

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikka

Tutkintotyö

Juuso Nurmi

PD-MITTAUKSET OSANA KUNNONVALVONTAA

Työn ohjaaja
Työn teettäjä
Tampere 2005

Lehtori Eerik Mäkinen
Kaakon Sähkökone Oy, valvoja toimitusjohtaja Tero Parsama

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Sähkövoimatekniikka

Nurmi, Juuso

PD-mittaus osana kunnonvalvontaa

Tutkintotyö

49 sivua

Työn ohjaaja

Lehtori Eerik Mäkinen

Työn teettäjä

Kaakon Sähkökone Oy, valvojana toimitusjohtaja Tero Parsama

Huhtikuu 2005

Hakusanat

sähkökoneiden eristeet, osittaispurkaus, PD-mittaus, $\tan\delta$ -mittaus

TIIVISTELMÄ

Teollisuudessa olevat suurjännitesähkökoneet ja -generaattorit ovat tuotannollisesti tärkeitä. Niiden toimintavarmuus ilman yllättäviä katkoksia on tärkeää taloudellisesti ja tuotannollisesti. Sähkökoneiden ja generaattoreiden kunnonvalvonnassa yksi oleellinen osa on eristyksen kunnonvalvonta, jota tämä tutkintotyö käsittelee.

Työssä on käsitelty sähkömoottorien eristykseen kohdistuvia rasituksia ja niiden vaikutuksia eristykseen sekä eristyksen vanhenemista. Sähkökoneiden yleisimmät eristeet ja niiden ominaisuudet on esitelty tässä työssä. Työn pääpaino on osittaispurkauksien syntyemisessä, niiden aiheuttamissa eristeaurioissa ja saadun tiedon hyödyntämisessä kunnonvalvonnassa. PD-mittauksella voidaan selvittää eristyksen kunto sekä saada selville mahdolliset viat ja niiden aiheuttajat. Lisäksi PD-mittauksessa käytettävät anturit ja niiden valitseminen sekä sijoittaminen käyttökohteeseen ja häiriöiden havainnointi sekä poistaminen on käsitelty. Työssä on kerrottu myös toisen yleisesti suurjännitekoneissa käytetyn eristyksen kunnonmittausjärjestelmän $\tan\delta$ -mittauksen perusteet.

Tätä tutkintotyötä käytetään tulevaisuudessa hyväksi PD-mittausjärjestelmien markkinoinnissa yrityksen asiakkaille ja henkilökunnan koulutuksessa Kaakon Sähkökone Oy:ssä.

TAMPERE POLYTECHNIC

Degree Program in Electrical Engineering

Electrical Engineer

Nurmi, Juuso

PD-measuring part of condition monitoring

Engineering Thesis

49 pages

Thesis Supervisor

Lecturer Eerik Mäkinen

Commissioning Company

Kaakon Sähkökone Oy, Supervisor: President Tero Parsama

April 2005

Keywords

electric machining insulators, partial discharge, PD-measuring, $\tan\delta$ -measuring

ABSTRACT

High voltage electric machines and generators are very important productionally in industry. Their reliability without sudden shortages is important productionally and economically. The aim of the study is to investigate condition monitoring of insulations which is a basic part of condition monitoring of electric machines and generators.

Report concerns direct exertion in electrical machines, influence in insulators and the ageing of insulators. Electrical machines' common insulators and their quality are presented in this report. Report is focused on partial discharge, insulate breakdowns and benefits of this knowledge used in service in electrical machines. PD-measuring system can measure the insulators shape and find out the possible failures and the reason for those. In addition, the sensors for PD-measurement systems and the selection and the implementation of those are covered also in the study. The report presents the basics of another generally used measurement system $\tan\delta$.

This report will be used in the future in marketing PD-measuring system for Kaakon Sähkökone Oy's customers and educating the personnel of Kaakon Sähkökone Oy's.

ALKUSANAT

Kiinnostukseni sähkömoottorien ja generaattoreiden kunnonvalvontaan syntyi työskennellessäni Kaakon Sähkökone Oy:ssä, jossa suoritin opintooni liittyvät työharjoittelut. Työharjoittelussani tutustuin PD-mittauksiin ja viimeisenä työharjoittelujaksona markkinoin yrityksen tarjoamia palveluita sekä laskin tarjouksia ja huomasin, että tarvetta tällaiselle selvitykselle markkinoinnin kannalta olisi. Esitin aiheen toimitusjohtaja Tero Parsamalle, joka piti sitä hyvänä ja tarpeellisena aiheena. Uskon, että työtäni voidaan hyödyntää myöhemmin.

Työni toteutumisesta kuuluu kiitos Kaakon Sähkökone Oy:lle ja toimitusjohtaja Tero Parsamalle. Työni valmistumisesta ja opintojen aikaisesta tukemisesta kiitos kuuluu äidilleni Tarja Nurmelle ja isälleni Esa Nurmelle. Tätini perhe Paronen oli myös tärkeä tukeni Tampereella. Suuren kiitoksen haluan osoittaa tyttöystävälleni Elina Parsamalle, joka jaksoi kannustaa ja tukea minua.

Tampere 15. huhtikuuta 2005

Juuso Nurmi

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
ALKUSANAT	4
1 JOHDANTO	7
2 ERISTEIDEN JA JOHTEIDEN FYSIKAALISET EROT	7
3 POLARISAATIO JA SÄHKÖDIPOLI	8
4 SÄHKÖKENTÄN VAIKUTUS ERISTEESEEN	8
5 ERISTYSRAKENTEISIIN KOHDISTUVAT RASITUKSET	9
5.1 Lämpörasitus	10
5.2 Pitkäaikainen lämpörasitus	11
5.3 Lyhytaikainen lämpörasitus	12
5.4 Mekaaniset rasitukset	12
5.5 Ympäristörasitukset	13
5.6 Sähköiset rasitukset	14
5.7 Yhdistelmärasitus	15
6 SÄHKÖKONEIDEN ERISTYKSET	16
6.1 Sähkökoneiden tärkeimmät eristemateriaalit	16
6.2 Sähkökoneiden eristemateriaalien ominaisuuksia ja rakenteita	17
7 DIELEKTRISTEN HÄVIÖIDEN SYNTYMINEN	22
8 HÄVIÖKULMAN δ JA TAN δ -MITTAUKSEN TEORIA	22
9 TAN δ -MITTAUS	24
9.1 Tan δ -mittaus Scheringin sillalla	24
9.2 Tan δ -mittaaminen	25
10 OSITTAISPURKAUS	26
10.1 Osittaispurkausten suureet	26
10.2 Osittaispurkauksien eristeille aiheuttamat vauriot	27
11 OSITTAISPURKAUKSEN LUOKITTELU	27
11.1 Eristeen sisäiset osittaispurkaukset	27
11.2 Sähköpuu	28
11.3 Käämin ulkopinnassa tapahtuvat koronapurkaukset	29
11.4 Pintavirrat	30
11.5 Pintapurkaukset	31

11.6 Liukupurkaukset.....	31
12 OSITTAISPURKAUSTEN ETENEMINEN.....	32
13 OSITTAISPURKAUKSET OSANA KUNNONVALVONTAA	33
14 PD-MITTAUKSIIN KÄYTETTÄVÄT ANTURIT SUOMESSA.....	34
14.1 PD-mittauksessa käytettävien kiinteiden ja siirrettävien antureiden erot	34
14.2 PD-antureiden tyyppin valinta käyttökohteeseen	36
14.3 PD-antureiden sijoittaminen	36
15 PD-MITTAUKSISSA KÄYTETTÄVÄT MITTAUSJÄRJESTELMÄT.....	38
16 PD-MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI JA NIIDEN AVULLA HAVAITTAVAT VIKATYYPIT	41
17 PD-MITTAUSTEN HÄIRIÖIDEN POISTAMINEN	43
17.1 Häiriön poistaminen vesigeneraattorin PD-mittauksesta kahdella anturilla vaihdetta kohti .	43
17.2 Häiriön poistaminen moottorien ja turbiinigeneraattorien PD-mittauksesta kahdella anturilla vaihdetta kohti.....	44
17.3 Häiriön poistaminen moottorien PD-mittauksesta yhdellä anturilla vaihdetta kohti	45
18 PD-MITTAUSTEN MÄÄRÄ SUOMESSA	45
19 PD- JA TAN δ -MITTAUSTEN EROT	46
LÄHDELUETTELO.....	48

1 JOHDANTO

Työn teettäjä Kaakon Sähkökone Oy on toiminut vuodesta 1988 kaikenkokoisten pyörivien sähkökoneiden ja generaattoreiden korjaamona. Nykyään teollisuudessa pyritään minimoimaan tuotannon pysähdyksiä ja huoltokustannuksia. PD- tai tanδ-mittauksien antama tieto auttaa minimoimaan huoltotarpeen eristykselle sekä lisää sähkökoneiden ja generaattoreiden toimintavarmuutta. Tanδ-mittauksia ei voida suorittaa ilman tuotantokatkosta, mutta niillä saadaan suuntaa antava kuva eristyksen kunnosta ja huoltotarpeesta. PD-mittausjärjestelmä on uudempi ja se voidaan suorittaa tuotannon normaalissa toiminnassa, joten tuotannonkatkoksia ei mittausta varten tarvita (kiinteät anturit). PD-mittaus perustuu suurjännitekoneissa aina jossakin määrin tapahtuviin osittaispurkauksien mittaamiseen ja analysointiin. Osittaispurkauksien määrä ja suuruus kertovat hyvin eristyksen kunnosta ja sillä olevasta eliniästä. Tämän tutkintotyön tarve ilmeni PD-laitteistojen markkinoinnissa asiakkaille, asiakkaitten tietämys PD-mittauksesta ja sen antamasta tiedosta oli vähäistä. Mittaustuloksien antamalla tiedolla voidaan asiakkaalle esittää ja perustella koneen mahdollinen huoltotarve.

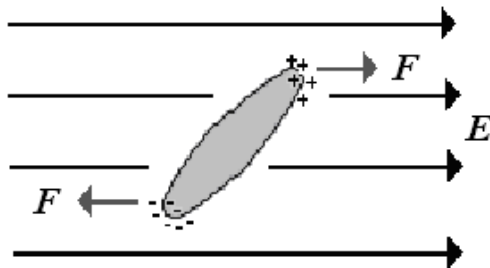
2 ERISTEIDEN JA JOHTEIDEN FYSIKAALISET EROT

Atomissa on positiivinen ydin, jota ympäröi negatiivisesti varautuneiden elektronien muodostama elektronikuori. Johtamattomissa (ideaalinen eriste) tai lähes johtamattomissa materiaaleissa, kuten eristeissä, uloin elektronikuori on täysi. Elektronien energiatilan muuttamiseksi tarvittava energia on niin suuri, ettei virran kuljettamiseen tarvittavia vapaita elektroneja ole helposti irrotettavissa. Hyvin johtaville materiaaleille on tyypillistä, että uloin elektronikuori on vajaa tai osittain päällekkäinen seuraavan tyhjän elektronikuoren kanssa. Sen vuoksi johteissa elektronien energiatilan muuttumiseen tarvittava energia on hyvin vähäinen ja pienikin ulkoinen sähkökenttä pystyy irrottamaan johteesta varauksenkuljettajia, minkä vuoksi virta kulkee johteessa helposti. /1/

3 POLARISAATIO JA SÄHKÖDIPOLI

Sähköstatiikan kannalta aineet ovat joko johteita tai eristeitä. Sähkökenttään tuotaessa eristeissä alkaa tapahtua järjestäytymistä, mikä aiheutuu atomien ja molekyylien positiivisiin ja negatiivisiin osiin kohdistuvista eri suuntaan vetävistä voimista. Eristeaineessa olevat molekyylit pääsevät liikkumaan vain lyhyitä matkoja, koska molekyylit ovat sähköisesti neutraaleja. Niiden positiivinen ja negatiivinen varauskeskittymät on itseisarvoltaan yhtä suuri. Molekyylit pyrkivät kääntymään sähkökentän suuntaiseksi ja muodostavat sähködipoleja. Mainitun ilmiön vuoksi atomien ja molekyylien osaset siirtyvät hieman normaalitilan asemastaan joutuessaan sähkökentän vaikutuksen alaiseksi. Tätä atomien ja molekyylien järjestäytymistä kutsutaan polarisaatioksi. /1/, /6/ ja /7/

Polarisaatio-termi esiintyy monissa eri yhteyksissä sähkömagnetismissä, tässä tutkintotyössä polarisaatio-termillä tarkoitetaan eristeessä tapahtuvaa polarisaatiota (kuva 1). /7/



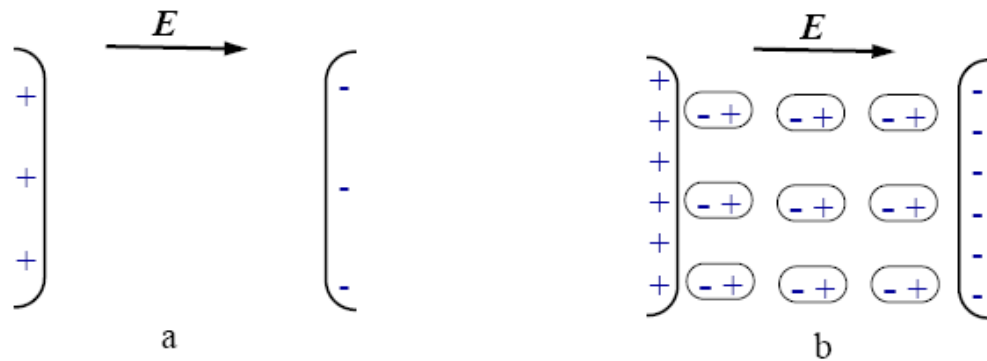
Kuva 1 Molekyyli polarisoituu sähkökentässä /8/

4 SÄHKÖKENTÄN VAIKUTUS ERISTEESEEN

Eristeessä polarisoituminen alkaa tapahtua jo heikossakin sähkökentässä. Vaihtojännitteellä polarisaation suunta vaihtelee, mikä aiheuttaa eristeessä tehohäviöitä, joita kutsutaan dielektriseksi häviöiksi. Dielektristen häviöiden syntyminen käsitellään kohdassa 7. Vaihtojännite jakautuu eristeessä sen permittiivisyyden mukaan. Tasajännite jakautuu eristeessä sen resistiivisyyden

mukaan. Vaihtojännite aiheuttaa eristeessä polarisaation suunnan vaihtelua, mikä aiheuttaa atomien ja molekyylien kääntyilemistä, mikä taas kitkan vaikutuksesta aiheuttaa eristeen lämpenemistä.

