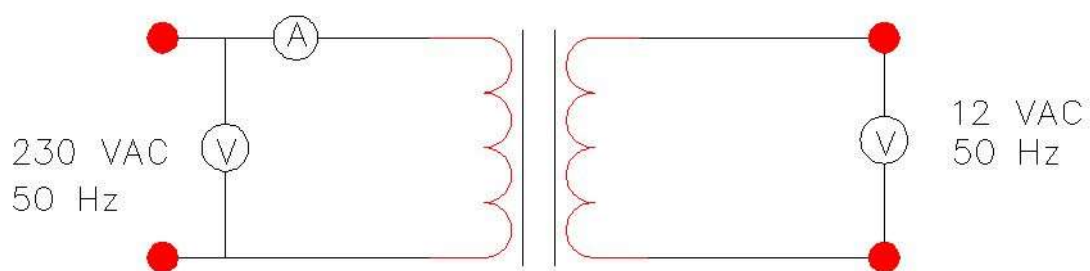


KUVA 9. Muuntajan levyrakente (Kuva: Suntinen. 2020)

Rautasydämessä syntyy lisäksi hajavuo, koska osa vuosta vaikuttaa myös raudan ulkopuolella, eikä siten ole hyödynnettävissä. Myös ensiöpuolen ja toisipuolen käämityksissä syntyy kuparihäviöitä. (Leena Korpinen. Muuntajat ja sähkölaitteet)

2.2 Tyhjäkäyntikoe yksivaiheiselle muuntajalle

Opinnäytetyön yhtenä osana tehtiin yksivaiheiselle muuntajalle tyhjäkäyntikoe, jonka avulla saadaan selvitettyä muuntajassa syntyviä häviöitä. Tehtaalta löytyi monia yksivaiheisia muuntajia, joista valittiin Muuntosähkö Oy MCST 150 – 230 – muuntajan.



KUVA 10. Tyhjäkäyntikokeen kytkentä. (Suntinen. 2020)

Muuntajan tiedoista selviää, että muuntaja kytketään 230V yksivaiheiseen jännitteeseen, jonka verkkotaajuus voi vaihdella välillä 50 – 60Hz. Ensiöpuolella suositellaan 800mA sulaketta, jolla estetään ensiökäämin liika lämpeneminen ja muuntajan vaurioituminen. Toisiokäämi eli ulostulojännite on 12V ja näennäis-teho 150VA.

Käytin mittauksissa Fluke 179- yleismittaria ja Fluke 365 - pihtivirtamittaria. Muuntaja on kytketty 230V verkkojännitteeseen, jonka taajuus on 50Hz. Ensiökäämiin on kytketty yleismittari tyhjäkäyntivirran mittausta varten ja toinen mittari jännitteen mittausta varten. Lisäksi piiriin kytketään tyypillisesti tehonmittaus rautahäviöiden määrittämistä varten mutta sellaista ei ollut saatavilla. Häviöt on yleensä ilmoitettu muuntajan datalehdessä. Seuraavalla sivulla mittaustulokset muuntajan tyhjäkäyntitilassa (TAULUKKO 1).

	Ensiö	Toisio	Muuntajan tiedot	
U (v)	230	13,05	Tyyppi	MCST 150 - 230 /12
I (A)	0,164	0	Pri	230 V 1~ 50-60Hz
f (Hz)	49,99	49,99	Sec	12 V
R(ohm)	8,2	0,3	Sn	150 VA

TAULUKKO 1. Tyhjäkäyntikokeen mittaustulokset.

Muuntajan datalehteä ei ollut enää saatavilla mutta Muuntosähkö Oy:ltä saatiin kuitenkin muuntajassa syntyvät häviöt, jotka olivat 8,5W tyhjäkäyntihäviötä ja 13 W kuparihäviötä eli muuntajassa esiintyy häviötä yhteensä 21,5W.

Häviötietojen ja mittaustulosten avulla voidaan selvittää vaihesiirtokulma. Tyhjäkäyntihäviöt voidaan laskea kaavalla:

$$W_p = U_p I_p \cos \varphi \quad (2)$$

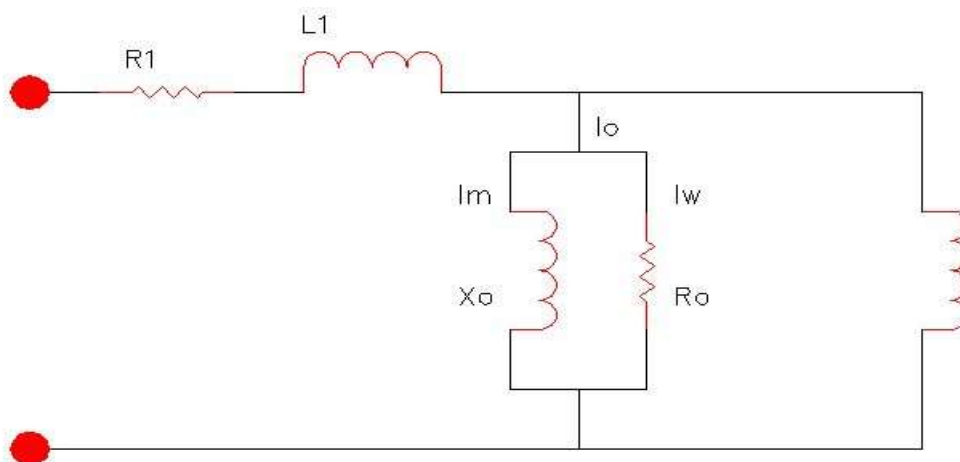
Joka ratkaistuna $\cos \varphi$ suhteen saa muodon:

$$\rightarrow \cos \varphi = \frac{W_p}{U_p I_p} = \frac{8,5W}{230V \cdot 0,164A} = 0.225$$

$$\rightarrow \cos^{-1}(0,225) = 77^\circ$$

$$\rightarrow \sin^{-1}(77^\circ) = 0.97$$

Seuraavaksi voidaan mallintaa muuntajan ensiöpuoli ja tyhjäkäyntitilanteessa esiintyvät häviöt.



KUVA 11. Muuntajan sijaiskytkentä tyhjäkäyntitilanteessa. (Suntinen. 20202)

Mallinnuksessa tyhjäkäyntivirta (I_o) jakautuu magneointivirraksi (I_m) ja raudan läpi muuten kulkevaksi virraksi (I_w). Virrat saadaan laskettua, kun tunnetaan vaihesiirtokulmat.

$$I_m = I_o \cos \varphi = 0,164A (\cos 77^\circ) = 0,037A \quad (3)$$

$$I_w = I_o \sin \varphi = 0,164A (\sin 77^\circ) = 0,16A \quad (4)$$

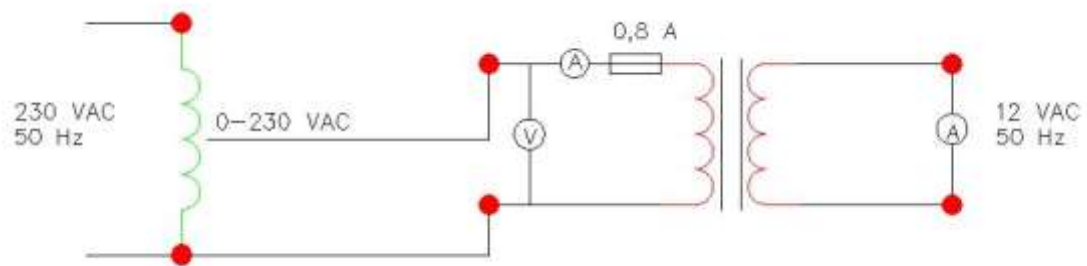
Kun lasketut virrat tunnetaan, voidaan laskea muuntajan magneointihäviö X_m ja rautahäviö R_c seuraavasti.

$$X_o = \frac{U_1}{I_m} = \frac{230V}{0,037A} = 1438 \Omega \quad (5)$$

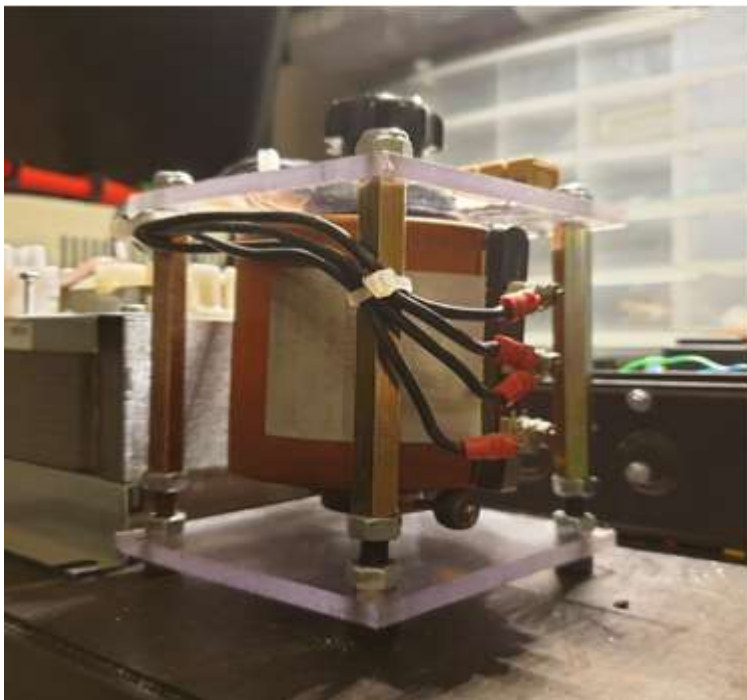
$$R_c = \frac{U_1}{I_w} = \frac{230V}{0,164A} = 6216 \Omega \quad (6)$$

2.3 Oikosulkukoe yksivaiheiselle muuntajalle

Seuraavaksi tehtiin muuntajalle oikosulkukoe, jossa voidaan määrittää kuparihäviöt (P_k) ja suhteellinen oikosulkuimpedanssi (U_k). Koetta varten kytkettiin muuntajan ensiökäämiin säätömuuntaja, jotta syöttöjännitteen kasvattaminen voidaan tehdä hallitusti. Lisäsin piiriin tässä vaiheessa myös muuntajan kilpitedoissa suositellun 0,8A sulakkeen.



KUVA 12. Oikosulkukokeen kytkentä. (Suntinen. 2020)



KUVA 13. Oikosulkukokeessa käytetty säätömuuntaja. (Kuva: Suntinen. 2020)

Ennen mittauksen aloittamista piti selvittää muuntajan ensiökäämin ja toisiokäämin nimellisvirrat. Kuparihäviöt ovat 13W ja myös muuntajan valmistajan ilmoittamat. Virrat laskettiin kaavalla:

$$I_{n1} = \frac{S_n}{U_1} = \frac{150 \text{ VA}}{230 \text{ V}} = 0,652 \text{ A} \quad (7)$$

$$I_{n2} = \frac{S_n}{U_2} = \frac{150 \text{ VA}}{12 \text{ V}} = 12,5 \text{ A} \quad (8)$$

Toisiokäämi oikosuljetaan kuvan 12 mukaisesti. Säättömuuntaja säädetään aluksi 0V:iin. Syöttöjännitettä nostetaan säättömuuntajasta, kunnes toisiokäämin virta vastaa 12,5 A:n nimellisvirtaa. Oikosulkukokeessa muuntajan nimellisvirta I_{n2} saavutettiin noin 22,16V:n jännitteellä. Kuparihäviö (W_c) voidaan laskea kaavalla:

$$W_c = I_n^2 R_2 \quad (9)$$

Joka voidaan resistanssin suhteen ratkaista, koska kuparihäviöt ovat tiedossa.

$$R_2 = \frac{W_c}{I_{n2}^2} = \frac{13 \text{ W}}{12,5 \text{ A}^2} = 0,08 \Omega \quad (10)$$

Myös toisiopuolen impedanssi voidaan laskea, kun tiedetään ensiöpuolen jännite oikosulkukokeessa ja toisiopuolen nimellisvirta:

$$Z = \frac{U_{sc}}{I_{n2}} = \frac{22,16 \text{ V}}{12,5 \text{ A}} = 1,77 \Omega \quad (11)$$

Edelleen voidaan selvittää toisiopuolen induktiivinen reaktanssi:

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} \quad (12)$$

Induktiivisen reaktanssin suhteen ratkaistuna saa muodon:

$$X_2^2 = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2} = \sqrt{1,77\Omega^2 - 0,08\Omega^2} = 1,77\Omega$$

Suhteellinen oikosulkuimpedanssi U_k voidaan nyt laskea:

$$U_k = \frac{U_{sc}}{U_1} \cdot 100 = \frac{22,16V}{230V} \cdot 100 = 9,6\% \quad (13)$$

Suhteellinen oikosulkuimpedanssi on yleensä myös ilmoitettu muuntajan arvokilvessä mutta se on myös mahdollista selvittää oikosulkukokeen avulla. Kun suhteellinen oikosulkuimpedanssi on tiedossa, voidaan laskea oikosulkuimpedanssi:

Impedanssi ensiöpuolelta katsottuna:

$$Z_k = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{9,6}{100} \cdot \frac{230V^2}{150VA} = 33,86\Omega \quad (14)$$

Impedanssi toisiopuolelta katsottuna:

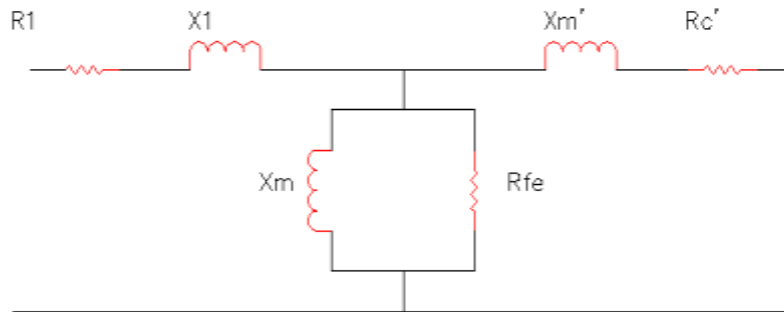
$$Z_k = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{9,6}{100} \cdot \frac{22,16V^2}{150VA} = 0,314\Omega$$

Rautahäviö ja magnetointihäviö voidaan laskea myös ensiöpuolelta tarkasteltuna:

$$Rc' = Rc \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 = 6216\Omega \left(\frac{230V}{12V} \right)^2 = 2,28M\Omega \quad (15)$$

$$Xm' = Xm \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2 = 1438\Omega \left(\frac{230V}{12V} \right)^2 = 528k\Omega \quad (16)$$

Muuntajalle tehtyjen koetulosten avulla voidaan nyt muodostaa muuntajan täydellinen sijaiskytkentä, jossa on mallinnettu muuntajassa esiintyvät häviöt.



KUVA14. Muuntajan täydellinen sijaiskytkentä (Suntinen. 2020)

2.4 Muuntajan hyötysuhde

Kun muuntajan häviöt ovat selvillä voidaan laskea muuntajan hyötysuhde, kun sitä kuormitetaan nimelliskuormalla (150W). Hyötysuhteella mitataan muuntajan anto- ja ottotehon suhdetta. Mitä enemmän muuntajassa esiintyy häviöitä, sitä huonompi on sen hyötysuhde.

$$\eta = \frac{P_2}{P^2 + W_j + W_c} (100\%) \quad (17)$$

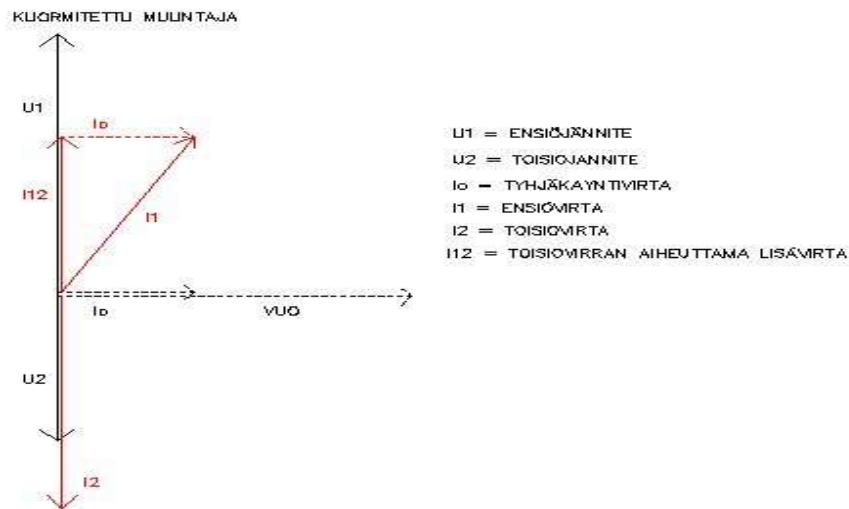
$$\rightarrow \frac{150W}{150W + 8,5W + 13W} (100\%) \approx 87,5\%$$

Hyötysuhde on yleensä sitä huonompi, mikä pienempi muuntaja on näennäisteholtaan. Suurilla jakelumuuntajilla hyötysuhde on yleensä yli 90% vaikka muuntajan tehon kasvaessa myös tehohäviöt kasvavat.

2.5 Kuormitettu yksivaiheinen muuntaja

Kuormitettu muuntaja ottaa tyhjäkäyntivirran lisäksi lisävirran, joka määräytyy muuntajan toisiovirran mukaan. Alla olevasta osoitinpiirroksesta havaitaan, että muuntajan ensiövirta on toisiovirran aiheuttaman lisävirran ja tyhjäkäyntivirran neliösumma.

$$I_1^2 = I_0^2 + I_{12}^2 \rightarrow I_1 = \sqrt{I_0^2 + I_{12}^2}$$



KUVA15. Kuormitetun yksivaihemuuntajan osoitinpiirros (Suntinen. 2020)

Käytännössä muuntaja ottaa kuormitettuna verkosta lisävirtaa määrän, joka vastaa yhtälöä:

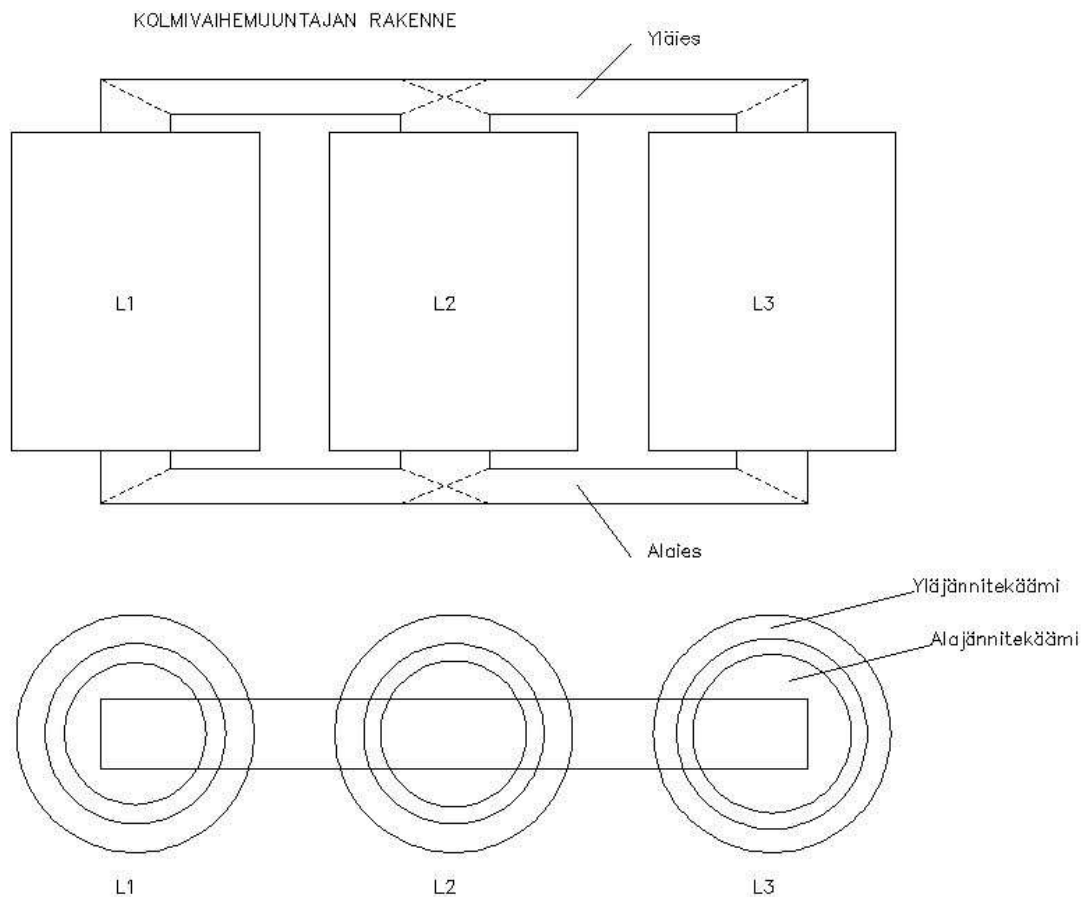
$$P_1 = P_2 \quad (18)$$

Tällöin tehosuhte pysyy vakiona muuntajan hyötysuhteen rajoittamalla tavalla. Yllä oleva kaava pätee häviöttömälle, ideaaliselle muuntajalle. Todellisuudessa muuntajan kuormituksen kasvaessa myös muuntajan häviöt kasvavat. Kuormitusvirran kasvaessa myös toisiopuolen jännite pienenee. Tyhjäkäyntivirta on yleensä noin 1-3% muuntajan nimellisvirrasta. (Ahoranta. Sähkötekniikka)

Koska kuormitusvirran kasvaessa toisiopuolen jännite pienenee, esiintyy muuntajissa nk. jännitteen alenemaa, josta voi aiheutua ongelmia kuormituspiirissä.

