



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**MATTI HERNESNIEMI**  
**SARJAPARISTON EPÄBALANSSIVIRRRAN MITTAUS**

Diplomityö

Tarkastaja: TkT Kari Lahti  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa 8.5.2013

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

HERNESNIEMI MATTI: Sarjapariston epäbalanssivirran mittaus

Diplomityö, 73 sivua, 2 liitesivua

Lokakuu 2013

Pääaine: Teollisuuden sähkönkäyttökonekone

Tarkastaja: TkT Kari Lahti

Avainsanat: Sarjakondensaattoriparisto, virtamuuntaja, ylijännitesuojaus, kipinäväli

Sarjaparisto on sähkön siirtojohdolle asennettava laite, jonka tarkoituksena on lisätä linjan tehosiirtokapasiteettia ja parantaa verkon stabiilisuutta häiriötilanteissa. Sarjaparisto koostuu suuresta määrästä kondensaattoriyksiköitä, sekä niiden kanssa rinnan kytkeytyviä suojalaitteita. Kondensaattoriyksiköiden kuntoa voidaan tarkkailla käytön aikana mittaamalla impedanssiepätasapainolle herkän H-siltakytkennän virtaa. Yksiköiden sisäiset vauriot johtavat kondensaattorielementin sisäisen sulakkeen palamiseen, mikä taas näkyy muutoksena yksikön kapasitanssissa. Näin syntyvät epäbalanssivirrat H-sillassa ovat tavallisesti hyvin pieniä.

Jotta pienet muutokset pariston kapasitanssissa voidaan havaita, siltakytkennän keskihaaran virtaa mitataan tarkalla virtamuuntajalla. Virtamuuntajan nimellinen ensiövirta ja muuntosuhde on valittava pieneksi riittävän tarkkuuden varmistamiseksi. Tämä johtaa kuitenkin ongelmiin tilanteessa, jossa vikatilanteen seurauksena oikosulkeutuu yksi tai useampi kondensaattoriyksikkö.

Työn alkuosassa on esitelty sarjaparistoon ja virtamuuntajiin liittyvää teoriaa. Diplomityössä on esitelty virtamuuntajan toimintaan vaikuttavat parametrit. Työssä on tutkittu virtamuuntajan suojalaitteena toimivan kipinävälin toiminnan edellytyksiä ja syttymisjännitteeseen vaikuttavia tekijöitä. Kipinävälin oikean asettelun varmistamiseksi työssä tehtiin laskenta, joka huomioi kipinävälin syttymisjännitteen vaihtelun eri ilmanpaineissa ja lämpötiloissa. Virtamuuntajan suojana toimiessaan kipinävälille on tarkasteluissa oletettava suurin mahdollinen syttymisjännite, vaikkakin on hyvin todennäköistä että kipinäväli toimii jo pienemmilläkin jännitteillä. Simulointimallin avulla on mallinnettu suojakipinävälin toimintaa ja virtamuuntajan käyttäytymistä suurivirtaisissa epäbalanssivirtoissa. Diplomityössä on myös esitetty vaihtoehtoinen keino suojata virtamuuntaja metallioksidiventtiilisuojan avulla. Venttiilisuojan toimivuutta ja kykyä suojata virtamuuntaja on arvioitu simulointimallin avulla. Lisäksi työssä on pohdittu epäbalanssivirran mittauksessa käytetty virtamuuntajan tarkkuusvaatimuksia.

Työn viimeisessä osiossa on esitelty optiseen virranmittaukseen perustuvien virtamuuntajien perusperiaate ja pohdittu tekniikan soveltumista sarjapariston virranmittaukseen. Lisäksi optisen virranmittauksen kustannuksia on vertailtu nykyiseen mittausjärjestelmään.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical engineering

HERNESNIEMI MATTI: Unbalance Current Measurement in Fixed Series Capacitor

Master of Science Thesis, 73 pages, 2 Appendix pages

October, 2013

Major: Utilization of electrical energy

Examiner: Dr.Tech. Kari Lahti

Keywords: Series capacitor bank, current transformer, overvoltage protection, spark gap

The fixed series capacitors (FSC) are used to improve the transmission capability and stability of modern power system network. The FSC consist the large amount of parallel and series connected capacitors. The protective devices are connected in parallel with capacitor bank. The condition of capacitors units are monitored in real time with protection & control system. In order to measure possible internal faults in capacitor units, the capacitors are divided to H-bridge connection which allows very accurate current measuring in midpoint of branch. The current generated by internal element failure is very low, but it is possible to detect with balanced bridge connection.

In order to detect fuse failures, accurate current transformer must be used to measure current in midpoint of capacitor branches. To ensure accurate measuring, the nominal primary current value of unbalance current transformer must be chosen reasonable low. However, the short time current value depend the fault type in capacitor branch. If numerous capacitor units or elements are by-passed due to fault, the current could be very high.

The beginning of the thesis deals with the theory of series compensation and current transformers. The parameters affecting the behavior of current transformer are examined. In order to achieve the correct operation of unbalance protection, the characteristics of overvoltage protection spark gap are also studied. The statistical behavior of ignition voltage of spark gap must be taken into account when determining the required protection level. The results achieved in spark over analysis have been implemented to unbalance simulation analysis. The purpose of unbalance simulation is to model the behavior of current transformer in high current unbalance faults. The surge arrester is also presented as alternative method to protect unbalance current transformer against overvoltages. The accuracy requirement of unbalance current transformer has been determined.

In the last part of the thesis, the optical current transformer technology has been introduced as an alternative option to provide unbalance current measuring in series capacitor. The cost structure between existing technology and optical current measuring system has been compared.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Alstom Grid Oy:n projektiosastolla syksyn 2012 – kesä 2013 aikana. Työn tarkastajana toimi tekniikan tohtori Kari Lahti ja ohjaajana insinööri Mikko Toikkanen. Haluan esittää kiitokset työn tarkastajan toimineelle Kari Lahdelle työn tarkastamisesta. Kiitän Mikko Toikkasta ohjauksesta sekä diplomi-insinööri Teemu Hännistä ja Vesa Oinosta työn sisältöön liittyvistä kommentteista, materiaalista ja keskusteluista. Lisäksi haluan kiittää avovaimoani Susannaa kannustuksesta ja tuesta koko opiskelun ja diplomityöprosessin aikana.

# SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
2	Loisteho sähkön siirrossa .....	3
	2.1 Sarjakompensoinnin periaate .....	4
	2.2 Sarjakompensoinnilla saavutettavat hyödyt .....	4
3	Sarjaparisto .....	6
	3.1 Pääkomponentit .....	6
	3.2 Epäbalanssi sarjaparistossa .....	9
	3.2.1 Aiheuttajat .....	9
	3.2.2 Epäbalanssin vaikutukset ja vikatyypit .....	11
	3.2.3 Epäbalanssisuojaus .....	14
4	Induktioon perustuvat virtamuuntajat .....	16
	4.1 Toimintaperiaate .....	16
	4.1.1 Sijaiskytkentä .....	17
	4.1.2 Osoitinpiirros .....	17
	4.2 Kyllästyminen virtamuuntajissa .....	18
	4.2.1 Tasakomponentin aiheuttama kyllästyminen .....	19
	4.2.2 Vaihtovirrasta aiheutuva kyllästyminen .....	20
	4.3 Ominaisuudet .....	21
	4.4 Virtamuuntajan valinta .....	26
5	Virtamuuntaja epäbalanssisuojauksessa .....	27
	5.1 Eristystaso .....	27
	5.2 Ryömintämatka .....	28
	5.3 Nimellisvirrat ja muuntajan sydämet .....	29
	5.3.1 Muuntajan tarkkuusvaatimukset .....	29
	5.3.2 Virtamuuntajan sydämet .....	31
	5.4 Toisiotaakat ja apuvirtamuuntaja .....	32
	5.4.1 Toisiokaapeloinnin taakka .....	32
	5.4.2 Apumuuntaja ja konversiovastus .....	34
	5.4.3 Kokonaistaakka .....	36
	5.4.4 Apumuuntajatyypin vaihto .....	36
	5.5 Ension suojaus kipinävälillä .....	37
	5.5.1 Kipinävälin syttymisjännitteen testaus .....	38
	5.5.2 Ympäristöolosuhteiden huomioiminen syttymisjännitteen määrittelyssä .....	41
	5.5.3 Kipinävälin valokaarijännitteen mittaus .....	43
	5.6 Ension suojaus venttiilisuojaalla .....	45
6	Vikatilanteiden simulointi .....	46
	6.1 Simulointimalli .....	46
	6.1.1 Virtamuuntajan malli .....	47

6.1.2	Sarjapariston malli .....	51
6.2	Vikasimuloinnit kun ensiön suojana kipinäväli .....	53
6.3	Vikasimuloinnit kun ensiön suojana venttiilisuoja .....	57
6.4	Johtopäätökset simuloinneista.....	60
7	Optiset virtamuuntajat.....	61
7.1	Toimintaperiaate .....	61
7.1.1	Ampéren laki .....	61
7.1.2	Polarisaatio ja Faradayn ilmiö .....	62
7.2	Alstomin optinen virtamuuntajateknologia.....	64
7.2.1	Mittauksen teoria .....	64
7.2.2	Käytännön mittausjärjestelmä .....	66
7.2.3	Kustannusten vertailu .....	66
7.3	Optinen virtamuuntaja epäbalanssimittauksessa.....	67
7.4	Optisen virtamuuntajan tulevaisuudennäkymät .....	68
8	YHTEENVETO .....	70
	Lähteet.....	72
	Liite 1 Virtamuuntaja CA-123 .....	74
	Liite 2 Epäbalanssivikojen simuloinnissa käytetty malli .....	75

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

FSC	Fixed Series Capacitor, sarjakompensointi
SIL	Luonnollinen teho, Surge Impedance Load
U	Jännite
$R_C$	Johtimen resistanssi
S	Näennäisteho
P	Pätöteho
Q	Loisteho
$\delta$	Jännitteiden välinen vaihekulma
X	Reaktanssi
MOV	Metallioksidivaristori
BPCB	Ohituskatkaisija, By-Pass Circuit Breaker
P&C	Ohjaus - ja suojausjärjestelmä, Protection & Control
$C_e$	Kondensaattorielementin kapasitanssi
$C_u$	Kondensaattoriyksikön kapasitanssi
$n_s$	Sarjaankytkettyjen elementtien lukumäärä
$n_r$	Rinnankytkettyjen elementtien lukumäärä
$n_f$	Vioittuneiden elementtien lukumäärä
$I_{ub}$	Epäbalanssivirta
pu	per unit, suhteellisarvo
$K_n$	Muuntajan nimellinen muuntosuhde
$I_n$	Virtamuuntajan nimellinen ensiövirta
$R_1$	Virtamuuntajan ensiökäämin resistanssi
$X_1$	Virtamuuntajan ensiökäämin reaktanssi
$I_p$	Virtamuuntajan ensiövirta
$I_s$	Virtamuuntajan toisiovirta
$I_0$	Virtamuuntajan magnetointivirta
$I_m$	Virtamuuntajan magnetoitumisvirtaa kuvaava komponentti
$I_r$	Virtamuuntajan rautahäviöitä kuvaava komponentti
$R_2$	Virtamuuntajan toisiokäämin resistanssi
$X_2$	Virtamuuntajan toisiokäämin reaktanssi
$R_b$	Toisiotaakan resistanssi
$X_b$	Toisiotaakan reaktanssi
$U_s$	Toisiojännite
$E_s$	Toisiokäämityksen indusoima sähkömotorinen voima
$\theta_m$	Muuntajan rautasydämen vuo
T	Tesla, magneettikentän voimakkuus
$\mu$	Väliaineen permeabiliteetti
B	Magneettivuon tiheys
H	Magneettikentän voimakkuus
$I_{th}$	Terminen mitoitusvirta

$I_{\text{dyn}}$	Dynaaminen mitoitusvirta
$S_b$	Virtamuuntajan toisiotaakka
$Z_R$	Virtamuuntajan nimellinen toisiotaakka
$I_{sR}$	Virtamuuntajan nimellinen toisiovirta
$\beta$	Virtamuuntajan kulmavirhe
$\varepsilon_c$	Virtamuuntajan yhdistetty virhe
$i_p$	Virtamuuntaja ensiövirran hetkellisarvo
$I_{pl}$	Mittarivarmuusvirran mitoitusarvo
$F_a$	Nimellinen tarkkuusrajakerroin
$F_{aa}$	Todellinen tarkkuusrajakerroin
$F_s$	Nimellinen mittarivarmuuskerroin
$U_{\text{knee}}$	Muuntajan knee-point jännite
$U_{\text{lim}}$	Jännite sarjapariston suojaustasolla
BIL	Syöksyjännitekestoisuus, laitteen peruseristystaso
$U_n$	Nimellinen käyttöjännite
$L_{\text{spec}}$	Käyttöpaikalle määritelty ryömintämatkavaatimus, mm/kV
$\rho$	Resistiivisyys
$l$	Johtimen pituus
$A_j$	Johtimen poikkipinta-ala
$T$	Lämpötila kelvinasteina
$\alpha$	Resistanssin lämpötilariippuvuuskerroin
$L_1$	Virtamuuntajan ensiökäämin induktanssi
$L_2$	Virtamuuntajan toisiokäämin induktanssi
$M$	Käämien välinen keskinäisinduktanssi
$\omega$	Kulmataajuus
$R_{\text{conv}}$	Konversiovastuksen resistanssi
$U_{50}$	50 % läpilyöntijännitteen estimaatti
$N_j$	Merkitsevien pulssien lukumäärä up & down testauksessa
$U_j$	Merkitsevien pulssien jännite up & down testauksessa
$s$	Keskihajonnan estimaatti
$h$	Korkeus merenpinnasta metreinä
$p$	Ilman paine (mbar)
$I_{s\text{max}}$	Suurin toisiovirta minkä muuntaja toistaa kyllästymättä
$Z_{\text{in}}$	Virtamuuntajan sisätaakka
$I_k$	Jatkuvan tilan vikavirta
$t_k$	Vikavirran kesto aika
$\beta_a$	Polarisoituneen valon kiertymiskulma
$\lambda$	Aallonpituus



# 1 JOHDANTO

Sarjakompensointia on jo pitkään käytetty menestyksekkäästi sähkön siirtoverkossa johtojen kuormitettavuuden lisäämiseksi ja verkon stabiilisuuden parantamiseksi. Menetelmä on periaatteessa varsin yksinkertainen, mutta suojauksen toteutus aiheuttaa haasteita sarjaparistojen suunnittelussa. Koska sarjaparisto on sarjassa siirtojohdolla, se on alttiina verkossa esiintyvälle vikavirroille. Lisäksi sarjakompensoinnilla on huomattavia vaikutuksia verkon käyttäytymiseen häiriötilanteissa.

Sarjaparisto on laite, jolle oletetaan erittäin suuret käytettävyyssarvot sen kantaverkon käytettävyyttä parantavan luonteen vuoksi. Kompensoidun linjan tehonsiirtokapasiteetti on huomattavasti suurempi kuin kompensoimattoman. Jotta pariston kondensaattoreille voidaan suorittaa käytönaikaista kunnonvalvontaa, niille aiheutuvia virta- ja jänniterasituksia tarkkaillaan suojausjärjestelmän avulla. Lisäksi kondensaattoriyksiköiden sisäiset vauriot voidaan havaita epäbalanssivirran mittauksen avulla. Mittaus paljastaa kondensaattorielementtien rikkoutumiset, jolloin hajoamassa oleva kondensaattoriyksikkö voidaan havaita ennen kuin vauriot aiheuttavat käyttökeskeytyksen. Kondensaattoriyksikkö koostuu sarja- ja rinnankytketyistä kondensaattorielementeistä. Elementtien rikkoutuminen näkyy kondensaattoreiden H-siltakytken epätasapainona, jolloin keskihaarassa alkaa kulkea virta. Mittauksen toteutuksessa on kuitenkin teknisiä haasteita, jotka on otettava huomioon mittaukseen käytettävää virtamuuntajaa valittaessa.

Tässä diplomityössä on perehdytty epäbalanssivirtamuuntajan toiminnan määrittelyyn parametreihin. Virtamuuntajan suojaus vikatilanteessa on erittäin tärkeää vaurioiden välttämiseksi. Työssä on selvitetty virtamuuntajan suojakipinävälän toiminnan edellytykset ja luotu laskentakaavat, millä voidaan laskea kipinävälän syttymisjännitteen vaihteluväli ja syttymistodennäköisyys. Kipinävälän syttymisestä saatuja tietoja pystyttiin hyödyntämään simulaatiomallissa, jonka avulla voidaan tutkia epäbalanssihaaran virtoja pariston erilaisissa vikatyypeissä. Epäbalanssisuojauksen toteuttamisessa käytettävältä virtamuuntajalta vaadittuja ominaisuuksia on pyritty selvittämään tutkimalla epäbalanssia aiheuttavia vikoja ja niistä syntyviä virtoja. Jotta virtamuuntajan käyttäytymistä voitiin mallintaa, tuli muuntajan toisiotaakka huomioida. Työssä kehitettiin laskenta, joka laskee virtamuuntajan toisiotaakan huomioiden toisiokaapeloinnin sekä apuvirtamuuntajan ja sen toisioon kytketyn kuorman. Koska epäbalanssimuuntajan nimellisvirrat ovat pieniä, mutta vioista aiheutuvat virrat suuria, on simulaatiomallissa huomioitu myös virtamuuntajan kyllästyminen. Mallin avulla voidaan myös perustella suojaussydämen tarpeettomuus epäbalanssimuuntajassa. Työssä on esitetty myös virtamuuntajan suojakipinävälän korvaajaksi metallioksidiventtiilisuoja. Simuloinneilla on

selvitetty venttiilisuojan käyttäytymistä ylijännitetilanteessa ja sen kykyä suojata virtamuuntajaa.

Lisäksi työssä on tutkittu vaihtoehtoa, jossa perinteinen induktioon perustuva virtamuuntaja korvattaisiin optisella virtamuuntajalla. Tässä on tyydytty tarkastelemaan muuntajan mittaussensorin ominaisuuksia ja mittauksen teknistä taustaa. Sen sijaan optiseen virtamuuntajavaihtoehdon käyttöön liittyvät tekniset haasteet suojausjärjestelmään liitettävyyden kannalta on rajattu pois.

## 2 LOISTEHO SÄHKÖN SIIRROSSA

Sähkön siirto tehdään tavallisesti korkealla jännitteellä häviöiden minimoimiseksi. Tavallisesti suuret tuotantoyksiköt sijaitsevat etäällä kulutusposteista. Teho siirretään pitkiä siirtolinjoja pitkin suurjännitteellä. Siirtoetäisyyden kasvaessa johdon häviöihin kiinnitetään yhä enemmän huomiota. Kantaverkon tehonsiirrossa resistanssia merkittävämmäksi nousee johtimien reaktanssi. Johdot siis joko tuottavat tai kuluttavat loistehoa, riippuen johdon loistehotaseesta. Kevyillä kuormituksilla johto tuottaa hajakapasitanssin vuoksi loistehoa, kun taas raskaasti kuormitettu johto kuluttaa sitä. Optimitilanteessa tehoa siirrettäisiin johdon luonnollisella teholla (SIL), jolloin loistehotase olisi nolla. Tällöin johdon tuottama kapasitiivinen loisteho ja kuluttama induktiivinen loisteho ovat samat jolloin loistehoa ei siirrettäisi lainkaan. Tällaisessa tilanteessa johdolla siirtyvä teho riippuu kaavan 2.1 mukaisesti pääjännitteestä  $U$  ja johtimien resistanssista  $R_C$ . Käytännössä on kuitenkin hyvin harvinaista, että siirto johdolla siirretty teho vastaa johtimen luonnollista tehoa. Raskaalla kuormituksella johtimien induktanssin vaikutuksesta syntyvää loistehoa pyritään kompensoimaan loistehohäviöiden pienentämiseksi, johdon siirtokyvyn parantamiseksi ja verkon stabiilisuuden lisäämiseksi. [1]

$$SIL = \frac{U^2}{R_C} \quad (2.1)$$

Siirrettävästä kokonaistehosta käytetään yleisnimitystä näennäisteho. Näennäisteho  $S$  koostuu pätötehosta  $P$  ja loistehosta  $Q$ , jotka ovat osoitinsuureita. Ainoastaan pätöteho voidaan muuttaa lämpöenergiaksi, mekaaniseksi energiaksi tai muuhun hyötykäyttöön. Loistehoa ei voida käyttää työn tekemiseen, sillä loisteholla kuvataan energiaa joka on varastoitunut sähkö- ja magneettikenttiin. [1]

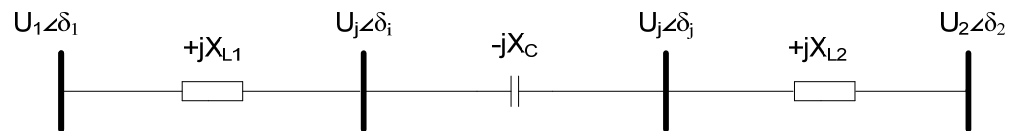
Siirtoverkossa pätötehon siirtoon vaikuttaa lähinnä verkon solmupisteiden jännitteiden välinen kulmaero. Siirtoverkossa tapahtuvassa sähkön siirrossa resistanssin osuus reaktanssiin verrattuna on häviävän pieni, mistä johtuen tehonsiirtoa suhteellisarvoilla tarkasteltaessa voidaan käyttää kaavan 2.2 mukaista tehonsiirtoyhtälöä. Kaavan 2.2 mukaan tehonsiirtoa voidaan kasvattaa suurentamalla solmupisteiden välistä kulmaeroa, kasvattamalla jännitteiden itseisarvoja tai pienentämällä solmupisteiden välistä reaktanssia. [1]

$$P = \frac{|U_1| |U_2|}{X} \sin(\delta) \quad (2.2)$$

Siirtoverkossa jännitteiden itseisarvojen suuruudet eivät voi vaihdella paljoakaan. Verkon stabiilisuuden säilymisen kannalta solmupisteiden kulmaero ei voi kasvaa lähellekään teoreettista maksimiaan eli  $90^\circ$ . Käytännön syistä siis monesti tehokkain tehonsiirtoa kasvattava menetelmä on reaktanssin pienentäminen kompensoimalla johdon induktiivista reaktanssia. Kompensoidulla siirtojohdolla samalla tehokulman  $\delta$  arvolla saadaan siis siirrettyä suurempi pätöteho. [1]

## 2.1 Sarjakompensoinnin periaate

Sarjakompensoinnin periaatteena on, että johdon pitkittäisreaktanssia kompensoidaan lisäämällä siirtojohdolle kondensaattoriparisto. Kondensaattoriparisto on sarjassa johdolla, jolloin sen yli muodostuu kapasitiivinen jännite virran kulkiessa sen läpi. Tällä kapasitiivisella jännitteellä kompensoidaan johdon induktiivisessa reaktanssissa muodostuvaa jännitehäviötä. Kuvassa 2.1 on kuvattu sarjakompensoinnin periaate. Sarjaparisto pienentää siirtojohdon kokonaisreaktanssia jolloin loistehohäviöt pienenevät ja johdon tehonsiirtokapasiteettia voidaan käyttää enemmän pätötehon siirtoon.



**Kuva 2.1** Sarjakompensoinnin periaate siirtojohdolla.

Sarjakompensoinnin etuna on sen itsesäätvyvyys. Koska sarjakompensoinnilla tuotettu loisteho on verrannollinen virran neliöön kaavan 2.3 mukaisesti, säätö pariston kompensointiteho automaattisesti linjan kuormituksen vaihdella. [2, 3]

$$Q = I^2 X_c \quad (2.3)$$

## 2.2 Sarjakompensoinnilla saavutettavat hyödyt

Sarjakompensointia käytetään pääasiassa sähkön siirron tehostamiseen yli 220 kV jännitetasolla. Sarjakompensoinnilla saadaan lyhennettyä johdon sähköistä pituutta. Käytännössä tämä tarkoittaa, että osa johdon induktiivisesta reaktanssista kompensoidaan kapasitiivisella reaktanssilla. Johdon kokonaisreaktanssin pienentyessä johdon kuormitettavuus kasvaa ja sama teho saadaan kompensoidulla linjalla siirrettyä pienemmällä jännitteenalenemalla. Johdon sarjakompensoiminen on huomattavasti uuden siirtolinjan rakentamista edullisempi ratkaisu. Erityisesti tilanteissa, jossa kuormitus ei ole pysyvää, saavutetaan sarjakompensoinnilla suuri etu verrattuna rinnakkaisten linjojen rakentami-

seen. Yleisesti sarjaparistot sijoitetaan johto-osuuksille, joiden pituus on noin 100 km – 500 km.

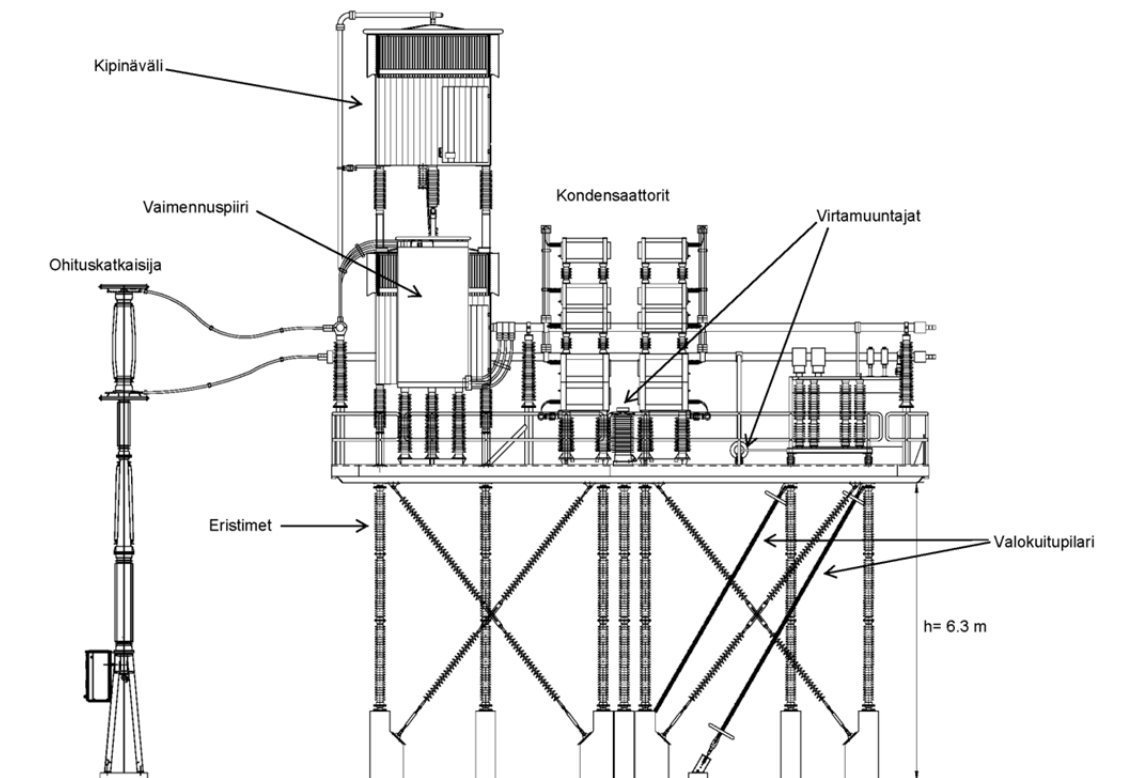
Kapasitiivisen reaktanssin suhdetta johdon reaktanssiin kutsutaan kompensointiasteeksi. Kompensointiastetta ei voida kasvattaa rajattomasti, sillä liian suurella kompensointiasteella toimivassa sähköverkossa on vaarana aliharmoninen resonanssi. Kun sarjaparisto kytketään siirtolinjalle, se muodostaa verkon induktanssien kanssa sarjaresonanssipiirin. Tämän sarjaresonanssipiirin taajuus ei saa olla liian lähellä verkon generaattoreiden värähtelyiden aiheuttamia mekaanisia herätetaajuuksia. Normaalisti nämä mekaaniset värähtelyt vaimenevat verkon induktanssien vaikutuksesta. Mikäli sarjapariston ja verkon sarjaankytkennän resonanssitaajuus osuu generaattoreiden värähtelytaajuudelle, seurauksena voi olla hallitsematon värähtely. Vaimenematon värähtely johtaa sarjapariston, siirtojohdon tai generaattorin irtoamiseen verkosta. Mikäli suojaus ei toimisi, seurauksena olisi vakava mekaaninen vaurio generaattorille. Tyypillisesti linjan kompensointiaste vaihtelee välillä 40 % – 70 %. [2, 3]

Sarjakompensoinnilla saavutetaan merkittäviä parannuksia verkon stabiilisuu-teen. Sarjakompensoidussa verkossa vian kriittinen selvitysaika on pidempi. Kriittisellä selvitysaikalla tarkoitetaan pisintä mahdollista aikaa, minkä vika saa olla päällä, ennen kuin vikakohta saadaan erotettua terveestä verkosta. Mikäli vika kestää tätä pidempään, verkon tahtigeneraattorit putoavat verkon tahtinopeudesta. Vaikka sarjakompensointi pienentää johdon reaktanssia, ei se juurikaan lisää vikavirtojen suuruutta koska pariston ylijännitesuojaus rajoittaa johdon kompensointiastetta vian aikana.

Sarjakompensoinnilla saavutettavan hyödyn kannalta pariston sijoituspaikka sähköverkossa on hyvin merkittävä tekijä. Erityisesti pitkillä siirtolinjoilla paristo vaikuttaa linjan jänniteprofiiliin nostamalla verkkojännitteen suuruutta pariston lähialueilla. Optimi sijoitus pitkällä siirtojohdolla olisi linjan puolivälissä, jolloin sillä voidaan lisätä linjan tehonsiirtokykyä jopa 25 %. Monesti kuitenkin pariston paikkaan vaikuttaa myös maantieteelliset seikat kuten luoksepäästävyys. Lyhyemmillä siirtolinjoilla pariston sijoituspaikat ovatkin yleensä sähköasemilla. [2]

## 3 SARJAPARISTO

Sarjaparisto koostuu verkkojännitteen potentiaaliin nostetusta lavarakenteesta, jonka päälle kondensaattoriparistot ja muut komponentit on sijoitettu. Sarjapariston kaikki päälaitteet ovat siis kokonaan maasta erotettuja. Tämä asettaa haasteita erityisesti mittausten kannalta, sillä kaikki tiedonsiirto verkkojännitteen potentiaaliin nostetun lavarakenteen ja maan välillä on tehtävä optisia kuituja käyttäen. Kuva 3.1 esittää tyypillistä sarjapariston rakennetta yhden vaiheen osalta. Kuvassa esitettyjen osien lisäksi paristoon kuuluvat paristo- ja maadoituserottimet sekä sisätiloissa sijaitseva pariston ohjaus- ja suojausjärjestelmä. Osa suojausjärjestelmästä sijaitsee sarjapariston lavalla sisältäen virran mittaukseen ja kipinävälin sytyttämiseen tarvittavan elektronikan.



Kuva 3.1. Sarjapariston rakenne

### 3.1 Pääkomponentit

#### Kondensaattorit

Kondensaattorit muodostavat sarjakompensoinnin perustan. Sarjaparisto rakentuu tavallisesti useista rinnan- ja sarjaankytketyistä kondensaattoriyksiköistä. Kondensaattoriyk-

siköt puolestaan sisältävät useita rinnan ja sarjaankytkettyjä elementtejä. Kondensaattoriyksiköitä yhdistelemällä saadaan paristolle riittävä jännite- ja virtakestoisuus. Yksiköiden kapasitanssit puolestaan valitaan siten, että koko paristolle saadaan haluttu kapasitanssi.