Polarisaation vaikutuksesta eriste ottaa varausvirtaa ja eristeeseen varastoituu energiaa, kun siihen kytketään jännite. Eriste ei kuitenkaan pysty pitämään varaustaan jännitteen poistuessa, vaan se purkautuu hitaasti. Polarisaatio on pienelläkin vaihtojännitteen taajuudella merkittävä eristeen tehohäviön aiheuttaja. ϵ_r kertoo aineen permittiivisyyden suhteessa tyhjiön permittiivisyyteen ϵ_0 . Tyhjiön permittiivisyys $\epsilon_0 = 1$ ja kaikilla muilla aineilla $\epsilon_r > 1$ (kuva 2), minkä vuoksi eriste polarisoituu ja eristeen elektroneille kertyy lisää varauksia, tämä lisää eristeen kykyä varastoida varausta. /1/



Kuva 2 Varaustiheys tasoelektrodeilla vakiojännitteellä a) Elektrodivälissä on tyhjiö, jolloin $\epsilon_0 = 1$ b) Elektrodivälissä on polarisoituva eriste, jolloin $\epsilon_r > 1$. /1/

5 ERISTYSRAKENTEISIIN KOHDISTUVAT RASITUKSET

Uuden eristysrakenteen jännite ja mekaaninen kestävyys on yleensä riittävä, joten erittäin tärkeä ominaisuus eristysrakenteelle on sen käytön aikaisen rasituksen kestoisuus. Eristysrakenteisiin kohdistuu käyttökohteen mukaan erilaisia rasituksia, jotka vanhentavat eristysrakenteita. Sähkökoneiden eristysrakenteiden on kestävästi erilaisia käytön aikaisia rasituksia ilman, että ne menettävät merkittävästi ominaisuuksiaan. Sähkökoneiden eristykseen vaikuttavat rasitukset voidaan jakaa kahteen ryhmään: pitkäaikaisiin ja lyhytaikaisiin rasituksiin. /1/ ja /2/

Pitkäaikaiset rasitukset ovat:

- lämpötila, joskus myös sen muutokset (termomekaaniset rasitukset)
- sähkökenttä, yleensä liittyneenä osittaispurkauksiin
- mekaaniset rasitukset
- ympäristöolosuhteet, erityisesti kosteus
- kemiallisesti vaikuttavat aineet
- ylijännitteet (taajuusmuuttajakäytöt)
- ionisoiva säteily (ydinvoimalakoneet). /2/

Lyhytaikaiset rasitukset ovat:

- ylijännitteet
- äkillinen kastuminen
- mekaaniset iskut, sähködynaamiset voimat startissa ja pikajälleenkytkentätilanteessa
- muut mekaaniset rasitukset
- lyhytaikaiset korkeat yllämpötilat. /2/

5.1 Lämpörasitus

Eristykseen kohdistuvat lämpörasitukset voivat olla pitkäaikaisia, lyhytaikaisia tai alhaisen lämpötilan aiheuttamia. Eriste saattaa kestää hyvin yhtä lämpörasituslajia, mutta tästä ei voida päätellä, että se kestäisi kaikkia lämpörasituslajeja hyvin. Tässä tutkintotyössä käsitellään kutakin lämpörasituslajia erikseen. Lämpörasitukset sähkökoneissa aiheutuvat johtimien virtalämpöhäviöistä, hajavuon aiheuttamista häviöistä, rautahäviöistä ja jäähdytysongelmista. Lämpörasitukset kohdistuvat sähkökoneissa johtimiin, johtaviin materiaaleihin, levypakettiin, tukirakenteisiin ja eristeisiin. Lämpörasitus aiheuttaa kemiallisia ja fysikaalisia muutoksia eristyksessä. Ympäristö aiheuttaa aina kemiallisia reaktioita, happi hapettumisella ja vesi hydrolyysireaktiolla, joten ne on syytä ottaa huomioon lämpörasituksessa. Lämpörasituksella on myös suuri merkitys eristeiden mekaaniseen kestävyYTEEN. Eristeiden mekaaniset ominaisuudet vaihtelevat lämpötilan mukaan. /2/ ja /4/

5.2 Pitkäaikainen lämpörasitus

Korkea käyttölämpötila lyhentää merkittävästi eristeen elinikää. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että käytettäessä konetta 10 °C yli sen eristysluokan sallitun lämpötilan, lyhenee sen käyttöikä puoleen normaalista. Sähkökoneissa käytettävissä kiinteissä eristeissä tapahtuvat muutokset ovat pysyviä. Lämpötilan nousu nopeuttaa kemiallisia reaktioita. Yleensä pelkkä kemiallinen muutos ei riitä eristeen tuhoutumiseen. Kemiallisten reaktioiden seurauksena eristeen mekaaninen kestävyys heikkenee, mikä voi aiheuttaa eristyksen tuhoutumisen. Esimerkiksi käynnistettäessä sähkökoneen käämeihin kohdistuu suuria voimia, jotka voivat aiheuttaa haurastuneen eristyksen tuhoutumisen tai lisävaurioitumisen.

Pitkäaikaisella lämpökestoisuudella tarkoitetaan eristeelle sallittua käyttölämpötilaa, jolla saavutetaan koeolosuhteissa keskimäärin 20 000 h läpilyöntikestoisuus. Sähkökoneiden eristykseltä odotetaan yli 20 000 h käyttöikää.

Taulukosta 1 nähdään eristysluokat ja niiden rajalämpötilat ja lämpenemät. Rajalämpötila on koneen kuumimman pisteen lämpötila ja lämpenemä on käämitykselle sallittu lämpötilan nousu nimelliskuormituksella kun ympäristön lämpötila on 40 °C.

/1/ ja /2/

Taulukko 1 IEC 34-1:n ja IEC 85:n mukaiset eristysluokat. /15/

Eristys luokka	Rajalämpötila °C	Lämpenemä °C
A	105	60
B	130	80
F	155	100
H	180	120
C	>180	

Sähkökoneiden eristykset koostuvat useasta erilaisesta eristysmateriaalista, minkä takia lämpöluokka ei voi varmasti kertoa eristyksen lämpökestoisuutta. Koko eristyksen vanheneminen voi olla hyvin erilaista kuin sen yksittäisen eristysmateriaalin vanheneminen. /1/ ja /2/

5.3 Lyhytaikainen lämpörasitus

Lyhytaikaisella lämpökestoisuudella tarkoitetaan enintään kahden tunnin pituista, selvästi yli normaalin käyttölämpötilan olevaa, käyttötilannetta. Lyhytaikaisessa rasituksessa eristys saattaa:

- sulaa ja valua
- muodostaa kaasuja, kuplia tai turvota
- kutistua ja sen seurauksena halkeilla ja menettää muotonsa
- hiiltä tai jopa syttyä tuleen.

Lyhytaikaisella lämpökestoisuudella on iso merkitys koneen elinikään ja toimintaluotettavuuteen. Hyvä lyhytaikainen lämpökestoisuus voi pelastaa koneen korkealta lyhytaikaiselta kuumenemiselta ilman eristyksen merkittävää vaurioitumista, tai että kone säilyttää toimintakuntonsa ja se saadaan vaihdettua sopivalla hetkellä.

Sähkökoneiden eristykset muodostuvat yleensä kahdesta eri osasta, joista toisen tarkoitus on parantaa lyhytaikaista lämpörasituksen kestävyyttä.

Sähkökoneiden suojauslaitteiston tulisi normaali käyttökohteessa toimia aina ennen eristyksen lyhytaikaisen lämpörasituksen pettämistä. On kuitenkin olemassa erikoiskäyttökohteita, joissa moottoria ei suojata millään tavalla ja moottorin on kestettävä suuria lämpörasituksia hyvin. Tällaisissa kohteissa moottorin toiminta on välttämätöntä. Tästä on esim. vesipumppu, joka toimii automaattisessa palon sammutusjärjestelmässä. /1/ ja /2/

5.4 Mekaaniset rasitukset

Mekaaniset rasitukset johtuvat:

- lämpölaajenemisesta
- värinästä
- sähködynaamisista voimista.

Sähkökoneiden eristykseen kohdistuva lämpötila on merkittävä eristeen mekaanisen kestävyuden osalta. Lämpötilan suuren vaikutuksen vuoksi on eristeen käyttäytyminen tunnettava koko käyttölämpötilan alueella, alhaisimmasta lämpötiloista aina yllämpötiloihin.

Sähkökoneissa käytettävillä eristemateriaaleilla puristuslujuus on paljon suurempi kuin vetolujuus. Sen vuoksi eristeisiin pyritään kohdistamaan puristusta eikä venytystä.

Eristeiden muodon muutokset voidaan jakaa kahteen ryhmään, palautuviin ja palautumattomiin muutoksiin. Eristeiden kiinnittymisellä johdinkupariin on suuri merkitys eristeen kykyyn seurata johdinkuparin muodonmuutoksia, esimerkiksi lämpölaajenemisessa. Lämpötilan kohoaminen yleensä lisää murtovenymää ja pienentää lujuutta. Eristyksen kimmoisuuteen vaikuttavat erittäin paljon lämpötilanvaihtelut. Kimmoisuus vaihtelee jo normaaleissa käyttölämpötiloissa paljon.

Käämityksen hyvällä tuennalla pyritään suojautumaan eristeiden värinää, sähködynaamisia voimia ja lämpöliikkeitä vastaan. Käämikuparin lämpöpitämisellä on suuret voimat, joita ei voida estää hyvällä tuennallakaan, vaan tällöin eristyksen mekaaninen kestävyys joutuu koetukselle. /2/ ja /4/

5.5 Ympäristörasitukset

Ympäristörasitukset vaihtelevat täysin käyttöympäristön mukaan. Ympäristörasituksia ovat muun muassa:

- kosteus
- kemikaalit
- jäähdytysilma
- mekaanisesti kuluttavat olosuhteet. /2/

Yksi pahimpia ympäristön rasituksia aiheuttavia käyttöpaikkoja ovat kalkin valmistusprosessit. Kalkin valmistusprosessissa sähkökoneisiin kohdistuu monta ympäristörasitusta samaan aikaan. Konetta saattavat samaan aikaan rasittaa kemikaalit,

jäähdytysilma ja mekaaninen rasitus. Kalkki yhdessä veden kanssa aiheuttaa korroosiota, jäähdytysilman mukana tuleva kalkkipöly tukkii jäähdytysrimojen välit ja kuluttaa ajan mittaan tuuletussiipiä, minkä vuoksi tuuletus heikkenee.

5.6 Sähköiset rasitukset

Nykyiset eristemateriaalit kestävät erittäin hyvin ja pitkään normaali käyttötilan sinimuotoista jännitettä. Eristykselle merkittävät sähköiset rasitukset ovat nykyään joko hetkellisiä tai epäsinimuotoisen jännitteen aiheuttamia. Epäsinimuotoisten jännitteiden suurin aiheuttaja ovat taajuusmuuttajakäytöt. Taajuusmuuttajakäytöt ovat kuitenkin yleisiä, joten koneita valmistetaan ja käänitään taajuusmuuttajakäyttöihin suunnitelluilla vahvennetuilla eristysrakenteilla.

Sähkökoneiden jänniterasitukset:

- kytkentä- ja katkaisuylijännitteet
- ilmastolliset (ukkosen aiheuttamat) ylijännitteet
- käyttötaajuiset ylijännitteet
- valmistuksen ja huollon koestusylijännitteet
- usein toistuvat jänniteylipulssit taajuusmuuttajakäytöissä.

Kytkenäylijännitteen aiheuttaa kytkentäsäysilmiö, jonka aiheuttama jänniterasitus on syöksyaaltomainen ylijännitepulssi. Kytkentäsäysilmiö ja sen suuruus on riippuvainen siitä millä, jännitteen hetkellisarvolla kytkentä tapahtuu. Kytkentäsäysilmiö esiintyy aina kolmivaihejärjestelmässä tehtävissä kytkentätilanteissa.

Katkaisuylijännitteen aiheuttaa jännitteen katkaiseminen ennen sen luonnollista nollakohtaa tai katkaisijassa tapahtuvat uudelleenkytketytymiset.

Ilmastolliset ylijänniterasitukset ovat erittäin harvinaisia, niitä vastaan on yleensä suojauduttu hyvin. Tarvittaessa sähkökoneiden suojaaminen ilmastollisia ylijännitteitä vastaan voidaan hoitaa esimerkiksi metallioksidisuojoilla.