3 KOLMIVAIHEMUUNTAJA

Kolmivaihemuuntaja on periaatteessa kolmen yksivaiheisen muuntajan rakennelmä, jossa jokaisella vaiheella on oma muuntajansa. Kolmivaihemuuntajassa vaihekäämityksillä on yhteinen rautasydän eli ies. (Korpinen. Muuntajat ja sähkölaitteet.)

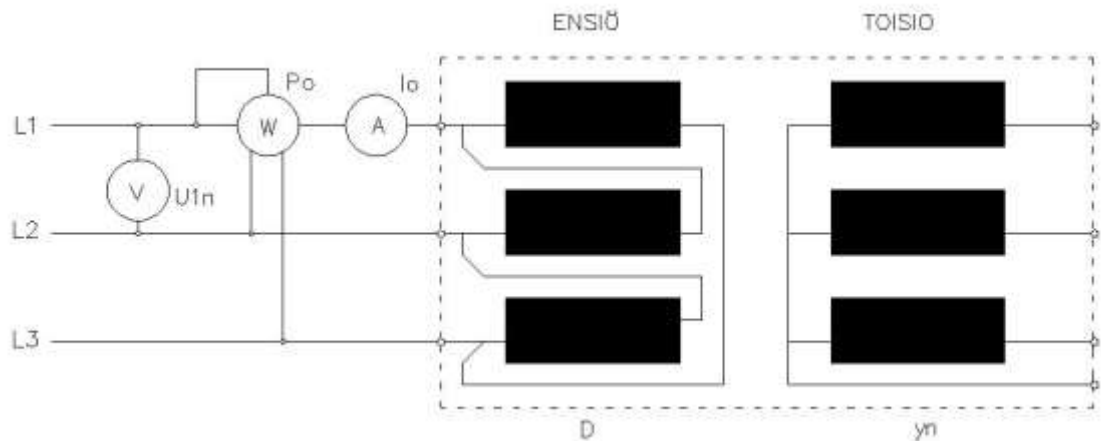


KUVA 16. Kolmivaihemuuntajan rakenne (Suntinen. 2020)

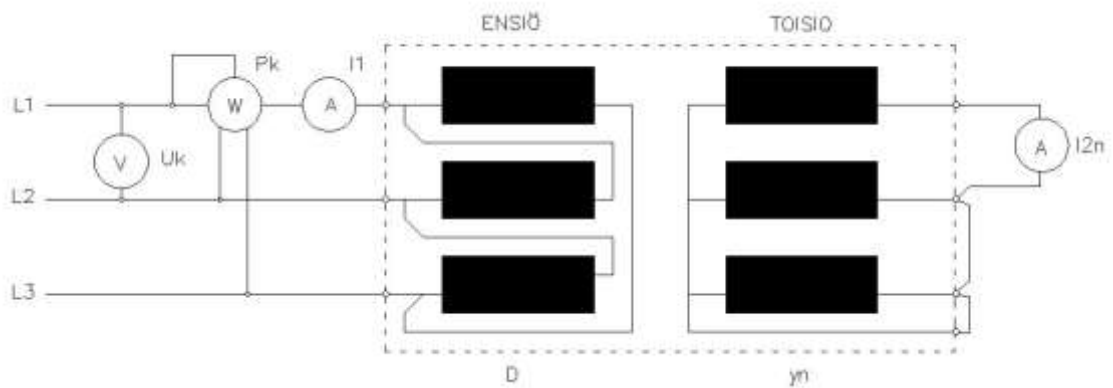
Muuntajat rakennetaan yleensä siten, että alajännitekäämitys on lähempänä iestä. Isoissa tehomuuntajissa käämintään käytetään kuparin sijaan usein alumiinia. Myös muuntajan tehon kasvaessa kasvavat myös muuntajassa esiintyvät häviöt, jolloin muuntajissa tarvitaan usein myös jäähdytystä.

3.1 Kolmivaihemuuntajan tyhjäkäynti- ja oikosulkukoe

Kolmivaihemuuntajan tyhjäkäynti- ja oikosulkukoe tehdään periaatteessa samalla tavalla, kuin yksivaihemuuntajalle. Kokeilla on myös tarkoitus selvittää samoja asioita, kuin yksivaiheisen muuntajan kokeissa eli muuntajassa esiintyviä häviöitä ja muuntajan hyötysuhdetta.



KUVA 17. Kolmivaihemuuntajan tyhjäkäyntikoekytkentä. (Suntinen. 2020)



KUVA 18. Kolmivaihemuuntajan oikosulkukoekytkentä (Suntinen, 2020)

Teho kVA	Muuntosuhde V/V	Kytkenä	P_o (W)	P_k (W)	Z_k (%)	Z_o (%)	I_o (%)	Kokonaispaino (kg)	Öljyä (kg)
315	25000±2x2,5%/410	Dyn 11	600	4500	4,5	4,6	0,8	1220	270
500	25000±2x2,5%/410	Dyn 11	720	6600	5	5,2	0,7	1650	340
630	25000±2x2,5%/410	Dyn 11	890	7200	5	5,2	0,7	1800	380
800	25000±2x2,5%/410	Dyn 11	1200	8500	5,5	5,7	0,5	2240	450
1000	25000±2x2,5%/410	Dyn 11	1450	10200	5,5	5,7	0,5	2640	520
1250	25000±2x2,5%/410	Dyn 11	1600	11500	5,5	5,7	0,4	2955	580
1600	25000±2x2,5%/410	Dyn 11	1840	14100	5,5	5,7	0,4	3680	760
2000	25000±2x2,5%/410	Dyn 11	2130	16000	6	6,4	0,3	4200	860
2500	25000±2x2,5%/690	Dyn 11	2550	18000	6	6,4	0,3	5150	1040

TAULUKKO 2. Muuntajien häviösarjataulukko.

Muuntosuhde tarkoittaa, että muuntajan ensiöjännitettä on mahdollista muuttaa väliottokytkimellä 2,5%:n porrastuksella, jolloin eri asentoja on viisi:

(Ahoranta. Sähkötekniikka)

Asento	Toisiojännite (V)	
5 %	$0,95 * 400$	380
2,5 %	$0,975 * 400$	390
0	-	400
-2,5 %	$1,025 * 400$	410
-5 %	$1,05 * 400$	420

TAULUKKO 3. Jänniteporrastukset.

Kolmivaihemuuntajan nimellisteho voidaan laskea kaavalla:

$$S = \sqrt{3} UI \quad (19)$$

Kolmivaihemuuntajan vaihevirta:

$$Iv = \frac{I}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

Kolmivaihemuuntajan verkosta ottama teho:

$$Sv = Sn + Po + Pk \quad (21)$$

Kolmivaihemuuntajan oikosulkuteho:

$$Sk = \frac{Sn}{Zk} \quad (22)$$

Kolmivaihemuuntajan oikosulkuvirta:

$$Ik = \frac{I}{Zk} \quad (23)$$

3.2 Tehtaan muuntaja

Tehtaan muuntajat ovat keskenään nimellisarvoiltaan samoja. Jokainen muuntaja on nimellisteholtaan 800kVA. Muuntajan teho ilmoitetaan aina näennäistehona ja se on myös teho, jolla muuntajaa voidaan jatkuvasti kuormittaa. (Ahoranta. Sähkötekniikka)

Tehtaan muuntajat ovat öljytäytteisiä. Öljy toimii jäähdyttimenä kuljettaen muuntajakäämityksessä syntyvän lämmön muuntajat vaipan jäähdytysripoihin, joista lämpö edelleen haihtuu ympäristöön. Muuntajat ovat hermeettisesti suljettuja, joka pidentää muuntajan öljyn käyttöikää. Öljyyn voidaan myös erikseen lisätä käyttöikää hidastavia aineita (inhibiittejä). Muuntajat ovat varustettu lämpömittareilla ja paisuntasäiliöillä. Lämpömittariin voidaan säätää lämpötilan yläraja, jolloin lämpötilan noustessa liian korkeaksi, mittari voi ohjata katkaisulaitetta, kuten paineilmakatkaisijaa.



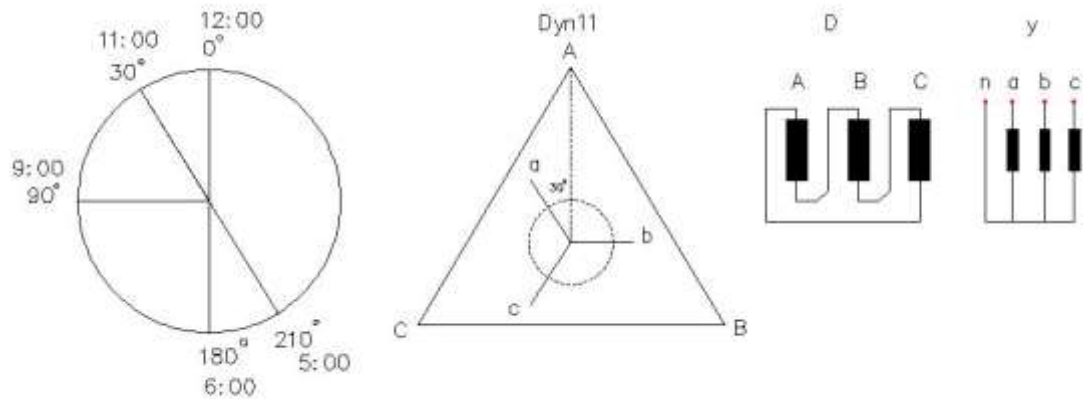
KUVA19. Alamuuntamon muuntaja (Kuva: Suntinen. 2020)



KUVA 20. Muuntajan arvokilpi (Kuva: Suntinen. 2020)

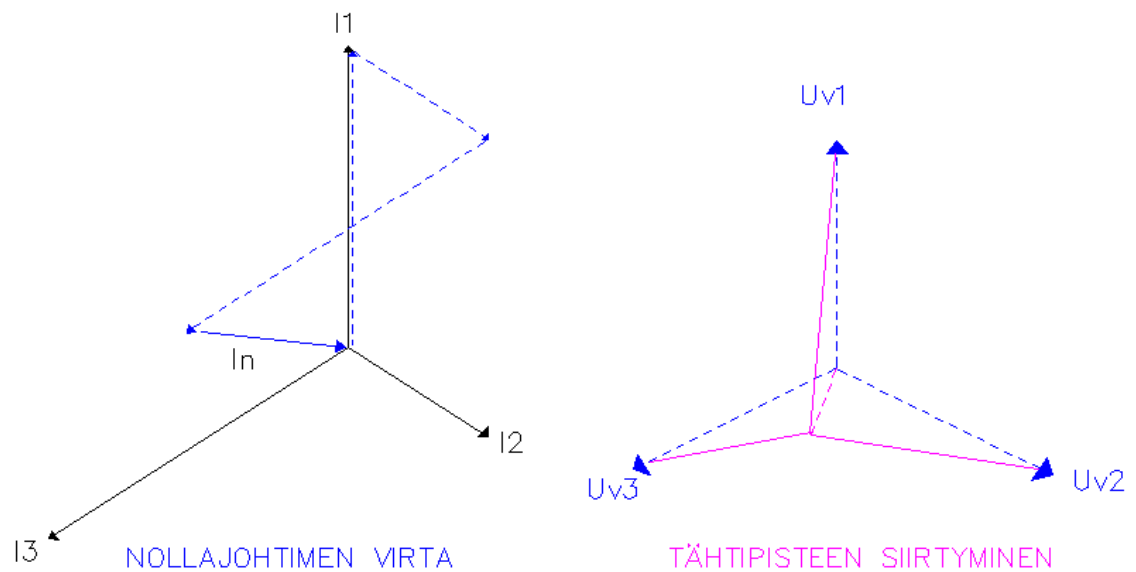
Kuvassa 20 on kuvattuna alamuuntamon muuntajan arvokilpi. Arvokilvestä nähdään muun muassa muuntajan tyyppi TOF195, muuntajan näennäisteho 800kVA ja muuntajan kokonaispaino. Arvokilven taulukossa väliottokytkin on asennossa 3, joka 21kV. Jännitettä vastaavat nimellisvirrat ovat ensiöpuolella 22A ja toisiopuolella 1155A. Arvokilpi ilmoittaa myös suhteellisen oikosulkuimpedanssin ($U_k\%$) joka on 5,5%.

Myös tehtaan muuntajien kytkennät ovat keskenään samoja eli ensiöpuoli on kytketty kolmioon ja toisiopuoli tähteen. Toisiopuolella tähdessä on myös kytkettynä nollajohdin, joka sallii epäsymmetrisen kuormituksen. Kytkennästä käytetään yleisesti tunnusta Dyn11, jossa D viittaa ensiöpuolen kolmiokytkentään ja y toisiopuolen tähtikytkentään. n kertoo, että toisiopuolella on kytkettynä nollajohdin. Muuntajan ensiöpuolen kolmiokytkennällä on myös jonkin verran yliaaltoja suodattavaa vaikutusta.



KUVA 21. Muuntajakytkennät ja osoitinpiirros. (Suntinen. 2020)

Kytkenän lukema 11 kertoo muuntajan ensiö- ja toisiopuolen jännitteillä olevan 30 astetta vaihe-eroa keskenään. Asiaa on havainnollistettu tarkemmin kuvassa 21 "kellotaulun" avulla. Muita muuntajan kytkentätapoja on esitelty liitteessä 1.



KUVA 22. Nollajohtimen virta epäsymmetrisessä järjestelmässä ja tähtipisteen siirtyminen ilman nollajohdinta (Suntinen. 2020)

Jos toisiopuolen kuormitus on epäsymmetrinen ja nollajohdinta ei ole kytketty, seuraa tähtipisteen siirtyminen erisuuruisten vaihejännitteiden vuoksi. (Ahoranta. sähkötekniikka). Ilmiötä on havainnollistettu kuvassa 22.

3.2.1 Kolmivaihemuuntajan laskelmat

Taulukossa 2 on rasteroituna tehtaän muuntajaa vastaavat arvot. Arvojen avulla voidaan laskea ensiö- ja toisiovirta, oikosulkuteho ja oikosulkuvirta. Tarvittavat tiedot saadaan häviösarjataulukosta.

Muuntajan verkosta ottama teho:

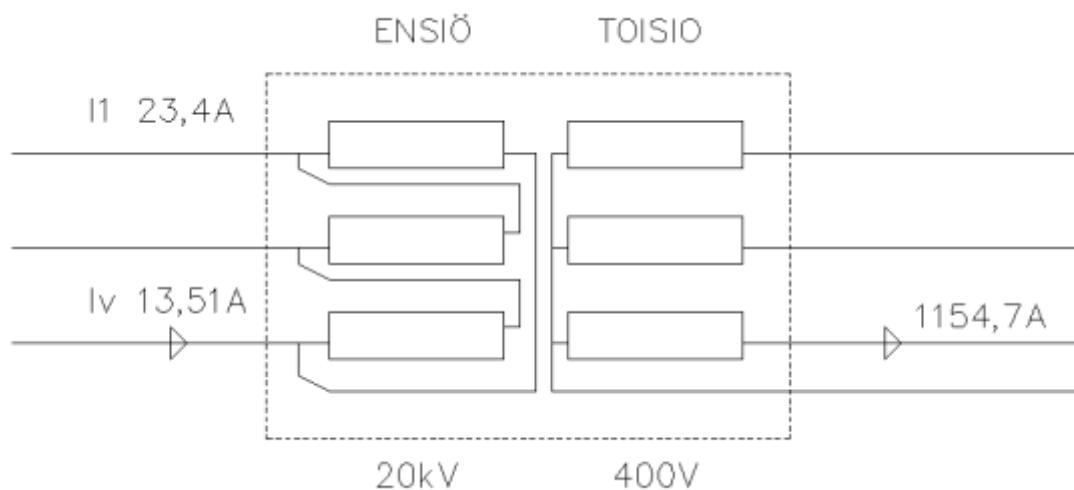
$$S_n + P_o + P_k \quad (24)$$

$$\rightarrow 800kVA + 1200W + 8500W = 809,7kW$$

Kaavan 19 avulla voidaan laskea ensiövirta I_1 ja toisiovirta I_2 :

$$S = \sqrt{3} UI \rightarrow I_2 = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U^2} = \frac{800kVA}{\sqrt{3} \cdot 400V} = 1154,7 A$$

$$S = \sqrt{3} U_1 I_1 \rightarrow I_1 = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_1} = \frac{809,7kW}{\sqrt{3} \cdot 20kV} = 23,4 A$$



KUVA 23. Muuntajan pää- ja vaihevirrät (Suntinen. 2020)

Muuntajan ensiöpuolen vaihevirta:

$$I_{ph} = \frac{I_1}{\sqrt{3}} = \frac{23,4A}{\sqrt{3}} = 13,5A$$

Muuntajan oikosulkuteho:

$$S_k = \frac{S_n}{Z_k} = \frac{800kVA}{0,055} = 14,5MVA$$

Muuntajan oikosulkuvirta ensiöpuolella:

$$I_k = \frac{I_1}{Z_k} = \frac{23,4A}{0,055} = 425,5A$$

Muuntajan oikosulkuvirta toisiopuolella:

$$I_k = \frac{I_2}{Z_k} = \frac{1154,7A}{0,055} \approx 21kA$$

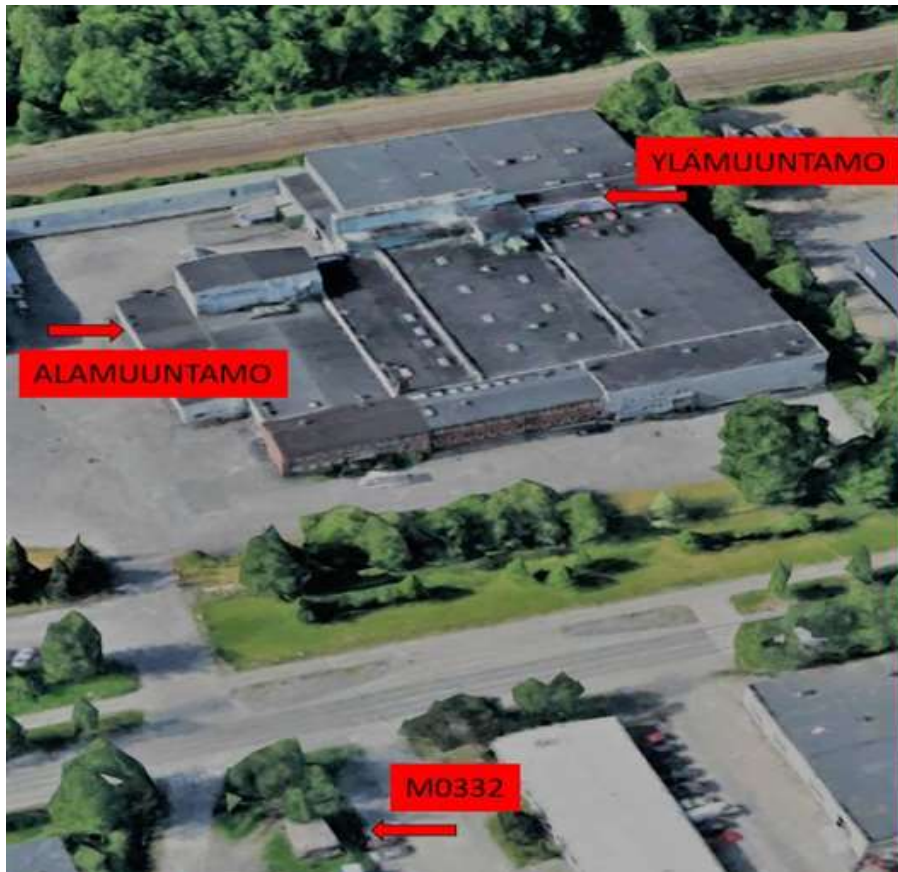
Muuntajan hyötysuhde:

$$\eta = \frac{S_n}{S_v} = \frac{800kVA}{809,7kW} \cdot 100\% \approx 99\%$$

Kuten aikaisemmin mainittiin, vaikka muuntajan hyötysuhde verrattain hyvä, ovat muuntajassa esiintyvät häviöt kuitenkin merkittävät ja aiheuttavat siten myös esimerkiksi voimakasta lämpenemistä. Tämä on otettava huomioon muuntajaa hankittaessa ja myös muuntajan jäähdytystä suunniteltaessa.