Kondensaattorit kytketään sarjaan siirtolinjalle. Johdon kuormitusvirta kulkee kondensaattoreiden lävitse. Tästä seuraa myös se, että kondensaattorit ovat alltiina verkossa esiintyvälle vikavirroille. Tämä aiheuttaa haasteita sarjapariston suojauksen suunnittelussa. Kiinteässä sarjaparistossa (FSC) ei pariston reaktanssia pystytä säätämään, mutta sarjapariston itsesäätyvyysominaisuuden vuoksi pariston tuottama teho riippuu johdon kuormitusvirrasta. [2, 4]

### **Metallioksidivaristori**

Kondensaattoreiden rinnalle on kytketty epälineaarinen vastus eli varistori (MOV). Sen tehtävänä on rajoittaa pariston yli oleva jännite kondensaattoriyksiköiden kannalta turvalliselle tasolle. Vikatilanteissa kondensaattoreiden virta nousee jolloin niihin kohdistuva jänniterasitus muuttuu suoraan virran suhteessa. Jännitteen noustessa riittävästi varistori siirtyy johtavaan tilaan jolloin osa pariston virrasta alkaa kulkea varistorin lävitse. Varistori rajoittaa kondensaattoripariston yli olevaa jännitettä, minkä ansiosta paristoa ei tarvitse ohittaa lyhyillä ylijännitteen kestoajoilla. Varistoriin kertynyt energia riippuu sen läpimenneestä virrasta. Varistori on ohitettava ennen kuin siihen kertynyt energia ylittää sen mitoitusenergian. Nopea ohitus tehdään tavallisesti pakkoliipaistavaa kipinäväliä käyttämällä. Tavallisesti varistori mitoitetaan siten, että se kykenee absorboimaan vikavirrasta kertyvää energiaa ulkoisen vian aikana jolloin sarjakondensaattoria ei tarvitse ohittaa. Tämä on erityisen tärkeää jotta sarjapariston tuomat edut verkon stabiilisuuden säilyttämiseksi voidaan hyödyntää. Ohitus on sallittu sisäisessä viassa, eli viassa joks tapahtuu sarjapariston kanssa samalla johto-osuudella. [2, 4]

### **Vaimennuspiiri**

Vaimennuspiiri koostuu ilmasydämisestä kelasta ja sen kanssa rinnan kytketystä vastuksesta. Vaimennuspiirin tehtävä on rajoittaa pariston ohituksesta syntyvän kondensaattorien purkausvirran amplitudia, muuttaa purkausvirran taajuus verkon kannalta sopivaksi sekä vastuksen avulla taata purkausvärähtelyn nopea vaimeneminen. Vastus kytketään piiriin kipinävälin tai varistorin avulla vain purkausvirran alun aikana, sillä sen mitoitaminen koko oikosulkuvirralla ei ole kannattavaa. Lisäksi jatkuvasti kytkettynä oleva vastus aiheuttaisi häviöitä tilanteessa, jossa sarjaparisto on ohitettuna tavallisessa verkon käyttötilanteessa. [4]

### **Kipinäväli**

Kipinäväli toimii pariston nopeana ohituskeinona suurivirtaisissa linjavioissa. Sisäisissä vioissa oikosulkuvirran suuruus on tavallisesti hyvin suuri. Suuri virta nostaa kondensaattoreiden yli olevan jännitteen korkeaksi ja varistori alkaa leikata jännitettä päästämällä virtaa lävitseen. Varistorin johtaessa siihen kertyvä energia kuumentaa sen hyvin

nopeasti. Tällaisessa tilanteessa tavallisen katkaisijan noin 40 ms toiminta-aika on liian hidas, jotta varistori ei vahingoittuisi. Suojausjärjestelmä antaa pakkoliipaisukomennon, jolloin kipinävälin elektrodien välille muodostetaan johtava valokaari minkä kautta paristo ohitetaan. Valokaari palaa kunnes pariston ohituskatkaisija sulkeutuu. [4]

### **Virtamuuntajat**

Virtamuuntajat muodostavat sarjaparistossa olennaisen osan ohjaus- ja suojausjärjestelmää. Niiden avulla mitataan virtaa sarjapariston kiskoston eri osissa. Virtamuuntajien oikeanlainen toiminta on suojauksen toiminnan kannalta välttämätöntä. Virtamuuntajilta saadun virtatiedon avulla voidaan tarkkailla pariston tilaa ja se pystytään ohittamaan ennen kuin laitteistolle ehtii syntyä vakavia vaurioita vikavirtojen seurauksena. Tavallisesti sarjaparistossa mitattavat virrat ovat:

- Linjavirta, mikä sama kuin kondensaattoreiden virta
- Varistorin läpi menevä virta
- Kipinävälin läpi kulkeva virta
- Lavarakenteen ja kiskotuksen välinen virta (Lavasulku)
- Kondensaattoripariston epäbalanssivirta

Näistä mittauksista kipinävälivirta ja lavasulkuvirta ovat mittauksia, joissa ei vaadita suurta tarkkuutta vaan tärkeintä on havaita virta luotettavasti. [4]

### **Ohituskatkaisija**

Ohituskatkaisijalla (BPCB) tarkoitetaan sarjapariston rinnalla olevaa katkaisijaa, jonka avulla paristo voidaan kytkeä verkkoon tai irti verkosta. Toisin kuin katkaisijoilla yleensä, sarjapariston ohituskatkaisijalla suojaava toimenpide on katkaisijan sulkeminen. Tällöin virta ei enää kulje sarjapariston kondensaattoreiden kautta. Katkaisijan on kestettävä merkittäviä ylijännitteitä joita pariston yli esiintyy varsinkin kompensoidun linjan kytkemistilanteissa. Lisäksi katkaisijan on kestettävä linjalla suurin vikavirta sekä tähän summautuva pariston ohituksesta syntyvä kondensaattoreiden purkausvirta. Katkaisijalle tulevia virtarasituksia helpottaa, mikäli paristo on ohitettu kipinävälin avulla jolloin purkausvirran suuruus on ehtinyt pienentyä alkuhetkestään huomattavasti. Katkaisijan sulkeutuessa virta kommutoi kipinäväliltä katkaisijalle ja kipinävälissä palava valokaari sammuu. [4]

### **Ohjaus- ja suojausjärjestelmä**

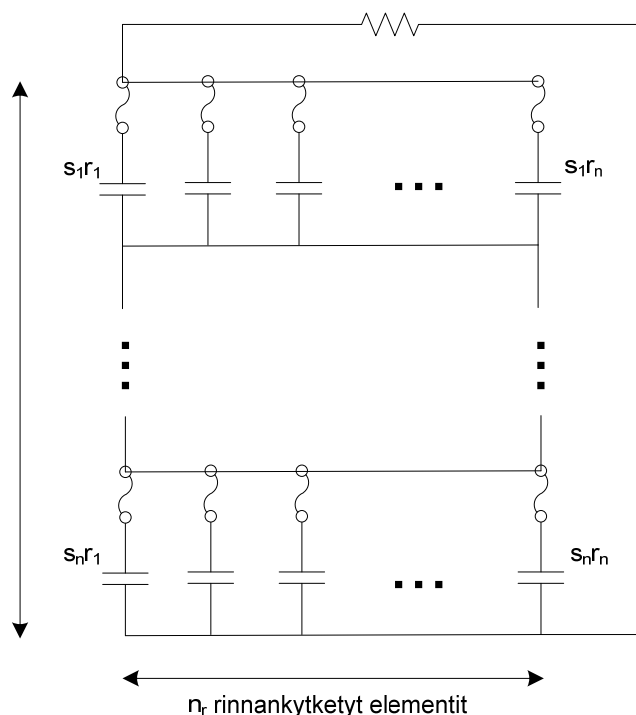
Ohjaus - ja suojausjärjestelmä (P&C) kerää tietoa pariston tilasta virtamuuntajien avulla. Pariston suojausjärjestelmä sijaitsee maatasossa erillisessä rakennuksessa, jonne tieto tuodaan sarjaparistosta valokuituja pitkin. Suojausjärjestelmä huolehtii pariston turvallisuudesta toiminnasta laitteiston kestävyyskannalta antamalla komennot katkaisijalle ja tarpeen vaatiessa myös kipinävälille. Ohjausjärjestelmä kommunikoi myös verkon linjasuojauksen kanssa. Lisäksi ohjausjärjestelmän avulla pariston tilaa voidaan tarkkailla ja sitä voidaan ohjata kaukokäytöllä verkkokeskuksista.



## 3.2 Epäbalanssi sarjaparistossa

### 3.2.1 Aiheuttajat

Sarjaparisto koostuu rinnan- ja sarjaankytketyistä kondensaattoriyksiköistä jotka sisältävät lukuisia yksittäisiä kondensaattorielementtejä. Kondensaattoriyksiköt voivat olla varustettuja sisäisillä sulakkeilla, ulkoisella sulakkeella tai kokonaan sulakkeettomia. Alstom Grid käyttää FACTS sovelluksissa tavallisesti sisäisillä sulakkeilla varustettuja kondensaattoriyksiköitä. Kuvassa 3.2 on esitetty periaatekuva kondensaattoriyksikön sisäisestä kytkennästä. Rinnankytkettyjä elementtejä kutsutaan ryhmiksi. Kun kondensaattoriyksikön sisällä yhdessä elementissä tapahtuu oikosulku, aiheuttaa se ryhmän rinnakkaisten elementtien purkautumiseen oikosulkeutuneen elementin ja sen sulakkeen kautta. Purkausvirta aiheuttaa sulakkeen palamisen. Kun sulake on palanut, yksikkö toimii normaalisti, mutta rikkoutuneen elementin vaikutus näkyy koko ryhmän kapasitanssissa. Kuvassa ylimpänä oleva vastus on kondensaattorin purkausvastus, jonka tehtävä on purkaa kondensaattoriin jäänyt varaus jännitteen poiskytkennän jälkeen. [4]

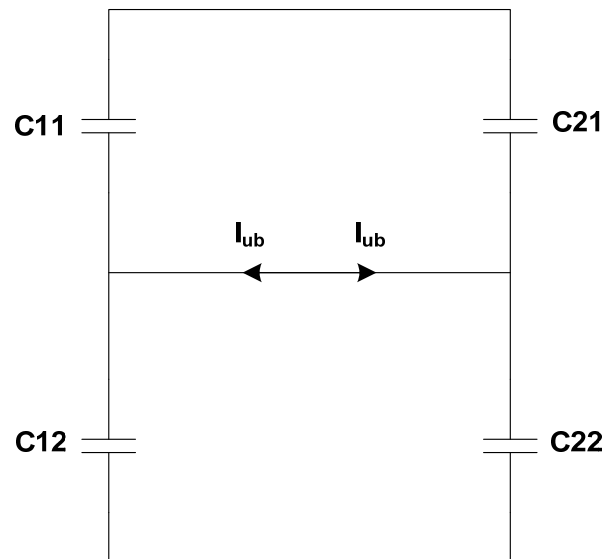


**Kuva 3.2.** Sisäisillä sulakkeilla varustetun kondensaattoriyksikön rakenne.

Kondensaattoriyksikön kapasitanssi määräytyy kaavan 3.1 mukaisesti. Kaavassa  $n_r$  tarkoittaa vioittuneiden elementtien eli samalla myös palaneiden sulakkeiden lukumäärää. Pienemmän kapasitanssin vuoksi ryhmän elementeille kohdistuva jänniterasitus kasvaa. Pahin mahdollinen tilanne on silloin, kun samasta ryhmästä on hajonnut useampia elementtejä, sillä sarjaankytkettyjen elementtiryhmiä jännite jakautuu kapasitanssien suhteessa. Elementeille kohdistuva jänniterasitus riippuu oleellisesti myös pariston virrasta. Pienellä linjavirran arvolla elementtien kokema jänniterasitus on pienempi.

$$C_u = \frac{n_r C_e}{\frac{n_r}{n_r - n_f} + n_s - 1} \quad (3.1)$$

Jotta kondensaattoriyksiköiden käytönaikainen kunnonvalvonta olisi mahdollista, sarjapariston kondensaattorit kytketään yhteen tai useampaan H-siltaan kuvan 3.3 mukaisesti. Jokaisessa haarassa on kondensaattoriräkkejä jotka sisältävät useita rinnan- ja sarjaankytkettyjä kondensaattoriyksiköitä. Elementtien rikkoutumisesta johtuva yksikön kapasitanssin muutos näkyy siltakytken epätasapainona ja virta alkaa kulkea keskihaaran lävitse. Virta keskihaarassa on nolla, mikäli kapasitanssin C12 suhde kapasitanssiin C11 on sama kuin C22:n suhde kapasitanssiin C21. Epäbalanssisuojauksessa oletetaan, että elementit rikkoutuisivat sillan samasta haarasta. Mikäli elementtejä hajoaisi tasaisesti siten, että ylä- ja alahaarojen välinen suhde pysyisi samana, ei useankaan elementin rikkoutumista huomata. Kuitenkin tässä tapauksessa elementtejä hajoaa tasaisesti pariston kondensaattoreista, jolloin yksittäiseen elementtiryhmään kohdistuva ylijännite ei kasva suureksi. Lisäksi yksittäisten elementtien vaikutus koko sarjapariston kapasitanssiin on hyvin pieni. [4]



**Kuva 3.3** Sarjaparistossa käytetty H-siltakytkenä

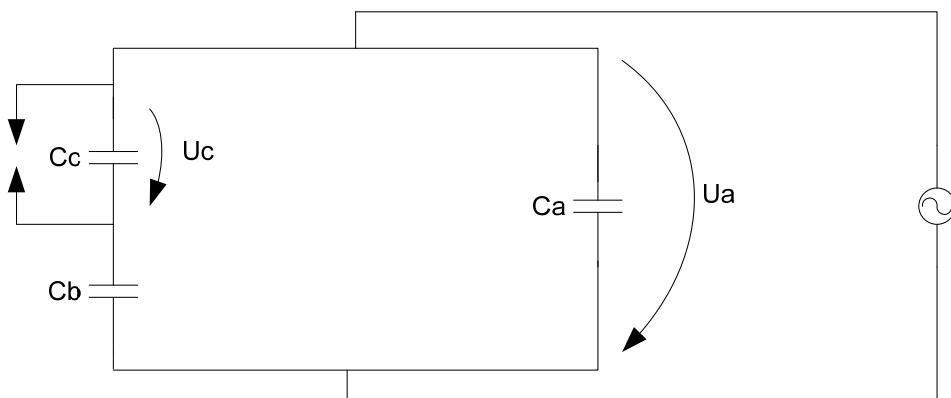
Kondensaattorielementtien hajoamisen lisäksi epäbalanssitilanne voi johtua sarjapariston lavalla tapahtuvasta läpi- tai ylilyönnistä jonkin kondensaattoriyksikön terminaalien välillä. Tällöin vikaantuvan yksikön kanssa rinnan oleva kondensaattoriyryhmä ohittuu. Näissä tilanteissa epäbalanssivirran arvot ovat merkittävästi suurempia kuin sisäisten sulakkeiden palamisesta johtuvissa vioissa. Käytännössä tällaiset viat ovat kuitenkin hyvin harvinaisia, sillä kondensaattorien terminaalit on suojattu eristeellä mikä estää esimerkiksi lintujen aiheuttamat oikosulut.

### 3.2.2 Epäbalanssin vaikutukset ja vikatyypit

Kondensaattorin yli vaikuttava jännite riippuu sen kapasitanssista. Kondensaattoriyksikön elementtien hajoaminen johtaa elementtiryhmän kapasitanssin pienenemiseen. Pienempi kapasitanssi tarkoittaa suurempaa reaktanssia, ja tämän johdosta jänniterasitus rinnakkaisilla elementeillä kasvaa. Kondensaattorielementtiryhmään kohdistuvan jänniterasituksen suuruus riippuu ennen kaikkea yksikön sisäisten rinnankytkentöjen määrästä. Mitä enemmän kondensaattoriyksikkö sisältää rinnankytkentöjä, sitä pienempi vaikutus yksittäisen elementin hajoamisella on.

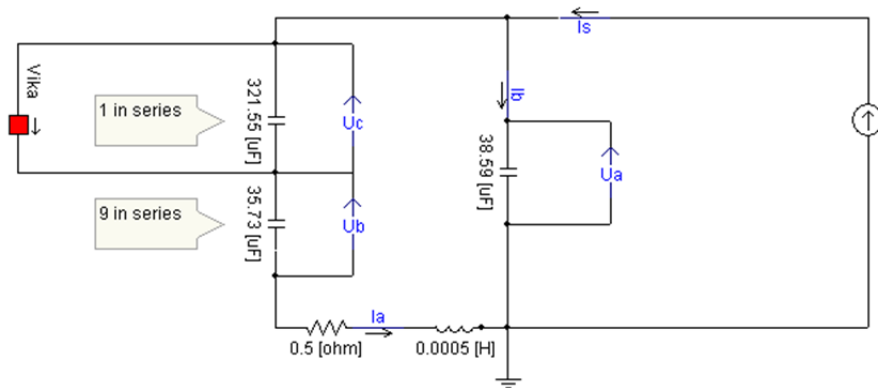
Sarjapariston kokonaiskapasitanssi koostuu niin monista kondensaattoriyksiköistä, että muutaman elementin rikkoutuminen ei näy käytännössä lainkaan pariston kapasitanssissa. Kapasitanssin muutos on niin pieni, että pariston yli olevaan jännitteeseen sen vaikutus on vain joitakin satoja voltteja. Yksittäisille elementtiryhmille tuleva jänniterasituksen kasvu on kuitenkin huomattava, ja tämän vuoksi ainoaksi mahdollisuudeksi havaita vikaantuneet elementit jää tarkka virran mittaustarve pariston H-haarasta.

Mikäli vian seurauksena ohittuu kokonainen kondensaattoriyksikkö, on viasta aiheutuva epäbalanssivirta huomattavasti suurempi ja sarjaparisto ohitetaan ohituskattaisijan avulla. Yksikön yli tapahtuvaa eristysvikaa voidaan kuvata usein osittaispurkausten yhteydessä käytetyllä kolmikapasitanssimallilla (Kuva 3.4). Osittaispurkausmittauksessa sarjassa olevilla kondensaattoreilla mallinnetaan eristeessä olevan ontelon kapasitanssia sekä ontelon kanssa sarjassa olevan terveän eristeen kapasitanssia. Näiden kanssa rinnan olevalla kondensaattorilla mallinnetaan ontelon kanssa rinnan olevan terveän eristeen kapasitanssia. Sarjaparistosovelluksessa kapasitanssit ovat reilusti suurempia kuin osittaispurkauksessa, mutta periaate on vastaavanlainen. Mallissa kapasitanssi  $C_c$  kuvaa vian seurauksena ohittuvan kondensaattoriyksikköryhmän kapasitanssia,  $C_b$  puolestaan samassa räkissä olevien sarjaankytkettyjen kondensaattoriyksikköryhmien kapasitanssia ja  $C_a$  vikaantuvan räkien kanssa rinnankytkettyjen rakkien kapasitanssia. [4, 5, 6]



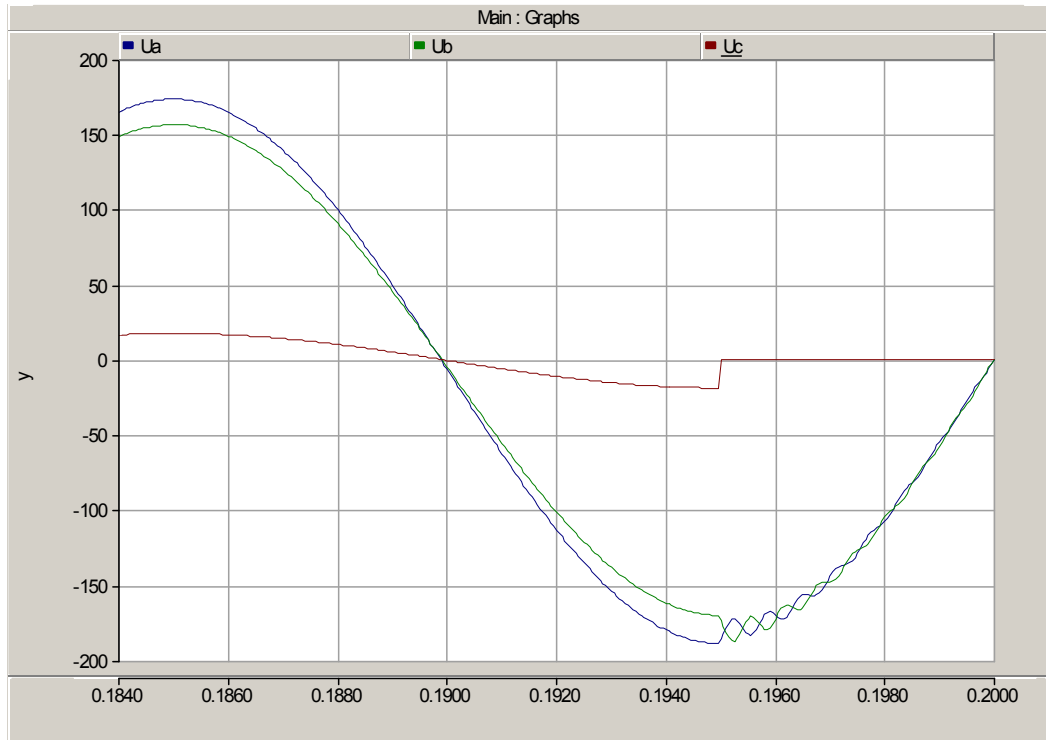
Kuva 3.4. Kolmikapasitanssimalli.

Mallia käyttämällä voidaan rakentaa simulointi, jonka avulla voidaan osoittaa että vian seurauksena aiheutuu korkeataajuinen värähtely. Tämä värähtely on juuri ongelmallinen epäbalanssisuojauksen kannalta, sillä värähtelevän virran korkea amplitudi ja suuri taajuus aiheuttaa haasteita epäbalanssivirran mittauksessa käytetyn muuntajan suojauksessa. Kuvassa 3.5 on esitetty edellä esitetyn kuvan kanssa analoginen PSCAD malli, jonka tarkoituksena on tutkia virran värähtelyn käyttäytymistä sarjaparistossa tapahtuvassa läpilyöntitilanteessa. Mallissa punaisella oleva komponentti ”Vika” esittää sarjapariston yhden kondensaattoriyksikön läpilyöntiä. Virta  $I_a$  on vikaantuvan haaran virta, mikä näkyy H-siltakytkenässä epäbalanssimuuntajan ensiossa. Virta  $I_s$  on syötöstä, eli sarjapariston tapauksessa verkosta tuleva vikavirta ja virta  $I_b$  puolestaan terveen kondensaattorihaaran kautta vikahaaraan tuleva virta.  $U_a$ ,  $U_b$  ja  $U_c$  esittävät vastaavien kondensaattoreiden yli vaikuttavia jännitteitä. Alahaarassa oleva resistanssi ja induktanssi kuvaa virtakiskojen ja johdotuksen impedanssia. [6]



**Kuva 3.5.** Kolmikapasitanssimallin PSCAD simulointi.

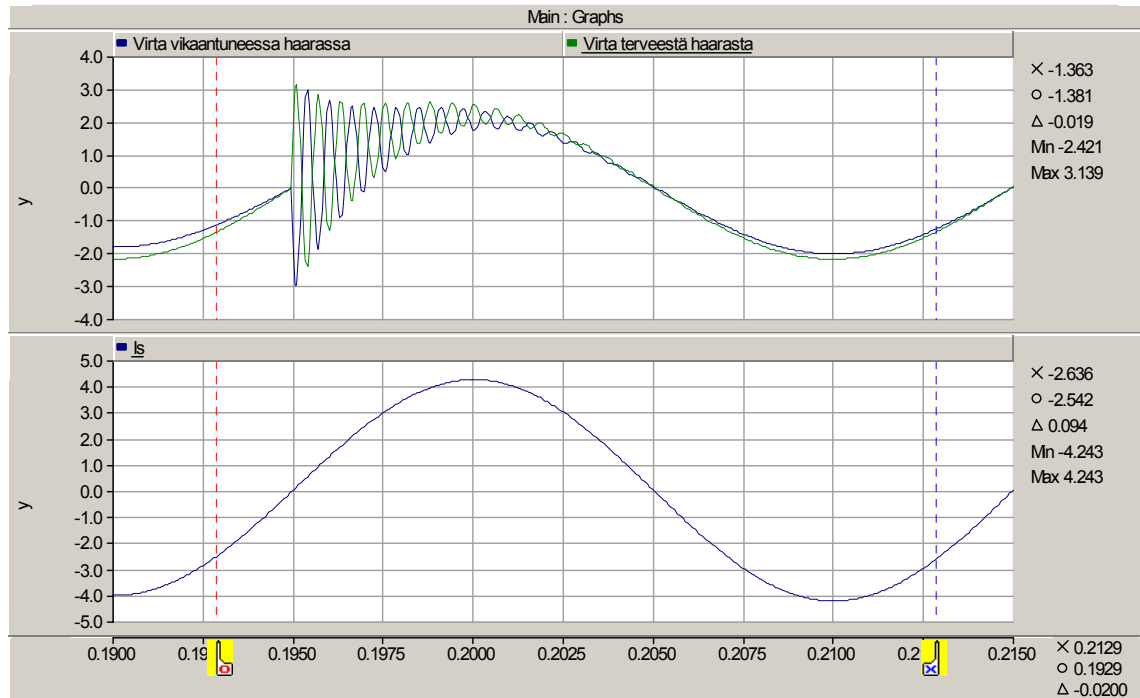
Kun piiriä tarkastellaan pisteestä missä läpilyönti tapahtuu, on kondensaattori  $C_c$  rinnankytkettynä kondensaattoreiden  $C_b$  ja  $C_a$  muodostaman sarjaankytkennän kanssa. Tällöin läpilyöntin seurauksena tapahtuva äkillinen jännitteen muutos jakautuu kondensaattoreiden  $C_b$  ja  $C_a$  kesken kapasitanssien suhteessa. Kuvassa 3.6 on simuloituna kondensaattoreiden jännitteiden käyttäytyminen vikahetkellä. Kondensaattorin  $U_b$  jännite nousee, koska sen kapasitanssi on pienempi. Jännitteen nousun aiheuttama varaus tulee kondensaattoreista  $U_c$ . Ilmiön nopeuden vuoksi ulkoinen piiri ei ehdi vaikuttaa värähtelyn alkuhetkellä mutta korvaa puuttuvan varauksen kuitenkin nopeasti. Mitä suurempi määrä kondensaattoreita sarjaparistolla tapahtuvassa viassa ohittuu, sitä suurempi on jännitteen nousu vikahaaran terveiden kondensaattoreiden ylitse.



**Kuva 3.6.** Kolmikapasitanssin kondensaattoreiden yli olevat jännitteet.

Alla esitettyssä kuvassa 3.7 on esitettyinä virtojen käyttäytyminen vian aikana. Käyriä tarkastelemalla huomataan, että vikahetkellä syntyy värähtelevä virta. Värähtelyn taajuus riippuu sarjapariston kapasitanssin sekä virtakiskojen ja virtamuuntajan induktanssin välisestä suhteesta sarjaresonanssin kaavan 3.2 mukaisesti. Värähtelyn amplitudiin vaikuttaa kondensaattoreiden jännite vian alkuhetkellä. On huomattavaa, että värähtely ei näy lainkaan syöttävän verkon virrassa  $I_s$ .

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.2)$$

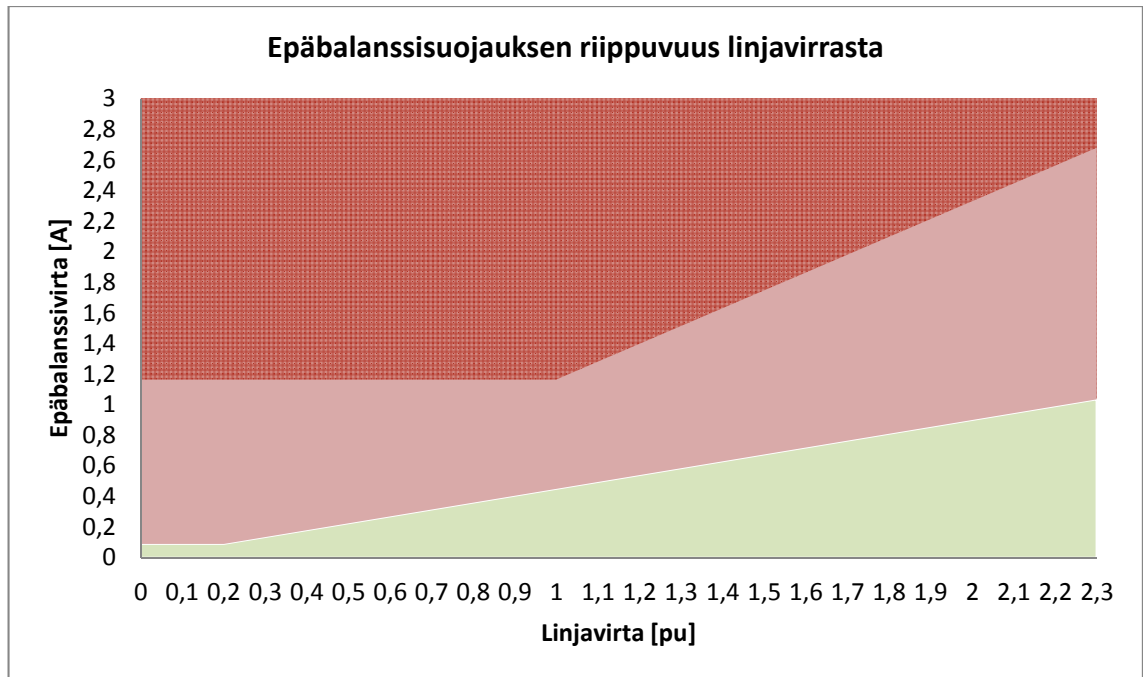


Kuva 3.7. Kolmikapasitanssimallin virrat vikatilanteessa.

### 3.2.3 Epäbalanssisuojaus

Epäbalanssisuojaus mittaa virtaa kondensaattorien siltakytkennän keskihaarasta. Sen tarkoituksena on havaita vikaantuneet kondensaattoriyksiköt ja antaa hälytys ennen kuin viallisen kondensaattorin elementtien kokema jänniterasitus kasvaa liian suureksi.

