

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
School of Energy Systems  
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Diplomityö

**Alexi Pakkanen**

## **GENERAATTORIN KUNNOSSAPITO**

Työn tarkastajat: Pertti Silventoinen  
Tommi Kärkkäinen

Työn ohjaaja: Kari Leskinen

# TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
School of Energy Systems  
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Alexi Pakkanen

## Generaattorin kunnossapito

Diplomityö

2016

82 sivua, 46 kuvaa, 2 taulukkoa, 1 liite

Työn tarkastajat: Pertti Silventoinen  
Tommi Kärkkäinen

Hakusanat: generaattori, kunnossapito, turbogeneraattori, voimalaitos

Diplomityössä käydään läpi tahtigeneraattorin toimintaperiaate ja miten erilaiset kuormat vaikuttavat generaattoriin. Työssä tutkitaan generaattorin staattorin rakenne, käyden läpi levypaketin rakenteet, käämien ja käämineristyksen merkityksen. Pyörivällä magnetoidulla roottorilla saadaan aikaan staattorinkäämiin kolmivaiheinen sähkö. Generaattorille suoritettavilla kunnossapitotoimilla varmistetaan generaattorin tuotanto koko sen eliniän ajan. Työssä käydään läpi revisiossa tehtävät toimenpiteet ja tarkastukset. Työn tarkoituksena on laatia kunnossapitotoimet tietyn yrityksen generaattoreille, ja näin ollen varmistaa generaattoreiden häiriötön käyttö.

# **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
School of Energy Systems  
Degree Program in Electrical Engineering

Alexi Pakkanen

## **Generator maintenance**

Master's Thesis

82 pages, 46 figures, 2 tables, 1 appendice

Examiners : Pertti Silventoinen  
Tommi Kärkkäinen

Keywords: generator, maintenance, turbogenerator, power plant

In this Master's thesis is told basic principles of synchronous generator and how different loads affects generators. This thesis studies the structure of stator, by telling the structure of the core iron and by explaining the meaning of the stator winding and its insulation. Rotating magnetized rotor generates three phase electricity to stator winding. Maintenance assures generators production to its whole lifecycle. In this thesis is told operations and inspection that should be done in generator overhaul. The purpose of this thesis is to create maintenance plan to power plant generator units and ensure units use without disruption.

## **ALKUSANAT**

Tämä diplomityö on tehty Lahti Energian Kymijärven voimalaitokselle. Haluan kiittää Lahti Energiaa lopputyöaiheesta, sekä työhön liittyvästä opastuksesta.

Kiitos Pertti Silventoiselle Lappeenrannan Teknillisestä Yliopistosta lopputyöhön liittyvistä neuvoista ja ohjeista.

Erityiskiitos kuuluu Lauralle ja Leeville kannustamisesta ja tukemisesta.

Lahdessa 29.11.2016

Alexi Pakkanen

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO.....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>LAHTI ENERGIA.....</b>	<b>5</b>
2.1	HISTORIA.....	6
2.2	VOIMALAITOKSET.....	6
<b>3</b>	<b>GENERAATTORIN RAKENNE .....</b>	<b>9</b>
3.1	STAATTORI.....	9
3.2	ROOTTORI .....	17
3.3	LAAKERIT.....	19
<b>4</b>	<b>TAHTIGENERAATTORI.....</b>	<b>20</b>
4.1	TYHJÄKÄYNTI.....	21
4.2	MAGNETOINTIMENETELMÄT .....	22
4.3	KUORMITETTU GENERAATTORI .....	24
4.4	UMPINAPAISEN TAHTIGENERAATTORIN TOIMINTA.....	27
4.5	TAHDISTUS VERKKOON .....	29
4.6	PÄTÖTEHON SÄÄTÖ.....	29
4.7	LOISTEHON SÄÄTÖ.....	30
<b>5</b>	<b>GENERAATTORIN APUJÄRJESTELMÄT .....</b>	<b>30</b>
5.1	MAGNETOINTI .....	30
5.2	JÄÄHDYTYS .....	31
5.3	ÖLJYJÄRJESTELMÄ.....	34
<b>6</b>	<b>KÄYTÖNAIKAINEN KUNNONVALVONTA.....</b>	<b>35</b>
6.1	SÄHKÖISET PARAMETRIT .....	36
6.2	LÄMPÖTILAMITTAUKSET.....	37
6.3	VÄRÄHTELYMITTAUS.....	40
6.4	OSITTAISPURKAUSMITTAUS .....	41
6.5	ILMAVÄLIVUOMITTAUS .....	43
6.6	ROOTTORIN AKSELIJÄNNITTEEN MITTAUS .....	44

<b>7</b>	<b>GENERAATTORI REVISIO .....</b>	<b>44</b>
7.1	STAATTORI.....	44
7.2	ROOTTORI .....	52
7.3	APUJÄRJESTELMÄT .....	62
<b>8</b>	<b>SÄHKÖISET MITTAUKSET.....</b>	<b>64</b>
8.1	EL-CID.....	64
8.2	RAUTASULKUKOE.....	67
8.3	KÄÄMIN VASTUSMITTAUS .....	69
8.4	ERISTYSVASTUSMITTAUS .....	69
8.5	POLARISAATIOINDEKSI.....	70
8.6	HÄVIÖKULMAMITTAUS .....	71
8.7	JÄNNITEKOE .....	73
8.8	ROOTTORIN KIERROSSULKU .....	74
8.9	ROOTTORIN MAASULKUMITTAUS.....	77
<b>9</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET .....</b>	<b>78</b>
<b>10</b>	<b>YHTEENVETO.....</b>	<b>80</b>
	<b>LÄHTEET.....</b>	<b>81</b>
	<b>LIITTEET</b>	

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$f$	taajuus
$f_k$	käämityskerroin
$I_a$	virta
$IR_{\min}$	eristysvastuksen minimiarvo
$IR_{10\min}$	eristysvastuksen arvo ajanhetkellä 10min
$IR_{1\min}$	eristysvastuksen arvo ajanhetkellä 1 min
$K_T$	eristysresistanssi lämpötilakerroin lämpötilassa T
$K$	vuotokerroin $= \frac{\text{poistunut kaasumäärä } m^3}{\text{koneen kaasutilavuus } m^3}$
$K_w$	käämikerroin
$kV$	kilovolttia
$n$	pyörimisnopeus
$N$	staattorin vaihekäämin sarjaan kytketyt johdinkierrokset
$p$	generaattorin napapariluku
$PF$	tehokerroin
$P_2$	ylipaine kokeen lopussa (mmHg)
$P_1$	ylipaine kokeen alussa (mmHg)
$P_{a2}$	ilmakehän paine kokeen lopussa (mmHg)
$P_{a1}$	ilmakehän paine kokeen alussa (mmHg)
$PI$	polarisaatioindeksi
$R_C$	eristysresistanssi skaalattuna 40 °C:een
$R_T$	eristysresistanssi lämpötilassa T
$T_2$	lämpötila kokeen lopussa (K)
$T_1$	lämpötila kokeen alussa (K)
$V_{LL}$	pääjännite
$\Phi_m$	yhden magneettinavan päävuoto, joka on sama kuin staattorivyöhyden huippuvuoto $\hat{\Phi}_m$

# 1 JOHDANTO

Sähköntuotannossa tulevaisuudessa tapahtuvat muutokset haastavat perinteisen käsityksen sähköntuotannossa. Perinteisesti sähköntuotanto mielletään isoissa yksiköissä turbogeneraattorilla tuotetuksi sähköksi, tai vastaavasti jokien varsiin rakennetuilla vesivoimalaitoksilla tuotetuksi sähköksi. Auringonenergia ja tuulivoima haastavat perinteiset sähkön tuotantotavat. Aurinkoenergia poikkeaa perinteisestä tuotannosta eniten puuttuvan generaattorin takia. Suurin osa tuotetusta sähköstä valmistuu kuitenkin generaattorin avulla. Generaattoria pyörittävä voima voi kuitenkin muuttua höyrystä tuuleen. Perinteinen generaattori toimii yhteisenä tekijänä sekä vanhoilla, että uudella tavalla tuotetussa sähköenergiassa. Generaattoreiden avulla tullaan takamaan sähkön riittävä määrä myös tulevaisuudessa.

Generaattori on sähköntuotannon kannalta tärkein ja kallein komponentti. Generaattorin kunnonvalvonnalla ja huoltamisella pyritään takaamaan häiriötön käyttö koko elinkaaren ajaksi. Generaattoreiden pitkän käyttöiän ja kalliin investointihinnan takia, generaattorin kunto varmistetaan erilaisilla kunnonvalvontamittausten ja visuaalisten tarkastelujen avulla. Generaattorin kuntoa arvioidaan valmistajan ohjeiden mukaisesti, sekä yleisesti kokemuseräiseen tietoon pohjautuvien tutkimuksien avulla. Korkean käyttöiän takia voidaan generaattorille suorittaa suuria uudistuksia, joissa voidaan staattorin käämitys vaihtaa, tai generaattorin roottori uusia. Perinteisen voimalaitoksen ikä voi olla kymmeniä vuosia, joten kunnossapidon tärkeyttä ei pidä unohtaa.

Tämän työn tarkoituksena on tutkia generaattorin yleistä rakennetta, sekä toimintaperiaatetta. Työssä käydään läpi generaattorin käytönaikaisen kunnonvalvonnan keinot, sekä revisiossa generaattorille tehtävät sähkömekaaniset tarkastukset. Työssä laaditaan suuntaviivat Kymijärven voimalaitoksen generaattoreiden kunnossapidolle. Generaattoreiden elinkaari on otettava huomioon kunnossapitosuunnitelmaa tehdessä. Suunnitelmassa on elinkaaren päässä olevalle generaattorille laadittava huolto-ohjelma, jonka avulla voidaan taata turvallinen loppukäyttö. Uudemmillle generaattoreille tulee suunnitelmassa huomioida tuleva käyttöikä. Kunnossapitosuunnitelmaa tulee päivittää generaattoreiden kunnon muutosten mukaan. Suunnitelmassa otetaan huomioon tarvittavat kunnonvalvontamittaukset, sekä käyttötunteihin perustuva generaattorin osittainen



avaaminen, sekä roottorin ulosottaminen.

## 2 LAHTI ENERGIA

Lahti Energian päätuotteita ovat sähkö ja kaukolämpö, jotka tuotetaan yhteistuotannolla Kymijärven voimalaitosalueella. Voimalaitosten lisäksi lämpöä tuotetaan eripuolille kaukolämpöverkkoa sijoitetuilla huippu- ja varalämpökeskuksilla. Tuotannon polttoaineina käytetään kierrätyspolttoainetta, maakaasua, kivihiiltä, puuta ja biokaasua. Lisäksi Lahti Energialla on osakkuusyhtiöiden kautta osuuksia vesivoimaan, tuulivoimaan ja ydinvoimaan. Lahti Energia toimittaa kaukolämpöä Lahden, Hollolan, Nastolan ja Asikkalan alueille. Kaukolämpöverkon yhteispituus on 672km. Lahti Energian tytäryhtiö LE- sähköverkon siirtoverkko ulottuu Lahden, Hollolan, Nastolan, Iitin, Hämeenkosken ja Asikkalan kuntiin. Sähköverkon pituus on 4580km. Lahti Energialla henkilökuntaa kuuluu vakituisesti 224 henkilöä. Vuonna 2014 Lahti Energian konsernin liikevaihto oli 180,8 miljoona euroa. (Lahti Energia, 2016)



**Kuva 1.** Lahti Energian Kymijärven voimalaitosalue.

## 2.1 Historia

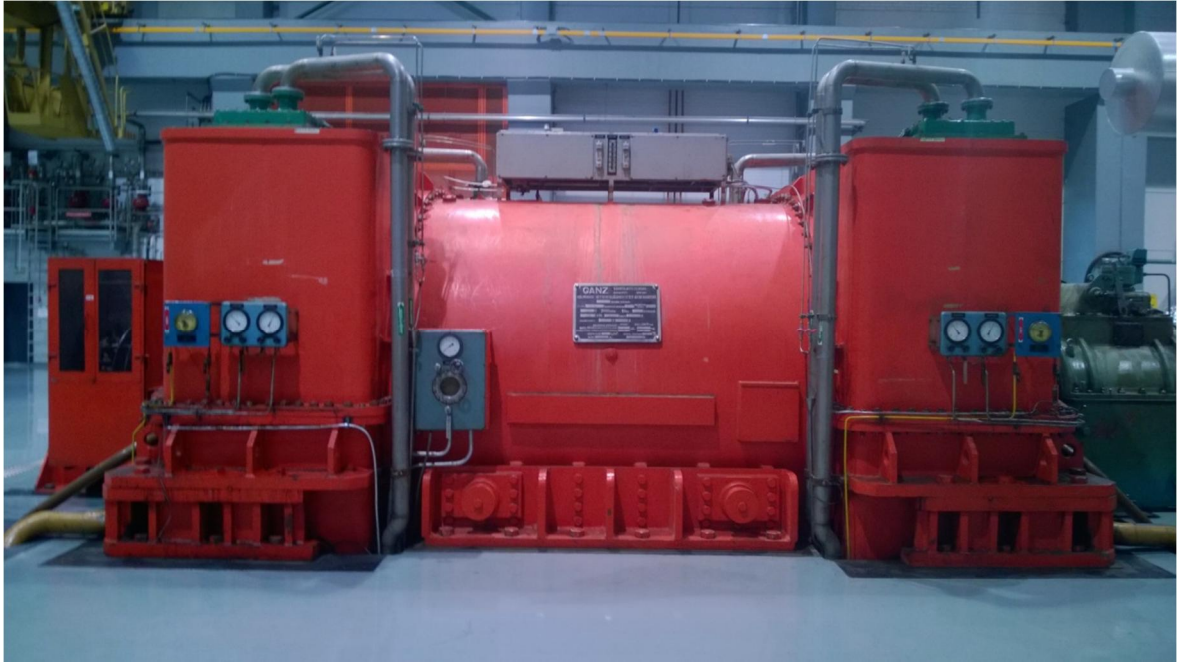
Vuonna 1907 Lahden kaupungin sähkölaitoksen toiminta alkoi, kun kaupunginvaltuusto hyväksyi taloustoimikunnan ehdotuksen sähkölaitoksen perustamisesta. Saman vuoden lopulla syttyi ensimmäiset katuvalot Lahdessa. Vuonna 1962 alettiin Lahdessa toimittaa kaukolämpöä, ja ensimmäinen asiakas liitettiin kaukolämpöverkkoon 18.8.1962. Sähkön ja kaukolämmön yhteistuotanto alkoi vuonna 1965, kun Teivaanmäen voimalaitos valmistui. Vuonna 1971 Lahden kaupunki perusti yhdessä IVO:n kanssa Lahden Lämpövoima Oy:n, tarkoituksen rakentaa Lahteen uusi voimalaitos. Yhteishankkeesta syntyi Kymijärvi I voimalaitos vuonna 1975. Kymijärven voimalaitos alueelle hankittiin vuonna 1986 kaasuturbiini. Vuonna 2001 Lahden lämpövoiman Kymijärvi I siirtyi kokonaan Lahti Energian omistukseen. LE-Sähköverkko perustettiin vuonna 2007. Kymijärvi II voimalaitoksen rakentaminen aloitettiin vuonna 2010, ja laitos vihittiin käyttöön vuonna 2012. (Lahti Energia, 2016)

## 2.2 Voimalaitokset

Kymijärvi I voimalaitos valmistui vuonna 1975. Laitos valmistui öljykäyttöisenä, mutta pian laitoksen käyttöönoton jälkeen öljyn hinta kallistui radikaalisti. Öljyn hinnan nousun vuoksi laitos muutettiin vuonna 1982 kivihiilikäyttöiseksi. Kymijärvi I prosessiin liitettiin vuonna 1986 kaasuturbiini ja pakokaasukattila. Näin ollen laitoksen sähköteho on 200MW ja kaukolämpöteho 250MW. Vuonna 1998 Kymijärvi I prosessiin liitettiin kaasutin. Kaasutin on osaltaan vähentänyt laitoksen päästöjä ja vähentänyt kivihiilenkäyttöä. (Lahti Energia, 2016)

Kymijärvi I turbiinin valmistaja on puolalainen Zamech. Turbiini on malliltaan 18UK135-0, jossa on välitulistuksella varustettu väliotto- ja lauhdeturbiini, joka on tarkoitettu käyttämään synkrogeneraattoria, sekä syöttämään lämpöä kaukolämpöverkkoon. Turbiini on kolmepesäinen aktioturbiini, kiekkorakenteinen ja varustettu säädettävällä lämmönnotolla. Turbiinia voidaan käyttää vastapainekäytössä, sekakäytössä ja lauhdekäytössä. Turbiinin tuorehöyryn nimellisarvot 177,5 bar, 535°C ja nimellvirtaus 125 kg/s. Kymijärvi I generaattorin on valmistanut Unkarilainen Ganz. Malliltaan generaattori on ORV 150. Generaattorin nimellisuoritusarvot ovat: teho 186MVA, jännite 21kV, staattorivirta 5140A ja pyörimisnopeus 3000 rpm. Generaattorissa on harjallinen

magnetointi, sekä vety- ja vesijäähdytys. Staattorikäämin sisällä virtaa tislattu jäähdytysvesi, ja generaattorin sisällä olevan vedyn puhtaus on oltava vähintään 97%. Vety jäähdytetään generaattorissa olevilla vetyjäähdyttimillä, joissa kiertää jäähdytysvesi. (Ganz)



**Kuva 2.** Kymijärvi I Ganz

Kymijärven kaasuturbiinin valmistaja on Alstom Altantique ja generaattorin valmistaja Brush Electrical Machines. Turbiinin ja generaattorin välissä on alennusvaihteisto, jonka välityssuhde on 5100/3000rpm. Savukaasujen lämpötila on ennen turbiinia 1104°C ja loppulämpötila 531°C. Turbiinin kaasumäärä on 151 kg/s. Generaattorin nimellisarvot: teho 58MVA, jännite 10,5kV ja staattorivirta 3202 A. Generaattori on ilmajäähdytteinen ja magnetointi on harjaton. (Brush)



**Kuva 3.** Kymijärvi KT Brush

Kymijärvi II voimalaitoksen rakentaminen alkoi vuonna 2009, ja laitos otettiin kaupalliseen käyttöön vuonna 2012 toukokuussa. Laitos oli valmistuessaan maailman ensimmäinen kaasutusvoimalaitos, jonka polttoaineena toimii jätteistä valmistettu kierrätyspolttoaine. Kymijärvi II polttoaineteho on 160MW, kaukolämpöteho 90MW ja sähköteho 50MW. (Lahti Energia. 2013. s. 11-13.)

Kymijärvi II turbiinin ja generaattorin valmistaja on Siemens. Vastapainehöyryturbiinin malli on SST-800 jossa tulohöyrynpaine on 117 bar ja lämpötila 527°C. Generaattorin nimellisarvot: teho 60MVA, jännite 10,5kV ja staattorin virta 3299A. Generaattorissa on ilmajäähdytys ja harjaton magnetointi. ( Siemens AG. 2011)



**Kuva 4.** Kymijärvi II Siemens

### **3 GENERAATTORIN RAKENNE**

Generaattori koostuu kahdesta pääkomponentista, paikoillaan olevasta staattorista ja pyörivästä roottorista. Suurella nopeudella pyörivään roottoriin kohdistuu mekaanista-, sähkömagneettista- ja lämpökuormaa. Roottorin kriittisimmät komponentit ovat roottorin käämien päitä tukevat siderenkaat ns. kapat. Kapat joutuvat suurelle mekaaniselle rasitukselle tukiessaan kääminpäitä keskipakoisvoimaa vastaan. Staattori altistuu käytönaikana värähtelylle, sekä sähkömagneettiselle- ja lämpökuormalle. Staattorin kriittisin komponentti on käämitys. Enemmistö staattorin vioista johtuu käämityksestä. (Klempner 2004 s.34)

#### **3.1 Staattori**

Staattorinrunгон tarkoituksena on tukea staattorin levysydäntä, ja toimia paineastiana vetyjäähdytteisissä generaattoreissa. Staattorinrunko tukee vetyjäähdyttimiä, joilla poistetaan vetyyn siirtynyttä lämpöä. Staattorinrunkoon kiinnittyy sisäpuolella levysydänpaketti. Rungon ulkopuolelle on generaattorin jalat, joilla se liitetään

perustuksiin. Generaattorinrunгон on kestävä generaattorin paino, sekä pyörivän liikkeen aiheuttama voima. Lisäksi rungon on kestävä verkon ja generaattorin viat. Rungon on mahdollistettava levypaketin lämpenemisestä johtuva laajeneminen ja supistuminen. Staattorinrunгон ominaisvärähtely taajuudessa on otettava huomioon, ettei taajuus ole lähellä 50Hz tai 100Hz, jottei värähtely saa vahvistusta verkon taajuudesta. Staattorissa on aksiaalissuunnassa tukikaaria, joilla saadaan staattorinrunko jäykistettyä. Rungossa on luontaisia heikkoja kohtia, johtuen eri kappaleiden liitoksista ja tukikaariin tehdyistä jäähdytysilmareiteistä, jotka täytyy ottaa huomioon staattorinrunгон suunnittelussa. Staattorinrunko on tarkoitettu nostettavaksi, joten rungon ulkopuolelle liitetään kannatinlevyt, joista staattoria voidaan nostaa. Staattorinrunгон maksimikokoon vaikuttaa kuljetuksen asettamat paino- ja kokorasitteet. (Klempner 2004 s.39–41)

Staattorin levysydän on ladottu ohuista 0,3mm – 0,5mm paksuista dynamolevyistä. Yksi levysydän kierros koostuu 10-24 dynamolevystä tehdystä segmentistä. Jokainen levysydänkierros on asennettu limittäin nähden edelliseen kierrokseen. Limittämisellä saavutetaan parempi mekaaninen kestävyys, ja vähennetään roottoriin syntyvää akselivirtaa. Jokainen segmentin palanen on eristetty molemmin puolin ohkaisella kerroksella lakkaa. Eristyksellä pyritään rajoittamaan syntyviä pyörrevirtoja, ja estämästä niiden kulkeutumista viereiseen levysydänkierrokseen. Pyörrevirtoja vähentämällä saadaan vähennettyä samalla niistä johtuvaa lämpenemistä.