Häviösarjataulukon avulla tehdyt laskelmat pitävät paikkansa muuntajan arvokilven kanssa (KUVA 20). Muuntajan datalehti on liitteessä 5, jossa on ilmoitettu alamuuntamon muuntajan kuormitus- ja tyhjäkäyntihäviöt sekä suhteellinen oikosulkuimpedanssi. Vaikka muuntajat ovat nimellisarvoiltaan samoja, ovat ne kuitenkin eri valmistajilta, joten laskelmat ovat tästä syystä tehty häviösarjataulukon (TAULUKKO 2) mukaan. Häviöarvot olivat riittävän lähellä toisiaan, joten loppu-tulos laskemissa ei ole merkittävästi erilainen.

4 TEHDASMUUNTAMOT



KUVA 24. Tehtaan muuntamot (Kuva: Google earth)

Amerplastin kassitehtaan puolella on kaksi muuntamo: alamuuntamo ja ylämuuntamo. Kaupungin syöttökaapeli tulee Vestonkadun toiselta puolelta rakennuksesta M0332, jossa on alamuuntamolle (TO16) menevän kaapelin kuormerotin. Erotin on osa Tampereen kaupungin rengasverkkoa. KJ- verkon syötön rakenne on esitetty tarkemmin kuvassa 25.

Syöttö tulee muuntamon M1223 kautta erottimelle M0332, josta kaapeli jälleen jatkuu rengasverkkoon.



KUVA 25. Kaupungin keskijänniteverkko (TKS)

Kaupungin syöttökaapeli kulkee maa-asennuksena Vestonkadun alitse tehdasalueelle aina alamuuntamolle, jossa on muuntamon kuormanerotin ja muita suojalaitteita. Alamuuntamosta on edelleen jatkettu syöttökaapeli tehtaan katolla sijaitsevaan ylämuuntamoon. Muuntamoilla tuotetaan teho tehtaan tuotantokoneistolle, valaistukselle ja muille kuormituksille. Tehdasrakennuksissa on taloudellisesti järkevämpää tuottaa tarvittava teho omilla muuntamoilla, jolloin voidaan liittyä suoraan suurempaan jakelujännitteeseen kuin esim. 400V verkkoon, jolloin myös liittymisvarokkeet pitäisi mitoittaa suuriksi ja myös liittymismaksu olisi suuri.

Muuntamot ovat yleisesti luokiteltu kuiviksi tiloiksi. Kuivaksi tilaksi luokitellaan alue, johon ei tiivisty normaalioloissa kosteutta seinärakenteisiin, sähkölaitteisiin eikä muihin tilaan kuuluviin pintoihin. Myös muuntamon palokatkojen on oltava määräysten mukaiset. Huonosti toteutetuissa palokatkoissa kaapeleiden eristeiden myrkylliset kaasut pääsevät läpi huonosti tiivistetyistä läpivienneistä aiheuttaen terveyshaittoja. (Mäkinen, Kallio. Teollisuuden sähköasennukset).

Molemmissa muuntamoissa on hiilidioksidisammutuslaitteisto tulipalon varalta. Sammutus on kaksitoiminen siten, että se on ohjelmoitu kahteen eri silmukkaan, joten järjestelmän mahdollinen herkkyys ei aiheuta turhia hälytyksiä palolaitokselle. Sammutuslaitteisto sijaitsee alamuuntamon ulkopuolella (KUVA 31).



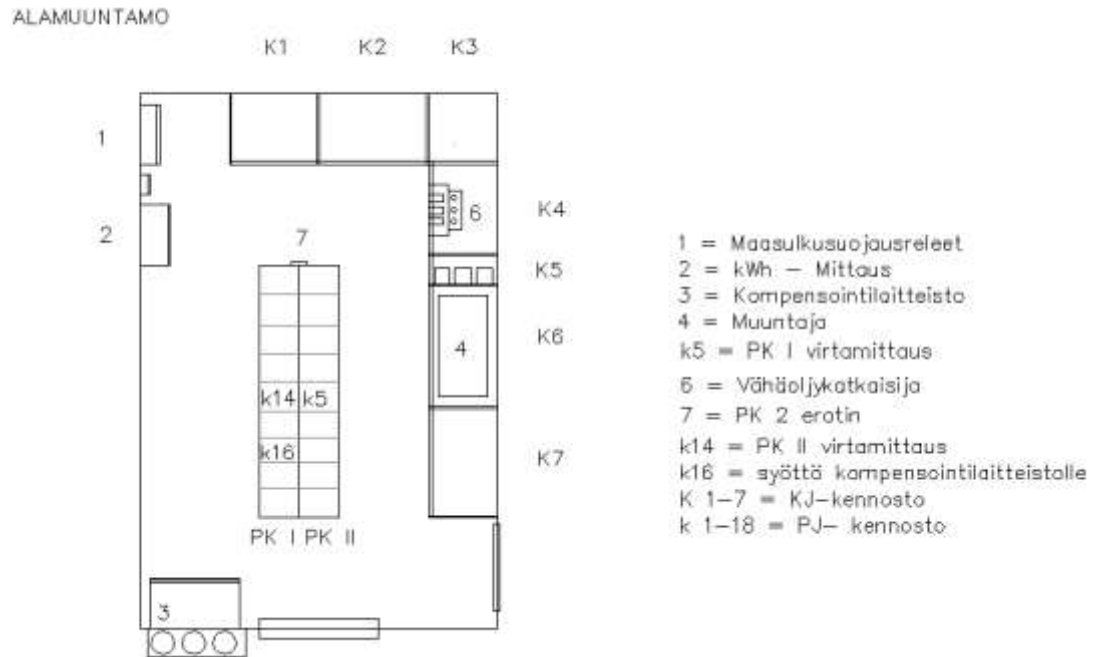
KUVA 25. Sammutuslaitteiston hiilidioksidisäiliöt (Suntinen. 2020)

4.1 Alamuuntamo



KUVA 26. Alamuuntamo (Kuva: Suntinen. 2020)

Syöttökaapeli tulee alamuuntamoon kuvan 24 tehtaan idänpuoleisesta seinästä. Kaapelin läpivienti on tiivistetty polyuretaanilla ja kaapelit ovat erikseen kiinnitetty kaapelipidikkeillä alamuuntamon sisäseinään (KUVA 27). Maadoitusjohdin on paljaana kuparijohtimena syöttökaapeleiden mukana. Muuntajan toisipuolen kaapelit kulkevat lattian kaapelikourussa PJ-kennostolle.



KUVA 27. Alamuuntamon pohjakuva (Suntinen. 2020)



KUVA 28. Muuntamon syöttökaapeli (Kuva: Suntinen. 2020)

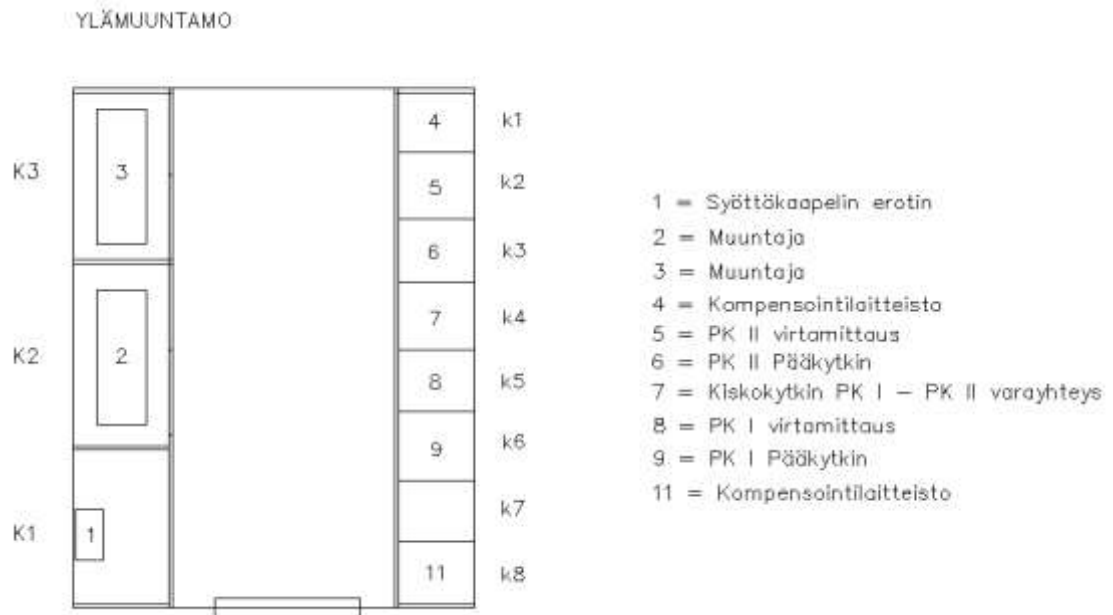
Alamuuntamon syöttökaapelit tulevat seinästä kahdelle erottimelle. Erottimilta tulevat virtakiskot suojakojeistojen kautta muuntajalle. Muuntajan toisipuolelta on kaapelointi pääkeskuksille. Pääkeskuksissa on vaihekohtaiset virta- ja jännitemittaukset.

4.2 Ylämuuntamo

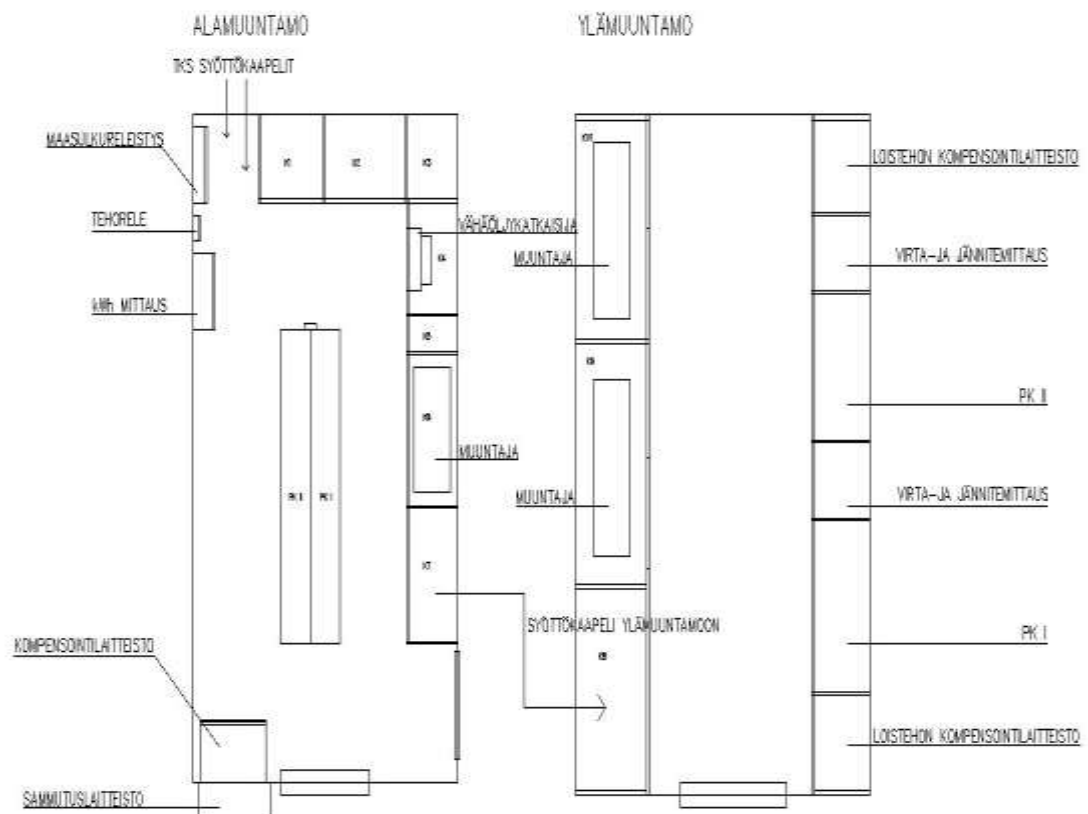


KUVA 29. Ylämuuntamo (Kuva: Suntinen 2020)

Ylämuuntamon syöttökaapeli tulee alamuuntamon kennosta 7 kahdelle muuntajalle. Muuntajien toisiopuolen kaapelit tulevat yläpuolelta kaapelihyllyä pitkin muuntajia vastapäätä sijaitseville pääkeskuksille. Pääkeskuksissa on myös vaihekohtaiset virta- ja jännitemittaukset.



KUVA 30. Ylämuuntamon pohjakuva (Suntinen. 2020)



KUVA 31. Ala- ja ylämuuntamon kojeistosijainnit

4.3 Suojalaitteet

Tässä osiossa käydään läpi tyypillisiä muuntamon suojalaitteita, joita on käytössä myös Amerplastin muuntamoissa.

4.3.1. Kuormanerotin



KUVA 32. Kuormanerotin (Kuva: Suntinen. 2020)

Eroittimia käytetään nimensä mukaisesti erottamaan kuormalaitteita verkosta. Eroittimella saadaan myös aikaan näkyvä väli piirin ja kuorman välille, joka on välttämätön esimerkiksi kojeistojen huoltotoissa. Erotin on mekaaninen laite, joka voidaan ohjata käsin tai moottorilla.

Eroittimessa on veitset, jotka erotinta avattaessa avautuvat ensin, jolloin virta kulkee kipinäveitsien kautta erillisiin sammutuskammioihin. Sammutuskammioissa valokaaret sammuvat ennen veitsien ilmestymistä ulos sammutuskammioista. Kuormanerotinta suljettaessa toiminnot ovat päinvastaiset. (Monni. Sähkölaitosasennukset)

4.3.2. Varokeuormanerotin



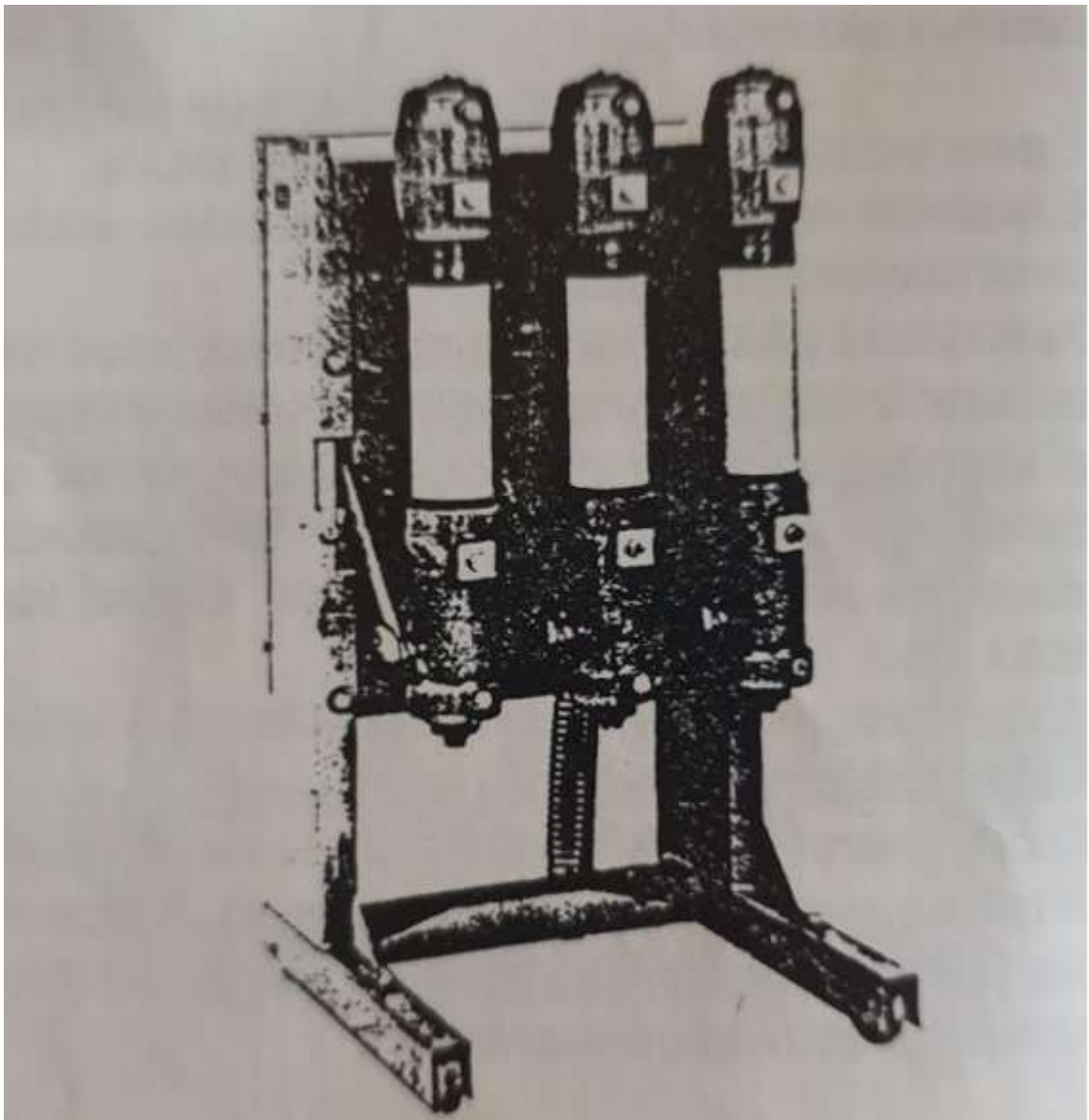
KUVA 33. Varokeuormanerotin (Kuva: Suntinen. 2020)

Varokeuormanerotin on toiminnaltaan samanlainen kuin tavallinen kuormanerotin. Varokeuormanerottimeen on lisätty varokkeet. Varokeuormanerotin toimii katkaisten piirin yhden tai useamman sulakkeen palaessa. Erottimessa on myös estolaitteisto, joka estää jälleen kytkennän, mikäli yksikin sulake on vioittunut. Varokeuormanerotin on tyypillisesti asennettu ennen muuntajaa tai kaapelihaaraa. (Monni. Sähkölaitosasennukset)

4.3.3. Vähäöljykatkaisin

Katkaisinlaitteita käytetään jännitteiseen katkaisuun ja oikosulkusuojaukseen. Vähäöljykatkaisijassa valokaaren sammutus perustuu öljyn höyrystyessä syntyvään voimakkaaseen paineeseen, joka ohjataan valokaaren suuntaan.