Epäbalanssivirran suuruus on suoraan verrannollinen linjavirran suuruuteen. Tämän vuoksi epäbalanssisuojaus on linjavirtakompensoitu, eli sallitun epäbalanssin suuruus riippuu linjavirran suuruudesta. Linjavirtakompensointi ei ole käytössä pariston ohitukseen johtavassa suojauksessa kuin vasta 1.0 pu virrasta ylöspäin häiriöistä johtuvien ohitusten välttämiseksi. Elementtivikojen seurauksena syntyvä epätasainen jännitteenjako ei rasita kondensaattoreita pienillä linjavirran arvoilla. Kuitenkin näissäkin tilanteissa on tärkeää että rikkinäisistä elementeistä generoidaan hälytys. Toisaalta taas suurilla linjavirran arvoilla pienikin kapasitanssiero kondensaattorihaaroissa aiheuttaa suurehkon epäbalanssivirran. Epäbalanssihälytys generoidaan, kun kondensaattoriyksikön elementtiryhmän jännite on noin 1,1 -kertainen nimellisarvoonsa nähden. Tällä varmistetaan että pariston tulisi kyetä toimimaan ongelmitta ja viallinen yksikkö vaihdettaisiin vasta seuraavassa suunnitellussa huollossa. Epäbalanssisuojaus generoi pariston ohituksen, mikäli laskennallinen elementtiryhmän ylijännite on noin 1,4 -kertainen nimellisarvoon nähden. Kuvassa 3.8 on eritettynä sallitun epäbalanssivirran riippuvuus linjavirran suuruudesta Wardha-Aurangabad projektissa. Vaalean punaisella alueella suojausjärjestelmä generoi hälytyksen ja kirkkaan punaisella pariston ohituksen. Vihreällä on esitetty sallitun epäbalanssivirran suuruus. [5]



**Kuva 3.8.** Epäbalanssisuojauksen toiminta-alueet: ohitus, hälytys ja normaali.

## 4 INDUKTIOON PERUSTUVAT VIRTAMUUNTAJAT

Virtamuuntajien tehtävänä on muuntaa ensiöpiirissä havaitut suuret pienjännitteisille toisilaitteille sopivaan arvoon ja samalla erottaa mittauspiiri galvaanisesti ensiöpiiristä. Valtaosa nykyisin sähköverkoissa käytössä olevista muuntajista perustuu sähkömagneettiseen induktioon.

Virtamuuntajat voidaan jakaa käyttötarkoituksesta riippuen kahteen ryhmään: mittausvirtamuuntajat ja suojausvirtamuuntajat. Mittausvirtamuuntajat kykenevät toimimaan tarkasti lähellä nimellisvirta-alueitaan, mutta suuremmilla virroilla ne kyllästyvät nopeasti. Suojausvirtamuuntajia taas tarvitaan kohteissa, joissa on tärkeää että moninkertaisesti virtamuuntajan nimellisvirtaa suuremmat virta-arvot saadaan mitattua luotettavasti riittävällä tarkkuudella ja näin varmistetaan suojalaitteiden oikea toiminta. [7]

### 4.1 Toimintaperiaate

Virtamuuntajien tarkoituksena on toistaa mitattua virtaa mahdollisimman virheettömästi. Käytännössä muuntajien tarkkuus kärsii muuntajan magnetointivirran ja käämityksen hajaimpedanssien seurauksena. Toisin kuin tehomuuntajissa, joissa toisioson taakka määrää ensiön virran, virtamuuntajissa ensiön virran määrää etupäässä ensiön impedanssi. Virtamuuntajan ensiöimpedanssi pyritään tekemään mahdollisimman pieneksi, jotta mittamuuntaja vaikuttaa pääpiiriin mahdollisimman vähän. Vaikka mittamuuntajat ovat toimintaperiaatteeltaan samanlaisia kuin tavalliset tehomuuntajat, niiden toiminnassa on huomioitava monia suureita jotka tehomuuntajilla eivät ole merkittäviä.

Virtamuuntajan ensiökäämin läpi kulkee pääpiirin mitattava virta. Johtimessa kulkeva virta muodostaa ympärilleen magneettikentän. Tavallisesti ensiöjohdin on käämitty muuntajan rautasydämen ympärille. Rengasvirtamuuntajan tapauksessa ensiökäämin muodostaa itse päävirtapiirin virtakisko. Magneettikentän vaikutuksesta muuntajan rautasydämeen indusoituu magneettivuon. Magneettivuon suuruus riippuu ensiövirran aiheuttaman magneettikentän voimakkuudesta ja rautamateriaalin magneettisesta johtavuudesta eli permeanssista. Raudan permeanssi riippuu käytetystä sydänmateriaalista ja siihen vaikuttavan magneettikentän suuruudesta.

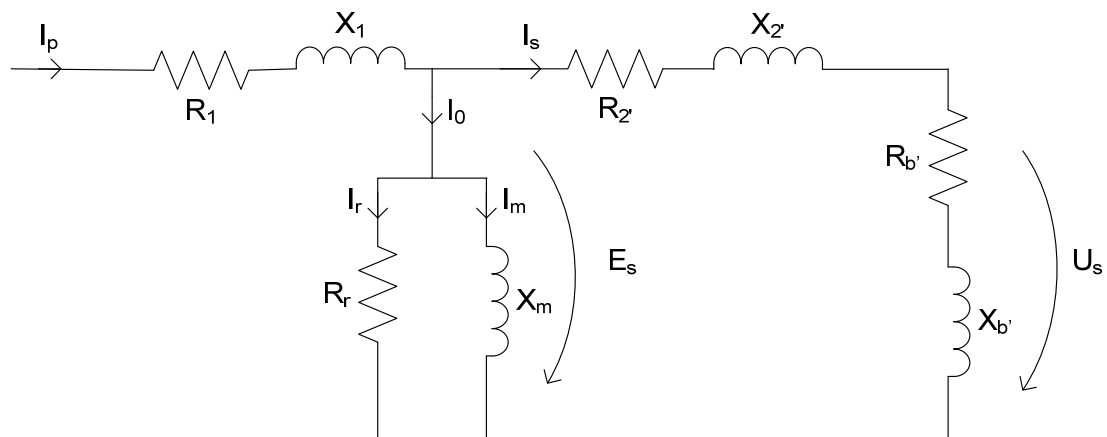
Muuntajan toisiokäämitys on käämitty saman rautasydämen ympärille. Ensiövirta muodostaa rautasydämeen magneettivuon, jolloin siis sama magneettivuon vaikuttaa myös toisiokäämitykseen ja indusoi toisiokäämitykseen jännitteen. Ideaalisessa tapauksessa vuo on täysin sama, jolloin muuntajan muuntosuhde on suoraan ensiökäämin ja



toisiokäämin kierroslukujen suhde  $K_n$ . Käytännössä muuntajassa esiintyy aina jossain määrin hajavuota sekä muuntajasydämen magnetoinnista aiheutuvia häviöitä, minkä vuoksi toisiovirta ei vastaa täysin ensiövirtaa muuntosuhteen mukaisesti. [7, 8]

#### 4.1.1 Sijaiskytkentä

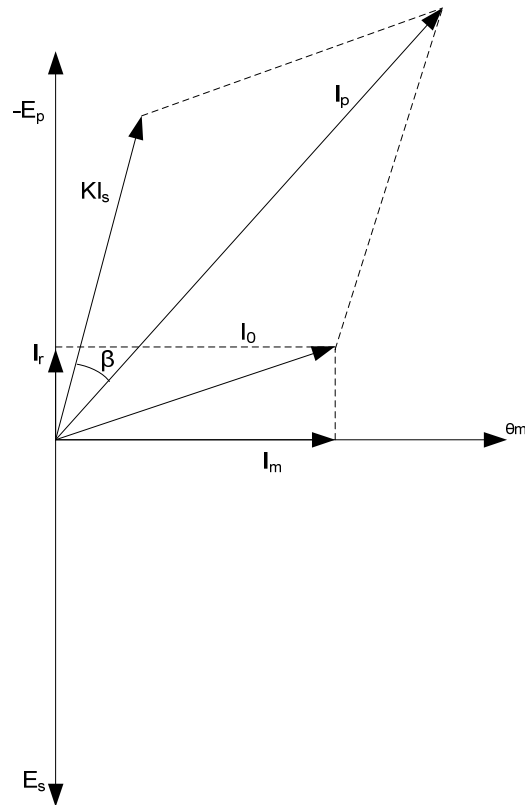
Kuvassa 4.1 on esitetty virtamuuntajan sijaiskytkentä. Virtamuuntajan ensiövirta  $I_p$  jakautuu magnetointivirtaan  $I_0$  ja toisiovirtaan  $I_s$ . Muuntaja tarvitsee sydämen magnetointiin niin sanotun magnetointivirran, joka aiheuttaa muuntajan mittauksessa virhettä. Magnetointivirta voidaan jakaa kahteen komponenttiin; raudan magnetointiin vaadittavaan magnetointivirtaan  $I_m$  sekä rautahäviöistä aiheutuvaan virtaan  $I_r$ . Virtamuuntajan toisioon indusoituvaa jännitettä merkitään sijaiskytkennässä  $E_s$ :llä ja toisiotaakalle näkyvää toisiojännitettä  $U_s$ :lla. [8]



Kuva 4.1. Virtamuuntajan sijaiskytkentä. [7]

#### 4.1.2 Osoitinpiirros

Sijaiskytkennän perusteella voidaan muodostaa virtamuuntajan osoitinpiirros kuvan 4.2 mukaisesti. Kuvassa referenssiosoittimeksi on valittu muuntajan rautasydämen vuo  $\theta_m$ . Ensiö ja toisiokäämin synnyttämä magnetomotorinen voima  $E$  on  $90^\circ$  magneettivuota jäljessä. Magnetomotorisen voiman suuruus riippuu käämien kierrosluvuista. Ensiövirran ja toisiovirran välisen kulmavirheen aiheuttaa muuntajan magnetointivirran osuus  $I_m$ . Amplitudivirheen aiheuttaa muuntajan magnetoinnissa syntyvät rautahäviöt joita kuvataan osoitinpiirroksessa virralla  $I_r$ . Magnetointivirran  $I_0$  ja toisiovirran  $I_s$  osoitinsummana syntyy ensiövirta  $I_p$ . Osoitinpiirroksessa toisiovirta  $I_s$  on kerrottu muuntajan muuntosuhteella  $K$ . [8]



Kuva 4.2. Virtamuuntajan osoitinpiirros.

## 4.2 Kyllästyminen virtamuuntajissa

Magneettivuo on jännitteen aikaintegraali. Tästä johtuen virtamuuntajan kyllästymiseen vaikuttaa ratkaisevasti käämissä kulkevan virran taajuus. Korkeilla taajuuksilla muuntaja ei kyllästy suurillakaan virroilla. Magneettikentän voimakkuuden kasvaminen kasvattaa magneettivuon tiheyttä kaavan 4.1 mukaisesti. Vuontiheys riippuu ratkaisevasti myös väliaineesta permeabiliteetista  $\mu$ . Permeabiliteetti on suure, joka kuvaa aineen käyttäytymistä magneettikentässä. Ferromagneettisille materiaaleille on ominaista, että permeabiliteetti on jopa yli tuhatkertainen verrattuna tyhjiön permeabiliteettiin. Ferromagneettisten materiaalien ominaisuutena on myös kyllästyminen, mikä tarkoittaa että kentänvoimakkuuden kasvaessa kyllästymispisteeseen magneettivuon tiheys ei enää kasva samassa suhteessa. Kyllästymiskentänvoimakkuus riippuu pääasiassa sydämessä käytetyistä materiaaleista ja poikkipinta-alasta. Esimerkiksi tehomuuntajissa ja uudenaikaisissa mittamuuntajissa käytetty rauta kyllästyy noin 1,2 T – 1,6 T kentänvoimakkuudella kun taas ennen virtamuuntajissa usein käytetyt rauta-pii seokset kyllästyvät jo noin 0,2 T – 0,5 T kentänvoimakkuudella.

$$B = \mu H \quad (4.1)$$

Tästä raudan ominaisuudesta johtuen induktioon perustuvan virtamuuntajan magneitoitumiskäyrä ei ole lineaarinen. Magneettipiirin epälineaarisuuden johdosta tietyllä ensiövirran arvolla toisiovirta ei enää noudata ensiövirtaa muuntosuhteen mukaisesti.

Mittamuuntajilla kyllästymisominaisuutta hyödynnetään suojaamaan muuntajan toisioon kytketyt mittalaitteet korkeilta ylivirroilta. Suojaustarkoituksiin käytettävillä muuntajilla kyllästyminen ei ole toivottavaa, sillä muuntajan kyky toistaa vikavirtoja on suojausten toiminnan kannalta ensiarvoisen tärkeää. Sydämen ominaisuuksiin vaikuttaa seuraavat parametrit:

- Sydämen poikkipinta-ala
- Sydämen materiaali ja seosaineet
- Magneettipiirin pituus
- Sydämen valmistusmenetelmät
- Mahdolliset ilmavälit

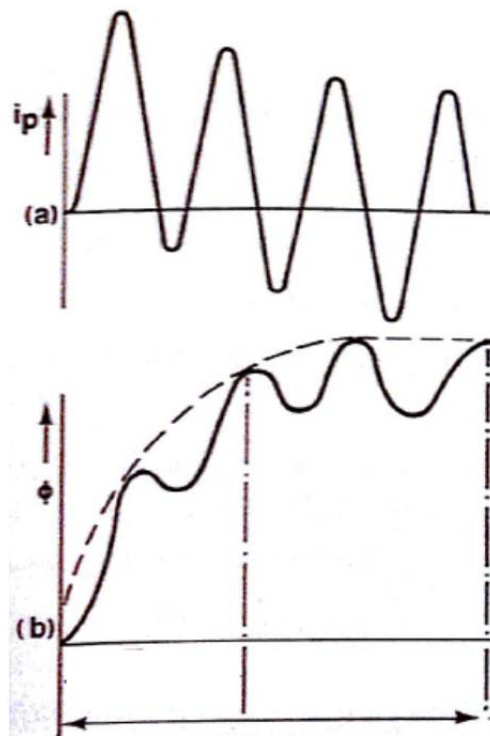
Sydänmateriaalin valinnalla voidaan vaikuttaa paljon muuntajan kyllästymiskentänvoimakkuuteen ja -vuontiheyteen. Poikkipinta-alaa lisäämällä muuntajan rautasydämen kokonaisvuo saadaan kasvatettua ilman että vuontiheys kasvaa. Valmistusmenetelmistä erityyppisten seosaineiden, sydämen laminoinnin ja muodon avulla voidaan puolestaan vaikuttaa muuntajan hajavuon suuruuteen. Ennen muuntajissa käytettiin piin ja raudan yhdisteitä joilla oli suhteellisen matala permeabiliteetti ja matala kyllästymisvuontiheys. Nykyään seosaineena käytetään usein nikkeliä joka tarjoaa korkean kyllästymisvuontiheyden ja samalla korkean permeabiliteetin. Muuntajasydämen valinta on usein kompromissi teknisten vaatimusten ja materiaalin hinnan välillä. [3, 8]

#### **4.2.1 Tasakomponentin aiheuttama kyllästyminen**

Puoliaaltosymmetrisellä virralla jännitteen aikaintegraali on jakson ajalta nolla. Tällöin kyllästymistä ei tapahdu, jos magneettivuontiheys ei ylitä muuntajan kyllästymisrajaa. Jännitteen tasakomponentti aiheuttaa jatkuvaa vuon kasvua. Sähköverkon vikatilanteille on tyypillistä, että oikosulkuvirran ensimmäiset jaksot ovat voimakkaasti epäsymmetrisiä ja sisältävät suuren tasakomponentin. Suojausten toiminnan kannalta on tärkeää, että virtamuuntaja pystyy toistamaan oikein nämä epäsymmetrisen vikavirran ensimmäiset jaksot. Kuvassa 4.3 on esitetty virtamuuntajan vuon käyttäytyminen kun ensiövirrassa esiintyy tasakomponentti. Ylemmässä kuvaajassa on virta, joka on vikavirran alkuhetkellä hyvin epäsymmetrinen. Muutaman jakson kuluessa vikavirran tasakomponentti pienenee huomattavasti, mutta kuten alemmasta kuvaajasta huomataan, on muuntajan vuo tasakomponentin vuoksi kasvanut niin paljon, että muuntaja on kyllästynyt eikä näin ollen mittaa symmetristäkään virtaa oikein.

Tasakomponentti aiheuttaa erityisen paljon ongelmia tilanteessa, jossa oikosulkuvirran katkaisun jälkeen muuntajan tulisi olla jälleen valmiina mittaamaan mahdollis-

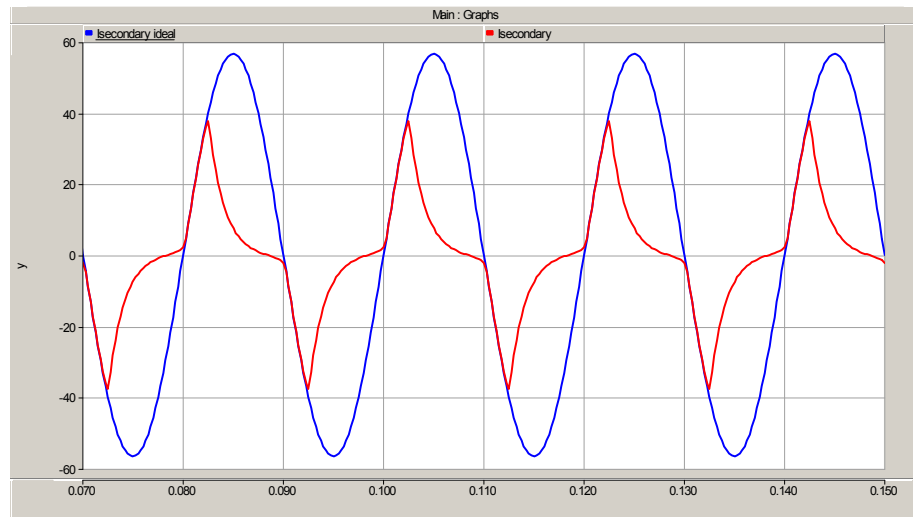
ta vikavirtaa verkon jälleenkytkennän jälkeen. Tällöin katkaisun jälkeen muuntajan sydämeen jäänyt remanenssivuo aiheuttaa virhettä mittaukseen. [3, 8, 9]



**Kuva 4.3.** Virran tasakomponentin aiheuttama kyllästymisen [8]

#### 4.2.2 Vaihtovirrasta aiheutuva kyllästymisen

Kyllästymistä tapahtuu myös puolialtosymmetrisellä vaihtovirralla. Tällöin on kyse siitä, että jännitteen puolijakson aikana kertyvä vuo ylittää muuntajan kyllästymiskentänvoimakkuuden. Seurauksena tästä on se, että toisiovirran huippuarvot eivät toistu oikein ja toisiovirran amplitudi jää todellista pienemmäksi. Tästä huolimatta virtamuuntaja ei jää kyllästyneeseen tilaan. Vaihtovirralla tapahtuva kyllästymisen ei ole suojausten toiminnan kannalta yhtä haitallista kuin tasakomponentin aiheuttama muuntajan kyllästymisen. Nykyaikaiset numeeriset suojauslehdet osaavat myös havaita saturoituneen toisiovirran jolloin niiden toiminta ei häiriinny kyllästymisestä yhtä paljon kuin vanhanaikaisten sähkömekaanisten suojauslehdien. [10]



**Kuva 4.4.** Vaihtovirtakyllästyminen virtamuuntajassa.

Kuvassa 4.4 on esitetty toisiovirran käyttäytyminen tilanteessa, jossa ensiövirran aiheuttama vuo ylittää muuntajan kyllästymiskentänvoimakkuuden. Punainen käyrä on virtamuuntajan todellinen toisiovirta ja sininen ideaalinen toisiovirran muoto mikäli kyllästyminen ei tapahtuisi. Toisiovirran käyrämuoto on voimakkaasti riippuvainen virtamuuntajan sydämen magneettisten ominaisuuksien lisäksi toisioita taakasta. Mitä suurempi toisioita taakka on, sitä herkemmin toisiovirta vääristyy sydämen kyllästyksen seurauksena. Suurella taakalla virtamuuntajan vuo romahtaminen nopeutuu, jolloin toisioon indusoitunut jännite laskee ja toisiovirta laskee kohti nollaa. [10]

### 4.3 Ominaisuudet

#### Terminen mitoitusvirta $I_{th}$

Terminellä mitoitusvirralla tarkoitetaan sitä virta-arvoa, minkä muuntaja on mitoitettu kestävänsä 1 sekunnin ajan toisiokäämit oikosuljettuina ilman, että muuntajassa ilmenee pysyviä vaurioita. [9]

#### Dynaaminen mitoitusvirta $I_{dyn}$

Virran aiheuttama magneettikenttä aiheuttaa muuntajakäämitykseen mekaanisia voima-vaikutuksia. Dynaamisella mitoitusvirralla tarkoitetaan virran arvoa jonka muuntaja on suunniteltu mekaanisesti kestävänsä ilman vaurioita. Myös tässä tapauksessa muuntajan toisiokäämit oletetaan oikosuljettuiksi. Standardi IEC 60044-1 määrittelee virtamuuntajille dynaamiseksi virtakestoisuudeksi minimissään 2,5 – kertaisen virran termiseen mitoitusvirtaan nähden. [9]

#### Virtamuuntajan sydämet

Virtamuuntajan tarkkuuteen eniten vaikuttava tekijä on muuntajassa käytetty sydän. Virtamuuntajien sydämet voidaan jakaa mittausydämiin ja suojaussydämiin. Mittausydämiä käytetään kohteissa, joissa mittauksen tarkkuus on tärkeää. Suojaussydämet

tulevat tarpeeseen silloin, kun on tärkeää että virtamuuntaja pysty toistamaan nimellisvirtaansa suuremmat virrat kyllästymättä.

Monesti sähköverkon virtamittaukseen käytetyssä muuntajassa on vähintään yksi mittaus- sekä suojaussydän. Sydänten määrää rajoittaa ainoastaan muuntajan fyysinen koko, jolloin niitä ei saada mahtumaan kustannustehokkaalla tavalla muuntajan sisään. Sydämillä on tavallisesti yhteinen ensiökäämi, mutta saman sydämen ympärille ei käänmitä useita toisiokäämityksiä. Jännitemuuntajassa useampi toisiokäämi voi olla saman sydämen ympärillä, mutta virtamuuntajassa toisiokäämityksen sydämeen indusoituva vuo vaikuttaisi muihin toisiokäämityksiin ja mittaustarkkuus kärsisi. Tästä johtuen useampia toisioita sisältävässä muuntajassa on aina vastaava lukumäärä sydämiä. [3, 9]

### **Virtamuuntajan taakka $S_b$**

Virtamuuntajan taakalla tarkoitetaan toisiopiirin impedanssia. Impedanssi muodostuu toision kaapeloinnista sekä suojareleen tai mahdollisen apuvirtamuuntajan impedanssista. Taakka ilmaistaan standardin IEC 60044-1 mukaan tavallisesti näennäistehona jonka toisiokäämitys, mittausjohdot ja kojeet kuluttavat muuntajan nimellisellä toisiovirralla yhtälön 4.2 mukaisesti. Muuntajan virtavirhe riippuu muuntajan taakasta. Kun toision taakka on mitoitustaakka tai pienempi, muuntaja pysyy sille luvatussa tarkkuusluokassa. Pelkästään muuntajan toisiokäämin hajaimpedanssin aiheuttamaa taakka kutsutaan sisätaakaksi. [9]

$$S_b = Z_R I_{SR}^2 \quad (4.2)$$

### **Virtavirhe**

Ideaalisen virtamuuntajan ensiö- ja toisiovirrat vastaavat toisiaan täysin muuntosuhteen mukaisesti. Todellisuudessa muuntosuhde ei vastaa täysin nimellistä muuntosuhdetta muuntajan magnetointivirrasta aiheutuvien häviöiden vuoksi. Virtavirhe määritellään prosentteina kaavan 4.3 mukaisesti. [9]

$$\text{Virtavirhe} = \frac{(K_n I_s - I_p) \times 100}{I_p} \% \quad (4.3)$$

### **Vaihe- eli kulmavirhe $\beta$**

Virtamuuntajan ensiö- ja toisiovirtojen välistä kulmaeroa eli ajallista poikkeamaa toisistaan sanotaan vaihevirheeksi. Vaihevirhe aiheutuu muuntajan magnetointivirrasta. Vaihevirhe ilmoitetaan joko senttiradiaaneina tai minuutteina. Vaihevirhe on määritelty vain silloin, kun ensiö- ja toisiovirrat ovt sinimuotoisia. [9]

### Yhdistetty virhe $\varepsilon_c$

Suojaustarkoituksiin käytettävillä muuntajilla mitattavat virrat voivat olla hyvin suuria virtamuuntajan nimellisvirtaan nähden ja poikkeavat usein sinimuotoisista suureista. Virta- ja vaihevirheen lisäksi virhettä toisiovirtaan aiheuttaa virtamuuntajan magnetoitumiskäyrän epälineaarisuuden aiheuttama muuntajan kyllästyminen. Näiden virheiden yhdistelmää kutsutaan yhdistetyksi virheeksi ja se määritellään kaavan 4.4 mukaisesti.

$$\varepsilon_c = \frac{1}{I_p} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n i_s - i_p)^2 dt} * 100\% \quad (4.4)$$

Virtamuuntajan virheen suuruuteen vaikuttaa muuntajan ensiövirran suuruus ja toisiokuorma. Ensiövirta aiheuttaa muuntajaan magneettivuon ja toisiovirta vastaavasti ensiövuon kasvua rajoittavan toisiovuon. Toisiokuormasta johtuen toisiovirta ei pääse kasvamaan rajatta. Kun muuntaja saavuttaa kyllästymispisteensä, ensiövirran kasvu ei enää kasvata toisiovirtaa muuntosuhteen mukaisesti. Tällöin virtamuuntajan yhdistetty virhe kasvaa voimakkaasti. [9]

### Tarkkuusluokat

Virtamuuntajille on standardisoitu useita eri tarkkuusluokkia. Virtamuuntajan sijoituspaikka ja tehtävä määrittelevät sille asetettavat tarkkuusvaatimukset. Taulukossa 4.1 on esitetty mittausvirtamuuntajille standardisoidut virta- ja kulmavirheiden arvot. Luokille 0,1 – 1 taulukon arvot pätevät kun virtamuuntajan toisiotaakka on 25 % – 100 % mitoitusastasta ja luokille 3 ja 5 puolestaan 50 % – 100 % mitoitusastasta.

**Taulukko 4.1.** Standardin IEC 60044-1 määrittelemät virheet mittausydämille

Mittausydämelle sallitut virheet									
Tarkkuusluokka	Virtavirhe $\pm\%$					Kulmavirhe $\pm\text{min}$			
	Ensiövirta % nimellisestä ensiövirrasta					Ensiövirta % nimellisestä ensiövirrasta			
	5	20	50	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2		0,1	0,1	15	8	5	5
0,2	0,75	0,35		0,2	0,2	30	15	10	10
0,5	1,5	0,75		0,5	0,5	90	45	30	30
1	3	1,5		1	1	180	90	60	60
3			3		3				
5			5		5				

Taulukon 4.2 suojaussydämille sallittavat virhearvot on määritelty, kun ensiövirta on nimellinen ja toisiossa on mitoitustaakka. Merkintä 5P20 tarkoittaa, että muuntaja pysyy toistamaan 20 kertaa nimellisen ensiövirran suuruisen virran yhdistetyn virheen pysyessä maksimissaan 5 prosentissa. [9]

**Taulukko 4.2.** Standardin IEC 60044-1 määrittelemät virheet suojaussydämille

Suojaussydämelle sallitut virheet		
Tarkkuusluokka	Virtavirhe ±%	Kulmavirhe ±min
5P	1	60
10P	3	N/A

### Mittarivarmuusvirran mitoitusarvo $I_{p1}$

Mittarivarmuusvirran mitoitusarvolla tarkoitetaan pienintä ensiövirran arvoa jolla muuntajan yhdistetty virhe on vähintään 10 % suuruinen. Kun yhdistetty virhe kasvaa riittävän suureksi, muuntaja suojaa toisioon kytketyt laitteet ylijännitteiltä kyllästymällä. Mitä pienempi mittarivarmuusvirran mitoitusarvo on, sitä paremmin se suojaa toisiokojeet. Toisaalta taas virtamuuntaja kyllästyy nopeasti jolloin suuria ylivirtoja ei voida mitata. [3, 9]

### Mittarivarmuuskerroin $F_s$ ja tarkkuusraja-kerroin $F_a$

Mittarivarmuuskertoimella  $F_s$  tarkoitetaan mittarivarmuusvirran mitoitusarvon ja muuntajan nimellisen ensiövirran suhdetta. Mittaustarkoituksiin tarkoitetuilla muuntajilla toisiolaitteet ovat sitä paremmin suojassa ylijännitteiltä, mitä pienempi on mittarivarmuuskerroin.

Suojaustarkoituksiin tarkoitettulle muuntajalle määritellään vastaavasti tarkkuusraja-kerroin  $F_a$ . Tarkkuusraja-kerroin ilmaisee kuinka monikertaisella ensiövirran arvolla muuntaja pysyy sille määritellyssä tarkkuusluokassa. Standardisoidut arvot tarkkuusraja-kerroin vaihtelevat 5 ja 30 välillä.

Kertoimessa on huomioitavaa, että se pätee vain kun muuntajan toisiossa on nimellistaakka. Jos taakka on pienempi, mittarivarmuuskerroin on korkeampi ja päinvastoin. Todellinen mittarivarmuuskerroin  $F_{aa}$  voidaan laskea kaavasta 4.5. Kaavasta huomataan, että mitä pienempi mitoitustaakka on nimellistaakkaan verrattuna, sitä paremmin muuntaja pystyy toistamaan nimellisvirtaansa suuremmat virrat. Toisaalta myös liian pieni taakka vaikuttaa virtamuuntajan tarkkuuteen heikentävästi. [3, 9]

$$F_{aa} = F_{an} \frac{|S_{in} + S_n|}{|S_{in} + S_a|} \quad (4.5)$$

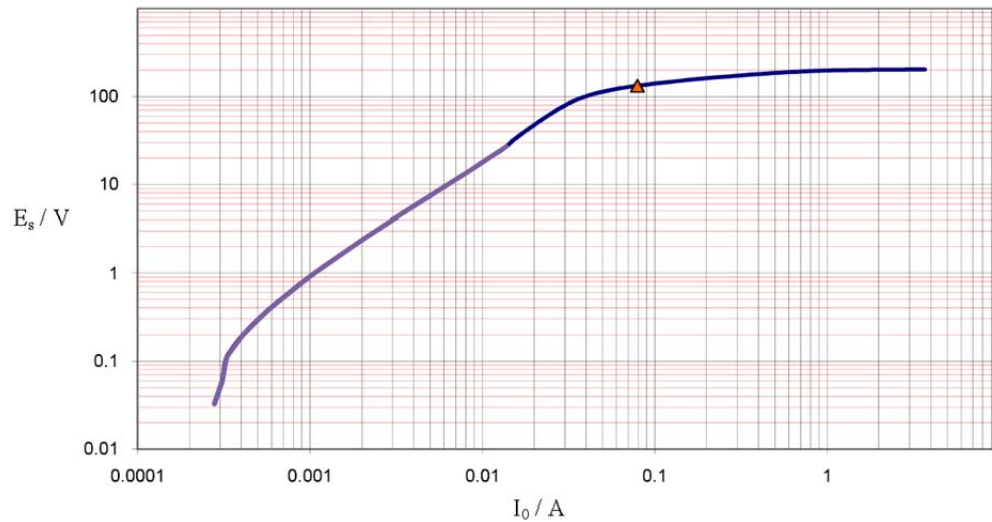


### Knee-point jännite $U_{knee}$

Muuntajasydämen ominaisuuksia tarkasteltaessa sille mitataan niin sanottu magnetoitumiskäyrä. Muuntajan toisiokäämiin kytketään jännite, jota nostetaan asteittain 10 % askelmissa. Muuntajan ensiökäämiin tulee olla avoin. Samalla mitataan muuntajan magnetoitumisvirtaa. Knee-point -jännitteeksi kutsutaan magnetoitumis-käyrällä pistettä, jossa jännitteen 10 % nosto aiheuttaa magnetoitumisvirtaan 50 % lisäyksen. Käytännössä tässä pisteessä muuntaja alkaa kyllästyä ja toisiojännite ei juurikaan enää nouse korkeammaksi. Knee-point pisteen jälkeen virtamuuntajan tarkkuus kärsii merkittävästi, sillä kasvava ensiövirta ei nosta enää toisiovirtaa muuntosuhteen mukaisesti.