**Kuva 5.** Levypaketin segmenttilevyjä. (Klempner 2004 s.36)

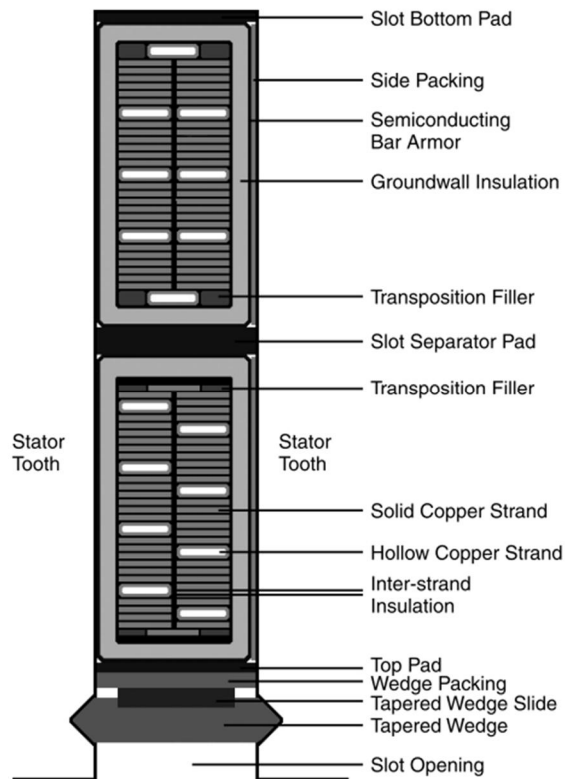
Staattorinlevysydän koostuu tuhansista dynamolevyistä tehdyistä segmenteistä. Levysydäntä tehtäessä levysydänpaketti on pystyasennossa, mutta valmis levysydänpaketti asennetaan lopulliseen asentoon generaattoriin vaaka-asentoon. Staattorinrungossa on ohjaintangot, joita vasten segmentit asennetaan. Levysydänpaketti kiristetään staattorinpäistä tiukaksi. Levypaketin kiristyksessä käytetään kahta erilaista rakennetta. Ensimmäisessä ja yleisesti käytössä olevassa rakenteessa segmentinlevyn takaosassa oleva hahlo menee staattorin rungossa kiinni olevaan ohjaintankoon, jonka jälkeen levypaketin päihin laitetaan metalliset renkaat jotka kiristetään. Toinen tapa kirittää levypakettisydän on laittaa ”läpipultti” kaikkien segmenttipalojen läpi. Segmenttipalasisissa on valmiit reiät läpipulteille ja levypaketin molempiin päihin laitetaan puristuslevyt, joita kiristämällä saadaan levypaketista tiivis. Levysydämen päistä tulee käämit ulos, joten puristuslevyjen lisäksi pitää olla erilliset tukikehikot, joilla saadaan levypaketti kiristettyä tasaisesti. (Klempner 2004 s.35–36)

Tasaisella kuormalla staattorinrunko ja levypaketti altistuvat tasaiselle väännölle, mutta vian sattuessa vääntövoima voi kasvaa suureksi. Vääntövoima siirtyy staattorinrungosta levypakettiin niitä tukevien ohjaintankojen kautta. Staattorin ja levypaketin välissä pyritään käyttämään mekaanista vaimennusta, jotta pystyttäisiin vähentämään normaalissa käytössä ja vikatilanteissa syntyviä värähtelyjä ja voimia. (Klempner 2004 s.37)

Kaksinapaisessa generaattorissa staattoriin kohdistuu sisäänpäin pyörivä magneettinen veto, jonka seurauksena staattorinrungon muoto pyrkii ovaalin muotoiseksi. Magneettikentän aiheuttamaa poikkeamaa ei voi havaita silmin, mutta magneettikenttä aiheuttaa värähtelyä. Syntyvä värähtely ilmenee verkontaajuuden toisella monikerralla. Syntyvä värähtely vaimennetaan, jottei se välity perustuksiin. Generaattori asennetaan jousien päälle, jolloin syntyvät värähtelyt saadaan vaimennettua. Jousien on kestettävä generaattorin paino ja käytönaikana generaattorin synnyttämät vääntömomentit. (Klempner 2004 s.37)

Staattorin käämitys tehdään eristetyistä kuparikiskoista, jotka asennetaan levysydämässä oleviin uriin. Käämit kiristetään uriin kiilojen avulla. Käämit tulevat symmetrisesti ympäri staattoria, jolloin roottorin synnyttämä magneettikenttä vaikuttaa käämeihin tasaisesti.

Jokaisessa levypaketin urassa on kaksi käämikiskoa päällekkäin. (Klempner 2004 s.51)

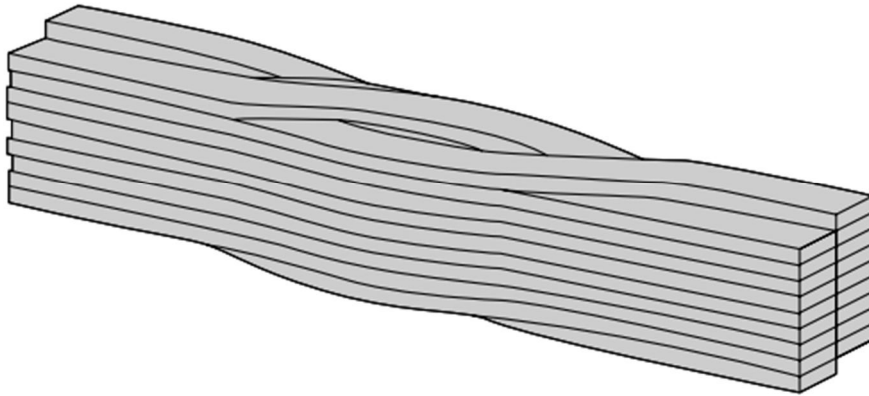


**Kuva 6.** Staattorin käämin poikkileikkaus. (Klempner 2004 s.51)

Staattorin käämit jaetaan kolmeen vaiheeseen, jotka usein kytketään tähteen. Tähtipistettä käytetään generaattorin relesuojauksessa. Kolme vaihetta järjestetään levypaketin uriin niin, että eri vaiheiden jännitepiikkien välille syntyy 120 asteen ero. Yhdessä levysydämen urassa olevaa käämiä kutsutaan staattorisauvaksi. Jokaista vaihdetta kohden on useampi staattorisauva, jotka kytketään sarjaan tai rinnan, tai niiden yhdistelmään riippuen generaattorista. Staattorikäämin virta on isoissa generaattoreissa yli tuhat ampeeria, jolloin käämin pinta-ala on oltava suuri. Staattorikäämien suuri kuormitusvirta aiheuttaa virtalämpöhäviöitä. Käämiuran päällimmäinen käämi tuottaa enemmän virtalämpöhäviöitä kuin uran pohjalla oleva käämi, koska päällimmäiseen käämiin kohdistuu suurempi magneettikenttä kuin alimpaan. Välttääkseen pyörrevirtoja käämi ei koostu yhdestä kuparikiskosta vaan useasta, toisistaan eristetyistä säikeistä. Vaikka säikeet on eristetty toisistaan, ne kytketään käämin päässä yhteen. Yhteenkytkennän takia pyörrevirrat pääsevät kulkemaan käämissä. Pyörrevirtaa pyritään estämään Roebel-sauvan avulla, jossa

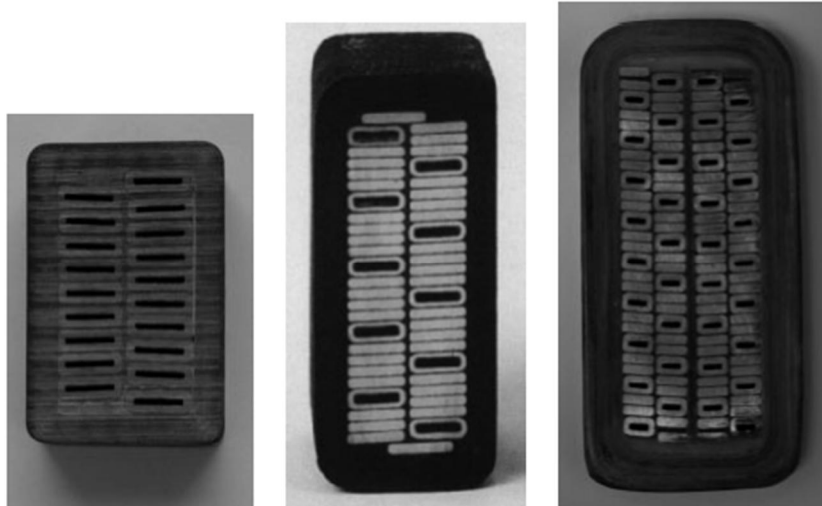


säie lähtee käämin päästä alhaalta, käy uran yläosassa ja palaa takaisin alas. (Klempner 2004 s.51–54)



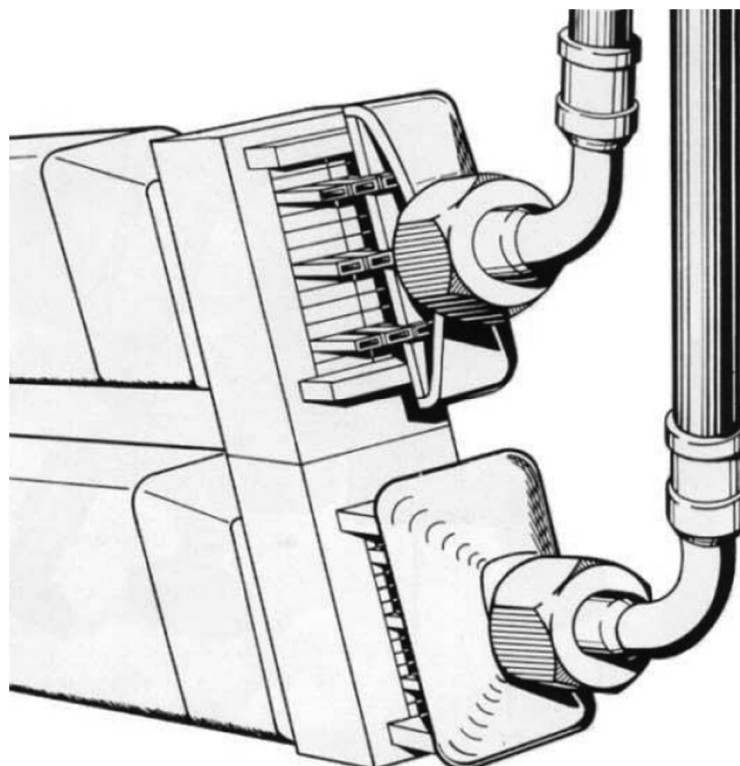
**Kuva 7.** Roebel sauva. (Klempner 2004 s.54)

Staattorin käämin suunnittelussa voidaan käyttää monia eri rakenteita, ja usein rakenteelliset erot johtuvat generaattorin tehosta ja tavasta, jolla generaattoria jäähdytetään. Jäähdytyksen avulla voidaan pitää generaattorin fyysinen koko pienempänä, vaikka teho kasvaisi. Perinteisesti jäähdytetyn generaattorin staattorinkäämi on tehty yhdestä umpikappaleesta. Umpikäämiin syntynyt lämpö pääsee siirtymään johtumisen välityksellä käämin eristykseen, ja siitä eteenpäin levypakettiin. Kyseinen jäähdytystapa rajoittaa merkittävästi generaattorin kokoa. Kaasujäähdytteisessä generaattorissa jäähdytyskaasu pääsee kiertämään käämiä, jolloin voidaan generaattorin tehoa kasvattaa. Vesijäähdytteisessä käämissä kiertää käämin sisällä jäähdytysvesi. Kuparikäämi valmistetaan rakenteeltaan ontoksi ja ontion käämin sisällä kulkee jäähdytysvesi. Käämin sisällä olevat erilliset kiinteät ja ontot kuparisäikeet on eristetty toisistaan. Vesijäähdytteisen käämin rakenne riippuu valmistajasta. Kuvassa 8 on esitetty erilaisia vesijäähdytteisiä käämimalleja. Generaattorin suunnittelussa otetaan huomioon haluttu teho, jonka avulla määritetään millainen käämitys ja miten käämin jäähdytys toteutetaan. (Klempner 2004 s.55)



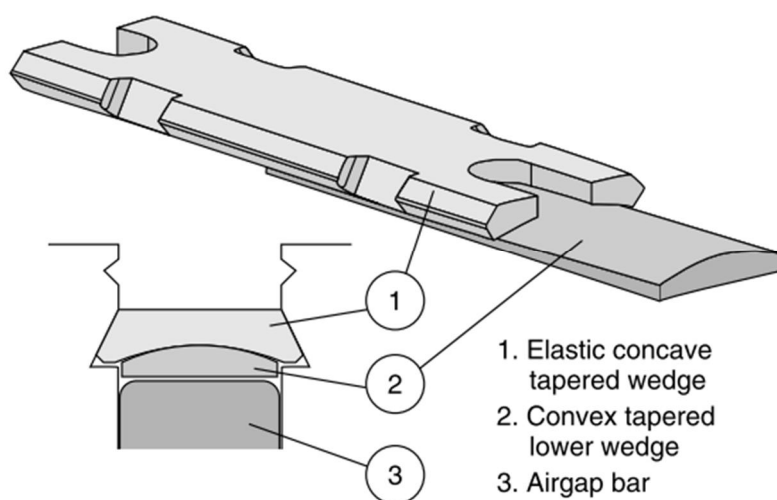
**Kuva 8.** Poikkileikkaus vesijäähdytetystä staattorikämmistä. (Klempner 2004 s.56)

Vesijäähdytteisessä staattorikämmissä voidaan käyttää kuparia virran kuljettamiseen, ja ruostumattomasta teräksestä valmistettuja onttoja säikeitä jäähdytysveden kuljettamiseen. Kyseisellä ratkaisulla päästään eroon kuparin korroosiosta, ja sen käämiä heikentävästä vaikutuksesta. Kuvassa 9 on kuva kääminpäädystä ja jäähdytysvesiliitoksesta.



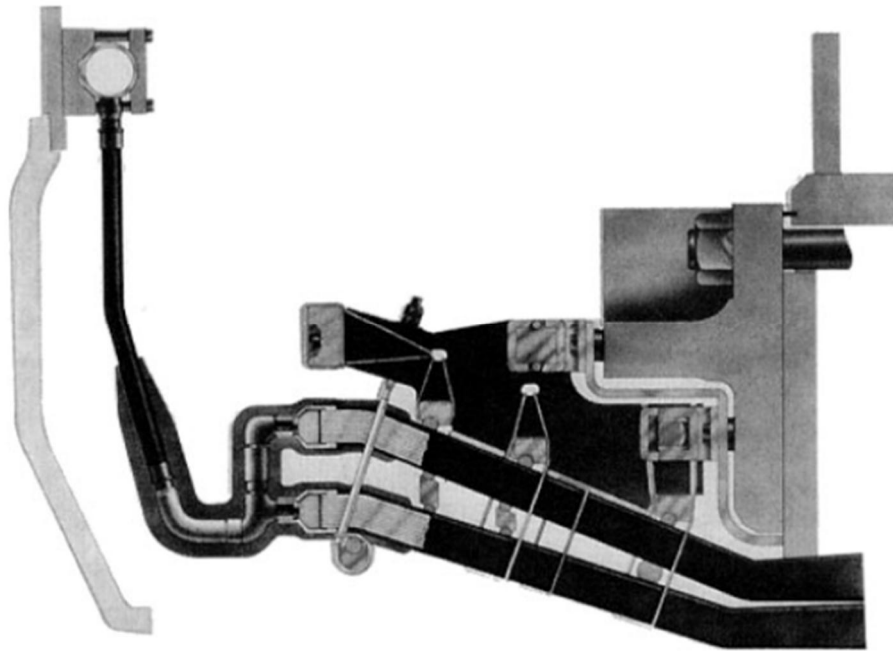
**Kuva 9.** Staattorinkäämin jäähdytysvesiliitin. (Klempner 2004 s.57)

Käämin eristyksen tarkoituksena on pitää käämi ja staattorin levypaketti toisistaan erillään, sekä pitää käämit toisiinsa nähden erillään. Eristyksen tulee kestää koko generaattorin eliniän staattorissa oleva pääjännite, sekä kestää tietty määrä ylijännitettä. Käämit tulee asentaa tiukasti staattorissa oleviin uriin, sillä käämien liikkuminen voi vahingoittaa eristyksiä. Staattorinkäämit saadaan tiukasti levypaketissa olevaan uraan kiilojen avulla. Kiiloja on olemassa valmistajasta riippuen erilaisia, mutta kiilojen tarkoituksena on pitää käämit paikoillaan, ja estää niiden värähtely. Kiilojen täytyy kestää värähtelyn lisäksi lämpötilan vaihtelusta johtuvat laajentumiset. Kiilojen tiukkuus tarkistetaan generaattorirevision yhteydessä. (Klempner 2004 s.58-60)



**Kuva 10.** Kiilan rakenne. (Klempner 2004 s.60)

Generaattorin käämityksen päät joutuvat kovien voimien vaikutuksen alaiseksi. Tämän takia käämien päät tulee olla tuettu tiukasti. Käämin päät tuetaan eristetyillä materiaaleilla mahdollisimman tiukaksi paketiksi, jotta värähtelyjä ei pääse syntymään. Aksiaalissuunnassa käämien tulee kuitenkin päästä liikkumaan lämpölaajenemisen takia. Vaiheiden välinen oikosulku aiheuttaa suurimman voiman kääminpäihin. Kääminpäiden tuennan suunnittelussa otetaan huomioon käämien käytön aikana kokemat mekaaniset voimat. Kääminpäiden tuenta tarkastetaan generaattorirevision yhteydessä. Kuvassa 11 on esitetty sivustakatsottuna kääminpäiden tuennasta periaatekuva. (Klempner 2004 s.60)



**Kuva 11.** Kääminpäiden tuenta. (Klempner 2004 s.61)

Generaattorissa tuotettu teho siirretään generaattorista ulos läpivientien kautta. Läpiviennit kiinnittyvät generaattorin sisällä käämin päihin ja ulkopuolella kiskostoon, joka on kytketty nostomuuntajaan. Pienemmissä generaattoreissa on kiskoston sijaan kaapelikytkentä läpiviennistä nostomuuntajaan. Läpivientien tulee kestää sama jännitetaso kuin staattorikäämin ja ne pinnoitetaan eristemateriaalilla. Läpiviennin kautta kulkeva virta lämmittää läpivientä, ja sen takia isoimmissa generaattoreissa läpiviennit ovat jäähdytettyjä. Vetyjäähdytteisessä generaattorissa läpiviennin sisällä kulkee jäähdyttävä vety. Läpivientä voidaan myös jäähdyttää samalla vedellä, joka kiertää staattorin käämissä. Vetyjäähdytteisessä generaattorissa tulee olla tarkka läpiviennin tiiveyden kanssa. Generaattorin ollessa kolmivaiheinen ja tähteen kytketty, on läpivientejä sen seurauksena kuusi kappaletta. Käämien tähtipiste tuodaan ulos generaattorin rungosta samanlaisilla läpivieneillä kuin virtapiiritkin. Läpivienneistä mitataan generaattorinvirta virtamuuntajien avulla. (Klempner 2004 s.63–64)



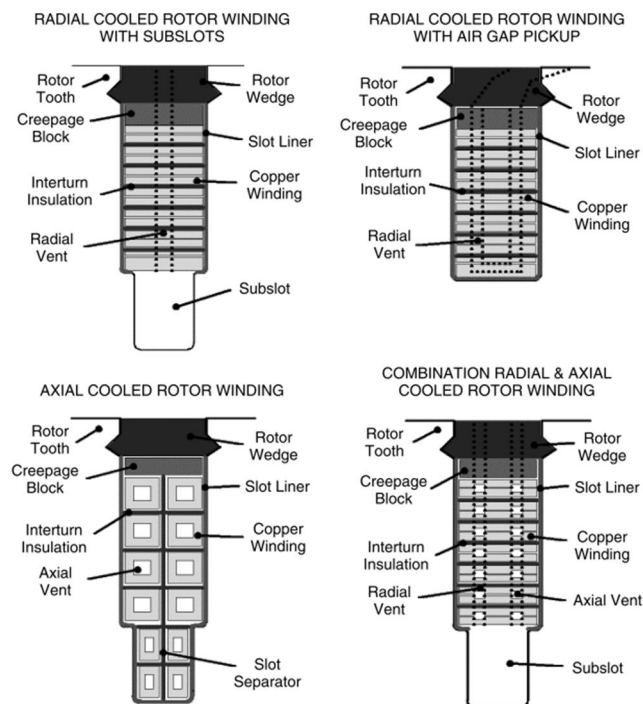
**Kuva 12.** Generaattorin läpiviennit. (Klempner 2004 s.64)

### **3.2 Roottori**

Roottorinrunko valmistetaan normaalisti yhdestä kokonaisesta metallikappaleesta. Aikaisemmin on ollut valmistajia, joiden roottorin runko on koottu kahdesta kappaleesta. Metallityöstövälineistön kehittyessä yhdestä osasta valmistettu roottorinrunko on nykyään yleisin valmistusrakenne. Roottorinrunko valmistetaan teräksestä, jonka on kestävä roottorille käytön aikana kohdistuvat mekaaniset rasitukset, sekä lämpötilan muutoksesta aiheutuvat voimat. Lisäksi roottorinrunnon on kestävä käämien aiheuttama paino. 2 napaisen roottorin suunnittelusta tekee erityisen haastavaa roottorin pituus nähden halkaisijaan. Roottori on halkaisijaltaan kapea, mutta voi olla pituudeltaan useita metrejä. Ongelmaksi tulee suurella nopeudella pyörivän roottorin tasapainotus. Tasapainotuksessa haasteellista on lämpötilan aiheuttamat laajenemiset ja liikkuminen. Roottorin runkoon liitetään muut komponentit, joiden avulla saavutetaan roottorin käyttötarkoitus. Roottorin runkoon liitetään käämiurat, akselit kannatin laakereille, akseli tiivistelaakerille, magnetoinnin liukurenkaat tai pyörivä diodisilta ja kytkin, joka kiinnitetään turbiinin akseliin. Käämiuriin asennetaan roottorin eristetyt käämit, jotka kiristetään uriin kiilojen

avulla. Kääminpäät tuetaan kapoilla, ja roottorin runkoon asennetaan tasapainotuspälsäset, sekä roottorin tuuletussiivet. Roottorin rungon keskikohtaan on aikaisemmin porattu koko roottorin pituudelta reikä. Reiän porauksella saatiin poistettua materiaalista heikko kohta, joka piti sisällään epäpuhtauksia ja huokoista materiaalia. Toinen syy poraukseen oli mahdollisuus tarkastaa roottorin rakenteen kunto ultraäänellä. Nykyisen kehittyneellä materiaalin työstölaitteistoilla, ei roottoriin tarvitse tehdä porausta koko roottorin pituussuunnassa. (Klempner 2004 s.64-67)

