

SARJAPARISTON TYYPPI- JA RUTIINITESTAUKSEN KEHITTÄMINEN

Janne Holla

Opinnäytetyö
Toukokuu 2012
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

TEKIJÄN NIMI: Janne Holla
Sarjapariston tyyppi- ja rutiinitestauksen kehittäminen

Opinnäytetyö 51 sivua, josta liitteitä 11 sivua
Toukokuu 2012

Sarjaparisto on sähkönsiirtoverkkoon asennettava järjestelmä, jolla parannetaan tehonsiirtokapasiteettia ja verkon stabiiliutta. Sarjaparisto koostuu useista komponenteista, jotka rutiini- ja tyyppitestataan asiakkaan ja standardien vaatimusten mukaisesti. Opinnäytetyössä keskitytään sarjapariston kipinävälin ja vaimennuspiirin sekä signaalikolumnin testaukseen.

Sarjapariston suojalaitteiden testaaminen on määritelty standardissa IEC 60143-2 ”*Series capacitors for power systems – part 2. Protective equipment for series capacitor banks*”. Nykyinen ja voimassaoleva standardi on vuodelta 1994 ja se tulee uudistumaan lähitulevaisuudessa.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli vertailla nykyisen ja tulevan standardien versioita sekä selvittää erityisesti uuden standardiversion vaikutusta komponenttien testaukseen. Tehtävänä oli lisäksi kartoittaa sarjaparistotestaukseen soveltuvia testilaboratorioita Euroopasta. Laboratorioselvityksen apuna käytettiin mm. INMR-lehden julkaisua, jossa oli listattu Euroopan suurjännite- ja suurteholaboratorioita.

Tarkempi laboratorioresurssien selvitys toteutettiin erillisen kyselyn avulla. Kysely lähetettiin yli kahteenkymmeneen laboratorioon ympäri Eurooppaa. Saatujen vastausten ja INMR-lehden perusteella laboratorioresursseista koostettiin yhteenveto, jonka avulla voidaan säästää aikaa ja kustannuksia, kun etsitään ja kilpailutetaan testilaboratorioita sarjaparistokomponenttien testaukseen.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Electrical Engineering
Electrical Power Engineering

AUTHOR : Janne Holla
Development of Fixed Series Capacitor Routine and Type Testing

Bachelor's thesis 51 pages, appendices 11 pages
May 2012

Series capacitor bank is a system, which improves the power transmission capacity and network stability. The series capacitor consists of several components which are routine and type tested in accordance with customer requirements and standards. The specific interest in this Thesis is on spark gap, damping circuit and signal column, which are components of a series capacitor bank.

IEC standard 60143-2 "*Series capacitors for power systems – part 2. Protective equipment for series capacitor banks*" defines the testing of series capacitor bank protection devices. The existing and valid standard is published in 1994 and it is going to be revised in near future.

The purpose of this Thesis was to compare the old and the future version of the standard and find out especially the influence of the new standard in equipment testing. In addition another task was to seek test laboratories for these components within Europe. An INMR magazine with the list of European high voltage and high power laboratories was used as a source in the laboratory survey.

A detailed laboratory survey was executed by a separate query. The query was sent to over twenty laboratories all over the Europe. A summary chart was created based on the information received by the survey and information gathered from the INMR magazine. The chart will help in the future when appropriate testing laboratories for series capacitor components are searched and quoted.

Key words: Series capacitor, routine testing, type testing, high power laboratory, high voltage laboratory, IEC 60143-2.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	SARJAKOMPENSOINTI SIIRTOLINJALLA	7
2.1	Tehonsiirto linjalla.....	7
2.2	Sarjapariston toiminta ja vaikutukset sähköverkkoon	8
2.3	Sarjapariston sijoitus siirtolinjalle ja kompensointiaste.....	9
2.4	Sarjapariston vikatilanteet.....	12
2.5	Sarjapariston rakenne ja komponentit.....	13
2.5.1	Kondensaattorit	15
2.5.2	Metallioksidivaristorit.....	15
2.5.3	Kipinäväli.....	16
2.5.4	Vaimennuspiiri.....	17
2.5.5	Ohituskatkaisija.....	17
2.5.6	Signaalikolumni	17
3	TESTAUSTEKNIikka	19
3.1	Suurjännitelaboratoriot	19
3.2	Suurteholaboratoriot	21
3.3	Testien määrittelyjä.....	21
4	SARJAKONDENSAATTORIN SUOJALAITESTANDARDI IEC 60143-2	24
4.1	Yleistä standardista IEC 60143-2 1994	24
4.2	Standardiversioiden 1994 ja 2011 vertailu	26
4.2.1	Kipinäväli.....	26
4.2.2	Vaimennuspiiri.....	28
4.2.3	Signaalikolumni	30
5	LABORATORIOKYSELY JA TULOSTEN TUTKIMINEN	32
5.1	Suurteholaboratoriot	33
5.2	Suurjännitelaboratoriot	35
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	38
	LÄHTEET.....	40
	LIITTEET	41
	Liite 1. Laboratoriokysely.	41
	Liite 2. Standardivertailutaulukko.....	50
	Liite 3. Laboratorioresurssitaulukko.....	51

ERITYISSANASTO

CDV	Yhdistetty lausunto- ja äänestyskierrös, Committee Draft for Voting
DMOV	Vaimennuspiirin MOV
δ_1	Lähtävän pään tehokulma
δ_2	Vastaanottavan pään tehokulma
I	Linjavirta
IEC	Kansainvälinen sähkötekniikan komissio, International Electrotechnical Commission
K1, M1, M2	Standardin mukaisia suojausluokituksia
k_{SC}	Kompensointiaste
MOV	Metallioksidivaristori, Metal Oxide Varistor
peak	Huippuarvo
PET	Power Electronics Tampere
P	Linjalla kulkeva pätöteho
pu	yksikköarvo, per unit
Q_{SC}	Sarjapariston tuottama loisteho
rms	Tehollisarvo
SC	Sarjaparisto, series capacitor
U_1	Lähtävän pään jännite
U_2	Vastaanottavan pään jännite
U_{Lim}	Suojaustason jännite
VAr	Loistehon yksikkö
X	Kokonaisreaktanssi
X_L	Siirtolinjan reaktanssi
X_{SC}	Sarjapariston reaktanssi

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön lähtökohtana oli Alstom Grid Oy:n sarjaparistokomponenttien testaus-tarpeen huomioiminen ja siihen valmistautuminen. Tarve on jatkuvaa sekä määrät muut-tuvat ja kasvavat. Laboratorioiden laitteistot ja testikapasiteetit muuttuvat ja niiden käyt-töasteet vaihtelevat. Ajankohtainen tieto laboratorioiden kyvystä ja käytettävyydestä on tärkeää. Työn tarkoituksena oli selvittää eurooppalaisten testilaboratorioiden soveltu-vuutta rutiini- ja tyyppitestaukseen kyselyn avulla. Selvityksellä pyrittiin kartoittamaan laboratorioiden ominaisuuksia ja saamaan tietoa eri laboratorioiden kyvystä suorittaa testejä.

Kysely tehtiin IEC-standardien pohjalta. Tärkeimpänä käytettiin IEC-standardia 60143-2:2011, joka on vielä CDV-versio (committee draft for voting). Selvityksen myötä saa-dun informaation pohjalta luotiin esitys testauskapasiteetista ja soveltuvista laborator-iosta sekä tietopankki, johon on koottu laboratorioiden esitteitä ja tietoa mahdollisista testauspaikoista. Komponentteja on testattu aikaisemmin joissain kyselyssä mukana olleista laboratorioista.

Opinnäytetyö on tehty Alstom Grid Oy:n PET-yksikölle (Power Electronics Tampere). Alstom Grid Oy on aiemmin toiminut nimellä Nokian Capacitors Oy. Yksikkö on toi-mittanut sarjaparistoja maailmanlaajuisesti 1960-luvulta lähtien. PET:n tuotteisiin kuu-luvat myös staattiset loistehon kompensointit ja staattiset synkroniset loistehonkom-pensaattorit.

Työn alussa, luvussa kaksi tutustutaan tehonsiirtoon ja tehohäviöiden syntymiseen siir-tolinjalla. Tämän jälkeen tutustutaan sarjaparistoon, sen toimintaan sekä sen vaikutuk-siin sähkönsiirtoverkossa. Lisäksi selvitetään sarjapariston toiminnan kannalta tärkeim-mät komponentit. Kolmas luku käsittelee testaustekniikkaa ja siihen liittyviä mittausjär-jestelyitä. Luvussa käydään lyhyesti läpi suurten virtojen ja jännitteiden tuottaminen laboratorio-oloissa. Tämän jälkeen luvussa 4 käydään läpi sarjakondensaattorin suoja-laitestandardi IEC 60143-2. Luvussa 4 esitellään nykyisen vuodelta 1994 olevan version erot lähiaikoina julkaistavaan 2011 versioon nähden kipinävälin, vaimennuspiirin ja signaalikolumnin kannalta. Lopuksi käsitellään työn tuloksena saatua tietoa ja kerrotaan opinnäytetyöprosessin vaiheista.

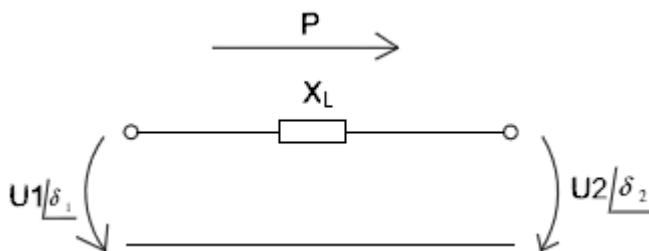
2 SARJAKOMPENSOINTI SIIRTOLINJALLA

2.1 Tehonsiirto linjalla

Siirtolinjoilla siirretään sähköenergiaa sähköasemien välillä. Siirtolinja on yleensä pitkä verrattuna jakelulinjaan. Esimerkiksi Suomessa kulutus- ja tuotantopisteiden välinen matka on suhteellisen pitkä. Siirto- ja jakeluverkkojen tarkoitus on yhdistää tuotanto ja kulutus mahdollisimman kustannustehokkaasti. Tämä tarkoittaa linjahäviöiden minimoimista. Linjan häviöt koostuvat johdon resistanssissa syntyvästä pätötehohäviöstä ja johdon induktiivisessa reaktanssissa syntyvästä loistehohäviöstä. (Elovaara & Haarla 2011, sv1 s. 218 -220, 222, Elovaara & Laiho 1999, s. 29-30)

Siirtolinjan häviöitä tarkastellaan yksinkertaisen esimerkin avulla. Oletetaan esimerkiksi alle 100 km ja 400 kV:n siirtolinja, jolloin johdon induktiivinen reaktanssi X_L on määrävin tekijä johdon häviöiden kannalta. Tässä jännitetasossa reaktanssi X_L on noin kymmenen kertaa suurempi, kuin johdon resistanssi R_L . Lisäksi alle 100 km linjojen laskennassa voidaan jättää huomioimatta johdon konduktanssi ja kapasitanssi maata vasten. (Elovaara & Haarla 2011, sv1 s.218-220)

Yksinkertaistetussa tilanteessa kahden solmupisteen välisen siirtolinjan sijaiskytkentä näyttää kuvion 1 mukaiselta.



Kuvio 1. Siirtolinjan sijaiskytkentä.

Tilanteessa, jossa johdolla vaikuttaa vain reaktanssi, pätötehoa siirtyy vain silloin, kun johdon alku- ja loppupään jännitteiden välillä on kulmaeroa. Kuvioista 1 päästään tehokulmayhtälöön, joka on esitetty alla

$$P = \frac{U_1 * U_2}{X_L} * \sin(\delta_1 - \delta_2) , \text{ missä} \quad (1)$$

P on johdolla siirrettävä pätöteho

U_1, U_2 ovat johdon alku- ja loppupään jännite

X on johdon induktiivinen reaktanssi

$(\delta_1 - \delta_2) = \delta_{12}$ on alku- loppupään jännitteiden välinen kulmaero

Mikäli näiden kahden solmupisteen jännitteiden välillä on eroa pelkästään itseisarvoissa, siirtyy linjassa vain loistehoa. Tehonsiirtokulman täytyy olla $0^\circ \leq \delta_{12} \leq 90^\circ$, jolloin pätötehoa siirretään stabiililla alueella. Yli 90° kulmaero on epästabiili tila ja linjalla siirtyisi loistehoa lähes kaksinkertainen määrä pätötehoon verrattuna. Teoreettinen tehonsiirtokapasiteetin maksimi saavutetaan 90° kulmaerolla, mutta käytännön raja kulmaerolle on noin 30° . Tällöin loistehoa siirtyy noin puolet siirrettävästä pätötehosta. (Elovaara & Haarla 2011, sv1 s.218-220)

2.2 Sarjapariston toiminta ja vaikutukset sähköverkkoon

Sarjaparisto on kondensaattoriparisto, joka sijoitetaan nimensä mukaisesti sarjaan siirtolinjan kanssa. Tällöin linjalle lisätään kapasitiivista reaktanssia, jolla kompensoidaan linjassa aiheutuvaa induktiivista reaktanssia. Kokonaisreaktanssi on silloin $X = X_L - X_{SC}$. Kaavassa (1) on esitetty kompensoimattoman linjan yhtälö. Kaava (1) muuttuu alla esitettyyn kaavan (2) muotoon, kun kapasitiivinen reaktanssi X_{SC} lisätään siirtolinjalle

$$P = \frac{U_1 * U_2}{X_L - X_{SC}} * \sin \delta_{12} \quad (2)$$

Kun linjalle tuodaan sarjaparisto, jonka kapasitiivinen reaktanssi on puolet linjan reaktanssista, pätötehoa rajoittava siirto johdon reaktanssi puolittuu ja tehoa siirtyy kaksinkertainen määrä kulmaeron δ_{12} pysyessä samana. (Elovaara & Haarla 2011, sv2 s.232)

Sarjaparisto parantaa sähköverkon stabiiliutta varsinkin pitkällä siirtoyhteysillä. Pitkiin siirtoyhteyksiin liittyy usein kulma- ja jännitestabiiliusongelmia, jossa jännitteet heilahtelevat tai laskevat huomattavasti. Jännitestabiilius liittyy pääosin siirto johdon kuluttamaan ja tuottamaan loistehoon. Sarjaparisto nostaa jännitettä. Kulmastabiiliudella tarkoitetaan alku- ja loppupään välisen tehonsiirtokulman stabiiliutta, joka esiteltiin luvussa 2.1. (Elovaara & Haarla 2011, sv2 s.218-220)

Sarjaparisto parantaa myös sähköverkon transienttistabiiliutta ja tehonsiirtokapasiteettia. Sarjakompensoitua johtoa kuormitettaessa verkosta otetaan vähemmän loistehoa, jolloin päätötehon siirtokapasiteettia jää enemmän reserviin. Transienttistabiilius tarkoittaa verkon käyttäytymistä suurhäiriön yhteydessä. (Elovaara & Haarla 2011, sv2 s.218-220)