Mittauskäyttöön tarkoitetuilla muuntajilla tämä knee-point -jännite voi olla hyvinkin matala, sillä mittaussydän kyllästyy helposti suojataksen toisiokojeita. Suojaus-tarkoituksiin valittavilla muuntajilla puolestaan knee-point jännitteen tulee olla riittävän korkealla, jotta muuntaja toistaa suuretkin vikavirrat ilman sydämen kyllästymistä. Muuntajan tulisi normaaleissa käyttötilanteissa toimia aina magnetoitumiskäyrän lineaarisella osalla. Alla olevassa kuvassa 4.5 esitetystä muuntajan magnetoitumiskäyrästä huomataan, että kolmiolla merkityn knee-point -pisteen jälkeen muuntajan magnetoitumisvirta kasvaa voimakkaasti ilman että toisioon indusoituva sähkömotorinen voima juurikaan nousee. [7, 9]

Suojaussydämen magnetoitumiskäyrä



**Kuva 4.5.** Suojaussydämen magnetoitumiskäyrä

#### 4.4 Virtamuuntajan valinta

Virtamuuntajan valintaan vaikuttaa eniten sen sijoituspaikka sähköverkossa ja siltä vaadittavat ominaisuudet. Tyypillisesti virtamuuntajat pyritään mitoittamaan siten, että se kykenee toistamaan oikein myös suurimmat vikavirrat joita sen sijoituspaikassa voi esiintyä. Monesti tässä joudutaan pohtimaan myös sähköverkon tulevaisuutta, sillä verkkoa vahvistettaessa vikavirtojen suuruus voi nousta merkittävästi.

Virtamuuntajan toisiovirran standardisoidut nimellisarvot ovat 1A ja 5A. Suoja-releiden kehittyessä virtamuuntajien toisiotaakat ovat yleisesti pienentyneet. Kuitenkin tilanteissa, joissa käytetään suhteellisen lyhyitä toisiokaapeleita kuten sarjaparistosovel-luksissa, on hyvä valita 5A toisiovirta. Tämä johtuu siitä, että 5 A toisiolla varustettu muuntaja tarjoaa paremman suojan toision ylijännitteitä vastaan verkon vikatilanteissa. Koska virtamuuntajan toisiojännite on kääntäen verrannollinen toision mitoitusvirtaan, voisi 1 A nimellisellä virralla ja lyhyillä toisiokaapeleilla tulla ongelmia ylijännitteiden kanssa verkon vikatilanteissa.

Muuntajan tyyppi, sijoituspaikka ja asennustapa vaikuttavat siltä vaadittavaan eristystasoon. Sarjaparistossa muuntajat pyritään asentamaan mahdollisuuksien mukaan lavan potentiaaliin, jolloin normaalissa käyttötilanteessa toision ja ensiön välillä ei ole potentiaaliero. Poikkeuksena tässä on kondensaattoripariston epäbalanssivirtaa mittaava virtamuuntaja.

Muuntajaa valittaessa on kiinnitettävä erityistä huomiota sen kykyyn toistaa vikavirran tasakomponentti. Tasakomponentin toistokykyyn vaikuttaa erityisesti muuntajan rautasydämen rakenne. Useimmiten suojauskäytössä olevissa virtamuuntajissa käytetään muuntajaa jossa on suljettu rautasydän. Tällainen muuntaja kykenee toistamaan vikavirran alun oikein, mutta rautasydämen kyllästymisen jälkeen mittaustarkkuus heikkenee. Lisäämällä muuntajan rautasydämeen ilmavälejä voidaan kyllästymistä estää, mutta tämä huonontaa tarkkuutta merkittävästi ja tasakomponentti mitataan väärin heti vian alkuhetkestä lähtien. Tällaista muuntajaa kutsutaan linearisoiduksi muuntajaksi. Etuna linearisoidulla muuntajalla on sen pieni remanenssivuon. Oikosulkuvirtoja katkaistaessa muuntajasydämeen jäävän remanenssivuon arvo voi olla jopa 80 % muuntajan kyllästymisvuontiheydestä. Käytännössä siis jälleenkytkettäessä esiintyvää virtaa ei voida mitata oikein, sillä muuntaja on jo virran kytkemishetkellä lähellä kyllästymispistettä. [3]

## 5 VIRTAMUUNTAJA EPÄBALANSSISUOJAUKSESSA

### 5.1 Eristystaso

Sähkömagneettiseen induktioon perustuvissa mittamuuntajissa on tärkeää, että toision mittaussiipi on luotettavasti erotettu päävirtapiiristä. Ensiön ja toision välinen eristys aikaansaadaan muuntajan jännitetasosta riippuen öljy-paperi eristyksellä tai valuhartsieristyksellä. Alle 100 kV jännitetasolla selvitetään yleensä valuhartsieristyksellä mutta tätä korkeammilla jännitetasoilla öljypaperieristys on yleisin. Öljyeristeiset muuntajat ovat rakenteeltaan monimutkaisempia ja painavampia. Virtamuuntajien on kyettävä kestämään muuntajan sisäisen eristyksen pettämisestä syntynyt sisäinen vika ja sitä seuraava paineen kasvu ilman, että muuntaja hajotessaan aiheuttaa vahinkoa ympäristönsään. Virtamuuntajan rakenne on esitetty liitteessä 1.

Toisin kuin muut sarjaparistossa käytetyt muuntajat, epäbalanssimuuntajan ensiön ja toision välillä on selvä potentiaaliero. Epäbalanssimuuntajan eristystason valintaan vaikuttaa sarjapariston nimellisvirta, pariston reaktanssi, käytetyt kondensaattoriyksiköt, epäbalanssimuuntajan sijoituspaikka lavalla sekä pariston suojaustaso  $U_{lim}$ . Suojaustaso valitaan tyypillisesti 2,1 – 2,5 -kertaiseksi pariston nimellisjännitteeseen nähden. Koska epäbalanssimuuntaja sijaitsee sarjapariston H-haarassa, on sen nimellisjännite noin puolet pariston yli vaikuttavasta jännitteestä. Eristystason valintaprosessi on esitettyä alla. [4]

Sarjapariston nimellisjännite saadaan kaavasta 5.1.  $I_n$  on pariston nimellisvirta ja  $X_c$  on pariston reaktanssi.

$$U_n = X_c I_n \quad (5.1)$$

Yhden kondensaattoriyksikön yli vaikuttava jännite määräytyy kaavan 5.2 mukaisesti. Kaavassa  $N_s$  on sarjaan kytkettyjen kondensaattoreiden lukumäärä paristossa.

$$U_{cap} = \frac{U_n}{N_s} \quad (5.2)$$

Epäbalanssimuuntajan jännite  $U_{unb}$  pariston nimellisvirralla saadaan puolestaan kertomalla H-haaran keskipisteen ja lavan potentiaalinvälissä olevien kondensaattorien sarjakytkentöjen määrä n yhden kondensaattoriyksikön jännitteellä (Kaava 5.3).

$$U_{umb} = nU_{cap} \quad (5.3)$$

Standardi IEC-60143-1 määrittelee ilmastollisen korjauskertoimen  $K_a$  ja virtamuuntajalta vaadittu yhden minuutin vaihtojännitekestoisuuden  $U_t$  kaavojen 5.4 ja 5.5 mukaisesti. Kaavassa 5.4 kirjain H tarkoittaa laitteen sijoituspaikan korkeutta merenpinnasta.

$$K_a = e^{(H-1000)/8150} \quad (5.4)$$

$$U_t = 1.2 \cdot U_{umb} \cdot U_{lim} \cdot K_a \quad (5.5)$$

Näin saadun laskennallisen minuutin vaihtojännitetestin arvoa käyttämällä valitaan laitteen eritystasoksi seuraava suurempi standardin IEC 60071-1:n määrittelemä arvo ja tätä vastaava laitteen peruseristystason määrittelevä salamasyökyjännitteen arvo. [4]

Epäbalanssimuuntajalta vaadittu eristystaso vaihtelee riippuen pariston kondensaattorihaaran rakenteesta, nimellisreaktanssista ja nimellisvirrasta. Tämä asettaa haasteita muuntajan valintaan, sillä kustannussyistä ylimitoitettun eristyksen valinta ei ole kannattavaa. Tämä johtaa siihen, että muuntajaa ei voida täysin standardisoida vaan joka projektiin on valittava epäbalanssimuuntaja tapauskohtaisesti.

## 5.2 Ryömintämatka

Ryömintämatkalla tarkoitetaan eristerakenteen lyhintä mahdollista pintamatkaa eri potentiaalissa olevien osien välillä. Vaadittava ryömintämatkan pituus riippuu eristimen yli vaikuttavasta jännitteestä. On huomattavaa, että ryömintämatka on tavallisesti eristimissä paljon pidempi kuin jännitteisten osien välinen etäisyys. Suurjännitteisten osien välillä kulkee pieni vuotovirta, joka lämmittää eristeen pintaa. Virran suuruus riippuu pintamatkan pituudesta. Likaisissa ja kosteissa olosuhteissa eristeen pinnasta tulee josain määrin johtava, jolloin vuotovirran suuruus lisääntyy. Virran aiheuttaman lämpenemän vuoksi pinnalle muodostuu kuivia vyöhykkeitä. Näiden kuivien vyöhykkeiden yli vaikuttava kentänvoimakkuus on merkittävästi suurempi kuin kosteuden tai lian seurauksena syntyneessä osittain johtavassa kanavassa vallitseva kentänvoimakkuus. Kentänvoimakkuuden kasvu näillä vyöhykkeillä näkyy kipinöintinä eristimen pinnassa ja voi pahimmillaan johtaa koko eristerakenteen ylilyöntiin.

Ryömintämatkan eli pintamatkan kasvattamisella pyritään minimoimaan eristeen pinnalla kulkevan vuotovirran vaikutukset. Pitkä ryömintämatka ilman merkittävää fyysisten mittojen kasvua saadaan aikaan eristimen laippojen muotoilulla. Erityisen pitkiä ryömintämatkoja tarvitaan kohteissa, joissa eristimet on alttiina vallitseville ympäristöolosuhteille ja teollisuuden kemikaaleille. Etäisyys merestä vaikuttaa ratkaisevasti eristimien pinnalle kertyviin suolakerroksiin, ja on siten erittäin merkittävä tekijä eristeen pintamatkaluokitusta tehtäessä. Standardi IEC 60815-1 antaa vähimmäispintamatkat

neljälle eri likaisuusluokalle. Ryömintämatkaa määriteltäessä eristerakenteen yli oletetaan olevan nimellisjännite. Minimi ryömintämatka lasketaan IEC 60123 standardin mukaan kaavalla 5.6. Kaavassa  $L_{spec}$  on asennuspaikalle määritelty ryömintämatkavaatimus, mikä ilmoitetaan arvona mm/kV. Mikäli sarjaparistolle määritelty 30 minuutin ylikuormitettavuus ylittää standardiarvon 1,35 pu, vaadittua ryömintämatkan pituutta on lisättävä ylikuormitusvirtojen suhteessa. [4, 6]

$$L_{min} = \sqrt{3}U_n L_{spec} \quad (5.6)$$

### 5.3 Nimellisvirrat ja muuntajan sydämet

Nimellisvirraltaan epäbalanssimuuntaja on valittava pieneksi, jotta pienet epäbalanssivirrat saadaan mitattua riittävän tarkasti. Perinteisesti epäbalanssimuuntajassa on käytetty muuntosuhdetta 10/5A tai 15/5A riippuen sarjapariston kondensaattorien lukumäärästä ja niiden kytkennästä.

#### 5.3.1 Muuntajan tarkkuusvaatimukset

Muuntajan on toimittava tarkasti hyvin pienillä virta-arvoilla, sillä virheelliset mittaus tulokset aiheuttavat pariston tarpeettoman ohituksen. Käytännössä tämä on hankalaa, sillä mitattavat virta-arvot ovat hyvin pieniä. Muuntajan mittaussydämen tarkkuusluokana on käytetty luokan 0,2 sydäntä joka on rakenteeltaan yhtenäinen rautasydän ilman ilmvälejä. Hajavuon vaikutus on minimoitu muotoilemalla sydän toroidin muotoiseksi ja käämimällä toisiokäämitys tasaisesti koko sydämen alalle. Näiden tekijöiden ansiosta se pystyy mittaamaan jopa alle 5 % nimellisensivirrastaan olevia virta-arvoja tarkasti. Taulukossa 5.1 on esitetty esimerkki epäbalanssivirtojen laskennallisista suuruuksista Intiaan 2013 toteutettavassa Wardha-Aurangabad sarjaparistoprojektissa. Taulukossa lasketut epäbalanssivirran arvot toteutuvat, kun pariston virta on 1,0 pu suuruinen. Koska epäbalanssivirran suuruus muuttuu suoraan suhteessa pariston linjavirtaan, pienemmällä linjavirran arvolla tapahtuvia elementin rikkoutumisia on vaikeampi havaita. Toisaalta on huomioitavaa, että kondensaattorielementin hajoaminen pienellä jännitteellä on hyvin epätodennäköistä. Lisäksi kondensaattorien valmistustoleransseista johtuen sillan haarojen välillä on aina hieman kapasitanssieroa, jolloin keskihaarassa olevan virtamuuntajan läpi kulkee pieni luonnollinen epäbalanssivirta. Luonnollista epäbalanssia pyritään minimoimaan sijoittelemalla kondensaattorit rutiinitesteissä tehtyjen kapasitanssimittausten perusteella haaroihin mahdollisimman tasaisesti.

**Taulukko 5.1.** Epäbalanssivirtojen suuruudet

Epäbalanssivirta-arvot Wardha projektissa				
Hajonneiden elementtien määrä yhdessä yksikössä	Kondensaattoriyksikön ylijännite-kerroin	Kondensaattori-elementin ylijännite-kerroin	Epäbalanssivirta	
kpl			[A]	
0	1,000	1,000	0,000	
1	1,004	1,040	0,140	
2	1,008	1,090	0,290	
<b>3</b>	<b>1,012</b>	<b>1,140</b>	<b>0,450</b>	Epäbalanssihälytys
4	1,017	1,190	0,630	
5	1,022	1,250	0,830	
6	1,028	1,320	1,040	
<b>7</b>	<b>1,034</b>	<b>1,400</b>	<b>1,290</b>	Pariston ohitus
8	1,041	1,480	1,560	
9	1,050	1,570	1,870	

Virtamuuntajan tarkkuus on oltava riittävä, jotta voidaan havaita montako elementtiä on vaurioitunut. Muuntajassa käytetty luokan 0,2 mittaussydän soveltuu hyvin tilanteisiin, joissa mitataan kondensaattorielementtien rikkoutumisesta johtuvia epäbalanssivirtoja. Taulukossa 5.2 on vertailtu 0,2, 0,5 ja 1 luokan mittaussydämien tarkkuutta standardin IEC 60044-1 määrittelemillä rajoilla. Vertailussa on oletettu muuntajan muuntosuhteeksi 10/5A. Paristoissa esiintyvät epäbalanssivirratt voivat olla jopa pienempiä kuin 5 % virtamuuntajan nimellisvirrasta. Epäbalanssivirtamuuntajan tyypillinen 10A – 15 A nimellinen ensiövirta on mitattaviin virtoihin nähden iso, mistä johtuen virtamuuntaja ei ole tarkimmillaan niillä virta-arvoilla, joita sen tulisi epäbalanssikäytössä mitata. Valitsemalla virtamuuntajan ensiövirta pienemmäksi, voitaisiin päästä pienillä virroilla tarkempaan mittaukseen. Ongelmaksi voi muodostua tällöin virtamuuntajan mittaussydämen käyttäytyminen suurivirtaisissa epäbalanssivirtoissa.

Taulukkoa 5.2 ja tarkastelemalla huomataan, että luokan 0,5 ja jopa luokan 1,0 muuntaja olisi riittävä havaitsemaan elementin rikkoutumisesta johtuvan epäbalanssivirran muutoksen. Esimerkiksi taulukossa 5.1 esitetystä esimerkistä Intian Wardha sarjaparistosta epäbalanssivirran muutos elementin rikkoutuessa on linjan nimellisvirralla pienimmillään noin 0,14 A. Epäbalanssihälytys generoidaan kun virta on 0,45 A. Tällä hälytystasolla mitattavat virrat eri tarkkuusluokkien muuntajille vaihtelevat taulukon 5.2 mukaisesti. Kaikkien tarkasteltujen virtamuuntajaluokkien tarkkuus on epäbalanssisuojauksen kannalta riittävä.

**Taulukko 5.2.** Eri virtamuuntajaluokkien tarkkuustarkastelu

Virtamuuntajan nimellinen ensiövirta	10	A	
Epäbalanssivirta hälytysrajalla	0,45	A	
<b>Virtamuuntajan tarkkuusluokka</b>			
	<b>Luokka 0,2</b>	<b>Luokka 0,5</b>	<b>Luokka 1</b>
Virtavirhe kun ensiön virta $0,05 \cdot I_n$ [%]	0,75	1,50	3,00
Virtavirhe kun ensiön virta $0,05 \cdot I_n$ [A]	0,004	0,008	0,015
Virtavirhe hälytysrajalla 1,0 pu virralla [%]	0,83	1,67	3,33
Virtavirhe hälytysrajalla 0,2 pu virralla [%]	4,17	8,33	16,67
Mitattu virta maksimi 1 pu linjavirralla [A]	0,45	0,44	0,44
Mitattu virta minimi 1 pu linjavirralla [A]	0,45	0,46	0,47

Mittaustarkkuuteen vaikuttaa käytetyn muuntajan lisäksi signaalinsiirron tarkkuus. Mikäli signaalinsiirron tarkkuus ei vastaa muuntajan tarkkuutta, ei tarkkaa virtamuuntajaa pystytä hyödyntämään täysipainoisesti. Koska mitattavat virrat ovat hyvin pieniä ja mitauspaikka sijaitsee siirtolinjan jännitteen potentiaaliin nostetulla sarjapariston lavalla alttiina ulkoisille häiriöille, on todellista mitattua virtaa vaikea erottaa mittauksen pohjakohinasta. Koko signaalinsiirtoketjussa virhettä tuottaa seuraavat osatekijät:

- Virtamuuntajan virhe
- Apuvirtamuuntajan virhe
- Mittauksen kohina
- Suodatus
- A/D -muunnoksen virhe

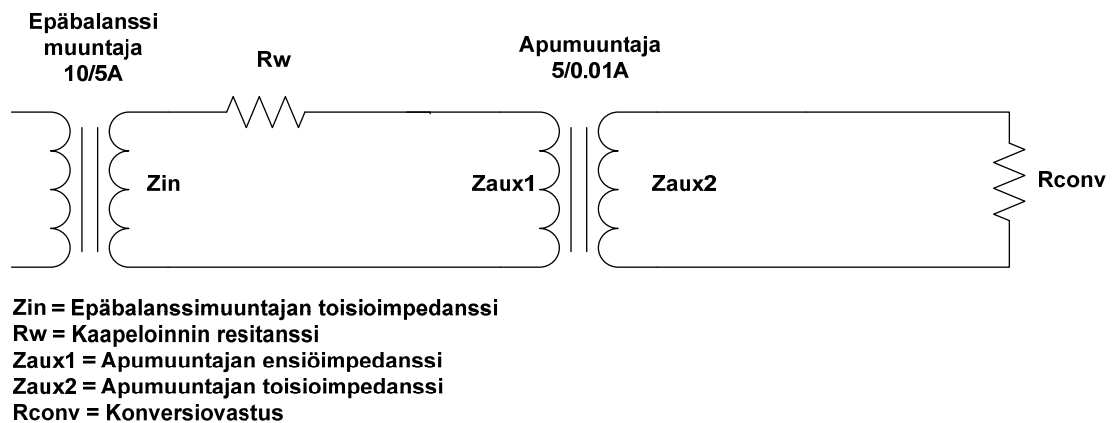
### 5.3.2 Virtamuuntajan sydämet

Epäbalanssimuuntajalta vaaditaan tarkkaa toimintaa pienillä virta-arvoilla, joten tarkka mittaussydän on ehdoton vaatimus. Toisaalta tällainen sydän kyllästyy nopeasti virtamuuntajan nimellisvirtoja suuremmilla virroilla. Perinteisesti on käytetty erikoisvalmis-teista sydäntä, joka toteuttaa myös suojaustarkoituksiin käytettävän muuntajan vaatimukset. Tällainen erikoissydän on kuitenkin tavallista mittaussydäntä selvästi kalliimpi valmistaa. Lisäksi suojaussydämeltä vaaditaan reilusti mittaussydäntä suurempaa raudan poikkipinta-alaa, jolloin se näkyy muuntajan painossa. Osa tämän diplomityön tavoitteista oli selvittää, voidaanko virtamuuntajan sydän korvata pelkästään mittaussydämellä ja silti varmistua suojausten toimimisesta oikein myös suurivirtaisissa vioissa joissa muuntajasydän mahdollisesti kyllästyy.

Tämän selvittämiseksi mittaussydämellä oleva muuntaja mallinnettiin suurimpien epäbalanssivirtojen etsimisessä käytettyyn PSCAD -simulointimalliin. Saavutetuista simulointituloksista ja niiden avulla tehdyistä päätelmistä suojaussydämen tarpeellisuu-desta on kerrottu lisää luvussa 6.

## 5.4 Toisiotaakat ja apuvirtamuuntaja

Muuntajan mittaustarkkuuden takaamiseksi on tärkeää, että muuntajan toision taakka on mitoitettu sopivasti. Jotta virtamuuntaja pysyy sille määritetyssä tarkkuusluokassa, tulee sen toisiotaakan olla välillä 25 % – 100 % mitoitustaakasta. Alstom Gridin sarjaparistoversoelluksissa käytettävien virtamuuntajien nimellistaakka on 10 VA, joten toisiotaakan tulisi olla välillä 2,5 VA – 10 VA. Kuvan 5.1 mukaisesti epäbalanssimuuntajan toisiopiiri koostuu toisiokaapeloinnin lisäksi niin sanotusta apumuuntajasta, jonka ensiö on kytketty epäbalanssimuuntajan toisioon. Apuvirtamuuntajan tehtävä on skaalata virtaa pienemmäksi, ja siten suojata herkkää mittaaselektroniikkaa. Muuntajan kokonaistaakan muodostaa siis sisätaakan lisäksi mittausjohdinten aiheuttama taakka ja apumuuntajan hajaimpedanssin sekä apumuuntajan toisiotaakan aiheuttama taakka. Apumuuntajan toisiossa sijaitsee konversiovastus. Apumuuntajan toisiovirta muodostaa vastuksen yli jännitehäviön joka muutetaan edelleen V/F muuntimessa optiseksi signaaliksi.



Kuva 5.1. Epäbalanssimuuntajan toisiokytkennän periaatekuva.

### 5.4.1 Toisiokaapeloinnin taakka

Epäbalanssimuuntaja sijaitsee sarjapariston lavalla, jolloin sen toisiokaapelointi jää tavallisesti sähköasemilla käytettyihin virtamuuntajiin nähden lyhyeksi. Virtamuuntajan tuottama tieto muunnetaan optiseen muotoon jo sarjapariston lavalla sijaitsevassa lava-kaapissa. Koska eri vaiheiden väliset lavat ovat sarjaparistossa kaukana toisistaan, ei eri vaiheiden muuntajilla voida käyttää yhteistä paluujohdinta. Tästä johtuen kaikille muuntajille täytyy vetää kaksi johdinta aina lavakaapille asti, jolloin johtimien aiheuttamaa taakkaa tarkasteltaessa täytyy johtimien pituus kertoa kahdella.

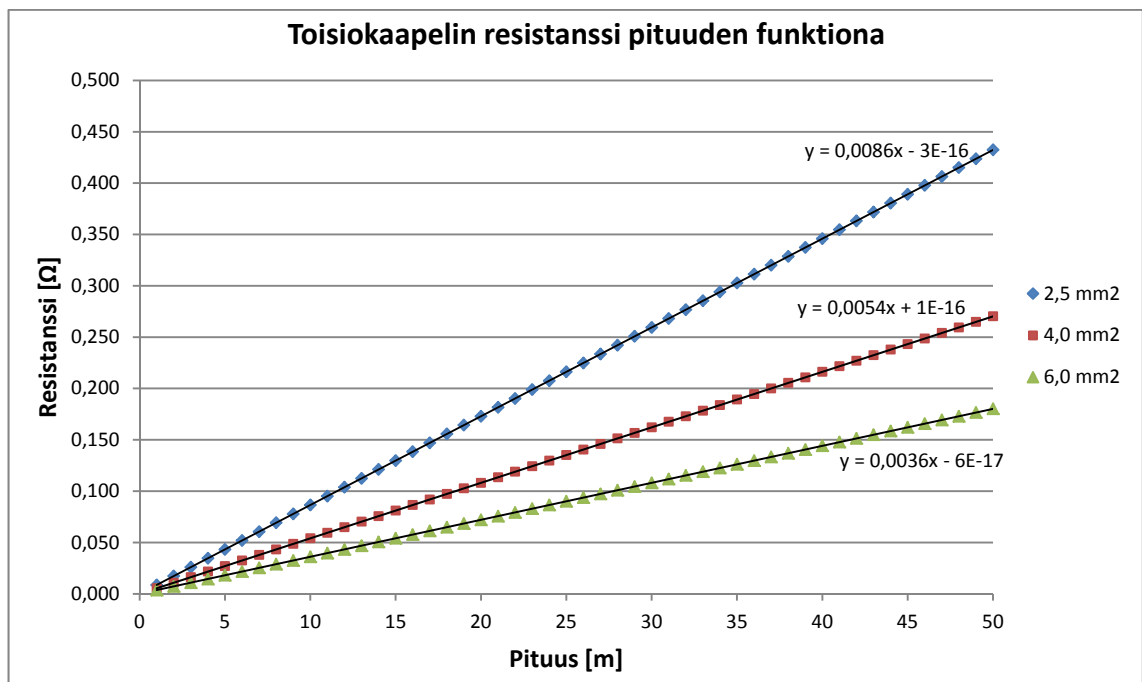


Johtimien resistanssi voidaan laskea kaavalla 5.7. Kaavaa käytettäessä pituus  $l$  tulee antaa metreinä, poikkipinta-ala  $A$  neliömillimetreinä ja resistiivisyys  $\rho$  arvona  $\mu\Omega\text{m}$ . [11]

$$R = \rho * \frac{l}{A} \quad (5.7)$$

Johtimien aiheuttama taakka on pääasiassa resistiivistä. Koska resistanssi on lämpötilariippuvainen suure, täytyy tarkastelussa ottaa huomioon suurin mahdollinen taakka. Standardin IEC 60044-1 mukaan taakkaa laskettaessa korkeimpana mahdollisena lämpötilana tulee käyttää  $+75\text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilaa. Kaapelin laskettu resistanssi saadaan lämpötilakorjattua kaavalla 5.8. [11]

$$R_2 = R_1 * [1 + \alpha(T_2 - T_1)] \quad (5.8)$$



**Kuva 5.2.** Toisiojohtimien resistanssit pituuden funktiona

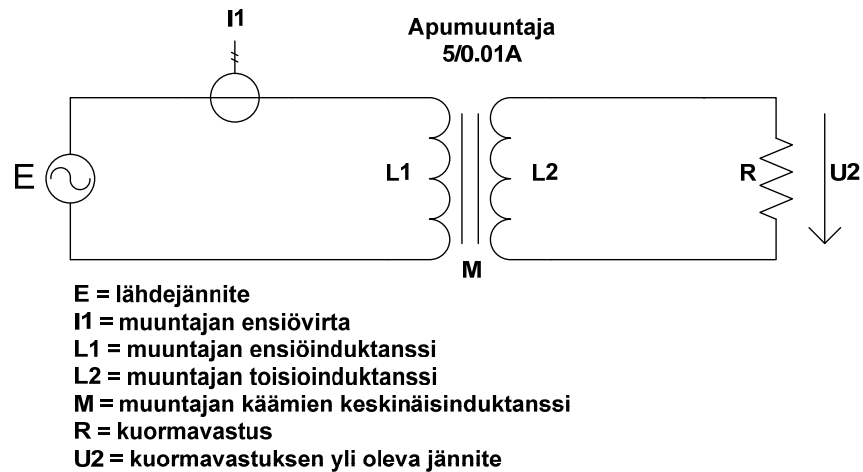
Kuva 5.2 esittää toisiokaapeloinnin aiheuttaman resistanssin pituuden funktiona kolmella eri johtimen poikkipinta-alalla. Kaapeleiden johdinmateriaalina tarkastelussa on käytetty kuparia. Tavallisesti kaapelointi toteutetaan joko  $2,5\text{ mm}^2$  tai  $4,0\text{ mm}^2$  kaapeleilla. Pienempiä poikkipinta-aloja ei virtamuuntajien toisiojohdotuksissa käytetä riittävän mekaanisen kestävyuden varmistamiseksi.

### 5.4.2 Apumuuntaja ja konversiovastus

Päämuuntajan toisiossa käytettävä apumuuntaja pienentää mitattavan toisiovirran 1/500 osaan alkuperäisestä toisiovirrasta. Näin saadaan minimoitua konversiovastuksen tehohäviöt ja samalla suojattua toisioelektronikka korkeilta ylivirroilta. Apumuuntajan kilpiarvot ovat:

- Nimellismuuntosuhde 5/0,01 A
- Mitoitustaakka 0,3 VA
- Tarkkuusluokka Class 0,5 / 10P10

Päävirtamuuntajan taakkaa laskiessa apumuuntajan vaikutus on huomioitava redusoidulla muuntajan toisiosuureet vastaamaan apumuuntajan ensiöarvoja. Apumuuntajan induktanssiarvot määritettiin mittaamalla.