Roottorin käämit valmistetaan kuparilatasta, ja ne asetetaan roottorissa oleviin käämiuriin. 2-napaisessa roottorissa on käämit jaettu kahteen symmetriseen aseteltuun ryhmään. Roottorin käämin rakenne vaihtelee valmistajasta ja roottorin koosta riippuen. Suuremmissa roottoreissa jäähdyttävänä väliaineena toimii vety ja pienissä roottoreissa ilma. Aksiaalissuunnassa jäähdytetyssä käämirakenteessa jäähdytys vety tai ilma kulkee roottorin päistä käämin sisään, ja kuuma vety poistuu keskeltä roottoria. Säteittäin jäähdytetyssä käämissä, käämin alapuolella on jäähdytysilman kulkuaukko, josta jäähdyttävä aine pääsee virtaamaan. Kolmannessa mallissa ilmaväliin johtuu käämistä lämpö ja roottorin puhaltimet kuljettavat lämmenneen jäähdytysaineen jäähdyttimeen. (Klempner 2004 s.68-70)



**Kuva 13.** Poikkileikkaus roottorin käämimalleista. (Klempner 2004 s.69)

Käämit pidetään paikoillaan kiilojen avulla, aivan kuten staattorin käämitkin. Roottorin kiilat joutuvat kuitenkin kovemmalle rasitukselle keskipakoisvoiman takia kuin staattorissa olevat kiilat. Kiilojen tiukkuudessa on otettava huomioon lämpölaajenemisesta johtuva käämien liikkuminen. Kiiloissa voi olla jäähditysreikiä, joiden lävitse käämi pääsee jäähtymään. Reiät kuitenkin heikentävät kiilojen mekaanista lujuuutta. Kiilat voivat vanhentua ja löystyä liian suuren lämmön vaikutuksesta. Kiilamateriaalina käytetään alumiinia tai messinkiä. Roottorin päissä kääminpäät pidetään erillään toisistaan eristyspalojen avulla. Käämien päästessä osumaan yhteen, syntyy roottorissa kierrossulkuja. Kääminpäitä tukevat kavat, jotka pitävät kääminpäät paikoillaan niiden kokemasta suuresta keskipakoisvoimasta riippumatta. Kavat joutuvat nimelliskierroksilla kovalle rasitukselle, ja niiden suunnittelussa on otettava huomioon mahdolliset ylikierrokset, jotka kappojen on kestettävä. Kappojen materiaali on nykyään 18Mn-18Cr, joka kestää mekaanisia rasituksia, eikä ole niin herkkä kosteudelle kuin aikaisemmin 18Mn-5Cr materiaalista valmistetut kavat, joita on käytönaikana rikkoutunut. (Klempner 2004 s.72-77)

Generaattorin roottori liitetään turbiinin akseliin kytkimen avulla. Kytkimen puolikas on kuumasovitettu roottorin akselin päälle. Kytkimeen on usein liitetty hammastus, johon voidaan kytkeä roottorin paaksaus moottori. Hammastuksesta voidaan mitata akselin pyörimisnopeus. Roottoria pyöritetään hiljaa sen jälkeen kun turbogeneraattori on ajettu alas. Pyöritystä jatketaan niin kauan kunnes turbogeneraattori on jäähtynyt. Paaksia käytetään turbogeneraattorin pyörittämiseen myös ennen käynnistystä, jonka avulla voidaan välttää äkilliset vääntömomentit. (Klempner 2004 s.79-81)

### **3.3 Laakerit**

Generaattorin roottori pyörii liukulaakereiden varassa. Roottorin ollessa paikoillaan, makaa se liukulaakerin pintaa vasten. Turbogeneraattorin apujärjestelmiin kuuluvalla nostoöljypumpulla liukulaakerin ja roottorin akselin väliin syötetään öljyä, joka nostaa roottorin irti laakerin metallipinnasta. Liukulaakerissa laakeripinnan ja akselin välissä on öljykalvo, jonka tehtävänä on poistaa kitka akselin ja laakerin väliltä. Normaalisti generaattorin roottori laakeroidaan pelkästään molemmista päistä generaattoria. Kuitenkin

joissakin roottorimalleissa liukurenkaat ovat niin pitkät, että joudutaan lisäämään kolmas laakeri magnetointilaitteiston ulkopuolelle. Laakerin runko on valmistettu kahdesta osasta. Laakerin runko asennetaan valmistajasta riippuen joko omalle pedille, tai generaattorin päätykilpiin. Laakeri eristetään generaattorin rungosta eristyspalojen avulla. Eristyksen tarkoituksena on estää vikavirtojen kulkeutuminen laakeriin, ja sitä kautta vaikuttaa heikentävästi laakereiden liukupintaan. Laakerinrunko valmistetaan valumetallista ja liukupinnat päällystetään usein valkometallilla. Roottorin pyöriessä voiteluöljyn puuttuminen aiheuttaa tilanteen, jossa roottorin akseli osuu laakerin liukupintaan. Valkometallin avulla saadaan kosketuksesta aiheutuva vaurio laakerin pintaan, jolloin roottorin akseli säilyy vahingoittumattomana. Laakeriin voidaan valaa valkometalli uudestaan. Laakereiden kuntoa valvotaan käytönaikana lämpötilamittausten ja värähtelymittausten avulla. Roottorin linjausta voidaan joutua muuttamaan generaattorin avauksen jälkeen. Usein roottorin linjausta muutetaan muuttamalla laakeripukkien alla olevien simmileyvyjen määrää. (Klempner 2004 s.81)

#### **4 TAHTIGENERAATTORI**

Tahtigeneraattori muuttaa voimakoneen antaman mekaanisen tehon sähköksi. Voimalaitoksissa käytettyjä voimakoneita ovat vesi-, höyry- tai kaasuturbiineita. Varavoimalaitoksissa käytetään dieselvoimakoneita sähköntuotantoon. Eri voimakoneet vaikuttavat tahtigeneraattorin mekaaniseen rakenteeseen. (Aura 1996 s.215)

Vesivoimalaitoksen generaattori on pystyakselikone. Pystyakselilla saadaan käytettyä rakennustila paremmin hyväksi kuin vaaka-akselikoneella. Vesivoimalaitoksen generaattorit ovat malliltaan avo- eli varsinapakoneita. Generaattorin ominaisuuksiin vesivoimassa kuuluu pieni pyörimisnopeus, joka tyypillisesti on noin 75-500rpm 50Hz:n taajuudella. Akselisuunnassa vesivoimageneraattorit ovat lyhyitä, mutta generaattoreiden halkaisijat ovat suuria. Kyseisellä rakenteella saavutetaan suuri hitausmomentti, jonka avulla generaattori vaimentaa tehon heilahteluja hyvin. (Aura 1996 s.215)

Höyry- ja kaasuturbiinivoimalaitosten generaattoreiden pyörimisnopeus on usein 3000rpm. Suuren pyörimisnopeuden takia generaattori roottorin on halkaisijaltaan pieni, jotta



kehänopeus ei kasva liian suureksi. Akselin suuntaisesti generaattorit ovat pitkiä verrattuna vesivoimakoneisiin. Höyry- ja kaasuturbiinivoimalaitosten generaattorit ovat malliltaan umpinapakoneita. (Aura 1996 s.215)

Tahtigeneraattorin synnyttämään taajuuteen vaikuttaa generaattorin pyörimisnopeus ja generaattorin napapariluku. Pienimillä nopeuksilla pyörivällä generaattorilla saavutetaan 50Hz taajuus suurentamalla napaparilukua. (Aura 1996 s.215)

$$n = \frac{f}{p} \quad \text{eli} \quad n = \frac{60 \cdot f / \text{Hz}}{p} \frac{r}{\text{min}} \quad (1)$$

jossa

$n$  pyörimisnopeus

$f$  taajuus

$p$  generaattorin napapariluku

#### 4.1 Tyhjäkäynti

Tahtigeneraattori toimii tyhjäkäynnissä silloin, kun staattorin virta  $I$  on nolla. Generaattori saadaan magnetoitua roottoriin sijoitetun magnetointikäätymyksen avulla. Käätymykseen johdetaan magnetoimisvirta  $I_r$ , joka on tasavirtaa. Magnetoimisvirta synnyttää roottoriin nähden paikallaan pysyvän magneettivuon, jota kutsutaan päävuoksi. Generaattorin roottoria pyörittäessä voimakoneella muuttuu staattorikäätymä lävistävä päävuoksi ajallisesti näihin staattorikäätymiin nähden. Syntyy sinimuotoinen jännite, jota kutsutaan päälähdäjännitteeksi. (Aura 1996 s.216)

$$E_{mv} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_k f N \Phi_m \approx 4,44 \cdot f_k f N \Phi_m \quad (2)$$

jossa

$f_k$  käämityskerroin

$f$  taajuus

$N$  staattorin vaihekäämin sarjaan kytketyt johdinkierrokset

$\Phi_m$  yhden magneettinavan päävuuo, joka on sama kuin staattorivyyhden huippuvuo  $\hat{\varphi}_m$

Generaattorin päälähdejännitteen sinimuotoisuuteen vaikuttaa magneettikentän muoto ja oikein valittu staattorikäänitys. Avonapakoneissa magneettikentän muotoon, eli magneettivuon tiheyden muuttamiseen koneen ilmapälissä, voidaan vaikuttaa magneettinavan napakengän kaaren muodolla. Umpinapakoneissa sinimuotoon voidaan vaikuttaa muuttamalla roottorin magnetomotorista voimaa, jonka päävuuo aiheuttaa. Magneettikentän muotoilulla ei pelkästään saavuteta staattorijännitteen sinimuotoisuutta, vaan sen lisäksi on staattorikäänitys valittava sopivaksi. Staattorikäänitys valmistetaan niin, että yliaaltojen käänityskertoimet ovat häviävän pieniä, jolloin ainoastaan perusaalto indusoi smj:n. (Aura 1996 s.216–217)

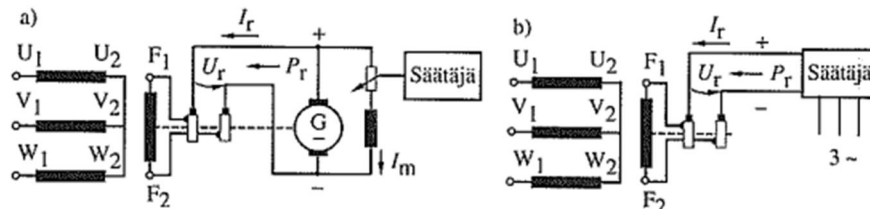
Tahtigeneraattorin päälähdejännitteen kaavasta 2, kaikki jännitteeseen vaikuttavat tekijät ovat valmiissa koneessa vakioita, paitsi päävuuo  $\Phi_m$ . Tyhjäkäynnissä generaattorille asetetaan magnetoimisvirta  $I_{r0}$  niin, että generaattorin kehittämä päälähdejännite  $E_{mv}$  on yhtä suuri kuin nimellinen liitinjännite  $U_{nV}$  taajuuden ollessa nimellistaajuus. Tyhjäkäyntimagnetointia kutsutaan tahtikoneen tyhjäkäynnin perusmagnetoinniksi. Suurjännitegeneraattoreissa saattaa jäännösvuo  $\Phi_r$  synnyttää suuren jännitteen staattorikäämiin, vaikka magnetoimisvirta  $I_r$  olisi nolla. (Aura 1996 s.217)

## 4.2 Magnetointimenetelmät

Tahtigeneraattoriin synnytetään tasavirralla päävuuo, joko roottorin mukana pyöriessä synnyttää staattorikäänitykseen päälähdejännitteen. Generaattorit jaetaan kahteen ryhmään magnetoinnin perusteella, joko harjallisiin tai harjattomiin. (Aura 1996 s.217)

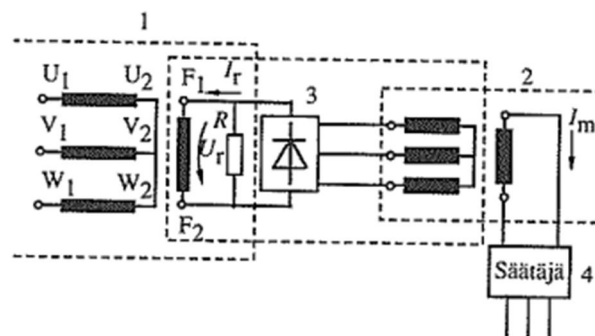
Harjallisessa magnetoinnissa magnetoimisvirta tuodaan roottorin käämien liukurenkaille hiiliharjoilla. Magnetoimisteho otetaan joko ulkoisesta tasasähkölähteestä, tai vaihtosähkölähteestä. Pääkoneessa voi olla samalla akselille sijoitettu magnetointigeneraattori, joka toimii tasasähkölähteenä. Pääkoneen magnetointisäätö tapahtuu tällöin säätämällä magnetoimisgeneraattorin magnetoimisvirtaa  $I_m$ , jolloin magnetointigeneraattorin synnyttämä jännite  $U_r$  muuttuu samalla muuttaen pääkoneen magnetoimisvirtaa  $I_r$ . Pääkoneen magnetointi voidaan ottaa myös vaihtosähkölähteestä,

jolloin magnetoinnin tehonlähteenä toimii joko ulkoinen sähkölähde, tai itse pääkone. Vaihtosähkölähteestä otettu magneointiteho tasasuunnataan ja säätäjän avulla säädetään magneointivirtaa  $I_r$ . (Aura 1996 s.218)



**Kuva 14.** Harjallinen magneointi, a) Magneointi tasasähkölähteestä, b) magneointi vaihtosähkölähteestä. (Aura 1996 s.218)

Harjattomassa generaattorissa pääkoneen akselilla on erillinen ulkonapainen vaihtosähkögeneraattori magneointikoneena. Ulkonapakoneessa magneettinavat ovat staattorissa, ja käämitys johon lähdejännite indusoituu, on roottorissa. Magneointigeneraattorin synnyttämä vaihtojännite tasasuunnataan roottorissa olevalla pyörivällä diodisillalla. Syntynyt tasajännite vaikuttaa pääkoneen roottorin magnetoimiskäämiin syöttäen siihen magnetoimisvirran  $I_r$ . Pääkoneen magnetoinnin säätö tapahtuu samalla tavalla kuin harjallisessa magneoinnissa, säätämällä magnetoimisgeneraattorin magnetoimisvirtaa  $I_m$ . Kuvassa 15 on esitetty harjattoman tahtikoneen magneointi laitteistoa. Kuvassa oleva numero 1 esittää pääkonetta, numero 2 magneointikonetta, numero 3 diodisiltaa ja numero 4 säätäjää. (Aura 1996 s.217–218)

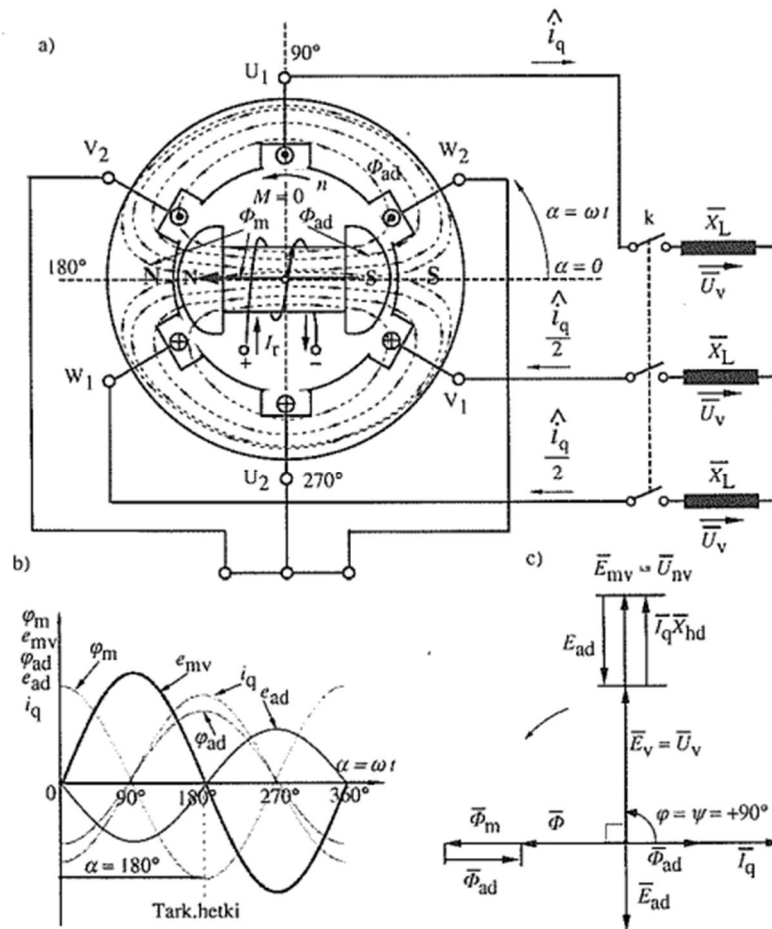


**Kuva 15.** Harjaton magneointi. (Aura 1996 s.219)

### 4.3 Kuormitettu generaattori

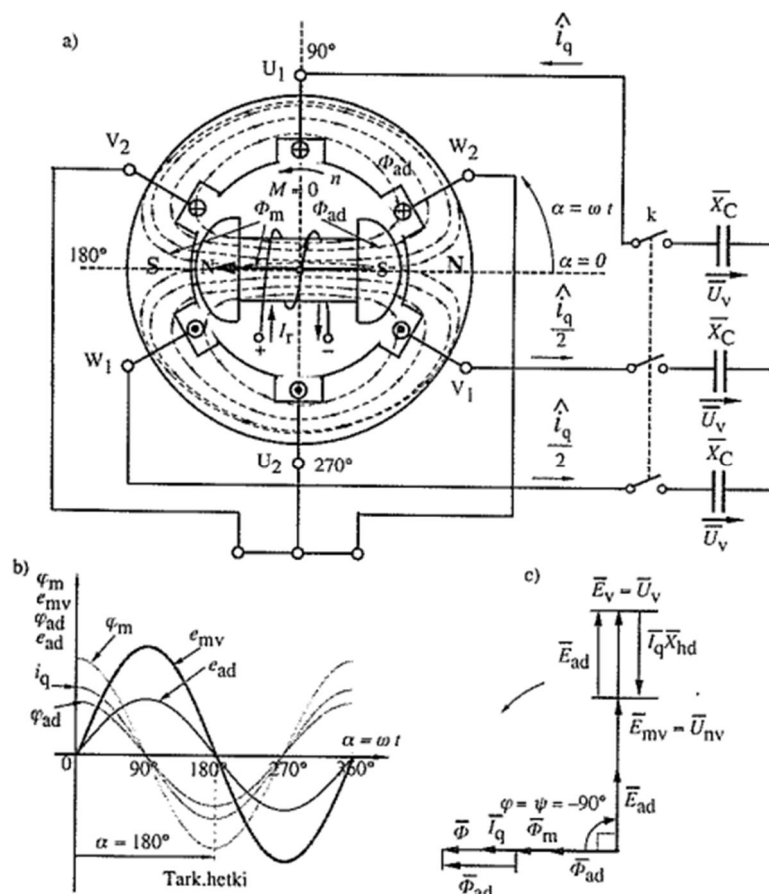
Generaattoria voidaan kuormittaa Induktiivisella, kapasitiivisella, resistiivisellä ja sekakuormalla. Kuormien muutokset vaikuttavat generaattorin toimintaan eritavalla. Yksikertaisin tapa tutkia erikuormien vaikutuksia generaattoriin on tutkia 2-napaista avonapageneraattoria. (Aura 1996 s.219)

Tutkiessa tilannetta jossa päälähdejännite aiheuttaa staattorivirran, joka on pelkästään induktiivista loisvirtaa, staattorin kuormitusvirta synnyttää staattorivuon  $\varphi_{ad}$ , joka on samanvaiheinen virtansa kanssa. Magneettikenttää nimitetään ankkurikentäksi, ja ankkurivirran vaikutuksia ankkurireaktioksi. Kolmivaiheinen vaihtovirta synnyttää kolmivaihekäämissä vakiona pysyvän ja vakionopeudella pyörivän magneettikentän, joka on kohtisuorassa sen käämin tasoa vastaan, jonka virta on huipussaan. Kuormitetussa generaattorissa on kaksi magneettikenttää, napakäämin magnetoimisvirran synnyttämä pääkenttä  $\Phi_m$  ja staattorin kuormitusvirran synnyttämä ankkurikenttä  $\Phi_a$ . Molemmat magneettikentät pyörivät tahdissa. Induktiivinen loisvirta synnyttää napapyörään nähden pitkittäisen, ja päävuolle vastakkaisen ankkurivuon. Syntyvää ankkurivuota kutsutaan pitkittäiseksi vastakentäksi. Induktiivinen loisvirta magnetoimii magnetoimisvirran synnyttämää päävuota vastaan, pienentäen ankkurireaktiollaan resuloivan lähdejännitteen päälähdejännitettä pienemmäksi. Mikäli jännitettä pidetään vakiona, on syntynyt jännitteen alenema kumottava magnetoimalla konetta yli perusmagnetoinnin. Ylimagnetoinnilla pidetään jännite nimellisarvossaan, mikäli kuormitusvirta on induktiivista. Induktiivinen loisvirta ei aiheuta sähköistä vääntömomenttia ilmaväliin, koska napapyörän pääkentän  $\Phi_m$  ja induktiivisen kuormitusvirran pitkittäisen ankkurikentän  $\Phi_{ad}$  samannimiset navat ovat kohdakkain. (Aura 1996 s.219–221)