Käyttötaajuiset ylijännitteet aiheutuvat sähkökoneen ulkopuolisen sähköverkon maasuluista. Yksivaiheisessa maasulussa viallisen vaiheen jännite on lähes nolla maata vastaan, terveiden vaiheiden jännite maata vastaan kasvaa lähes pääjännitteen suuruiseksi. Sähkökoneiden eristeiden on kestävä pitkiä aikoja tällaista jänniterasitusta.

Sähkökoneiden eristysten pitää kestää pitkäaikaisesti käyttöjännitettä ja edellä mainittuja lyhytaikaisia jänniterasituksia. Eristyksen mitoittaminen molempia jänniterasituksia kestäväksi on sähkökoneissa käytettävien kiinteiden eristysmateriaalien takia suhteellisen helppoa. Kiinteitä eristysmateriaaleja ei tarvitse mitoittaa erityisesti toista jänniterasitusta silmällä pitäen, vaan kun mitoittaa toisen, on yleensä toinenkin riittävän suuri. /1/, /2/ ja /4/

5.7 Yhdistelmärasitus

Sähkökoneissa eristeisiin yleensä kohdistuu käyttötilanteessa samanaikaisesti useita rasituksia. Eri rasitusten yhteisvaikutus vanhentaa eristystä huomattavasti nopeammin kuin pelkästään yksi rasitus. Yhdistelmärasitus voi olla esimerkiksi lämpö-, mekaanisen ja sähköisen rasituksen yhdistelmä. Kun lämpörasitus on haurastuttanut eristystä riittävästi, jolloin mekaaninen kestävyys on myös heikentynyt, voivat normaalit käyttötilanteen mekaaniset rasitukset, kuten käynnistys, aiheuttaa eristyksen murtumista. Nämä eristeeseen syntyneet vauriot ovat otollisia kohtia osittaispurkausten syntymiseen. Ajan myötä eristys tuhoutuu kokonaan näiden rasitusten yhteisvaikutuksesta. /1/, /2/ ja /3

6 SÄHKÖKONEIDEN ERISTYKSET

Sähkökoneiden eristykset voidaan jakaa niiden vaatimusten mukaan kahteen osaan, pienjännite- ja suurjännitekoneiden eristykseen. Pienjännitekoneiden eristystä ei tarvitse mitoittaa suuria jänniterasituksia varten, lukuun ottamatta taajuusmuuttajakäyttöön tarkoitettuja pienjännitekoneita. Sähkökoneet asettavat eristyksille omat vaatimuksensa, jotka on huomioitava. Sähkökoneiden eristyksessä käytettävien eristeiden pitää kestää hyvin mekaanisia rasituksia, suuria lämpötiloja, lämpötilan vaihteluita ja soveltua käämintään. Sähkökoneissa käytettävät eristeet ovat rakenteeltaan joko huokoisia tai tiiviitä. Huokoiset eristeet on kyllästettävä valmistuksen jossakin vaiheessa. Etenkin pienjännitekoneissa käytettävät eristysmateriaalit ovat tiiviitä, niiden kyllästäminen ei vaikuta merkittävästi niiden sähkölujuuteen. Kyllästyksellä on kuitenkin erittäin tärkeä osa tiiviilläkin eristeillä, kyllästyksellä saadaan lisättyä merkittävästi niiden mekaanista kestävyyttä. /1/, /2/ ja /3/

6.1 Sähkökoneiden tärkeimmät eristemateriaalit

Nykyään on olemassa tuhansia erilaisia eristemateriaaleja, kuitenkin sähkökoneissa käytettävät tärkeimmät eristysmateriaalit ovat helposti lueteltavissa. Sähkökoneissa käytettävien eristemateriaalien tulee kestää hyvin ja pitkäaikaisesti niihin kohdistuvia rasituksia, jotka on edellä mainittu. Tärkeimpiä eristysmateriaaleja ovat:

EMALI, jota käytetään sähkökoneiden kuparijohtimien pinnalla. Emalilankaa käytettäessä ei pienjännitekoneissa tarvitse muuta johdinkierroseristettä käyttää.

PETP-kalvo, polyesterikalvo jota käytetään pienten ja keskikokoisten koneiden ura- ja vaiheväliristeinä. Polyesterikalvoja käytetään kerroseristeinä.

LASIKUITU, jota käytetään sähkökoneissa yleisesti muiden eristeiden tukemisessa.

ARAMID-kuitutuotteet eivät ole yhtä sitkeitä kuin polyesterikalvot, mutta niiden lämmönkestoisuus on polyesterikalvoja parempi. Heikomman sitkeyden takia niitä käytetään kerroseristeinä polyesterikalvon kanssa.

KIILLE on yksi tärkeimmistä suurjännitekoneiden eristysmateriaaleista. Kiille on epäorgaaninen aine, joka kestää erittäin hyvin osittaispurkauksia.

EPOKSI- ja POLYESTERIHARTSI ovat erittäin tärkeitä eristyksen kyllästyksessä. Eristyksen monet ominaisuudet riippuvat juuri kyllästyshartsista. /2/

6.2 Sähkökoneiden eristemateriaalien ominaisuuksia ja rakenteita

Emalia käytetään sähkökoneiden johdinkuparien pinnalla johdineristeinä. Emalilangat on valmistettu useasta lakkakerroksesta. Emalilankojen eristerakenteessa on yleisesti käytössä ns. kaksikerrosemalilanka, jossa kuparilankaa vasten on pehmeämpi polyesteriemali ja sen päällä mekaanisesti kestävämpi amidi-imidimuovi.

Polyesterikalvot syrjäyttivät aikanaan selluloosakuidut sähkömoottorien eristemateriaalina. Polyesterikalvot ovat synteettisiä aineita ja yleensä polyetyleenitereftalaattia (PETP).

Polyesterikalvot saattavat kutistua kyllästyshartsauksen jälkeisessä kovetusuunin lämpötilassa, 120...160 °C. Kutistumista voidaan kuitenkin käyttää myös hyödyksi esimerkiksi sidonnan tiukkauksessa.

Polyesterikuidut muistuttavat erittäin paljon lasikuitua, polyesterikuidun erottaa siitä että se palaa ja sulaa liekissä. Polyesterikuitu pehmenee huomattavasti yli 200 °C:n lämpötilassa ja sulaa 260 °C:n lämpötilassa. /2/

Taulukko 2 Polyesterikalvojen ominaisuuksia /2/

Ominaisuus	Yksikkö	Polyesteri (polyetyleni- tereftalaatti PETP)	Polyimidi	Polysulfoni (PS)	Huom.
Vetolujuus	N/mm ²	140...160	180	90	Huoneen lämpötilassa
Kimmomoduuli	N/mm ²	3900	3000	2500	
Murtovenymä	%	75	70	25	
Tiheys	g/cm ³	1,38	1,42	1,37	
Jatkuva käyt- tölämpötila	°C	130...155	220	180	
Hetkellinen lämmönkes- toisuus	°C	190	400	210	
Pehmene- mispiste	°C	210	530	235	
Sulamispiste	°C	250	Ei sula		
Palaminen		Hidas	Ei pala	Ei ylläpidä	
Kutistuminen °C:ssa	%	3	-	-	
Kosteuden imevyys	Paino %	0,5	3	1,1	
Tropiikkikes- toisuus		Hyvä	Hyvä	-	
Kemiallinen kestoisuus	Arvostelu numeroin 0...4				0: Ei kestä edes lyhytaikaisesti 4: kestävä pitkä- aikaisesti
hapot		2	3	3	
emäkset		1	0	3	
org. liuotteet		4	4	1	
jännitelu- juus	kV/mm	150	280	175	1 min 50Hz
Tilavuus- vastus	Ωcm	10 ¹⁹	10 ¹⁸	5x10 ¹⁶	

Lasikuituja käytetään sähkömoottoreissa niiden lujuuden takia, ohut lasikuitu on vahvempaa kuin teräs. Tämän takia lasikuituja käytetään kudosten raaka-aineina ja muovien vahvistamiseen. Sähkökoneissa on käytettävä E-lasia, jotta kostuessaankaan ei lasikuidusta liukene muille eristysmateriaaleille haitallisia aineita. Pelkkä lasikuitu on murtumaherkkää, esimerkiksi lasikuitu ei kestä suuria taivutuskulmia eikä mekaanista värinää. Sähkökoneissa nämä molemmat rasitukset ovat erittäin merkittäviä, joten lasikuidun kyllästämällä on erittäin suuri merkitys sen kestävyysparantajana. Kyllästys vähentää myös lasikuidun vedenimukykyä.

Paperi ja aramidkuidut ovat sukua nylonille, koska niiden kemiallinen rakenne sisältää aromaattisia polyamideja. Aramid-rakenne on kuitenkin huomattavasti lämpöä paremmin kestävä ja sitä voidaan käyttää jopa yli 180 °C:n lämpötilassa.

Aramidpaperia valmistetaan lähes samalla tekniikalla kuin normaalia paperia.

Aramidpaperin loppukäsittelyssä se kuumennetaan, minkä vaikutuksesta kuidut sulavat yhteen ja näin muodostavat erittäin tiiviin, sähköisesti ja mekaanisesti vahvan rakenteen.

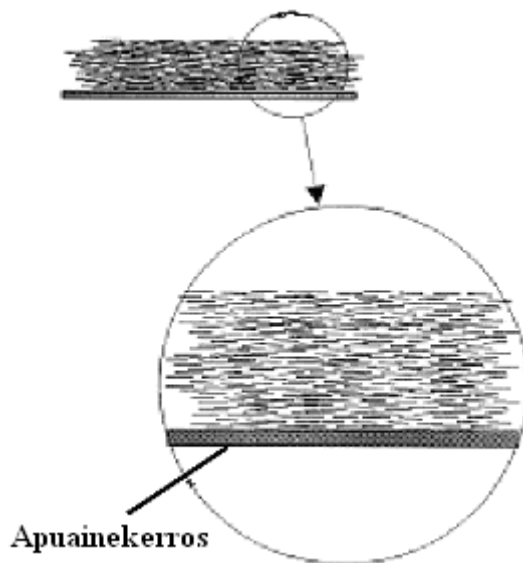
Aramidkuiduilla saavutetaan vielä aramidpaperiakin parempi lämmönkestoisuus.

Aramidkuitu säilyttää mekaanisen kestävyuden vielä 70 %:sti 220 °C:n lämpötilassa verrattuna normaaliin huoneen lämpötilaan. /2/

Taulukko 3 Kuitueristeiden ominaisuuksia /2/

Ominaisuus	Yksikkö	Puuvilla- kuidut	Polyesteri- kuidut	Lasikuidut	Aramidpaperi	Huom.
Vetolujuus	N/mm ²	250...500	500...600	1000...2000	100	
Murtovenymä	%	6...10	20...25	1,5	17	
Kimmomoduuli	N/mm ²	5000	3000	70000	-	
Repimislujuus		Kohtalainen	Hyvä	Hyvä	Hyvä	
Jatkuva käyt- tölämpötila	°C	105 ⁽¹⁾	155	130...200 ⁽²⁾	210	¹⁾ Kyllästettynä
Hetkellinen lämm. kesto.	°C	150	190	> 600	300	²⁾ Riippuen kyl- lästysaineesta
Pehmene- mispiste	°C	-	210	670	Ei pehmene	
Sulamispiste	°C		260	855	n. 300	
Lämmön- johtavuus	W/m°C	0,07...0,14		0,99	0,1	
Palaminen		Palava	Palav. hitaasti	Eivät pala	Eivät pala	
Kosteuden imevyys	Paino %	10	0,4	-	7...9	
Kemiallinen kestoisuus	Arvostelu numeroin 0...4					0: Ei kestä edes lyhytaikaisesti 4: Kestää pitkä- aikaisesti
hapot		1	2	4	3	
emäkset		2	1	3	3	
org. liuotteet		4	4	4	4	
Jännitelujuus	kV/mm	-	-	-	20	1 min 50 Hz

Kiille-eristeen kiille on luonnontuote, jota esiintyy kallioperässä. Sähköeristeeksi sopivaa kiillettä esiintyy harvassa paikassa. Kiille on kemialliselta rakenteeltaan kidevettä sisältävää kalium-aluminiumsilikaattia ja sen lähisukulaisia. Kiilteen kiteet ovat muodoltaan ohuita ja suomumaisia. Kiille-eriste itsessään ei kestä koossa, minkä takia siinä tarvitaan aina sopivaa sideainetta, jolla saadaan suomut pysymään yhdessä. Tämän lisäksi kiille-eristeellä täytyy olla tarvittavan vetolujuuden saavuttamiseksi apuainekerroksia (kuva 3), esimerkiksi lasikuitua, jotta saavutettaisiin riittävä mekaaninen kestävyys, jota eristysaineelta vaaditaan.



Kuva 3 Lasikangasvahvisteinen kiillepaperieriste /2/

Kiilteeseen ei kuitenkaan saa missään tapauksessa joutua öljyä. Öljy pystyy erottamaan kiillekerroksia toisistaan ja heikentämään eristettä. Kiilteen lämmönkestoisuus vaihtelee kiillelaadun mukaan 500...1100 °C:een. Kiille on erittäin tärkeä eristysaine suurjännittekoneissa ominaisuuksiensa vuoksi. Kiilteen tärkeitä ominaisuuksia suurjännittekoneiden eristeenä ovat:

- suuri läpilyöntilujuus
- alhaiset dielektriset häviöt
- hyvin suuri pinta- ja tilavuusvastus
- erittäin hyvä pintavirtojen kestoisuus
- erittäin hyvä osittaispurkauksien kestoisuus verrattuna orgaanisiin eristeisiin.