**Kuva 5.3.** Apumuuntajan induktanssien määrittämisessä käytetty kytkentä. [12]

Apuvirtamuuntajan induktanssien määrittämiseksi sille suoritettiin mittaukset käyttämällä kuvassa 5.3 esitettyä kytkentää. Mittauksessa muuntajan ensiöjännitettä nostettiin vähitellen nolasta aina siihen saakka, kunnes ensiövirta oli 120 % nimellisenä virtaa suurempi. Mittaus toistettiin kahdella eri kuormavastuksen arvolla jotka olivat 100  $\Omega$  ja 18,2  $\Omega$ . Mittauksessa huomattiin, että kuormavastuksen suuruus ei vaikuttanut apumuuntajan toisiovirran suuruuteen. Testitilanteessa ensiön virtaa rajoittava resistanssi oli lyhyiden johtimien vuoksi hyvin pieni, mutta käytännössä ensiöpiirin vastus riippuu pitkälti kaapeloinnin pituudesta. Testitilanteessa eri mittapisteissä kirjattiin ylös lähdejännite, ensiövirta ja jännite kuormavastuksen yli. Mitatuista arvoista laskettiin alla esitetyt keskiarvot mittauserätarkkuuden vähentämiseksi:

- $E=0,45$  V
- $I_1=3,4$  A
- $U_2=0,7$  V
- $R=100,0$   $\Omega$
- $F=50,0$  Hz

Näiden arvojen avulla voidaan laskea muuntajan käämien keskinäisreaktanssi kaavan 5.9 avulla. Laskemalla reaktanssiarvosta induktanssi saadaan keskinäisinduktanssiksi 0,64 mH. [11]

$$\omega M = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{|I_1|}{U_2}\right)^2 - \left(\frac{U_2}{ER}\right)^2}} \quad (5.9)$$

Keskinäisinduktanssia apuna käyttäen voidaan muuntajasta määrittää myös ensiö- ja toisioreaktanssit kaavojen 5.10 ja 5.11 avulla. Taulukossa 5.3 on esitetty mittauksen avulla saadut tulokset apuvirtamuuntajan käämien induktansseista. [12]

$$\omega L_1 = \frac{E}{U_2 \sqrt{\left(\frac{|I_1|}{U_2}\right)^2 - \left(\frac{U_2}{ER}\right)^2}} \quad (5.10)$$

$$\omega L_2 = \frac{(\omega M)^2}{\omega L_1} \quad (5.11)$$

**Taulukko 5.3.** Apuvirtamuuntajasta määritetyt induktanssiarvot

<b>Mittauksen alkuarvot:</b>		
Lähdejännite:	0,45	V
Taajuus:	50,0	Hz
Virta I1:	3,4	A
Jännite U2:	0,7	V
Kuormavastuksen arvo R:	100,0	Ω
<b>Lasketut induktanssiarvot:</b>		
Ensiökäämin reaktanssi ωL1:	0,13	Ω
Ensiökäämin induktanssi L1:	0,42	mH
Toisiokäämin reaktanssi ωL2:	0,31	
Toisiokäämin induktanssi L2:	0,99	mH
Keskinäisreaktanssi ωM:	0,20	Ω
Keskinäisinduktanssi M:	0,64	mH

Muuntajan toisiossa oleva konversiovastuksen vaikutus muuntajan kokonaistaakkaan voidaan laskea redusoimalla konversiovastuksen arvo apumuuntajan ensiöön. Impedanssien redusoinnissa todellinen impedanssi kerrotaan muuntosuhteen neliöllä kaavan 5.12 mukaisesti. Koska apumuuntajan muuntosuhde on 1:500, on konversiovastuksen merkitys kokonaistaakaan kannalta vähäinen.

$$R'_{conv} = \left( \frac{N_1}{N_2} \right)^2 * R_{conv} \quad (5.12)$$

Mitatut apumuuntajan suureet tulee huomioida päävirtamuuntajan taakkatarkastelussa. Käytännössä apumuuntajan suuren muuntosuhteen takia muuntajan toisio-induktanssin ja konversiovastuksen vaikutus taakkaan on niin pieni, että ne voitaisiin jättää tarkastelusta huomioimatta.

### 5.4.3 Kokonaistaakka

Epäbalanssivirran mittauksessa käytetyn virtamuuntajan taakka muodostuu muuntajan toisioon kytketystä kokonaistaakasta. Kokonaistaakkatarkastelussa on valittu kaapeloinniksi 10 metriä pitkä, poikkipinta-alaltaan 4 mm<sup>2</sup> oleva kuparikaapeli ja konversiovastuksen suuruudeksi 100 Ω, mikä on tyypillinen arvo epäbalanssivirran mittauskanavassa. Kokonaistaakka voidaan laskea näiden osataakkojen summana taulukon 5.4 mukaisesti. Koska johdotuksen taakka on pääasiassa resistiivinen ja apumuuntajan taakka reaktiivinen, näiden yhteisvaikutus tulee laskea neliösummana.

**Taulukko 5.4.** Epäbalanssimuuntajan taakkatarkastelu

<b>Kaapelointi:</b>	
Toisiokaapeloinnin (Cu) poikkipinta-ala [mm <sup>2</sup> ]	4,000
Toisiokaapeloinnin pituus [m]	10,000
Kaapeloinnin resistanssi @ +20 C [Ω]	0,089
Kaapeloinnin resistanssi @ +75 C [Ω]	0,108
<b>Apuvirtamuuntaja: (1=on, 0=ei ole )</b>	<b>1,000</b>
Ensiön resistanssi [Ω]	0,072
Ensiön reaktanssi [Ω]	0,131
Ensiöimpedanssi [Ω]	0,150
Konversiovastus [Ω]	100,000
Konversiovastus redusoituna ensiöön [Ω]	0,000
Apumuuntajan taakka [Ω]	0,150
<b>Kokonaistaakka</b>	
Taakan kokonaisimpedanssi [Ω]	0,185
Virtamuuntajan nimellistaakka [Ω]	0,400
Taakka % nimellistaakasta	46

### 5.4.4 Apumuuntajatyypin vaihto

Alstom Grid:llä on meneillään signaalinsiirron uudistamishanke, jossa osana signaalinsiirron uudistamista olisi tarkoituksena korvata myös perinteisesti käytetty suurehko

apumuuntaja rengastyypisellä muuntajalla. Tässä vaihtoehdossa apumuuntajan aiheuttama taakka jäisi kokonaan pois tarkastelusta, sillä apumuuntajan ensiö olisi pelkästään johdin vietyä virtamuuntajatoroidin läpi. Tällä olisi päävirtamuuntajan taakkaa pienentävä vaikutus. Epäbalanssivirtamuuntajalla toision johdotus on riittävän pitkä, jotta taakka saadaan sovitettua 25 – 100 % välille nimellistaakasta myös rengastyypistä apuvirtamuuntajaa käytettäessä. Mittauksissa, joissa kaapelointivedot ovat hyvin lyhyitä, on huomioitava mahdollinen lisäresistanssin tarve taakan sovittamiseksi virtamuuntajalle sopivaksi. Taulukossa 5.5 on laskettu epäbalanssimuuntajan toisiotaakka-arvot kun johdinpituudeksi on oletettu 10 metriä. Laskelman perusteella ongelmia ei pitäisi esiintyä yli 20 metriä pitkillä kaapeleilla, kunhan johtimien poikkipinta-ala ei ylitä 4,0 mm<sup>2</sup>.

**Taulukko 5.5.** Epäbalanssimuuntajan toisiotaakat pitkällä (20 m) toisiokaapeloinnilla.

Virtamuuntajan toisiotaakka rengastyypisen apuvirtamuuntajan kanssa				
Poikkipinta-ala	Nimellisvirta In	Johdinten resistanssi [Ω]	Taakka [VA]	Taakka % nimellisestä
2,5 mm <sup>2</sup>	5	0,173	4,32	43,2
4,0 mm <sup>2</sup>	5	0,108	2,70	27,0
6,0 mm <sup>2</sup>	5	0,072	1,80	18,0

**Taulukko 5.6.** Virtamuuntajan toisiotaakat lyhyellä (3 m) toisiokaapeloinnilla.

Virtamuuntajan toisiotaakka rengastyypisen apuvirtamuuntajan kanssa				
Poikkipinta-ala	Nimellisvirta In	Johdinten resistanssi [Ω]	Taakka [VA]	Taakka % nimellisestä
2,5 mm <sup>2</sup>	5	0,052	1,30	12,97
4,0 mm <sup>2</sup>	5	0,032	0,81	8,11
6,0 mm <sup>2</sup>	5	0,022	0,54	5,40

Vertailun vuoksi samanlainen laskelma tehtiin myös sillä oletuksella, että muuntajan toisiokaapeloinnin pituus olisi vain 3 metriä. Tällainen tilanne on sarjaparistossa linjavirtamuuntajan osalta, sillä se sijaitsee tyyppillisesti suoraan lavakaapin yläpuolella. Kuten taulukosta 5.6 huomataan, tässä tapauksessa muuntajan toisiotaakan arvot laskevat hyvin pieniksi varsinkin suuremmilla johdinten poikkipinta-aloilla. Tällaisessa tapauksessa toisiopiiriin olisi asennettava lisävastusta tai vaihtoehtoisesti kaapelointia pidentävä lisätaakan aikaansaamiseksi.

## 5.5 Ensiön suojaus kipinävälillä

Epäbalanssimuuntaja on nimellisvirraltaan niin pieni, ettei muuntajaa kannata mitoittaa kestämään kondensaattoriyksikön vikatilanteissa esiintyvät ylijännitteet ja virrat. Kuitenkin muuntajan suojaus ylijännitteiltä ja suurilta kondensaattorien purkausvirroilta on välttämätöntä. Suojaus voidaan toteuttaa ensiökämin rinnalle asennettavalla pallokipinävälillä. Ensiön rinnalle asennettu kipinäväli on ollut jo pitkään käytössä muuntajan suojana. Kipinävälin elektrodien välinen asettelu on perinteisesti ollut 2 mm, mutta vas-

ta nyt on alettu huomioimaan tarkemmin kipinävälille asetetut toimintavaatimukset muuntajan suojauksen kannalta. Suojakipinävälin tulee toteuttaa seuraavat vaatimukset:

- Kipinävälin on suojattava muuntajaa kaikissa mahdollisissa vikatilanteissa
- Kipinävälin syttyä sen yli oleva jännite on oltava riittävän suuri, jotta muuntajan ensiökäämissä kulkeva virta voidaan tulkita suurivirtaiseksi viaksi

### 5.5.1 Kipinävälin syttymisjännitteen testaus

Valokaaren syttyminen elektrodivälille on ilmiö, johon liittyy paljon syttymisjännitteen hajonnan vaihtelua. Ylilyönnillä tarkoitetaan kaasumaisen eristeen eristysominaisuuksien täydellistä menettämistä. Tällöin eristeen läpi kulkee suuri virta, ja eristeen yli oleva jännite romahtaa. Purkaushetkellä elektrodien välille syntyy ionisoitunut kanava eli valokaari. Ionien määrään elektrodivälissä vaikuttaa ioneja tuottavien ja toisaalta poistavien mekanismien välinen tasapaino. Sähkökentässä elektrodien välillä olevat varauksen kuljettajat eli elektronit alkavat kulkea sähkökentän suuntaisesti. Elektronit törmäilevät toisiinsa, mutta eivät ionisoidu elleivät ne saa törmäyksessä ionisaatioenergiaa ylittävää energiamäärää. Kun jännite kasvaa riittävän suureksi, alkaa virta nousta ja kaasussa olevat vapaat elektronit saavat ulkoiselta sähkökentältä riittävän energian ionisoitumiseen. Tätä ilmiötä kutsutaan nimellä kenttäionisaatio. Törmäyksessä vapautunut elektroni voi ionisoida uudelleen ja elektronien määrä alkaa kasvaa elektronivyöryksi jolloin purkaus ruokkii itse itseään. Kun jännite elektrodien välillä nousee edelleen suuremmaksi, muuttuu kaasu erittäin johtavaksi ja tapahtuu ylilyönti.

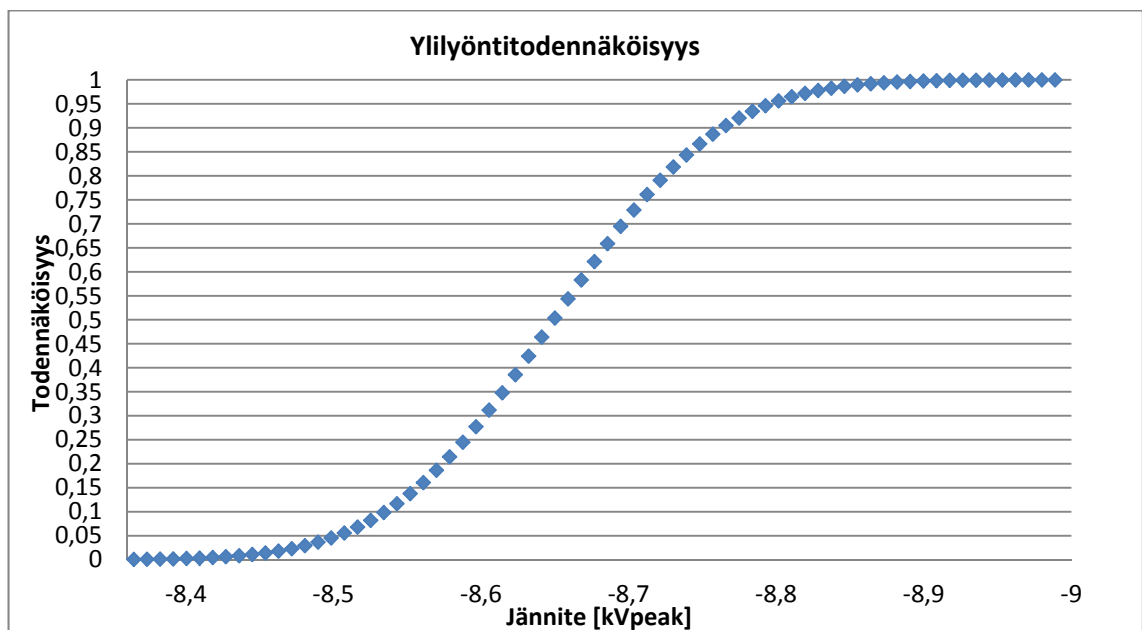
Koska ylilyöntiin johtava prosessi on fysikaalisesti monimutkainen ja sisältää paljon muuttujia, tulee ylilyöntijännitteen määrittämisessä ottaa huomioon ilmiön satunnaisuus. Ylilyöntijännitteen määrittämisessä käytettiin up&down (U&D) menetelmää, jossa jokaisella tasolla joko nostetaan tai lasketaan jännitettä riippuen siitä, kesti-kö eristys testijännitettä vai ei. Tällä menetelmällä eristysrakenteen, tässä tapauksessa ilmaeristeen jännitelujuus saadaan määritettyä kaikkein tarkimmin. Tilastollisessa tarkastelussa ylilyönnin oletetaan olevan normaalijakautunut suure, jolloin sen tilastollisessa tarkastelussa voidaan käyttää normaalijakaumaa.

Kipinävälin syttymisjännite 2 mm elektrodivälille mitattiin käyttämällä mahdollisimman lähellä standardimuotoista kytkentäsyökyjännitettä (250/2500  $\mu$ s) olevaa jännitettä. U&D menetelmässä testaus aloitetaan tasolta, jolla läpilyöntejä ei vielä tapahdu. Tästä eteenpäin jännitettä nostetaan pienissä portaissa, jonka suuruus on tyypillisesti arvioidun keskihajonnan luokkaa. Kun ensimmäinen läpilyönti tapahtuu, jännitettä lasketaan jälleen yhdellä portaalla kunnes eristerakenne kestää jälleen. Testauksen alusta alkaen tuloksiin huomioidaan pulssit sillä jännitetasolla olevasta pulssista alkaen, jolla testauksen aikana tapahtuu vähintään toinenkin pulssi. Taulukossa 5.7 on esitettyinä



$$s = 1,62\Delta U \left( \frac{s_u^2}{\Delta U^2} + 0,029 \right) \quad (5.14)$$

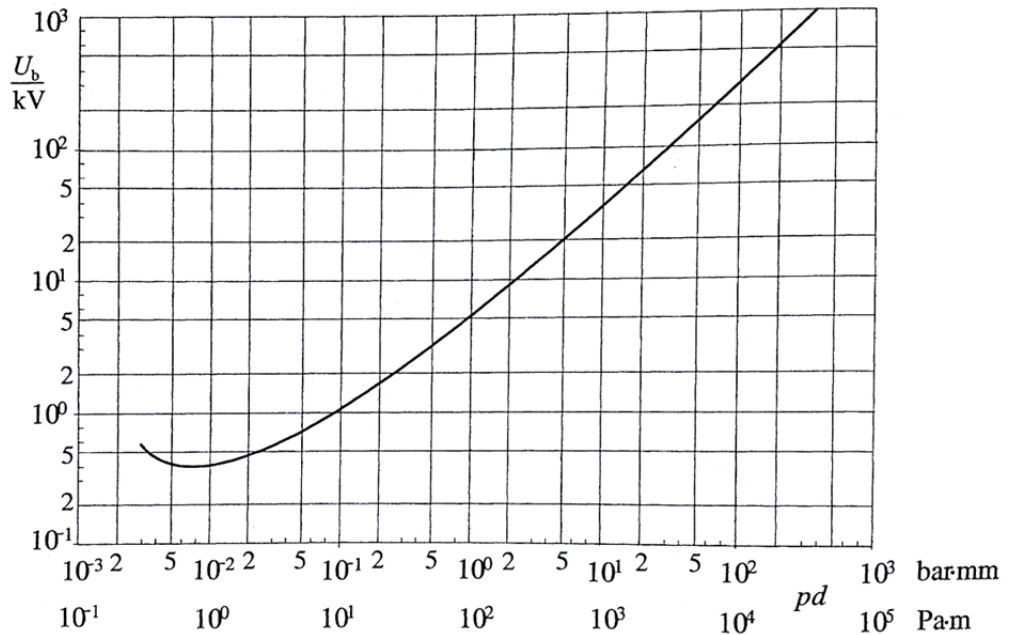
Testissä keskihajonnan estimaatiksi määritettiin 89 V. Kun oletetaan ylilyönnin olevan normaalijakautunut suure, voidaan ylilyöntitodennäköisyyttä arvioida normaalijakauman avulla. Kuva 5.4 esittää ylilyöntitodennäköisyyden kertymäfunktion 2 mm elektrodivälillä. Ylilyöntijännitteen todennäköisyys kahden keskihajonnan päässä 50 % ylilyöntijännitteestä on 97,2 %. Koska epäbalanssimuuntajan suojauksen kannalta kipinävälin toimiminen on erittäin tärkeää, valittiin tarkastelua varten suurimmaksi todennäköiseksi syttymisjännitteeksi kolme keskihajontaa 50 % läpilyöntijännitettä suurempi arvo. Tällöin todennäköisyys, että elektrodivälissä tapahtuu ylilyönti on 99,9 %.



**Kuva 5.4.** Elektrodivälän ylilyöntitodennäköisyys jännitteen funktiona.

Syttymisjännitteen testaus suoritettiin 2 mm elektrodivälille. Homogeenisessä sähkökentässä ja lyhyillä ilmväleillä läpilyöntijännitteen käyttäytyminen on Paschenin lain mukaisesti riippuvainen vain kaasun paineesta ja elektrodien välisestä etäisyydestä. Paschenin laki on suora seuraus Townsendin läpilyöntiehdosta, joten se on voimassa vain tilanteissa joissa läpilyönti tapahtuu Townsendin mekanismin mukaisesti. Kuvassa 5.5 on esitetty ilmalle mitattu Paschen-käyrä 20°C lämpötilassa. Pidemmillä elektrodiväleillä Townsendin läpilyöntimekanismi ei ole enää päde. Ylilyöntijännite käyttäytyy hyvin lineaarisesti kun tulo  $pd$  on pienempi kuin  $5 \text{ kPa}\cdot\text{m} - 10 \text{ kPa}\cdot\text{m}$ . Normaalipaineisessa ilmassa ylilyöntijännite kasvaa siis hyvin lineaarisesti aina 5-10 cm elektrodivälille saakka. Koska epäbalanssimuuntajan suojana käytettävä kipinäväli on hyvin lyhyt, voidaan testissä saadut tulokset skaalata suoraan halutulle elektrodivälille ilmväliden suhteessa. [6]





**Kuva 5.5.** Ilmalle mitattu Pachen-käyrä 20°C lämpötilassa [6]

### 5.5.2 Ympäristöolosuhteiden huomioiminen syttymisjännitteen määrittelyssä

Virtamuuntajalle aiheutuvien vaurioiden välttämiseksi on tärkeää, että kipinävälin syttymisjännite on kaikissa tapauksissa matalampi kuin ensiökäämin ja muuntajan rungon välinen eristystaso. Muuntajan ensiön eristystaso testataan salamasyöksyjännitteellä (1,2/50  $\mu$ s). Käytännössä muuntajan ensiön pieni induktanssi tekee standardimuotoisen salamasyöksyjännitteen aaltomuodon saavuttamisesta vaikeaa. Mikäli ensiökäämin yli oleva jännite nousee liaksi ennen kipinävälin syttymistä, on jännitteen ensiökäämiin aiheuttama virta suurempi kuin virtamuuntajan suurin dynaaminen virtakestoisuus.

Vallitsevilla ympäristöolosuhteilla on vaikutusta kipinävälin syttymisherkkyyteen. Yleisesti ottaen syttymisjännitteeseen vaikuttavat lämpötila, kosteus ja ilmanpaine. Ilman tiheys on suoraan verrannollinen paineeseen ja kääntäen verrannollinen lämpötilaan. Ilman tiheys vaikuttaa syttymisjännitteeseen muuttamalla ilmassa tapahtuvien ionisoivien sykästen todennäköisyyttä. Kosteus puolestaan lisää ilman läpilyöntilujuutta sillä vesimolekyylit ovat elektronegatiivisia ja siten sitovat ilmapälissä olevia vapaita elektroneja. Lämpötilan noustessa ilman läpilyöntiherkkyys kasvaa. Standardi IEC 60060 määrittelee normaaliolosuhteet seuraavasti:

- Lämpötila  $T_0=20^\circ\text{C}$  (293 K)
- Paine  $p_0=1013$  mbar
- Absoluuttinen kosteus  $h_0=11$  g/m<sup>3</sup>

Seuraavissa kappaleissa on esitetty kipinävälin syttymisjännitteen vaihteluvälin määrittely Wardha-Aurangabad projektissa. Laboratoriokokeissa suurimmaksi normaaliolo-

suhteisiin korjatuksi syttymisjännitteeksi 2 mm kipinävälin määritettiin  $8,80 \text{ kV}_{\text{peak}}$ . Suurin mahdollinen syttymisjännite todellisessa käyttötilanteessa riippuu asennuspaikan lämpötilasta ja korkeudesta merenpinnasta. Asennuspaikan korkeus merenpinnasta ( $h$ ) vaikuttaa ilmanpaineeseen kaavan 5.15 mukaisesti. Korkeammalla ilman ionipitoisuus on suurempi, jolloin ylilyönti elektrodivälin yli tapahtuu herkemmin. [4, 6]

$$p = p_0 * e^{\frac{-h}{8150}} \quad (5.15)$$

Taulukossa 5.9 on esitetty ilmastollisten olosuhteiden huomioiminen pienimmän ja suurimman syttymisjännitteen määrittämisessä. Ensimmäisessä sarakkeessa on annettu testissä vallitsevat olosuhteet ja mitatut arvot. Tämän jälkeen on edellä esitettyihin perusteluihin nojaten valittu suurimmaksi todennäköiseksi syttymisjännitteeksi kolme keskihaajontaa 50 % syttymisjännitettä suurempi arvo. Syttymisjännite on korjattu vastaamaan standardin määrittelemiä normaaliolosuhteita suhteellisen ilman tiheyden huomioonottavan kaavan 5.16 avulla.

$$\delta = \frac{p}{p_0} \frac{T_0}{T} = \frac{p}{p_0} \frac{273 + 20}{273 + T} \quad (5.16)$$

Seuraavana taulukossa on määriteltynä sarjapariston asennuspaikalle määriteltävät ilmastolliset parametrit; korkeus merenpinnasta ja mahdollinen lämpötilan vaihteluväli. Maksimi ja minimilämpötilan korjauskertoimet laskettiin kaavan 5.15 avulla. Koska asennuspaikka sijaitsee alle 1000 metrin korkeudessa, korkeuden vaikutusta ilmanpaineeseen ei huomioitu. Näin saatiin syttymisjännitteen todennäköiseksi vaihteluväliksi 2 mm elektrodivälillä  $7,3 \text{ kV}_{\text{peak}} - 9,2 \text{ kV}_{\text{peak}}$ . Kuten aiemmin kuvassa 5.5 esitetyssä Pachen käyrässä on esitetty, ylilyöntijännite käyttäytyy hyvin lineaarisesti pienillä, alle 10 cm ilmaväleillä. Niinpä syttymisjännite voidaan skaalata sopivaksi suoraan elektrodivälin suhteessa.

Epäbalanssimuuntajalle tehtävässä vikatarkastelussa on oletettava tilanne, jossa kipinävälin syttymisjännite on suurimmillaan. Tällöin muuntajan ensiökäämin eristys joutuu suurimmalle rasitukselle ja muuntajaa mekaanisesti rasittava dynaaminen virta on suurimmillaan.

**Taulukko 5.9.** Kipinävälin syttymisjännitteen määrittäminen.

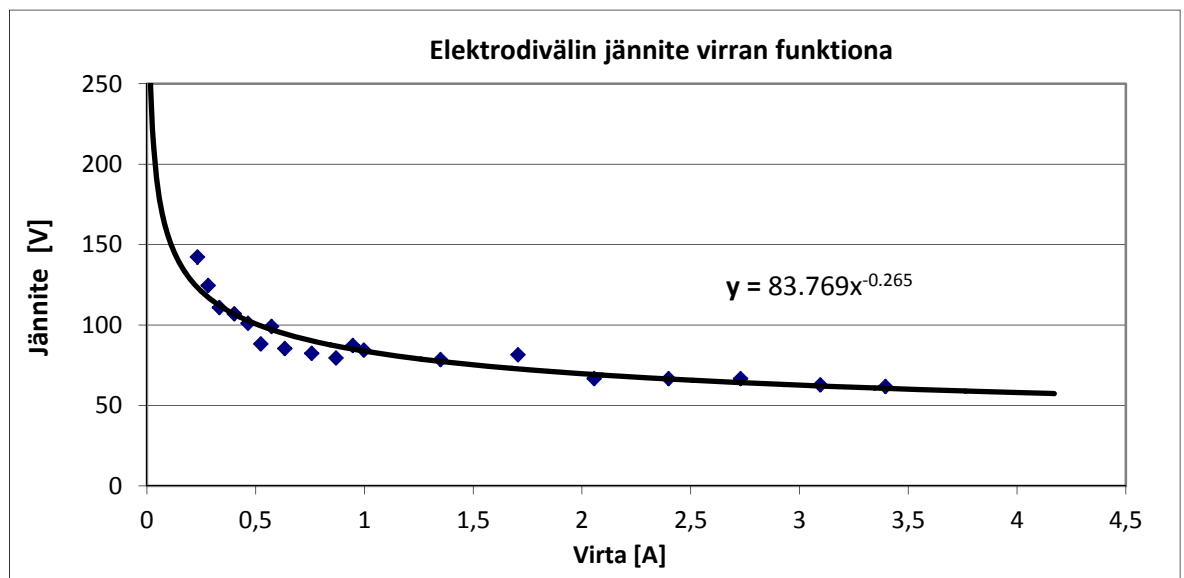
Ilmastollisten olosuhteiden huomiointi läpilyöntijännitteen laskennassa Wardha-Aurangabad projektissa		
<b>Testiolosuhteet</b>		
Lämpötila	21,50	°C
Kosteus	65,00	%
Ilmanpaine	1005,00	mbar
50 % ylilyöntitodennäköisyys	8650,00	V
Keskihajonta	89,00	V
Ilmavälin pituus	2,00	mm
Suurin todennäköinen syttymisjännite ( $U_{50+3\sigma}$ )	8917,00	V
Pienin todennäköinen syttymisjännite ( $U_{50-3\sigma}$ )	8383,00	V
<b>Normaaliolosuhteet</b>		
Korkeus ja lämpötilakorjauskerroin	0,9870	
Suurin todennäköinen syttymisjännite ( $U_{50+3\sigma}$ )	8801,52	V
Pienin todennäköinen syttymisjännite ( $U_{50-3\sigma}$ )	8274,44	V
<b>Asennuspaikan ympäristöolosuhteet</b>		
Maksimi lämpötila	50,00	°C
Minimi lämpötila	0,00	°C
Korkeus	200,00	m
Ilmanpaine	988,44	mbar
Maksimijännitteen korjauskerroin	1,05	m = 1
Minimijännitteen korjauskerroin	0,89	m = 1
Minimi läpilyöntijännite	7323,96	V <sub>peak</sub>
Maksimi läpilyöntijännite	9217,33	V <sub>peak</sub>
<b>Käytetty ilmaväli</b>		
Minimi läpilyöntijännite käytetyllä ilmavälillä	<b>5492,97</b>	V <sub>peak</sub>
Maksimi läpilyöntijännite käytetyllä ilmavälillä	<b>6913,00</b>	V <sub>peak</sub>

### 5.5.3 Kipinävälin valokaarijännitteen mittaus

Kun elektrodivälille on syttynyt valokaari, elektrodien välinen jännite romahtaa arvoon jonka määrää pääasiassa valokaarta syöttävän piirin impedanssi. Tällöin virtamuuntajan ensiön näkemä jännite on sama kuin kipinävälielektrodien yli vaikuttava jännite. Vaikka suurin osa vikavirrasta kulkee kipinävälissä palavan valokaaren kautta, kipinävälin yli vaikuttava jännite saa aikaan sen, että osa virrasta kulkee myös muuntajan ensiökäämin lävitse. Tämä on suojausten toiminnan kannalta hyvin tärkeää, sillä muuten muuntajan näkemä virta olisi nolla ja viasta ei saataisi tietoa ohjaus- ja suojausjärjestelmälle.

Muuntajan mitoituksen kannalta on tärkeää määrittää kuinka suuri jännite suojakipinävälän ja samalla muuntajan ensiökäämin yli vaikuttaa vian aikana. Jännitehäviö aiheutuu valokaaren lisäksi elektrodimateriaalina käytetyn grafiitin impedanssista. Puolipallon muotoisten grafiittielektrodien resistanssiksi määritettiin  $0,23 \Omega$ / elektrodi. Niinpä kipinävälän anodi- katodiresistanssi on yhteensä noin  $0,46 \Omega$ . Itse elektrodivälissä palavan valokaaren impedanssin suuruuteen vaikuttaa valokaaren pituuden lisäksi sen läpi kulkeva virta. Virran kasvaessa suuremmaksi, valokaarijännite laskee voimakkaasti. Tällaisessa tilanteessa valokaarta merkittävämmäksi jännitehäviön aiheuttajaksi piirissä tulee elektromateriaalina käytetyn grafiitin resistanssi.

Kipinävälän yli vaikuttavan jännitteen suuruuden määrittämiseksi suoritettiin vaihtojännitetestit, missä kipinäväli kytkettiin 380/10000 V suurjännitemuuntajan toisiosion. Kipinävälän väliasettelukseksi valittiin 2 mm. Valokaari aikaansaatiin kasvattamalla jännitettä kunnes läpilyönti tapahtui. Toisiosion virtaa säädettiin suurjännitemuuntajan ensiön lisäimpedanssilla. Oskilloskoopilla mitattiin sekä elektrodien välisen jännitteen suuruutta että elektrodivälissä kulkevaa virtaa. Jännitemuuntajan korkean induktanssin vuoksi virtaa ei saatu nousemaan kovinkaan paljon, mutta elektrodivälän yli oleva jännite vaikutti tasaantuvan kun virtaa lisättiin. Mitatuista arvoista piirrettiin kuvaaja 5.6, mistä selviää suojakipinävälän yli vaikuttavan jännitteen ja virran välinen riippuvuus. [6]



**Kuva 5.6.** Mitattu valokaarijännite 2 mm kipinävälille.

Kuvaajasta voidaan päätellä, että elektrodivälän ja samalla siis ensiökäämin yli vaikuttava jännite pienenee nopeasti virran kasvaessa. Käytännössä epäbalanssivioissa esiintyvillä vikavirroilla valokaarijännitteen suuruus on noin 30 V – 60 V. Virran kasvaessa itse valokaaren virta pienenee ja määrääväksi tekijäksi alkaa nousta grafiittimateriaalin resistanssi. Tätä mitattua arvoa voidaan hyödyntää kipinävälille tehtävissä vikasimuloinneissa.