Katkasijan ohjaus tapahtuu jousiohjaimen avulla. Lauennut jousi viritetään uudelleen käsin tai viritysmoottorin avulla. (Monni. Sähkölaitosasennukset)

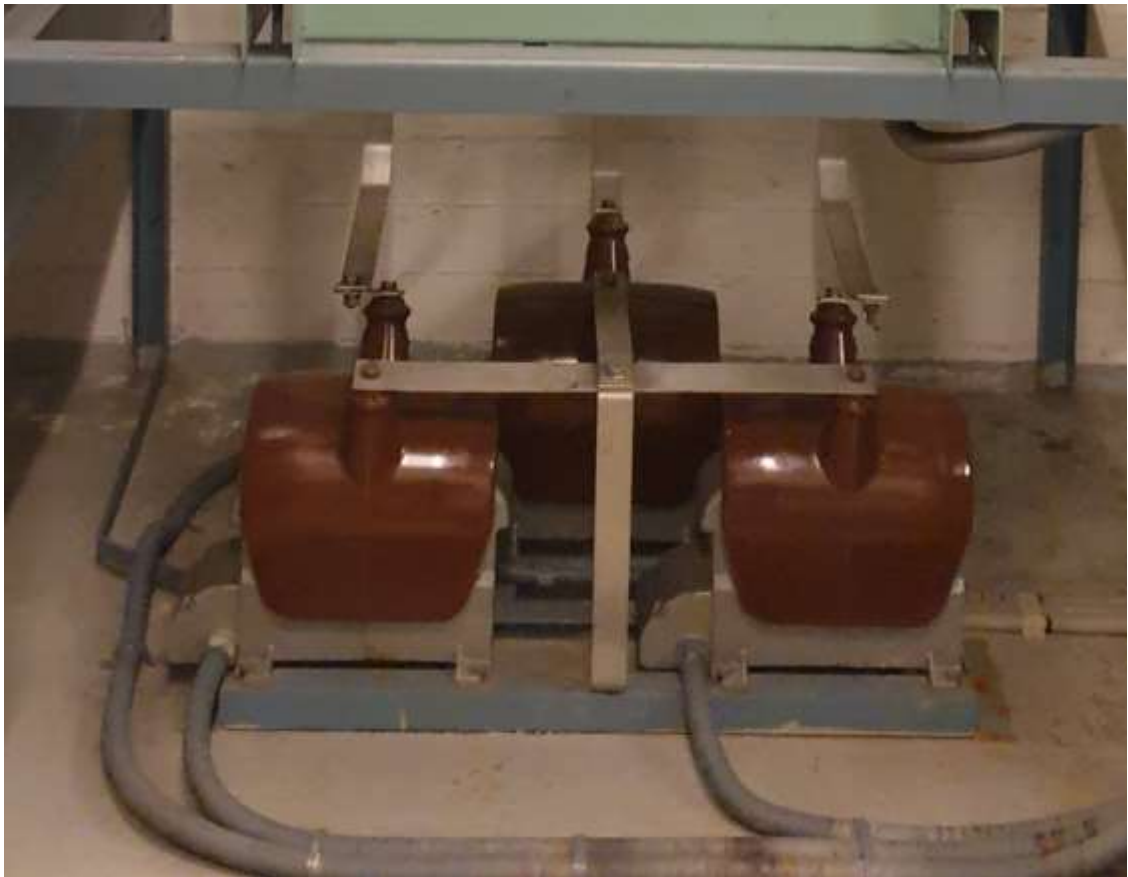


KUVA 34. Vaunurakenteinen vähäöljykatkaisija (Monni. Sähkölaitosasennukset)

4.3.4 Jännitemuuntaja

Jännitemuuntaja on muuntaja, jonka kuormitettavuus on pieni. Kuormana toimivat mittalaitteiden piirit. Muuntajan toisiojännite on 100V. Muuntosuhde on:

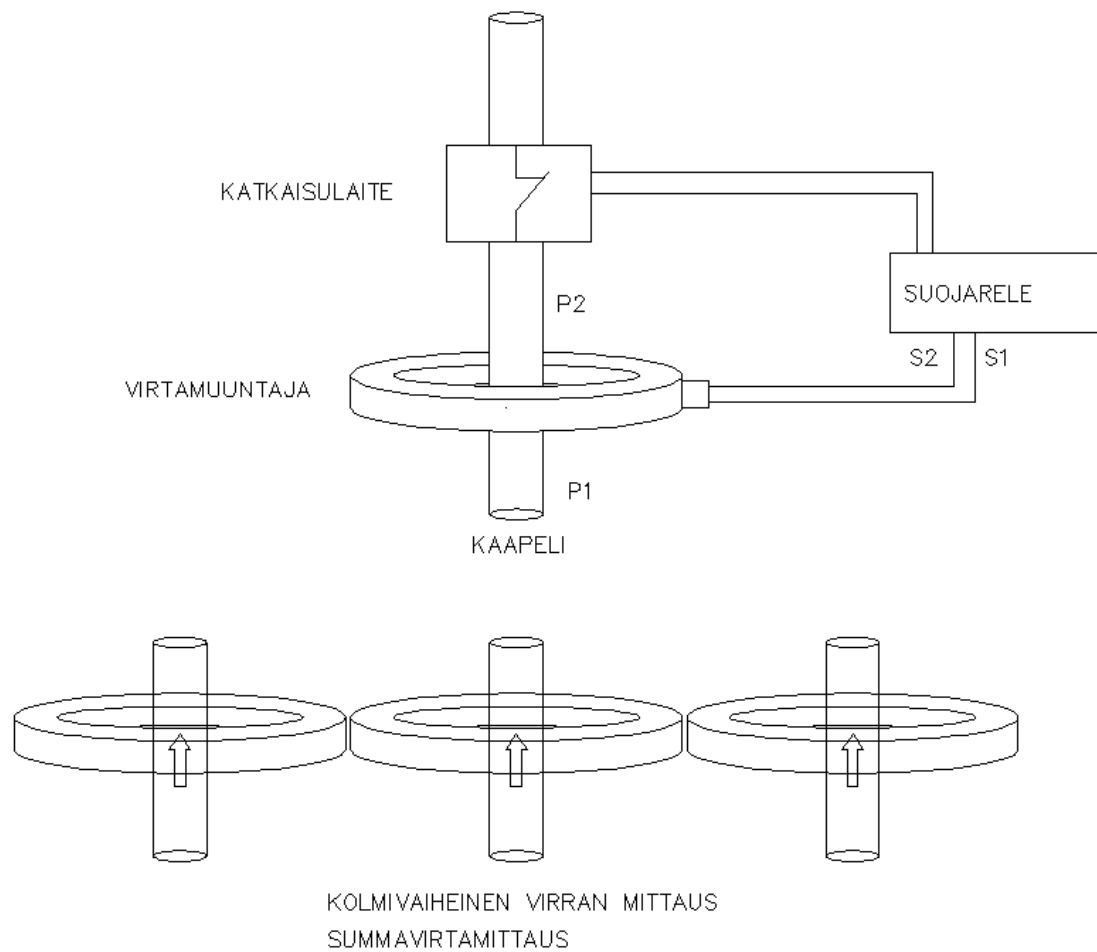
$$U_1:U_2 = N_1:N_2 \quad (24)$$



KUVA 35. Jännitemuuntaja (Kuva: Suntinen. 2020)

Jännitemuuntajia käytetään muuntamaan korkeat jännitteet suojalaitteille sopiviksi. (Ahoranta. Sähkötekniikka)

4.3.5 Virtamuuntaja



KUVA 35. Virtamuuntajan kytkentä (Suntinen. 2020)

Toisin kuin normaalin muuntajan, virtamuuntajan ensiövirran määrää ulkopuolisen kuorman ottama virta, eikä toisiopuolen kuormitusvirta. Virtamuuntajan toisiokäämin virta on 5A. (Monni. Sähkölaitosasennukset)

Virtamuuntajaan kuorman indusoima vuo synnyttää matalaohmiseen toisiopiiriin ensiöpiirin virtaa vastaavan toisiopiirin.

Virtamuuntajan muuntosuhde on:

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2 \quad (25)$$

Virtamuuntajia käytetään erilaisissa mittauksissa, kuten sähkön kulutusmittauksissa. Muuntajat ovat myös käytössä erilaisissa suojauspiireissä, kuten maasulkusuojauksessa, jossa virtamuuntajilla mitataan piirissä kulkevaa virtaa. (Ahoranta. Sähkötekniikka)



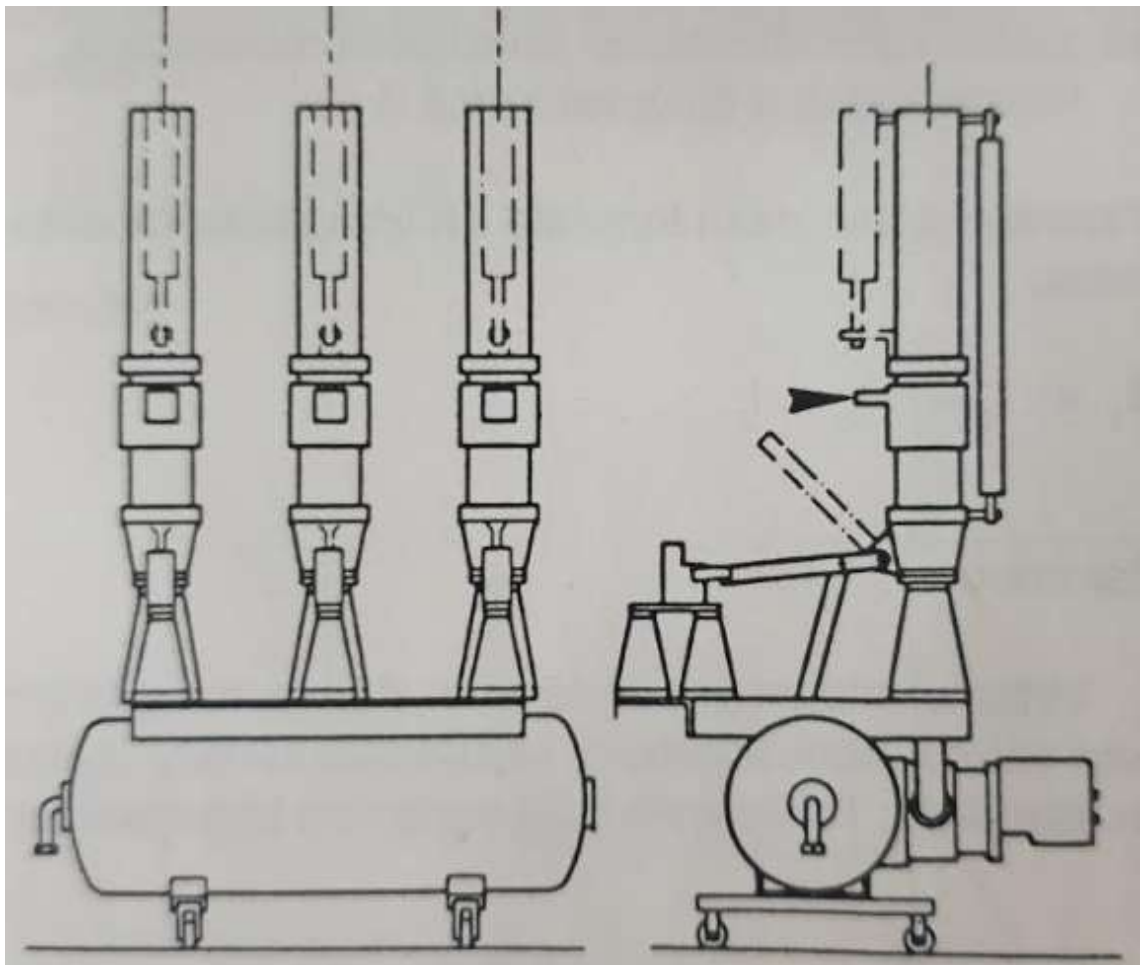
KUVA 36. Virtamuuntajat (Kuva: Suntinen. 2020)

Summavirtamittauksessa virtamuuntamat mittaavat kolmen vaiheen virtaa. Jos mitattava järjestelmä on symmetrinen, niin virtojen summa on tällöin 0A. Jos virta on erisuuri kuin 0A, järjestelmä on epäsymmetrinen johtuen esimerkiksi viikatilanteesta, virtamuuntaja tunnistaa tämän ja laukaisee mitattavan piirin suoja-laitteen.

Virtamuuntajan toisiopiiriä (S1 ja S2) ei saa katkaista kuormitettuna. Katkaistuna muuntajan toisiopiiriin ei synny vastavuota, jolloin rautasydämen magneettivuo kasvaa ja toisiopuolelle indusoituu suuri jännite. (Ahoranta. Sähkötekniikka)

4.3.6 Paineilmakatkaisin

Paineilmakatkaisijassa valokaaren sammutus tapahtuu ilman aiheuttamasta paineaallosta. Tätä varten tarvitaan paineilmalaitteisto. Katkaisutilanteessa paineilma aukaisee katkaisijan kosketinosan ja sammuttaa samalla valokaaren. Katkaisin voidaan kytkeä jälleen kiinni, kun ilmanpaine on laskenut tarpeeksi. (Monni. Sähkölaitosasennukset)



KUVA 37. Paineilmakatkaisija (Monni. Sähkölaitosasennukset)

4.3.7 Loistehonkompensointi

Kuormalaitteet, kuten sähkömoottorit ja muuntajat, tarvitsevat loistehoa toimiakseen.

$$Q = \frac{P[kW]}{\eta} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (26)$$

, jossa Q on loistehon tarve (var), P on kuormituksen teho, η on kuormituksen hyötysuhde, φ_1 on tehokulma ennen kompensointia, φ_2 tehokulma kompensoinnin jälkeen (haluttu kompensointi).

Tehtaalla on käytössä keskitetty kompensointi, jossa kompensointilaitteisto on kytkettynä pääkeskukseen ja säädin ohjaa kompensointia. (ABB:n TTT-käsikirja)



KUVA 38. Alamuuntamon kompensointilaitteisto (Suntinen. 2020)

Falico Oy:n valmistama kompensointilaitteisto on säädetty pitämään loistehon kompensointi tehokerroin arvossa 1,0:ssa (KUVA 38). Kompensointilaitteisto koostuu kondensaattorimoduuleista (portaista) ja loistehon säätimestä. Itse moduuli rakentuu kontaktorista, varokkeista sekä varsinaisesta kondensaattorista.

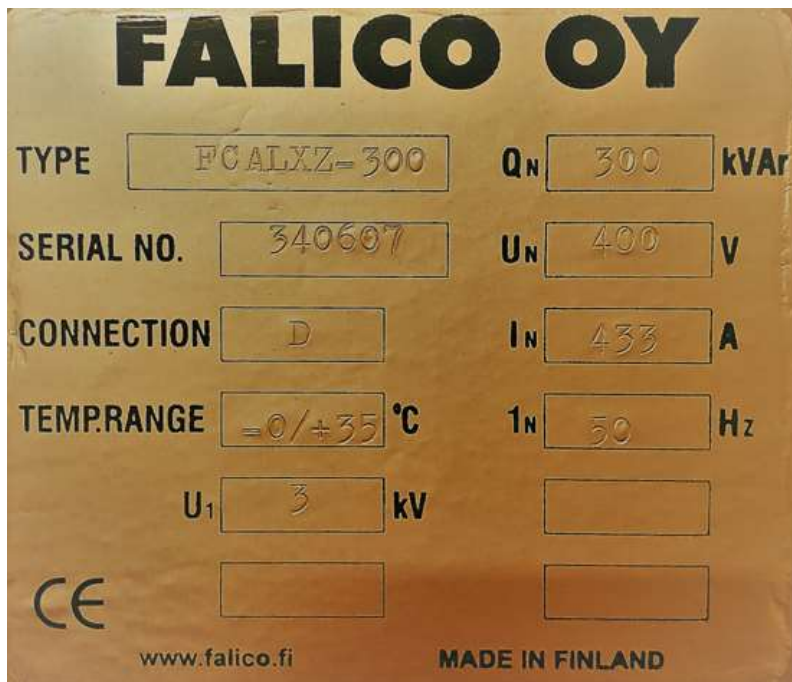
Loistehon säädin ohjaa moduulien kontaktoreita jakeluverkon induktiivisen loistehon vaihdellessa ja pyrkii näin pitämään asetetun tehokertoimen. Ohjauksen sähkökuvat löytyvät liitteestä 2.



KUVA 39. Kompensointilaitteen näyttö (Kuva: Suntinen. 2020)

Kompensointilaitteistoa syötetään alamuuntamon PJ-puolen kennosta k16 (KUVA 26). Syöttönä ovat rinnakkaiset 2xMCMK 3x185+95+54- kaapelit, joissa on 315A varokkeet. Mitoitus vastaa TAULUKON 4 300kVAr pariston mitoitustarpeita (KUVA 39).

Syöttökaapeli on hieman paksumpi, kuin taulukko suosittelee, mutta muuntamon syöttökaapelia on käytetty myös vanhemmassa, nykyään poistetussa kompensointiparistossa, joten kaapelointia ei ollut tarpeellista uusua, vaikka se on hieman ylimitoitettu nykyiselle laitteistolle.



KUVA 40. Kompensointilaitteen arvokilpi (Kuva: Suntinen. 2020)

Automatiikkaparistot				
Q kVAr	Nimellisvirta A	Sulake A	Cu-kaapeli	Portaat kVAr
50	72	100	3x35+16	10+20+20
100	144	200	2x3x35+16	20+40+40
150	217	315	2x3x95+50	3x50
200	288	400	2x3x95+50	4x50
250	361	500	2x3x120+70	5x50
300	433	630	2x3x150+70	6x50

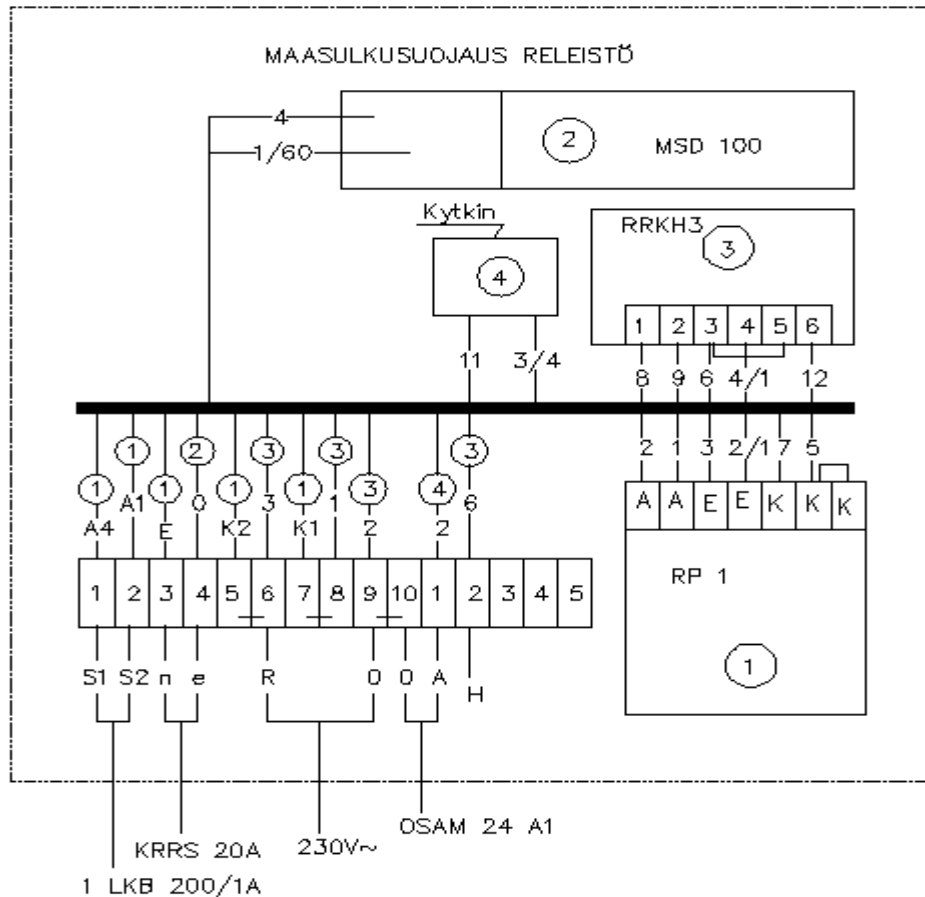
TAULUKKO 4. Automatiikkaparistojen teknisiä arvoja (ABB:n TTT-Käsikirja)

cos φ 1	cos φ 2							
	1,00	0,99	0,98	0,97	0,95	0,90	0,85	0,8
0,30	3,18	3,04	2,98	2,93	2,85	2,70	2,56	2,43
0,32	2,96	2,82	2,76	2,71	2,63	2,48	2,34	2,21
0,34	2,77	2,62	2,56	2,52	2,44	2,28	2,15	2,02
0,36	2,59	2,45	2,39	2,34	2,26	2,11	1,97	1,84
0,38	2,43	2,29	2,23	2,18	2,11	1,95	1,81	1,68
0,40	2,29	2,15	2,09	2,04	1,96	1,81	1,67	1,54
0,42	2,16	2,02	1,96	1,91	1,83	1,68	1,54	1,41
0,44	2,04	1,90	1,84	1,79	1,71	1,56	1,42	1,29
0,46	1,93	1,79	1,73	1,68	1,60	1,45	1,31	1,18
0,48	1,83	1,69	1,62	1,58	1,50	1,34	1,21	1,08
0,50	1,73	1,59	1,53	1,48	1,40	1,25	1,11	0,98
0,52	1,64	1,50	1,44	1,39	1,31	1,16	1,02	0,89
0,54	1,56	1,42	1,36	1,31	1,23	1,07	0,94	0,81
0,56	1,48	1,34	1,28	1,23	1,15	1,00	0,86	0,73
0,58	1,40	1,26	1,20	1,15	1,08	0,92	0,78	0,65
0,60	1,33	1,19	1,13	1,08	1,00	0,85	0,71	0,58
0,62	1,27	1,12	1,06	1,01	0,94	0,78	0,65	0,52
0,64	1,20	1,06	1,00	0,95	0,87	0,72	0,58	0,45
0,66	1,14	1,00	0,94	0,89	0,81	0,65	0,52	0,39
0,68	1,08	0,94	0,88	0,83	0,75	0,59	0,46	0,33
0,70	1,02	0,88	0,82	0,77	0,69	0,54	0,40	0,27
0,72	0,96	0,82	0,76	0,71	0,64	0,48	0,34	0,21
0,74	0,91	0,77	0,71	0,66	0,58	0,42	0,29	0,16
0,76	0,86	0,71	0,65	0,60	0,53	0,37	0,24	0,11
0,78	0,80	0,66	0,60	0,55	0,47	0,32	0,18	0,05
0,80	0,75	0,61	0,55	0,50	0,42	0,27	0,13	
0,82	0,70	0,56	0,49	0,45	0,37	0,21	0,08	
0,84	0,65	0,50	0,44	0,40	0,32	0,16	0,03	
0,86	0,59	0,45	0,39	0,34	0,26	0,11		
0,88	0,54	0,40	0,34	0,29	0,21	0,06		
0,90	0,48	0,34	0,28	0,23	0,16			
0,91	0,46	0,31	0,25	0,20	0,13			
0,92	0,43	0,28	0,22	0,18	0,10			
0,93	0,40	0,25	0,19	0,14	0,07			
0,94	0,36	0,22	0,16	0,11	0,03			
0,95	0,33	0,19	0,13	0,08				
0,96	0,29	0,15	0,09	0,04				
0,97	0,25	0,11	0,05					
0,98	0,20	0,06						
0,99	0,14							