Sarjapariston tuottama loisteho on suoraan verrannollinen linjavirran neliöön ja se lasketaan kaavasta (3),

$$Q_{SC} = 3 * X_{SC} * I^2, \text{ missä} \quad (3)$$

Q_{SC} on sarjapariston tuottama loisteho

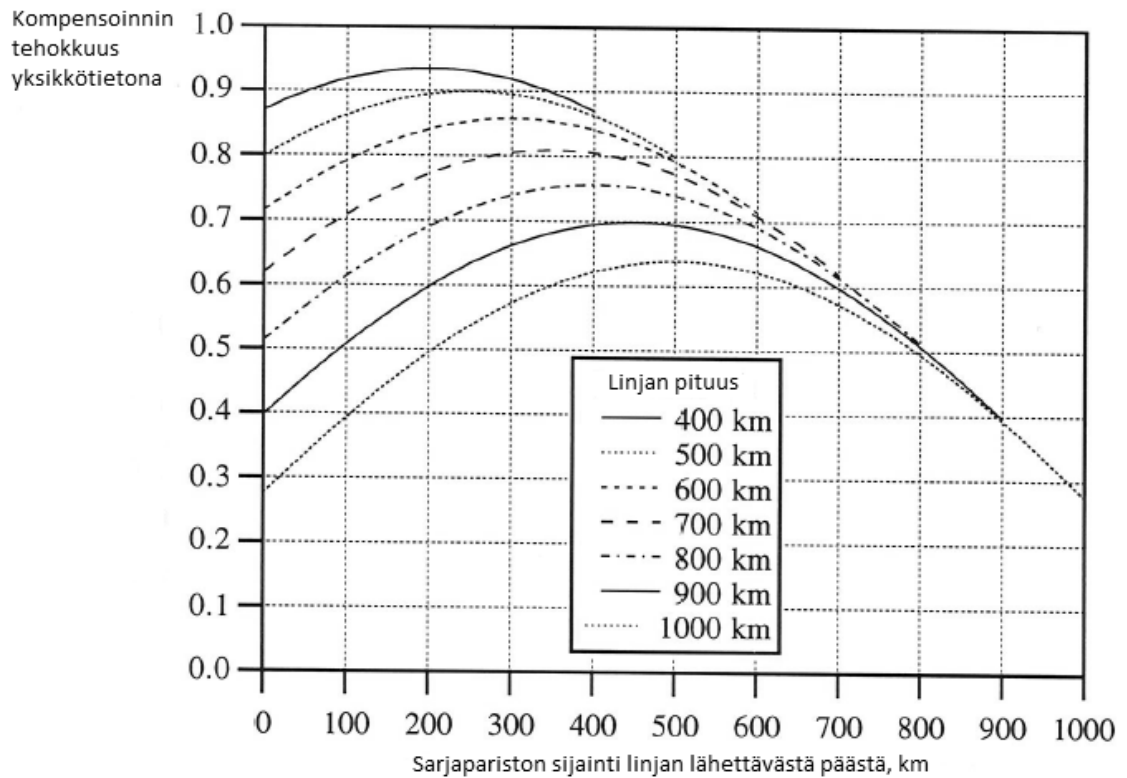
I on linjavirta

Kaavasta 3 nähdään, että sarjapariston tuottama loisteho vaihtelee kuormitustilanteen mukaan. Siirtoverkossa toimivien sarjaparistojen teho on yleensä satojen megavarien luokkaa. (Elovaara & Haarla 2011, sv2 s.218-220)

2.3 Sarjapariston sijoitus siirtolinjalle ja kompensointiaste

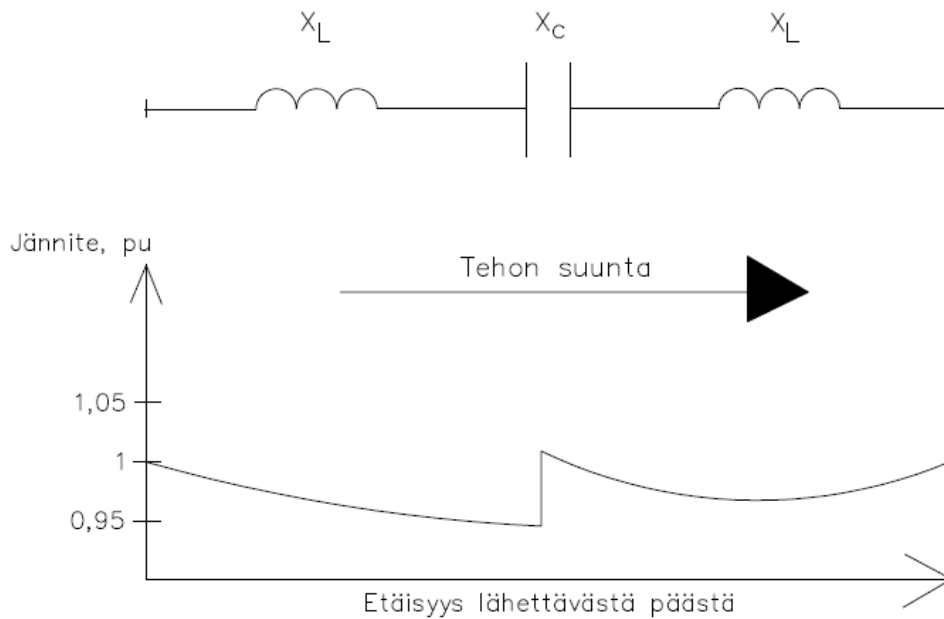
Sarjaparisto voidaan sijoittaa siirtolinjalle käytännössä kolmella eri tavalla. Optimi vaihtoehto on siirtolinjan puoliväli. Kaksi muuta vaihtoehtoa on jakaa sarjaparisto kahteen osaan ja sijoittaa nämä siirtolinjan päihin sähköasemille tai siirtolinjalle noin kolmanneksen etäisyydelle siirtolinjan päistä. Paras sijoituspaikka on arvioitava tapauskohtaisesti. Käytännössä sarjaparisto sijoitetaan usein olemassa olevalle johdon alku- tai loppupään sähköasemalle. Sarjapariston sijainnilla on suuri vaikutus sen toimintaan ja saatavaan hyötyyn. Kuvio 2 nähdään, kuinka sarjapariston sijoituspaikka vaikuttaa kompensoinnin tehokkuuteen eripituisilla linjoilla. Kuvio 2 esittää kompensoitavan siir-

tolinjan induktiivisen reaktanssin ja sarjapariston tuoman kapasitiivisen reaktanssin suhdetta eripituisilla linjoilla.



Kuvio 2. Sarjapariston sijoittamisen vaikutus korjauksen tehokkuuteen eripituisilla linjoilla. (Muokattu Farmer & Andersson 1996, s. 106)

Tarkasteltaessa kuviossa 2 ylintä, eli 400 km pituista linjaa, huomataan korjauksen tehokkuuden olevan parhaimmillaan, kun sarjaparisto sijoitetaan 200 km päähän lähettävästä päästä. Sijoittaminen vaikuttaa linjan jänniteprofiiliin ja suojaukseen. Jänniteprofiili kuvaa jännitteen käyttäytymistä siirtolinjalla. Jänniteprofiilista on nähtävissä jännitteenalenema eri pisteissä sekä havaittavissa sarjapariston aiheuttama jännitetason nousu sijoituspaikassa. Kuviossa 3 on esitetty jänniteprofiili kompensoidulla linjalla.



Kuvio 3. Jänniteprofiili linjan keskelle sijoitetulla sarjaparistolla.

Kuviosta 3 on tulkittavissa sarjapariston periaatteellinen vaikutus siirtolinjan jänniteprofiiliin. Jännite laskee ennen paristoa linjan induktiivisen reaktanssin takia ja pariston kohdalla päästä jännite nousee linjalla askelmaisesti, jonka jälkeen se taas laskee kohti vastaanottavaa päätä linjan induktiivisen reaktanssin takia. Sähköaseman läheisyydessä jännite jälleen nousee lähettävän pään jännitteen tasolle 1 pu:n arvoon solmupisteen muun verkon tehonsiirron takia.

Kompensoimisasteella tarkoitetaan sarjapariston yhteydessä osaa, joka siirtolinjan aiheuttamasta induktiivisesta reaktanssista kompensoidaan. Pitkille johdoille käytettävä kompensointiaste on tyypillisesti 30 - 70 %. Kompensointiaste määrittää sarjakondensaattorin reaktanssin suuruuden kaavan (4) mukaisesti.

$$X_C = X \cdot (1 - k_{sc}), \text{ missä} \quad (4)$$

X on siirtolinjan induktiivinen reaktanssi

$$k_{sc} = \frac{X_C}{X_L} \text{ on kompensoimisaste}$$

Kompensoimisastetta rajoittaa siirtolinjan jänniteprofiili, joka muuttuu epäedulliseksi verkon kannalta liian suurella kompensoimisasteella. Tämä ilmenee niin, että johtimen jännite kohoaa sarjapariston kohdalla yli verkon suurimman sallitun käyttöjännitteen. Kompensoimisasteen nostaminen laskee kompensoinnin kustannustehokkuutta ja tämän vuoksi on kompensoimisaste mietittävä tarkkaan tapauskohtaisesti. (Elovaara & Haarla 2011, sv2 s.232-233)

Resonanssiongelmat rajoittavat myös kompensointiaستetta. Sarjaparisto muuttaa verkon ominaistajuutta, mikä mahdollisesti johtaa aliharmonisen resonanssiipiirin syntymiseen turbogeneraattorin kanssa. Aliharmoninen resonanssi rikkoo kalliin generaattorin. (Elovaara & Haarla 2011, sv2 s.236)

Sijoituspaikka vaikuttaa MOV:lta vaadittavaan energiakapasiteettiin. Sähköasemalla vikavirta on suurimmillaan. Mitä lähempänä sähköasemaa ja suurta tuotantolaitosta ollaan, sitä suurempi vikavirta on. Mitä suurempi on vikavirta, sitä suuremmat energia-vaatimukset se asettaa MOV:lle. Lisäksi sijoittaminen vaikuttaa pariston ylläpitoon, koska valmiille sähköasemalle on helpompi päästä. (Farmer & Andersson 1996, s.104, 436-437)

2.4 Sarjapariston vikatilanteet

Suojauksen kannalta sarjapariston kohtaamat sähköverkon viat jaetaan kahteen tyyppiin, sisäisiin ja ulkoisiin vikoihin. Sisäiset viat tapahtuvat sarjakompensoidulla johdolla ja ne ovat yleensä kondensaattoreiden kannalta vakavimpia. Ulkoiset viat taas tapahtuvat kompensoidun johdon ulkopuolella. Sisäisissä vioissa vikavirrat kohoavat paristolla hyvin suuriksi ja ovat tyypillisesti suurempia kuin ulkoisissa vioissa. (Elovaara & Haarla 2011, sv2 s.233-234)

Kondensaattoreiden suojaus toteutetaan kytkemällä kondensaattoreiden rinnalle laitteita, joilla rajoitetaan jännitteen suuruutta ja kestoaikaa. Ne voivat olla esimerkiksi metallioksidivaristorit, kipinäväli, vaimennuspiiri ja ohituskatkaisija. Nämä komponentit esitellään tarkemmin seuraavassa luvussa 2.5. (Elovaara & Haarla 2011, sv2 s.233-234)

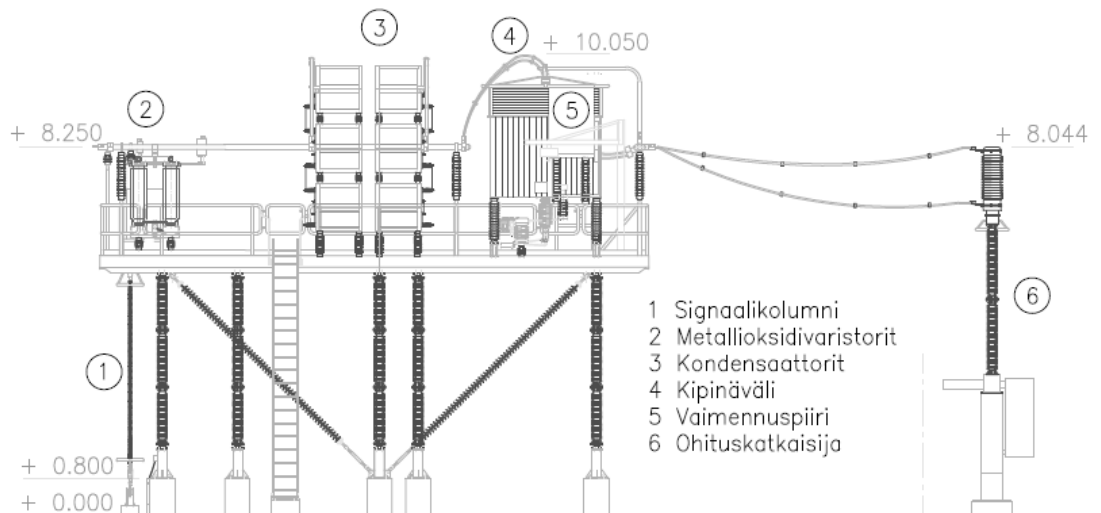
Metallioksidivaristoreilla suojataan kondensaattoreita ylijännitteeltä. Monesti vikavirrat kohoavat niin suuriksi, että metallioksidivaristorien energiakapasiteetti tai suojaustaso on vaarassa ylittyä ja ne on ohitettava. Ohitus tapahtuu kytkemällä kipinäväli tai ohituskatkaisija johtavaksi.

Kaikissa vioissa on tarkoitus saada paristo vian selvittyä mahdollisimman nopeasti takaisin toimintaan. Käytännössä metallioksidivaristoreiden energian absorbointikyky määritetään niin, että ne pystyvät purkamaan ulkoisen vian aikana syntyvän energian, jolloin sarjaparistoa ei ohiteta ja se pysyy käytössä. Standardi IEC 60143-2:2011 määrittelee kolme erilaista suojausvaihtoehtoa. Ne on esitelty myöhemmin luvussa 4.3 (Elovaara & Haarla 2011, sv2 s.233-234)

2.5 Sarjapariston rakenne ja komponentit

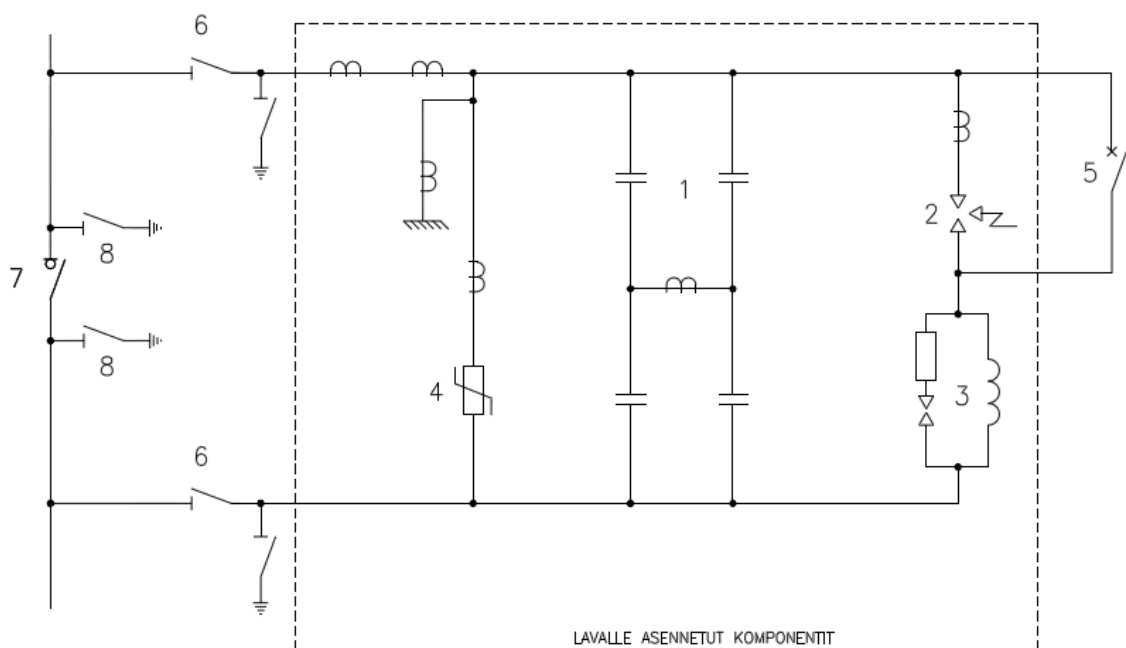
Sarjaparisto on melko yksinkertainen laite mutta sen suojaukseen vaadittava tekniikka tekee siitä monimutkaisen. Tässä luvussa käsitellään sarjapariston pääkomponentit ja niiden toiminta yleisesti.