**Kuva 16.** Induktiivinen kuorma. (Aura 1996 s.220)

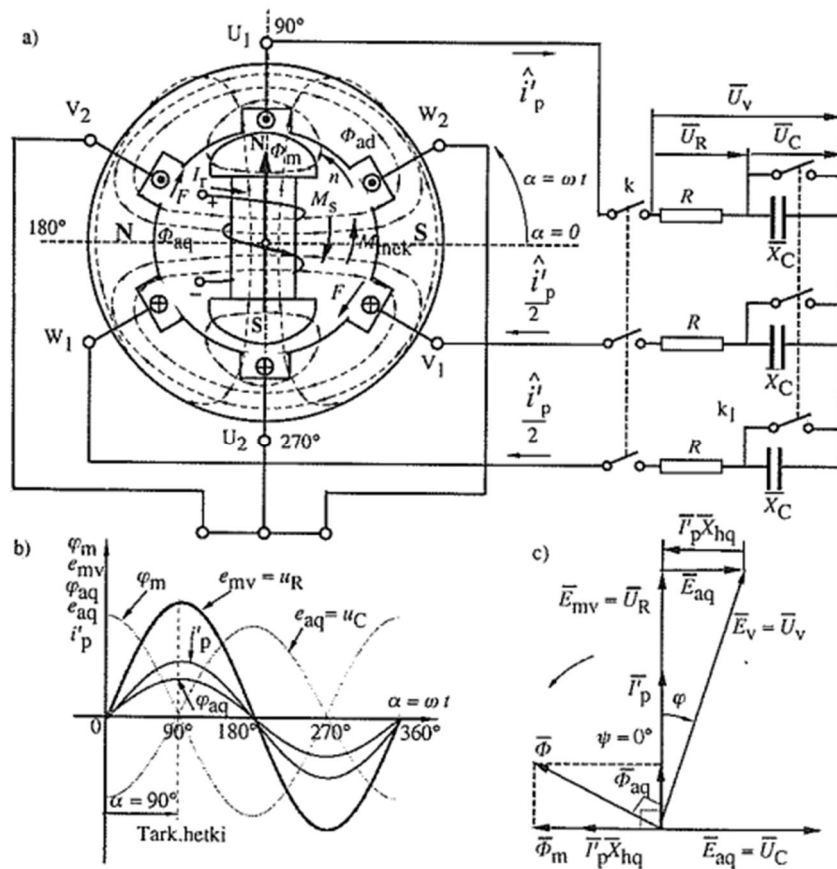
Kapasitiivisesti kuormitetun generaattorin virta on vastakkaisuuntainen induktiiviseen virtaan verrattaessa. Kapasitiivinen loisvirta synnyttää napapyörään nähden pitkittäisen ja päävuolle myötäisen ankkurivuon. Tällöin kapasitiivinen magnetoimisvirta magnetoimismavirran kanssa samaan suuntaan, aiheuttaen lähdejännitteen suurenemisen. Mikäli jännitettä halutaan pitää vakiona, on magnetoimisvirtaa pienettävä alle perusmagnetoinnin. Mitä suurempi on generaattorin kapasitiivinen kuormitusvirta, sitä enemmän konetta on alimagnetoitava. Kapasitiivinen kuormitusvirta ei aiheuta eroa voimakoneen vääntömomenttiin. (Aura 1996 s.222–224)



**Kuva 17.** Kapasiitiivinen kuorma. (Aura 1996 s.223)

Resistiivisesti kuormitetussa koneessa päälähdejännite ja kuormitusvirta ovat ajallisesti samanvaiheiset, jolloin sisäinen vaihesiirtokulma on nolla. Saavuttaakseen resistiivisen kuorman, on kuorman kanssa kytkettävä sarjaan sellainen kondensaattori, jonka reaktanssi on yhtä suuri kuin generaattorin reaktanssi. Tällöin käytetään sarja- eli jännitekompensointia, jossa staattorijännite kompensoi generaattorin reaktanssin jännitteen. Resistiivisen kuorman tilannetta voidaan tarkastella tyhjäkäyntitilanteessa, jossa katkaisija on auki. Vaihekulmaksi valitaan  $0^\circ$ , jolloin N-napa on oikealla ja S-napa on vasemmalla. Suljettaessa katkaisija k, päälähdejännite syöttää R:n ja C:n sarjaan kytketään virran, joka on päälähdejännitteen kanssa samassa vaiheessa. Syntyy ankkurivuo  $\varphi_{aq}$ , joka on virran kanssa samanvaiheinen, mutta päävuosta jäljessä  $90^\circ$ . U vaihekäämin virran ollessa huippuarvossaan ja napapyörän vaihekulman ollessa  $90^\circ$ , staattorin kolmivaiheisen virran synnyttämä magneettikenttä on napapyörään nähden poikittainen. Resistiivinen kuormitusvirta synnyttää napapyörään nähden ja päävuolle poikittaisen ankkurikentän.

Poikittainen ankkurikenttä pyörii tahdissa napapyörän kanssa, ja indusoi staattorin vaihekäämeihin jännitteen, joka jää vuosta jälkeen  $90^\circ$ . Resistiivisesti kuormitetun generaattorin kuormitusvirran muuttaminen aiheuttaa tahtikoneen ilmvälissä sähkövääntömomentin muuttumisen. Siitä johtuen joudutaan säätämään voimakoneen mekaanista vääntömomenttia sellaiseksi, että pyörimisnopeus on nimellinen. Resistiivisen kuorman kuormitusvirtaa muuttaessa magnetoimisvirtaa tarvitsee muuttaa vain vähän, jotta generaattorin liitinjännite pysyy nimellisenä. (Aura 1996 s.224-227)

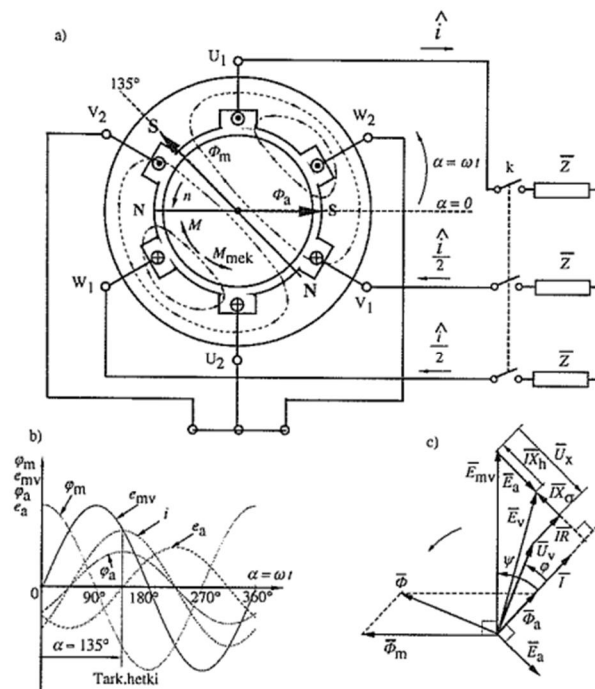


Kuva 18. Resistiivinen kuorma. (Aura 1996 s.225)

#### 4.4 Umpinapaisen tahtigeneraattorin toiminta

Lieriöroottorista tahtigeneraattoria käytetään höyry- ja kaasuturbiinivoimalaitoksissa. Lieriöroottorinen tahtigeneraattori on käytännössä katsoen magneettisesti symmetrinen, koska ilmvälin tasaisuutta rikkoo vain uritus, toisin kuin varsinapaisessa roottorissa. Tällöin koneen toimintaa tarkastellessa ei tarvitse tarkastella pätö- ja loisivirran aiheuttamaa

ankkurireaktiota, koska koneen reluktanssi on pääkenttää nähden sekä pitkittäissuunnassa ja poikittaissuunnassa yhtä suuri. Symmetrisyyden takia staattorin vaihekäämiin ja ankkurivuon magneettipiiriin liittyvä pääreaktanssi on sama. Kuormitusvirran vaikutusta voidaan tarkastella kuvan 19 esimerkin avulla. Tyhjäkäyntitilanteessa jossa katkaisija  $k$  on auki, on ankkuri virraton ja päävuo indusoi ankkurin vaihekäämeihin päälähdejännitteen. Suljettaessa katkaisijan päälähdejännite syöttää staattorivirtapiiriin virran  $i$ , jonka vaihesiirto oletetaan induktiiviseksi. Kuormitusvirta synnyttää ankkurivuon, joka on virran kanssa samanvaiheinen. Kolmivaihevirran rezultoiva ankkurikenttä  $\Phi_a$  on vakiona pysyvä pyörien napapyörän kanssa tahdissa. Pyörivä ankkurivuo indusoi paikoillaan oleviin ankkurin vaihekäämeihin oman lähdejännitteen. Valittaessa tarkasteluhetken, jolloin U-vaihekäämin virta on huippuarviossaan, tällöin staattorivaihekäämin yhdessä synnyttämä ankkurikenttä  $\Phi_a$  on kohtisuorassa U-vaihekäämin tasoa vastaan. Ankkurikenttää jarruttaa pääkentän pyörimistä sähkövääntömomentilla, jota voimakone ylläpitää mekaanisella momentilla. Ankkurikenttä seuraa pääkenttää samalla nopeudella tahdissa, mutta pyörimisnopeus ja taajuus muuttuvat, ellei voimakoneen vääntömomentti säädetä sen mukaan miten staattorin pätoehoa muutetaan. (Aura 1996 s.229-231)



**Kuva 19.** Umpinapaisen generaattorin toiminta (Aura 1996 s.231)



## 4.5 Tahdistus verkkoon

Generaattori kytketään jännitteelliseen verkkoon katkaisijan avulla. Katkaisija suljetaan tilanteessa, jossa katkaisijan liittimien välinen jännite on lähes nolla. Kytkevää virtaa on pieni silloin, kun katkaisijan liittimen välinen jännite-ero on mahdollisimman pieni. Jännitteen saamiseksi nollassa, pitää suorittaa tahdistettavalle generaattorille määrättyjä säätöjä. Generaattorille tehtäviä säätötoimenpiteitä kutsutaan tahdistamiseksi.

Katkaisijan molemmin puolin olevien jännitteiden pitää olla itseisarvoltaan ja vaihekulmiltaan yhtä suuret. Tilanteessa, jossa jännitteet ovat toisiinsa nähden vastakkain, sanotaan vaiheiden olevan vaiheoppositiossa. Taajuuden ja kulmataajuuden on oltava katkaisijan molemmin puolin melkein samansuuruisia, silloin jänniteosoittimet ovat riittävän kauan päällekkäin mahdollistaen katkaisijan sulkemisen. Jotta tahdistuksessa jänniteosoittimet pyörisivät samaan suuntaan, on vaihejärjestyksen oltava sama molemmin puolin katkaisijaa. Katkaisijan oikea sulkemiskohta on tilanteessa, jossa jännite on katkaisijan liittimien välillä lähes nolla. Tahdistetun generaattorin jännite asetetaan verkon kanssa samaan arvoon säätämällä magnetoimisvirtaa. Voimakoneen momentti säädetään niin, että generaattorin taajuus on verkon kanssa sama. (Aura 1996 s.232-233)

## 4.6 Pätötehon säätö

Pätövirta aiheuttaa generaattoriin poikittaisen ankkurikentän. Syntynyt ankkurikenttä aiheuttaa voimakoneen mekaaniselle vääntömomentille vastakkaisen sähkövääntömomentin. Mikäli tahdistuksen jälkeen voimakoneen vääntömomenttia lisätään, pyrkii generaattorin pyörimisnopeus suurenemaan. Generaattorin päälähdejännite, muuttuu generaattorin jännitteestä tehokulman verran edelle. Tehokulman takia generaattorin vaihekäämien muodostamaan piiriin syntyy jännite, aiheuttaen piiriin virran. Syntynyt virta on piirin kannalta induktiivista, mutta verkon kannalta pätövirtaa. Mitä suuremmaksi voimakoneen vääntömomentti asetellaan, sitä suuremmaksi tulee tehokulma. Tehokulman suureneminen tarkoittaa suurempaa generaattorin verkkoon syöttämää pätötehoa. Generaattorin pätötehon ja pätövirran pienentyessä, sen sähköinen vääntömomentti pienenee. Voimakoneen vääntömomentti pyrkii lisäämään pyörimisnopeutta ja muuttamaan taajuutta, jolloin säätäjä pienentää voimakoneen

vääntömomenttia vastaamaan generaattorin sähkövääntömomenttia niin, että pyörimisnopeus ja taajuus pysyvät vakiona. Tästä seuraa, että pätötehon säätö generaattorissa tapahtuu säätämällä voimakoneen vääntömomenttia. Perusmagnetoinniksi kutsutaan tilannetta, jossa magnetoimisvirta vastaa pelkkää ulkoista pätövirtaa  $\cos \varphi = 1$ . (Aura 1996 s.234–235)

#### **4.7 Loistehon säätö**

Verkkoon kytketyn generaattorin magnetointivirran muuttaminen ei vaikuta koneen napajännitteeseen. Magnetoimisvirran muutos vaikuttaa tällöin ainoastaan generaattorin loisvirtaan. Generaattoria ylimagnetoitaessa saa generaattori magnetoimisvirtaa yli oman tarpeen. Ylimääräisen magnetoimisvirran generaattori syöttää verkkoon, jolloin syntyy induktiivista loisvirtaa. Alimagnetointi tilanteessa magnetoimisteho ei ole riittävä, ja generaattori joutuu ottamaan puuttuvan tehon verkosta. Verkosta tuleva teho vastaa kapasitiivista tehoa. (Aura 1996 s.236–237) (Pöyhönen 1975 s. 363)

### **5 GENERAATTORIN APUJÄRJESTELMÄT**

Generaattori tarvitsee toimiakseen erilaisia apujärjestelmiä, joiden avulla taataan generaattorin toiminta. Erilaisia apujärjestelmiä ovat voiteluöljyjärjestelmä laakereille, staattorin jäähdytysjärjestelmä, staattorin käämin jäähdytysvesijärjestelmä, vetyjäähdytysjärjestelmä ja magnetointijärjestelmä. Riippuen generaattorin koosta ja valmistajasta, ei kaikkia edellä mainittuja järjestelmiä löydy jokaisesta generaattorista. Pienen kokoluokan generaattori vaatii vähemmän apujärjestelmiä, koska kyseessä on usein vain ilmajäähdytteinen kone. Suuremmissa generaattoreissa apujärjestelmiä on enemmän, koska staattorin käämin sisällä virtaa jäähdytysvesi ja generaattoria jäähdytetään vedyllä. Vetyjäähdytteinen generaattori tulee olla tiivis. Tiiveyden saavuttamiseksi tarvitaan generaattorissa erilliset tiivisteöljylaakerit, joilla vety pidetään generaattorin sisällä.

#### **5.1 Magnetointi**

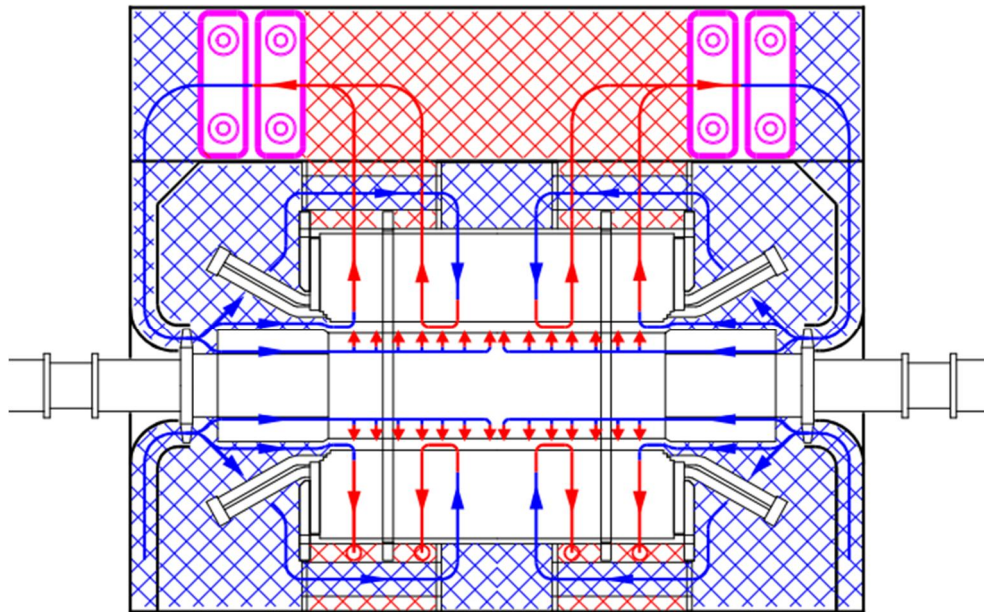
Magnetointiperiaatteet on esitelty 4.2 läpi. Magnetointilaitteistoissa on toimintaperiaatteen lisäksi suuri ero laitteiston määrässä ja koossa. Hiiliharjallinen magnetointilaitteisto

tarvitsee oman magnetointimuuntajansa, ja sitä kautta oman kytkinlähdön keskijännitekojeistosta. Kymijärvi I voimalaitoksen tapauksessa magnetointimuuntajan yläjännite on 6kV ja tasasuuntaajalle menevä alapuolen jännite 1000V. Muuntajan lisäksi laitteisto vaati tasasuuntaajan ja säätäjän, jolla magnetointia ohjataan. Sen lisäksi roottorissa on oltava liukurenkaat ja hiilet, jonka kautta tasasuunnattu sähkö siirretään roottorin käämiin. Hiilellisessä magnetointilaitteistossa on kunnossapidollisia tarpeita enemmän kuin harjattomassa magnetoinnissa. Hiilet tulee tarkistaa viikoittain, samoin liukurenkaiden puhtaus.

Kymijärvi II voimalaitoksen generaattorissa on harjaton magnetointi, jossa roottorin kanssa samalla akselilla on magnetointikone. Magnetointikoneella on oma erillinen staattori, jossa on DC käämitys. Verkosta otettu 400VAC tasasuunnataan ja syötetään magnetointikoneen staattorikäämiin. Roottorin magnetointikoneen kolmivaihekäämiin syntyy vaihtojännite, joka tasasuunnataan roottorissa olevilla diodeilla. Tasasuunnattu sähkö johdetaan roottorin käämiin, ja näin ollen saadaan synnytettyä staattorikäämiin kolmivaiheinen sähkö. Harjattomassa magnetoinnissa ei ole kuluvia liukurenkaita tai hiiliä, joita pitää viikoittain tarkistaa.

## **5.2 Jäähdytys**

Generaattorit ovat jäähdytysperiaatteeltaan joko ilma- tai vetyjäähdytteisiä. Pienemmissä generaattoreissa käytetään ilmajäähdytystä ja suuremmilla generaattoreilla käytetään vetyjäähdytystä, koska generaattorin fyysinen koko kasvaisi liian suureksi. Ilmajäähdytteisessä generaattorissa koneen sisällä kiertää ilma, johon lämpö siirtyy. Generaattorin päällä on lämmönvaihdin, jossa toisella puolella kiertää lämmennyt ilma ja toisella puolella jäähdyttävä järvivesi. Ilmaa kierrätetään generaattorin sisällä roottorin akselilla olevilla puhaltimilla. Valmistajasta riippuen on ilmankierrolle olemassa rakenteellisia eroavaisuuksia. Ilmakierron tarkoituksena on jäähdyttää roottoria sekä staattoria. Kuvassa 20 on esitelty periaatekuva ilmajäähdytteisen generaattorin ilmankierrosta. Kuvassa olevat sinisellä värillä piirretyt nuolet esittää jäähtynyttä ilmaa ja punaiset nuolet generaattorissa kuumentunutta ilmaa. Kuvassa on esitetty violetilla vesikierteiset ilmanjäähdyttimet.