## 5.6 Ensiön suojaus venttiilisuojalla

Virtamuuntajan ensiökäämin suojana olisi mahdollista käyttää myös pienjännitemuuntajien suojaukseen tyypillisesti käytettyjä venttiilisuojia. Metallioksidiventtiilisuojan etuna kipinäväliin verrattuna on sen hyvin hallittu toiminta ja kyky rajoittaa jännitteen huippuarvot alhaiselle tasolle. Venttiilisuojalta toivottava ominaisuus tässä sovelluksessa on mahdollisimman pieni jännite, jolla suoja muuttuu johtavaksi. Valmiit kaupalliset sovellukset rajoittuvat tavallisesti komponentteihin, jossa venttiilisuoja ei vielä johda kun se on kytketty pienjänniteverkon vaihejännitteeseen. Alla on esitettyä ABB:n valmistaman LOVOS-10/280 tyyppin venttiilisuojan tekniset tiedot. [14]

**Taulukko 5.10.** Pienjänniteventtiilisuojan tekniset tiedot

<b>LOVOS - 10/280</b>		
Nimellinen käyttöjännite	280	Vrms
Nimellinen purkausvirta	10	kApeak
Maksimi purkausvirta	40	kApeak
Maksimienergia	2,2	kJ
Jännitteen rajoitus	900	Vpeak

Tavallisesti edellä kuvatun kaltaisia venttiilisuojia käytetään suojaamaan pienjännitelaitteita ilmastollisia ja kytkentäylijännitteitä vastaan. Ne kestävät lyhytaikaisesti hyvinkin suurta virtaa ja rajaavat jännitteen tehokkaasta alle 1 kV tasolle. Pienjänniteverkkoon tarkoitettu venttiilisuoja on kooltaan pieni, ja siten se olisi helppo asentaa virtamuuntajien ensiöliittimien tai vaihtoehtoisesti ensiöliittimen ja muuntajan rungon väliin. Lisäksi venttiilisuoja on varsin edullinen komponentti. Venttiilisuojan toimintaa virtamuuntajan suojana on simuloitu luvussa 6.

## 6 VIKATILANTEIDEN SIMULOINTI

Epäbalanssimuuntaja sijaitsee sarjakondensaattorin H-haaran keskellä. Epätasapaino H-haaran kapasitanssien välillä aiheuttaa keskihaaraan virran, jonka suuruus riippuu rikkinäisten kondensaattorielementtien määrästä ja linjavirran suuruudesta. Mikäli epäbalanssivirta aiheutuu rikkoutuneista kondensaattorielementeistä, kapasitanssin muutos on niin pieni, että aiheutuva epäbalanssivirta on vain 20 mA – 1000 mA. Tämä johtaa siihen, että muuntajan nimellinen ensiövirta on valittava pieneksi riittävän tarkkuuden takaamiseksi. Toisaalta taas virtamuuntaja on sijoituspaikassaan alttiina suurille vikavirroille mitkä johtuvat mahdollisista ylilyönneistä kondensaattoriyksikön ulkoisissa tai sisäisissä rakenteissa.

Vikavirtojen suuruus riippuu ensisijaisesti sarjapariston lavalla tapahtuvan vian tyypistä ja vallitsevasta linjavirran suuruudesta. Mitä useampi sarjaankytketty kondensaattoriyksikkö vian seurauksena ohittuu, sitä suurempi on vikavirta. Käytännössä todennäköisyys, että vian seurauksena oikosulkeutuisi useampi kuin yksi kondensaattoriyksikkö on hyvin pieni, mutta silti se on otettava huomioon virtamuuntajan määrittelyssä. Tutkittavat tilanteet rajoitettiin joko yhden kondensaattoriyksikön ylilyöntiin tai tilanteeseen, jossa ylilyönti tapahtuu koko kondensaattoriräkin ylitse.

Simuloitaviksi tilanteiksi keskityttiin valitsemaan suurivirtaisia käyttötilanteita, jolloin pariston yli on korkea jännite. Ylilyönnin todennäköisyys pienillä linjavirran arvoilla on hyvin epätodennäköistä.

### 6.1 Simulointimalli

Sarjapariston epäbalanssivirtoja simuloitiin PSCAD-ohjelmistolla. Simulointimallin pohjaksi otettiin Intiaan rakennettava Wardha – Aurangabad sarjaparisto. Kyseinen sarjaparisto on epäbalanssimittauksen kannalta haasteellinen, sillä suuresta kondensaattoreiden lukumäärästä johtuen yksittäisen kondensaattorielementin rikkoutumisesta johtuva epäbalanssivirran kasvu jää hyvin pieneksi. Simuloinnissa käytettiin todellisia sarjapariston kapasitansseja. Pariston tiedot on lueteltuna alla:

- Teho (1-v): 387,4 MVA<sub>r</sub>
- Nimellisvirta (1 pu): 3000 A
- Kapasitanssi: 73,96 μF
- Nimellisjännite: 129,1 kV
- Jännite suojaustasolla: 400,0 kV<sub>peak</sub>

### 6.1.1 Virtamuuntajan malli

Jotta virtamuuntajan ensiövirtojen käyttäytymistä erilaisissa vikatilanteissa ja erilaisilla kuormituksella voitaisiin tutkia, piti virtamuuntajalle rakentaa sijaiskytkentään perustuva malli. Täydellistä sijaiskytkentää varten projektissa käytettävästä virtamuuntajasta ja sen taakasta tuli selvittää seuraavat arvot:

- Ensiökäämin resistanssi  $R_1$
- Ensiökäämin induktanssi  $L_1$
- Magnetoitumisinduktanssi  $L_m$
- Rautahäviöitä kuvaava resistanssi  $R_r$
- Toisiökäämin resistanssi  $R_2$
- Toisiökäämin induktanssi  $L_2$
- Taakan resistanssi  $R_b$
- Taakan induktanssi  $L_b$

Projektissa käytettävälle, Artechin toimittamalle CA-123 tyyppin muuntajalle osa arvoista saatiin muuntajavalmistajan ilmoittamana, osa puolestaan vastaavaa tyyppiä olevan muuntajan testiraporteista. Sen lisäksi osa arvoista saatiin laskemalla parametrit muita muuttujia apuna käyttäen. Simulointitulosten kannalta epäoleelliset arvot arvioitiin.

Ensiökäämin resistanssi ja induktanssiarvot ovat valmistajan ilmoittamat. Lähes samat luvut on myös mitattu virtamuuntajalle tehtävissä rutiinitesteissä. Magnetoitumisinduktanssi laskettiin käyttäen apuna virtamuuntajalle mitattua knee-point jännitettä ja sitä vastaavaa magnetointivirtaa. Koska kyllästymistilassa virtamuuntajan induktanssi romahtaa, mitattua knee-point jännitettä laskettiin 10 % ja magnetointivirtaa laskettiin 50 %. Tällöin muuntajan ei tulisi olla vielä kyllästynyt. Kyseisen pisteen jännitettä vastaavan magnetoitumisvirran avulla voidaan laskea magnetoitumisreaktanssi (kaava 6.1). Magnetoitumisreaktanssin avulla voidaan laskea sitä vastaava induktanssi  $L_m$ . Tässä arvossa on mukana myös toisiökäämin resistanssi ja induktanssi, mutta ne voidaan jättää huomioimatta, sille niiden arvo on magnetoitumisinduktanssin arvoon nähden häviävän pieni. Laskennan lukuarvot ja tulokset on esitetty taulukossa 6.1.

$$X_m = \frac{U}{I_m} \tag{6.1}$$

**Taulukko 6.1.** Magnetoitumisinduktanssin määrittäminen.

Jännite magnetoitumiskäyrän lineaariselta alueelta	7,77	V
Magnetoitumisvirta kyseisessä pisteessä	0,03	A
Impedanssi (reaktanssi)	235	$\Omega$
Magnetoitumisinduktanssi	0,62	H

Rautahäviöt muuntajassa syntyvät hystereesi ja pyörrevirtahäviöiden seurauksena. Hystereesillä tarkoitetaan ferromagneettiselle aineille ominaista ilmiötä, minkä seurauksena aineen atomit jäävät magnetoituneeseen tilaan vaikka siihen ei enää vaikuta ulkoinen magneettikenttä. Pyörrevirtahäviöt puolestaan syntyvät kun magneettikenttä indusoi muuntajasydämeen jännitteen, jonka aikaansaamat virrat kulkevat eri suuntaan magneettikentän kanssa. Tarkassa mittamuuntajassa on erittäin tärkeää, että toisiovirta seuraa mahdollisimman tarkasti ensiövirtaa. Tämän vuoksi mittamuuntajan sydän mitoitetaan siten, että rautahäviöt ja samalla siis magnetoitumisvirta pysyvät mahdollisimman pieninä. Rautahäviöitä kuvaavaksi resistanssiksi valittiin 5000  $\Omega$ .

Toisiokäämin resistanssi ja induktanssi saatiin myös valmistajan ilmoittamista arvoista. Toisiotaakan resistanssi koostuu virtamuuntajan toisiokaapeloinnin resistanssista sekä apuvirtamuuntajan ensiökäämin resistanssista. Wardha-Aurangabad projektissa arvioitiin toisiokaapeloinnin pituudeksi 10 metriä. Taakan induktanssin muodosti puolestaan suurilta osin apuvirtamuuntajan induktanssi. Johdotuksen induktanssi jätettiin tässä tarkastelussa huomioimatta.

Taulukossa 6.2 on koottuna sijaiskytkennän parametrit. Toisiosuureet on esitetty ensiöön redusoituna. Redusointi tehty samalla kaavalla 5.11, mitä käytettiin apuvirtamuuntajan toisioarvojen redusoinnissa ensiöpuolelle. Näiden parametrien avulla luotiin sijaiskytkentä, jonka tarkoituksena on kuvata mahdollisimman tarkasti virtamuuntajan toiminta. On huomattavaa, että sijaiskytkennän tarkoitus on mallintaa virtamuuntajan vaikutus sarjaparistomalliin mahdollisimman tarkasti. Virtamuuntajan yli muodostuvan jännitteen suuruus vikatilanteen aikana riippuu voimakkaasti virran suuruuden ja taajuuden lisäksi itse muuntajan sähköisistä ominaisuuksista. Suojalaitteena toimivan kipinävälin syttymiseen puolestaan tarvitaan riittävästi jännitettä, joten tämän vuoksi on hyvin tärkeää että muuntaja on mallinnettu piiriin mahdollisimman oikein.



**Taulukko 6.2.** Virtamuuntajan sijaiskytkennän komponenttiarvojen määrittäminen

Virtamuuntajan sijaiskytkennän komponenttiarvojen määrittäminen				
Parametri	Arvo	Yksikkö	Ensiöön redusoitu arvo	Yksikkö
Ensiökäämin resistanssi $R_1$	0,1500	$\Omega$	0,150	$\Omega$
Ensiökäämin induktanssi $L_1$	0,0001	H	0,060	mH
Magnetoitumisinduktanssi $L_m$	0,6243	H	0,624	H
Rautahäviötä kuvaava resistanssi $R_r$	5000,0	$\Omega$	5000	$\Omega$
Toisiökäämin resistanssi $R_2$	0,1300	$\Omega$	0,033	$\Omega$
Toisiökäämin induktanssi $L_2$	0,0002	H	0,045	mH
Taakan resistanssi $R_b$	0,1801	$\Omega$	45,023	m $\Omega$
Taakan induktanssi $L_b$	0,0004	H	0,104	mH

Epäbalanssivirtamuuntajan magneettipiirin toimintaa toisiovirran käyttäytymisen kannalta mallinnettiin simulointiohjelmiston generisellä virtamuuntajamallilla. Mallille tuodaan tieto ensiövirran suuruudesta muuttujaa  $I_{ct}$  käyttämällä. Muuntajan ensiövirran käyttäytyminen mahdollisimman realistisesti saadaan aikaan kuvassa 6.1 esitetyllä sijaiskytkennällä. Ulostulona mallista on virtamuuntajan toisiovirta. PSCAD mallintaa virtamuuntajan magneettista käyttäytymistä käyttäen Jiles – Atherton magneettipiirin mallia. Malli huomio ferromagneettisten materiaalien kyllästymisen ja hystereesin. Muuntajan mallintamiseen tarvittavat parametrit ovat:

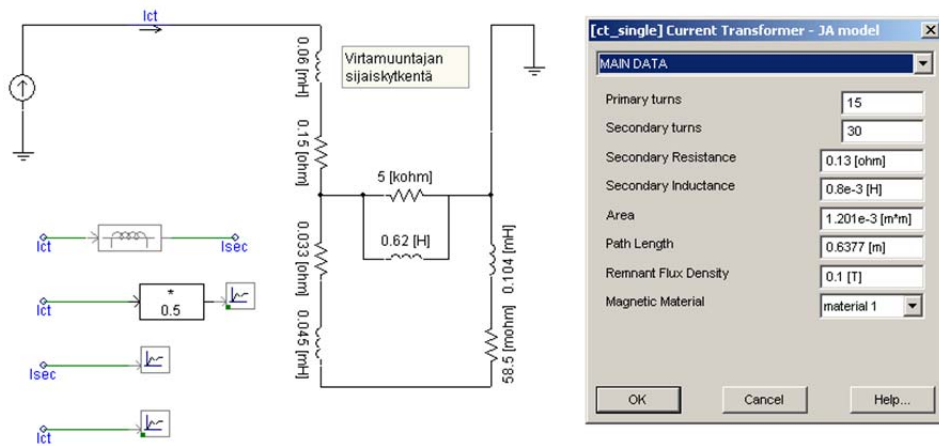
- Ensiökäämin kierrosten lukumäärä
- Toisiökäämin kierrosten lukumäärä
- Toisioresistanssi
- Toisioinduktanssi
- Muuntajasydämen poikkipinta-ala
- Magneettipiirin pituus
- Toisiotaakka

Jotta malli toimisi mahdollisimman tarkasti, nämä tiedot tulisi saada virtamuuntajavalmistajalta. Lisäksi olisi mahdollista antaa tarkemmat tiedot muuntajassa käytetystä sydänmateriaalista ja sen ominaisuuksista. Mikäli tarkkaa tietoa virtamuuntajan sydämen magneettisista ominaisuuksista ja poikkipinta-alasta ei ole saatavilla, voidaan virtamuuntajan kyllästymistä aiheuttavan ensiövirran suuruus arvioida muuntajan knee-point jännitteen avulla.

Virtamuuntajan toisiovirta on suurimmillaan kun sydän alkaa kyllästyä. Maksimivirran arvoa tällöin voidaan arvioida jakamalla muuntajan mitattu knee-point jännite virtamuuntajan kokonaistaakalla, kun mukaan lasketaan muuntajan toisiökäämin impedanssi eli virtamuuntajan sisätaakka (Kaava 6.2).

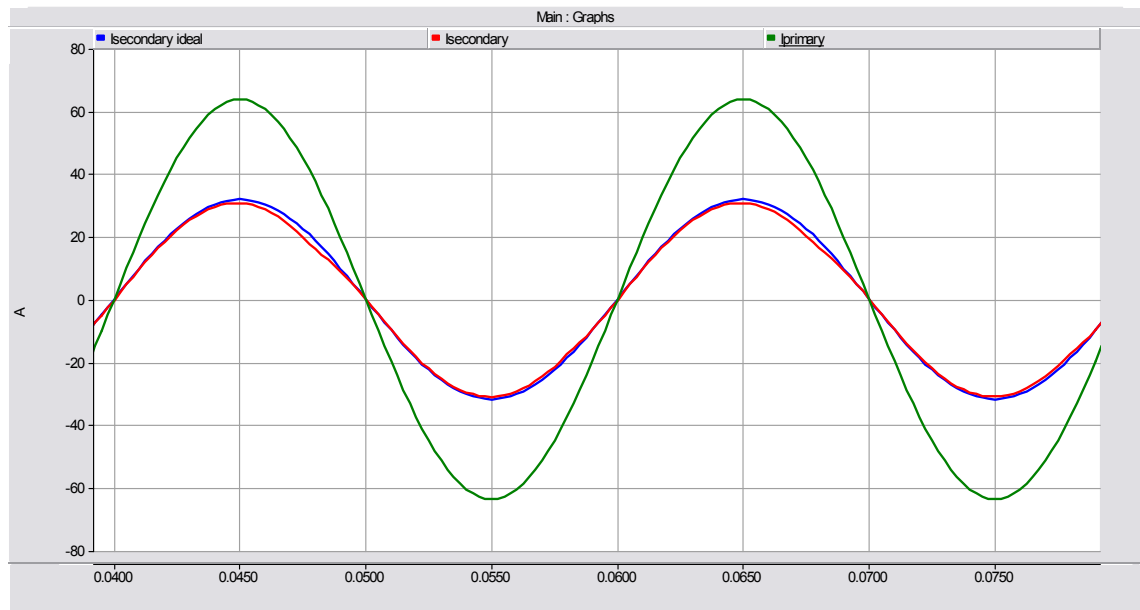
$$I_{s\max} = \frac{V_{knee}}{(Z_b + Z_{in})} \quad (6.2)$$

Näin saatu toisiovirran maksimiarvo tulee kertoa muuntajan muuntosuhteella, jotta saadaan kyllästymisen aiheuttavan ensiövirran tehollisarvo. Käytännössä virta voi nousta hieman tätä korkeammaksi, mutta virtamuuntajan virhe kasvaa voimakkaasti. Näin saatu ensiövirran arvo voidaan syöttää tätä tarkoitusta varten tehtyyn simulointimalliin, jolla voidaan etsiä vastaavalla tavalla käyttäytyvälle virtamuuntajalle parametrit varsinaisia sarjapariston vikasimulointeja varten. Tässä yksinkertaisessa mallissa on mallinnettuna virtalähde joka syöttää virtamuuntajan sijaiskytkentää (kuva 6.1). Virtamuuntajan toisio on mallinnettu PSCAD:ista löytyvällä geneerisellä virtamuuntajamallilla, jonka parametrit ovat muokattavissa vastaamaan valittavaa virtamuuntajaa.



**Kuva 6.1.** Malli virtamuuntajan parametrien hakemiseksi.

Mallin virraksi asetellaan edellä kuvatulla tavalla saatu laskennallinen kyllästymisen aiheuttava ensiövirran arvo. CA-123 tyyppin muuntajalle, jonka mittaussydämen tarkkuusluokka on 0,2, saatiin kyllästymisen aiheuttavaksi ensiövirran tehollisarvoksi 54 A mikä vastaa huippuarvoa 76 A<sub>peak</sub>. Virtamuuntajamallille annetaan muuntajan ensiön ja toisio kierrosmäärät, toisio resistanssi, induktanssi sekä taakan arvot. Virroista piirretään kuvaajat, joissa on esitettyä ensiövirran, muuntajamallilla saadun toisiovirran sekä ideaalisen toisiovirran aaltomuodot (kuva 6.2).



Kuva 6.2. Virtojen aaltomuodot

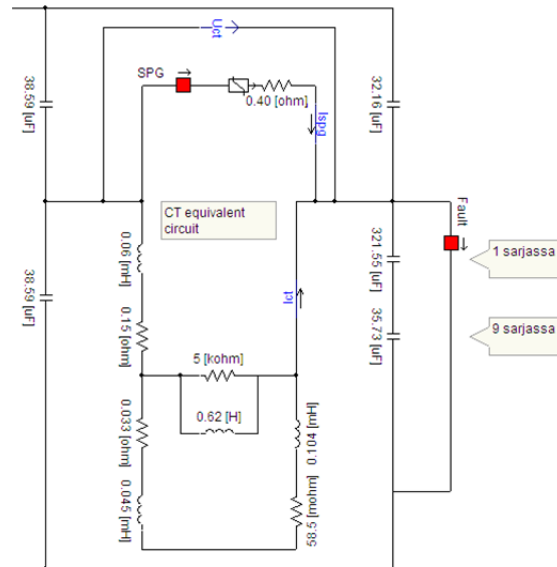
Kuvassa vihreällä on ensiövirran aaltomuoto. Sinisellä on ideaalinen toisiovirta ja punaisella toisiovirta, missä on huomioitu virtamuuntajan magneettipiirin kyllästymisen. Virtamuuntajan parametreja säädetään, kunnes toisiovirran aaltomuoto alkaa eroamaan ideaalisista toisiovirrasta kuten kuvasta 6.2 huomataan. Pienemmillä ensiövirran arvoilla ideaalinen ja simuloitu toisiovirta vastaavat täysin toisiaan, mutta ensiövirran noustessa riittävästi virtojen suuruudet eroavat huippuarvojen kohdalla. Tämä johtuu siitä, että muuntajasydän kyllästyy ja sen seurauksena magnetointivirta kasvaa. Näin saadut virtamuuntajan mallin parametrit voidaan ottaa käyttöön toisiovirran aaltomuodon määrittämiseksi varsinaisessa sarjapariston epäbalanssivikasimuloinnissa.

### 6.1.2 Sarjapariston malli

Wardha-Aurangabad:in sarjapariston kondensaattorit on jaettu kahteen H-haaraan jolloin molemmille haaroille on oma epäbalanssimittaus. Kuvassa 6.3 on esitetty PSCAD malli yhdestä sarjapariston H-haarasta. Keskellä H-haaraa on epäbalanssivirtamuuntaja joka on mallinnettu virtamuuntajalle määritetyn sijaiskytkennän avulla. Virtamuuntajan ensiön rinnalla on ohjattava kytkin (SPG) ja varistori, jolla saadaan mallinnettua kipinävälin syttyttyä ensiön yli vaikuttava valokaarijännite pienillä kipinävälivirran arvoilla. Varistorin referenssijännitteeksi valittiin 20 V. Kipinävälihaarassa oleva  $0,40 \Omega$  vastus kuvaa grafiittielektrodien resistanssia.

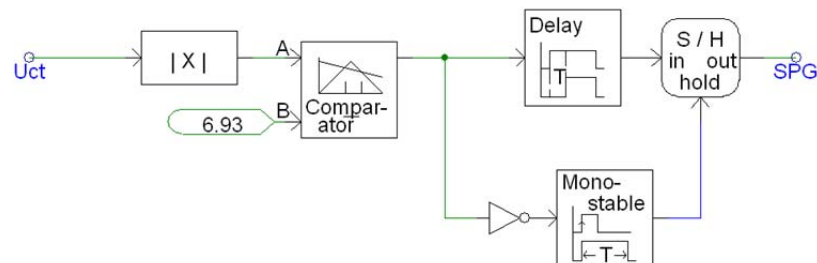
H-haaran yksi jalka koostuu kymmenestä kondensaattoriryhmän sarjaankytkennästä. Kuvassa oikealla olevalla vikakytkimellä (Fault) saadaan oikosuljettua haluttu määrä sarjaankytkettyjä kondensaattoreita johtimen paikkaa vaihtamalla. Vika aikaan saadaan halutulla ajanhetkellä käyttämällä Timed Breaker Logic –komponenttia. Piirissä mitataan virtamuuntajan ensiön läpi menevää virtaa ( $I_{ct}$ ), ensiön yli vaikuttavaa jännitettä ( $U_{ct}$ ) sekä kipinävälin valokaaren kautta kulkevaa virtaa ( $I_{spg}$ ). Sarjapariston toinen

H-haara on mallinnettu vastaavalla tavalla, mutta ilman kipinävälin toimintalogiikkaa, koska vian tapahtuessa toisessa H-haarassa, toisen paristohaaran virtamuuntaja ei sitä huomaa. Sarjaparistomalli on nähtävissä kokonaisuudessaan liitteessä 2.



**Kuva 6.3.** Sarjapariston kondensaattorihaaran simulointimalli.

Kipinävälin syttymistä ohjataan kuvan 6.4 ohjauspiirillä. Virtamuuntajan ensiön yli vaikuttavan jännitteen itseisarvoa  $U_{ct}$  verrataan aseteltuun kipinävälin syttymisjännitteeseen. Koska kipinävälin tehtävä on suojella virtamuuntajaa ylivirroilta ja jännitteiltä kaikissa tapauksissa, syttymisjännitteeksi tulee asetella arvo, joka on kipinävälin suurin mahdollinen syttymisjännite kun ilmastolliset olosuhteet on huomioitu. Kun virtamuuntajan ensiön yli oleva jännite ylittää tämän asetteluarvon, komparaattori antaa pulssin set/hold-piirille ja samanaikaisesti asettaa pitopiirin pitämään muuntajan ensiön ohittava kytkin (SPG) kiinni. Pulssiin on asetettu 250  $\mu$ s viive, jonka on tarkoitus mallintaa valokaaren syttymisprosessin hitautta.



**Kuva 6.4.** Kipinävälin ohjauspiiri.

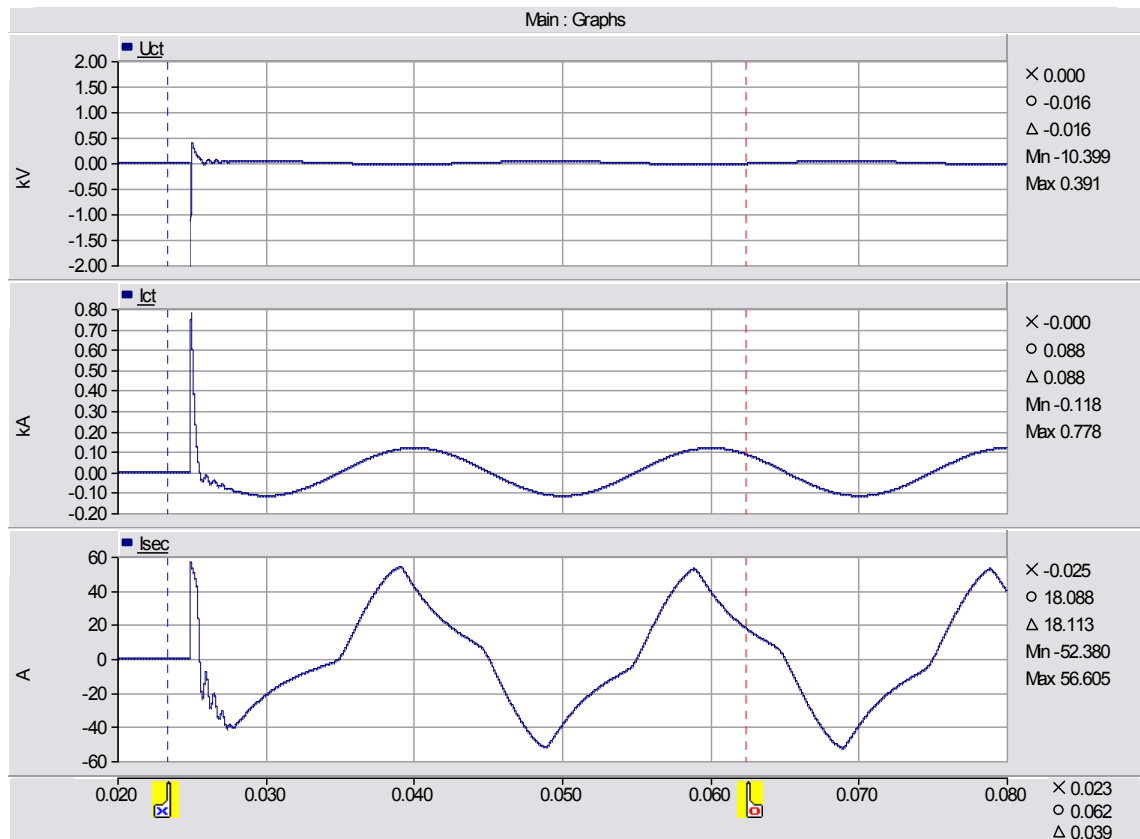
## 6.2 Vikasimuloinnit kun ensiön suojana kipinäväli

Epäbalanssisuojauksen kannalta pahimpia vikoja tutkittiin ajatuksella, joka perustui siihen oletukseen, että kondensaattoriyksikössä tapahtuva läpilyönti tapahtuu todennäköisimmin suurella linjavirran arvolla ja kondensaattorien jännitteen huippukohdassa. Suurimmat mahdolliset vikavirrat syntyvät tilanteessa, jossa mahdollisimman moni sarjaankytketty yksikköryhmä oikosulkeutuu vian seurauksena. Pienimmät virrat puolestaan saavutetaan silloin kuin vain yksi kondensaattoriyksikkö oikosulkeutuu. Virtamuuntajan kannalta vaarallisimpia tilanteita ovat vikatyypit, joissa jännite kasvaa suureksi ilman että ensiön suojakipinäväli kuitenkaan vielä syttyy. Lisäksi kipinävälin toimiessa on saatava varmuus siitä, että kipinävälin yli oleva jännitehäviö riittää aikaansaamaan ensiöön riittävän suuren virran vian toteutukseksi.

### **Yhden kondensaattorin vika, kipinäväli syttyy**

Ensimmäisenä tutkittiin tilanne, jossa ylilyönti tapahtuu yhden kondensaattoriyksikön ylitse linjavirran ollessa niin suuri että kipinäväli syttyy. Tässä tapauksessa valittiin linjavirran suuruudeksi 2,19 pu mikä vastaa pariston suojaustasoa. Tätä suuremmaksi ei paristojen läpi menevä virta siis nouse, sillä sen rinnalle kytketty metallioksidivaristori alkaa johtaa ja siten rajoittamaan kondensaattoripariston läpi menevää virtaa.

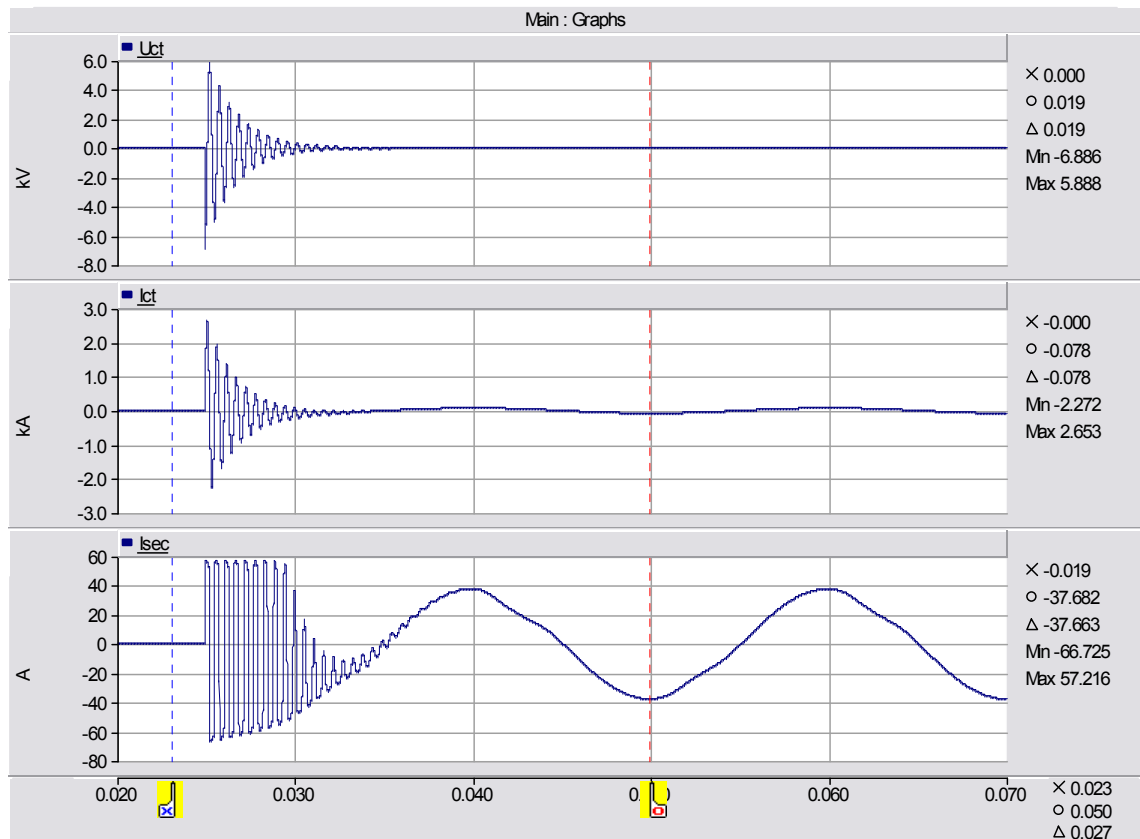
Vikasimuloinnissa mallista oikosuljettiin yhtä kondensaattorien sarjaankytkettyä ryhmää vastaava kapasitanssi linjavirran arvon ollessa 6,57 kA. Oikosulku tapahtui pariston jännitteen huippukohdassa. Kuvassa 6.5 on esitetty virtamuuntajan ensiökäämin yli olevan jännitteen ja virran aaltomuodot. Lisäksi on mallinnettu toisiovirran käyttäytyminen tässä tilanteessa. Virtamuuntajan yli vaikuttava jännite kohoaa maksimissaan 10,4 kV<sub>peak</sub> arvoon ennenkuin kipinäväli toimii. Tämä on vielä turvallinen jännitetaso virtamuuntajan eristykselle. CA-123 tyyppin virtamuuntajan ensiökäämin eristys on tyyppitestattu kestäämään 15 kV<sub>peak</sub> jännite. Muuntajasydän kyllästyy, mutta ei jää vikavirran puolialtosymmetrisen aaltomuodon ansiosta kyllästyneeseen tilaan. Jatkuvuustilassa ensiövirran tehollisarvo on noin 90 A. Koska muuntaja kyllästyy jokaisella puolijaksolla, toisiovirta ei ole enää sinimuotoista, mutta siitä on kuitenkin mitattavissa epätavallisen suuret epäbalanssivirta-arvot. On huomioitavaa, että signaalinsiirto ei kykene nykyisellään mittaamaan yli 15 A suuruisia ensiövirtoja, joten tätä suurempien virtojen toistokyvyllä ei juurikaan ole merkitystä muuntajaa valittaessa. Sarjapariston epäbalanssisuojaus havaitsee korkean epäbalanssivirran ja ohittaa sarjapariston 100 ms viiveen jälkeen. Viiveen tarkoituksena on estää pariston tahaton ohittuminen mahdollisten häiriöiden seurauksena.