Sarjaparisto asennetaan vaihejännitteeseen lavalle tukieristimien päälle, koska lavan ja maan välillä on suuri potentiaaliero. Jokaiselle kolmelle vaiheelle tehdään oma lavansa ja ne sijoitetaan vierekkäin riittävän kauaksi toisistaan. Jokaiselle lavalle asennetaan kondensaattorit, suojauslaitteisto ja lavaelektroniikka. Lavan viereen sijoitetaan ohituskatkaisija. Ohjaus- ja mittausjärjestelmät sijoitetaan maatasoon sisätiloihin ja ohjaussignaalit tuodaan sieltä lavalla oleville laitteille. Lavalla tarvitaan apusähköä, joka otetaan joko siirtolinjasta virtamuuntajan kautta tai syötetään maatasosta lasersäteen avulla. Kuviossa 4 on yhden vaiheen sarjaparistolava sivulta kuvattuna.



Kuvio 4. Sarjaparistolava.

Kuviossa 4 selkeimmin näkyvät komponentit ovat lavan oikeassa reunassa näkyvä kipinäväli, vasemmassa reunassa olevat metallioksidivaristorit, keskellä olevat kondensaattorit ja lavan ulkopuolella oleva ohituskatkaisija. Vaimennuspiiri on kipinävälikopin edessä. Yllä olevasta kokoonpanosta tehty yksivaihekaavio on esitetty kuviossa 5



Kuvio 5. Sarjapariston yksivaihekaavio.

Kuviossa 5 on nähtävissä kaikki sarjapariston komponentit ja niiden sijainti kytkennän kannalta. Kuviossa 5 olevat komponentit 1 - 8 ovat

1. Kondensaattorit
2. Kipinäväli
3. Vaimennuspiiri
4. Metallioksidivaristori (MOV)
5. Ohituskatkaisija
6. Sarjaparistoerottimet
7. Ohituserotin
8. Siirtolinjan maadoituserottimet

Metallioksidivaristorit ja ohitushaara, joka koostuu kipinävälistä, ohituskatkaisijasta ja vaimennuspiiristä, ovat kondensaattoreiden rinnalla. MOV:ien toiminta perustuu siihen, että niiden yli vaikuttaa sama jännite kuin kondensaattoreiden. Ne suojaavat kondensaattoreita alkamalla johtaa vikavirran ja pariston yli olevan jännitteen kasvaessa riittävän suureksi. (Elovaara & Haarla 2011, sv2 s.234-235,)

2.5.1 Kondensaattorit

Sarjapariston kondensaattoriparisto koostuu useista sarjaan- ja rinnankytketyistä kondensaattoriyksiköistä. Jokainen yksittäinen kondensaattorielementti on oman sulakkeen suojaama. Kondensaattoriyksikkö suunnitellaan kestämään tietty mitoitusvirta ja mitoitusjännite. Yksittäisiä kondensaattoreita asennetaan rinnan riittävä määrä, jotta kondensaattoriyksikön läpi menevä virta olisi sopiva. Rinnan kytketyt kondensaattoriryhmät kytketään taas sarjaan, jotta saadaan riittävä jännitekestoisuus. (Farmer & Andersson 1996, s. 330 -331)

2.5.2 Metallioksidivaristorit

Metallioksidivaristori eli MOV koostuu lasikuitukomposiitista tai posliinista valmistettuun eristinkuoreen ladotuista sylinterimäisistä metallioksidielementeistä. Eristinkuoren sisällä metallioksidivaristorilevyt on kytketty sarjaan. Lisäksi kuoren sisällä voi olla

useampia rinnakkaisia pilareita, joilla saadaan kasvatettua MOV-yksikön energian absorbointikykyä. Metallioksidielementit valmistetaan usein sinkkioksidista ja lisäaineista, joilla vaikutetaan varistorin sähköisiin ominaisuuksiin. (Elovaara & Haarla 2011, sv2 s.239)

Metallioksidivaristori toimii kondensaattoreiden ylijännitesuojana. Se on epälineaarinen vastus, jonka resistanssi riippuu jännitteestä. MOV nimenomaan rajoittaa kondensaattorin yli olevaa jännitettä sen noustessa suojaustasolle U_{Lim} . Varistori siirtyy pehmeästi johtavaan tilaan ja eikä se aiheuta syttymisjännitepiikkiä. Metallioksidivaristorilla suojattu sarjaparisto säilyttää osan kompensoimiskapasiteetistaan varistorin toimiessa. Metallioksidivaristorilla on suuri energian varastointikyky. Mikäli sen energian purkukyky ei ylity, on sarjaparisto koko ajan toiminnassa metallioksidivaristorien rajoittaman kapasiteetin mukaisesti. (Elovaara & Haarla 2011, sv2 s.233, 237, IEC 60143-2:1994, s.31)

2.5.3 Kipinäväli

Kipinäväli suojaa kondensaattoreita ja metallioksidivaristoreita. Varsinkin linjan sisäisten vikojen aikana kipinävälin tehtävä on toimia ylijännitesuojana ja ohittaa kondensattorit ja metallioksidivaristorit ennen ohituskatkaisijan toimintaa. Kipinävälin tehtävä on myös rajoittaa metallioksidivaristoreihin vian aikana kerääntyvää energiaa ja estää niiden terminen ylikuormittuminen. Kipinävälejä on itsesyttyviä ja pakkoliipaistavia. Pakkoliipaistava kipinäväli on suunniteltu toimimaan ulkoisella käskyllä. Suojauskriteerejä ovat varistoreiden energia, virran suuruus tai niiden muutosnopeus. Liipaisupiiri antaa syttymispulssin suojausjärjestelmän ohjauksesta. Valokaari syttyy ja palaa kopin sisällä sijaitsevien pääelektrodien välissä kunnes ohituskatkaisija toimii ja sammuttaa valokaaren kipinävälissä. Kipinäväli toimii huomattavasti nopeammin, kuin ohituskatkaisija ja siksi kipinäväli tarvitaan suojaamaan metallioksidivaristoreita ennen ohituskatkaisijan toimintaa. (IEC 60143-2:1994, s. 11, Elovaara & Haarla 2011, sv2 s.234)

2.5.4 Vaimennuspiiri

Vaimennuspiirin tehtävä on rajoittaa kondensaattorien purkausvirran suuruutta ja taa-juutta sekä tarjota riittävä vaimennus kondensaattoreiden purkausvirran värähtelylle kipinävälin tai ohituskatkaisijan ohittaessa sarjapariston. Vaimennuspiiri koostuu vaimennuskelasta ja vaimennusvastuksesta. Vastus ja kela on kytketty rinnan ja ne ovat sarjassa kipinävälin kanssa kuvion 5 mukaisesti. Joissain tapauksissa ei käytetä vaimennusvastusta. Vastus ja reaktori voivat olla myös kondensaattorihaarassa.

Vaimennusvastus voi olla kytketty jatkuvasti piiriin tai vain purkaushetken alkuvaiheen. Vaimennusvastuksen kanssa sarjassa voi olla pieni kipinäväli tai DMOV (vaimennuspiirin MOV). Näin vastusta ei tarvitse mitoittaa kestäämään jatkuvaa purkaus- ja kuormitusvirtaa. Näiden kahden komponentin tarkoitus on estää purkausvirran vaimennuttua vastuksen läpi kulkeva virta virran kulkeutuessa vain kelan läpi. (IEC 60143-2:1994, s.51)

2.5.5 Ohituskatkaisija

Ohituskatkaisijan avulla paristo kytketään siirtolinjaan ja ohitetaan. Kun ohituskatkaisija avataan, niin sarjaparisto on toiminnassa. Ohituskatkaisija toimii silloin, kun verkossa ilmenee häiriöitä ja vikoja. Jos kyseessä on niin suuri vika, että kipinäväli toimii, niin ohituskatkaisijan avulla kipinävälin valokaari sammutetaan ja vika johdetaan ohituskatkaisijan ja vaimennuspiirin kautta muun pariston ohi. Ohituskatkaisijat voidaan luokitella monella tapaa niiden toimintaperiaatteen ja -mekanismin mukaan. (IEC 60143-2:1994, s.43, Farmer & Andersson 1996, s. 338 -339)

2.5.6 Signaalikolumni

Signaalikolumni sijaitsee tukieristimien tavoin lavan alla ja on osa signaalien välitysjärjestelmää. Sen sisällä kulkee valokuitukaapeleita ja tehtävänä on toimia signaalikaapeleiden reittinä ohjausjärjestelmästä lavalle ja lavalta ohjausjärjestelmälle. Signaalikolumni on ontto tukieristin ja sitä ei ole tehty kuormien kantamiseen. Signaalikolumni on

valmistettu komposiittimateriaaleista. (Elovaara & Haarla 2011, sv2 s.234-235, IEC 60143-2:1994 s.63)

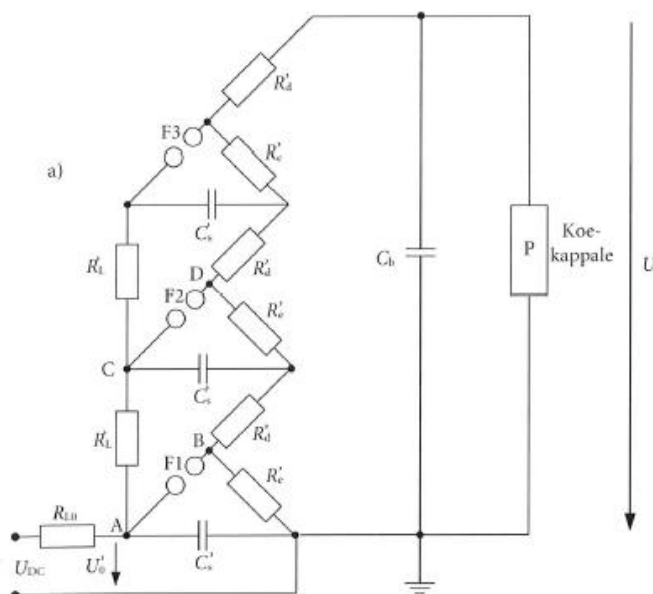
Signaalin siirtojärjestelmä koostuu tyypillisesti kolmesta pääkomponentista, lavaelektronikasta, signaalikolumnista ja valokuitukaapelista. (IEC 60143-2:2011 CDV, s. 42)

3 TESTAUSTEKNIikka

Sarjapariston suojalaitestandardi IEC 60143-2:2011 määrittelee komponenteille testit, joissa todetaan niiden ominaisuudet ja niiden soveltuvuus käyttötarkoitukseen. Testit on määritelty erikseen jokaiselle komponentille. Testaus suoritetaan valmistajan laboratoriossa, tuotantolinjalla tai erityisessä suurjännite- tai suurteholaboratoriossa (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2003, s. 358). Testit jaetaan rutiini- ja tyyppitesteihin. Rutiinitesteillä tarkistetaan komponenteille ominaiset asiat, kuten kelojen induktanssin arvo ja tyyppitesteillä varmistetaan, että komponentti toimii suunnitellusti verkon äärimmäisissä tilanteissa.

3.1 Suurjännitelaboratoriot

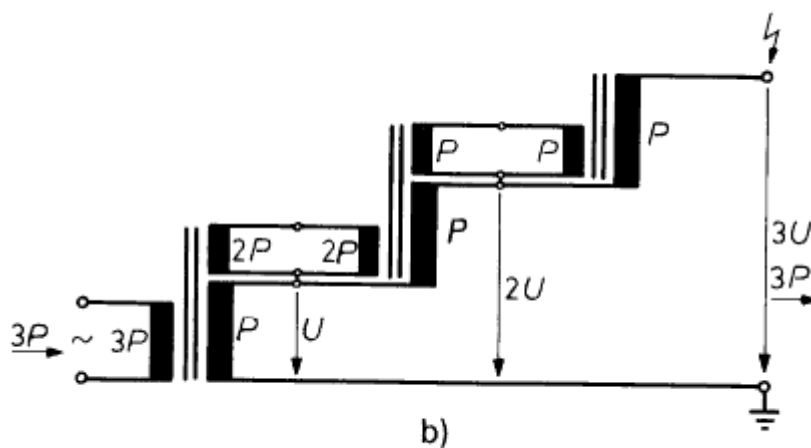
Suurjännitetestauksessa käsitellään jopa megavolttien suuruisia jännitteitä, jotka kehitetään erilaisia erikoislaitteita ja -kytkentöjä hyväksi käyttäen. Marxin generaattori on tavallisimmin käytetty kytkentä, jolla voidaan luoda hyvin suuria jännitepulsseja. Marxin generaattorilla tuotetun jännitteen muoto valitaan mitoittamalla komponentit sen mukaan, minkä muotoinen jännitepulssi halutaan. Kuviossa 6 on esitetty Marxin generaattorin kytkentä.



Kuvio 6. Marxin generaattori. (Elovaara & Haarla 2011, sv2 s. 70)

Kuviossa 6 oleva kytkentä on kolmiportainen syöksyjännitegeneraattori. Kytkentää sanotaan moninkertaistamiskytkennäksi. Jännite synnytetään lataamalla suuria rinnankytkettyjä kondensaattoreita ja purkamalla ne sarjassa testipiirissä olevaan testikappaleeseen. Yksittäinen kondensaattori voidaan esimerkiksi ladata 100 - 200 kV: n jännitteeseen. Marxin generaattoria käytetään muun muassa IEC:n standardoimaan syöksyjännitetestiin, joka määrittää testikappaleen eristystason. (Elovaara & Haarla 2011, sv2 s. 70-71, Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2003, s. 363)

Suuret käyttötaajuiset vaihtojännitteet synnytetään normaalisti suurien muuntajien avulla. Muuntajat on kytketty sarjaan muodostaen ns. kaskadikytkennän. Tällöin yksittäisten muuntajien jännitteet summautuvat ja saadaan sitä suurempi jännite, mitä enemmän muuntajia on sarjassa. Kuviossa 7 esitetään kaskadikytketyn muuntajan toimintaperiaate. (Elovaara & Haarla 2011, sv2 s. 71)



Kuvio 7. Kaskadikytkentä. (Elovaara & Laiho 1999, s. 227)

Kytkentä toimii siten, että toisiokäämin rinnalla on toinen käämi, joka magnetoidaan myös ensiökäämin synnyttämällä magneettivuolla. Tämä käämi magnetoi taas seuraavan muuntajan ensiökäämin. Syötetty teho jakautuu kuvion 7 mukaisesti muuntajien kesken.

3.2 Suurteholaboratoriot

Suuria virtoja vaativat testit suoritetaan suurteholaboratorioissa. Suuret vaihtovirrat synnytetään suoraan sähköverkosta syötetyillä muuntajilla tai erityisillä suurvirta-generaattoreilla ja muuntajilla. Moottorilla käytettävä oikosulkugeneraattori on yleinen tapa synnyttää käyttötaajuinen oikosulkuvirta.