Taulukko 4 Kiille-eristeiden ominaisuuksia /2/

Ominaisuus	Yksikkö	Kommu- taattorimi- kaniitti	Muovailu- mikaniitti	Mikafolium	Lasikiille- nauha	Lasivahvist. epoksikiille- pap. nauha	Huom.
Kiillepitoi- suus	%	95...98	80...90	40...50	40...80	45...55	1) Valmistus- vaiheessa kiillesuomut liukuvat toistensa suhteen. Sideaineen kovetuttua puristuma on 4...8 %
Sideaine- pitoisuus	%	2...5	10...20	25...40	4...22	35...45	
Kantaja	%	-	-	20	15...40	n. 15	
Puristuslu- juus	N/mm ²	110...170	-	-	-	-	
Vetolujuus	N/mm ²	-	-	30...50	40...80	80...120	
Puristuma	%	2...6	- ⁽¹⁾	-	-	-	
Jatkuva käyttöläm- pötila, kun sideaineena	°C						
shellakka		F ⁽²⁾	F ⁽²⁾	B	B		2) F-luokan koneiden kom- mutaattoreissa
alkydit, epoksit		H ⁽³⁾	H ⁽³⁾	F	F	F	3) H-luokan koneiden kom- mutaattoreissa
silikooni		-	-	H	H		
Jännitelujuus	kV/mm	25	20	20	16...20	20...30	1 min 50 Hz

Sähkökoneiden kyllästyshartsauksessa käytetään polyesteri- tai epoksipohjaisia kyllästysaineita. Polyesteri- ja epoksipohjaiset kyllästysaineet ovat liuotteettomia ja 100 % kovettuvia. Kyllästyksen tarkoitus sähkökoneissa on saada aikaan käämityksestä ja eristeistä yhtenäinen paketti, joka on mekaanisesti kestävämpi, parantaa eristyksen kosteuden kestoisuutta, korjata mahdollisia johdineristyksen vikoja ja näin estää pintavirtojen syntymistä ja parantaa lämmönjohtamiskykyä. /2/

Taulukko 5 Kyllästyslakkojen, kyllästyshartsien ja pintalakkojen ominaisuuksia /2/

Ominaisuus arvostelu 0...4	Kyllästyslakat		Kyllästyshartsit		Pintalakat		
	Polyesteri- lakka	Silikooni- lakka	Polyesteri- hartsit	Epoksi- hartsit	Alkydi- lakka	Epoksi- lakka	Silikoni modifioitu alkydilakka
Jatkuva käyttö- lämpötila °C	155...180	180...220	155...180	140...180	130	155	180
Mekaaninen lujuus käyttölämpötilassa	3	1	3	4	2	2	1
Joustavuus	3	2	2	2	4	3	2
Kosteuden kestoisuus	3	3	3	4	3	4	4
Kemiallinen kestoisuus	3	3	3	4	3	4	3
Pintavirran kestoisuus	3	3	3	2	3	2	3

7 DIELEKTRISTEN HÄVIÖIDEN SYNTYMINEN

Dielektrisiä häviöitä syntyy vaihtojännitekentässä olevassa eristeessä, dielektrisen jälkivaikutuksen ja molekyylikitkan seurauksena. Molekyylikitkan aiheuttavat molekyylien keskinäiset kitkat, jotka rajoittavat myös niiden liikettä. Dielektriset jälkivaikutukset syntyvät molekyylikitkojen ja molekyylien hitausmomenttien seurauksena. Edellä mainitut seikat hidastavat polarisoitumista, minkä vuoksi polarisoituminen jää aina jonkin verran jälkeen polarisaation aiheuttavasta sähkökentästä. Polarisoitumisen jäämistä jälkeen sen aiheuttavasta sähkökentästä kutsutaan dielektriseksi jälkivaikutukseksi. Häviöiden syntymistä eristeessä ei voida estää, koska mikään eriste ei ole ideaalinen vaan jokainen eriste johtaa vähän sähköä.

/1/

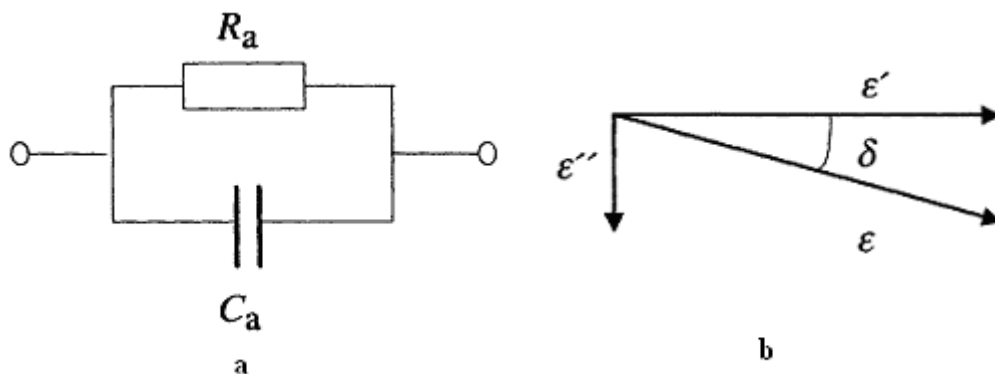
8 HÄVIÖKULMAN δ JA $\tan\delta$ -MITTAUKSEN TEORIA

Sähkökoneissa käytettäville eristeille on ominaista johtavuuden kasvaminen lämpötilan noustessa, minkä vuoksi dielektriset häviöt kasvavat. Kunnossa olevan eristyksen tehohäviöt (P_d) ovat vakioämpötilassa ja vakiotaaajuudella melkein suoraan verrannollisia sähkökentän voimakkuuden neliöön, $P_d \sim E^2$. Tasajännitteellä eristeessä

syntyvät tehohäviöt johtuvat ainoastaan eristeen johtavuudesta, joka on lämpötilan funktio.

Eristeessä syntyviä dielektrisiä häviöitä voidaan kuvata kondensaattorilla, jota voidaan vaihtojännitteellä kuvata kapasitanssin C_a ja resistanssin R_a rinnankytkennällä.

Kuvassa 4 a) on kuvattuna eristeen sijaiskytkentä jolla voidaan kuvata $\tan\delta$ -häviöiden aiheuttajia eristeessä. Kuvassa 4 b) on kuvattuna häviökulman δ syntyminen.



Kuva 4 a) Eristyksen sijaiskytkentä b) Kompleksinen permittiviteetti ja häviökulma δ /1/

Kuvassa 4 a olevan eristeen sijaiskytkennän kapasitanssin C_a ja resistanssin R_a rinnankytkennän toinen napa on johdinkuparin pinnassa kiinni ja toinen levypaketin uran seinämässä. Mitattavan eristeen permittiviteetti ϵ määräytyy ϵ' ja ϵ'' kompleksisesta tulosta. Kuvassa 4 b ϵ' kuvaa eristeessä tapahtuvaa polarisaation aiheuttamaa häviötä, jota sijaiskytkennässä kuvaa kapasitanssi C_a . ϵ'' kuvaa eristeessä tapahtuvia johtavuudesta aiheutuvia häviöitä, jota sijaiskytkennässä kuvaa resistanssi R_a . Häviökulma δ kuvaa kuinka paljon mitattava eriste eroaa ideaalisesta eristeestä.

$\tan\delta$ -arvo ilmaisee dielektristen häviöiden suhteellisen suuruuden. $\tan\delta$ -arvo on johtavuudesta aiheutuvien häviöiden ϵ'' ja polarisaatiosta aiheutuvien häviöiden ϵ' suhde. $\tan\delta$ -arvo voidaan määrittää yhtälöllä 1.

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} \quad (1)$$

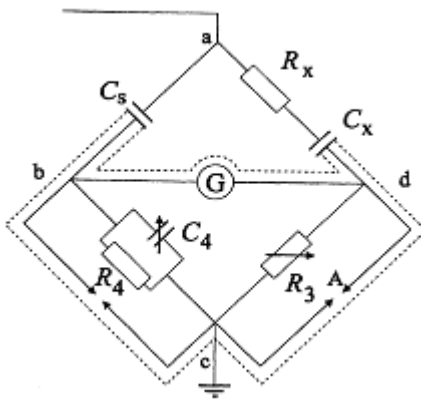
Lämpötilan nouseminen lisää eristeen johtavuutta, joka lisää johtavuudesta aiheutuvia häviöitä ϵ'' . Yhtälöstä 1 nähdään helposti että lämpötilan nouseminen kasvattaa $\tan\delta$ -arvoa. /1/, /4/ ja /6/

9 TAN δ -MITTAUS

Tan δ -mittausta käytetään suurjännitekoneiden ja generaattorien eristyksen kunnonvalvontaan. Mittauksissa käytetään yleensä Scheringin siltaa tai virtavertailijasiltaa. Siltamittaukset perustuvat tunnettuun referenssiin eli mittanormaaliin.

9.1 Tan δ -mittaus Scheringin sillalla

Scheringin sillan perusrakenne on hyvin yksinkertainen (kuva 5). Sillä voidaan mitata tan δ sekä eristyksen resistanssi ja kapasitanssi. Nykyisten siltojen mittaustapahtuma on lähes kokonaan automaattinen. Silta tasapainottaa itsensä ja tallentaa saadut mittaustulokset automaattisesti.



Kuva 5 Scheringin silta /1/

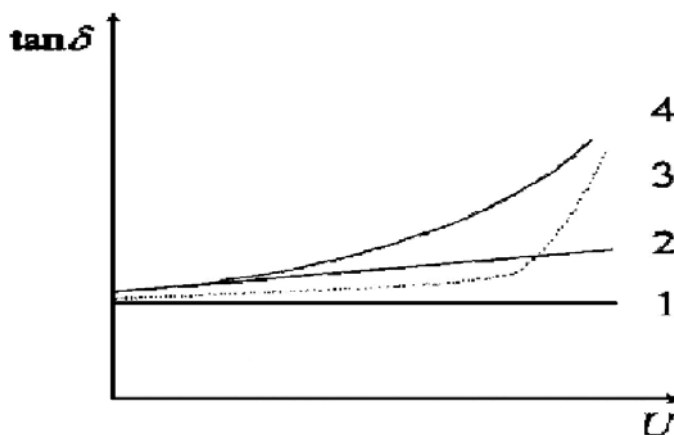
Kuvassa 5 vastuksen R_x ja kondensaattorin C_x sarjankytkentä kuvaavat mitattavaa eristystä. C_s on referenssikondensaattori, minkä dielektriset häviöt ovat niin pienet verrattuna mitattavaan eristykseen, että ne eivät vaikuta merkittävästi mittaustulokseen. Liittimeen a tuodaan mittaussännite, joka kohdistuu mitattavaan eristykseen (R_x ja C_x) ja kondensaattoriin C_s . Sillan muut komponentit eivät joudu mittaussännitteen vaikutuksen alaiseksi, joten niiltä ei vaadita suurjännite kestoisuutta. Sillan tasapainotilaa mittaa nollaindikaattori G . Sillan tasapainotilaa säädetään säädettävällä vastuksella R_3 ja säädettävällä kondensaattorilla C_4 . /1/, /4/ ja /14/

9.2 Tan δ -mittaaminen

Tan δ -mittauksista piirretään yleensä käyrä jännitteen funktiona. Mittauksissa nostetaan mittausjännitettä ainakin koneen nimellisjännitteeseen. Mittaustuloksia analysoidessa kiinnitetään huomiota tan δ -arvon suuruuden lisäksi myös sen kasvuun jännitteen noustessa. Kuvassa 6 on esimerkkinä erilaisia tan δ -mittausten tuloksina piirrettyjä käyriä. Käyrän muodosta voidaan päätellä tan δ -arvon nousun aiheuttavaa syytä. Käyrä yksi on ihanteellinen käyrä. Todellisen kunnossa olevan eristeen käyrämuoto on käyrän kaksi mukainen.

Uusien käämien testauksessa tan δ -arvo saa nousta 5-6 promillea käyrän kaksi mukaisesti, jolloin arvo on hyvä. Hylkäämisraja on 10 promillea. /16/

Tan δ -käyrän muodosta voidaan päätellä myös sen aiheuttajaa. Käyrä neljä kertoo eristeen liiallisesta vanhenemisesta. Käyrässä kolme tan δ -arvo nousee äkillisesti, kun on saavutettu tietty jänniterasitus. Tällainen käyrä kertoo huomattavista osittaispurkauksien syntymisestä koneessa. Tämän tarkempaa tietoa ei osittaispurkauksien syntymisestä saada tan δ -mittauksella.



Kuva 6 Esimerkki käyriä tan δ -mittauksista jännitteen funktiona /1/

Jotta saatuja mittaustuloksia voidaan verrata aikaisemmin tai tulevaisuudessa mitattaviin tuloksiin, tulee lämpötila mitata ja merkitä se mittauspöytäkirjaan.