**Kuva 20.** Generaattorin jäähdytysilman kierto. (Siemens AG, 2011)

Generaattoreissa voidaan ilman sijasta käyttää vetyä jäähdytykseen. Vetyjäähdytteisessä generaattorissa kiertää vetyä johon lämpö sitoutuu. Roottorin akselilla olevat puhaltimet kierrättävät vetyä staattorin sisällä. Generaattorin sisällä on erilliset vetyjäähdyttimet, joilla poistetaan vetyyn sitoutunut lämpö. Generaattorin valmistajasta riippuen vetyjäähdyttimet ovat joko pystyssä, jokaisessa generaattorin nurkassa, tai generaattorin sivuilla vaakatasossa. Vetyjäähdyttimen sisällä kiertää järvi-vesi johon lämpö siirtyy. Vetyä käytetään generaattoreissa sen ilmaa paremman lämmönsiirtokyvyn takia, sekä vedyn suuremman jännitelujuuden takia. Vety on lämmönsiirron kannalta erittäin hyvä generaattorin jäähdyttämiseen. Ongelmana on vedyn vaarallisuus, mikäli sitä käytetään väärin. Vetyjärjestelmä on oma laitteistokokonaisuus, joka on eriytetty muista apujärjestelmistä. Normaalisti vety toimitetaan laitokselle pulloilla, joita vaihdetaan aika ajoin. Joissakin tapauksissa laitoksella on oma vedyntuotantolaitteisto. Vetylaitteistoon kuuluvat putkistot, venttiilit ja paineen säätöjärjestelmä. Vedyn puhtaus pidetään yli 97 %, jolloin välttyään tilanteesta jossa voi syntyä räjähdysherkkä seos. Myös vedyn kastepistettä tarkkaillaan, jotta vety ei pääse kondensoitumaan generaattorin sisälle ja aiheuttamaan vahinkoa eristykselle. Vedyn puhtautta valvotaan kaasuanalysaattorin avulla. Revision

jälkeen generaattorin sisällä oleva ilma korvataan ensin hiilidioksidilla. Vasta kun kaikki ilma on korvattu hiilidioksidilla, voidaan aloittaa generaattorin vedyn lisääminen. Ilman kanssa reagoiessa vety voi olla räjähdysherkkä. Näin ollen varmistetaan, että ilma ja vety eivät pääse kosketuksiin. Vetyjäähdytteistä generaattoria valmisteltaessa revisioon korvataan vety ensin hiilidioksidilla. Näin estetään vedyn ja ilman seoksen syntyminen generaattorin sisälle. Käytönaikana automaattinen paineensäädin ylläpitää vedyn painetta generaattorin sisällä. Mikäli vetyä pääsee vuotamaan generaattorista, lisää paineen säädin lisää vetyä. Generaattoria ei saa täysin tiiviiksi ja tietty määrä vetyvuotoa voidaan hyväksyä. Generaattorin valmistaja ilmoittaa sallitut vetyvuodon rajat generaattorille. Rajan ylittyessä on generaattori ajettava alas, poistetaan vety koneesta ja korjattava mahdollinen vuotokohta. (Klempner 2004 s.95–98)



**Kuva 21.** Vetyjäähdyttimiä. (RetubeCo, 2016)

Normaalisti suuremmissa generaattoreissa staattorikämin suorana jäähdytyksenä käytetään staattorikämin sisällä virtaavaa vettä. Staattorin käämissä kierrätetään tislattua vettä, jonka johtavuutta tarkkaillaan. Staattorin käämin jäähdytysvesilaitteisto toimitetaan normaalisti omana pakettina, joka pitää sisällään tarvittavat säiliöt, pumput, lämmönvaihtimet, suodattimet, sekä vesikemian vaatimat laitteistot. Lämmönvaihtimella poistetaan jäähdytysveten johtunut lämpö. Usein lämmönvaihtimen jäähdytysvetenä käytetään voimalaitokselle tulevaa järvivettä. Suodattimien avulla jäähdytysvedestä poistetaan lika, joka veteen on voinut syntyä. Suodattimien avulla jäähdytysvesi pysyy

puhtaana ja voidaan välttää jäähdytysveden virtauksen mahdollinen estyminen. Tärkeintä käämin sisällä virtaavan jäähdytysveden ominaisuuksista on ylläpitää veden alhaista johtokykyä. Normaalisti johtokykyä pyritään pitämään alle 5 $\mu$ S. Veden johtavuuden noustessa yli sallittujen arvojen, voi seurauksena syntyä läpilyönti. Läpilyönti voi syntyä kohdassa, jossa jäähdytysvesi virtaa generaattorin sisällä teflon letkussa. Jäähdytysvedestä seurataan myös sen rauta- ja kuparipitoisuuksia. Normaalisti arvot tulevat olla alle 20ppm, suuremmat pitoisuudet voivat estää veden virtausta. Järjestelmän ollessa tiivis ei vetyjäähdytteisessä generaattorissa vetyä siirry jäähdytysveden sekaan. Mikäli jäähdytysjärjestelmässä on vuotoja, pääsee jäähdytysveden sekaan vetyä, koska vedynpaine on suurempi kuin jäähdytysveden. Veden sekaan päässyt vety poistetaan generaattorin päällä olevasta säiliöstä. Säiliössä on jäähdytysveden pinta ja normaali ilmanpaine, veteen päässyt vety vapautuu ilmaan, josta se voidaan tuulettaa ulos. Säiliössä on myös jäähdytysveden pinnankorkeuden mittaus ja rajat. Jäähdytysveden hapen pitoisuus pyritään pitämään mahdollisimman alhaisena, jolloin korroosiota ei pääse syntymään. Veden pH:n arvo riippuu valmistajasta, mutta yleisesti ottaen pH on joko 7 tai 8,5. Käyttötilanteessa staattorikäimin jäähdytysveden lämpötila pyritään pitämään 35-50° C. (Klempner 2004 s.95-98)

### **5.3 Öljyjärjestelmä**

Voiteluöljyjärjestelmä pitää sisällään turbiinin ja generaattorin laakereiden tarvitseman voiteluöljyn. Vetyjäähdytteisten generaattoreiden tiivisteöljy kuuluu samaan öljyjärjestelmään kuin laakeriöljyt. Normaalisti öljyjärjestelmän huolto ajoittuu turbiinirevision yhteyteen. Voiteluöljyjärjestelmä koostuu öljysäiliöstä, pumpuista, suodattimista, lämmönvaihtimista, öljyseparaattorista ja laitteiston instrumentoinnista. Öljysäiliö sijaitsee usein turbiinin alla, ja on tilavuudeltaan useita kuutioita. Turbiinin valmistajasta riippuen öljypumppu voi olla joko erillinen AC pumppu, tai turbiinin pääakselille sijoitettu pumppu. Turbiininakselille sijoitettu pumppu tarvitsee kuitenkin AC pumpun turbiinin käynnistyksen ajaksi. Normaalisti jokaisella turbiinivalmistajalla on hätä-öljypumppuna akuston perässä oleva tasavirta pumppu, jolla saadaan turbiini ja generaattori ajettua alas mahdollisen sähkökatkon aikana. Öljysäiliöön syntyvä kuumuus poistetaan lämmönvaihtimien avulla, joissa toisella puolella vaihdinta kiertää jäähdytysvesi. Suodattimien avulla öljystä poistetaan likapartikkelit. Karkea suodatin

poistaa suuremmat likapartikkelit. Karkean suodattimen jälkeen on hienommat suodattimet, joilla poistetaan pienemmät likapartikkelit. Öljyseparaattorilla poistetaan öljyn sekaan mahdollisesti muodostunut kosteus, joka aiheuttaa öljyssä voiteluominaisuuden romahtamisen. (Klempner 2004 s.92)

Vetyjäähdytteisessä generaattorissa paineistettu vety pidetään generaattorin sisällä tiivistelaakereiden avulla. Tiivistyksen kannalta vaikein kohta on pyörivän roottorin tiivistäminen. Tiivistäminen tehdään tiivistelaakerin avulla. Laakeriin syötetään paineella tiivisteöljy, joka pitää vedyn generaattorin sisällä. Paineistettu öljy tiivistää roottorin ja tiivistelaakerin välin. Tiivisteöljynä käytetään samaa öljyä kuin turbiinin ja generaattorin laakerin voiteluöljynä. Tiivisteöljy on kuitenkin oma yksikkö, jossa on omat pumput ja vedynpoistojärjestelmä. Tiivisteöljykoneikossa on normaalisti AC pumppu ja varalla akustovarmennettu tasavirtapumppu. Tasavirtapumpulla varmistetaan sähkökatkon yhteydessä vedyn pysyminen generaattorin sisällä. Tiivisteöljyn laskiessa alle tietyn paineen, tasavirtapumppu käynnistyy automaattisesti. Tiivisteöljyn paine pidetään suurempana kuin vedyn paine, jolloin vety ei pääse vuotamaan generaattorista ulos. Tiivisteöljylaitteiston kriittisempiä laitteistoja on kaasunpoistolaitteisto, jolla poistetaan tiivisteöljyn sekaan joutunut vety. Vety poistetaan ruiskuttamalla tiivisteöljy suuttimen lävitse, jolloin öljystä tulee sumua. Sumusta poistuu öljyyn liuennut kaasu. (Ganz)

## **6 KÄYTÖNAIKAINEN KUNNONVALVONTA**

Generaattorin operoimille valmistaja on antanut käyttöarvot, joiden rajoissa generaattoria voidaan käyttää. Generaattorivalmistaja toimittaa konekohtaisen PQ-diagrammin, joka kertoo generaattorin toiminta-alueen. Valmistajan arvoja seurataan generaattorin ollessa verkossa erilaisin sensoreille ja instrumenttimittauksilla. Generaattorin käytön aikaisissa online-mittauksilla voidaan tulkita generaattorin kuntoa ja varmistetaan generaattorin toiminta sallituilla käyttöarvoilla. Generaattoria valvotaan jännite-, virta-, lämpötila- ja värähtelymittauksilla. Mittausten avulla voidaan välttyä, tai pienentää generaattoriin kohdistuvia vaurioita. Käytönaikaisten mittausten lisäksi generaattoreille voidaan suorittaa tiettyjä kunnossapitomittauksia generaattorin ollessa verkossa. Generaattorin anturoinnin määrä vaihtelee riippuen generaattorin koosta ja käyttökohteesta.

## 6.1 Sähköiset parametrit

Generaattorin pätöteho saadaan laskettua staattorin jännitteestä virrasta ja tehokerroimesta.

$$MW = \sqrt{3} \cdot V_t \cdot I_a \cdot PF \quad (3)$$

jossa

$V_t$  pääjännite

$I_a$  virta

$PF$  tehokerroin

Generaattorin pätötehoa valvotaan, jotta generaattori ei ajaudu ylikuormalle. Generaattorin ajautuminen ylikuormalle johtuu staattorin virran rajoittimen toimimattomuudesta, tai staattorin jännitteen nousemisesta. Edellä mainitut tilanteet huomaa generaattorin suojareleistys, joka lopulta ajaa generaattorin alas. Generaattorin ylikuorma vahingoittaa käämejä ja niiden eristystä. Pätötehon lisäksi generaattorin loistehoa valvotaan. Loistehon arvo muuttuu roottorin virran myötä. Generaattorin ylittäessä loistehoarvonsa, on roottorin virransäätö viallinen. Roottorin virran kasvaessa liian suureksi, roottorin käämit kuumenevat. Generaattorin liiallinen alimagnetointi aiheuttaa kuumenemista staattorin levypaketin päissä. Staattorin virtoja mitataan virtamuuntajien avulla, jotka on sijoitettu mahdollisimman lähelle generaattorin käämejä. Usein virtamuuntajat asennetaan generaattorin läpiviennin ympärille. Virtamuuntajia voi olla useampia, jolloin relesuojaukselle ja mittaukselle käytetään eri virtamuuntajia. Staattorin jännite mitataan jännitemuuntajien avulla. Jännitettä mitataan suojauksen ja mittauksen tarpeisiin omilla jännitemuuntajilla. Liian suuri jännite voi johtaa läpilyöntiin generaattorin sisällä. Liian suuri jännite aiheuttaa levypaketin kuumenemista. Mitä suurempi ylijännite on, sitä vähemmän aikaa staattorin eristys kestää ylijännitettä. Tahdistuksen aikana generaattorin jännitteen mittaus on erittäin tärkeässä roolissa, jotta tiedetään verkon ja generaattorin jännitteen olevan sama. Roottorin virran mittauksella estetään roottorin yli- tai alimagnetointirajojen ylittäminen. Virran mittaus viedään magnetointilaitteistolle, joka säätelee virran määrää. Roottorin lämpötilaa ei voida mitata anturilla, vaan mittaus tehdään laskemalla roottorin resistanssi virta- ja jännitemittausarvoista. Roottorin virta mitataan



magnetointilaitteistosta, ja mittauksen avulla säädetään generaattorin pätöteho, sekä loistehoa. Virtamittausta käytetään myös laskiessa roottorin lämpötilaa. Roottorin jännite mitataan myös magnetointilaitteistosta ja sitä käytetään generaattorin jännitteen ylläpitämiseen, sekä roottoriresistanssin laskemiseen. Generaattorin syöttämän jännitteen taajuus mitataan joko kierrosta sekunnissa, tai hertseinä Hz. Taajuudesta mitataan mahdollisia poikkeamia. Taajuuden mittaus on tärkeässä roolissa generaattorin tahdistuksen aikana. Mittauksella varmistetaan, että generaattorin ja verkon taajuus ovat samat. Käytön aikana taajuuden äkillinen nouseminen johtuu usein kuorman äkillisestä putoamisesta pois. Kuorman pois tippumisen takia turbiinin mekaanista voimaa on vähennettävä ja magnetointia pienettävä, jotta saadaan tuotanto vastaamaan kuormaa. Kuorman ollessa suurempi kuin generaattorin teho, alkaa taajuus pudota. Generaattori joutuu tällöin ylikuormalle aiheuttaen staattori- ja roottorikäänin lämpenemistä. Jännitteen ja taajuusmittauksen avulla voidaan suojata generaattori ylimagnetoitumiselta. Ylimagnetoituminen voi tapahtua tilanteessa, jossa generaattori toimii jännitteisenä generaattorikatkaisijan ollessa auki. (Klempner 2004 s.188)

## **6.2 Lämpötilamittaukset**

Generaattorista valvotaan lämpötilaa useista eri kohdista. Lämpötila valvonnalla päästään seuraamaan generaattorin kuntoa, ja varmistamaan ettei generaattorin käytön aikana ylitetä sallittuja toimintaarvoja. Lämpötilaa mitataan staattorin levypaketista, käämeistä, staattorin käänin jäähdytysvedestä, vetyjäähdyttimestä, tiivisteöljylaakereista, liukulaakereista, sekä roottorista.

Levypaketin lämpötilaa mitataan levyjen väliin sijoitetulla termoelementillä. Termopari sijoitetaan usein levypaketin hampaan kohdalle käämiuran alapuolelle. Aksiaalissuunnassa lämpötilamittaus sijoitetaan lähelle levypaketin päitä. Lämpötilamittauksen avulla voidaan valvoa levypaketin lämpenemistä, joka voi johtua ylimagnetoinnista. Levypaketti kuumenee myös tilanteessa, jossa generaattori ajautuu ylikuormaan. Vetyjäähdytteisessä generaattorissa vedyn paineen putoaminen nostaa levypaketin lämpötilaa. Alhaisen paineen takia vety ei pääse kiertämään, jolloin levypaketti ei saa tarvitsemaa jäädytystä. Vedyn epäpuhtaus voi lisätä levypaketin kuumenemista. Epäpuhtaudesta johtuva lämpeneminen tulee kysymykseen vasta tilanteessa, jossa vedyn puhtaus on romahtanut

merkittävästi. Epäpuhtaudesta johtuva kuumeneminen näkyy myös muissa generaattorin lämpötilamittauksissa. Vedyn lämpötilan noustessa, heikkenee generaattorin jäähdytys ja levypaketin lämpötila nousee. Vedyn lämpötilanousu voi johtua jäähdytysveden virtauksen heikentymisestä, tai joissakin tapauksissa liian kuumasta jäähdytysvedestä. Levypaketin kannalta lämpötilanousu vanhentaa levypaketin eristystä. Ajettaessa generaattorilla suurta loistehoa, levypaketti kuumenee päistään, mutta keskeltä levypakettia lämpötila ei nouse. Paikalliset kuumat kohdat levypaketissa voi syntyä ylijännitteen seurauksena, jolloin eristys vioittuu. (Klempner 2004 s.193–196)

Staattorinkäämiin johdettavan jäähdytysveden lämpötila pyritään pitämään alle  $50^{\circ}\text{C}$ . Mikäli käämiin johdettavan veden menolämpötilaa nostetaan liian suureksi, kärsii loppukierron jäähdytyskyky. Jäähdytysveden lämpötilaa mitataan kiertoa menevästä putkesta, sekä jälkilämpöä palaavasta putkesta. Normaalisti staattorin käämin jäähdytysveden paluulämpötilaa pidetään  $75^{\circ}\text{C}$ . Liian kuuma vesi ei jäähdytä staattorin käämiä. Veden kumentuessa yli kiehumispisteen, on vaarana käämin läpilyönti. Liiallinen kuumuus vanhentaa ennen aikaisesti staattorin eristystä. Lämpötilan nousu voi johtua tislattun veden lämmönvaihtimen toimimattomuudesta, tai jäähdytysveden korkeasta lämpötilasta. Tukkiutunut suodatin, tai käämin sisällä olevan jäähdytysvesiuran umpeutuminen voi nostaa jäähdytysveden lämpötilaa. Generaattorin ollessa ylikuormalla jäähdytysveden lämpötila nousee. Jäähdytysveden virtauksen ollessa alhainen, tulee tarkistaa suodattimien kunto, sekä pumppujen toiminta. (Klempner 2004 s.193–196)

Staattorin käämin lämpötilaa mitataan käämiuraan sijoitettavalla mittauksella. Mittaus sijoitetaan käämiurassa olevien käämien väliin. Aksiaalissuunnassa mittaus sijoitetaan staattorin päähän, josta kuumin ilma tai vety poistuu. Näin saadaan selville kuumimmasta kohdasta käämin lämpeneminen. Mittauksia ei usein asenneta jokaiseen käämin uraan, jolloin mittauksista ei saada täysin kattavaa kuvaa kaikkien käämien lämpötilasta. Mitä enemmän mittauksia asennetaan, sen tarkemman kuvan saa generaattorista. Mittauksen mennessä rikki käytönaikana, ei sitä pääse korjaamaan, ellei ota käämiä pois. Käämin poistamista ei tehdä pelkästään lämpötilamittauksen korjauksen takia. (Klempner 2004 s.201–202)

Roottorin lämpötilamittausta ei voida suorittaa anturoinnin avulla, johtuen roottorin liikkeestä. Roottorin lämpötila voidaan kuitenkin mitata roottorikäänin vastusmittauksen avulla. Vastusmittauksen avulla saadaan keskimääräinen roottorin lämpötila, mutta sen avulla ei saada selville yksittäistä kuumaa kohtaa roottorista. Kuumin arvo voidaan määrittää valmistajan toimittamasta roottorin käänin lämpötilajakautumisen profiilista. Kuumin arvo voidaan laskea, kun tiedetään kerroin keskilämmölle. Kerroin saadaan valmistajan ilmoittamasta roottorin profiilista. Kertoimen avulla voidaan kuumin arvo laskea kaavan 4 avulla. (Klempner 2004 s.212–215)

$$T_{hs} = (T_{ave} - T_{cold}H_2) * M + T_{cold}H_2 \quad (4)$$

jossa,

$$T_{ave} = R_{ave}/R_{ref}(K + T_{ref}) - K$$

$R_{ave} = V_f/I_f$  , laskettu käänin resistanssi, mittamuuntajien kautta mitatuista arvoista

$R_{ref}$  Käänin resistanssi mitattuna valmistajan toimesta

$K$  234,5

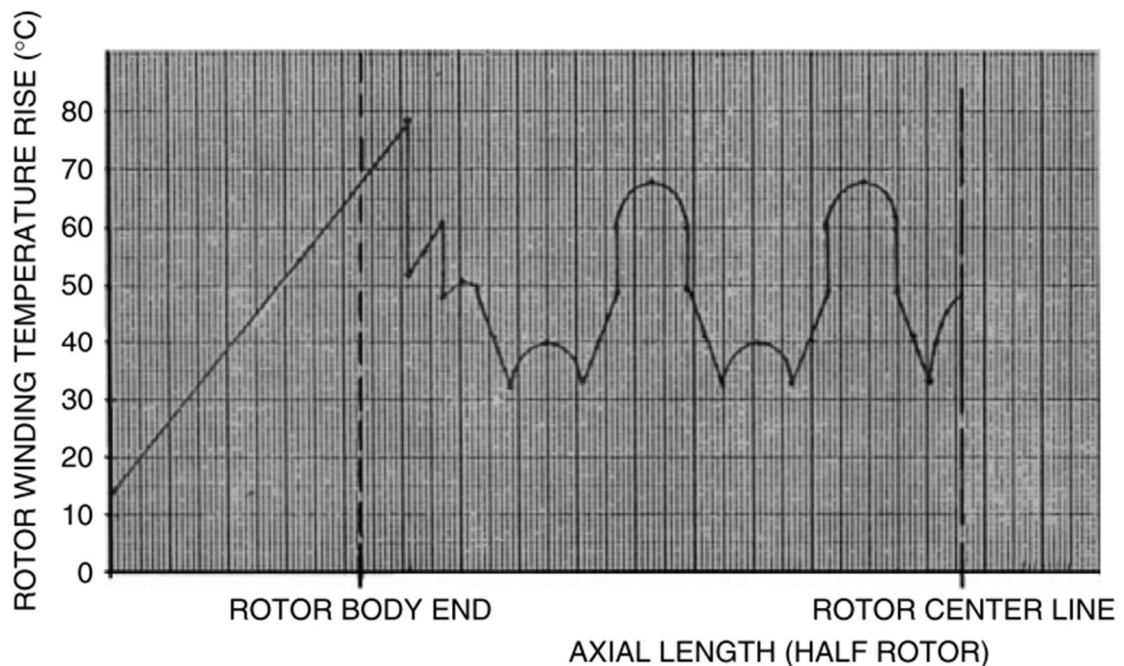
$T_{cold}H_2$

Mitattu kylmän vedyn lämpötila

$$M = T_{hs}/T_{ave}$$

Valmistajan toimittama kerroin

Roottorin käänin lämpötila vaihtelee kuormituksen mukaan, sekä vedyn paineen ja lämpötilan mukaan. Generaattorin ollessa ylikuormalla roottorin käänin lämpenevät. Lämpenemisen seurauksena roottorin käänin eristys heikkenee ja vanheneminen nopeutuu. Eristyksen heikkeneminen voi aiheuttaa kierrossulkuja käänityksessä, sekä mahdollisesti roottorin maasulun. (Klempner 2004 s.214)



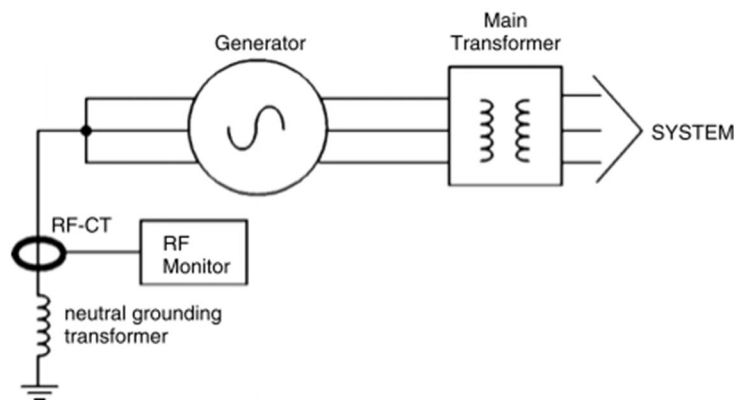
**Kuva 22.** Roottori hot-spot profiili. (Klempner 2004 s.214)

### 6.3 Värähtelymittaus

Generaattorin kuntoa voidaan valvoa värähtelymittausten avulla. Värähtelymittausantureiden määrä vaihtelee generaattorin koon mukaan. Normaalisti pienemmissäkin turbogeneraattoreissa laakerit ovat värähtelyvalvonnan piirissä. Suuremmissa generaattoreissa voidaan värähtelyanturit asentaa staattorin levypakettiin. Levypaketin värähtely syntyy ilmaväliin syntyvästä epätasaisesta magneettisesta vetovoimasta. Magneettisen vetovoiman aiheuttama värähtely voi löystyttää levypakettia. Löystyneessä levypaketissa värähtely voimistuu. Löysyys voi aiheuttaa metallin väsymistä ja lopulta osien rikkoutumisen. Levypaketin värähtely mitataan levypakettiin asennetuilla kiihtyvyyssantureilla. Staattorin rungosta voidaan mitata värähtelyä, joka voi johtua epätasaisesta magneettisesta vedosta tai resonanssista. Resonanssia voi esiintyä sähköverkon taajuuden monikerralla, mikäli rungon ominaistajuus on lähellä verkontaajuuden monikertoja. Kyseisen värähtelyn esiintyessä voidaan asia korjata lisäämällä staattorin runkoon painoa, tai vahvistamalla runkoa. Värähtely voi aiheuttaa staattorinrungossa olevien hitsausaumojen rikkoutumista. (Klempner 2004 s.198–199)