Moottori pyörittää oikosulkugeneraattoria ja oikosuljetaessa generaattorin navat, saadaan suuri virta. Oikosuljetaessa syntyvä virta vaikuttaa vain vähän aikaa generaattorin navoissa, jolloin se ei rasita generaattoria termisesti liikaa. Oikosulkugeneraattoria pyörittävä moottori täytyy kytkeä pois ennen generaattorin napojen oikosulkua mekaanisen rasituksen ja verkkovaikutusten takia. Generaattorin liike-energia riittää tarvittavan energian tuottamiseen. (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2003, s. 381, 402-403, Elovaara & Haarla 2011, sv2 s. 72)

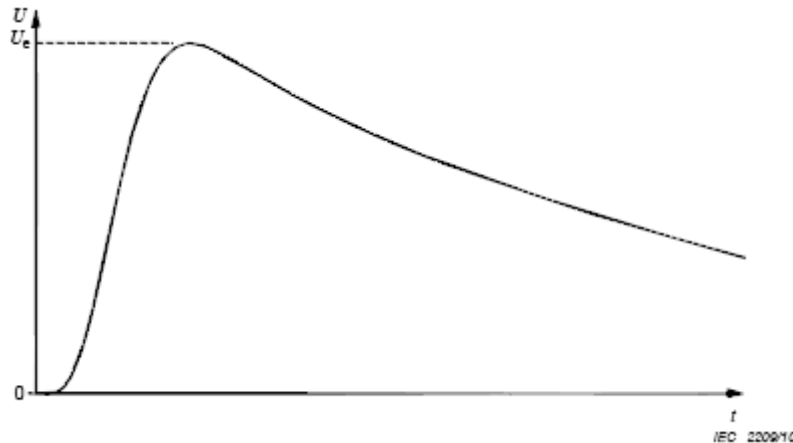
Opinnäytetyössä tavoitteena oli löytää sellaisia suurteholaboratorioita, joissa olisi sekä suuri virransyöttökyky että mahdollisuus suureen jännitteeseen. Liitteen 1 mukaisessa Laboratoriokyselyssä kohdassa 1 ”SPARK GAP (forced triggered)” käytetyssä ns. de-ionisaatiotestissä, eli palaavan jännitteen testissä (recovery voltage test) vaaditaan testilaboratoriolta molempia ominaisuuksia.

3.3 Testien määrittelyjä

Sähkölaitteille määritellään eristyskoordinaatio, jonka mukaisilla testijännitteillä sähkölaitteet testataan. Laskennallinen käyttöjännite määrää koekappaleen testijännitteet, jotka löytyvät standardeista. Tärkeimpiä jännitetestejä ovat salamasyöksyjännitetesti, verkkotaajuinen vaihtojännitetesti, kytkentäsyöksyjännitetesti ja tasajännitetesti (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2003, s. 362-363). Opinnäytetyön kannalta oleellimmat ovat salamasyöksyjännitetesti ja verkkotaajuisen vaihtojännitteen testi.

Standardi IEC 60060-1 määrittelee salamasyöksyjännitteelle testijännitteiden kestot ja niiden toleranssit sekä ylityksen tai ylivärähtelyn amplitudin. Salamasyöksyjännitepulsin ”rinnan” kesto aika on $1,2\mu\text{s} \pm 0,36\mu\text{s}$ ja ”selän” puoliarvoaika $50\mu\text{s} \pm 10\mu\text{s}$. Ylivärähtelylle sallitaan maksimissaan 5 % amplitudi huippuarvosta. Ylivärähtely tarkoittaa

suuri taajuisia häiriöitä, joiden taajuus on yli 0,5 MHz. Ne syntyvät häiriöiden tai jännitelähteen takia. Syöksyjännitepulssin muodosta puhutaan yleensä sen ”rinnan” ja ”selän” kestoajan mukaan, esimerkiksi 1,2/50 μs pulssina. Tällöin jännite nousee huippuunsa 1,2 μs ja laskee puoleen huippuarvostaan 50 μs . Kuviossa 8 on esimerkki salamasyöksyjännitepulssista.



Kuvio 8. Salamasyöksyjännitepulssi. (IEC 60060-1 s. 26)

Vaihtojännitetesti tehdään käyttötaajuisella jännitteellä, jonka poikkeama sinimuodosta saa olla maksimissaan 5 %, joka lasketaan huippuarvon ja tehollisarvon suhteen poikkeamana luvusta $\sqrt{2}$. Toinen tapa on laskea yliaaltojen tehollisarvon suhde perusaallon tehollisarvoon. (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2003, s. 363)

Opinnäytetyön osana tehdyssä kyselyssä, joka on liitteenä 1, käytettiin standardissa IEC 60071-1:1993 määriteltyjä testijännitearvoja. Vaihtojännitetestissä koekappaleeseen vaikuttaa laskennallisesti määritetty jännite yhden minuutin ajan. (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2003, s. 363)

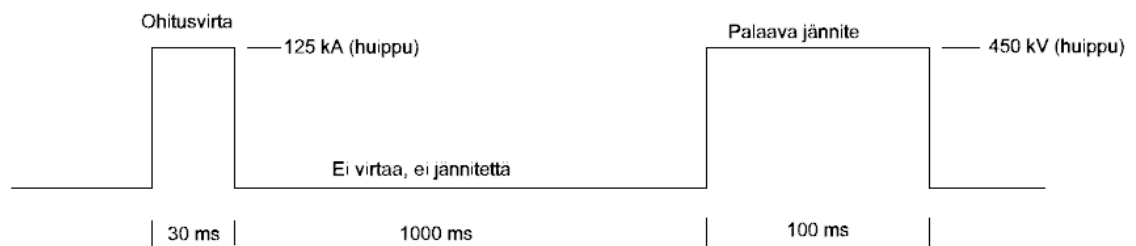
Komponenttien oikosulkuvirtakestoisuus määritellään standardissa IEC 60909. Standardi määrittelee kaksi eri oikosulkuvirtakestoisuutta, jotka ovat dynaaminen ja terminen oikosulkuvirtakestoisuus. Dynaaminen oikosulkuvirtakestoisuus tarkoittaa oikosulkuvirran alkuhetken aiheuttamaa virtarasisitusta. Sen suuruus määritellään huippuarvona. Terminen oikosulkuvirtakestoisuus kertoo, kuinka suuren oikosulkuvirran komponentti kestää 1 - 3 s ajan ilman, että se vahingoittuu. Terminen oikosulkuvirtakestoisuus ilmoitetaan virran tehollisarvona. Taulukossa 1 on esitetty IEC:n standardoimat oikosulkuvirran arvot.

Taulukko 1. Taulukoidut oikosulkuvirran arvot.

I _{term} / kA (teh.arvo)	5,0	6,3	8,0	10,0	12,5	16,0	20,0	25,0	31,5	40,0	50,0	63,0	80,0	100,0
I _{dyn} / kA (huippuarvo)	12,5	16,0	20,0	25,0	31,5	40,0	50,0	63,0	80,0	100,0	125,0	160,0	200,0	250,0

Taulukoidut oikosulkuvirran arvot määrittelevät komponenttien oikosulkuvirtakestoisuuden, joka on siirtolinjakohtaisesti määritelty. Taulukosta 1 valittiin opinnäytetyöhön kuuluvaan kyselyyn 63 kA_{rms}, 1 s terminen oikosulkuvirta ja 125 kA_{peak} dynaaminen oikosulkuvirta. Sitä suurempien testivirtojen käyttö ei olisi enää ollut perusteltua. IEC standardi 60909 määrittää komponenteille myös nimellisen virtakestoisuuden, joka saadaan taulukon 1 arvoista jakamalla ne kymmenellä. (Elovaara & Laiho 1999, s. 237 - 238)

Palaavan jännitteen testi kuuluu kipinävälin tyyppitesteihin ja se löytyy suojalaitestandardista IEC 60143-2. Testi tehdään esimerkiksi kuviossa 9 olevan sekvenssin mukaisesti.



Kuvio 9. Palaavan jännitteen testi.

Testissä kuvataan tilannetta, jossa sarjaparisto ohitetaan, jolloin kipinävälissä vaikuttaa ensin kondensaattoreiden purkausvirta sekä vikavirta. Virta vaikuttaa ohituskatkaisijan toiminta-ajan verran. Välissä on aikajälleenkytkentään kuluva aika (1000 ms), jonka jälkeen kipinäväliin tuodaan palaava jännite, eli suojaustason määrittämä jännite. Tarkoituksena on, että valokaari ei syty, kun jännite vaikuttaa kipinävälissä. Valokaaren palaessa kipinävälissä ilma ionisoituu, mikä laskee kipinävälin syttymisjännitettä. Testillä varmennetaan, että syttymiskynnys ei laske liikaa. (IEC 60143-2:2011 CDV, s 20)

4 SARJAKONDENSAATTORIN SUOJALAITESTANDARDI IEC 60143-2

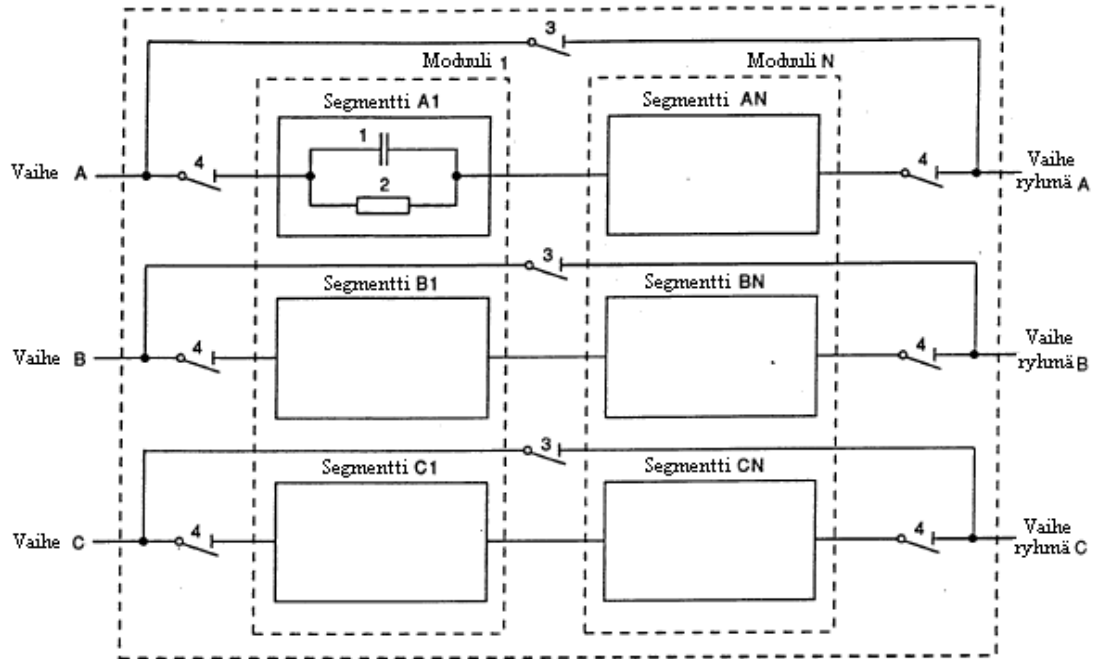
Standardi IEC 60143-2 ”*Series capacitors for power systems – part 2. Protective equipment for series capacitor banks*” on sarjapariston suojalaitestandardi. Se on kansainvälisen sähköteknisen komission eli IEC:n (International Electrotechnical Commission) työryhmän laatima standardi. Standardi määrittelee sarjapariston suojauskomponenttien testauksen ja luokittelee suojauksen toteutustavat (IEC 60143-2:1994 s.7). Voimassa oleva suojalaitestandardi on vuodelta 1994 ja se tullaan päivittämään lähitulevaisuudessa. Tässä luvussa käsitellään standardia yleisesti, sen suojausluokitteluja sekä vertaillaan 1994 ja 2011 versioita laboratoriokyselyssä käytettyjen komponenttien osalta. Vuoden 2011 versio standardista on vielä CDV (committee draft for vote) vaiheessa ja sitä ei ole virallisesti julkaistu. Ennen standardin julkaisua suoritetaan äänestys, jossa valmisteltu standardi hyväksytään ja tämän jälkeen siitä tulee julkinen.

IEC on maailmanlaajuinen standardoimisorganisaatio käsittäen kaikki kansalliset sähkötekniset komissiot. IEC:n tavoitteena on edistää kansainvälistä yhteistyötä elektroniikan ja sähkötekniikan aloilla koskien standardoimista. IEC julkaisee kansainvälisiä standardeja ja niiden valmistelu on annettu teknisille komiteoille ja jokaisen kansainvälisen IEC-komitean on mahdollista osallistua halutessaan standardin valmisteluun. Lisäksi IEC:n kanssa yhteistyössä olevat organisaatiot voivat olla osallisena valmisteluissa. Suojalaitestandardin IEC 60143-2 on valmistellut tekninen komitea 33, joka on erikoistunut tehokondensaattoreihin. (IEC 60143-2:1994 s.7)

4.1 Yleistä standardista IEC 60143-2 1994

Standardi koskee vaiheteholtaan yli 10 MVAr kokoisia sarjaparistoja. Suojalaitteet kuvataan pääpiirin laitteina ja apulaitteina, jotka ovat osa sarjaparistolaitteistoa, mutta kuitenkin erillään kondensaattoriparistosta. Standardi käsittää ylijännitesuojat eli kipinävälin, metallioksidivaristorin ja ohituskatkaisijan sekä erottimet, vaimennuspiirin, purkauskelan, jännitemuuntajan, virtamuuntajan, signaalikolumnin, relesuojauksen, hallintalaitteet ja ohjaus -ja tiedonsiirtojärjestelmän. (IEC 60143-2:1994 s.9)

Standardissa määritetään sarjapariston rakenne hyvin yleisellä tasolla. Kuviossa 10 on kuva standardista IEC 60143-2. Kuvio on muokattu standardista siten, että tekstit on suomennettu.



Kuvio 10. Sarjapariston rakenne standardin mukaan. (muokattu IEC 60143-2:1994, s. 11)

Kuviossa 10 numeroidut kohdat ovat

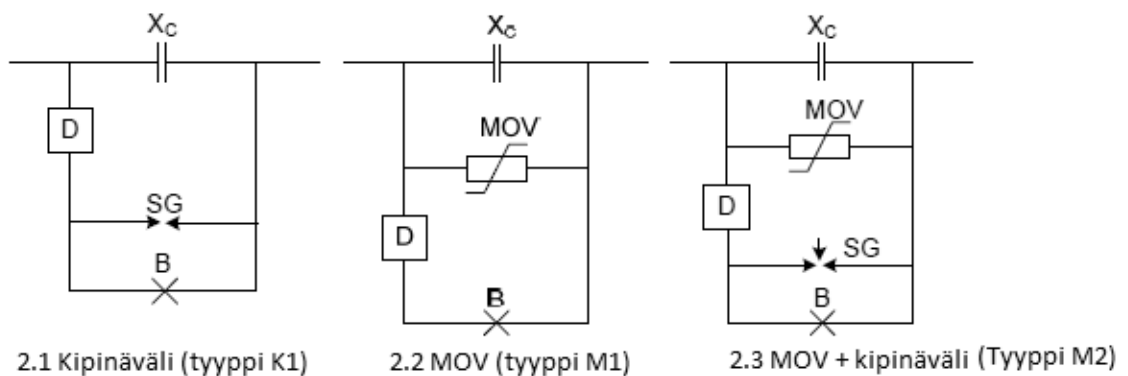
- 1 Kondensaattorit
- 2 Segmentin A1 suojauslaitteisto
- 3 Ohituserotin
- 4 Sarjaparistoerotin

Sarjaparisto pyritään toteuttamaan yhdellä segmentillä. Erityiset vaatimukset tai korkea suojaustaso ovat syitä, joiden takia kahta tai useampaa segmenttiä joudutaan käyttämään. Syy jakoon on esimerkiksi aliharmoninen resonanssi, joka saadaan vaimentumaan segmenttien ohittamisella menettämättä sarjakompensointia kokonaan. Standardissa oleva kuvio 10 ottaa tämän huomioon. Segmentteihin jako tarkoittaa sitä, että sarjaparisto jaetaan vaiheittain yhdellä sijoituspaikalla kahteen erilliseen osaan, joilla molemmilla on omat komponenttinsa.