TAULUKKO 5. Tyypillisiä loistehon kompensointikertoimia (ABB:n TTT- käsi-
kirja)

4.3.8 Maasulkusuojaus

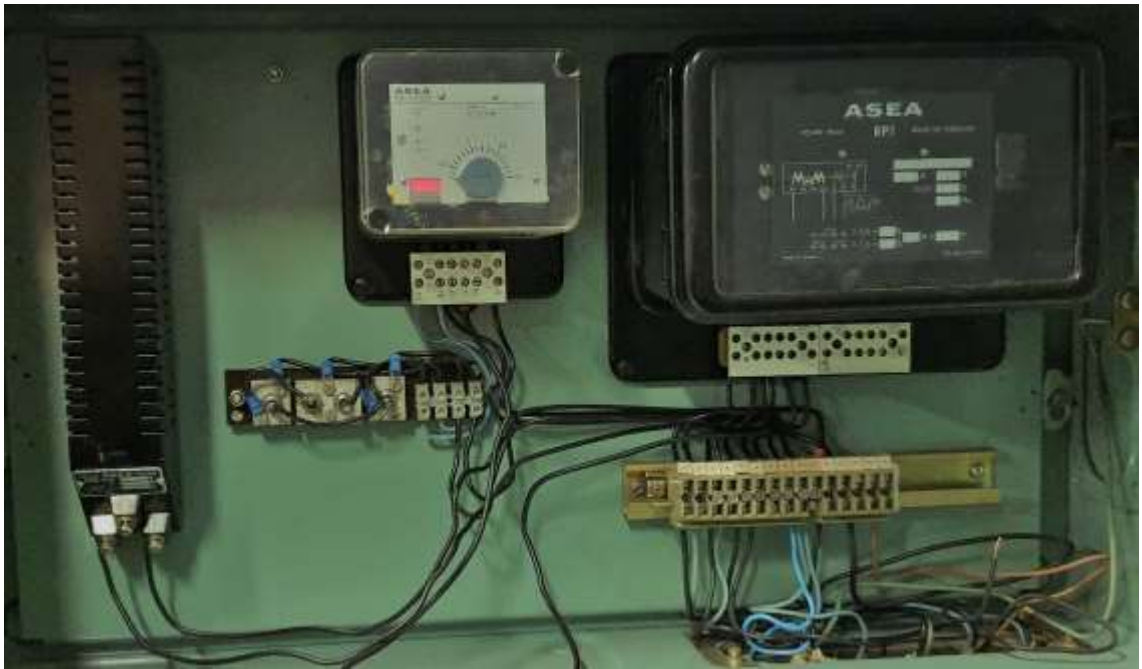
Muuntamoon on asennettu maasulkusuojausreleistö mahdollisten oikosulkutilanteiden takia.



KUVA 41. Maasulkureleistön kytkentäkuva (Suntinen. 2020)

Virtamuuntajat ovat kytkettyinä kuvan 40 maasulkusuojausreleistöön. Releistöön kuuluu pätotehorele RP 1, asetteluvastus MSD 100, Aikarele RRKH 23 ja maasulkulaukaisukytkin (4).

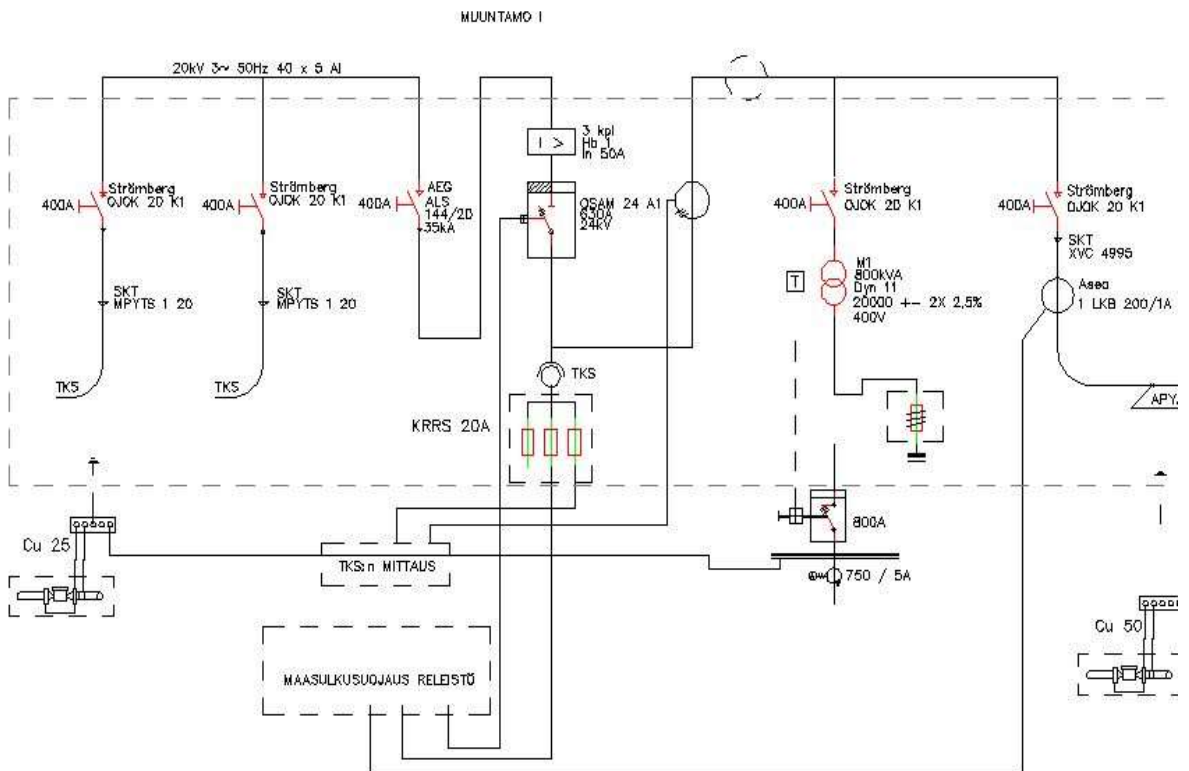
Vikatilanteessa, kuten maasulussa, virtamuuntaja mittaa virtaa, koska tulo- ja paluuvirta ovat epäsymmetrisiä. Virta kulkee asetteluvastuksen kautta pätotehoreleelle, joka ohjaa aikarelettä ja katkaisua.



KUVA 42. Maasulkureleistö

Liittimiin 1 ja 2 on kytketty virtamuuntaja 1LKB 200/1A. Jännitemuuntaja KRRS 20A on kytketty liittimiin 3 ja 4. Aikareleen RRKH 23 kelajännite tulee PJ- puolen kennosta 8 ja on kytketty liittimiin 5,6 sekä 9,10. Vähäöljykatkaisijaa OSAM 24 A1 ohjataan liittimistä 9,10 ja 1.

4.4 Muuntamon toiminnan selostus



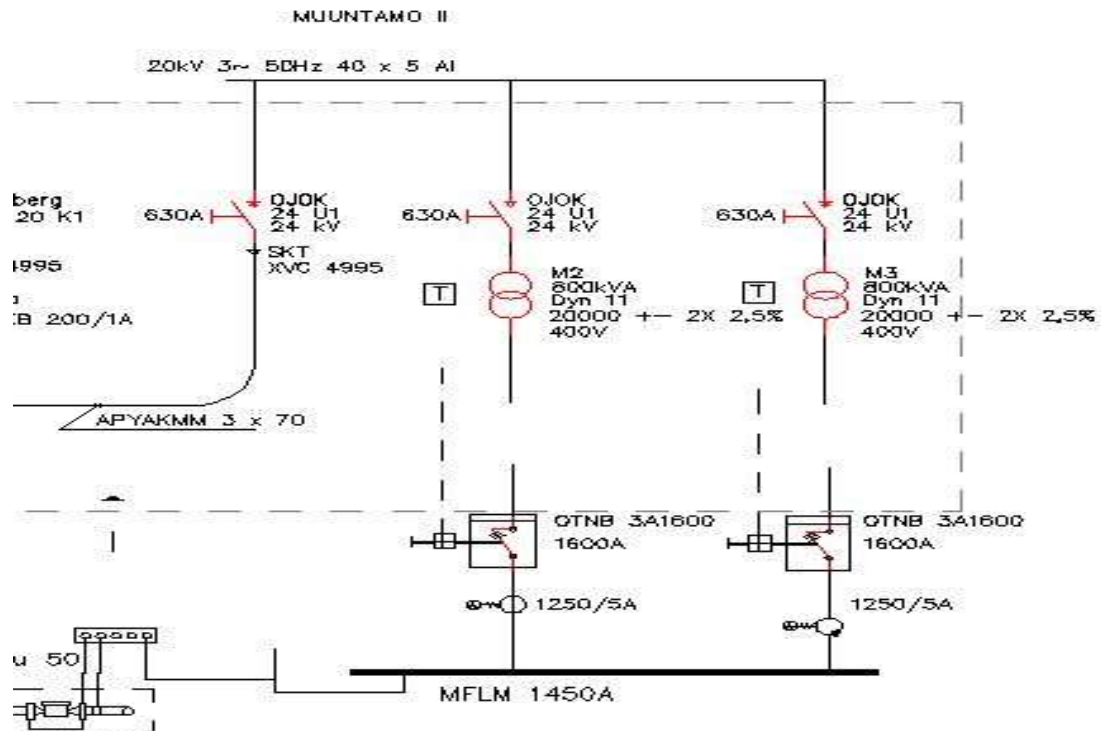
KUVA 43. Alamuuntamon piirikaavio (Suntinen. 2020)

Alamuuntamoon tulee kaksi kaupungin syöttökaapelia, joilla molemmilla on oma erotin. Kaapelit yhdistyvät samaan varokekuormanerottimeen. Piiriin on kytkettynä myös vähäöljykatkaisija sekä jännite- ja virtamuuntajat. Muuntajilta menee jännite ja virta kaupungin (TKS:n mittaus) sähkönkulutusmittaukselle. Ala- ja ylämuuntamon virta- ja jännitemittausmittarit sijaitsevat pääkeskusten kennostoissa.

Virtamuuntaja on myös kytkettynä maasulkusuojaukseen, joka puolestaan ohjaa vähäöljykatkaisijaa.

Muuntajan öljyn lämpömittarit ovat kytkettyinä paineilmakatkaisimiin, jotka toimivat öljyn lämpötilan noustessa liian korkealle.

Myös jokaiselle muuntajalle on erikseen oma erotin. Erottimien sekä varokeuormanerottimen virrankesto on 400A, mikä vastaa muuntajien ensiöpuolen oikosulkuvirtaa 425,5A.



KUVA 44. Ylämuuntamon piirikaavio (Suntinen. 2020)

Muuntajien lämpötilat ovat normaalikäytössä noin 40-50 °C:ssa. Paineilmakatkaisimet on aseteltu toimimaan noin 100 °C:ssa.

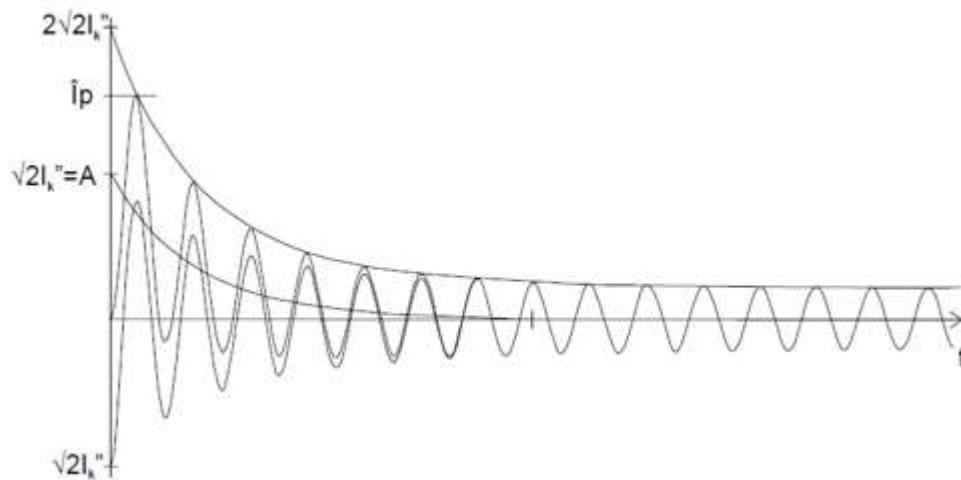
Tehtaan maadoitus on 2 x 50mm² kuparijohdin, joka on kytketty vestonkadun puolelta tulevaan 150mm² päävesijohtoon ja siitä muuntamoiden maadoituskiskoihin (KUVA 42) ja (KUVA 43). Alamuuntamon maadoitus on 25mm² kuparijohdin.

Muuntamoon on myös asennettu hiilidioksidilaitteisto, joka toimii muuntamon tulipalosuojana.

4.5 Oikosulkuvirrat

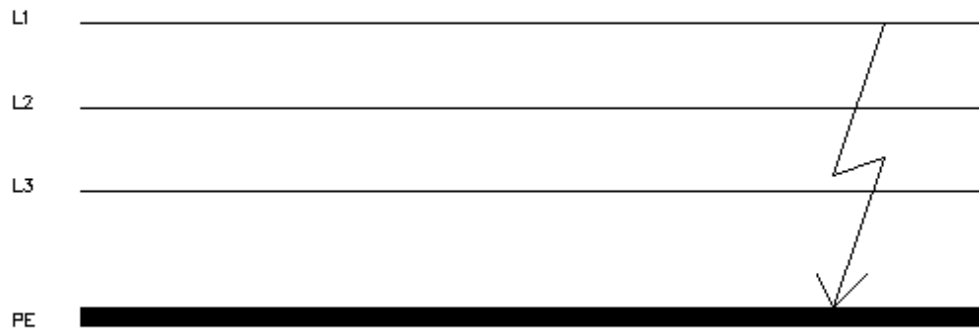
Sähköisiä suojalaitteita mitoittaessa tulee tietää mitoitettavan piirin oikosulkuvirrat. Oikosulku on tapahtuma, jossa piirin kuormitus menee vikatilaan, jossa virta periaatteessa kulkee suoraan vaiheesta nollaan eli piirin impedanssi alenee oleellisesti. Virran kulkua vastustaa oikosulkutilanteessa vain johtimien impedanssi. Tästä seuraa kaapelissa suurten virtojen vaikutuksesta myös voimakasta lämpenemistä.

Oikosulkuvirta on suurimmillaan heti oikosulun sattuessa, jolloin kaapelin impedanssi on pienimmillään. Virta lämmittää kaapelia, jolloin myös kaapelin impedanssi kasvaa. Impedanssin kasvaessa oikosulkuvirta vastaavasti pienenee. Kaapelin saavuttaessa lopullisen lämpötilansa myös oikosulkuvirta saavuttaa lopullisen lämpötilansa.

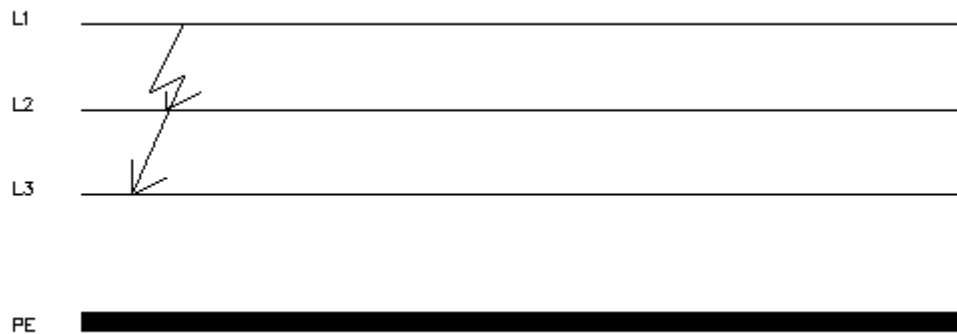


KUVA 45. Oikosulkuvirran käyttäytyminen ajan funktiona (ABB:n TTT-käsikirja)

Oikosulku voi tapahtua vaiheiden välillä tai maasulkuna.



KUVA 46. Maasulku (yksivaiheinen oikosulku)



KUVA 47. Vaiheiden välinen oikosulku

Tehdasmuuntamon syöttökaapelista ei ollut juurikaan tietoja saatavilla, eikä syöttökaapeleissa itsessään ollut tyyppiä. Oikosulkuvirtoja varten täytyy tietää kaapelin impedanssi Z , joka koostuu resistiivisestä osasta sekä reaktiivisestä osasta. Tampereen kaupungilta saatujen tietojen mukaan muuntamon syöttökaapelin oikosulkuvirta I_{k2} on 4,48kA ja I_{k3} on 6,05kA. Suojaus on riittävä nykyiselle verkkomallille. Myös erottimien oikosulkukestoisuus (35kA) on riittävä. Oikosulkuvirta tulee olla selvillä suojalaitteita valittaessa, jolloin suojalaitteen tulee toimia tietyssä ajassa ja myös kestää mekaanisesti oikosulkuvirtaa ennen laukeamista.

Johtimen poikkipinta- ala [mm ²]	Kupari			Alumiini		
	Resistanssi r	Reaktanssi x	Impedanssi z	Resistanssi r	Reaktanssi x	Impedanssi z
4 × 1,5	14,620	0,115	14,620			
4 × 2,5	8,770	0,110	8,770			
4 × 4	5,480	0,107	5,480			
4 × 6	3,660	0,100	3,660			
4 × 10	2,244	0,094	2,246			
4 × 16	1,415	0,090	1,418	2,324	0,090	2,326
4 × 25	0,898	0,086	0,902	1,489	0,086	1,492
4 × 35	0,652	0,083	0,657	1,086	0,083	1,089
4 × 50	0,482	0,083	0,489	0,796	0,083	0,800
4 × 70	0,336	0,082	0,346	0,551	0,082	0,557
4 × 95	0,244	0,082	0,257	0,398	0,082	0,406
4 × 120	0,195	0,080	0,211	0,316	0,080	0,326
4 × 150	0,155	0,080	0,174	0,258	0,080	0,270
4 × 185	0,125	0,080	0,148	0,207	0,080	0,222
4 × 240	0,095	0,079	0,124	0,162	0,079	0,180
4 × 300	0,078	0,079	0,111	0,133	0,079	0,155

TAULUKKO 6. Erialaisten kaapeleiden impedansseja (D1-2012)

Johtimen resistiivisyys voidaan laskea yhtälöstä:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (27)$$

, jossa R on resistanssi (Ω), ρ on johtimen ominaisvastus (Ω/m), l on johtimen pituus (m) ja A on johtimen poikkipinta-ala (m²).

Kaapelin impedanssi Z_k voidaan laskea, kun tiedetään kaapelin oikosulkuvirta I_k . Sähkölaitos yleensä ilmoittaa syöttökaapelin oikosulkuvirran, kun mitoitetaan sähköliittymää. Tällöin impedanssi on:

$$Z_k = \frac{c U}{\sqrt{3} I_k} \quad (28)$$

,jossa c on oikosulkuvirtakerroin, joka riippuu nimellisjännitteestä (TAULUKKO 7).