## 6.4 Osittaispurkausmittaus

Osittaispurkausmittauksella tutkitaan staattorikäämieristeen kuntoa. Osittaispurkaukset tapahtuvat joko käämieristeen sisällä, tai pinnalla syntyvinä purkauksina. Purkaukset voidaan tunnistaa mittalaitteistolla sähköisinä pulsseina. Staattorikäämeissä syntyvät viat, kuten lämmöstä aiheutunut eristeiden rappeutuminen ja käämityksen löystyminen, aiheuttavat osittaispurkauksia. Generaattorissa syntyviä osittaispurkauksia voidaan käynninaikana mitata erilaisten generaattoriin asennettavilla mittaus-antureiden avulla. Osittaispurkauksia voidaan mitata joko radiotaajuus mittaukselle (RF), vaiheisiin kykettävillä mittauskondensaattoreilla, tai staattorin kiilauksen alle asennettavan anturin avulla. Osittaispurkausmittaus voidaan suorittaa generaattorin ollessa verkossa kuormitettuna, tai pois käytössä olevalle generaattorille. Kuormitetulle generaattorille tehty mittaus antaa paremman kuvan staattorieristyksen kunnosta, koska verkossa ollessa generaattorin staattorikäämitys altistuu käytön aiheuttamille rasituksille. RF mittauksessa staattorikäämityksessä syntyvä osittaispurkaus aiheuttaa radioaaltovirtoja, jotka voidaan havaita ennen generaattorin tähtipistettä asennetulla suurtaajuus virtamuuntajalla. Virtamuuntajalta tuleva tieto siirretään radiotaajuus monitoriin, jossa signaali analysoidaan. Monitorissa poistetaan taajuudet, jotka eivät johdu osittaispurkauksista. Mittauslaitteistolle on asennettu hälytysraja, jonka ylittyessä valvomoon saadaan hälytys kasvaneesta osittaispurkausten määrästä. Ongelmana RF – mittauksessa on häiriötaajuuksien suodatus. Liukurenkaat ja maadoitushiilet voivat aiheuttaa näkyviä häiriötaajuuksia, jotka eivät ole osittaispurkauksia. (Klempner 2004 s.208–210)



**Kuva 23.** RF-mittaus. (Klempner 2004 s.209)

Kapasitiivisillä mittauskondensaattoreilla voidaan mitata osittaispurkauksia vaihekohtaisesti. Kondensaattorit asennetaan jokaiseen vaiheeseen, jolloin syntyneestä purkauksesta tiedetään missä vaiheessa eristysvika on. Kondensaattorit pyritään asentamaan mahdollisimman lähelle käämejä, joissa purkaukset syntyvät. Usein kondensaattorit kytketään generaattorin liityntäkiskoon. Kondensaattorista saatava mittaustulos saadaan näkyviin oskilloskoopin avulla. Oskilloskoopissa positiivisella puolijaksolla ilmenevät purkaukset johtuvat usein johdinkuparin ja eristeen rajapinnassa olevasta eristeviasta. Negatiivisella puolijaksolla ilmenevät pulssit johtuvat taas käämieristeen ja staattoripakan rajapinnan eristyksen heikentymisestä. Mittausta tehtäessä pitäisi päästä muuttamaan generaattorin kuormitusta, jolloin staattorin virta, lämpötila, sekä värähtelyt muuttuvat. Näin ollen nähdään osittaispurkausten muutos verrattaessa tasaiseen kuormanajoon. Osittaispurkausmittauksessa voi verkosta aiheutua häiriöitä, jotka voidaan tulkita väärin generaattoriviaksi. Käyttämällä kahta kondensaattoria vaihdetta kohden, voidaan tulkita mistä suunnasta pulssi tulee. Toinen kondensaattoreista asennetaan verkon puolelle, ja toinen generaattorin puolelle. Mittalaitteisto osaa eritellä kumpi kondensaattori huomaa osittaispurkauksen ensin. Mikäli generaattorin puoleinen huomaa purkauksen ensin, on vika generaattorissa, tai päinvastoin huomaa verkon puoleinen kondensaattori verkosta tulevan vian aikaisemmin. Mikäli käytössä on siirrettävät kondensaattorit, voidaan joutua tekemään verkolle erillinen tyhjäkäyntimittaus, jonka avulla saadaan selville verkosta tulevat osittaispurkaukset. (Klempner 2004 s.209–212)

Osittaispurkauksia voidaan mitata myös staattorikiilauksen alle sijoitettavalla SSC ( Stator Slot Couplers) anturilla. Anturi toimii antennina ja se asennetaan staattorikäämin päähän. Häiriöt poistetaan SCC mittauksessa virtuaalisesti. SCC mittaus näyttää kaikki mahdolliset signaalit laajalta taajuusalueelta ja osaa eritellä pulssin muodon, jota muut osittaispurkausmittausmenetelmät eivät pysty tekemään. Osittaispurkauspulssit esiintyvät 1-5 nanosekunnin vaihtelulla ja ovat havaittavissa SCC anturin avulla, joka mahdollistaa osittaispurkausten tarkemman määrittämisen. SCC mittauksen etuna ovat osittaispurkausten tarkka havainnointi, positiivisen ja negatiivisen pulssin tunnistaminen, pulssin koon ja määrän tunnistaminen, sekä pulssin suunnan tunnistaminen. (Klempner 2004 s.209–212)

## 6.5 Ilmavälivuomittaus

Ilmavälivuomittauksella tutkitaan roottorikäänin aiheuttamia hajavuota. Mittauksella pystytään selvittämään onko roottorin käämissä syntynyt kierrossulku. Kierrossulku syntyy roottorissa, kun käämien välissä oleva eristys peittää ja käämit osuvat toisiinsa. Keskipakoisvoima vaikuttaa käämeihin, jolloin on tärkeää että kappojen alla olevat käämien tuet ovat kunnossa. Kierrossulkuja voi syntyä myös roottorin ollessa likainen tai kostea. Ilmavälivuomittausanturi asennetaan staattorin pinnalle. Anturi toimii kääminä, johon indusoituu jännite. Indusoitunut jännite on suoraan verrannollinen roottorikäänin aiheuttamaan hajavuohon. Mittalaite vertaa roottorin vastakkaisten napojen käämien aiheuttamaa hajavuota toisiinsa. Kunnossa olevan roottorin käämityksessä ei ole yli 3 % eroa napojen vuon arvossa. Vuon arvo laskee, mikäli käämissä on kierrossulku. Ilmavälivuomittaus toimii parhaana keinona havaita roottorin kierrossulkuja, sillä mittaus tehdään generaattorin ollessa verkossa. Paras mittaustulos saadaan aikaiseksi, kun generaattorin kuormitusta vaihdetaan mittauksen aikana, mikäli mahdollista ajetaan generaattori nollakuormasta täydelle teholle. Mittalaitteisto voidaan asentaa pysyväksi, jolloin hälytysrajojen kanssa ilmavälivuomittaus toimii käytön aikana ja hälyttää mikäli kierrossulkuja tapahtuu. Aikaisemmin ilmavälivuomittaus on tapahtunut siirrettävillä mittainlaitteistolla. (Iris Power, 2016)



**Kuva 24.** Ilmavälivuomittaus.

## **6.6 Roottorin akselijännitteen mittaus**

Generaattorin ollessa verkossa syntyy roottorin akselille jännite. Jännite voi syntyä roottorin akseliin magnetointilaitteistosta kapasitiivisen kytkennän kautta, turbiiniin siipiin osuvista varauksellisista pisaroista, tai epäsymmetrisen staattoripaketin takia. Mikäli roottoriin syntyviä virtoja ei maadoiteta, pääsee virran määrä kasvamaan. Roottorivirrat voivat vahingoittaa laakereiden öljykalvoa, vetytiiviste laakeria ja tehdä palojälkiä laakerin liukupinnalle. Vaarana on generaattorin mekaaninen rikkoutuminen. Roottorin jännitteet maadoitetaan maadoitushiilen avulla. Hiili on sijoitettu normaalisti generaattorin ja turbiinin väliin roottorin akselille. Maadoitushiilen toinen pää on kytketty laitoksen maadoitukseen. Maadoitushiilen kulumista tulee tarkkailla ja hiilen jousen puristusta. Mikäli hiili on kulunut tai jousi joka painaa hiiltä akseliin on kuoleentunut, eivät syntyneet roottorivirrat saa yhteyttä maadoitukseen. Jousen lisäksi tulee tarkkailla roottorin akselin puhtautta. Kulunut hiili on voinut jättää kerroksen hiilipölyä akselin päälle, jolloin kosketus akseliin ei ole optimaalinen. Maadoituksen kunto voidaan todeta mittaamalla roottorin maadoitushiilen läpi kulkeva virta ja jännite. Maadoitushiilten visuaalinen tarkastus tulisi tehdä viikoittain, ja mittauksella todentaa maadoituksen kunto kuukausittain. Maadoitushiileen on mahdollista liittää online- mittausta, jonka avulla voidaan maadoituksen kuntoa tarkkailla valvomosta. Laitteistoon on mahdollista asettaa hälytysrajat. (Klempner 2004 s.222)

## **7 GENERAATTORI REVISIO**

Generaattorille suoritetaan valmistajan ohjeiden, sekä omistajan vaatimuksien mukaan revisioita, joilla voidaan varmistaa generaattorin kunto. Revision laajuus vaihtelee avaavasta huollosta aina pienempiin jokavuotisiin tarkastuksiin. Alla on esitelty tarkastus kohteita ja toimenpiteitä, joita tulee ottaa huomioon generaattorin avaavassa revisiossa.

### **7.1 Staattori**

Staattorinrunko voidaan jakaa ulkopuolisiin ja sisäpuolisiin tarkastelukohteisiin, jotka



tarkistetaan revisiossa. Staattorinrunko kantaa koko generaattorin painon, ja se on pultattu kiinni turbiinisalin lattiaan, tai erillään kelluvaan petiin. Rungon jalat ja niiden kiinnityspulttien on kestettävä generaattorin niille aiheuttamat voimat. Pulttien kireys tarvitsee tarkistaa tietyn ajan välein. Löystyneet pultit voivat pahimmassa tapauksessa mennä poikki. Generaattorin perustus valmistetaan betonista, joka on vahvistettu raudoituksella. Pedin tarkoituksena on kannatella turbogeneraattoria ja pitää koko generaattori ja turbiini linjassa. Pedin tulee kestää generaattorin aiheuttamat mekaaniset voimat. Perustuksissa ilmenevät halkeamat ovat merkki siitä, että peti ei toimi oikein. Revisiossa on tarkistettava perustuksen mahdolliset halkeamat. Usein generaattorin peti ei ole suoraan kiinni muun rakennuksen perustuksissa vaan välissä on joustava rakenne kuten jouset. Vian sattuessa generaattori aiheuttaa perustuksiin vääntövoiman, jonka hallinnassa jouset auttavat. Jousien etuna on myös pedin säädettävyys. Perustuksissa voidaan havaita ajan kuluessa ongelmia, jolloin jousipetiä voidaan nostaa tai laskea niin, että saadaan turbiinin ja generaattorin linjaus kohdilleen. (Klempner 2004 s.318–312)



**Kuva 25.** Generaattorin pedin jouset.

Generaattorin runko on maadoitettu voimalaitoksen maadoitusverkkoon. Maadoitus tehdään usein yhdestä kohtaa generaattoria, jolloin estetään vikavirtojen kiertäminen generaattorissa. Vikavirrat voivat aiheuttaa kipinäointia, jolla voi olla vakavat seuraukset vetyjäähdytteisessä koneessa. Maadoituskaapelit pitää olla kiinni tiukasti, ja niissä ei saa esiintyä korroosiota, tai poikki menneitä suonia. Maadoituskaapelin virran mittauksella voidaan selvittää, paljon sitä pitkin kulkee vikavirtoja. Suuri virran määrä kertoo

generaattorissa olevan vian. (Klempner 2004 s.321)

Generaattorirevisiossa on tarkastettava kaikki ulkopuoliset putkitukset. Generaattorissa voi olla vesi-, vety- ja öljyputkia, joiden kunto pitää varmistaa. Putkiston kunto vaikuttaa suoraan generaattorin toimintaan. Jotkin putkijärjestelmät vaativat tiiveyskokeen, jotta tiiveys voidaan varmistaa. Tarkastuksissa on otettava myös putkiston maadoitukset tarkastuskohteeksi. (Klempner 2004 s.322)

Generaattorin päätykilvet tukevat joissakin generaattorimalleissa roottorin laakeripukkeja. Näin ollen päätykilpien on oltava rakenteeltaan vahvoja, koska niihin kohdistuu koko roottorin paino. Vetyjäähdytteisissä generaattoreissa päätykilvet pitää olla tiiviit ja kestää vedyn paine. Päätykilpi on tehty kahdesta puolikkaasta. Rakenteen tarkoituksena on helpottaa roottorin asentamista ja ulosottamista. Kilven puolikkaat täytyy tiivistää vetyjäähdytteisessä koneessa huolellisesti niin kilpien jakotasoon nähden, sekä staattorin runkoon nähden. Jakotasossa on metallit vastakkain, joten tasoihin on työstetty tiivisteelle ura, jotta vety ei pääse vuotamaan koneesta ulos. Riippuen generaattorin valmistajasta voidaan uraan laittaa tiiviste, jonka jälkeen kilvet asetetaan paikoilleen. Toisenlaisessa rakenteessa kilpi asennetaan ensin paikoilleen ja tiivisteurat täytetään ruiskuttamalla uriin tiivistemassa. Poistaessa päätykilvet tulee vanhat tiivisteet korvata uusilla tiivisteillä. Päätykilpien toimiessa laakerin kannattimena on päätykilpi rakenteeltaan vahvempi kuin generaattoreissa, joissa laakeripukki on suoraan generaattorin pedin päällä. Rakenteessa, jossa laakeri lepää päätykilven varassa, tulee revisiossa varmistaa, että laakeri on eristetty päätykilven rakenteesta. Myös vetytiivisteiden tulee olla eristetty päätykilvestä. Generaattorirevisiossa voidaan varmistaa eristys käyttämällä eristysvastusmittausta. (Klempner 2004 s.323–324)

Turbogeneraattorin roottoreihin voi käytön aikana syntyä jännite ja sen seurauksena pieniä akselivirtoja. Akselivirrat voivat aiheuttaa laakereille merkittäviä vikoja. Akselivirtoja voi syntyä generaattorin magnetoinnin virtapiikeistä ja roottorin aksiaaliliikkeen aiheuttamasta muutoksesta magneettikentässä. Vapaasti kulkemaan pääsevä akselivirta voi vahingoittaa laakereita ja öljytiivisteitä. Akselivirta tuhoaa laakerin liukupinnan, jolloin laakeri leikkaa kiinni. Virta vaikuttaa myös laakeriöljyn kemiallisiin ominaisuuksiin. Akselivirroista päästään eroon asentamalla akseliin hiiliharjallinen maadoitus, sekä

eristämällä laakeripukit. Revisiossa ja ajonaikana tulee maadoitushiilen kuluminen tarkistaa. Kulunut maadoitushiili tulee vaihtaa uuteen ja sen lisäksi tarvitsee puhdistaa akselin kaula johon hiili osuu, jotta varmistetaan hyvästä maadoituksesta. Generaattorin revisiossa tutkitaan laakerit ja tarkistetaan onko laakereihin päässyt syntymään akselivirran aiheuttamia vaurioita. Mikäli vaurioita on syntynyt, tulee maadoituksen kunto tarkistaa ja varmistaa, että laakeripukit on eristetty muusta rakenteesta. (Klempner 2004 s.325–327)

Generaattorin alasajon jälkeen on pidettävä huolta, että generaattorin sisälle ei pääse kondensoitumaan vettä. Riippuen generaattorin valmistajasta kosteuden poisto hoidetaan joko erillisellä ilmankuivaimella, joka asennetaan koneeseen seisokin ajaksi, tai generaattorissa on sähkövastus, jolla lämmitys hoidetaan. Sähkövastusten kunto ja toiminta on varmistettava generaattori revision yhteydessä. Mikäli generaattoriin pääsee syntymään kondenssivettä, se heikentää eristyksen lujuutta ja voi vahingoittaa roottorin kappoja, erityisesti 18Mn-5Cr materiaalista valmistettuja kappoja. (Klempner 2004 s.327)

Staattorin rungon sisäpuoliset osat altistuvat käytönaikana värinälle, lämpötilanvaihtelulle, sekä muille mekaanisille rasituksille mitä kuorman muutokset ja mahdolliset viat voivat aiheuttaa. Syntyneet rasitukset voivat löystyttää staattorin sisäpuolisia liitoksia. Staattorin käämien tuentoihin ja tukirakenteisiin vaikuttavia voimia voi syntyä kuorman äkillisestä muutoksesta johtuen, generaattorikatkaisijan sulkeminen epätahtikohdassa, sekä oikosulut. Generaattorin avauksen yhteydessä tulee etsiä merkkejä liitoksien löystymisestä. Löysät liitokset ja pultit voidaan havaita silmämääräisellä tutkimuksella. Mikäli pulttien ja liitosten kohtaan on syntynyt öljyn ja pölyn sekoitusta, voidaan epäillä liitoksen olevan löysä. Öljyn ja pölyn sekoitus syntyy, kun kaksi kappaletta hankaa toisiaan vasten värinän seurauksena. (Klempner 2004 s.328–330)

Generaattorin avauksen yhteydessä tulee tutkia onko lämpötilan mittaamiseen käytetyt anturit kunnossa. Ongelmana ovat usein käämien lämpötilamittaukset, jotka ovat tavoittamattomissa. Kyseisiä mittaustantureita ei päästä vaihtamaan kuin uudelleen kääminnän yhteydessä. Muita lämpötila-antureita jotka mittaavat laakereiden lämpöä, sekä ilman tai vedyn lämpöä on usein sijoitettu niin, että niiden vaihtaminen onnistuu generaattorirevision yhteydessä.

Generaattorin yleiskunnosta voidaan päätellä paljon visuaalisella tarkastuksella. Mikäli generaattorista löytyy palon jälkiä, suuria määriä öljyä ja pölyä, sekä irtonaisia metallikappaleita voidaan olettaa koneen kunnan oleva heikko. Staattorin käämityksen läpi menevät ilmareiät voivat tukkeuta edellä mainittujen likojen takia. Seurauksen voi olla generaattorin ylikuumentuminen ja käämien erityksien ennenaikainen vanheneminen. Ilmareikien puhtaus tulee varmistaa koneen avauksen yhteydessä. Mikäli ilmankulkureitit ovat tukkeutuneet, voidaan ne yrittää avata paineilman avulla. Paineilmaa tulee puhaltaa staattorin sisäpuolelta kohti staattorin ulkokehää. Staattorin sisältä voi löytyä metallipölyn ja öljyn sekoitusta. Metallipöly on väriltään punaista ja se voi olla peräisin löystyneestä staattorikäänin kiilauksesta, tai löysistä levypaketin laminaateista. Öljyistä likaa voidaan kokeilla magneetilla selvittääkseen sisältääkö lika metallia. Mikäli metallipölyä on paljon, on sen alkulähde selvitettävä. Tutkimuksessa saadaan selville johtuuko syntynyt metallipöly joko löystyneestä kiilauksesta, tai esimerkiksi löysästä levypaketista. Levypaketti joutuu kovalle mekaaniselle rasituksella ja se voi löystyä vuosien saatossa. Löystynyt levypaketti altistuu kulumiselle ja siitä voi seurata kohtia, jotka kuumenevat ja mahdollisesti rikkovat levypaketin segmentistä paloja generaattorin sisälle. Löystynyt levypaketti lisää generaattorin värähtelyä ja voi lopulta rikkoa levypakettia kiristävät pultit tai aiheuttaa niihin eristysvikoja. Levypaketin tiukkuutta voidaan testata mittaamalla kiristyspulttien momenttia ja vertaamalla sitä valmistajan antamiin arvoihin. Mikäli levypaketti on löystynyt, voidaan pultit kiristää oikeaan momenttiin. Toinen tapa on yrittää laittaa ohut kiila levypaketin segmenttien väliin. Levypaketti on tiukka, mikäli kiilaa ei saa laitettua väliin. Levypaketin kunto voidaan varmistaa tarkistamalla sen tiukkuus ja tekemällä EL-CID mittaus. (Klempner 2004 s.333–337)

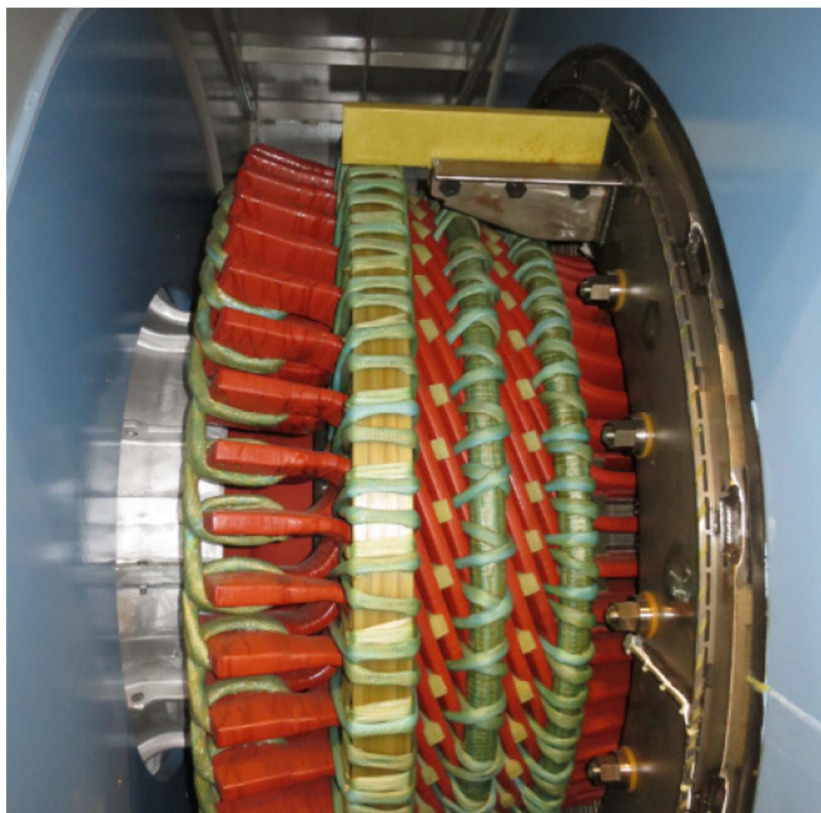


**Kuva 26.** Levypaketin päälle muodostunutta likaa.

Staattorin käämeihin lian muodostuminen on melko yleistä ottaen huomioon aikavälin, jolloin käämien puhtautta tutkitaan. Lika aiheuttaa käämin päälle kerroksen, jossa virta pääsee kulkemaan. Virta vahingoittaa ja heikentää käämien eristyksen kuntoa. Käämineristyksessä olevaan halkeamaan voi lika tunkeutua ja aiheuttaa oikosulun. Käämien eristykseen voi tulla halkeamia lämpölaajenemisen takia. Käämieristyksen kuntoa voidaan mitata käytönaikana tehtävällä PD mittauksella. Käämin likaisuus saadaan selville silmämääräisellä tarkastetulla. Käämin ollessa likainen, on se syytä puhdistaa. Puhdistustapa riippuu käämin eristeen laadusta ja kunnosta, sekä siitä kuinka likainen käämitys on. Puhdistus voi olla mekaaninen hankaaminen, imurointi, harjaaminen tai kuivajääpuhallus. (Klempner 2004 s.355–357)