4.2 Standardiversioiden 1994 ja 2011 vertailu

Uuteen versioon on tehty lisäyksiä ja siitä on poistettu vanhentuneita kohtia. Tässä työssä esitellään standardiversioiden muutokset kipinävälin, vaimennusvastuksen ja -kelan ja signaalikolumnin osalta, minkä lisäksi esitetään yleisiä muutoksia. Luvussa esitetään lisäykset ja eroavaisuudet edellä esitettyjen komponenttien osalta. Liitteenä 2 on taulukko, josta on nähtävissä eri komponenttien testit uudessa ja vanhassa versiossa sekä testeihin liittyviä huomioita. Taulukko on tehty selventämään kirjoitettua tekstiä.

Vuoden 2011 versiossa laatuvaatimukset ja testit-osiossa on muutos ylijännitesuojauksen toteutuksen kohdalla. Luokittelu on uudistunut, siten että vuoden 2011 versiossa on kolme suojausluokitusta, jotka ovat K1, M1 ja M2. Kahden kipinävälin ratkaisu on poistunut standardin mukaisista luokituksista. Kuviossa 11 on esitetty suojausluokitukset.



Kuvio 11. 2011 version suojausluokitukset. (Muokattu IEC 60143-2:2011 CDV, s. 17)

Kuviossa 11 D tarkoittaa vaimennuspiiriä, B ohituskatkaisijaa ja SG kipinäväliä. (IEC 60143-2:1994 s. 25, IEC 60143-2:2011 CDV, s.17)

4.2.1 Kipinäväli

Suojausluokitukset ja niiden nimeämiset ovat muuttuneet siten, että vuoden 2011 versiossa puhutaan K1 ja M2 tyyppin kipinäväleistä. Ne luokitellaan liipaisuperiaatteen mukaan; K1 on itseliipaiseva ja M2 pakotetulla liipaisulla toimiva kipinäväli. Itseliipaiseva kipinäväli toimii, kun jännite nousee sarjaparistolle määritetyille suojaustasolle. Pakote-

tulla liipaisulla toimiva kipinäväli toimii taas silloin, kun jokin liipaisukriteeri täyttyy vian aikana. (IEC 60143-2:1994 s. 25, IEC 60143-2:2011 s.17)

Testien osalta vuoden 2011 versioon on tullut muutoksia ja lisäyksiä koskien lähinnä tyyppitestejä. Rutiinitestit ovat samat, kuin vuoden 1994 versiossa. Standardi määrittelee kipinävälille vikavirtatestin, jolla määritetään kipinävälin käyttötaajuisen vikavirran kesto. Testi tehdään vain kerran myös uuden standardin mukaan. Testissä käytetyn virran ensimmäisen huipun täytyy vastata uuden standardin mukaan määritellyn oikosulkuvirran arvoa. Testin läpäisylle on erikseen omat määritelmät itseliipaisevalle ja pakotetulla liipaisulla toimivalle kipinävälille. Vanhassa versiossa läpäisykriteerit olivat yksinkertaisemmat ja siinä ei ollut eritelty läpäisykriteerejä liipaisuperiaatteen mukaan. Vuoden 2011 version mukaan pakkoliipaistava kipinäväli on läpäissyt testin, kun sen toimivuus on todettu toiminnallisuustestillä ja verkkotaajuisella suojaustasoon nähden 1,2-kertaisella jännitteen sietotestillä. Verkkotaajuisen jännitteen sietotestiä ei tarvitse tehdä, mikäli ohitusvirtatesti tehdään vikavirtatestin jälkeen. Itseliipaisevalle kipinävälille suoritetaan verkkotaajuinen ylilyöntijännitetesti. (IEC 1994 s. 27-28, IEC 2011 CDV s.18-19)

Vuoden 1994 versio määrittelee purkausvirtatestin, jolla todetaan kipinävälin kestäminen sarjapariston ohitustilanteessa. Tällöin kondensaattorit purkautuvat ja niiden korkeataajuinen purkausvirta summautuu vikavirtaan ja kulkee kipinävälin läpi. Uudessa standardissa testi on nimellä ohitusvirtatesti. Uudessa versiossa on kohta, jossa vaaditaan, että testissä käytetty virta on laskettu oikeasta verkkomallista. Vuoden 2011 versiossa on annettu kaksi mahdollisuutta muodostaa testivirta. Testissä voidaan käyttää yhdistettyä virtaa, joka sisältää korkeataajuisen kondensaattoreiden purkausvirtaa vastavan virran ja käyttötaajuisen vikavirran tai vain pelkkää käyttötaajuisia (50 Hz tai 60 Hz) virtaa. Käytettäessä yhdistelmävirtaa on vaatimuksena, että vaimennus vastaa todellista. Pelkällä käyttötaajuisella (50 Hz tai 60 Hz) virralla voidaan käyttää epäsymmetrisiä virtaa. CDV-version 2011 mukaan testi toistetaan 24 kertaa. Uusimman tiedon mukaan toistojen määrä tulee muuttumaan 2011 versiossa kahteenkymmeneen. Vanhemman version mukaan testi toistetaan kymmenen kertaa ja vain erityistilanteessa ja erillisellä sopimuksella 20 kertaa. Testin läpäisyvaatimukset riippuvat kipinävälin liipaisuperiaatteesta. (IEC 60143-2:1994 s. 29, IEC 60143-2:2011 CDV s.19)

Palaavan jännitteen testi on määritelty vuoden 2011 versiossa erikseen K1- ja M2- tyyppin kipinäväleille. Uudessa versiossa määritellään tarkemmin molemmille kipinävälytyypeille, kuinka testi suoritetaan. M2- ja K1-tyypin kipinävälille täytyy tehdä ennen palaavan jännitteen testiä ohitusvirtatesti vähintään kymmenen kertaa. Tästä syystä standardi kehottaa tekemään nämä testit samalla kertaa. Uusi versio määrittää testijännitteen kestoajaksi 100 ms, mitä ei ollut määritelty vuoden 1994 versiossa. Lämpäisykriteerit ovat vuoden 2011 version mukaan joko 1/1 tai 2/3 onnistunutta toistoa. K1-tyypin kipinävälille testi on muuten sama, mutta testijännite poikkeaa edellä mainitusta. Testijännitteen huippuarvo on suurin odotettu sarjapariston jännite pariston palautuessa takaisin verkkoon. (IEC 60143-2:1994 s. 29, IEC 60143-2:2011 CDV, s.20-21)

Uusi versio määrittelee myös yhden uuden tyyppitestin kipinävälille. Mekaanisen kestävyys testi tehdään kipinäväleille, joissa on liikkuvia osia. (IEC 60143-2:2011 CDV s. 21)

Kipinävälin liipaisupiirille tehdään erilliset testit. Tyyppitestit K1-tyypin liipaisupiirille ovat samat molemmissa standardiversioissa. Rutiinitesteissä hermeettisesti suljettujen kotelointien vuototesti on määritelty hieman tarkemmin uudessa versiossa. M2-tyypin kipinävälin rutiinitesteihin on tullut kaksi uutta testiä. Uudet määritellyt testit on toiminnallisuustesti ja komponenttiarvojen mittaus. Toiminnallisuustesti voidaan tehdä käyttöönnotossa. M2-tyypin kipinävälin liipaisupiirin erikoistyyppitestit käsittävät koko kipinävälilikoonpanon testit. Niihin kuuluu vuoden 2011 versiossa kolme testiä; a) kokonaisohitusajan testaus $0,95 \cdot U_{Lim}$ jännitteellä, b) liipaisu- ja ohitusajan varmentaminen minimijännitteellä ja c) käyttötaajuuden jännitteen kestotesti. Liipaisu- ja ohitusajan varmentaminen minimijännitteellä on silloin tarpeellista, mikäli kipinävälin tulee ohittaa paristo myös ulkoisen vian aikana. Testit tehdään asiakkaan niitä vaatiessa. (IEC 60143-2:1994 s. 29-31, IEC 60143-2:2011 CDV, s.22-23)

4.2.2 Vaimennuspiiri

Vaimennuspiirin vastus ja kela testataan erikseen. Kelan rutiinitestit ovat samat molemmissa standardeissa. Tyyppitesteihin on tullut tarkennuksia ja muutoksia. Vuoden 1994 versio määrittää vikavirtatestin, joka uudessa versiossa on oikosulkuvirtatestin

nimellä. Testi on muuten samanlainen, mutta se tehdään kahdesti vuoden 2011 version mukaan. Vanhan version mukaan se tehtiin vain kerran.

Purkausvirtatesti on muuttunut vuoden 2011 versioon nimelle ohitusvirtatesti. Sillä testataan kelan ohitusvirtakestoisuus. Uudessa versiossa on maininta, että testivirran simulointi ja määrittäminen tulisi tehdä oikealla sarjapariston verkkomallilla. Virran puolijakso (50 tai 60 Hz) käy testivirraksi korkeataajuuden purkausvirran lisäksi. Tällöin kappaleeseen vaikuttaa virta yhden pulssin ajan. Testivirran tulisi aiheuttaa sama terminen rasitus, kuin oikeissa käyttöolosuhteissa kelaan vaikuttaisi. Testi tehdään kaksikymmentäneljä kertaa vuoden 2011 version mukaan. Uusimman tilanpäivityksen mukaan toistojen määrä tulisi muuttumaan kahteenkymmeneen vuoden 2011 versiossa. Vanhassa versiossa testi tehtiin kymmenen kertaa ja kaksikymmentä kertaa mikäli käyttöolosuhteet sitä vaativat. (IEC 60143-2:1994 s. 53,55, IEC 60143-2:2011 CDV, s. 35 -36)

Lämpötilan nousutesti on molemmissa standardeissa täysin samanlainen. Uusi standardiversio määrittelee kolme uutta tyyppitestiä, joita tilaaja voi vaatia kelalle tehtäväksi. Nämä testit ovat modifioitu yhdistetty oikosulku- ja ohitusvirtatesti, mekaaninen resonanssitesti sekä käännesuhteiden ja induktanssin mittausta taajuuden funktiona. Kaksi ensimmäistä testiä on määritelty tarkemmin standardissa IEC 60076-6 kappaleissa 9.10.15-16. (IEC 60143-2:1994 s.53,55, IEC 60143-2:2011 CDV, s.36-37)

Vaimennusvastuksen rutiinitesteihin on lisätty kaksi uutta testiä. Referenssi-jännite- testi ja osittaispurkaustesti tehdään, jos vaimennusvastuksen kanssa on sarjassa DMOV. Muuten rutiinitestit ovat vastaavat vuoden 1994 versioon nähden. (IEC 60143-2:1994, s. 57, IEC 60143-2:2011 CDV, s. 37)

Energian absorbointitesti on vuoden 2011 versiossa samanlainen, mutta sitä on hieman tarkennettu. Vaimennusvastus altistetaan kondensaattoreiden purkausvirralle kymmenen kertaa. Komponentti saa jäähtyä purkausten välissä ympäristön lämpötilaan. Resistanssi, joka mitataan ennen ja jälkeen testin, ei saa muuttua 5 % enempää ja lisäksi vastus ei saa vahingoittua. (IEC 60143-2:1994, s. 55 , IEC 60143-2:2011 CDV, s. 38)

Purkausvirtatestissä testataan vastuksen kyky kestää normaalissa ohitustilanteessa syntyvä kondensaattoreiden purkausvirta. Vuoden 2011 versiossa testi on määritelty tarkemmin. Testivirran täytyy olla 1,05-kertainen suurimpaan mahdolliseen purkausvirtaan

nähdän ja sen kesto on sama kuin normaalissa käyttötilanteessa. Testi tehdään kaksi kertaa ja komponentti saa jäähtyä välissä vallitsevaan ympäristön lämpötilaan. Resistanssi mitataan ennen ja jälkeen testin ja sen muutos ei saa ylittää 5 %. Lisäksi vastus ei saa vahingoittua. (IEC 60143-2:1994, s. 57, IEC 60143-2:2011 CDV, s. 38)

Käyttötaajuinen vikavirtasietoisuustesti on vuoden 2011 versiossa määritelty tarkemmin. Purkausvirran jälkeinen käyttötaajuinen vikavirta vaikuttaa vastuksessa tietyn ajan ja tietyn suuruisena. Testi tehdään sen mukaisesti kerran. Lämpötilan vaikutus resistanssiin täytyy huomioida testin arvioinnissa. Resistanssin muutos ei saa ylittää 5 %. Resistanssi mitataan ennen ja jälkeen testin. Mikäli vaimennusvastuksen kanssa sarjassa on varistori, ei testi ole soveltuva. (IEC 60143-2:1994, s. 57, IEC 60143-2:2011 CDV, s. 38)

Impulssijännitetesti on vuoden 2011 versiossa tarkemmin määritelty. Testi tehdään $1,2/50 \mu\text{s}$ syöksyjännitteellä. Koska vaimennusvastuksen resistanssi voi olla hyvinkin pieni, ei $1,2/50 \mu\text{s}$ aaltomuoto ole välttämättä mahdollinen. Tällöin syöksyjännitepulsin häntää voi hyväksyttävästi lyhentää. Laskennalliseen käyttöjännitteeseen lisätään turvakerroin 1,2 ja sitä kautta saadaan suurin mahdollinen käyttöjännite, jonka mukaan määräytyy salamasyöksyjännite. Testissä komponentti altistetaan 15 kertaa kummankin polariteetin syöksyjännitteelle ja kaksi ulkoista ylilyöntiä sallitaan molemmille polariteeteille. (IEC 60143-2:1994, s. 57, IEC 60143-2:2011 CDV, s. 37-38)

Mikäli vaimennuspiiriin kuuluu kipinäväli sarjassa vaimennusvastuksen kanssa, täytyy sen sammuminen purkausvirran vaimentumisen jälkeen testata. Muuten vaimennusvastus täytyy testata käyttötaajuisen vikavirtasietoisuustestin mukaan ja merkitä jatkuvaksi tehohäviöksi. Standardiversioiden välillä ei ole eroa testin osalta. (IEC 60143-2:1994, s. 57, IEC 60143-2:2011 CDV, s. 39)

4.2.3 Signaalikolumni

Suojalaitestandardin vuoden 1994 versio määrittelee taulukon 2 mukaiset signaalikolumnin tyyppitestit

Taulukko 2. Signaalikolumnin tyyppitestit vuoden 1994 standardiversiossa.