Nimellisjännite U_n	Maksimioikosulkuvirta C_{max}	Minimioikosulkuvirta C_{min}
pienjännite 100 V – 1000 V a) 230 V / 400 V b) muut jännitteet	1.00 1.05	0.95 1.00
keskijännite 1 kV - 35 kV	1.10	1.00
suurjännite 35 kV - 230 kV	1.10	1.00

TAULUKKO 7. Jännitekertoimia (ABB:n TTT-käsikirja)

4.6 Jännitteen alenema

Kuormitetussa muuntajassa kuormitusvirran kasvaessa muuntajan jännite alenee. Alenemaa esiintyy varsinkin oikosulkumoottorien käynnistyessä johtuen moottorien suhteellisen suurista käynnistysvirroista. Tämä aiheuttaa ongelmia muissa samaan kuormituspiiriin kytketyissä kuormituksissa. Jännitteen alenema ei saisi nousta tästä syystä liian suureksi. Jännitteen alenema ilmoitetaan prosentuaalisena. Jännitteen alenema on laskettavissa kaavalla:

$$\Delta U = R_k I_2 \cos\varphi + X_k I_2 \sin\varphi \quad (29)$$

, jossa R_k on oikosulkureaktanssi, I_2 on toisiokäämin virta ja X_k on oikosulku-reaktanssi. φ on tehokerroin.

Jännitteen alenemaa esiintyy myös kaapeleissa. Kaapelin pituuden kasvaessa kaapeli alkaa käyttäytyä kuorman tavoin kasvavan resistiivisyyden takia. Jännitteen alenemaa ei yleensä tarvitse ottaa huomioon KJ verkoissa korkean jännitteen vuoksi, jolloin alenemat ovat vähäisiä.

Koska jännitteen alenema liittyy lähinnä muuntajan kuormitukseen, sitä ei tässä opinnäytetyössä käsitellä kuin teoreettisesti. Jännitteen alenema tulee selvittää aina kun verkkoon kytketään uutta kuormaa, kuten esim. moottoreita.

Jännitteen aleneman olisi hyvä olla teollisuusverkoissa alle 10%. Liian suurta jännitteen alenemaa voidaan parantaa muun muassa hillitsemällä moottoreiden käynnistysvirtoja erilaisilla käynnistystavoilla. Myös keskenään samanlaisten muuntajien rinnankytkentä pienentää jännitteen alenemia. (Hietalahti. Sähkövoimatekniikan perusteet)

Kennoston suunnittelu

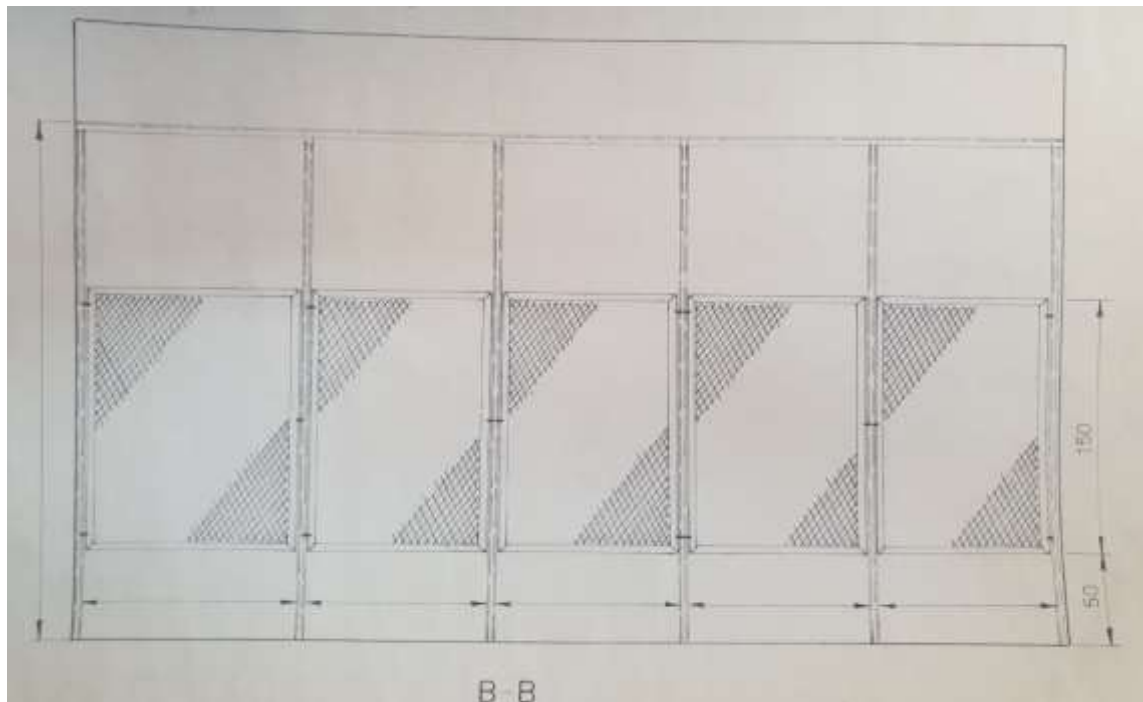
Tehtaan kennosto alkaa olla elinkaarensa loppupuolella, joten muuntamon kennosto ja siihen kuuluvat suojalaitteet olisi tarkoitus uudistaa. Erottimissa, jännitemuuntajissa ja virtamuuntajissa voidaan käyttää nykyisiä komponenttiarvoja mikä helpottaa laitehankintoja. Muuntajia ei ole tarkoitus tässä vaiheessa uusia. Muuntamon tiloja koskeviin säädöksiin ei myöskään tule muutoksia. Tarvittavia kojeita ja suojalaitteita tarvitaan vähintään seuraavasti:

- 7 kpl erottimia (5kpl alamuuntamoon 20kV/400A, 2kpl ylämuuntamoon 20kV/630A)
- 3 kpl virtamuuntajia tehomittausta ja suojausta varten
- 1 kpl jännitemuuntajia tehonmittausta varten
- 1 kpl suojalaitteita muuntajien KJ-puolelle
- 3 kpl suojalaitteita muuntajien PJ-puolelle

Uudistamissuunnitelmassa selvitetään tarvittavat kojeet ja budjettiarvio muuntamon komponenteille ja asennustyölle. Suunnitelman valmistuttua urakka kilpailutetaan. Virta- ja jännitemuuntajat (tehon kulutusmittaus) toimittaa jakeluverkon haltija, joten niitä ei tarvitse ottaa huomioon tarjousta tehdessä. Tarjouksessa tulee selvittää urakan hinta, jossa on eritelty kojeistojen hinnat, varsinaisen työn hinta ja urakan kesto. Suunnitteluvaiheessa voidaan edelleen sopia yksityiskohdaisempia asioita, kuten aikataulutus ja työn aloittamisen ajan kohta.

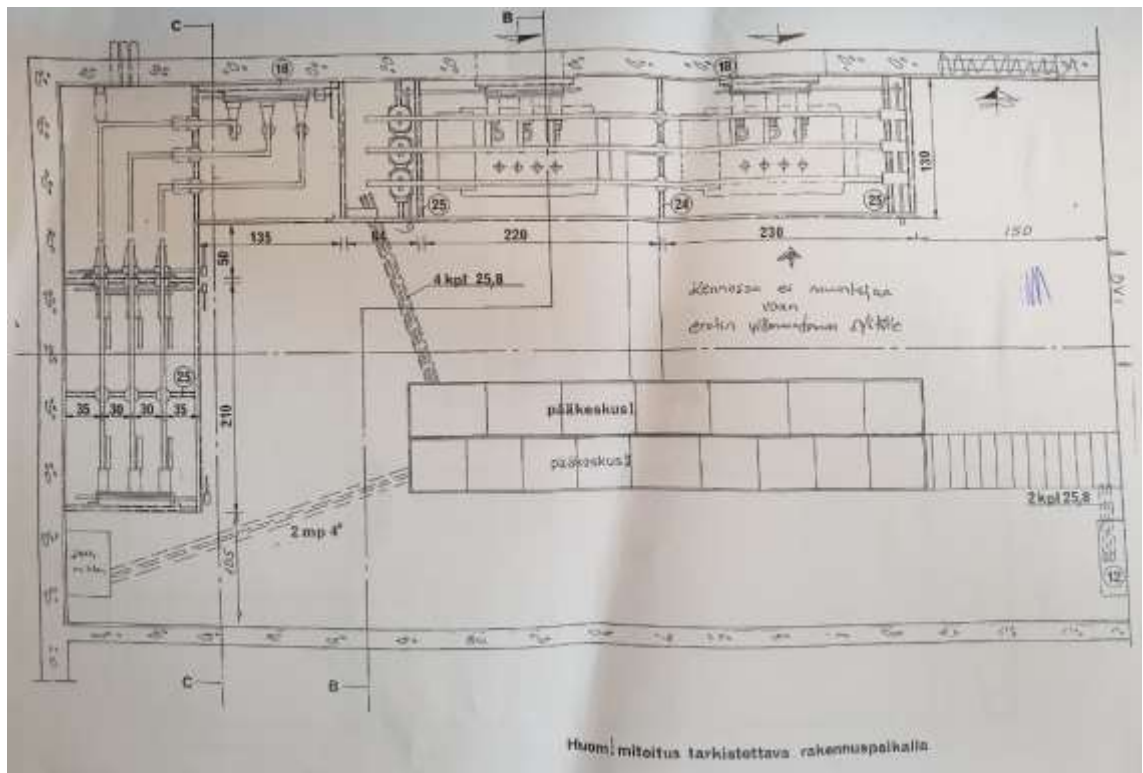
Vähäöljykatkaisija on tarkoitus korvata jollakin nykyaikaisemmalla ratkaisulla, kuten SF6- katkaisijalla tai tyhjiökatkaisijalla. PJ-verkon puolella suojauksena voidaan edelleen käyttää esimerkiksi paineilmakatkaisua. Myös differentiaalirele voisi olla potentiaalinen vaihtoehto. Tätä tarkastellaan lähemmin malliverkon suunnittelussa.

Myös avonainen KJ- puolen häkkiovikennosto olisi tarkoitus korvata vähintään levykoteloidulla kennostolla. Myös SF6- kennostoa on tarkasteltu vaihtoehtona. Häkkikennoston mitat ovat kuvassa 46.

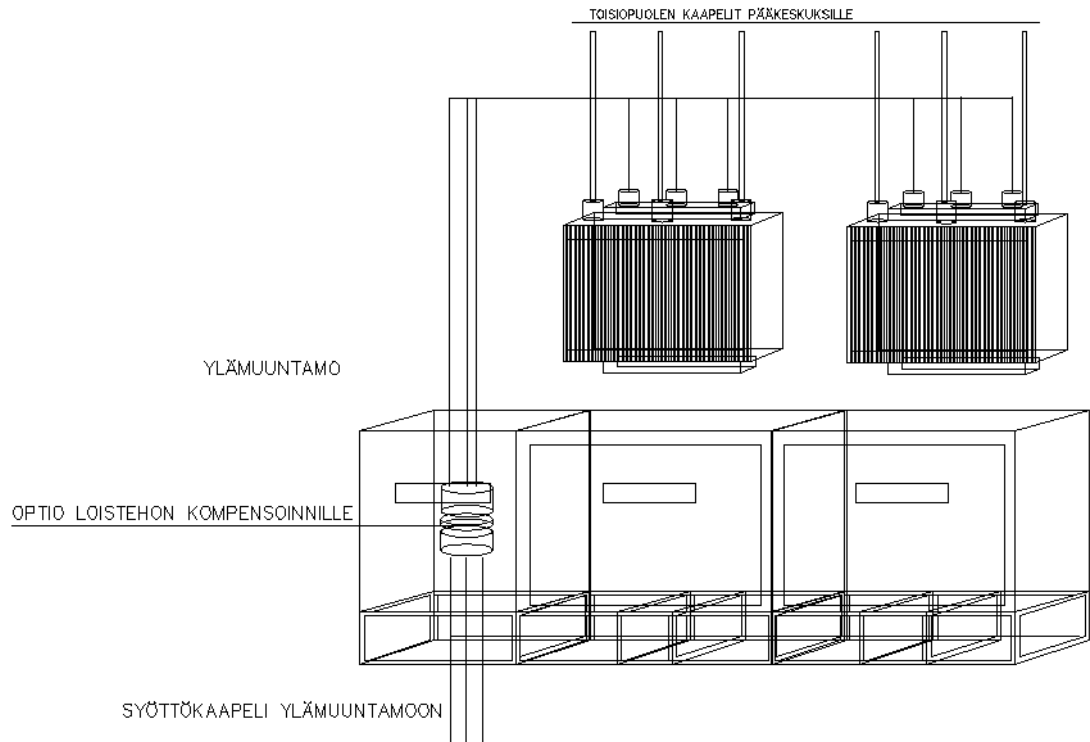


KUVA 48. Nykyiset muuntamon häkkikennostot.

Myös ylämuuntamoon menevän syöttökaapelin erotin on tarkoitus poistaa tarpeettomana. Tyhjän kennoon (KUVA 50) jätetään mahdollisuus kompensointilaitteistolle, mikäli sellaiselle tulee tulevaisuudessa tarvetta.

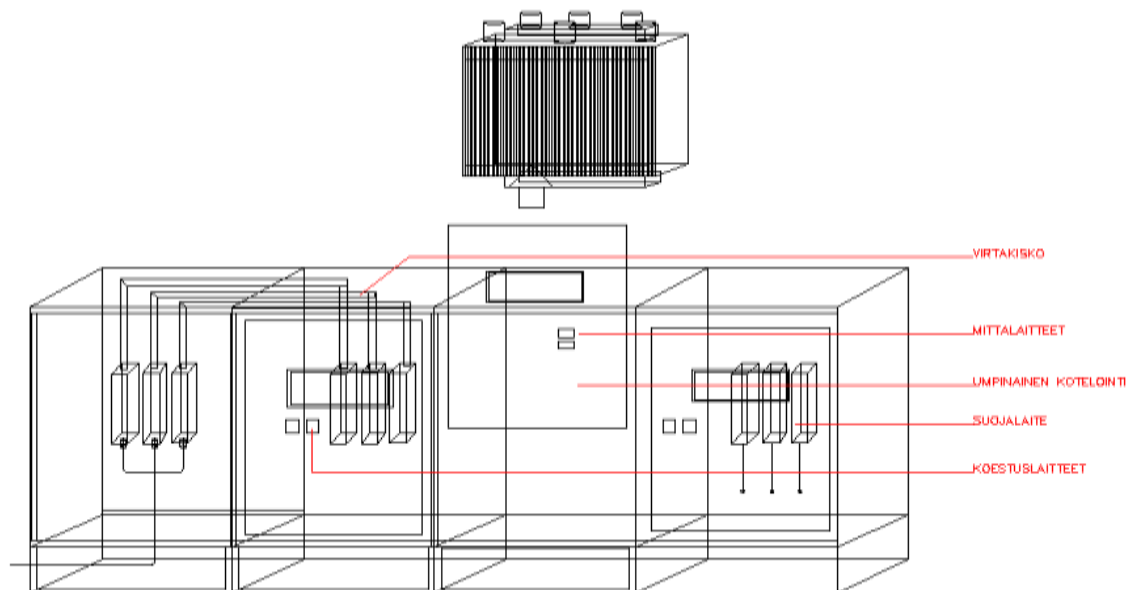


KUVA 49. Muuntamon uudistamisen suunnittelua.



KUVA 50. Ylämuuntamon loistehon kompensointi. (Suntinen. 2020)

Umpinaiseen kotelointiin voidaan asentaa tarvittavia mittauslaitteita ja suojalaitteiden koeistus- virityslaitteita. Nykyään kennostoihin on mahdollista liittää myös väyläteknikkaa etävalvontaa ja -koestusta varten. Myös differentiaaliresalaus voidaan toteuttaa väyläteknikalla.



KUVA 51. Umpinainen kennosto.

Alamuuntamon pääkeskuksissa on vielä käytössä ns. ”uuninluukkukytkimiä”, jotka ovat melko vaarallisia niissä herkästi esiintyvien valokaarien takia. Myös nämä kytkimet on tarkoitus vaihtaa varokeisiin.

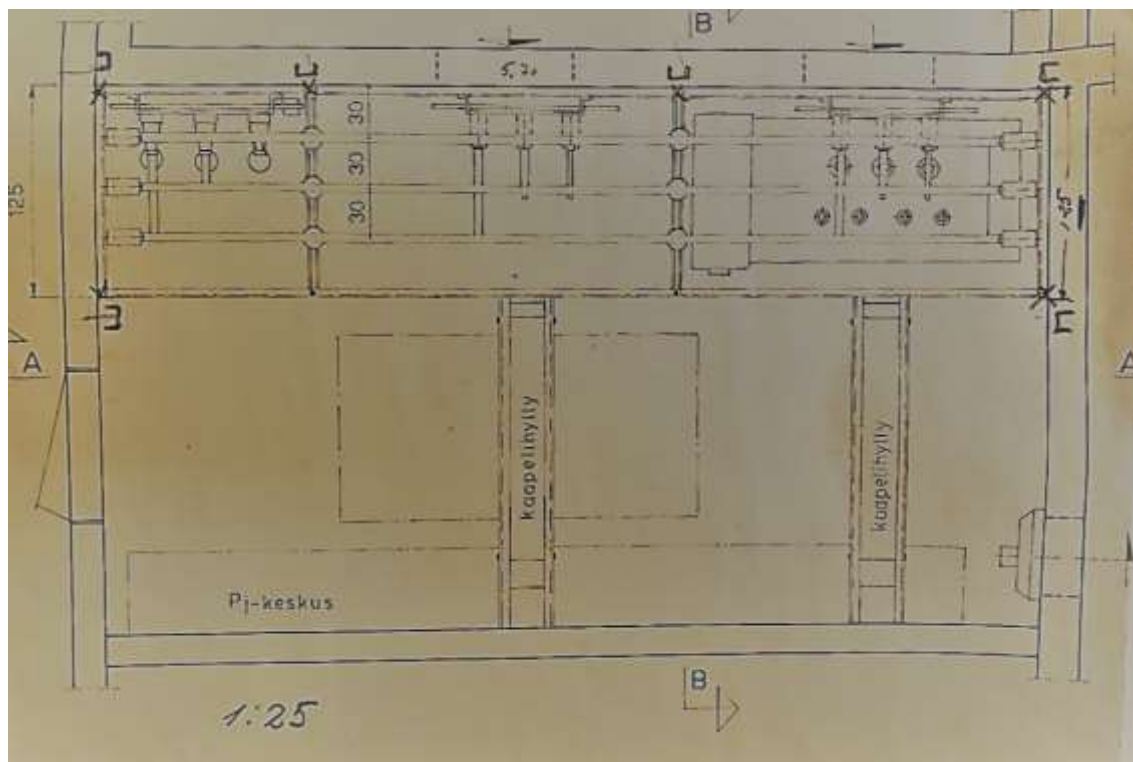


KUVA 52. ”Uuninluukkukytkimiä”. (sahkot.fi)

Kennoston suunnittelussa tulee KJ- puolella soveltaa SFS- 6001 (yli 1000V jännitetyöt) standardia ja PJ- puolella SFS- 6000 (alle 1000V jännitetyöt) standardia. Kennostojen rakennusmateriaali voi olla metallia tai muovia. Materiaalin tulee olla rakennusympäristöön soveltuvaa. Huomioitavia asioita kennoston suunnittelussa ovat esimerkiksi korroosion kesto, kennostojen oikosulkukestävyys, mekaaninen kestävyys oikosulun aiheuttamia paineaaltoja vastaan, kosketussuojaus ja suojaus muilta ulkoisilta haitoilta, kuten kosteudelta ja pölyltä. Kennostot ovat tyypillisesti IP-luokaltaan IP20 tai IP30 (Mäkinen, Kallio. Teollisuuden sähköasennukset).

Kaapelointireittien muuttamiselle ei nähty suunnittelussa merkittävää tarvetta. Tästä syystä voidaan kaapeleissa esiintyvien oikosulkuvirtojen olettaa pysyvän muuttumattomina. Myös jännitteen aleneman voidaan olettaa pysyvän samana.

Mietittiin, kuinka pieneen tilaan kennosto olisi mahdollista rakennuttaa. Tarkoitus olisi säästää materiaalikustannuksissa. Kennostot ovat liitettyinä toisiinsa virtakiskoilla, jotka ovat paljain ilman eristeitä noin 30cm etäisyydellä toisistaan.