**Kuva 6.5.** Virtamuuntajan virrat ja jännite yhden yksikön oikosulussa suojaustasolla.

### Yhden kondensaattorin vika, kipinäväli ei syty

Virtamuuntajan eristykselle rasittavin tilanne on sellainen, jossa jännite nousee mahdollisimman suureksi ilman että ensiön rinnalle kytketty suojakipinäväli vielä kykenee toimimaan. Tällöin muuntajan eristys joutuu kaikkein suurimmalle rasitukselle. Tilanteessa kondensaattoripariston äkillisen kapasitanssimuutoksen seurauksena syntyy värähtelevä virta, joka kuitenkin vaimenee noin 10 ms kuluessa. Kuvassa 6.6 on esitetty virtamuuntajaan vaikuttavan jännitteen ja virtojen aaltomuodot. Mittaussydämellä varustettu virtamuuntaja ei pysty toistamaan korkeaa purkausvirtaa vaan huippuarvot kyllästyvät pois mittauksesta. Värähtelevän virran aaltomuoto on kuitenkin melko symmetrinen x-akselin suhteen. Tämän seurauksena muuntaja ei jää kyllästyneeseen tilaan. Tämä on suojausten toiminnan kannalta erittäin tärkeää. Jatkuvuustilassa muuntajan ensiövirta on noin 50 A. Tässä tilanteessa suojaus toimii samoin kuin edeltävässä tapauksessa.



**Kuva 6.6.** Virtamuuntajan virrat ja jännite yhden yksikön oikosulussa kun kipinäväli ei toimi.

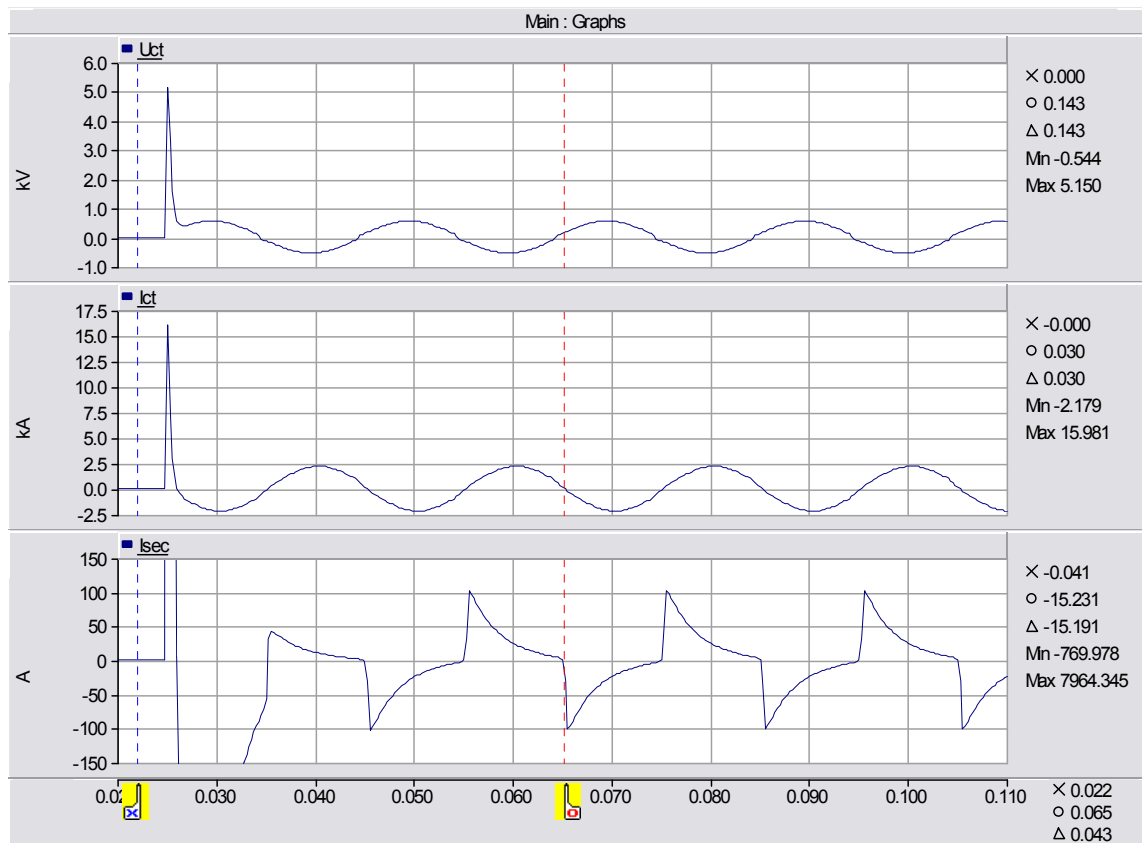
### Koko kondensaattorihaaran ohittava vika, kipinäväli syttyy

Tämän vikatyypin toteutuminen sarjaparistossa on äärimmäisen harvinainen tilanne. Vian toteutuminen vaatisi kaikkien H-haarassa sarjaankytkettyjen yksiköiden ohittumista ylilyönnin seurauksena. Vian seurauksena syntyvä epäbalanssivirta on niin suuri, että kipinäväli toimii myös hyvin pienillä, alle 0,1 pu linjavirran arvoilla. Suurimmat mahdolliset virrat virtamuuntajan ensiöön syntyvät kun pariston jännite on suojaustasolla. Kuvassa 6.7 on esitetty virtamuuntajan ensiön jännite ja virrat kun ylilyönti tapahtuu koko kondensaattoriräkin ylitse 2,16 pu linjavirralla. Virtamuuntajan ensiökäämin yli oleva jännite käy maksimissaan  $5,1 \text{ kV}_{\text{peak}}$  arvossa. Simulointitulosten perusteella virtamuuntajan ensiövirta nousee maksimissaan  $16 \text{ kA}_{\text{peak}}$  arvoon. Todellisuudessa virta ei nouse näin nopeasti, sillä sarjapariston virtakiskojen sekä kondensaattorien käämityksen ja ulkoisen johdotuksen aiheuttama induktanssi hidastaa virran muutosnopeutta häiriötilanteissa. Virtamuuntajaa rasittava terminen oikosulkuvirta on jatkuvuustilassa noin 1800 A. Tämä on suurempi kuin CA-123 tyyppin muuntajan terminen kestoisuus. Kuitenkin tässä tilanteessa on huomioitava, että muuntajan terminen kestoisuus ilmoitetaan 1 sekunnin oikosulkuvirran kestonä. Termisen oikosulkuvirran vaikutuksia muuntajaan voidaan arvioida kaavassa 6.3 esitetyn jouleintegraalin avulla. Koska tässä tapauksessa vikavirran suuruus on likimain vakio, voidaan kaavaa 6.3 yksinkertaistaa jolloin saadaan laskettua pisin sallittu oikosulun kesto aika  $t_k$  tietyllä virran arvolla (kaava 6.4).

CA-123 tyyppin virtamuuntajan nimellinen oikosulkuvirtakestoisuus on 800 A yhden sekunnin ajan. Kun huomioidaan simuloinnissa saatu virran arvo, voidaan laskea pimmäksi 1800 A virran kestoajaksi noin 0,2 sekuntia. Suojajärjestelmän tulee ohittaa paristo vikatapauksessa 100 ms viiveellä. Tästä voidaan päätellä, että virtamuuntaja kestäisi myös koko kondensaattoriräkin ylilyönnistä syntyvän oikosulkuvirran. [17]

$$I_{t1}^2 * t_1 = \int_0^{t_k} [I_k(t)]^2 dt \quad (6.3)$$

$$t_k = t_1 \frac{I_{t1}^2}{I_{tk}^2} \quad (6.4)$$



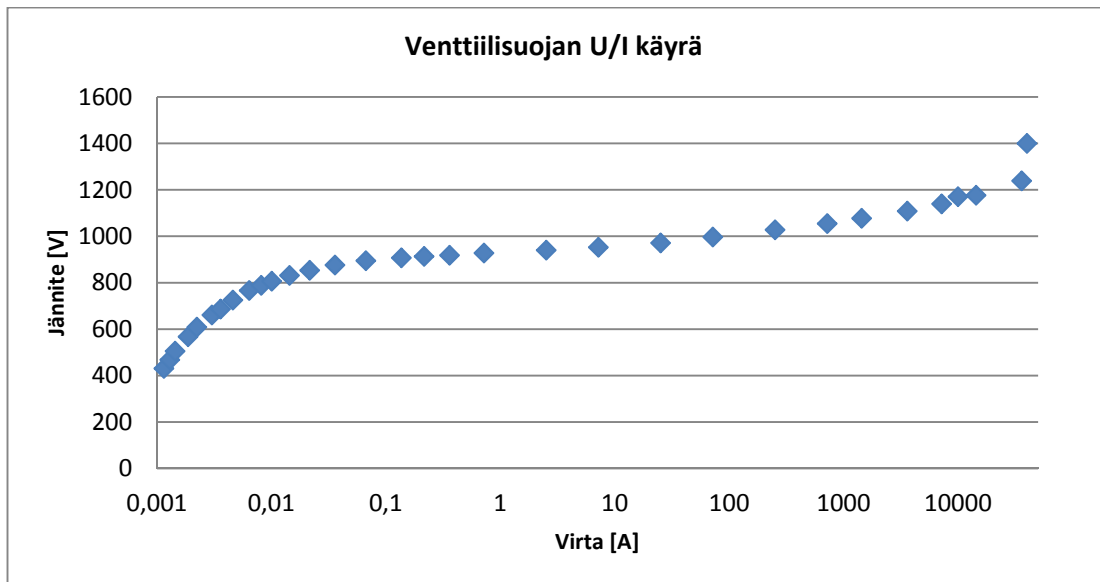
Kuva 6.7. Virtamuuntajan virrat ja jännite koko kondensaattoriräkin ylilyönnissä.



### 6.3 Vikasimuloinnit kun ensiön suojana venttiilisuoja

Suurivirtaisia epäbalanssivikoja tutkittiin uudelleen samalla periaatteella kuin aikaisemmissa simuloinneissa, mutta nyt virtamuuntajan ylijännitesuojana toimi kipinävälin sijasta venttiilisuoja. Venttiilisuoja mallinnettiin simulointiohjelman geneerisellä venttiilisuojamallilla. Tutkittavia suureita oli vian aikana venttiilisuojan läpi menevä virta, suojaan kertyvä energia, virtamuuntajan ensiö- sekä toisiovirrat ja ensiöjännite. Simulointimalli oli samanlainen kuin kuvassa 6.3, mutta virtamuuntajan rinnalla olevasta haarasta poistettiin kipinäväliä mallintava kytkin SPG.

Venttiilisuojan käyttäytyminen mallinnettiin käyttämällä tyypillistä metallioksidisuojan jännite/virta -käyrää. LOVOS-10/280 tyyppiselle venttiilisuojuille ilmoitetut toimintapisteet sovitettiin käyrälle, jotta se kuvaisi mahdollisimman tarkasti suojan todellista toimintaa. Datalehdellä oli ilmoitetut toimintapisteet olivat 1100 V / 10 kA ja 1400 V / 40 kA. Näiden pisteiden avulla saatiin luotua kuvan 6.8 mukainen jännite/virtakäyrä.

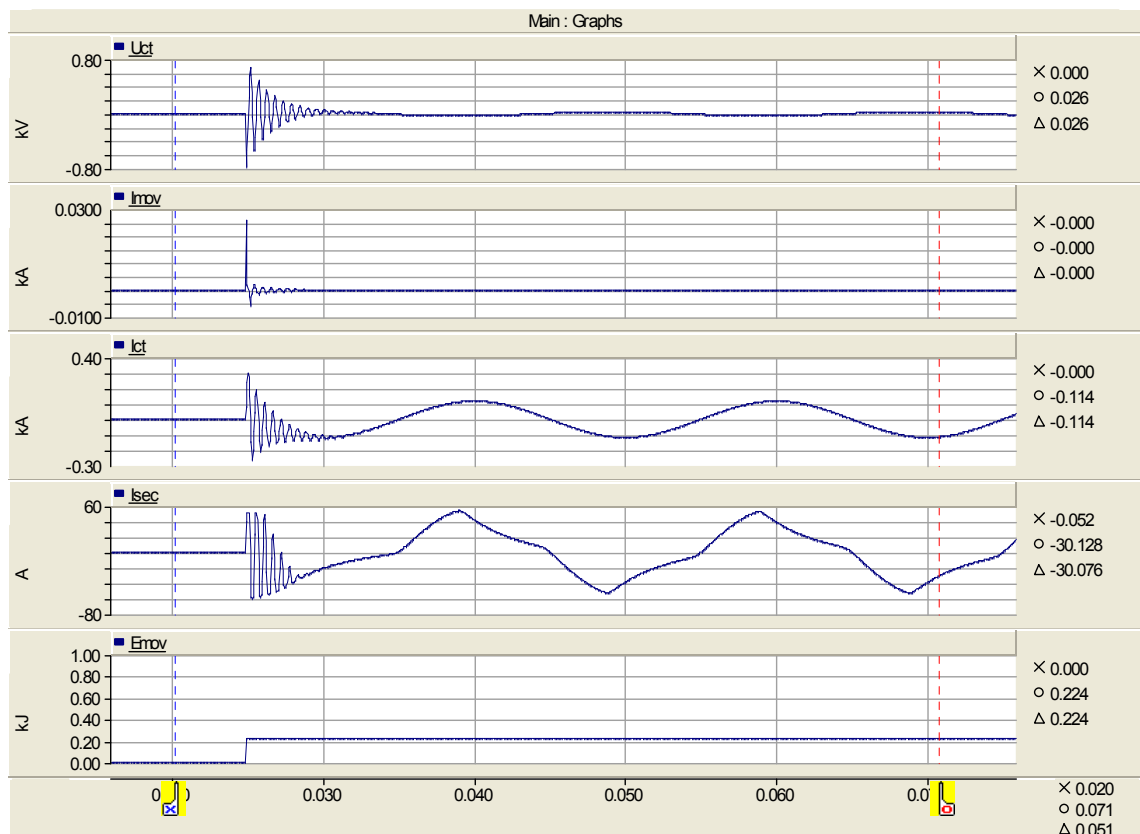


**Kuva 6.8.** Venttiilisuojan simuloinnissa käytetty U/I – käyrä.

Simuloinnit tehtiin samoilla vikatapauksilla kuin kipinävälin kanssa, jotta tulokset olisivat keskenään vertailukelpoisia.

### Yhden kondensaattorin vika

Vikasimuloinnissa mallista oikosuljettiin yhtä kondensaattorien sarjaankytkettyä ryhmää vastaava kapasitanssi linjavirran arvon ollessa 6,57 kA. Tällöin pariston jännite on suojaustasolla. Kuten kipinävälisimuloinneissakin, vikaa simuloiva kytkin suljettiin jännitteen huippukohdassa. Kuvassa 6.9 on esitettyä simuloinnin tuloksena saadut virtojen, jännitteiden ja venttiilisuojaan kertyvän energian arvot. Venttiilisuoja estää tehokkaasti jännitteen nousun korkeaksi, jolloin virtamuuntajan ensiön jännite käy maksimissaan noin 800 V arvossa. Koska virtamuuntajan ensiön yli vaikuttava korkea jännite on hyvin lyhykestoinen, venttiilisuoja vaihtuu purkausvirran jälkeen nopeasti estotilaan ja siihen kertyvä energia on vain 0,22 kJ. Suojan maksimienergia on 2 kJ, joten tässä tapauksessa venttiilisuoja toimisi virtamuuntajan suojana hyvin. Virtamuuntajan virta käyttäytyy hyvin samalla tavalla kuin kipinävälin kanssa. Toisiovirta vääristyy hieman, mutta suojaus toimii ja ohittaa pariston.

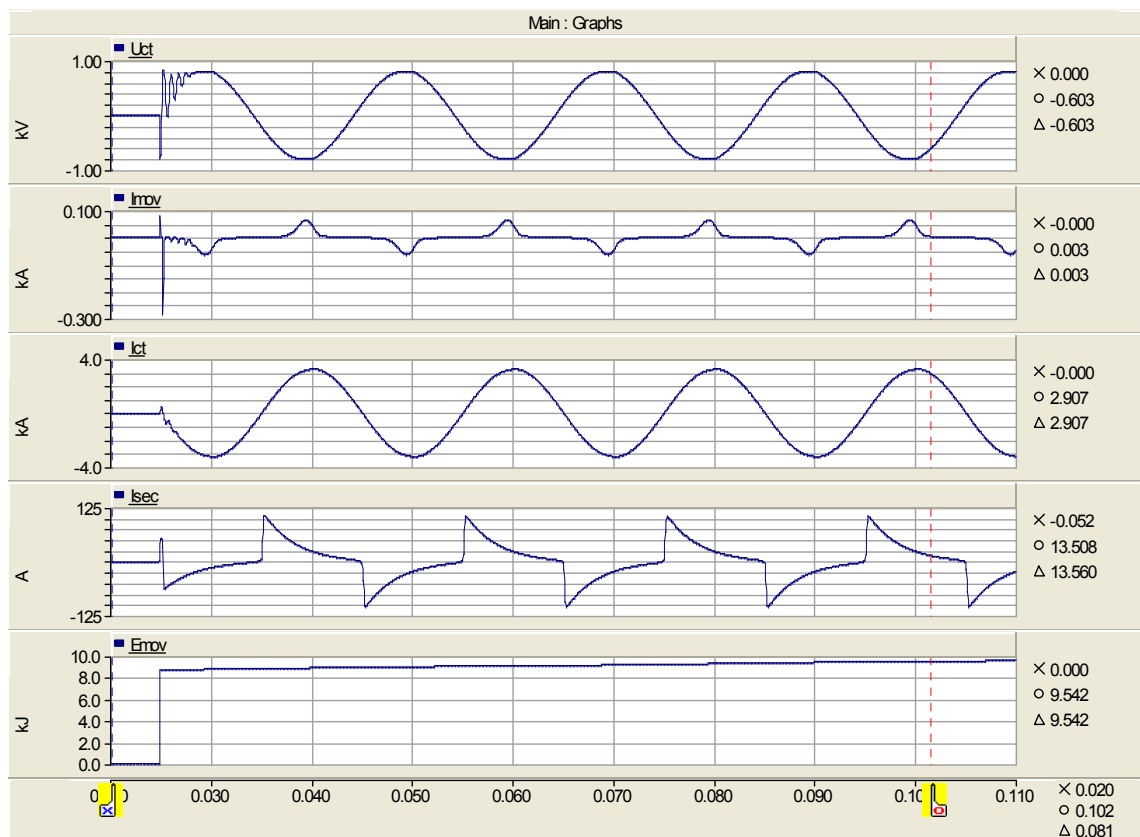


**Kuva 6.9.** Virta, jännite ja energia yhden yksikön oikosulussa suojaustasolla.

Tilannetta, missä kipinävälillä suojatulla virtamuuntajalla tulee suurin jänniterasitus ei tässä tapauksessa tarvitse tutkia. Venttiilisuojan hallittu käyttäytyminen jännitteen kasvassa estää korkeat jännitepiikit.

### Koko kondensaattorihaaran ohittava vika

Seuraavassa simuloinnissa tutkittiin tilanne, jossa valokaari oikosulkee kaikki yhden haaran kondensaattorit pariston jännitteen ollessa suojaustasolla. Kuvassa 6.10 on esitettyä tässä tilanteessa saadut tulokset. Tässä tapauksessa virtamuuntajan läpi menevä virta on varsin suuri. Virran suuruus on tehollisarvoltaan noin 2 kA. Kuitenkin kaavan 6.3 ja 6.4 avulla voidaan osoittaa, että myös CA-123 tyyppin muuntaja, jonka nimellinen 1 sekunnin terminen oikosulkuvirta on 800A, kestäisi todennäköisesti tämän virran. Kaavan mukaan virtamuuntajan tulisi kestää tämän suuruista virtaa vähintään 160 ms. Venttiilisuojaan kertyvä energia sen sijaan on LOVOS-10/280 tyyppille liian suuri. Simuloinnin mukaan energiaa kertyy 100 ms aikana hieman vajaat 10 kJ kun venttiilisuojuille määritelty energia 4/10  $\mu$ s virtaimpulsseissa on noin 2 kJ. Venttiilisuojuja on kuitenkin mahdollista saada myös suuremmalla energialuokituksella. Tällöin se sopisi varsin hyvin muuntajan suojuksi. Lisäksi on huomioitava, että koko haaran ohittava eristysvika on äärimmäisen harvinainen.



**Kuva 6.9.** Virrat, jännite ja energia koko kondensaattorihaaran oikosulussa suojaustasolla.

## 6.4 Johtopäätökset simuloinneista

Simulointien tarkoituksena oli tutkia, miten ensiön kipinäväli suojaa virtamuuntajaa korkeilta vikavirroilta erityyppisissä vioissa. Sen lisäksi käytiin läpi pahimmat mahdolliset tilanteet, joissa vaarana olisi virtamuuntajan kyllästymisestä johtuva suojausten toimimattomuus. Mallin antamien tulosten perusteella voidaan todeta, että oikein säädettynä kipinäväli tarjoaa riittävän suojan virtamuuntajalle kaikissa mahdollisissa vika-tilanteissa. Lisäksi simulointimallin ja sen avulla suoritettujen simulointien avulla saatiin varmuus, että mittaussydämellä varustettu virtamuuntaja kykenee ylläpitämään toisiovirtaa myös tilanteissa, joissa muuntaja ajautuu kyllästysalueelle. Tällöin muuntajan toisiovirta ei enää ole sinimuotoista, mutta vikavirran puolialtosymmetrisen luonteen vuoksi virtamuuntaja ei jää kyllästyneeseen tilaan ja suojausjärjestelmä saa indikaation viasta sarjaparistossa.

Venttiilisuojan kanssa tehdyistä simuloinneista saadut tulokset ovat erittäin positiivisia. Venttiilisuojiin toimivuutta käytännössä epäbalanssimuuntajan suojana kannattaisi kokeilla, sillä niiden etuna kipinäväliin verrattuna on tarkkaan määritelty käyttäytyminen ylijännitetilanteissa.

## 7 OPTISET VIRTAMUUNTAJAT

Perinteiset sähkömagneettiseen induktioon perustuvat muuntajat vaativat usein huomattavan suuret eristimet, jotta mittauspiiri voidaan luotettavasti eristää suurjännitteisestä päävirtapiiristä. Lisäksi kuparikaapeleissa kulkevat pienivirtaiset signaalit ovat alttiita johtoon kytkeytyville sähkömagneettisille häiriöille. Induktioon perustuvien virtamuuntajien valinta on usein kompromissi tarkkuuden, mittausalueen ja hinnan suhteen.

Näiden ongelmien ratkaisemiseksi optiset virtamuuntajat ovat kasvattaneet suosiotaan sovelluksissa, joissa virtaa mitataan korkeajännitteisistä sähköverkon osista. Optisissa virtamuuntajissa virtatieto siirretään digitaalisessa muodossa valokuitua pitkin, jolloin se ei ole alttiina sähkömagneettisille häiriöille. Optiset sensorit ovat huomattavasti kevyempiä ja pienempiä kuin perinteisten induktioon perustuvien virtamuuntajien rautasydämet. Tämä mahdollistaa kevyemmät eristinrakenteet jolloin virtamuuntajan koko pienenee huomattavasti. Lisäksi optisilla sensoreilla ei ole raudan magnetoitumisesta johtuvaa hystereesi- ja kyllästymisilmiötä, jolloin optisten sensoreiden vaste on hyvä sekä tasavirralla että epäsymmetrisillä virroilla. [15]

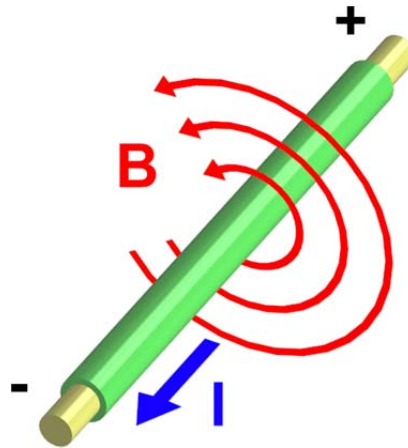
### 7.1 Toimintaperiaate

Tällä hetkellä kaikki saatavilla olevat optiset virtamuuntajaratkaisut perustuvat kahteen fysikaaliseen ilmiöön: virrallisen johtimen ympärilleen muodostamaan magneettikenttään ja Faradayn ilmiöön. Ilmiöt ovat hyvin tunnettuja mutta niiden hyödyntäminen virran mittauksessa edustaa tuoretta ja vielä kehitteillä olevaa tekniikkaa. [15]

#### 7.1.1 Ampéren laki

Johtimessa kulkeva virta luo ympärilleen magneettikentän Ampéren lain (kaava 7.1) mukaisesti. Virran muodostaman magneettikentän sulkeutuvat kenttäviivat kiertävät virrallista johdinta. Magneettikentän voimaviivat ovat virran kulkusuuntaan nähden kohtisuorassa kuvan 7.1 mukaisesti.

$$\oint_C B dl = \mu_0 I \quad (7.1)$$

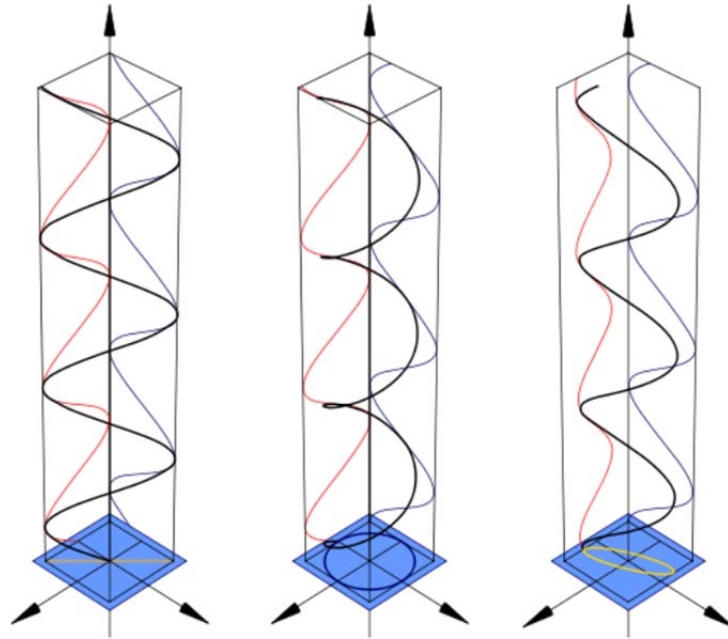


**Kuva 7.1.** Virrallisen johtimen ympärilleen muodostama magneettikenttä. [15]

Ampèren lain mukaisesti magneettivuon viivaintegraali suljetun silmukan läpi on suoraan verrannollinen johtimessa kulkevan virran suuruuteen. Mikäli siis on olemassa keino mitata magneettivuon tiheyttä, voidaan mitata myös johtimessa kulkevaa virtaa. [15]

### 7.1.2 Polarisaatio ja Faradayn ilmiö

Valoksi kutsutaan sähkömagneettisen spektrin osaa, joka voidaan nähdä ihmissilmällä. Valolle ominaisia suureita ovat amplitudi eli kirkkaus, aallonpituus eli väri sekä polarisaatio eli värähtelykulma. Polarisoimattoman valon sähkökenttä värähtelee sattumanvaraisesti joka suuntaan. Mikäli sähkökenttä värähtelee vain yhteen suuntaan, valo on polarisoitunutta. Sähkömagneettisen aallon sähkökenttä värähtelee aina valon kulkusuuntaan nähden kohtisuoraan ja magneettikenttä puolestaan sähkökenttää ja kulkusuuntaa vastaan kohtisuorassa kulmassa. Valo polarisoituu kun se heijastuu esimerkiksi lasista tai kulkee tietyistä aineista muodostettujen polarisaattoreiden lävitse. Polarisaattori päästää lävitseen vain tietyllä tavalla polarisoituneen valon. Sähkökentän komponentit värähtelevät tietyllä amplitudilla sekä  $x$ - että  $y$ -suuntiin, mutta molemmat ovat kohtisuorassa valon etenemissuuntaa  $z$  vastaan. Polarisaatiot voidaan jakaa kuvan 7.2 mukaisesti kolmeen eri polarisaation päätyyppiin. Sähkökentän  $x$ - ja  $y$ -komponenttien amplitudin suuruudesta ja keskinäisestä vaihesiirrosta riippuu syntyvän polarisaation tyyppi.



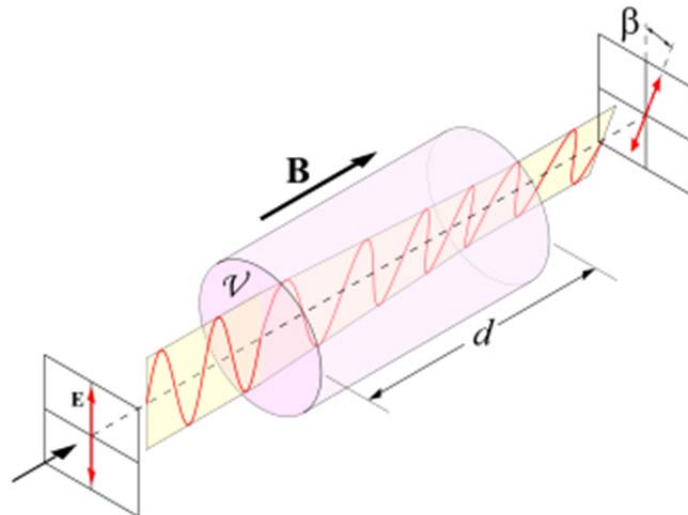
**Kuva 7.2.** Lineaari- ympyrä- ja elliptinen polarisaatio.