Signaalikolumni
IEC 60143-2 1994
Salamasyöksyjännitetesti
KytKentäsyöksyjännitetesti, kuiva
KytKentäsyöksyjännitetesti, märkä
Verkkotaajuinen jännitetesti, kuiva
Radiohäiriöjännitetesti
Vaimennusmittaukset
Lämpötilatesti

Vuoden 2011 standardiversiossa ei suoraan määritellä testejä. Siinä viitataan standardiin IEC 61109, jonka mukaan testit tulee tehdä. IEC 61109 ”*Insulators for overhead lines – Composite suspension and tension insulators for a.c. systems with a nominal voltage greater than 1 000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria*” määrittelee signaalikolumnin testauksen. Standardin IEC 61109 mukaan signaalikolumnille tehdään salamasyöksyjännitetesti, märkä vaihtojännitetesti sekä märkä kytkentäsyöksyjännitetesti. Edellä mainitussa standardissa on vielä viittaus IEC 60383-2 standardiin, jonka mukaan määritetyt sähköiset testit tulee tehdä. Testijännitetasojen tulisi vastata samoja, mille signaalikolumni altistuu lavan alla. Käytännössä signaalikolumni testataan suuremmilla jännitteillä kuin todellisella jännitteellä.

5 LABORATORIOKYSELY JA TULOSTEN TUTKIMINEN

Opinnäytetyön yhtenä tarkoituksena oli tutkia Euroopassa olevia laboratorioita ja kartoittaa niiden kykyä tehdä sarjaparistokomponenttien testejä. Kyselyn lähtökohtana oli INMR-julkaisu ja sarjaparistostandardi IEC 60143-2:2011. INMR-julkaisussa on maailmanlaajuinen luettelo suurteho- ja suurjännitelaboratorioista. Komponenttien testaamista ajatellen kysely rajattiin Euroopan alueelle, sillä komponenttien kuljettaminen kauas on hankalaa ja kallista. Julkaisussa oli jokaisesta laboratoriosta lyhyt esittely ja tietoa laboratorion suorituskyvystä. Kyselyllä pyrittiin saamaan vielä yksityiskohtaisempaa tietoa, kuin lehdestä on saatu. Laboratoriot saattavat ilmoittaa lehdessä heidän teoreettiset sähköiset arvot, johon laitteilla päästään ihannetilanteessa. Kysely lähetettiin yhteensä yli kahteenkymmeneen laboratorioon ympäri Eurooppaa. Laboratorioita oli kolmen tyyppisiä, suurjännitelaboratorioita, suurteholaboratorioita sekä laboratorioita, joissa oli molemmat puolet. Esitys (liite 3) eri laboratorioista on tehty kyselyyn saatujen vastausten ja INMR-lehden mukaan.

KEMA on Euroopan suurin ja tehokkain testilaboratorio. Siellä on suurteho- ja suurjännitelaboratoriot. Se on suosittu, kallis ja jonotusaika on hyvin pitkä. Alstom Grid Oy on teettänyt kipinävälin ja vaimennuspiirin testejä aikaisemmin KEMAssa. Laboratoriokapasiteettien kartoituksella on tarkoitus löytää kipinävälin osalta vaihtoehtoisia testauspaikkoja, joissa pystyttäisiin samaan tai lähes samaan. KEMA oli yksi harvoista laboratorioista, jotka pystyivät toteuttamaan kipinävälille esitetyn palaavan jännitteen testin kyselyssä esitetyn sekvenssin mukaisesti. Testi toimii referenssinä vertailtaessa KEMAA muihin laboratorioihin, sillä siinä vaaditaan suuria jännitteen ja virran arvoja.

Kyselyä varten tarvittiin useampaa IEC-standardia. IEC 60143-2 lisäksi käytettiin IEC 60071-1 standardia, jossa määritellään standardin mukaiset vaihtojännite- ja syöksyjännitekoestuksiin käytettävät jännitteet. Oikosulkuvirtatesteissä käytettävät testivirran arvot saatiin IEC-standardista 60909. Sarjapariston suojalaitestandardista käytettiin CDV-versiota.

Laboratoriot vastasivat kyselyyn hyvin vaihtelevasti. Kysely lähetettiin tammikuun viimeinen päivä ja ensisijainen viimeinen vastauspäivä oli helmikuun viimeinen päivä. Vastauksia saatiin helmikuun aikana, mutta suurin osa oli vielä saamatta maaliskuun

alussa. Laboratorioita, jotka eivät olleet vastanneet, muistutettiin helmikuun puolessa välissä. Helmikuun jälkeen käytiin puhelinkeskusteluita laboratorioiden henkilökunnan kanssa ja lisäksi laboratorioihin lähetettiin sähköpostia vielä maaliskuun aikana. Puheluilla ja sähköposteilla onnistuttiin saamaan lisää vastauksia. Yhteistyö laboratorioiden kanssa oli myös vaihtelevaa. Eräät laboratoriot olivat hyvin innoissaan yhteistyöstä ja toiset laboratoriot eivät vastanneet ollenkaan. Lisäksi kyselyyn vastanneet laboratoriot antoivat eritasoisia vastauksia.

5.1 Suurteholaboratoriot

Suurin osa kyselyn kysymyksistä oli suunnattu suurteholaboratorioille. Kyselyn saaneista laboratorioista neljäsosa on suurteholaboratorioita. Laboratoriot sijaitsevat pääasiassa Keski-Euroopassa.

Esimerkkinä KEMA ilmoitti, että kolmen kipinäkopin kokoonpano mahtuu helposti heidän laboratorioon. KEMA pystyy tekemään suurteholaboratorioille suunnatut testit ilman ongelmia. KEMA ilmoittaa kykenevänsä tuottamaan 5000 MVA oikosulkutehon yksivaiheiseen testipiiriin ja tällöin virta voi olla maksimissaan $100 \text{ kA}_{\text{rms}}$.

Eräs mielenkiintoisimmista kyselyn vastauksista saatiin Espanjasta L.C.O.E. (Laboratorio Central Oficial de Electrotecnia) laboratoriosta. Laboratorio oli erittäin yhteistyöhaluinen ja tämän takia laboratoriosta saatiin selvitettyä paljon verrattuna muihin laboratorioihin. INMR-lehdessä L.C.O.E. ilmoittaa, että Madridissa on suurjännitelaboratorio. Kyselyn avulla selvisi, että L.C.O.E:llä on myös suurteholaboratorio Bilbaossa. Yhteydenpidon jälkeen selvisi, että L.C.O.E. suurteholaboratorio kykenee normaalilla varustuksella $125 \text{ kA}_{\text{peak}}$ testivirtaan ja $140 \text{ kV}_{\text{rms}}$ jännitteeseen. Tämä tarkoittaa sitä, että laboratoriossa onnistuisi tehdä oikosulkutestit sekä muut suuria virtoja vaativat testit. Bilbaon laboratoriolla on myös mahdollisuus kuljettaa paikalle Madridista kuljetettava testimuuntaja, jolla päästään $300 \text{ kV}_{\text{rms}}$ jännitteeseen ja 60 kVA tehoon. Sarjaparistoja käsiteltäessä yleensä käytetään jännitteiden ja virtojen huippuarvoja, jolloin perusvarustuksella päästäisiin lähes $200 \text{ kV}_{\text{peak}}$ jännitteeseen ja kuljetettavalla muuntajalla $420 \text{ kV}_{\text{peak}}$ jännitteeseen. Tämä mahdollistaisi palaavan jännitteen testin suurella U_{Lim} jännitteellä. Ainoa rajoitus Bilbaon laboratoriossa on se, että sinne ei mahdu kahta kipinäväli-

koppia päällekkäin. Tämä ei kuitenkaan pitäisi tuottaa ongelmaa, jos kopit voidaan asettaa vierekkäin tai testit tehdään yhdellä kipinävälillä.

Ranskassa sijaitsee kaksi mahdollista testauslaboratoriota. Les Renardieres ja Alstom CERDA ovat suuria ja tehokkaita laboratorioita. Les Renardieresin suurteholaboratoriossa saatava maksimi virta on $130 \text{ kA}_{\text{rms}}$, $300 \text{ kA}_{\text{peak}}$, 3 s. Alstom CERDA ilmoittaa pystyvänsä $125 \text{ kA}_{\text{huippu}}$, 0,3 s virtaan. Lisäksi CERDA kykenee $63 \text{ kA}_{\text{rms}}$ virtaan 1 s ajan siten, että keskiarvo on $63 \text{ kA}_{\text{rms}}$ ja virran syöttö aloitetaan $68 \text{ kA}_{\text{rms}}$. Tämä tarkoittaa, että molemmissa laboratorioissa pystytään kyselyssä esitettyihin oikosulkutesteihin ja muihin standardoituihin suuria virtoja vaativiin testeihin. Les Renardieres ilmoittaa kykenevänsä palaavan jännitteen testiin 450 kV tasajännitteellä. Testiä ei ole mahdollista tehdä tasajännitteellä kipinävälin jännitteenjakokondensaattoreiden takia. INMR-lehden mukaan maksimijännite Les Renardieresin suurteholaboratoriossa on $420 \text{ kV}_{\text{rms}}$. CERDA ilmoittaa, että he pystyvät $450 \text{ kV}_{\text{peak}}$ jännitteeseen. Rajoituksena voi olla kipinäkoppikokoonpanon mahtuminen testilaboratorioon. INMR lehden mukaan CERDAn oikosulkuteho on 5000 MVA kolmevaiheisena ja Les Renardieresin 6600 MVA.

Muita kyselyyn vastanneita suurteholaboratorioita oli mm. FGH Engineering Saksassa ja L2E/Volta Ranskassa. Nämä laboratoriot ovat pienitehoisempia kuin edellä mainitut ja L2E/Volta on keskittynyt lähinnä pien- ja keskijännitetestaukseen. L2E/Volta ilmoitti pystyvänsä suuriin virtoihin mutta pienillä jännitteillä. L2E/Volta:ssa virransyöttökyky tippuu radikaalisti, mitä suuremmalla jännitteellä testi tehdään. Esimerkiksi $170 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 2200 V jännitteellä ja $10 \text{ kA}_{\text{rms}}$ 97 kV jännitteellä. Komponentit mahtuvat hyvin L2E/Voltan laboratorioon. FGH ilmoittaa vastauksessaan, että heidän suurteholaboratorion oikosulkuteho on 630 MVA kolmevaiheisena INMR-lehdessä olevasta 600 MVA:sta poiketen. FGH ei pysty tekemään kyselyn mukaisia oikosulkutestejä komponenteille. Lehden mukaan FGH pystyisi maksimissaan $100 \text{ kA}/1 \text{ s}$ ja $80 \text{ kA}/3 \text{ s}$.

Mielenkiintoisia suurteholaboratorioita, jotka eivät vastanneet kyselyyn, jäi myös jäljelle. Näitä ovat ABB Switzerland Ltd. High power & high voltage Laboratories Sveitsissä, ICMET Romaniassa ja VEIKI VNL Electric Large Laboratories Ltd. Unkarissa. Näistä laboratorioista on esitetty alla taulukko, johon on kerätty INMR-lehdessä ilmoitettuja suoritusarvoja.

Taulukko 3. Vastaamattomien suurteholaboratorioiden tietoja.

Laboratorio	Maa	Oikosulkuteho	Maksimi I	Maksimi U	Mitat (m)
ABB Switzerland Ltd.	Sveitsi	3000 MVA	135 kA / 3 s	264 kV	40 x 12 x 12 (p x l x k)
ICMET	Romania	4000 MVA	31,5 kA / 0,2 s	123 kV	-
VEIKI VNL	Unkari	1000 MVA	220 kA / 1s	75 kV	-

ABB: n laboratorio Sveitsissä vaikuttaisi sopivalta kipinävälin testauksen kannalta suorituskykynsä puolesta. ABB sopii myös vaimennuspiirin komponenttien oikosulkutestaukseen. VEIKI vaikuttaa hyvältä suurilla virtoilla vaativiin oikosulku ja ohitusvirtatesteihin. Kipinävälin palaavan jännitteen testin tekoa rajoittaa alhainen jännite.

5.2 Suurjännitelaboratoriot

Suurjännitelaboratorioita on ympäri Eurooppaa. Lähimmät vastanneista sijaitsevat Ruotsissa ja Norjassa. Ruotsissa sijaitsevassa STRi:ssä kapasiteetti riittää hyvin sarjaparistokomponenttien testeihin. Laboratoriossa on 3000 kV_{peak} salamasyöksyjännitekapasiteetti ja 1050 kV_{rms} vaihtojännitekapasiteetti. Lisäksi testihalli on suuri, sen mitat ovat 37m x 25m x 30m (p x l x k). Halliin mahtuu helposti esimerkiksi 7000 mm korkea signaalikolumni. Lisäksi STRi: llä on kolme muuta pienempää testihallia.

Norjalainen Sintef ilmoitti vastauksessaan, että on rakentamassa tulevaisuudessa uuden testihallin. Sintef antoi nykyiset ja tämän hetkisten tietojensa mukaiset tulevaisuuden arvot testauskapasiteetistaan. Tällä hetkellä Sintef pystyy 800 kV_{rms} vaihtojännitteeseen, 1600 kV_{peak} salamasyöksyjännitteeseen ja 1000 kV_{peak} kytkentäsyöksyjännitteeseen. Tulevaisuudessa on tarkoitus nostaa salamasyöksyjännitteen huippua 2000 kV_{peak}:n ja kytkentäsyöksyjännitteen huippua 1650 kV_{peak}:n. Sintef kykenee riittävän suureen jännitteeseen sekä on lähellä. Sintefillä on myös oikosulkutestikapasiteettia 100 kA_{peak} ja 40 kA_{rms} / 0,1 s. Termistä oikosulkukestoisuutta varten 40 kA_{rms} / 0,1 s ei riitä, sillä virran tulisi kestää yleensä 1 - 3 s.

Keski-Euroopassa sijaitsevia suurjännitelaboratorioita on useita. Aikaisemmin suurteholaboratoriokappaleessa esille tulleilla KEMAlla, Alstom CERDAlla ja Les Renardieresillä on suurjännitelaboratorio. Jokainen edellä mainituista laboratorioista kykenee signaalikolumnin vaatimiin jännitetesteihin. KEMAssa vaihtojännitettä saadaan vähiten, 850 kV_{rms}, mutta KEMAn ollaan hankkimassa uutta suurjännitemuuntajaa. CERDAlla ja

Les Renardieresilla molemmilla on yli 1000 kV_{rms} vaihtojännitekapasiteetti. Lisäksi Les Renardieres ilmoittaa, että 1100 kV_{rms}:n vaihtojännitteellä maksimi teho on 3000 kVA:ta. Salamasyöksyjännitetestaus signaalikolumnille on mahdollista jokaisessa laboratoriossa. KEMAssa on 2600 kV_{peak} syöksyjännitegeneraattori. CERDAssa ja Les Renardieresissa on 3000 kV_{peak} syöksyjännitegeneraattori.

L.C.O.E:n suurjännitelaboratoriosta saatiin tarkkaa tietoa. Tämän hetkinen kapasiteetti on 800 kV_{rms} vaihtojännitteelle ja 1400 kV_{peak} salamasyöksyjännitteelle. Tulevaisuudessa, luultavasti kuluvan vuoden lopulla Madridissa sijaitsevaan laboratorioon on tarkoitus hankkia uusi 2400 kV syöksyjännitegeneraattori. Nykyinen syöksyjännitegeneraattori on seitsemänportainen. Jokainen portas on 200 kV ja 10 kJ. Uusi syöksyjännitegeneraattori on 14-portainen.

FGH Engineering & Test GmbH laboratoriossa on kyselyyn vastanneista laboratorioista suurin syöksyjännitekapasiteetti. Kyselyyn FGH vastasi, että testihallissa saadaan 1550 kV_{peak} ja ulkolaboratoriossa jopa 3500 kV_{peak} salamasyöksyjännite. Lisäksi FGH kykenee 1100 kV_{rms} vaihtojännitteeseen testihallissa. INMR lehden mukaan FGHn syöksyjännitegeneraattorin maksimi jännite on 4500 kV_{peak}. Kytöntäsyöksyjännitekapasiteetti FGH:ssa on testihallissa 1175 kV_{peak} ja ulkolaboratoriossa 2500 kV_{peak}. Kyselyn avulla saatujen vastausten perusteella todetaan, että todellinen kapasiteetti on lehdessä ilmoitettua pienempi.