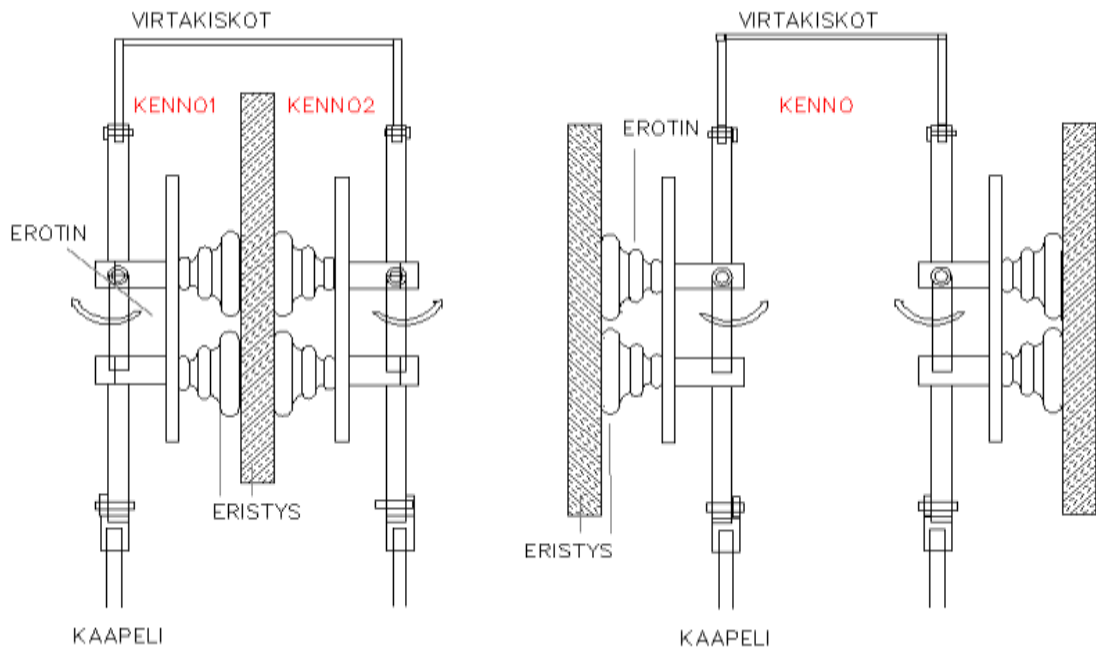


KUVA 53. Ylämuuntamon virtakiskon ja kaapelihyllyt.



KUVA 54. Virtakiskosta (Suntinen. 2021)

Myös erottimille on määritelty tietyt etäisyydet. Etäisyydet luonnollisesti kasvavat jännitteiden noustessa, koska myös läpilyönnin riski kasvaa.



KUVA 55. Kojeiston sijoitusmahdollisuuksia. (Suntinen. 2020)

Jos halutaan saada kojeistoa pienempään tilaan, on parannettava jännitteisten osien välistä eristystä edelleen läpilyöntien välttämiseksi.

SF₆- kojeistot ja -katkaisijat

Nykyään kojeistovalmistajilta on saatavana paljon monipuolisia ratkaisuja. Jos kennosto halutaan saada pieneen tilaan, voidaan käyttää kojeistoja, joissa on eristeenä SF₆-kaasua. SF₆ – kojeistoja on nykyään saatavilla myös tehtaalla käytettäville jännitetasoille. SF₆- kennostot ovat kuitenkin melko kalliita.

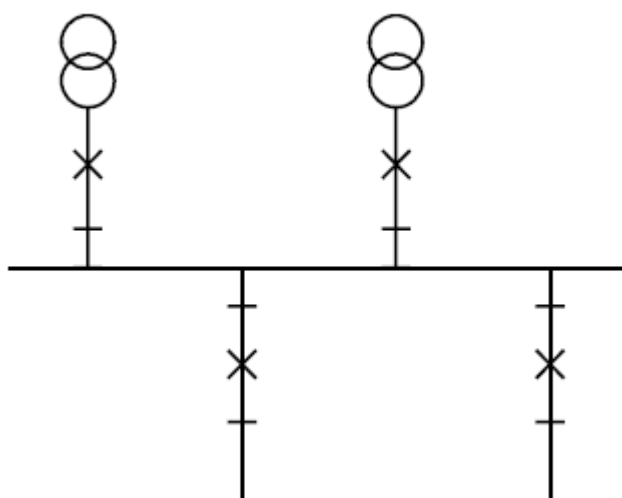
SF₆- kaasueristeisiin rakennettujen kojeistojen etuja ovat käyttövarmuus, pitkä käyttöikä, alhainen huollon tarve ja kevyt rakenne. Kennostot on mahdollista esiasentaa ja koestaa ennen loppusijoitusta. Tällä on merkittävä etu asennusajan kannalta. (ABB:n TTT-käsikirja)

SF₆- katkaisijat ovat myös edulltaan samoja kennostoihin verrattaessa. Katkaisin vaihtoehto on huomattavasti edullisempi verrattaessa kokonaiseen kennostoon.

Malliverkon suunnittelu

Nykyisen muuntamoverkon suojaus on sikäli ongelmallinen, että vian sattuessa koko tehtaan koko tehtaan sähkön syöttö katkeaa. Myös vähäöljykatkaisija on jo niin vanhaa tekniikka, että sitä ei kannata uusia. Uudistetussa muuntamossa jokainen muuntaja voidaan esimerkiksi suojata omalla katkaisijalla. Tällöin vian sattuessa tehtaan sähkön jakelu keskeytyy mahdollisimman vähän.

Tehtaan jakelu on nk. yksikiskojärjestelmä, jossa jokainen muuntamon kojeisto on liitettyä samaan kiskostoon. Ratkaisu on verrattain edullinen ja helppo toteuttaa. Merkittävä huono puoli on suojauksen taso, joka katkaisee sähkön syötön kokonaan, koska katkaisija on sijoitettu ennen muuntajia yhteiseen syöttökiskoon. Tosin yhden katkaisijan suojaus on toteutettava tällä tavalla, jos halutaan koko järjestelmän kattava suojaus.



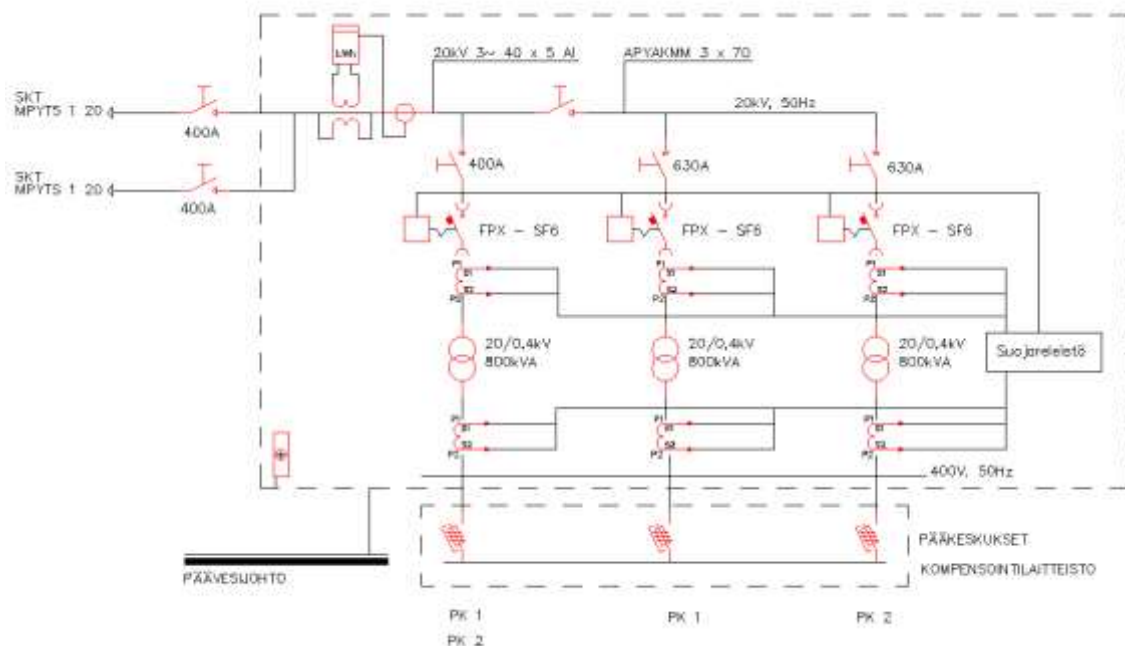
KUVA 56. Yksikiskojärjestelmä (ABB:n TTT-käsikirja)

Kiskostoratkaisuja on lukuisia erilaisia hyötyineen ja haittoineen. Tässä käsitellään vain yksikiskoon liittyvät hyödyt ja haitat. Yksikiskoston järjestelmän etuina

ovat muun muassa edullinen hankintakustannus, yksinkertainen ja selkeä suojausperiaate. Merkittävä haitta on vian aiheuttama katkos kiskostossa ja vaatimattomat kytkentämahdollisuudet. (ABB:n TTT-käsikirja)

Kaupunki edellyttää tehtaan muuntamon relesuojausta ja maasulkusuojausta (LIITE 4). Nämä on sisällytettävä malliverkon suunnitteluun. Muuntajien ensiöpuolen suojaus toteutetaan omilla SF₆- katkaisijoilla. Muuntajilla on myös oltava omat erottimet, koska katkaisijaa ei voi käyttää muuntajana.

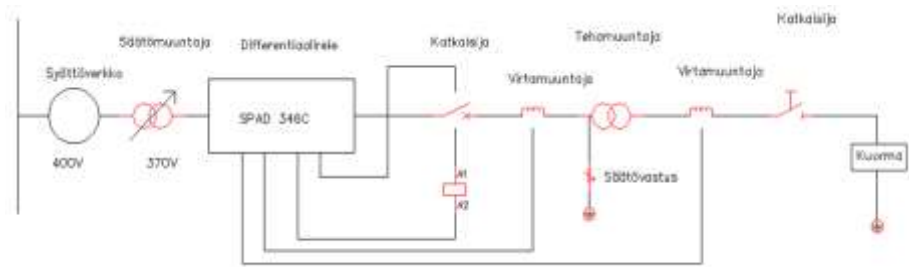
Kiskostorakenne säilytetään ennallaan. Kaupungin syöttökaapeleiden erottimet vaihdetaan uusiin. Kaapelien yhdyskohdan erotin poistetaan. Myös jokaisen



KUVA 57. Uudistetun muuntamon malliverkko. (Suntinen. 2020)

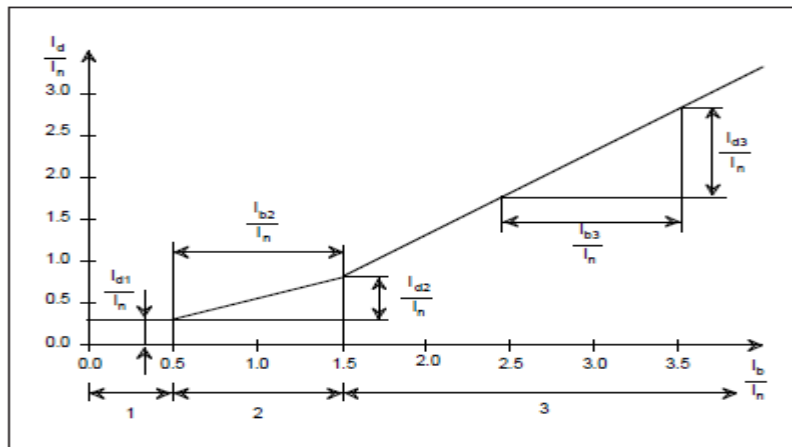
muuntajan erotin uusitaan. Muuntamoiden maadoitus on edelleen kytkettynä päävesijohtoon. Myös muuntamon muut metalliset osat, kuten kennostojen metalliset rungot, yhdistetään maan potentiaaliin, mikäli päädytään metalliseen kennostorakenteeseen.

Muuntajien katkaisijoiden ohjaus voidaan toteuttaa differentiaalireleellä, joka mittaa virtaa muuntajan ensiö- ja toisiopuolelta. Differentiaalireleellä on useita käyttötarkoituksia piirisuojauksessa ja tehomuuntajan suojaus on niistä yksi.



KUVA 58. Differentiaalirelesuojauksen periaate (Suntinen. 2021)

Rele on vakavoitu siten, että se ei reagoi satunnaisiin virtasysäyksiin esimerkiksi muuntajan kytkeytyessä verkkoon. Rele ohjaa havahtuessaan SF₆-katkaisijaa FPX-SF6. Rele havahtuu virtaepäsymmetriasta, joten se tunnistaa myös vuotovirran maasulussa.



KUVA 59. Differentiaalireleen toimintakuvaaja. (ABB)

Kuvassa on esitettyä differentiaalireleen tyypillinen toimintakuvaaja. Releen havahtuminen perustuu erovirran (I_d) ja vakavointivirran (I_b) kulmakertoimeen. I_{d1}/I_n on releen perusasettelu. Rele havahtuu kulmakertoimen erotessa asettelu-arvoista I_{d2} ja I_{d3} .

Havahtumissuhde S , vakavointivirta I_b ja erovirta I_d määritellään seuraavasti:

$$S = \frac{I_d}{I_b} \quad (30)$$

$$I_b = \frac{I_1 + I_2}{2} \quad (31)$$

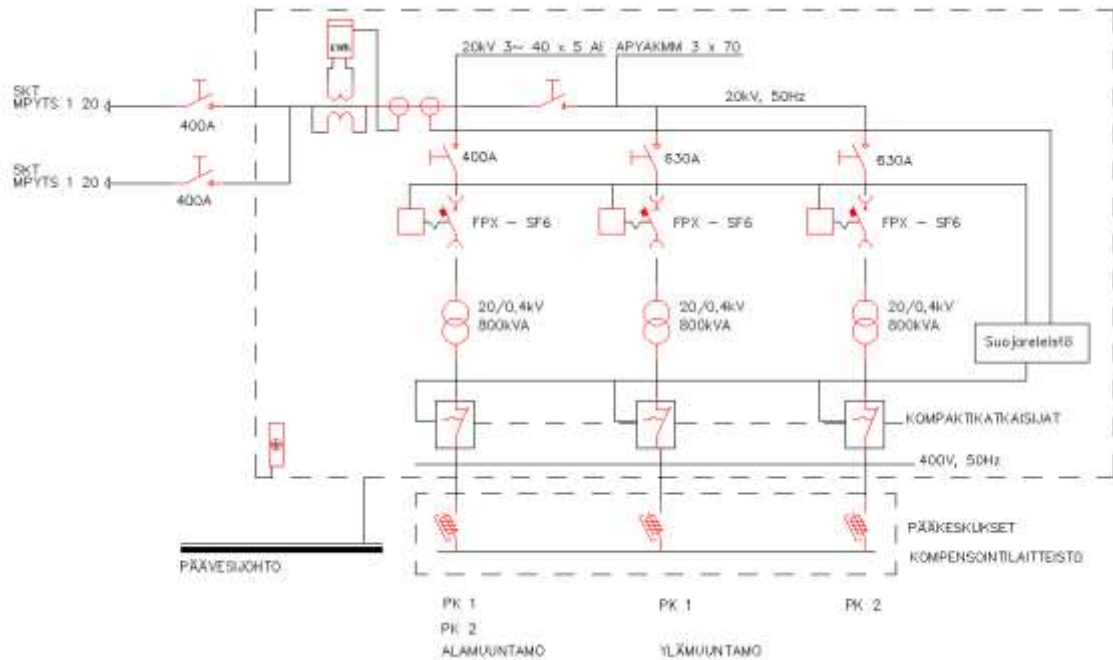
$$I_d = I_1 - I_2 \quad (32)$$

I_1 ja I_2 ovat muuntajan ensiövirta ja toisiovirta.

Havahtumisarvot voidaan asettaa vastaamaan Tampereen kaupungin suojauskelle asettamat vaatimukset ylivirran suhteen (LIITE 4). Myös katkaisijoita tarvittaisiin seitsemän sijasta vain kuusi, jos poistetaan nykyinen rinnakkaissyöttöjen jälkeinen erotin. SPAD 346 C- differentiaalireleen liitântäkaavio on esitetty liitteessä 6.

Tällainen malliverkko voi olla kuitenkin suhteellisen hankala toteuttaa ja virtamuuntajien määrä kasvaisi kohtuuttomasti. Myös suojauksen selektiivisyys on varmistettava. Tosin differentiaalireleissä on hyvät toimintojen asettelumahdollisuudet, joten selektiivisyyden toteuttaminen ei välttämättä ole ongelma.

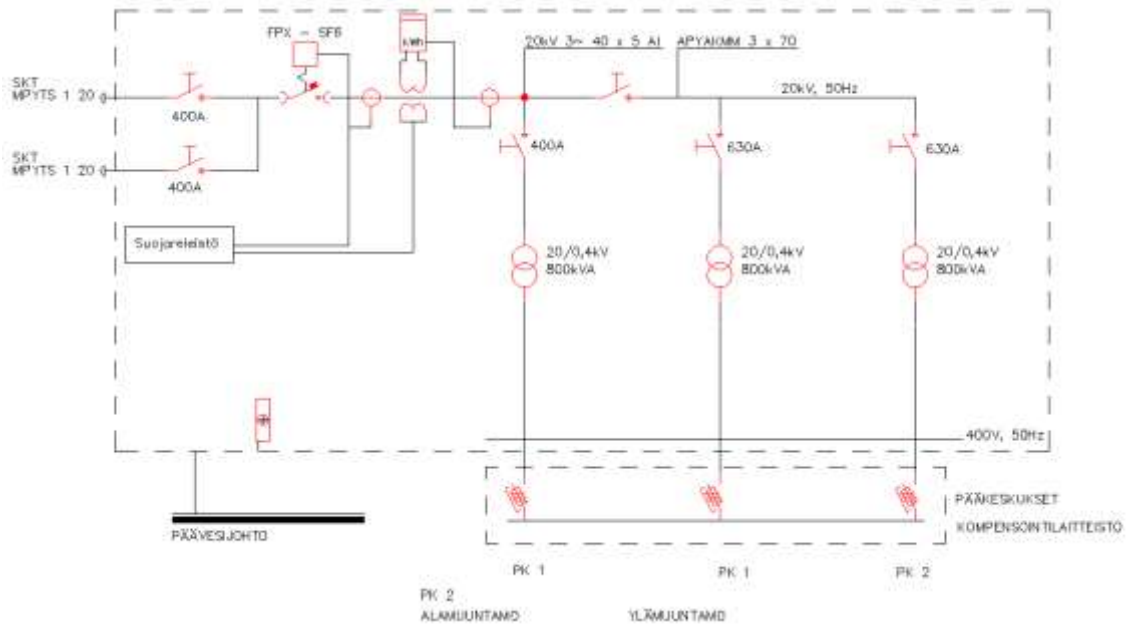
Differentiaalireleen voisi vaihtoehtoisesti korvata kompaktikatkaisijoilla, jolloin malliverkkoa saataisiin selkeytettyä suojauksen kannalta. Kompaktikatkaisijassa terminen katkaisukyky liikalämpenemisen välttämiseksi sekä myös magneettinen katkaisukyky ylivirran ehkäisemiseksi. Myös väyläohjaus on mahdollinen.



KUVA 60. Malliverkko kompaktikatkaisijoilla. (Suntinen. 2021)

Tämä malliverkko on selkeämpi ja suojaus edelleen hyvä mutta komponenttien määrä on edelleen suuri, joten verkko voi olla kallis toteuttaa.

Taloudellisin ratkaisu olisi toteuttaa edelleen malliverkko yhdellä katkaisijalla nykyisen verkon mukaisesti. Muuntajien toisiopuolella olisi varokesuojaus. Oikosulkutilanne on sinänsä harvinainen, joten ei ole välttämättä tarpeellista toteuttaa jokaisen muuntajan erillissuojausta omilla katkaisijoilla. Myös ylämuuntamon loistehon kompensointilaitteistoa varten suunniteltuun kennoon on suotuisaa toistaiseksi jättää vähintään vanha erotin toistaiseksi.



KUVA 61. Nykyisen periaatteen malliverkko. (Suntinen. 2021)

Yhdellä katkaisijalla myös kiskorakenne säilyy mahdollisimman paljon ennallaan, koska katkaisijan voi sijoittaa vähäjykatkaisijan tilalle omaan kennoon. Vanhan kennostorakenteen voisi mahdollisesti säilyttää kuitenkin vaihtamalla häkiovet umpinaisiksi. PJ- puolella riittää varokesuojaus. Myös maasulkusuojaus pidetään ennallaan. Ratkaisu olisi todennäköisesti edullisin ja nopein vaihtoehto toteuttaa.

Projektin aloitus

Projektista tulee tehdä urakkasopimus, joka on myös suositeltavaa kilpailuttaa. Urakkasopimuksessa tulisi selvittää ainakin urakan laajuus eli mitä urakoitsijan tulee muuntamoon rakennuttaa, urakan kokonaishinta, urakan kesto ja dokumentointi. Dokumentoinnin tulee käsittää sähkökuvat, asennettavien laitteistojen tekniset tiedot ja mahdolliset sertifikaatit, joista selviää muun muassa valmistajan laitteistolle tekemät testaukset ja hyväksynnät. Myös urakoitsijan ja asiakkaat vastuut sekä sähkölaitoksen osuus projektissa tulee olla kirjallisesti selvillä.

Tarjous tulee myös olla hyväksyttynä ennen varsinaisen työn aloittamista. Urakoitsijan tulee noudattaa urakointia tehdessään asennusaikana voimassa olevia määräyksiä ja Tampereen kaupungin sähkölaitoksen antamia ohjeistuksia.