Kääminpäiden tullessa ulos levypaketista täytyy päät tukea, jotta ne kestävät mekaaniset voimat, jotka käämeihin vaikuttaa generaattorin ollessa verkossa. Kääminpäiden ympärille asennetaan kehä, joka pitää koko pään kasassa. Kehä valmistetaan metallista tai lasikuidusta. Metallista valmistettuun kehään asennetaan useita kerroksia eristysmateriaalia päälle. Käämit on lisäksi tuettava niin, etteivät ne pääse hankaamaan toisiinsa vasten. Kääminpäiden liikkuminen johtuu lämpötilojen vaihtelusta johtuvasta liikkeestä, kuorman muutoksista aiheutuvista voimista ja verkossa tapahtuvien oikosulkuvikojen takia. Käämien osuessa toisiinsa hankaus heikentää eristystä ja näin ollen vähentää eristyksen

ikä. Käämien väliin asennetaan eristemateriaalista valmistettu välikappale, joka erottaa käämit toisistaan. Eristyskappaleet sidotaan kiinni käämeihin. Revisiossa tulee tarkistaa sidosten tiukkuus, sekä onko eristyskappaleet tiukasti paikoillaan. Kääminpäiden välinen tuenta voidaan myös tehdä eristyskappaleen sijaan sidoksen avulla. Kääminpäiden löystyessä voi eristyskappale päästä tippumaan käämien välistä, mutta sidoksen kanssa tehdyssä tuennassa ei ole kyseistä ongelmaa. Käämin päissä oleva lika tulee puhdistaa revisiossa, ja mikäli tuennat ovat päässeet löystymään, tulee ne tiukentaa. Kuvassa 27 on esitetty käämien tuenta, josta voidaan erottaa kehärenkaat, sekä käämien välissä olevat eristyspalat. Kääminpäiden tuennan lisäksi päät tuetaan generaattorin runkoon. Runkoliitoksesta tulee revisiossa tarkastaa pulttien tiukkuus ja silmämääräisesti tutkia onko liitosrakenteissa halkeamia. Vesijäähdytteissä staattorikämissä kääminpäiden runkotuennan täytyy tukea myös jäähdytysvesiletkujen rakenne. Kääminpäiden tuennassa löysän liitoksen paljastaa kiinnityspulttiin muodostunut rasva. (Klempner 2004 s.360-362)



**Kuva 27.** Staattorin kääminpäiden tuenta.

Käämit saadaan pysymään paikoillaan levypaketin urassa kiilauksen avulla. Kiilojen avulla

saadaan pidettyä käämit tiukasti urassa kiinni, jolloin käämit eivät pääse hankautumaan ja tärisemään. Generaattorirevisiossa tulee tarkistaa kiilojen tiukkuus. Kiilojen tiukkuus voidaan tarkistaa naputtamalla pienellä vasaralla toisesta päästä kiilaa ja toisesta päästä kokeilla käsin liikkuko kiila. Kiilan ollessa löysä, liikkuu toinen pää kiilasta, kun toista päätä naputetaan. Kiila voi olla tiukka, mutta ei silti purista käämiä. Kyseisessä tapauksessa naputuksen yhteydessä kiila ei liiku, mutta kiilauksesta syntyy ontto ääni. Onttous johtuu raosta kiilan ja käämin välillä. Vika voi esiintyä asennusvirheen takia tai käämin kutistumisen takia. Kiilauksien tarkistuksessa ontot ja löystyneet kiilat merkitään, ja mikäli viallisia kiiloja on paljon, joudutaan koko staattorin kiilaus uusimaan. Koko kiilauksen uusinta tulee kysymykseen mikäli yli 25% kiiloista on löysiä tai onttoja. Erityistä huomiota tulee kiinnittää staattorin päätyjen kiilaukseen. Löysän kiilan voi havaita myös hankauksen takia syntyneestä pölystä, joka sekoituessaan öljyyn näkyy likana kiilassa. Kiilauksen tarkistaminen käsin vie aikaa ja on henkilösidonainen. Nykyisin kiilausta voidaan tarkistaa instrumentin avulla, joka tekee kiilan naputuksen ja tallentaa kiilan liikkeen. Instrumentti kalibroidaan testikappaleen avulla, jossa on mallina löysä kiila. Instrumentilla tehty kiilojen tarkastus on huomattavasti nopeampaa, kuin perinteinen kiilojen tarkastaminen ja samalla vältetään henkilöriippuvuudesta. (Klempner 2004 s.377–379)

Vetyjäähdytteisen generaattorin revision jälkeen täytyy generaattorille suorittaa painekoe, jotta voidaan olla varmoja generaattorin tiiveydestä. Generaattorin tiiveyskoe tehdään pyörittämällä roottoria paaksin avulla. Nosto- ja tiivisteöljyjärjestelmä tulee olla päällä, jotta laakerit saavat voitelun, sekä vedyn generaattorin sisällä pitävän tiivistelaakerin tiivistepintaan tulee öljyä. Generaattorin painekoe tehdään paineilmalla, ja mikäli vuotoa ei havaita, voidaan ilma korvata hiilidioksidilla ja sen jälkeen vedyllä. Laskentakaavalla lasketaan onko tiiveys riittävän hyvä. Kaavassa otetaan huomioon paine kokeen alussa ja kokeen lopussa, sen lisäksi kaavassa huomioidaan lämpötilanvaihtelut, sekä ilmakehänpaine. Mikäli generaattori ei saavuta sille asetettuja tiiveysrajoja, täytyy aloittaa vuotokohtien etsiminen ja tiivistäminen. Vuotokohtia etsitään saippuaveden avulla. Saippuavettä suihkutetaan esimerkiksi hitsaussaumaan ja mikäli siihen muodostuu kuplia, vuotoa kyseinen kohta. Vuotokohtien etsiminen kannattaa aloittaa seuraavista kohteista: jakotason seutu, akselitiivistepesä, päädyt ja kaikki läpiviennit. (Ganz)

$$P_2 = (P_1 + P_{a1}) * \frac{T_2}{T_1} - \left( \frac{k}{0,38} * T_2 + P_{a2} \right) \quad (5)$$

jossa,

- $P_2$ = ylipaine kokeen lopussa (mmHg)  
 $P_1$ = ylipaine kokeen alussa (mmHg)  
 $P_{a2}$ = ilmakehän paine kokeen lopussa (mmHg)  
 $P_{a1}$ = ilmakehän paine kokeen alussa (mmHg)  
 $T_2$ = lämpötila kokeen lopussa (K)  
 $T_1$ = lämpötila kokeen alussa (K)  
 $K$ = vuotokerroin =  $\frac{\text{poistunut kaasumäärä } m^3}{\text{koneen kaasutilavuus } m^3}$

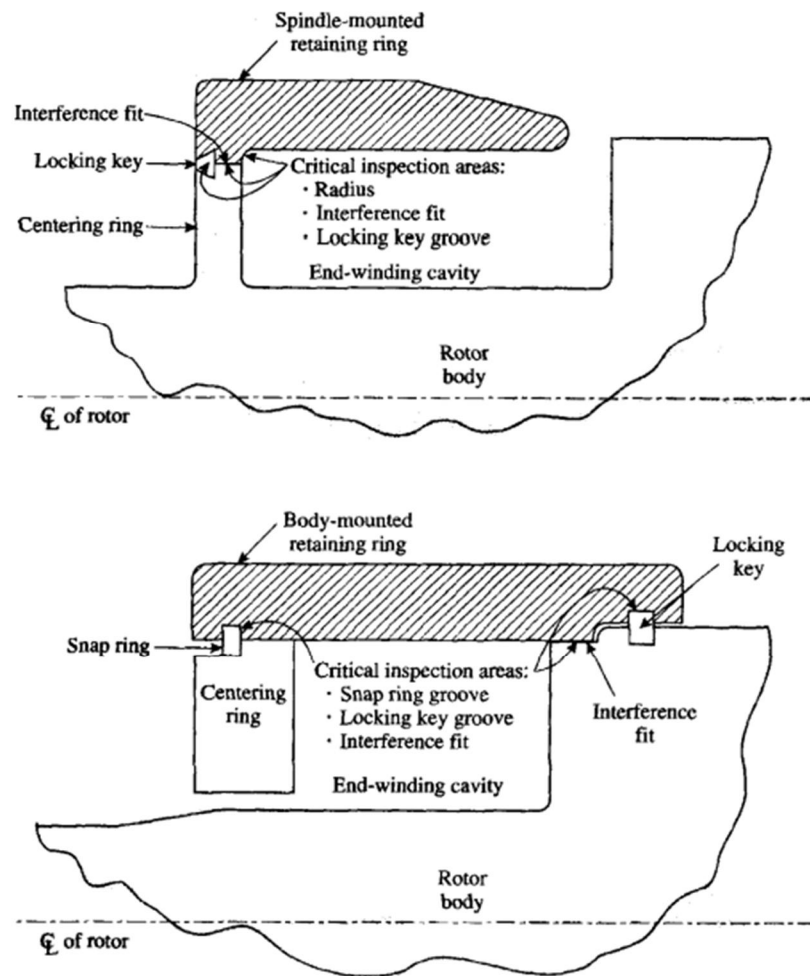
## 7.2 Roottori

Roottorin puhtaudesta voidaan silmämääräisesti päätellä hyvin paljon roottorin yleiskunnosta. Likaisessa roottorissa, jossa on paljon punaista kuparipölyä ja öljynsekaista likaa, voidaan olettaa roottorin käämien tukien ja eristeiden olevan kuluneita. Kuparipölyä löytyessä roottorista paljon, voi vaarana olla roottorin käämiin syntyvät kierrossulut. Kierrossulkuja voidaan havaita sähköisillä mittauksilla. Roottorin liasta voidaan suorittaa kemiallinen analyysi, josta saadaan selville kuinka paljon kuparia pöly oikeasti pitää sisällään. Roottorin päällä oleva lika tulee puhdistaa huolellisesti, sillä lika vaikuttaa roottorin jäähtymiseen ja hankaloittaa roottorin silmämääräistä tutkimista. (Klempner 2004 s.402–403)

Kovimmalle rasitukselle joutuvat komponentit roottorissa ovat kapat. Kapat pitävät roottorin kääminpäitä kasassa. Kappojen rikkoutuminen johtaa usein vakavaan generaattorin vikaantumiseen. Kapat tarkastetaan silmämääräisesti ja NDT tarkastuksilla. Kappojen tarkastusväli riippuu koneen käyttötunneista ja käynnistyskerroista. Suuri käynnistyskertojen määrä kiihdyttää roottorin kappojen metallin väsymistä. Tarkastusvälin lyhentäminen voi tulla kysymykseen, mikäli epäillään roottorin kappojen altistuneen kosteudelle. Käytön ja revision aikana on pidettävä huolta, että roottori on kuivassa ja puhtaassa tilassa. Erityisen herkkiä kosteudelle ovat vanhat roottorit, joissa kappojen

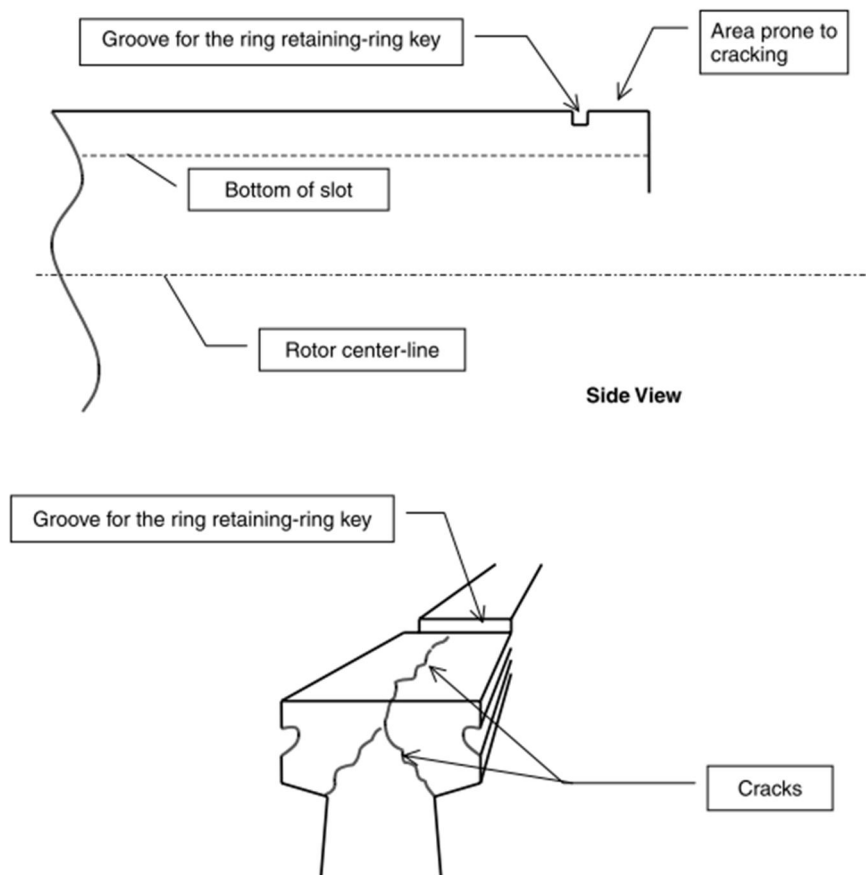


materiaali on 18Mn-5Cr. Korroosion syntyminen kapoille tapahtuu usein tilanteessa, jossa roottori on otettu huollon ajaksi pois generaattorista. Vanhasta materiaalista valmistetut roottorikapat on todettu herkästi hajoaviksi, mikäli niihin on päässyt kosteutta. Nykyään kapat valmistetaan 18Mn-18Cr materiaalista, joka ei ole niin säröherkkä. Moniin roottoreihin on huollon yhteydessä vaihdettu kapat, jotka on valmistettu uudesta materiaalista. Materiaalin vaihdoksella on saavutettu kappoihin kestävyyttä, mutta tulee roottorin kapat silti pitää kuivana ja kappoja tulee tarkistaa aikajoin. Huollonaikaisen kosteuden välttämiseksi roottorille rakennetaan telttä, johon asennetaan ilmankuivain. Roottorin kappojen silmämääräistä ja NDT tarkastusta varten voidaan joutua poistamaan kappojen maalipinta. Riippuen roottorin valmistajasta voidaan kapat myös jättää maalaamatta. Kapoista voi löytyä maalin ja lian poiston jälkeen kohtia, joihin on syntynyt korroosiota. Kapoista etistään NDT tarkastuksien avulla mahdollisia särökohtia. Mikäli kapoissa havaitaan säröjä, voidaan joutua kapat poistamaan. Kappojen materiaalin kuntoa voidaan revision yhteydessä tarkistaa kovuusmittauksella. Joissakin kappojen rakenteissa käytetään porattuja reikiä, joilla pyritään parantamaan jäähdytysilman virtausta. Ilmanvirtausreiät joutuvat kovalle mekaaniselle rasitukselle ja niille tulee tehdä NDT tarkastus. Kapat kiinnitetään roottorin päälle kuumentamalla kapat, jolloin lämpölaajenemisen seurauksena kapat saadaan sovitettua roottorin kääminpäiden päälle. Kappojen jäähtyessä ne kiristyvät roottoriin kiinni. Kapoista tutkitaan onko lämpösovitte päässyt liikkumaan ja mahdollisia säröjä päässyt syntymään liitoskohtaan. Kappoja on olemassa kahta erilaista mallia. Kappojen rakenne eroaa niiden tavasta kiinnittyä roottoriin. Rakenteista johtuvista eroista on eri kappamalleilla omat kriittiset kohtansa, jotka tulee tarkistaa revision yhteydessä. Kuvassa 28 on esitetty eri kapparakenteissa olevat heikot kohdat. (Klempner 2004 s.402–411)



**Kuva 28.** Kappojen kiinnitys roottoriin. (Klempner 2004 s.411)

Roottorin kappojen mahdollisen poistonjälkeen voidaan tutkia NDT tarkastuksella roottorissa olevaa uraa johon kappa kiinnittyy. Joissakin roottorirakenteissa ongelmana on uraan syntyvät säröt, joita on vaikea havaita kappojen ollessa paikoillaan. Kuvassa 29 on esitetty poikkileikkaus roottorista ja urasta johon mahdollisia säröjä voi syntyä. Säröjä voi syntyä kappojen poisoton yhteydessä, joten kappojen irrottamista tulee harkita tarkoin. (Klempner 2004 s.411–412)

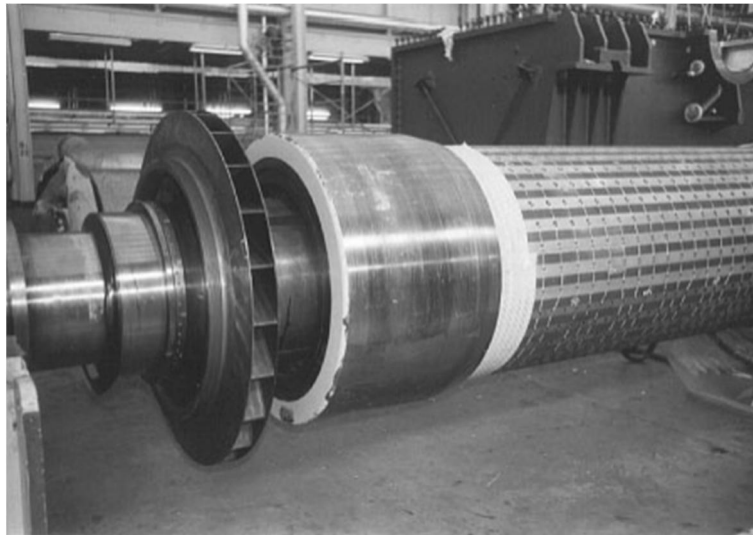


**Kuva 29.** Säröjen syntypaikat. (Klempner 2004 s.412)

Roottorin akselille molempiin päihin asennetaan puhaltimet, joiden avulla saadaan kierrätettyä generaattorin sisällä olevaa ilmaa tai vetyä. Puhaltimet ovat malliltaan joko aksiaalis- tai keskipakopuhaltimia. Aksiaalispuhaltimen siivet kiinnitetään kehään, joka on lämpösovitettu roottorin akseliin. Puhallinsiivet kiinnittyvät kehään joko hitsaamalla tai pulttiliitoksella. Puhaltimen siivet tulee tarkistaa, jotta niissä ei ole säröjä. Erityistarkastelun kohteena ovat siiven kiinnityskohta kehään, sekä siipien alaosa. Pulttiliitoksessa tulee varmistaa niiden kiinnipysyminen, jottei pultit pääse avautumaan käytönaikana. Riippuen valmistajasta voi aksiaalispuhaltimet olla kooltaan suuremmat kuin roottorin halkaisija. Kyseissä mallissa tulee puhallinsiivet poistaa, ennen kuin roottori voidaan ottaa ulos staattorin sisältä. (Klempner 2004 s.414–417)



**Kuva 30.** Roottorin aksiaalispuhallin.



**Kuva 31.** Roottorin keskipakopuhallin. (Klempner 2004 s.416)

Suurissa rottoreissa on asennettu erilaisia painoja rottorille, joilla rottori saadaan tasapainotettua. Painoihin ja muihin rottoreissa oleviin pultteihin ja muttereihin kohdistuu suuri keskipakovoima. Keskipakovoiman takia on varmistettava, että erilaiset kiinnitysmekanismit ovat kunnossa ja mikään osa ei pääse irtoamaan rottorista käytön aikana. Valmistajasta riippuen rottorin tasapainotuspainoja voi sijaita erinäisissä paikoissa. Painoja voidaan sijoittaa joko akselin päihin, tai aksiaalissuunnassa rottorin napojen pinnalle. Kuvassa 32 esitetään rottorin kyljissä olevat painot. Painot ovat pyöreät ja niissä on poikkileikkaus. Painot on sijoitettu valmistajan toimesta oikeisiin kohtiin, joten

niitä ei tule siirtää tai muuttaa revision yhteydessä. Painoista tulee vain varmistaa, että ne pysyvät paikoillaan. Kuvassa 33 esitetään vastaavasti roottorin akselin päähän sijoitetut tasapainotuspainot. Mikäli roottorissa havaitaan käytönaikana värähtelyä, voidaan roottori tasapainottaa uudestaan, jolloin painojen paikkaa voidaan joutua siirtämään. Roottorin tasapainotus tapahtuu lähettämällä roottori pajalle, joka pystyy pyörittämään tasapainotusta vaativaa roottoria. (Klempner 2004 s.419–421)