/1/, /2/, /4/ ja /15/

10 OSITTAISPURKAUS

Osittaispurkaus (partial discharge) on läpilyönti, joka rajoittuu joko kummaltakin puolelta eristeeseen tai ainakin toiselta puolelta. Yksittäinen purkaus ei johda eristeen täydelliseen tuhoutumiseen. Osittaispurkauksia alkaa esiintyä eristeessä olevissa virheissä. Eristyksen valmistuksessa, asennuksessa ja rasituksen seurauksena eristeeseen syntyy vaurioita, joissa sähkökentän voimakkuus ylittää eristeosan sähkölujuuden. Osittaispurkauksia syntyy tasa-, vaihto- ja syöksyjännitteillä kaasuisissa, nesteissä, kiinteissä eristeissä ja rajapinnoilla. /1/, /2/ ja /3/

10.1 Osittaispurkausten suureet

Osittaispurkauksien kokonaissuuruuden mittana käytetään näennäisvarausta. Näennäisvarauksen tunnuksena käytetään q tai Q ja sen suuruus ilmoitetaan yleensä pikocoulombeina (pC). Näennäisvaraus q on se varaus, mikä tuotuna eristeeseen aiheuttaa siinä yhtä suuren jännitteen muutoksen kuin osittaispurkaus. Näennäisvaraus pystytään mittaamaan eristysrakenteen ulkopuolelta, joka mahdollistaa sen näkymisen mittaustureissa. Näennäisvaraus ei kuitenkaan ole verrannollinen osittaispurkauksessa siirtyneeseen varaukseen. Näennäisvaraus on verrannollinen purkauksen tehoon, energiaan ja vian suuruuteen. Osittaispurkauksista mitataan vaihtojännitteellä myös niiden lukumäärä positiivisella ja negatiivisella puolijaksolla. Osittaispurkaukset aiheuttavat suurtaajuuksisia jännitepulsseja, jotka havaitaan mittaustureilla. Näennäisvarauksen Q suuruus kertoo osittaispurkauksien haitallisuudesta, ei niiden syntymissyystä. Osittaispurkauksien syntymissyystä saadaan selville niiden lukumäärästä, suuruudesta (voltteina) ja pulssien sijainnista suhteessa syöttötaajuuteen. Osittaispurkauksien syntymissyiden analysoinnista on kerrottu enemmän kohdassa 16 PD-mittaustulosten analysointi ja niiden avulla havaittavat vikatyypit. /1/, /2/ ja /5/

10.2 Osittaispurkauksien eristeille aiheuttamat vauriot

Osittaispurkauksien aiheuttamia vaurioita ovat:

- Eristeen mekaaninen kuluminen osittaispurkauksien seurauksesta, osittaispurkauksissa vapautuva energia kuluttaa ja kuumentaa eristettä.
- Osittaispurkaukset aiheuttavat eristeen pintakerroksissa ionisoitumista ja radikaalinmuodostumista, jotka aiheuttavat kemiallisia reaktioita.
- Varauksen kuljettajien ionisoituminen eristeeseen tai ionisoitumisen synnyttäminen eristeen sisällä, vaurion edistäminen syvemmälle eristeeseen (sähköpuu).
- Pintapurkauksien syntyminen, pintapurkaukset vaurioittavat eristyksen pintakerroksia.
- Osittaispurkauksien seurauksena syntyy typpioksideja ja otsonia. Typpioksidin ja kosteuden reagoiessa syntyy typpihappoa joka pystyy edelleen reagoimaan orgaanisia aineita sisältävien eristeiden kanssa ja aiheuttamaan niiden hajoamista. Otsoni aiheuttaa koneen hapettumista. /1/ ja /2/

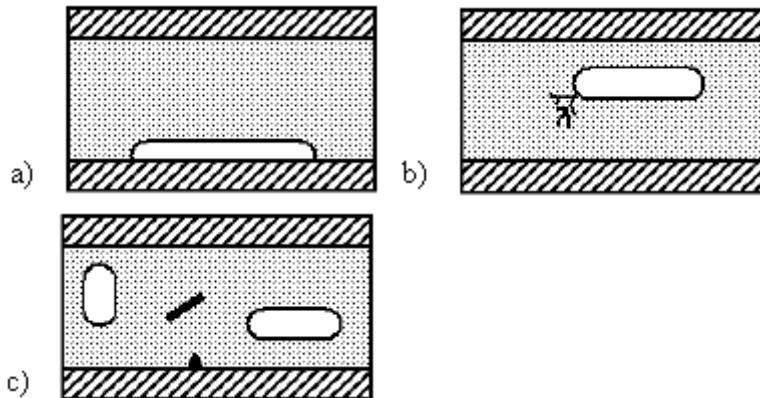
11 OSITTAISPURKAUKSEN LUOKITTELU

Osittaispurkauksien purkauslähteet voidaan jakaa karkeasti kolmeen eri ryhmään, eristeen sisällä tapahtuviin purkauksiin, käämin ulkopinnasta tapahtuviin koronapurkauksiin ja käämin sekä eristeen rajapinnassa tapahtuviin liukupurkauksiin.
/1/ ja /3/

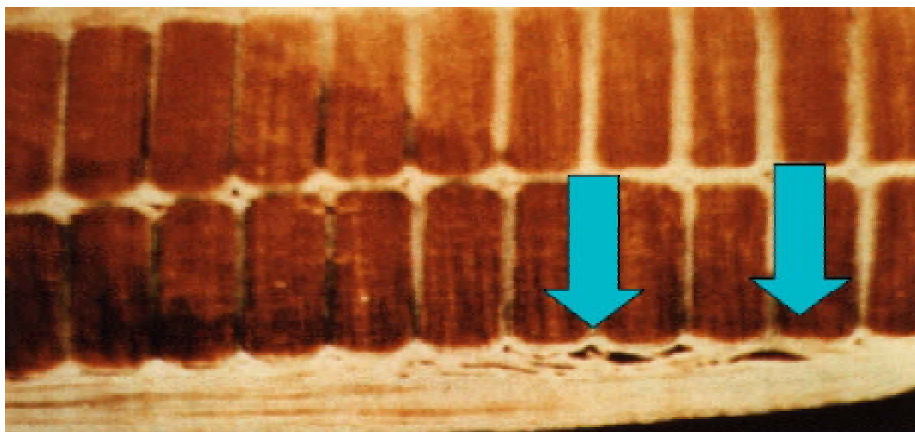
11.1 Eristeen sisäiset osittaispurkaukset

Osittaispurkauksien syntymiseen eristeen sisällä tarvitaan eristeessä oleva vika. Sisäisiä purkauksia aiheuttavia vikoja ovat yleensä valmistuksessa, asennuksessa tai yhteisrasituksesta (kuva 8) aiheutuneet kaasukuplat eristeen ja käämin rajapinnassa, kaasukupla eristeen sisällä, eri eristemateriaalien väliin syntynyt kaasukupla ja

epäpuhtaudet eristeessä. Sisäisistä osittaispurkauksista kaasukuplissa tai epäpuhtauksista alkaa helposti kehittyä eristeen lisävaurioituminen sähköpuun muodossa (kuva 7 b). Kuvassa 7 on esitetty sisäisten osittaispurkauksien lähteitä. /1/ ja /3/



Kuva 7 a) Kaasukupla käämin ja eristeen rajapinnalla, b) Kaasukupla eristeen sisällä, josta on alkanut kehittyä sähköpuu, c) Erilaisia osittaispurkauksia synnyttäviä vikoja eristeessä /3/



Kuva 8 Muotokuparikäämityksen eristeiden väliin on muodostunut ilmaonteloita, lämpörasituksen seurauksena /9/

11.2 Sähköpuu

Sähköpuu alkaa kehittyä eristeessä olevista mikroskooppisista epähomogeenisista kohdista (onteloista, johtavista epäpuhtauksista jne.). Epähomogeenisten kohtien varauksenkuljettajat alkavat liikkua sähkökentän suuntaisesti. Sähkökentän kasvaessa

tarpeeksi suureksi alkavat epähomogeeniset kohdat kasvaa eristeessä. Alkuvaiheessa syntyy myös uusia epähomogeenisia kohtia eristeeseen. Nämä kohdat syntyvät useasti vanhan kohdan lähelle, jolloin syntyy epähomogeenisia kasautumia eristeeseen.

Todellinen lisääntyminen alkaa vasta silloin, kun niitä syntyy enemmän kuin poistuu muiden mekanismien seurauksena. Kasautumien sisällä alkaa epähomogeenisuus, elektronien vapaa tila ja elektronitiheys kasvaa. Edellä mainittujen asioiden ja sähkökentän suunnan vuoksi alkavat kasautumat kasvaa yhteen, jolloin alkaa syntyä pitkiä ohuita kanavia, jotka muistuttavat puuta (Kuva 9). Syntyneet kanavat ovat hyvin sähköä johtavia ja niissä alkaa syntyä osittaispurkauksia. Tästä vaiheesta eteenpäin sähköpuun kehittyminen on nopeaa. Sähköpuun edetessä elektrodilta elektrodille tapahtuu läpilyönti, jossa suuri läpilyöntivirta kulkee ohuen sähköpuun kanavan läpi ja polttaa mennessään suuremman kanavan joka johtaa sähköä hyvin. Tämän jälkeen uusi läpilyönti tapahtuu jo hyvin alhaisella jännitteellä. /1/ ja /2/



Kuva 9 Sähköpuu /13/

11.3 Käämin ulkopinnassa tapahtuvat koronapurkaukset

Urapurkaukset ovat koronanpurkauksia, joita syntyy väljästi uraan asennettujen vyyhtien seurauksena, jolloin vyyhdin ja uran seinämän väliin on muodostunut rako. Vyyhdin irtoaminen uran seinästä voi syntyä löysän kiillauksen seurauksesta. Värisemään päässyt vyyhti voi irrottaa itsensä uran seinämästä ja saada aikaan ilmapälin, missä urapurkauksia alkaa syntyä. Urapurkauksen energia on paljon

suurempi kuin osittaispurkauksen, tästä johtuen niitä käsitellään omana osittaispurkausten muotona. /1/, /2/ ja /11/

11.4 Pintavirrat

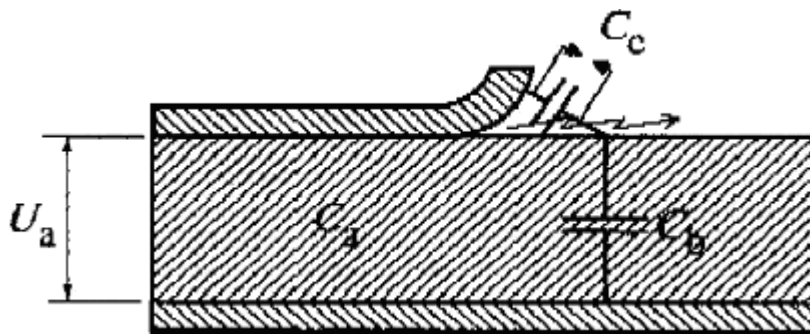
Suurjännitekoneiden käämityksen likaantuminen ja kostuminen saa aikaan eristeen johtavuuden kasvamisen, joka aiheuttaa pintakerroksessa kulkevia pintavirtoja. Pintavirrat kuivattavat epätasaisesti eristettä ja johtavat kuivissa eristekohdissa kipinöintiin pintavirran katketessa. Kipinöinti eristeen pinnalla aiheuttaa eristeen hiiltymistä tai kulumista. Pintavirta kohdistuu hiiltymäkohtaan ja ajan mittaan johtaa eristysvaurioon. Kuvassa 10 näkyy pintavirtojen aiheuttama eristevaurio. /2/ ja /9/



Kuva 10 Eristeen hiiltyminen pintavirtojen seurauksena /9/

11.5 Pintapurkaukset

Pintapurkausten syntyminen vaatii suuren jännitteen maata vasten (koneen levypaketti), jännitteen on oltava niin suuri että se ylittää ilman läpilyöntilujuuden. Pintapurkauksia syntyy yleensä suurjännitekoneissa käämin ja levypaketin risteyskohdassa. Pintapurkaus levypaketin ja kääminristeyskohdassa aiheutuu voimakkaan sähkökentän taipumisesta (kuva 11). Sähkökentän taipuminen saa aikaan eristeen pinnan suuntaisen sähkökentän, joka aiheuttaa pintapurkauksen. Pintapurkauksen seurauksena syntyy eristeen pintaa pitkin etenevä purkaus. Purkaus sammuu kun sen eristeen suuntainen sähkökenttä on pienentynyt riittävästi. Pintapurkauksen energia on paljon pienempi kuin pintavirtojen kipinöinnissä. Pintapurkaukset voivat toistua vaihtojännitteellä useita kertoja jakson aikana, joka tekee myös pintapurkauksista ajan mittaan haitallisen eristykselle. /1/, /2/ ja /9/



Kuva 11 Sähkökentän taipuminen eristeen ja johtimen risteyskohdassa /1/

11.6 Liukupurkaukset

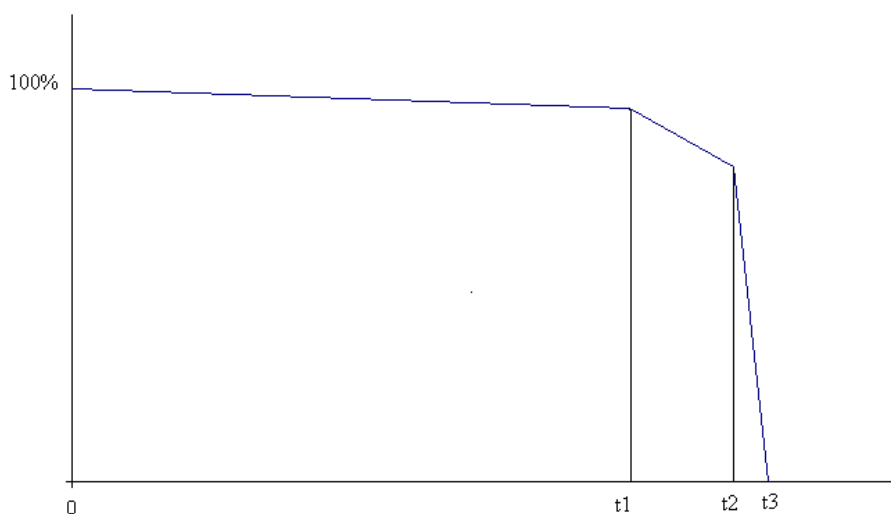
Liukupurkaukset syntyvät samalla tavalla kuin pintapurkauksetkin. Liukupurkauksien syntymiseen tarvitaan vielä suurempi jännite kuin pintapurkauksiin. Niissä ylitetään ns. liukupurkausrajajännite. Kun se on ylitetty, kasvaa purkausten energia äkillisesti. Suuri purkausenergia saa purkaukset ”liukumaan” eristeen pintaa pitkin. Liukupurkaukset voivat edetä eristeen pintaa pitkin jopa kymmeniä senttejä. Liukupurkaus on yksi pintapurkauksien muoto. Ne ovat kuitenkin erittäin paljon haitallisempia eristeille. Liukupurkaukset synnyttävät voimakkaan rätisevä äänen.