Itävallassa sijaitseva Test Institution of High Voltage Engineering Graz Ltd (TUgraz) on samaa tasoa, kuin CERDA ja Les Renardieres. TUgraz:n laboratoriossa 1100 kV_{rms} vaihtojännitekapasiteetti. Lisäksi TUgraz ilmoitti, että 2013 vuoden puoliväliin mennessä olisi mahdollista saada 1500 kV_{rms} vaihtojännite. TUgraz:illa olisi siten kyselyyn vastanneista laboratorioista paras vaihtojännitekapasiteetti. Salamasyöksyjännitekapasiteetti TUgrazilla on 2400 kV_{peak}. TUgrazin kytkentäsyöksyjännitekapasiteetti 1900 kV_{peak}, mutta positiivinen jännite on mahdollinen vain laboratorion ulkopuolella.

Euroopassa on myös suurjännitelaboratorioita, jotka eivät ole kelvollisia sarjaparistokomponenttien testaukseen. Näitä paikkoja ovat Narec Electrical Systems ja Maxwell Technologies. Maxwell on erikoistunut täysin erilaisiin testeihin, mitä sarjaparistokomponenteille vaaditaan. Narec:ssa taas pystytään kehittämään hyvin pieniä jännitteitä verrattuna muihin selvityksen laboratorioihin.

Vaimennusvastuksen ja kelan syöksyjännitetestin vaatii syöksyjännitegeneraattorilta paljon energiaa. Tästä syystä se on laboratoriolle vaativa. Kelan ja vastuksen alhaisen impedanssin takia syöksyaallon muoto voi poiketa vähän normaalista 1,2/50 μ s muodosta siten, että selän kesto-aika voi olla lyhyempi. Lisäksi aallon pieni vääristyminen sallitaan [IEC 60143-2]. Normaalisti vaihtojännitetestin ei voida tehdä vaimennusvastukselle ollenkaan, sillä virta kasvaisi siinä niin suureksi. Harva kyselyyn vastannut laboratorio ilmoitti pystyvänsä suorittamaan syöksyjännitetestin vaimennuspiirin elementeille 950 kV_{peak} jännitteellä. Yksi harvoista oli edellä mainittu Ruotsissa sijaitseva STRi. STRi totesi myös, että juuri oikean aaltomuodon muodostaminen voi olla vaikeaa. Kaksi muuta olivat CERDA ja Les Renardieres.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Laboratoriokysely lähetettiin kahteenkymmeneenkolmeen laboratorioon, joista vastaus saatiin lähes jokaiselta laboratoriolta. Vastausten laatu vaihteli paljon. Osa laboratorioista oli hyvin yhteistyöhaluisia. Vastauksista kerättiin tietoa ja muodostettiin parempi käsitys testausresursseista Euroopassa. Vaativin komponentti testauksen kannalta on laboratoriolle kipinäväli, jonka testaaminen vaatii laboratoriolta paljon. Kun suojaustason jännite kasvaa, joudutaan kipinävälejä laittamaan sarjaan, jolloin kokoonpanon vaatima tila kasvaa. Se pelkäästään vaikeuttaa testausta. Lisäksi suojaustason jännitteen kasvu tuo vaikeuksia IEC-standardin 60143-2 määrittelemään deionisaatiotestiin, sillä se tehdään suojaustason jännitteellä.

Harva suurteholaboratorio pystyy $125 \text{ kA}_{\text{peak}}$ virtaan ja $450 \text{ kV}_{\text{peak}}$ jännitteeseen. Huippuvirta ei aiheuta ongelmia, mutta jännitettä saadaan harvassa laboratoriossa riittävästi. Edellä mainitut arvot valittiin tarkoituksella suuriksi, jotta pystyttiin selvittämään laboratorioiden maksimaalista suorituskykyä. Vastausten perusteella näitä laboratorioita oli vähän. Pienemmälle suojaustasolle suunniteltujen sarjaparistojen testaukseen löydettiin uusia mahdollisia testauspaikkoja. KEMAn kapasiteettia ylittävää laboratorioita ei löydetty.

Vaimennuspiirin komponenttien oikosulku-testaus onnistuu monessa kyselyyn vastanneista laboratorioista. Vaikeuksia niiden testauksessa tuo suuren vaimennuskelan paino, jolloin jouduttaisiin hankkimaan erillinen nosturi. Kuitenkin monessa paikassa 8000 kg :n paino ei toisi lisäkustannuksia ja useissa laboratorioissa oli vähintään 5000 kg :n nosturi. Komponenttien mahtuminen laboratorioon ei ole ongelma. Syöksyjännitetesti on hankalin vaimennuspiirin komponenttien kohdalla. Harvassa laboratoriossa pystytään tekemään syöksyjännitetesti $950 \text{ kV}_{\text{peak}}$ jännitteellä kyselyn resistanssin ja impedanssin arvoilla.

Signaalikolumnin testaus onnistuu useimmissa kyselyn laboratorioissa. Signaalikolumnin testaamisessa sen korkeus vaikeuttaa testaamista suurilla jännitteillä laboratorion eristystason takia. Kyselyyn vastanneet laboratoriot, jotka kykenivät tarvittuihin testi-jännitteisiin, pystyisivät tekemään testit.

Kaikista näistä vastauksista kerättiin Excel-taulukko (liite 3), johon vastaukset jäseneltiin komponenttikohtaisesti. Lisäksi yleiset ja kyselyn avulla selvinneet asiat listattiin taulukkoon. Taulukosta nähdään eri komponenttien testaukseen sopivat laboratoriot. Lisäksi taulukkoon listattiin toiselle välilehdelle laboratorioita, jotka eivät vastanneet tai antoivat pelkkiä datalehtiä vastaukseksi.

Suojalaitestandardin IEC 60143-2 ”*Series capacitors for power systems – part 2. Protective equipment for series capacitor banks*” vertailussa huomattiin, että standardin mukainen testaaminen tulee vaikeutumaan. Toistojen määrä lisääntyy testeissä, jolloin testeistä tulee vaativampia. Lisäksi läpäisykriteerit tulevat kovenemaan ja tarkentumaan. Tyypitestien läpäisy kipinävälillä tullaan tulevaisuudessa toteamaan testein.

Tehty laboratorioskysely toimi laboratorioresurssien selvitykselle hyvänä alkuna. Tulevaisuudessa voisi käyttää samaa mallia laboratorioresurssien selvittämiseen hieman tarkemmin. Suurteholaboratorioiden testihallin fyysinen koko on yksi tärkeä asia. Liitteen 3 avulla voidaan listata sellaiset laboratoriot, joiden kokoa kannattaa selvittää. Lisäksi vaimennuspiirin elementeille olisi hyvä kehittää taulukko eri impedanssi- ja jännitearvoilla, jonka avulla voitaisiin selvittää syöksyjännitekoestuksen mahdollisuuksia laboratorioissa tarkemmin. Mielestäni työlle asetetut tavoitteet toteutuivat kohtuullisen hyvin. Alstom Grid Oy saa työn tuloksena käyttökelpoiset taulukot, joiden pohjalta voidaan testausasioita kehittää lisää.

LÄHTEET

Anderson, P.M. & Farmer R.G. 1996. Series Compensation of Power Systems. California: PBLSH! Inc.

Aro, M, Elovaara, J, Karttunen, M, Nousiainen, K & Palva, V. 2003. Suurjännitetekniikka. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Elovaara, J. & Laiho, Y. 1999. Sähkölaitostekniikan perusteet. Helsinki: Valopaino Oy.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot 1, järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Tallinna: Raamatutrükikoda.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot 2, verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Tallinna: Raamatutrükikoda.

IEC 60060-1 2010 ”High-voltage test techniques – Part 1:General definitions and test requirements”

IEC 60143-2 1994 ”Series capacitors for power systems – Part 2: protective equipment for series capacitor banks”

IEC 60143-2 2011 CDV ” Series capacitors for power systems – Part 2: protective equipment for series capacitor banks”

LIITTEET

Liite 1. Laboratoriokysely.

The ALSTOM logo is located in the top right corner of the page. It consists of the word "ALSTOM" in a bold, sans-serif font. The letters "ALSTO" are blue, and the letter "M" is red. The "O" in "ALSTO" has a red circle around it, which is part of the company's branding.

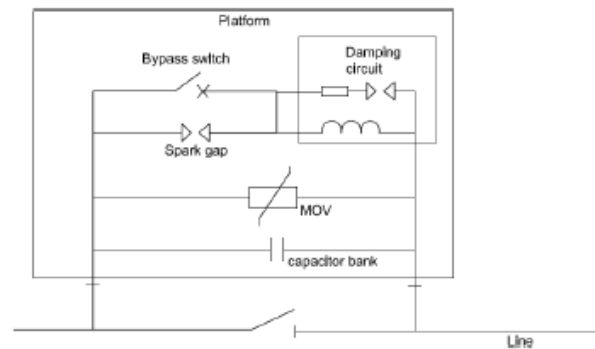
SURVEY OF TEST LAB CAPABILITIES FOR FSC
TESTING

This survey is about FSC (fixed series capacitor) routine and type testing. Purpose is to gather information about testing capabilities of HV/HP laboratories for FSC components. This survey is part of my thesis and I should have the answers by the end of February in order to have sufficient time to analyze the results. Thank you for your contribution.

Contact information

Author: Janne Holla janne.holla@alstom.com
Supervisor: Jussi Poyhonen jussi.poyhonen@alstom.com

The limiting voltage of the FSC in this survey is $U_{lim} = 450$ kV (peak). Selected short-circuit current values are $I_{sh} = 63$ kA/1s (rms) and $I_{dyn} = 125$ kA (peak) (IEC 60909). Picture 1 shows typical FSC configuration.

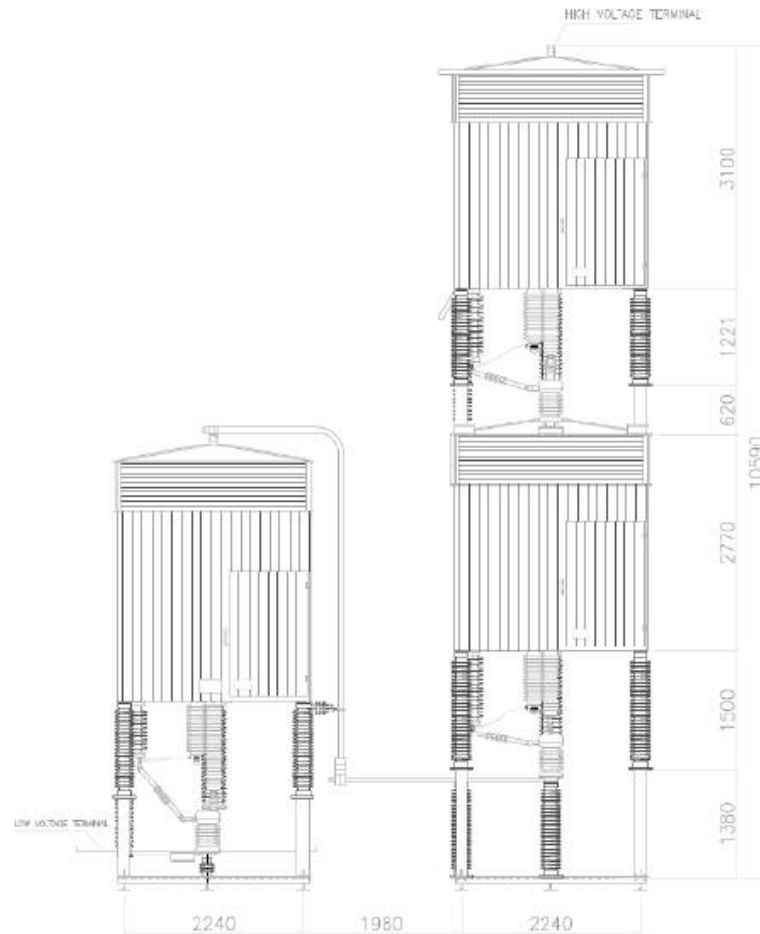


Picture 1. SC configuration.

1 SPARK GAP (Forced triggered gap)

Spark gap is one of the main components in the series capacitor. Primary function of SG (spark gap) is to limit energy accumulation into MOV (metal oxide varistor) and thus to protect them against thermal overloading. Secondly it can reduce the overvoltage seen by capacitor bank (and MOV) by fast by-passing of the SC. Spark gap consists of triggering electronics and cubicle(s)

where the main and auxiliary electrodes are located. Spark gap assembly can be made of 1-3 cubicles. Each cubicle weights approx. 1500kg. Maximum of two SGs can be assembled one on top of the other. Picture 2 shows a typical assembly and dimensions of three cubicles.



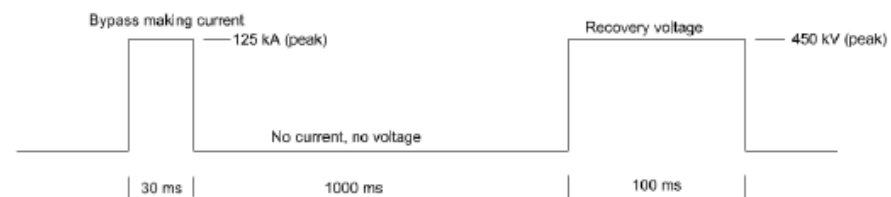
Picture 2. Spark gap assembly with three cubicles.

From the picture 2 you can see also the dimensions of a two cubicle assembly.

SPARK GAP QUESTIONS

Does spark gap assembly of three cubicles fit into your HV test hall? If not, does two or single cubicle assembly fit in?

IEC 60143-2 defines in section 3.2.3.1.2 c) recovery voltage test (type test) for the spark gap. Spark gap shall be exposed to bypass making current (the combination of the capacitor banks discharge current and the power frequency fault current). Current value is $I_{dyn} = 125 \text{ kA}$ (peak). Bypass making current lasts for 30ms and then after 1s re-insertion time the test voltage of $U_{Lm} = 450 \text{ kV}$ (peak) shall take effect and duration of test voltage shall be 100ms. Is it possible to do this test in your laboratory?



Picture 3. Recovery voltage test.

Do you have a weather test room? If you have, does one cubicle assembly fit into it?

Recovery voltage test demands great current values. How great is the short-circuit power you can get from your equipment?

2 SIGNAL COLUMN

The purpose of signal column in series capacitor is to be the path for signals between the platform and the ground level where the control building is located. Signal column consists of insulating tube and a number of fiber optic cables inside. Signal column is located below the series capacitor platform; the top of the column has the same potential than platform while bottom is at ground potential. Transmission voltage can be up to 1000 kV so there can be a high potential difference between platform and ground terminals of signal column.

Signal column should be considered as hybrid insulator that is not made for carrying loads (IEC 61109). Please see an example of signal column assembly in the picture 4.



Picture 4. Signal column of a 735 kV FSC.

Total height of the signal column in the example is **7000mm**.

SIGNAL COLUMN QUESTIONS

The signal column type test voltage withstand levels shall match those of platform and the signal column may be tested in such a way as to simulate its position under or next to platform (IEC 60143-2, section 3.10.2). If the line voltage is 1000 kV, the voltage over signal column below the

series capacitor platform will be $\frac{1000 \text{ kV}}{\sqrt{3}} = 577 \text{ kV}$. Standard test values defined by IEC 60071-

1, Table 3 are in power frequency AC voltage test 680 kV (rms) and in lightning impulse voltage withstand test 1675 kV (peak) (BIL).