Lineaarisesti polarisoituneessa valossa sähkökentän  $x$ - ja  $y$ -komponenttien amplitudit ovat samansuuruiset ja ne ovat samassa vaihesiirrossa. Tällöin komponenttien summana syntyvä sähkökenttävektori värähtelee tasoon nähden vain yhteen suuntaan.

Ympyräpolarisaatiossa sähkökentän  $x$ - ja  $y$ -komponenttien amplitudit ovat yhtä suuret, mutta komponenttien välillä on  $90^\circ$  vaihesiirto. Komponenttien summana syntyvä sähkökenttävektori kiertyy tasoon nähden ympyrää. Kiertosuuntaa määrättyy siitä, kumpi sähkökentän komponenteista on vaihesiirrossa edellä.

Elliptisessä polarisaatiossa joko komponenttien amplitudit ovat erisuuret, tai niiden välillä oleva vaihekulma poikkeaa  $90^\circ$  vaihekulmasta. Sekä lineaari- että ympyräpolarisaatio ovat itse asiassa tietyillä ehdoilla toteutuvia erikoistapauksia elliptisestä polarisaatiosta.

Valon kulkiessa magneettikentässä, sen polarisaatiotaso kiertyy. Kiertymiskulma  $\beta_a$  on suoraan verrannollinen vallitsevaan magneettivuon tiheyteen  $B$ , materiaalin optisiin ominaisuuksiin  $V$  ja valon magneettikentässä kulkemaan matkaan  $d$ . Tätä ilmiötä kutsutaan nimellä Faradayn ilmiö. Kuvassa 7.3 on esitetty valon polarisaation kiertymiskulman mittauksessa käytetty periaate. Vakio  $V$  on aineelle ominainen suure, joka kuvaa Faradayn ilmiön voimakkuutta väliaineena toimivassa materiaalissa. [15, 16]



**Kuva 7.3.** Valon polarisaatiotason kiertyminen magneettikentässä [15]

Valon kiertymiskulma  $\beta$  riippuu siis kaavan 7.2 mukaisesti materiaalivakiosta  $v$ , magneettivuon tiheydestä  $B$  ja valon aineessa kulkemasta matkasta  $d$ . Materiaalivakio ja valon kulkema matka samassa sensorityypissä ovat vakioita, joten kiertymiskulma riippuu vain magneettivuon tiheydestä. Amperen lain mukaisesti taas magneettivuon tiheys on suoraan verrannollinen johtimessa kulkevan virran suuruuteen. Niinpä kiertymiskulman suuruutta mittaamalla saadaan tieto myös johtimessa kulkevasta virrasta. On huomattavaa, että magneettivuon tiheys ilmassa on lineaarisesti riippuvainen virrasta, joten raudalle ominaista kyllästymisilmiötä ei ole optisissa virtamuuntajissa. [15]

$$\beta_a = vdB \quad (7.2)$$

## 7.2 Alstomin optinen virtamuuntajateknologia

Alstomin kehittämä optinen virtamuuntajateknologia perustuu Faradayn ilmiöön. Perinteisesti optisissa virtamuuntajissa on hyödynnetty valon lineaarisesta polarisaatiota mittaamalla lineaarisesti polarisoituneen valon polarisaatiotason kiertymiskulmaa kuten kuvassa. Kiertymiskulman avulla on saatu tieto magneettikentän voimakkuudesta mikä taas on suoraan verrannollinen johtimessa kulkevan virran suuruuteen. Alstomin käyttämässä teknologiassa hyödynnetään ympyräpolarisoituneen valon nopeuden muutosta riippuen magneettikentän voimakkuudesta. Alstomin kokemusten mukaan on helpompi ja tarkempi mitata tarkasti valon nopeutta kuin polarisaation kiertymiskulmaa.

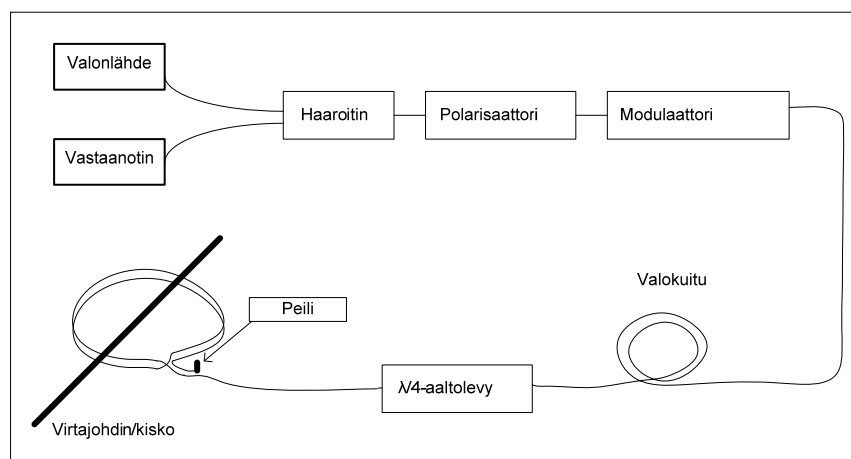
### 7.2.1 Mittauksen teoria

Kuvassa 7.4 on esitetty optisessa virran mittauksessa käytetty mittauspiiri. Lähetinyksikössä valo ohjataan optiseen kuituun. Tämän jälkeen valo ohjataan polarisaattoriin, jossa valo jaetaan kahteen kohtisuoraan toisiinsa nähden polarisoituneeseen aaltoon (x ja y-



komponentit). Polarisoituneet aallot viedään tämän jälkeen modulaattoriin, missä vaihe-  
siirtoinformaatio liitetään mittaukselle menevään korkeataajuiseen kanta-aaltoon. Lineaaripolarisoituneet aallot jatkavat matkaansa virrallisen johtimen ympärille käärittynyt mittapäänä toimivaan sensoriin. Sensorikuidun loppupäässä lineaarisesti polarisoituneet aallot jatkavat matkaansa kaksoistaittavasta materiaalista valmistettuun  $\lambda/4$ -aaltolevyyn, jossa valo jakautuu kahteen toisiinsa nähden eri kiertosuuntaan pyörivään ympyräpolarisoituneeseen aaltoon. Lineaarisesti polarisoituneen valon x-komponentti saa kiero-suunnakseen oikeakätisen polarisaation ja y-komponentti puolestaan vasenkätisen ympyräpolarisaation. Magneettikentän vaikutuksesta ympyräpolarisoituneen valon nopeudessa tapahtuu muutos, joka on verrannollinen magneettivuon tiheyteen. Nopeuden muutos riippuu polarisaation kiertosuunnasta.

Sensorikuidun lopussa on peili, josta aallot heijastuvat takaisin. Heijastuksessa valon polarisaation kiertosuunta kääntyy ja aallot kulkevat vastakkaiseen suuntaan suhteessa magneettikenttään. Polarisaation kiertosuunnan muutoksen seurauksena aaltojen nopeudessa tapahtunut muutos säilyy aaltojen paluumatkalla magneettikentän vaikutuksesta huolimatta. Aallot kulkevat takaisin  $\lambda/4$ -aaltolevyn läpi missä ne muunnetaan jälleen lineaarisesti polarisoituneiksi aalloiksi. Sensoripäässä tapahtuneen heijastuksen vuoksi lineaarisesti polarisoituneiden aaltojen komponentit ovat päinvastoin kuin lähtiesä. Aallot kulkevat siis täsmälleen saman matkan. Vastaanotinpäässä aaltojen vaihe-  
siirtoinformaatiosta lasketaan valon matkaan käyttämä aika. Tähän matkaan käytettyyn aikaan vaikuttaa vain sensorin alueella vallitseva magneettivuon tiheys. Valon matkaan käyttämän ajan muutoksesta voidaan päätellä magneettivuon tiheys ja sen myötä myös johtimessa kulkevan virran suuruus. Tällä tekniikalla valon kulkuajassa pystytään havaitsemaan jopa  $10^{-21}$  sekunnin ero. Mittauksen ryhmäviive, eli aika joka menee kuluu johtimessa tapahtuvasta virran muutoksesta siihen, että mittaustieto havaitaan sensorilla on  $11,5 \mu\text{s}$ . [16]



**Kuva 7.4.** Optisen virranmittauksen mittaussiiri. [16]

## 7.2.2 Käytännön mittausjärjestelmä

Virran mittaukseen käytetty sensori koostuu virtajohtimen tai kiskon ympärille kääritystä sensorikuidusta. Sensorikuidun ympärillä tulee olla johtamattomasta materiaalista valmistettu mekaaninen suoja. Koska ilmiön voimakkuuteen vaikuttaa valon magneettikentässä kulkema matka, voidaan sensorin herkkyyttä lisätä kiertämällä sensorin kuitukaapeli useita kertoja virrallisen johtimen ympärille.

Alstomin tekniikka on suunniteltu käytettäväksi 3-vaiheiseen virran mittaukseen. Jokainen mittaussensori tulee kytkeä maatasossa keskusyksikköön (merging unit) joka muuntaa sensoreiden antaman tiedon standardimuotoiseksi analogiseksi tai digitaaliseksi mittaustiedoksi. Yhteen keskusyksikköön voidaan kytkeä vain 3 sensoria. Digitaalisessa mittaustiedon siirrossa keskusyksikkö käyttää standardin IEC 60850-9 määrittelemää protokollaa. Analogiset ulostulovaihtoehdot ovat 1/5A virta tai vaihtoehtoisesti  $\pm 11,3$  V jännite. Sensorin pienestä ryhmäviihteestä huolimatta keskusyksikön näytteenottotaajuus on vain 80 näytettä/jakso, mikä johtaa 50 Hz verkkotaajuudella siihen, että näyte virran suuruudesta otetaan 250  $\mu$ s välein. Järjestelmän näytteenottotaajuus on riittävä tavanomaisiin verkon suojaustoimintoihin, mutta sarjapariston erittäin pientä viivettä vaativat mittaukset kuten metallioksidivariistorin virta täytyisi saada mitattua nopeammin. Sen sijaan suojauksissa, joissa mittauksen nopeus ei ole kriittinen tekijä, voitaisiin optista virran mittausta hyödyntää. Tällaisia mittauksia sarjaparistossa on epäbalanssivirran mittausta, kipinävälivirran mittausta.

Koska yksi keskusyksikkö pystyy huolehtimaan vain kolmesta mittaussensorista, sarjapariston kaikkien mittausten toteuttaminen optisella virtamuuntajaratkaisulla vaatii suuren määrän keskusyksikköjä. Esimerkiksi Wardha-Aurangabad projektissa, jossa on kaksi 3-vaiheista sarjaparistoa, tarvittavat määrät täysin kahdennetulle järjestelmälle olisi 36 muuntajaa ja siten siis 12 keskusyksikköä. Muuntajien suureen määrään vaikuttaa ratkaisevasti sähköverkkoyhtiöille tyypillinen vaatimus sarjapariston suojausjärjestelmän kahdennuksesta. Induktioon perustuvilla mittamuuntajilla kahdennusmittauksessa voidaan toteuttaa kahdella muuntajasydämellä joilla on yhteinen ensiökäämi. Optisten virtamuuntajien tapauksessa tämä ei onnistu, vaan sensoreita tarvitaan kaksi kappaletta yhtä mittausta kohden. Tämä lisää vaadittavaa muuntajien määrää ja siten myös kustannuksia ratkaisevasti.

## 7.2.3 Kustannusten vertailu

Mikäli sarjapariston kaikki virtamuuntajat korvattaisiin optisilla virtamuuntajilla, vaatisi se paljon kehitystyötä ja erityisesti muuntajien luotettavuuteen liittyviä tarkasteluja. Taulukossa 7.1 on vertailtu nykyisen ja optisen virranmittauksen eroja kustannusten kannalta. Vertailu on tehty suhteellisarvoja käyttämällä, sillä euromääräisiä hintoja ei haluttu julkaistavan. Taulukosta huomataan, että suojauksen kahdennusvaatimuksen vuoksi kaikkien muuntajien korvaaminen optisilla ei vaikuta tällä hetkellä kustannustehokkaalta vaihtoehdolta. Muuntajien tämänhetkinen yksikköhinta ei ole kilpailukykyinen verrattuna perinteiseen virtamuuntajateknologiaan perustuviin rengastyyppeihin

muuntajiin, joita sarjapariston kaikissa mittauksissa käytetään epäbalanssimittausta lukuun ottamatta. Lisäksi on huomioitava, että Alstomin käyttämä sarjapariston suojaki-  
pinävälän sytytyslektronikka tarvitsee tehölähdemuuntajaa, joten sitä tarvittaisiin vaika kaikki mittauksiin käytettävät virtamuuntajat olisivat optisia. Taulukon mukaisesti nykyisellään optiset virtamuuntajat eivät ole kustannusmielessä järkevä ratkaisu. Näiden kulujen lisäksi tulee luonnollisesti lisäksi tuotekehityskuluja, joita uuteen teknologiaan siirtyminen välttämättä toisi mukanaan.

**Taulukko 7.1.** Virtamittauksen kustannusrakenteiden vertailu.

Virtamittauksen kustannusrakenne / paristo										
Virtamuuntajat:	Nykyinen systeemi				Optiset virtamuuntajat					
	Hinta		kpl	Yhteensä		Hinta		kpl	Yhteensä	
Linjavirtamuuntaja	1,0	pu	3	3,0	pu	5,7	pu	6	34,5	pu
Kipinävälän virtamuuntaja	1,0	pu	3	3,0	pu	5,7	pu	6	34,5	pu
Lavasulku virtamuuntaja	1,0	pu	3	3,0	pu	5,7	pu	6	34,5	pu
Varistorihaaran virtamuuntaja	1,4	pu	3	4,3	pu	5,7	pu	6	34,5	pu
Epäbalanssimuuntaja	6,3	pu	6	37,9	pu	5,7	pu	12	69,0	pu
Tehonsyöttömuuntaja	1,5	pu	3	4,5	pu	1,5	pu	3	4,5	pu
<b>Signaalinsiirto:</b>										
Signaalikolumni	5,1	pu	6	30,3	pu	5,1	pu	6	30,3	pu
Kuidut / 1km	8,9	pu	2	17,7	pu	8,9	pu	2	17,7	pu
<b>Lavaelektronikka:</b>										
Lavakaapit	2,5	pu	6	15,2	pu	2,5	pu	6	15,2	pu
Elektronikka	1,7	pu	6	10,3	pu	0,2	pu	6	1,4	pu
<b>Maatason elektronikka:</b>										
Tehonsyöttölaser	1,6	pu	2	3,2	pu	-				
Elektronikka	1,1	pu	2	2,3	pu	-				
	<b>Yhteensä:</b>			<b>135</b>	<b>pu</b>	<b>Yhteensä:</b>			<b>276</b>	<b>pu</b>

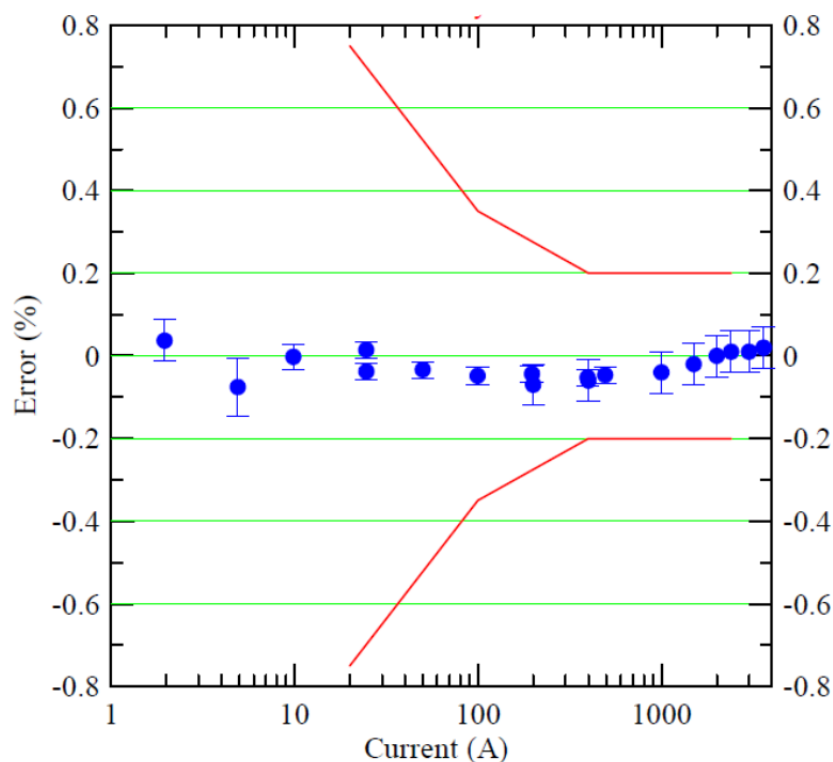
### 7.3 Optinen virtamuuntaja epäbalanssimittauksessa

Epäbalanssimuuntaja on sarjapariston kallein yksittäinen muuntaja. Suuremmissa sarjaparistoissa epäbalanssimuuntajalta vaadittavan eristystason vuoksi joudutaan käyttämään suuria ja painavia öljy-paperieristeisiä muuntajia, jolloin myös niiden hinta kasvaa.

Sarjapariston epäbalanssivirran mittaukseen optinen virtamuuntajaratkaisu soveltuisi varsin hyvin. Koska optisessa virtamuuntajassa ei ole ollenkaan induktioon perustuvien muuntajien kaltaista ensiökäämitystä, ei vikavirran vaikutuksia muuntajaan tarvitse huomioida. Lisäksi muuntajan eristystaso olisi erittäin helposti valittavissa pidentämällä sensoria tukevaa eristintä. Optisten virtamuuntajien etuna on muokattavuus;

sensoreilla ei ole kiinteitä muuntosuhteita vaan asetukset määritellään halutuiksi anturin asennusvaiheessa. Tästä johtuen samaa sensoria voidaan käyttää hyvin erisuuruisten virtojen mittaukseen. Optiset virtamuuntajat eivät kärsi kyllästymisilmiöstä, vaan niiden vaste on lineaarinen mitattavan virran suuruudesta riippumatta.

Optinen virtamuuntaja on hyvin tarkka myös pienillä virroilla. Kuvassa 7.5 on esitetty mitattu tarkkuuskäyrä virtamuuntajalle, joka on suunniteltu mittaamaan 2 A – 3600 A virrat. Kuvaajassa siniset pisteet ovat mitattuja arvoja ja punaiset viivat kuvaavat virtamuuntajalle sallittua virhettä tarkkuusluokassa 0.2S. Kuvasta voidaan päätellä, että virtamuuntaja on hyvin tarkka myös nimellisvirtaan nähden pienillä virran arvoilla. Tämä ominaisuus on tarpeen myös epäbalanssimittauksessa. [18]



**Kuva 7.5.** Optiselle virtamuuntajalle (NXCT) mitattu tarkkuuskäyrä. [18]

## 7.4 Optisen virtamuuntajan tulevaisuudennäkymät

Tällä hetkellä optiset virtamuuntajat ovat vielä perinteisiin virtamuuntajiin nähden huomattavan kalliita. Sarjaparistosovelluksessa etuna on se, että monissa mittauksissa voidaan käyttää pienjännitemuuntajia sillä itse virtamuuntaja on asennettu siirtoverkon jännitteen tasossa olevaan sarjapariston lavarakenteeseen. Tämä tuo mittausjärjestelmään huomattavan säästön verrattuna normaaleihin sähköverkon mittauksiin, joissa virtamuuntajilta vaaditaan korkeat eristystasot.

Optisista virtamuuntajista on tekniikan tuoreuden vuoksi varsin vähän luotettavuustietoa. Sarjaparistoon asennettu virtamuuntaja joutuu alttiiksi varsin koville ympäristöolosuhteille, mekaanisille rasituksille sekä lämpötilanvaihtelulle. Optisten virtamuuntajien pitkän aikavälin luotettavuudesta ei ole riittävästi tietoa, jotta yksittäinen mittaus voitaisiin kokonaan korvata optisella muuntajalla. Sen sijaan olisi suositeltavaa, että yksittäinen optinen virtamuuntaja asennettaisiin koekäyttöön sarjaparistolle tavallisen virtamuuntajan rinnalle. Näin saataisiin lisätietoa laitteen ominaisuuksista, häiriöistä ja käyttövarmuudesta. Kuten edellä todettiin, parhaiten optinen virtamuuntaja soveltuisi juuri epäbalanssivirran mittaukseen. Kuitenkin koekäytössä olisi suotavaa, että virtamuuntaja asennettaisiin mittaamaan esimerkiksi linjavirtaa. Epäbalanssivirran mittauksen ongelmana on se, että normaalitilanteessa virtaa ei kulje jolloin mittauksesta saatu lisätieto muuntajan tarkkuudesta ja dynaamisesta käyttäytymisestä jäisi varsin vähäiseksi.

## 8 YHTEENVETO

Sarjapariston toiminnan luotettavuus on verkon tehokkaan käytön kannalta erittäin tärkeää. Mikäli linjalle asennettu sarjaparisto ei ole käytettävissä, joutuu verkkoyhtiö usein rajoittamaan linjan suurinta mahdollista tehonsiirtoa. Epäbalanssivirran mittauksella pyritään suorittamaan sarjapariston kondensaattoreiden reaaliaikaista kunnonvalvontaa. Virran mittaus on normaalia hankalampaa, sillä mitattavat virrat ovat hyvin pieniä ja mittaus on altis häiriöille. Kuitenkin vikatapauksissa, jolloin virta voi olla hyvinkin suuri, virtamuuntajan on pystyttävä antamaan viasta tieto suojausjärjestelmälle. Tämän lisäksi itse virtamuuntajan on kestävä vikavirran termiset ja dynaamiset vaikutukset.

Työssä perehdyttiin virtamuuntajien toimintaperiaatteeseen ja selvitettiin parametrien vaikutusta virtamuuntajan toimintaan. Tavoitteena oli määrittellä epäbalanssivirran mittaukseen tarvittavat virtamuuntajan ominaisuudet ja selvittää virtamuuntajan ylijännitesuojana toimivan kipinävälän toimintaperusteet. Lisäksi pohdittiin vaihtoehtoisia keinoja suojata virtamuuntajaa ylijännitteiltä. Kondensaattorien epäbalanssivikojen syntyä ja virtojen suuruutta sekä käyttäytymistä mallinnettiin kolmikapasitanssimallin avulla.

Työn tuloksena saatiin selville epäbalanssimuuntajalta vaadittu todellinen tarkkuus. Voidaan todeta, että jo tarkkuusluokan 1 virtamuuntaja riittäisi monesti epäbalanssivirran mittaustarkkuudeksi. Virtamuuntajan ei tarvitse kyetä mittaamaan tarkasti suuria vikavirtoja, mutta sen tarvitsee kyetä toistamaan riittävän suurta toisiovirtaa jotta suurivirtainen vika pystytään huomaamaan. Tähän tarkoitukseen soveltuu myös pelkällä mittaussydämellä varustettu muuntaja, kunhan toision taakka on kohtuullisen pieni.

Suojalaitteena toimivan kipinävälän tarkan toiminnan selvittämiseksi saatiin varmuus siitä, että se kykenee suojaamaan virtamuuntajan ylijännitteiltä suurivirtaisissa vioissa. Kipinävälille selvitettiin syttymisjännitteet ja tilastollisen tarkastelun avulla selvitettiin todennäköisyydet, joilla kipinäväli toimii eri jännitteillä. Kipinävälän oikean säädön varmistamiseksi työssä olevassa laskennassa huomioitiin sähköasemalla vallitsevien ilmastollisten olosuhteiden vaikutus kipinävälän syttymisherkkyteen.

Vaihtoehtoisena ylijännitesuojana esiteltiin venttiilisuoja, jonka toimintaa mallinnettiin simulointimallin avulla. Simulointien perusteella metallioksidiventtiilisuoja soveltuisi hyvin epäbalanssimuuntajan suojaksi tyypillisissä epäbalanssitilanteissa. Venttiilisuojan etuna kipinävälään verrattuna on hallittu käyttäytyminen ylijännitteillä ja edullinen hinta. On suositeltavaa, että venttiilisuojuille suoritettaisiin käytännön testejä, sillä se voisi olla hyvä vaihtoehto grafiittikipinävälille.

Diplomityössä tutkittiin myös optisen virtamuuntajateknologina tuomia mahdollisuuksia sarjapariston virran mittauksessa. Työssä tehdyn kartoituksen perusteella optinen

virtamuuntajavaihtoehto ei tällä hetkellä ole kustannustehokas vaihtoehto. Jotta optisia virtamuuntajia voitaisiin jatkossa käyttää, niistä tulisi hankkia riittävästi luotettavuustietoa ja käyttökokemusta.

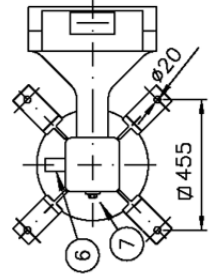
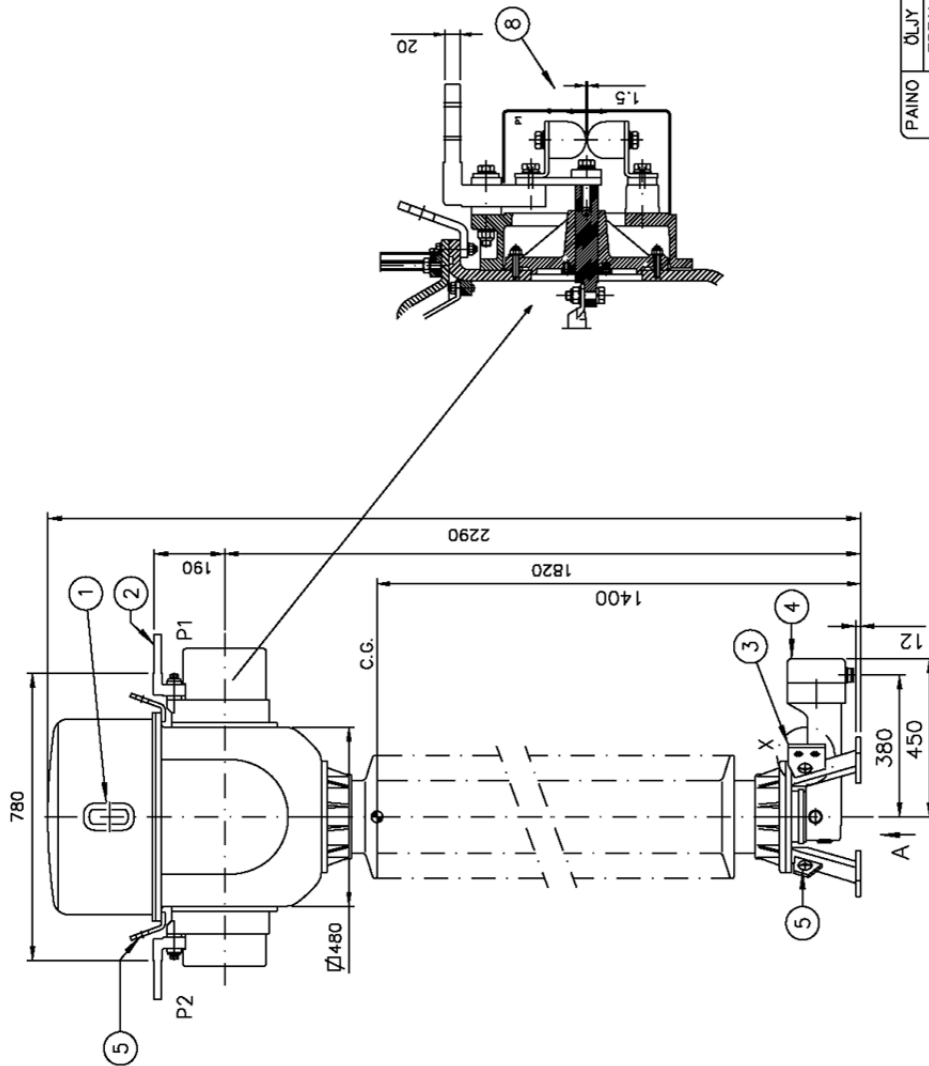
## LÄHTEET

1. Kothari D.P, Nagrath, I.J. Modern power system analysis, third edition. New Delhi 2003, Tata McGraw-Hill Publishing Company Ltd. 694 s.
2. Anderson P.M, Farmer R.G, Series Compensation of Power Systems, Encinitas, California 1996, PBLSH! Inc. 559 s.
3. Elovaara J, Haarla L, Sähköverkot II Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Tallinna 2011, Gaudeamus Helsinki University Press / Otatieto. 550 s.
4. IEC 60143-1: Series capacitors for power systems - Part 1: General, International Standard, 1st edition 2004, 128 s.
5. IEC 60143-2: Series capacitors for power systems - Part 2: Protective equipment for series capacitor banks, International Standard, 1st edition 1994, 101 s.
6. Aro M, Elovaara J, Karttunen M, Nousiainen K, Palva V, Suurjännitetekniikka, Jyväskylä 2003, Yliopistokustannus / Otatieto, 520 s.
7. Nousiainen K, TTY luentomateriaali - Magneettipiirit ja muuntajat
8. ARTECHE - Introduction to instrument transformers. Virtamuuntajavalmistajan oma julkaisu.
9. IEC 60044-1: Instrument transformers - Part 1: Current transformers. Edition 1.2 2003, 116 s.
10. IEEE C57.13, Standard Requirements for Instrument transformers. International Standard, 2008, 96 s.
11. ABB Teknisiä Tietoja ja Taulukoita – käsikirja. ABB Oy 2007. 632 s.
12. Silvonen K, Sähkötekniikka ja elektroniikka, Helsinki 2003, Otatieto. 511s.
13. Lahti K, Tampere University of Technology Test report No 031/11 August 26, 2011, 4 s.



14. ABB Lovos 5 & Lovos 10 catalogue, saatavissa:  
[http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/95ec07228eada168c125762f006c5106/\\$file/lovos\\_catalogue\\_2127p1197-w1\\_09-2009-en.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot245.nsf/veritydisplay/95ec07228eada168c125762f006c5106/$file/lovos_catalogue_2127p1197-w1_09-2009-en.pdf)
15. Retz E, Boucherin M, Compact Optical Sensor Intelligence presentation, 2013.
16. J. Blake, W. Williams, C. Glasow, R. Bergh, K. Fetting, E. Hadley, and G. Sanders, Optical Current Transducers for High Voltage Applications, NxtPhase Corporation, 7 s
17. IEC 60865-1: Short-circuit currents – Calculation of currents Part 1: Definitions and calculation methods. Second Edition 1.2 1993, 120s.
18. F. Rahmatian, J. Blake, Applications of High-Voltage Fiber Optic Current sensors. IEEE julkaisu, 2005, 6 s.

- ① Öljytason ilmaisin
- ② Ensisiilitin
- ③ Maadotusliitin
- ④ Toisiokatelo
- ⑤ Nostokorvakkeet
- ⑥ Öljynöyryteen ottoventtiili
- ⑦ Testausliitin
- ⑧ Ylijännitesuoj (vipinäkö)



ARTECHE		VIRTAMUUNTAJA		CA-123	
ARTECHE		VIRTAMUUNTAJA		4285306	