Sähköurakoitsija laatii sähkötyöselityksen, jossa edellä mainitut asiat ovat esitettyinä. Projektilla on myös hyvä olla valvonta urakoitsijan ja asiakkaan puolelta.

Katkon suunnittelu

Muuntamo ei voida uudistaa ilman, että tuotanto jouduttaisiin keskeyttämään jossain vaiheessa kokonaan. Tästä aiheutuu tuotannollisia tappioita ja on siksi otettava myös huomioon muuntamon uudistamisen budjettia suunnitellessa. Myös komponenttien toimitusajat tulee ottaa huomioon, kun suunnitellaan muuntamon uudistamisen valmistelua. Siitä syystä tuotannon katko tulee suunnitella huolellisesti, jotta uudistus tapahtuu mahdollisimman nopeasti ja taloudellisesti.

Katko voitaisiin ajoittaa vuodenaikaan, jolloin tuotanto olisi mahdollisesti pienimmillään. Pyhien aikoihin tuotanto voi olla pienempää mutta työn hinta pyhänä on korkeampi. Myös kesäaikana tuotanto on hiljaisempaa lomien vuoksi.

On myös mietitty jonkinlaista tilapäiskaapelointia, jolla osa tuotannosta voitaisiin pitää toiminnassa uudistamisen aikana. Kennostojen rakentaminen valmiiksi muissa tehdastiloissa on myös mahdollista. Tällöin valmiit kokonaisuudet voidaan viedä muuntamoon kytkentävalmiina.

Alamuuntamon muuntaja on ollut aikaisemmin teholtaan 500kVA, joka on vaihdettu aikoinaan lisääntyneen kulutuksen vuoksi 800kVA muuntajaksi. Tällöin on tehty myös kojeisto- ja kaapeliasennuksia. Tässä työssä on aikoinaan kestänyt noin viikko. Asennustyön aikana sähkö on ollut koko tehtaalta katkaistu. Tämä antaa osaltaan suuntaa, kuinka kauan sähkökatko voisi kestää asennustyön aikana. Tähän vaikuttaa tietysti huolellinen työvaiheiden suunnittelu.

Koska kyseessä olisi todennäköisesti urakaluontoinen työ, myös aikataulu urakan kestosta tulee olla kirjallisesti tehtynä, josta selviää projektin vaiheet päivämäärineen ja työvaiheineen.

5 POHDINTA

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on osaltaan toimia pohjana muuntamon uudistamiselle, kun se aikanaan tulee ajankohtaiseksi. Sain myös hyvin paljon tietoa ja oppia tehtaan sähköjärjestelmästä ja muuntajien toiminnasta ja niiden roolista sähköjakelussa.

Tuotantokoneita on tehtaalla jonkin verran purettu ja uudemmat tuotantokoneet ovat taloudellisempia, joten kolmelle muuntajalle ei välttämättä olisi enää tarvetta. Tarvetta voisi tarkastella esimerkiksi seuraamalla tehtaan sähkön kuluusta mahdollisimman pitkältä aikaväliltä, jolloin saataisiin hyvä käsitys nykyisestä tehotarpeesta.

Lisäksi olisi ollut mielenkiintoista suorittaa mittauksia myös tehtaan muuntajille, jotta olisi voinut verrata mittaustuloksia laskettuihin arvoihin. Tähän ei kuitenkaan ollut mahdollisuutta asianmukaisten mittalaitteiden puutteen vuoksi eikä myöskään tuotannollisista syistä. Muuntajien kuntoa olisi myös ollut mielenkiintoista selvittää jollakin tavalla, kuten öljynäytteellä. Muuntajat ovat suhteellisen vanhoja kuormituksen aiheuttama lämpö muuntajassa vahingoittaa käämieristeitä pitkän ajan kuluessa.

Mikäli itse muuntajat jossain vaiheessa tullaan uudistamaan, olisi vaihtoehtona kuivamuuntaja lähinnä paloturvallisuutensa vuoksi. Tällöin on huolehdittava muuntajien riittävästä jäähdytyksestä. Kaikkien muuntamoiden sijoitusta samaan tilaan myös harkita. Tämä ratkaisu voisi kuitenkin olla hyvin työläs johtuen muun muassa kaapelien ja pääkeskusten uudelleen sijoittelusta. Samalla voitaisiin harkita myös mahdollisuutta ottaa 400V järjestelmän rinnalle 690V järjestelmä. 690V järjestelmällä saataisiin kaapelikokoja pienennettyä, koska kaapeleiden virrat pienenevät. Samoin pienenevät myös kaapeleissa esiintyvät lämpöhäviöt. Myös käyttövarmuus kasvaa, koska eri jännitteet eivät vaikuta toisiinsa. Myös järjestelmään liitettävät kuormalaitteet, kuten moottorit ja taajuusmuuttajat voidaan mitoittaa pienemmiksi ja samasta syystä myös edullisemmiksi. (Mäkinen, Kallio. Sähkölaitosasennukset).

LÄHTEET

Jukka Ahoranta. Sähkötekniikka. WSOY. 1998. 1.-3. p.

Lauri Hietalahti. Sähkövoimatekniikan perusteet. Tammertekniikka. 2013. 1p.

Markku Monni. Sähkölaitosasennukset. Edita. 1991. 5.-6. p

Tekniikan kaavasto. Tammertekniikka. 2005. 17. p

ABB:n TTT- käsikirja

FALICO Oy. Automatiikka- estokelapariston käyttöönotto-ohje.2003

Leena Korpinen. Muuntajat ja sähkölaitteet

D1 - 2012 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista

Mäkinen, Kallio. Teollisuuden sähköasennukset. Otava. 2004.

Siemens Sähkö Oy. Pienten öljytäytteisten tehomuuntajien asennus- ja hoito-ohjeita.

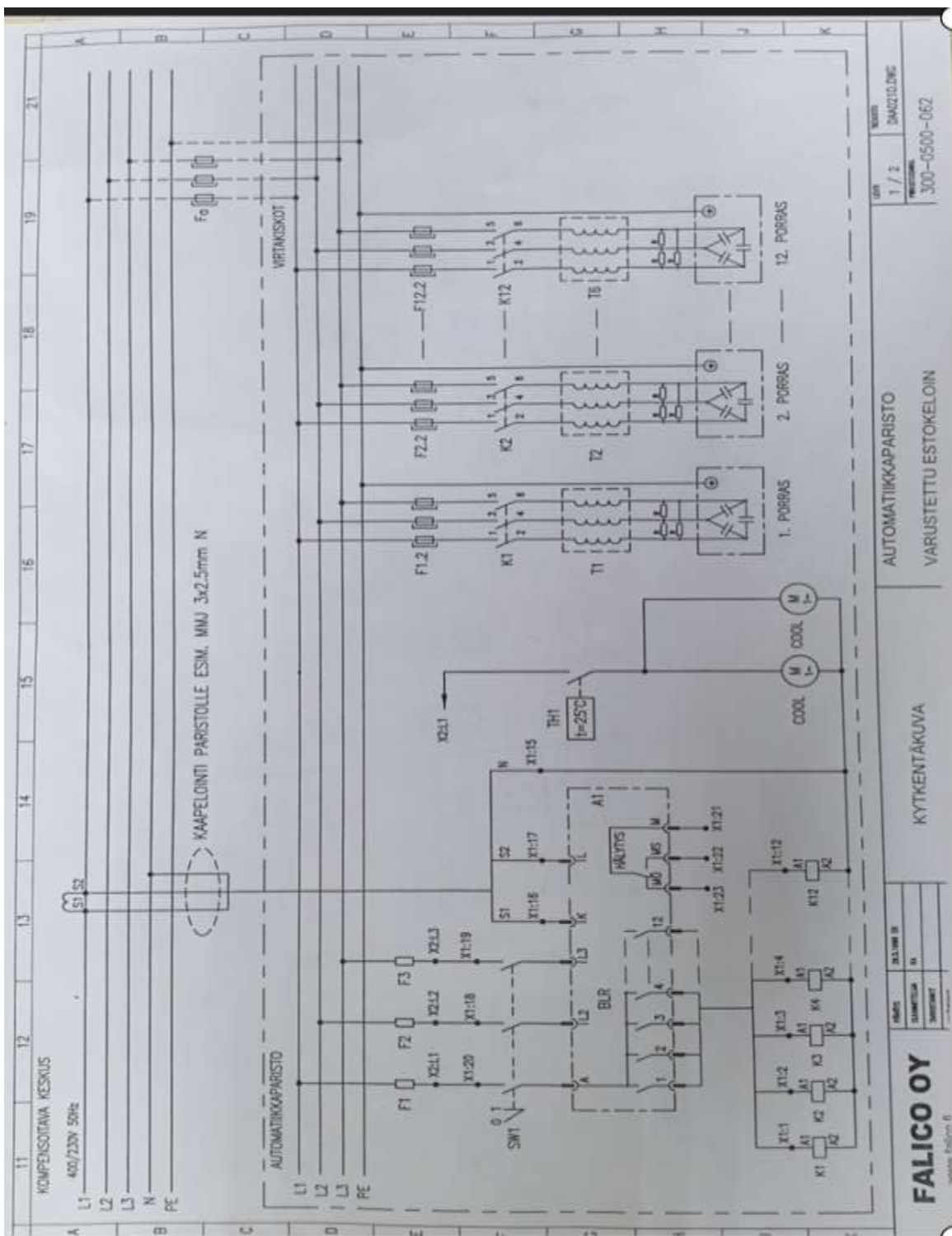
ASEA. Öljyeristeiset jakelumuuntajat käyttöönotto ja huolto. 1983.

LIITTEET

KOLMIVAIHEMUUNTAJIEN OSOITIN- JA KYTKENTÄPIIRROKSET

Kytkentäryhmä IEC:n mukaan	Osoitinpiirros		Kytkentäpiirros		Toision Nollapiste
	Ylä- jännite	Ala- jännite	Ylä- jännite	Ala- jännite	
0	Dd 0				Ei saatavissa
	Yy 0				n. 10% kuormitettavissa.
	Dz 0				100% kuormitettavissa
5	Dy 5				100% kuormitettavissa
	Yd 5				Ei saatavissa
	Yz 5				100% kuormitettavissa
6	Dd 6				Ei saatavissa
	Yy 6				n. 10% kuormitettavissa
	Dz 6				100% kuormitettavissa
11	Dy 11				100% kuormitettavissa
	Yd 11				Ei saatavissa
	Yz 11				100% kuormitettavissa

LIITE 1. Muuntajan kytkentätaulukko (Trafomic)



LIITE 2. Kompensointilaitteiston kytkentäkuvat



ASIAKASMUUNTAMON RELESUOJAUS

Pääkatkaisijan rele asetellaan seuraavien enimmäisarvojen mukaan. Suojauksen tulee toimia näillä tai pienemmillä virran arvoilla esitetyissä ajoissa tai nopeammin.

Seuraavia asetteluja käytetään keskijänniteliittymäalueella LKJ1. LKJ1-alueen ulkopuolelle tulevan keskijänniteliittymän suojauksesta sovitaan aina erikseen

Ylivirtasuojaus

Asiakasmuuntamon suojaukselta edellytetään aina ylivirtasuojausta.

Hidastettu laukaisu	500 A	0,4 s
Pikalaukaisu	1500 A	0,1 s

Maasulkusuojaus

Jos asiakkaalla on muuntamotilan ulkopuolista 20 kV:n verkkoa, sille edellytetään maasulkusuojaus.

I_0 -asetus (suuntaamaton)	2,0 A	0,2 s
------------------------------	-------	-------

Maasulkuvirran mittaukseen on käytettävä kaapelivirtamuuntajaa. Kaapelivirtamuuntajat voidaan asentaa liittymiskojeistosta lähteville johdoille, kuitenkin niin lähelle kojeistoa kuin mahdollista.

Käänteisaikarelettä voidaan käyttää suojauksessa, jos suunnittelija osoittaa, että releellä pystytään toteuttamaan yllä olevat vaatimukset.

Relesuojaukselle edellytetään aina varmennettua apusähköjärjestelmää.

Pääkatkaisijan releiden koestukset tulee suorittaa ennen laitteiston käyttöönottoa ja sen jälkeen laitteiston kunnossapito-ohjelman mukaan. Käänteisaikareleet tulee koestaa niin, että tuloksista käy ilmi releen toiminta ylläesitetyillä arvoilla tai nopeammin.

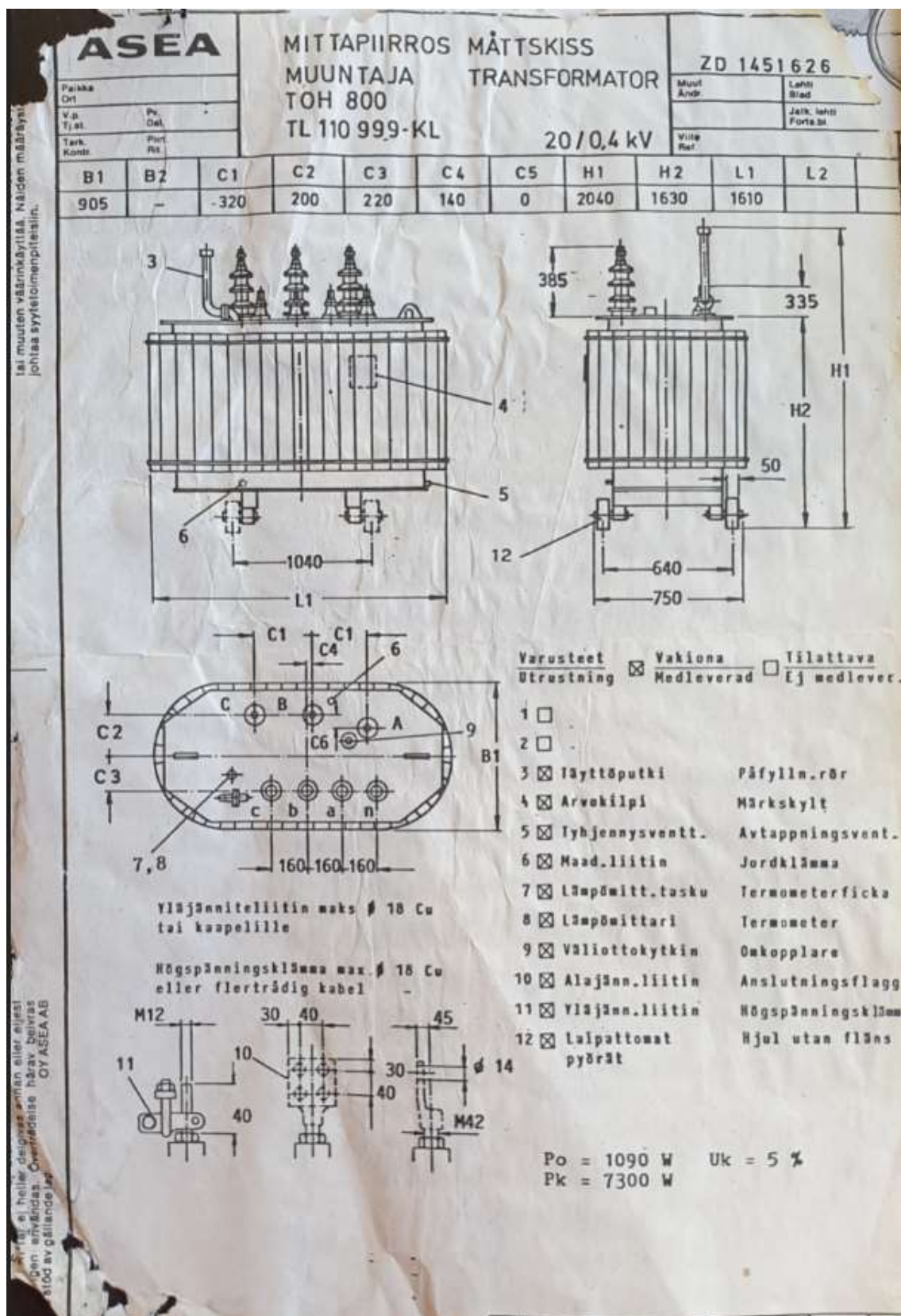
Releiden koestukset voidaan suorittaa niin sanottuna toisiokoestuksena kuitenkin varmistaa ennen kojeiston käyttöönottoa tehtävässä käyttöönottotarkastuksessa koko suojausketju mittamuuntajien ensiöpuolelta katkaisijalle.

Kopiot koestuspöytäkirjoista toimitetaan verkkoyhtiölle.

Tampereen Sähköverkko Oy
PL 425, 33101 Tampere
Voimakatu 17, 33100 Tampere
Vaihe: 020 630 3801

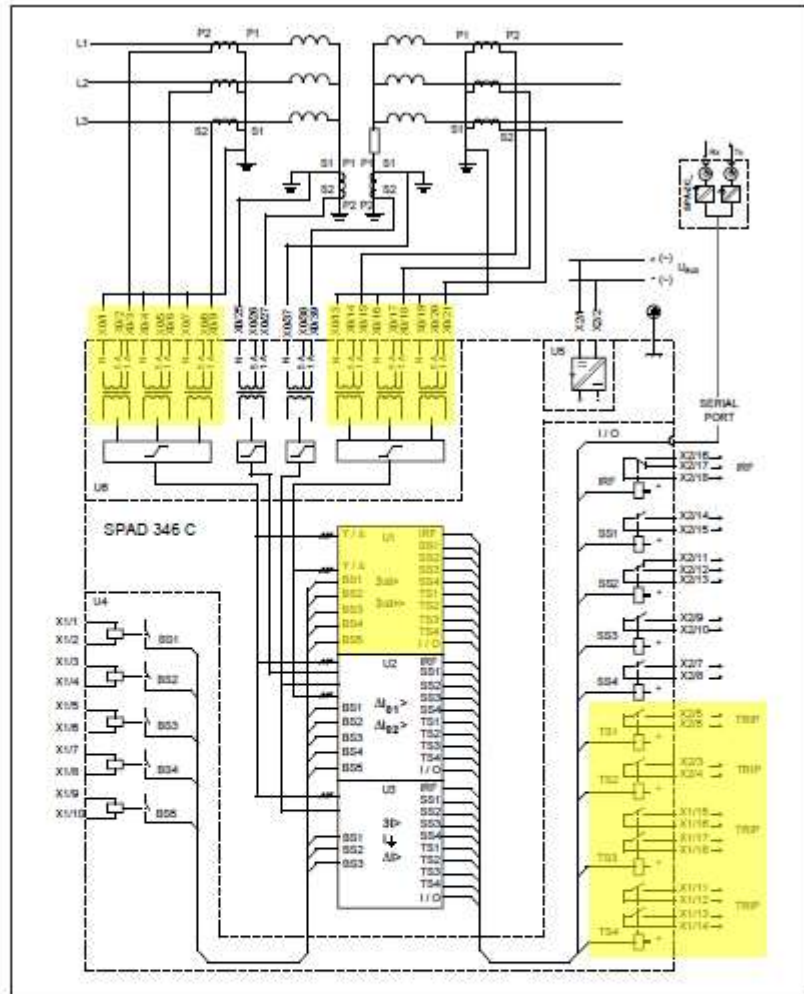
Sähköliittymäasiat rakentajalle
ja remontoijalle:
sahkolittyms@sahkolaitos.fi

Energianmittauksiin liittyvät asiat:
mittauspalvelu@sahkolaitos.fi



Liite 5. Muuntajan datalehti.

Liitântäkaavio



Kuva 1. Vakavoidun differentiaalireleen SPAD 346 C liitântäkaavio

U_{aux}	Apujännite
TS1...TS4	Lähtöreleet (laukaisukelpoiset)
SS1...SS4	Lähtöreleet
IRF	Itsevalvonnan lähtörele
BS1...BS5	Ulkoiset ohjaustulot
U1	Kolmivaiheinen vakavoitu differentiaalirelemoduuli SPCD 3D53
U2	Maasulkurelemoduuli SPCD 2D55
U3	Yhdistetty ylivirta- ja maasulkurelemoduuli SPCJ 4D28
U4	Ohjaustulo- ja lähtörelemoduuli SPTR 9B31
U5	Teholähdemoduuli SPGU 240A1 tai SPGU 48B2
U6	Liitântämoduuli SPT 8B18
TS1...TS4	Lähtösignaalit (laukaisukelpoisille lähtöreleille)
SS1...SS4	Lähtösignaalit
SERIAL PORT	Sarjaliikenneliityntä
SPA-ZC	Sarjaväylän liitântämoduuli
Rx/Tx	Liitântämoduulin vastaanotin (Rx) ja lähetin (Tx) kuitukaapeliinliityntää varten

LIITE 6. SPAD 346 C- Differentiaalireleen liitântäkaavio (ABB)