Liukupurkausrajajännite saatetaan ylittää valmiin käämityksen jännitekokeessa, jossa käytetään yleisesti jännitettä $2 \cdot U_n + 1 \text{ kV}$ /1/, /2/ ja /9/

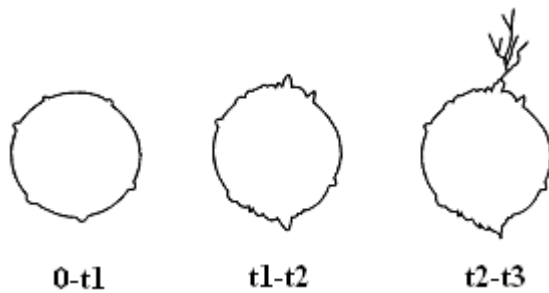
12 OSITTAISPURKAUSTEN ETENEMINEN

Sähkökoneissa ja generaattoreissa käytetään kiinteitä eristeitä, jotka eivät kestä jatkuvia osittaispurkauksia vaurioitumatta. Osittaispurkaukset vaurioittavat vähitellen eristeitä ja ajan mittaan aiheuttavat eristyksen tuhoutumisen.

Osittaispurkausten vaurioiden eteneminen voidaan jakaa karkeasti kolmeen jaksoon (kuvat 12 ja 13). Aluksi osittaispurkaukset aiheuttavat eristeaurion seinämien suhteellisen tasaista ja hidasta vaurioitumista (0-t1). Ajan mittaan osittaispurkaukset kohdistuvat eristeaurioiden seinämien tiettyihin kohtiin, joihin alkaa syntyä vaurioiden seurauksena hiililymähkeitä ja monttuja (t1-t2). Montusta alkaa syntyä sähköpuu, joka aiheuttaa lopulta täydellisen läpilyönnin (t2-t3). Tämä ajanjakso on hyvin lyhyt verrattuna edellisiin ajanjaksoihin. /1/, /2/ ja /3/



Kuva 12 Osittaispurkausten kehittyminen /1/



Kuva 13 Osittaispurkausten eteneminen /1/

13 OSITTAISPURKAUKSET OSANA KUNNONVALVONTAA

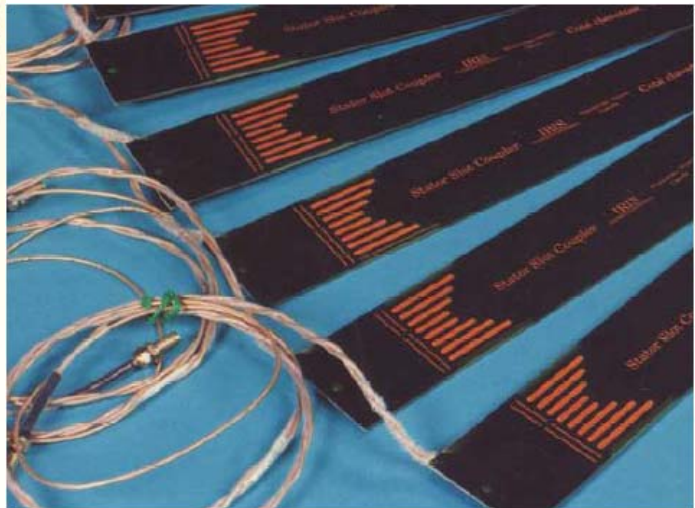
Perinteinen sähkökoneiden kunnonvalvonta perustuu valmistajalta saatuihin ohjeisiin ja kunnossapitohenkilökunnan kokemuksiin ja tottumuksiin. Tällainen kunnonvalvonta perustuu silmämääräisiin ja mittalaitteilla tehtyihin tarkastuksiin. Mittaukset ja tarkistukset kohdistuvat yleensä koneen laakereihin, puhtauteen sekä nopeasti ja helposti suoritettaviin sähköisiin mittauksiin. Koneita huolletaan ja vaihdetaan tutun kaavan mukaan, jolloin ei voida välttyä odottamattomilta vioittumisilta, koska tällainen kunnonvalvonta perustuu olettamuksiin.

Perinteinen kunnonvalvonta on yleensä ylimitoitettua, jolloin koneita huolletaan turhan useasti. Toinen ääripää kunnonvalvonnessa on huoltovälin pidentäminen, joka toimii periaatteella ”kokeillaan kepillä jäätä”. Huoltovälejä venyttämällä saadaan aikaan kustannussäästöjä, kun samalla vikaantumisriski kasvaa.

Osittaispurkausmittauksilla (PD-mittauksilla) pyritään kunnonvalvonnessa määrittämään sähkökoneen eristyksen jäljellä olevaa elinikää. Sähkökoneiden osittaispurkausmittauksilla saadaan selville alkava vioittuminen. Huollon ajankohta voidaan tämän tiedon perusteella ajoittaa sellaiseen kohtaan jolloin konetta ei tarvita (esim. seisokki tai revisio). Tästä syystä tuotantoon ei synny turhia katkoksia. Kun tiedetään koneen huoltotarve hyvissä ajoin, voidaan huolto suunnitella huolellisesti ja kilpailuttaa huoltotarjouksia riittävästi. Näillä toimenpiteillä saadaan aikaan huomattavia säästöjä huoltotöissä.

14 PD-MITTAUKSIIN KÄYTETTÄVÄT ANTURIT SUOMESSA

PD-mittauksissa käytettävät anturit ovat erityisesti PD-mittauksia varten valmistettuja. Fortumin maahantuomia, sähkökoneille ja generaattoreille tarkoitettuja, PD-mittausantureita on kahta erilaista mallia. Näistä malleista huomattavasti yleisimmin käytettävä anturi on hartsieristeinen kytkentäkondensaattori EMC (Epoxy-Mica Capacitor), jonka kapasitanssi on 80 pF (kuva 14). Toinen anturimalli on SSC (Stator Slot Couplers) (kuva 15), joka asennetaan staattorikiilauksen alle. /10/, /11/ ja /12/



Kuva 14 EMC-anturit /12/

Kuva 15 SSC-anturit /12/

14.1 PD-mittauksessa käytettävien kiinteiden ja siirrettävien antureiden erot

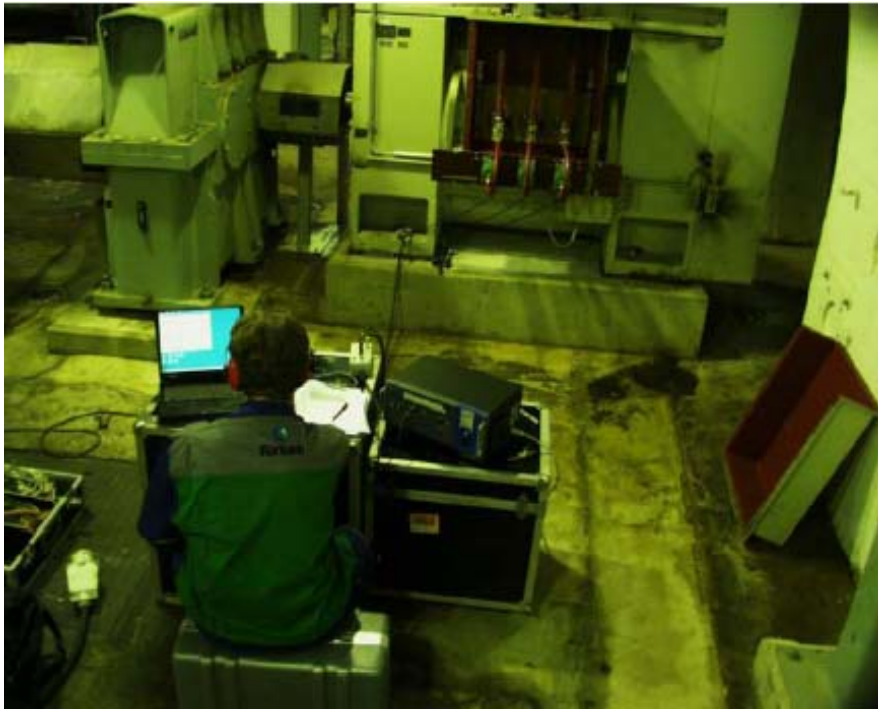
PD-mittauksessa käytettävät EMC-anturit voivat olla joko kiinteästi asennettu tai siirrettävät.

Kiinteitä antureita käytetään tärkeissä mittauspaikoissa tai antureilla mitataan vain yhtä konetta tai generaattoria tehtaassa. Seuraavaksi on luoteltu kiinteiden antureiden edut siirrettäviin antureihin nähden.

- Mittauksen takia ei tarvitse tehdä tuotannon pysäytystä.
- Antureita ei tarvitse asentaa joka kerta erikseen.
- Mittaus voidaan suorittaa haluttuna aikana.

- Mittaus tapahtuma on nopea (noin puolituntia).
- Koneeseen kohdistuvat rasitukset ovat normaali käyttötilanteessa todellisia koneeseen kohdistuvia rasituksia, jolloin saadaan selville normaalissa käyttötilanteessa tapahtuvat osittaispurkaukset.

Siirrettäviä antureita käytetään yleensä silloin, kun tehtaassa on monia koneita joihin samat anturit käyvät. Tällöin ei tarvita kuin yksi anturisarja, jolla voidaan suorittaa mittaukset kaikkiin saman käyttöjännitteen koneisiin. Mitattava kone on kuitenkin pysäytettävä antureiden asennusta ja irrottamista varten. Mittaus suoritetaan poikkeuksellisessa käyttötilanteessa, esimerkiksi ilman kuormaa, jolloin koneeseen ei kohdistu samoja rasituksia kuin normaalissa käyttötilanteessa. Siksi ei saada aivan yhtä tarkkaa kuvaa oikeassa käyttötilanteessa syntyvistä osittaispurkauksista kuin mitä kiinteillä antureilla saadaan. Kuvassa 16 on siirrettävillä antureilla oleva mittaustapahtuma.



Kuva 16 Siirrettävillä anturilla tapahtuva PD-mittaus /11/

14.2 PD-antureiden tyypin valinta käyttökohteeseen

Anturin tyypin valinnan ratkaisee mitattava moottorin tai generaattorin teho. EMC-antureita käytetään yleensä moottoreissa, vesivoimageneraattoreissa ja pienissä turbiinigeneraattoreissa (< 100 MVA). Tyypillisesti moottoreissa käytetään kolmea EMC-anturia, kun taas generaattoreissa käytetään kuutta EMC-anturia. EMC-antureita voidaan käyttää osittaispurkauksien mittaamiseen kytkinlaitoksissa ja kuivissa muuntajissa. EMC-anturit mitoitetaan mitattavan kohteen käyttöjännitteen mukaan. Seuraavassa on luoteltu EMC-antureiden yleistietoa ja taulukossa 6 on Suomen markkinoilla olevien kolmen eri jänniteluokan antureiden teknisiä tietoja:

- Epoxy-Mica valmisteinen
- kapasitanssi 80 pF
- havaitsee > 40MHz olevat pulssit
- häviökerroin < 0,05 %
- toimintalämpötila -55 °C – 125 °C
- kolme jännitealuetta (taulukko 6).

Taulukko 6 EMC- anturien teknisiä tietoja /11/ ja /12/

	25 kV	16 kV	6,9 kV
AC Hipot, kV rms	51	33	15
Paino, kg	2,3	1,6	1,1
Korkeus, mm	206	127	92

SSC- antureita käytetään tyypillisesti suurissa (>100MVA) turbiinigeneraattoreissa. Normaalisti SSC- antureita asennetaan kuusi kappaletta, yli 600MVA:n turbiinigeneraattoreihin voidaan asentaa enemmänkin kuin kuusi anturia.