Can you generate these voltages? What are the greatest voltages you can generate?

3 DISCHARGE CURRENT LIMITING DAMPING EQUIPMENT (DCLDE)

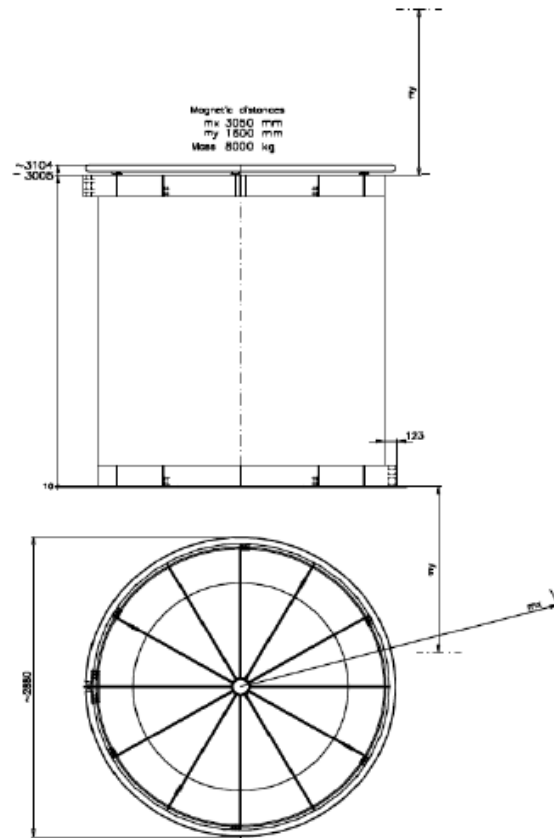
DCLDE is one of the main equipment of series capacitor and it is typically in series with protective spark gap. Discharge current-limiting and damping equipment include discharge current limiting reactor and in some applications it may also include damping resistor in parallel with the reactor. Purpose of the circuit is to limit the magnitude and frequency of discharge current and to provide a sufficient damping of the capacitor discharge oscillations upon operation of the protective spark gap or closing of the bypass switch.

Tests shall be performed on reactor and resistor separately (IEC 60143-2, section 3.6.3).

3.1 Damping reactor

The routine, type and optional tests for the reactor shall be carried out in accordance with relevant clauses of the reactor standard IEC 60076-6, clause 9, "Filter, damping and discharge reactors associated with capacitors".

Picture 5 gives indication about a damping reactor which is used as an example in this survey.



Picture 5. Damping reactor dimensions.

Inductance of the reactor is **2,4 mH** and mass is approx. **8000 kg**. Needed post insulators (not shown in the picture) are 1900 mm high.

3.2 Damping resistor

The resistor assembly consists of several parallel connected resistors. The example used in this survey has 5 parallel connected 5Ω resistor elements that comprise the whole damping resistor with 1Ω resistance. Maximum dimensions for one element are: length approx. 3500mm and width 300mm. The impulse voltage test is done to one resistor element (resistance = 5Ω) only.

DCLDE QUESTIONS

If the limiting voltage is $U_{lim} = 450$ kV (peak), the calculated test voltages for reactor and resistor should be in AC voltage test 395 kV (rms) and in lightning impulse voltage withstand test 950 kV (peak). Can you generate these voltages over resistor and reactor in your HV test laboratory? What are the greatest voltages you can generate?

The weight of the reactor can be 8000 kg. Does the weight of the reactor cause any problems? (lifting /moving indoors, floor withstand etc.)

COMMON QUESTIONS

Can you carry out the IEC defined short-circuit current tests for damping circuit and spark gap with those selected $I_{th} = 63 \text{ kA/1s (rms)}$ and $I_{dyn} = 125 \text{ kA (peak)}$ values? What are the greatest current values that you can carry out the tests for these equipment?

Can you give us some kind of estimated price of one testing day for each component?

Is there something else you would like to tell us concerning testing in your laboratory?

I would highly appreciate if you could attach some brochures and/or some data sheet showing general information about your test equipment and test facilities.

THANK YOU FOR YOUR VALUABLE INFORMATION!

Liite 2. Standardivertailutaulukko.

IEC 60143-2		
Versioiden väliset erot		Katso tarkemmat huomiot a-f taulukon alapuolelta
1994	2011	Huomiota
Kipinäväli (pakkoliipaistava)		
Tyypit		
Vikavirtatesti, tehdään kerran	Vikavirtatesti, tehdään kerran	v. 2011 versiossa tiukemmat läpäisykriteerit, kuin v. 1994 versiossa. Läpäisy varmistetaan testeillä a)
Purkausvirtatesti, toistetaan 10 kertaa (20 jos tarvetta)	Ohitusvirtatesti, toistetaan 20 kertaa	v. 2011 versiossa tiukemmat läpäisykriteerit, kuin v. 1994 versiossa. Läpäisy varmistetaan testeillä b)
Deionisaatiotesti	Deionisaatiotesti, pakkoliipaistava kipinäväli	v. 2011 Testijännitteen kesto 100 ms. läpäisykriteerit; 1/1 tai 2/3 onnistunutta toistoa. c)
Rutiinitestit liipaisupiirille		Vain eroavaisuudet
Verkkotaajuinen referenssijännitesti tai verkkotaajuinen ylilyöntitesti (kumpi sopiikaan)	Toiminnallisuustesti (voidaan tehdä käyttöönnoton yhteydessä)	
	Ylilyöntijännitesti tarkkuuskipinäväli (jos soveltuva)	
	Komponenttien mittaus	
Koko kokoonpanon testit (erityistyyppit)		
Koko kokoonpanon testit (erityistyyppit)		
Koko kokoonpanon testi, ei tarkempia määritelmiä	Koko kokoonpanon testi a-c	Tarkat määritelmät testeille v. 2011 versiossa
	a) Kokonaisohitusajan testi 0,95-kertaisella suojaustasolla	Testi toistetaan 5 kertaa DC jännitteellä molemmilla polariteeteilla
	b) Liipaisu- ja ohitusajan varmistus minimijännitteellä	Soveltuva, mikäli kipinävälin täytyy pystyä ohittamaan sarjaparisto ulkoisella ohituskäskyllä d)
	c) Verkkotaajuinen jännitteen sietotesti	Testijännitteen kesto 0,5 s ja testi toistetaan kerran e)
Vaimennuspiiri		
Vaimennuskela		
Tyypit		
Vikavirtatesti, tehdään kerran	Oikosulkutesti (pakollinen), tehdään kahdesti.	Samanaiset testit muuten. v. 2011 IEC 60076-6, kohta 9.10.10 on soveltuva
Purkausvirtatesti, tehdään 10 kertaa (20 jos tarvetta)	Ohitusvirtatesti (pakollinen), tehdään 20 kertaa	Samanaiset testit muuten
Lämpötilan nousutesti	Lämpötilan nousutesti (pakollinen)	v. 2011 IEC 60076-6, kohta 9.10.8 on soveltuva
	Missä soveltuvat, voidaan erityisesti pyytää	
	Muokattu oikosulku/ohitusvirtatesti	v. 2011 IEC 60076-6, kohta 9.10.15 on soveltuva
	Mekaaninen resonanssitestit	v. 2011 IEC 60076-6, kohta 9.10.16 on soveltuva
	Käämiresistanssi ja induktanssi taajuuden funktiona	
Rutiinitestit		
Resistanssimittaukset	Käämiresistanssin mittaus, IEC 60076-6, kohta 9.10.2 ja IEC 60076-1 ovat soveltuvia	
Induktanssimittaukset	Induktanssimittaus, IEC 60076-6, kohta 9.10.15 on soveltuva	
Hävöiden mittaus	Häviö- ja laatukertoimen mittaus, IEC 60076-6, kohta 9.10.6 on soveltuva	
Impulssijännitesti	Impulssijännitesti, IEC 60076-6, kohta 9.10.7 on soveltuva	
Vaimennusvastus		
Tyypit		
Energian absorptiokykytesti, toistetaan 10 kertaa	Energian absorptiokykytesti, toistetaan 10 kertaa	f)
Korkeataajuinen virran sietotesti (purkaustesti)	Purkausvirtatesti, toistetaan 2 kertaa	v. 1994 ei ole toistojen määrää määritelty f)
Verkkotaajuinen vikavirran sietotesti	Verkkotaajuinen vikavirran sietotesti, tehdään 1 kerran	f)
Koteloinnin impulssijännitesti	Koteloinnin impulssijännitesti, -15/+15 ja 2 läpilyöntiä / polariteetti	v. 2011, Katso IEC 60143-1, kohta 6.1.3.4
Vaimennuspiirin kipinävälin sammumisen toteaminen	Vaimennuspiirin kipinävälin sammumisen toteaminen	
Rutiinitestit		
Resistanssimittaus	Resistanssimittaus	
Vuototesti (jos soveltuva oikealle vastus-designille)	Vuototesti	
	Referenssijännitesti	v. 2011, referenssijännitesti, jos vaimennuspiirissä on DMOV.
Ylilyöntijännitesti	Ylilyöntijännitesti	
Vaimennuspiiri (tyyppi testi)	Osittaispurkaustesti (sisäisen koronan testi), testi tehdään IEC 60270 mukaan	Testi tehdään, jos on DMOV
Vaimennuspiirin vaimennuksen demonstroitin joko pienjännitteisellä purkauksella tai laskemalla komponentiarvoista		
Signaalikolumni		
Tyypit		
Dielektriset/ tyypit		
Salamasyöksyjännitesti		v. 2011 IEC 61109 viittaa IEC 60383-2, jonka mukaan testit tehdään ja näin ollen varmistetaan määritellyt arvot.
Kytkäsyöksyjännitesti, kuiva		
Kytkäsyöksyjännitesti, märkä		
Verkkotaajuinen jännitesieto, kuiva		
Radiohäiriöjännite (RIV)		
Vaimennusmittaus		
Lämpötilatesti		
Rutiinitestit		
Optiset testit		
Asennettujen kolumnien kuituvaimenemisen mittaus	Optisissa testeissä käytetään IEC 61300-3-4 standardia. Se mitä metodia käytetään on asiakkaan ja toimittajan välinen asia.	
a) v. 2011, pakkoliipaistavan kipinävälin läpäisykriteerit vikavirtatelle. Ei saa ilmentyä merkittävää mekaanista vahinkoa tai liiallista murtumista eikä merkittävää muutosta ylilyönti jännitteessä. Tämä varmistetaan; 1. Verkkotaajuusella jännitesteillä, jonka huippujännite on 1,2-kertaa suojaustason jännite. Testijännite on oltava puhdasta siniaaltoja ja sen kesto on 60 s. Testiä ei tarvitse tehdä, mikäli ohitusvirtateli tehdään heti vikavirtatestin perään. Testi koskee vain päävälejä. 2. Toiminnallisuustesti, jolla varmistetaan oikeanlainen liipaisu määritellyissä rajoissa.	b) v. 2011, pakkoliipaistavan kipinävälin läpäisykriteerit ohitusvirtatelle. Ei saa ilmentyä merkittävää mekaanista vahinkoa tai liiallista murtumista eikä merkittävää muutosta ylilyöntijännitteessä. Tämä varmistetaan; 1. Joko deionisaatiotestillä tai verkkotaajuus jännitteen sietotestillä, jonka huippujännite on 1,2 kertaa suojaustason jännite. Jännite on oltava puhdasta siniaaltoja ja sen kesto on 60 s. Testi tehdään vain pääväleillä. 2. Toiminnallisuustesti, jolla todetaan kipinävälin oikeanlainen syytyminen määritellyissä rajoissa.	
c) v. 2011, ohitusvirtateli on tehtävä vähintään 10 kertaa ennen deionisaatiotestiä	d) Testipiiri sisältää päävälin ja liipaisupiirin	
e) Testipiiri täytyy koostua päävälistä, pakkoliipaisupiiristä ja MOV:sta. Testijännite ja MOVien suojaustaso täytyy säätää vallitsevat olosuhteet huomioiden, kuten ilmanpaine, lämpötila jne.	f) v. 2011 versiossa vaimennusvastuksen resistanssin muutos ei saa ylittää 5 %.	

Liite 3. Laboratorioresurssitaulukko.

Kyselyyn vastanneet laboratoriot		Kipinäkoppi		(L= 2,4 mH ja R=1Ω)		Signaalikolumni				
Laboratorio	Tyyppi	Deionis. testi 450 kV/125 kA	HP laboratorion koko	Syöksyjännite testi U= 950 kV	Oikosulkutesti I _{th} =63 A/ 1s I _{dyn} = 125 kA	Syöksyjännite U= 1675 kV	Vaihtojännitete testi U=680 kV (rms)	HV laboratorion koko (p x l x k)	Säätöhuone	Testipäivän hinta
Alstom Grid Cerda	HV/HP	OK	-	OK	OK	OK	OK	36m x 21m x 25m	ON	-
EGU - HV laboratory a.s	HV	-	-	EI	-	OK	OK	54m x 25m x 24m	-	-
FGH Engineering & Test GmbH CESI Group	HV/HP	EI	-	EI	EI	OK	OK	35m x 25m x 15m	ON	-
Kema	HV/HP	OK	3 kappaletta OK	-	OK	OK	OK	85m x 50m x 19m	-	-
L2E/Volta d)	HV/HP	EI	-	EI	EI	EI	OK	7m x 19m x 5m	-	-
LCOE	HV/HP	Ei a)	10x10x10	EI	OK	EI	OK	35m x 22m x 23m	ON	HV 2500€ ja HP 11800 €
Les Renardieres Electrical Testing Laboratories	HV/HP	Ei b)	33m x 21m x 31m (p x l x h)	OK	OK	OK	OK	45m x 25m x 20m	ON	-
Sintef Energy Research	HV	-	-	EI	OK	EI	OK	23m x 15m x 12m f)	EI	-
STRI AB	HV	-	-	OK h)	-	OK	OK	37m x 25m x 30m	ON	6000-7000 €
Tecnalia Electrical Equipment Laboratory d)	HV/HP	EI	8m x 10m x 10m (l x p x k)	EI	EI	EI	EI	19m x 14m x 11m	ON	-
Test Istitution of High Voltage Engineering Graz Ltd.	HV	-	-	EI	-	OK	OK	35m x 25m x 21m	Ei i)	3000 €/ päivä + 20% verot

HUOMIOITA

a) HP laboratorion muuntaja on 140 kV (rms). HP laboratorioon mahdollista tuoda 300 kV / 60 kVA testimuuntaja Madridista. Arvioitu hinta kuljetukselle on noin 2000 €.

b) INMR lehden mukaan HP laboratorion max jännite on 420 kV. Virrananto kyky on riittävä.

c) 1 neljästä tehomuuntajasta on pois käytöstä, siksi virranantokyky on tällä hetkellä (14.3.2012) 100 kA (rms) / 250 kA (huippu) / 3s

d) Keskittynyt pien- ja keskijännitekomponenttien testaukseen

e) 2013 vuoden puoliväliin mennessä mahdollisuus 1500 kV AC

f) Tulevaisuudessa pystytään 2000 kV syöksyjännitteeseen, SI 1650 kV, uusi HV laboratorion on suurempi

g) Vastaus hieman epäselvä

h) Oikean aaltomuodon saaminen voi olla vaikeaa

i) IEC 60060 mukaisia wet-testejä voi tehdä ulkona