14.3 PD-antureiden sijoittaminen

Antureiden sijoittaminen on aina tapauskohtainen toimenpide. Anturit pyritään sijoittamaan mahdollisimman lähelle käämejä (purkauslähde), koska suuritaajuiset osittaispurkaukset vaimenevat nopeasti kaapeleissa. Sähkökoneiden suurin sähköinen rasitus kohdistuu ensimmäisiin sisään meneviin käämikierroksiin, joten suurimmat

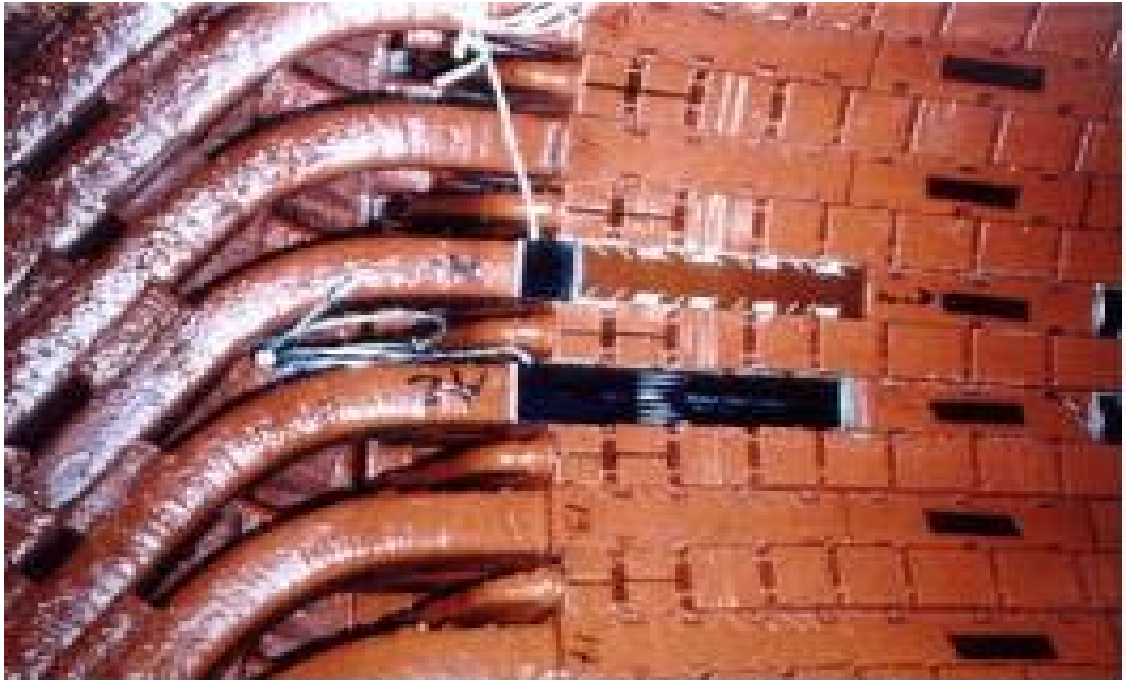
osittaispurkaukset tapahtuvat sähkökoneiden ensimmäisissä käämeissä, mikä helpottaa purkausten havainnointia (purkauslähde lähellä anturia). Sijoituspaikan valinnassa on myös huomioitava ympäristön olosuhteet.

Hartsieristeiset kytkentäkondensaattorit (EMC) voidaan kytkeä lyhyellä kaapelilla suoraan moottorin tai generaattorin kiskoon ja moottorin kytkentäliittimiin. EMC-antureiden asennus kestää noin kolme työpäivää. Kuvassa 17 on esimerkki EMC-antureiden kiinteästä asennuksesta. /3/, /10/ ja /11/



Kuva 17 EMC-antureiden asennus /12/

SSC-anturit asennetaan staattorin uran kiilauksen alle. Kuvassa 18 on esimerkki SSC-anturien asennuksesta. /10/ ja /12/



Kuva 18 SSC-antureiden asennus /12/

15 PD-MITTAUKSISSA KÄYTETTÄVÄT MITTAUSJÄRJESTELMÄT

TGA-B on siirrettävä analysaattori (kuva 19), mikä pystyy mittaamaan turbiinigeneraattoreita ja moottoreita. TGA-B analysaattorin antureina käytetään EMC-antureita. Mittaus suoritetaan tyypillisesti puolen vuoden välein ja se kestää noin puoli tuntia (kiinteillä antureilla). Analysaattori on ulkoisesti samanlainen kuin PDA-IV. /10/ ja /12/

PDA-IV on siirrettävä analysaattori (kuva 19), mikä on suunniteltu mittaamaan vesivoimageneraattoreita ja moottoreita. PDA-IV analysaattorin antureina käytetään EMC – antureita. Mittaus suoritetaan tyypillisesti puolen vuoden välein ja se kestää noin puoli tuntia (kiinteillä antureilla). /10/ ja /12/



Kuva 19 PDA-IV tai TGA-B PD-analysaattori /12/

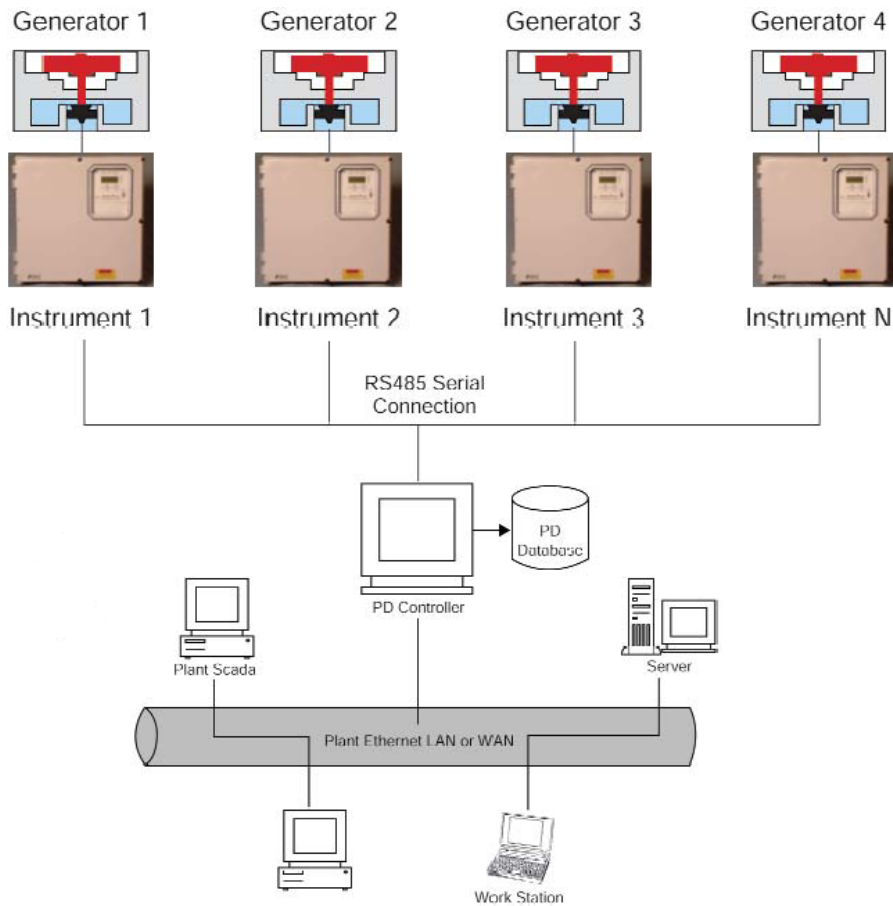
BusTrac (kuva 20) on jatkuva valvontajärjestelmä (on-line) osittaispurkauksien aktiivisuuden valvontaan turbiinigeneraattoreille. Turbiinigeneraattorien osittaispurkausmittauksessa BusTrac:lla käytetään tyypillisesti kuutta EMC-anturia generaattoria kohti, jolloin asennetaan kaksi anturia vaihetta kohti. BusTrac järjestelmää voidaan käyttää myös kytkinlaitosten jatkuvaan valvontaan. /10/ ja /12/



Kuva 20 BusTrac mittausyksikkö /12/

HydroTrac on jatkuva valvontajärjestelmä osittaispurkauksien aktiivisuuden valvontaan vesivoimageneraattoreille. Vesivoimageneraattorien osittaispurkausmittauksessa HydroTrac:lla käytetään tyypillisesti 6, 9 tai 12:sta EMC-anturia (kuva 21).

/10/ ja /12/



Kuva 21 BusTrac PD-valvontamittausjärjestelmä /12/

PDTrac on jatkuva valvontajärjestelmä osittaispurkauksien aktiivisuuden valvontaan. Se sopii moottoreiden, kytkinlaitosten ja kuivien muuntajien mittaukseen. Järjestelmällä voidaan kerätä mittausdataa jopa kahden vuoden ajalta. PDTrac antaa hälytyksen, jos asetetut PD-arvot ylittyvät. Järjestelmä voidaan kytkeä jo olemassa olevaan kunnossapitojärjestelmään, jolloin kerättyä dataa voidaan seurata ja analysoida tehtaan valvontajärjestelmällä (kuva 22).

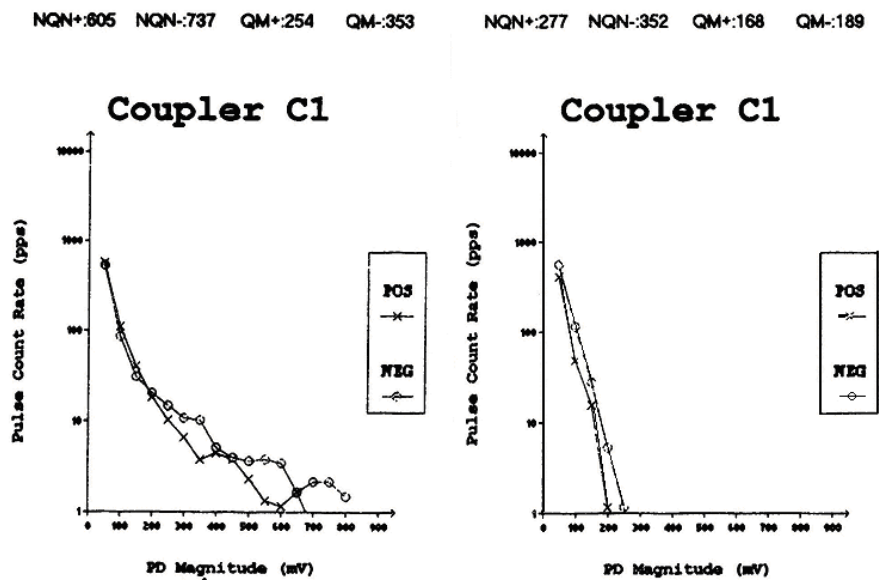


Kuva 22 PDTrack mittaus yksikkö.

16 PD-MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI JA NIIDEN AVULLA HAVAITTAVAT VIKATYYPIT

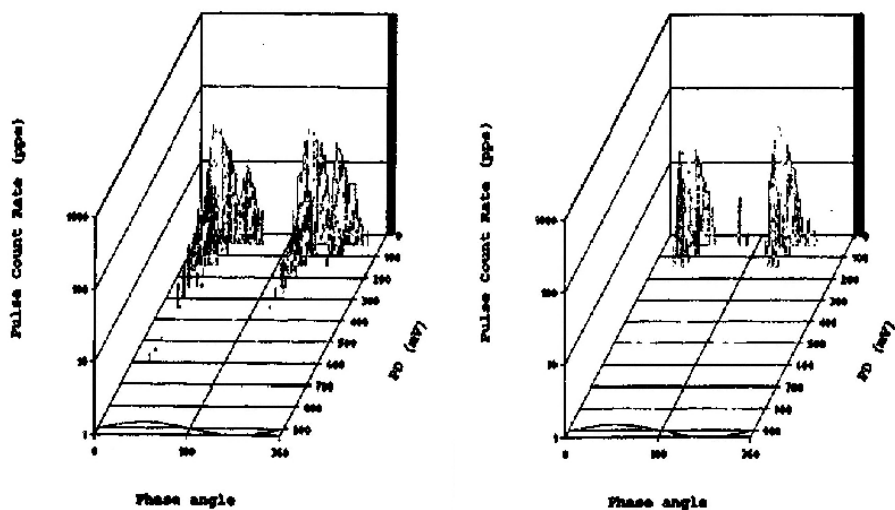
Mittausdata kerätään automaattisesti mittauslaitteistolla, minkä jälkeen se siirretään tietokoneelle. Ohjelma lajittelee saadun mittausdatan, jonka jälkeen se saadaan suoraan graafisessa muodossa analysoijalle (kuvat 23 ja 24). Siitä eteenpäin analysointi on manuaalista asiantuntijatyötä.

Mittauksien analysoinnissa käytetään kahta menetelmää, joista toinen on pulssin korkeusanalyysi (Pulse Height Analysis, PHA) (kuva 23). Tästä analysoinnista voidaan myös käyttää nimeä 2D-analyysi. Tällä analysoinnilla tulkitaan positiiviset ja negatiiviset PD-pulssit huomioiden niiden suuruudet ja lukumäärät. PHA-analysoinnilla voidaan tunnistaa eri vikatyyppejä, kuten käämitys löysällä, kääminpään kentänheikennyspinta heikko, käämin puolijohtava pinta heikennyt, kääminpäiden terminen vika, käämieristeen kyllästysvika ja osajohtimet löysällä. /10/ ja /12/



Kuva 23 PHA-analysoinnin graafiset kuvaajat /5/

Toinen analysointi tapa on pulssivaiheanalyysi (Pulse Phase Analysis, PPA) (kuva 24). PPA-analysoinnista voidaan myös käyttää nimeä 3D-analyysi. Tässä analysoinnissa tutkitaan talletettuja osittaispurkauksien lukumäärää, suuruutta sekä pulssin sijaintia suhteessa syöttöjännitteen vaihekulmaan. Tuloksista muodostuu kolmiulotteinen graafinen kuvaaja, joka antaa yksinkertaisen ja tehokkaan työkalun PD-pulssien aktiivisuuden esittämiseen. PPA analysoinnilla voidaan vielä tunnistaa PHA-analysoinnin vikatyypin lisäksi vikatyyppejä, kuten kääminpäiden välinen eristevika, kääminpäiden välinen kapasitiivinen kytkeytyminen, liitosten löystyminen ja korona. /10/ ja /12/



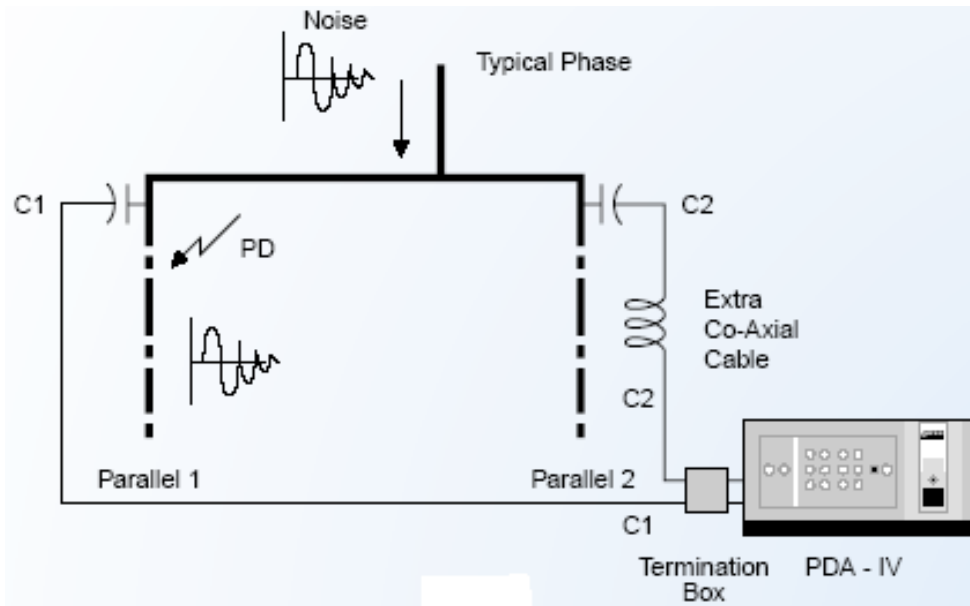
Kuva 24 PPA-analysoinnin graafiset kuvaajat. /5/

17 PD-MITTAUSTEN HÄIRIÖIDEN POISTAMINEN

Jotta saataisiin luotettava kuva mitattavasta koneesta tai generaattorissa tapahtuvista osittaispurkauksista, on kiinnitettävä huomiota häiriötekijöihin, jotka vääristävät mittaustulosta ilman hyvää häiriö suodatusta. PD-mittaustulosten analysoinnissa on tärkeää erottaa sähkökoneen osittaispurkaukset verkosta päin tulevista häiriöistä, kuten korunasta, liitoskohinasta, liukurenkaiden aiheuttamasta kohinasta jne. Fortumin maahantuomissa mittauslaitteistoissa häiriöiden suodattaminen suoritetaan mittauslaitteissa automaattisesti. Häiriöiden poistossa voidaan käyttää myös kahta mitta-anturia vaihdetta kohden, jolloin saadaan selville sähkökoneessa syntyvät purkaukset ja verkossa syntyvät häiriöt. /3/, /10/ ja /12/

17.1 Häiriön poistaminen vesigeneraattorin PD-mittauksesta kahdella anturilla vaihdetta kohti

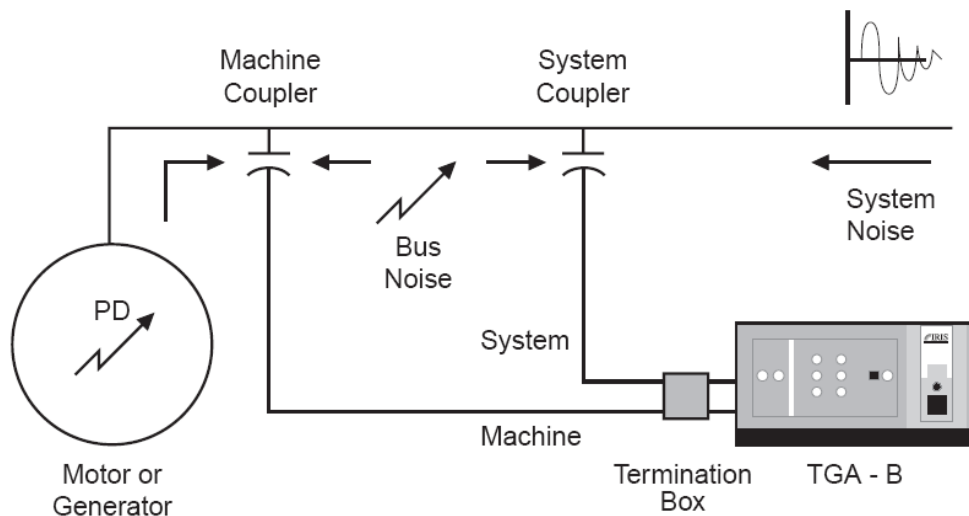
80 pF kondensaattorit eivät päästä lävitse 50/60Hz taajuisia jännitettä, vaan kondensaattorit päästävät lävitseen vain korkealla taajuudella ja suuren nousunopeuden omaavat jännitepulssit. Anturit on normaalisti asennettu eri paikkoihin, esimerkiksi käämitykseen, missä on kaksi rinnakkaista syöttöä vaihdetta kohden. Kumpaankin syöttöön on asennettu anturi, kuten kuvasta 25 näkyy. Coaxial-kaapeleiden pituus, antureiden asennus ja pääteboksi on viritetty niin, että häiriöpulssit ja niiden aiheuttajat koneen ulkopuolelta päätyvät samanaikaisesti mittarin sisääntuloihin. Käämityksessä syntyvät osittaispurkausten pulssit tulevat mittarin sisääntuloihin eri aikaan. Tämän seurauksena mittauslaitteisto pystyy automaattisesti erottamaan käämityksessä syntyvät osittaispurkaukset verkosta tulevista häiriöistä. /12/



Kuva 25 PDA-IV mittausjärjestelmä, joka mittaa vesivoimageneraattorin osittaispurkauksia /12/

17.2 Häiriön poistaminen moottorien ja turbiinigeneraattorien PD-mittauksesta kahdella anturilla vaihdetta kohti

Antureina mittauksessa käytetään 80 pF EMC-kondensaattoreita. Antureita asennetaan kaksi kappaletta vaihdetta kohti: toinen moottorin tai generaattorin kytkentäkoteloon tai sen välittömään läheisyyteen ja toinen pidemmälle kohti syöttöjärjestelmää (kuva 26). Coaxial-kaapeleiden pituuksien tulee olla samat. Pulssin saapuminen eri aikaan anturille kertoo sen saapumissuunnan, jolloin saadaan selville pulssin syntymispaikka. Järjestelmä pystyy automaattisesti erottamaan häiriöt ja käämityksessä syntyvät osittaispurkaukset. /12/



Kuva 26 TGA-B mittausjärjestelmä, joka mittaa moottorin tai turbiinigeneraattorin osittaispurkauksia. /12/

17.3 Häiriön poistaminen moottorien PD-mittauksesta yhdellä anturilla vaihdetta kohti

Mikäli moottorissa on yli 30m pitkät suojatut syöttökaapelit, vaativat ne vain yhden anturin vaihdetta kohti. Anturit asennetaan moottorin kytkentäkoteloon mahdollisimman lähelle koneessa syntyviä purkauksia. Suuritaajuiset häiriöt vaimenevat kaapeleissa niin paljon, että ne eivät vaikuta mittaukseen (kaapelit toimivat häiriöiden poistajina). /12/

18 PD-MITTAUSTEN MÄÄRÄ SUOMESSA

Suomessa kiinteillä antureilla valvotaan noin 100:a konetta (31.12.2003). Mitattavien koneiden jakautuminen moottorien, turbiinigeneraattorien ja vesivoimageneraattorien suhteen jakautuu seuraavasti:

- moottorit 45
- turbiinigeneraattorit 40
- vesivoimageneraattorit 15.

Siirrettävillä anturilla mitataan Suomessa noin 250 konetta vuosittain. Siirrettävillä antureilla mitataan:

- moottoreita
- vesivoimageneraattoreita
- varavoimageneraattoreita. /11/

19 PD- JA $\tan\delta$ -MITTAUSTEN EROT

PD- ja $\tan\delta$ -mittausten tarkoitus on saada kuva suurjännitteisen sähkökoneen tai generaattorin eristyksen tilasta ja mahdollisista syntyvistä tai jo olemassa olevista vioista.

PD-mittaus voidaan suorittaa kiinteillä tai siirrettävillä antureilla. Jos mittauksessa käytetään kiinteitä antureita ei tuotannon katkosta tarvitse tehdä mittauksen suorittamisen takia. $\tan\delta$ -mittauksessa on aina kone irroitettava verkosta mittausten ajaksi. Kiinteillä PD-antureilla mittaus voidaan suorittaa haluttuna aikana ja halutussa kuormitusilanteessa, kun taas $\tan\delta$ -mittaus on suoritettava edellä mainituista syistä tuotantokatkoksen aikana. PD-mittaus voidaan suorittaa kiinteillä antureilla koneen normaalissa käyttötilanteessa, jolloin saadaan erittäin hyvä kuva käytönaikaisten rasitusten aiheuttamista osittaispurkauksista. $\tan\delta$ -mittauksessa konetta ei voida rasittaa muuten kuin sähköisesti mittaus jännitteellä.

PD-mittaukset on suoritettava samalla laitteistolla ja antureilla, jotta mittaustulokset olisivat vertailukelpoisia. $\tan\delta$ -mittauksessa on myös oltava sama mittauslaitteisto, kuin muillakin kerroilla. Tämän lisäksi $\tan\delta$ -mittaus tulokset ovat täysin lämpötilasta riippuvaisia (lämpötilan vaikutusta $\tan\delta$ -mittaukseen käsiteltiin tarkemmin kohdassa 8 Häviökulman δ ja $\tan\delta$ -mittauksen teoria).

$\tan\delta$ -mittauksella saadaan selville eristyksessä tapahtuvat häviöt, joiden perusteella voidaan arvioida niiden haitallisuutta eristykselle. $\tan\delta$ -mittauksilla ei voida saada selville eristyksen heikkenemisen syytä. Esimerkiksi sillä saadaan selville

kokonaisosittaispurkauksien suuruusluokka-arvio, mutta ei sen aiheuttajaa eikä vaarallisuudesta saada tarkkaa tietoa.

PD-mittauksen perusteella voidaan antaa hyvä ja yksityiskohtainen selvitys eristyksen kunnosta, eristeessä olevista mahdollista vioista ja niiden vaarallisuudesta. PD-mittaus antaa erittäin hyvän kuvan eristyksen kunnosta, koska osittaispurkaukset lisääntyvät eristyksen heiketessä tai jo eristeessä olevan virheen kasvaessa. Osittaispurkauksia syntyy aina jossakin määrin suurjännitekoneissa ja generaattoreissa.

LÄHDELUETTELO

- 1 Aro, M., Elovaara J., Karttunen M., Nousiainen, K. Palva V.,
Suurjännitetekniikka. ©Tekijät ja Yliopistokustannus/Otatieto,
Jyväskylä 2003, 520s.
- 2 Paloniemi P., Koskinen E., Sähkökoneiden eristykset, Sähkömekaniikan
lensiaattiseminaari, Otaniemi 1996, 63 s.
- 3 Nevalainen, P., PD-mittauksiin perustuva kunnonvalvontamenetelmät
teollisuuden sähköverkossa, TESLA raportti 67/2002, Tampere 2002,
108 s.
- 4 Lindgren, P., Bovellan, K., Koistinen, H., Eerola, H.,
Turbogeneraattoreiden käyttöikä ja sen pidentämismahdollisuudet,
Energialouden Yhdistys raportti 20/1987, Helsinki 1987, 104 s.+ 4
liitettä.
- 5 Fortum Service Oy & IRIS Power Engineering Ltd., Fortum
Kunnonvalvonta, esite kunnonvalvonnasta, 1999, 6 s.
- 6 Petri, H., Dielektrisen vasteen mittausmenetelmien
teoreettinen perusta, Raportti TKK-SJT-46, Espoo 2001, 16 s.
- 7 Eloranta, E., Geofysiikan kenttäteoria, Dark Oy, Vantaa 2003, 424 s.
- 8 Frisk, L., Properties of liquid crystal materials - Nestekidemateriaalien
ominaisuudet, raportti 7407465 Näyttötekniikat, Tampere 2003, 9 s.
- 9 Lindgren, O., Suurjännitesähkökoneiden kunnonvalvonta
osittaispurkausmittausten avulla, Fortum, kalvosarja, 15.02.2004, 14 s.

- 10 Fortum Service Oy, Fortum Kunnonvalvonta, esite
Suurjännitestaattorien ja kytkinlaitosten kunnonvalvonta
osittaispurkausmittausmenetelmällä, 2002, 5 s.
- 11 Lindgren, O., esite Suurjännitesähkökoneiden kunnonvalvonta
osittaispurkausmittausten avulla, Fortum Service Oy, 2002, 14 s.
- 12 IRIS Power Engineering Ltd., [www-sivut], [viitattu 05.01–10.04.05]
Saatavissa: <http://www.irispower.com>
- 13 Furukawa electric institute of technology, [www-sivut], [19.03.05]
Saatavissa: <http://www.feti.hu/>
- 14 Tampereen Teknillinen Yliopisto, Sähkövoimatekniikka, [www-sivut],
[28.03.05] Saatavissa: <http://svtf43.ee.tut.fi/>
- 15 Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, Sähkötekniikanosasto, [www-
sivut], [28.03.05] Saatavissa: <http://www.ee.lut.fi>
- 16 Tero Parsama, toimitusjohtaja, puhelinkeskustelu 24.03.2005, Kaakon
Sähkökone Oy.