**Kuva 32.** Roottorin kyljissä olevat tasapainotuspalaset.

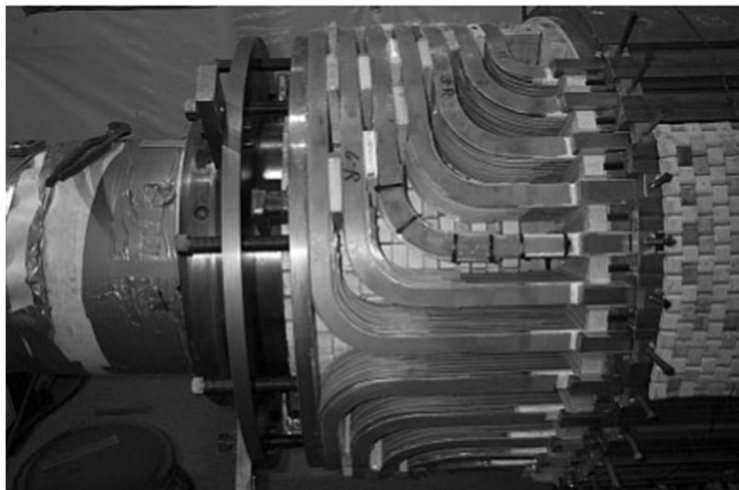


**Kuva 33.** Roottorin päähän sijoitetut tasapainotuspainot.

Roottoriin runkoon voi syntyvä virtoja joko vinokuorman, tai verkon heilahtelun takia. Virrat kulkevat pitkin roottorin kiiloja ja runkoa, jolloin vaarana ovat vikavirtojen aiheuttamat läpilyönnit. Roottorin tarkastuksessa tulee kiinnittää huomiota mahdollisiin palojälkiin, joita on voinut syntyä kappojen ja kiilojen välille. Roottorin rakenteesta riippuen voivat roottorin kiilat joko osua kappoihin, tai kiilojen ja kappojen väliin jätetään pieni väli. Vaikka kiilat olisivat irti kapoista, voi käytön aikana kiilat liikkua kohti kappoja. Mikäli kiilat ovat liikkuneet, ne tulee korjata ja palauttaa alkuperäiseen asemaan. Roottorin kiiloista tulee tarkistaa mahdolliset halkeamat, onko kiilaus päässyt löystymään ja onko kiilojen väri muuttunut mahdollisen lämpenemisen seurauksena. Alumiinista valmistetut kiilat voivat menettää niiden mekaanisen lujuuden, mikäli ne ovat altistuneet suurelle lämpötilalle. (Klempner 2004 s.421–423)

Roottorin käämeistä kovimmille joutuvat roottorin päissä olevat käämit keskipakoisvoiman seurauksena. Kapat tukevat roottorin kääminpäitä, mutta sallivat käämeille aksiaalissuunnan liikkeen. Käämien liikkussa aksiaalissuunnassa tulee varmistaa, ettei käämit pääse osumaan toisiinsa synnyttäen kierrossulkuja. Kuvassa 34 on esitetty roottorin kääminpäät, josta voi nähdä käämienpäiden väliin laitettut tuet, jonka avulla pyritään estämään aksiaalissuunnassa liikkuvien käämien toisiinsa osuminen. Riippuen roottorin iästä ja kuormasta, voi roottorin kääminpäät vanhentuessa menettää muotoaan. Käämienpäiden liikkeeseen vaikuttaa niiden muoto. Usein ongelmaksi voi koitua käämirakenteet, joissa käämin päät tekevät roottorin päissä 90° kulman. Kuvassa 35 on esitetty 90° asteeseen muotoiltu kääminpää, joka on päässyt liikkumaan. Usein huollon yhteydessä ei päästä näkemään kääminpäitä, koska kappoja ei poisteta tarpeettomasti vain sen takia että päästään tarkistamaan kääminpäät. Roottoriin syntyvä ruskea metallipöly kertoo käämin liikkumisesta. Pitkäaikainen roottorin paaksaaminen saattaa lisätä kuparipölyn syntymistä. Paaksilla pyöriessään roottorin käämit liikkuvat oman painonsa seurauksena, jolloin pyörimisestä syntyvä liike synnyttää kuparipölyä. Roottorin ollessa täydessä kierrosnopeudessa, keskipakoisvoima pitää käämit tietyssä asennossa, jolloin edestakaisin liikettä ei synny. Ylimääräistä kuparipölyä voidaan yrittää puhdistaa joko imuroimalla, höyrypesulla ja kemikaaleilla. Usein ei käytetä höyrypesua ja kemikaaleja, koska ei haluta ottaa ylimääräistä riskiä jolla vaarannetaan roottorin kunto. Joissakin

tapauksissa kuparipölyn poistamiseen käytetään paineilmapuhallusta, mutta ongelmana puhaltamisessa on lian painuminen takaisin syvemmälle roottorin sisälle. Paras keino on puhdistaa kaikki mahdollinen lika roottorin päältä pois. Tarvittaessa roottorin puhdistuskeinona voidaan käyttää imurointia. (Klempner 2004 s.427–431)



**Kuva 34.** Roottorin kääminpäät kun kapat poistettu roottorista. 427



**Kuva 35.** Kääminpäät joissa  $90^\circ$ , kuvassa nähdään käämien kierrossulku. (Klempner 2004 s.430)

Heikoin kohta roottorin käämityksessä on kohta, joka yhdistää kääminpäät ja liukurenkaat. Yhdistyskappale valmistetaan ohuista kuparilevyistä, jolloin liitoksesta tulee joustava. Joustava liitos kestää paremmin lämpötilan vaihtelu aiheuttamia voimia. Liitososat voivat kulua käytössä ja joissakin tapauksissa liitos rikkoutuu käytönaikana. Liitososaan ei pääse tekemään visuaalista tarkastelua silloin kun roottorin kapat ovat paikoillaan. (Klempner 2004 s.431)

Roottorin liukurenkaat ja hiilet joutuvat kovalle kulutukselle generaattorin ollessa verkossa. Liukurenkaat ja hiilet siirtävät magnetoinnin vaatiman virran. Liukurenkaiden kulumiseen vaikuttaa merkittävästi ympäristötekijät sekä ajetut tunnit. Ympäristötekijöinä ovat ilmankosteus, liukurenkaiden puhtaus ja ympäristön lämpötila. Hiilien ja liukurenkaiden kulumiseen vaikuttaa magnetointilaitteistosta tulevat harmoniset yliaallot. Hiiliharjoihin kuluttavasti vaikuttaa myös roottorin värähtely. Värähtelyn aiheuttama

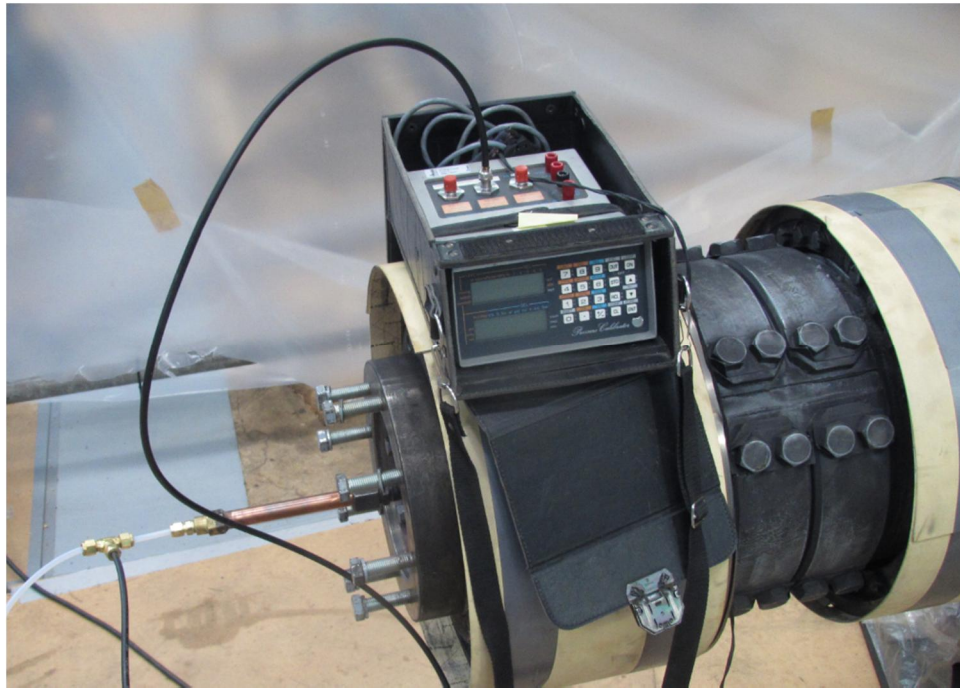


vaikutus on hyvin pieni, koska generaattori on suojattu liiallista värähtelyä vastaan muiden syiden takia. Hiilien asennuksessa tulee ottaa huomioon hiilien asema nähden liukurenkaisiin. Kuluminen voi lisääntyä, mikäli hiilet eivät asemoidu hyvin nähden liukurenkaisiin. Hiilien asemaan voi vaikuttaa roottorin aksiaalinen liikkuminen käytönaikana lämpenemisen takia, sekä mahdollisesti väärään asentoon asennetut hiilenpidikkeet. Asema tulee tarkistaa, kun hiilet on asennettu kylmään koneeseen ja sen jälkeen kun on saavutettu roottorin käyttölämpötila generaattorin ollessa verkossa. Hiilien kulumista tulee käytön aikana seurata päivittäin. Vuosihuollon yhteydessä tulee tarkistaa liukurenkaiden pinnan kuluneisuus ja puhtaus. Joissakin tapauksissa voidaan liukurenkaiden pinta hioa puhtaaksi, jotta saadaan parempi kosketus aikaiseksi hiilen ja liukurenkaan välille. Harjallisessa magnetoinnissa tulee ajokausittain vaihtaa magnetoinnin napaisuus. Tutkimusten mukaan positiivinen puoli hiilistä kuluu nopeammin kuin negatiivinen puoli. Generaattorin ollessa pois käytöstä pidemmän ajan, tulee hiilet poistaa liukurenkailta. Samalla on varmistettava, että liukurenkaat säilyvät puhtaana ja suojattuna niin, ettei ilman kosteus pääse vaikuttamaan liukurenkaiden pintaan. Ennen käynnistystä on puhdistettava mahdollisesti revision aikana likaantuneet liukurenkaat. Hiiliä liukurenkaalle painavien jousien voima tulee tarkistaa huoltoseisokin aikana. Mikäli jouset muuttavat väriä kuumentumisen takia, on vaarana jousen kuoleentuminen. Normaalisti jousen voima tulisi olla 1,75-2,25 psi välillä, voima voidaan mitata jousivaa'an avulla. (Klempner 2004 s.432–435)

Liukurenkaat asennetaan eristyskerroksen päälle, joka erottaa roottorin rungon ja liukurenkaat toistaan. Eristysmateriaali joutuu käytönaikana kosketuksiin öljyn, kupari- ja metallipölyn sekä hiilistä irtoavan hiilipölyn kanssa. Mikäli irtopölyä ja likaa ei puhdisteta liukurenkaista voi syntyä tilanne, jossa liukurenkaiden eristys pettää. Käytönaikana eristyksen pettäminen voidaan nähdä roottorin maasulkuna tai pahimmassa tapauksessa DC piirin oikosulkuna. (Klempner 2004 s.435)

Liukurenkailta DC- jännite siirretään roottorin käämiin virtapulttien kautta. Liukurenkaaseen kiinnitetään joustava virtakisko, josta virta siirretään roottorin rungosta eristetyn virtapultin kautta roottorin käämiin. Virtapulttien pitää olla tiiviit vetyjäähdytteisessä generaattorissa. Virtapultin vuotaessa pääsee generaattorin sisällä oleva

vety vuotamaan generaattorista ulos. Virtapulttien tiiveys voidaan mitata roottorista. Valmistajasta riippuen voi roottorin päässä olla mittayhde, josta tiiveys voidaan mitata. Mittaus voidaan suorittaa asettamalla roottorin sisälle paine ja mittaamalla miten paine lähtee vajoamaan. Mikäli paineen vajoamista ei tapahdu, on roottori tiivis. Roottorin tiiveys tulee tarkastaa aina revision jälkeen ja ennen starttia staattorin tiiveyskokeen yhteydessä.



**Kuva 36.** Roottorin tiiveyskoe.

### **7.3 Apujärjestelmät**

Generaattorin apujärjestelmät vaativat kunnossapitoa, jotta voidaan taata generaattorin toiminta kaikissa olosuhteissa. Apujärjestelmät ovat erittäin tärkeässä roolissa, joten generaattorirevision yhteydessä tulee käydä apujärjestelmät läpi ja tarkastaa niiden toiminta. Usein apujärjestelmät ovat toiminnassa vaikka generaattori ei olisi verkossa, joten järjestelmille kertyy generaattoria suuremmat käyttötunnit.

Voiteluöljyjärjestelmän tarkastus on hyvä tehdä jokaisen generaattori tai turbiini revision yhteydessä. Käytön aikana tulee valvoa laakereiden ja öljyn lämpöä, koska niissä tapahtuvien muutoksien havaitseminen voi kertoa mitä asioita tulee käydä tarkastuksessa

läpi. Öljysäiliön kunto tulee tarkistaa ja tutkia tankkiin kertynyt likaa. Öljysäiliössä olevat epäpuhtaudet tulee poistaa, ettei lika pääse vaikuttamaan voiteluöljyn voiteluominaisuuksiin. Putkistojen kunto tarkastetaan ja liitoksista etsitään mahdollisia vuotokohtia. Öljynjäähdyttimestä tulee tarkistaa sen puhtaus ja katsoa, että lämmönvaihdin ei vuoda. Vuoto voi olla joko vaihtimesta ulospäin tai vaihtimen sisällä, jolloin jäähdytysvesi ja öljy menevät sekaisin. Ulospäin olevan vuodon voi havaita silmin, mutta sisäisen vuodon havaitsemiseksi voidaan vaihtimelle suorittaa painekoe. Öljylaitteiston huollossa vaihdetaan öljynsuodattimet ja tarkastetaan öljyseparaattorin toiminta. Joissakin tapauksissa ennen generaattorin tai turbiinin revisiota otetaan voiteluöljystä näyte analysoitavaksi. Tuloksesta nähdään öljyn kunto, sekä öljyn sekaan mahdollisesti joutunut valkometalli, joka kertoo laakerikulumisesta generaattorilla tai turbiinilla. Tiivisteöljyjärjestelmälle suoritetaan samanlainen tarkastus kuin voiteluöljyjärjestelmälle. Eroavaisuutena tiivisteöljyjärjestelmässä tulee tarkistaa vedynpoistojärjestelmän toimivuus ja kunto. Sekä voiteluöljy- että tiivisteöljyjärjestelmän pumppujen ja moottoreiden huolto tulee ajoittaa generaattorirevision yhteyteen. Järjestelmistä voidaan vaihtaa tiivisteitä vaikka vuotoja ei olisikaan havaittavissa, näin vältetään tiivisteiden ajansaatossa tapahtuvalta haurastumiselta. (Klempner 2004 s.456–458)

Staattorin kääminjäähdytysvesijärjestelmästä tarkastetaan vesisäiliön ja putkiston kunto. Lämmönvaihtimesta tarkastetaan, ettei vaihdin vuoda sisälle tai ulkopuolelle. Jäähdytysvesipumput ja moottorit huolletaan, sekä järjestelmässä olevat suodattimet vaihdetaan uusiin. Laitteistosta täytyy tarkistaa vedynpoistojärjestelmän toiminta. Vedenjohtokykymittauksen pitävyys tulee tarkistaa, jotta vältetään generaattorin sisäiseltä läpilyönniltä. Staattorin sisältä pitää tarkistaa liitoskohdat, josta vesi menee sisälle käämiin. Staattorin sisäiset vesiputket tulee tarkistaa niiltä osin kuin silmämääräisesti on mahdollista. Mahdollisia vuotavia kohteita ovat staattorin sisällä olevat laippaliitokset ja niiden O-renkaat, jotka voivat haurastua ajan myöten. (Klempner 2004 s.459)

Vetyjäähdytettyjen generaattorin vetyjäähdyttimet tulee revision yhteydessä puhdistaa. Jäähdyttimissä kiertävä järvivesi voi liata jäähdytysputket, jolloin jäähdytysveden virtaus voi vaarantua. Vesituubit puhdistetaan joko painepesulla, tai harjaamalla mekaanisesti. Vetyjäähdyttimen puhdistuksen yhteydessä tulee vaihtaa jäähdyttimien kansien tiivisteet,

koska vanhat tiivisteet voivat vioittua avaamisen yhteydessä. Jäähdyttimelle suoritetaan vesipainekoe, jolla varmistetaan että jäähdytin on tiivis ja se voidaan asentaa staattorin sisällä. Vesipainekokeessa täytetään jäähdytin vedellä, nostaen painetta käyttöpaineeseen asti. Paineen ollessa käyttöarvossa suljetaan jäähdytin pulloksi ja katsotaan 30min pysyvä paine muuttumattomana. Paineen päästessä laskemaan etsitään vuotokohta ja korjataan se. Ilmajäähdytteisessä generaattorissa suoritetaan samat toimenpiteet ilman jäähdyttimelle, jossa jäähdytysväliaineena toimii vesi. (Ganz)

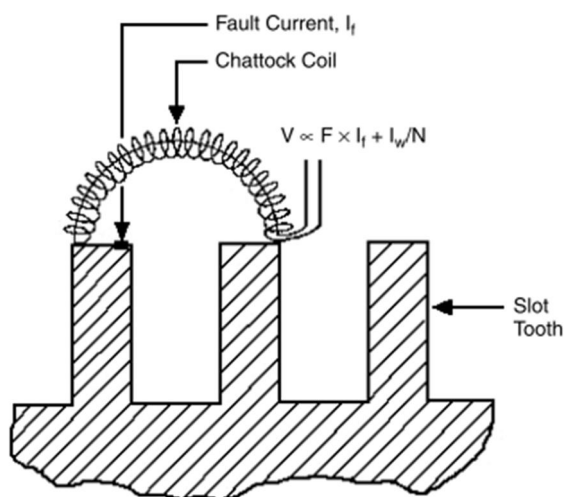
## **8 SÄHKÖISET MITTAUKSET**

Generaattorille suoritettujen mekaanisten tarkastuksien lisäksi suoritetaan revision yhteydessä kunnonvalvonta mittauksia. Alla on esitelty erilaisia revisiossa tehtäviä mittauksia sekä staattorille, että roottorille. Mittaus tarpeet vaihtelevat generaattorin kunnosta ja iästä riippuen, eikä alla olevista mittauksista kaikkia suoriteta jokaisessa generaattorirevisiossa.

### **8.1 EL-CID**

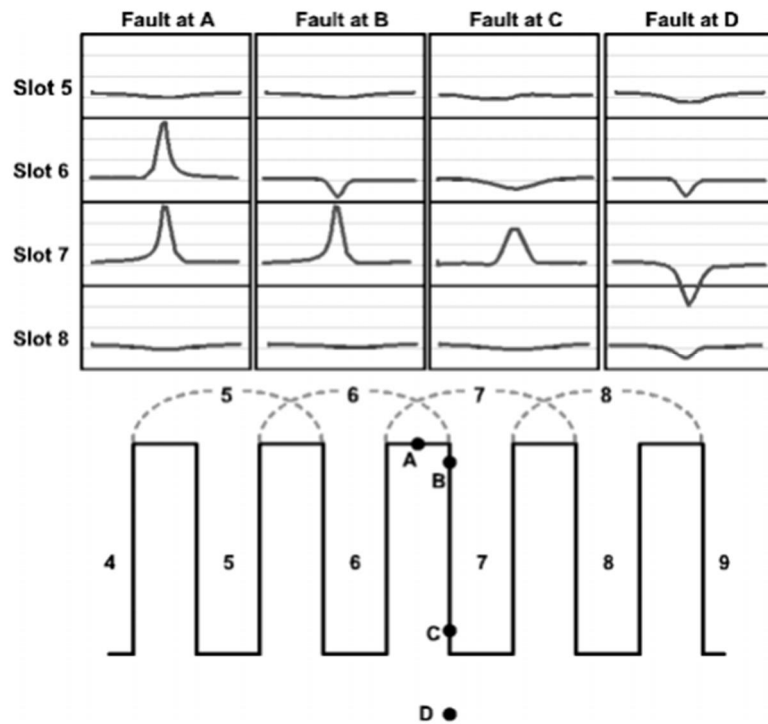
EL-CID mittauksella tutkitaan staattorin levypaketin eristyksen kuntoa. EL-CID tulee sanoista Electromagnetic-Core Imperfection Detector. Ennen EL-CID mittausta staattorin levypaketin kuntoa voitiin tutkia ainoastaan suuren magnetoinnin vaatimalla levypaketin rautasulkumittauksen rengaskokeena. EL-CID kokeessa mitataan magneettivuota, joka johtuu vika-alueella kulkevasta virrasta, ainoastaan 3-4% magnetoinnilla nimellisvuosta. Mittauksessa tarvittava magnetointi määräytyy staattorin suunnittelu parametreista ja tarvittavasta tehosta, jolla saadaan tarvittava vuo. Normaalisti staattorin ympäri laitetaan sisältä ulkoa 4-7 kierrosta kaapelia, jolla saadaan siirrettyä tarvittava magnetointivirta. Mittauskäämitys magnetoidaan 3-4% nimellisvuosta, usein 5 V/m staattorin tehollista pituusyksikköä kohden. Testilaitteisto mittaa havaitut vikavirrat. Kokemuksen mukaan voidaan sanoa että 100mA virta voidaan olettaa olevan uuden levypaketin hyväksymisraja, 200mA on vanhan levypaketin hälytysraja ja yli 300mA menevät virrat vaativat toimenpiteitä levypaketille. (Klempner 2004 s.469–470)

Mittauksessa staattorin sisäpinnalla viedään sensoria aksiaalissuunnassa staattorin levypakettia pitkin. Sensoria liikutetaan hitaalla vauhdilla, noin metri kahdessakymmenessä sekunnissa. Sensoria liikuttaessa liian nopeasti ei saada oikeaa mittaustulosta, jolloin jokin vikakohta voi jäädä näkemättä. Sensorin liikutusnopeuden lisäksi on pidettävä huolta, että sensori yhdistää kaksi levypaketin ”hammasta”. Sensorin periaatteesta on esitys kuvassa 37. Mahdolliset vikavirtakohdat ja arvot tallentuvat mittauslaitteistoon. Sensorin tulisi näyttää ehjässä levypaketin kohdassa 0mA, mutta todellisuudessa mikään levypaketin eristys ei ole täydellinen, joten pieniä vikavirtoja löytyy aina. Normaalisti uutta levypakettia mitattaessa vikavirran arvo on 0mA-20mA. Vikakohdassa sensori havaitsee vikavirran synnyttämän vuon. (Klempner 2004 s.470–472)



**Kuva 37.** EL-CID sensori. (Klempner 2004 s.473)

EL-CID mittaus on osoittautunut käytännössä erittäin luettavaksi tavaksi havaita levypaketin eristysvikoja. Verrattaessa levypaketin rengassulkukokeeseen EL-CID mittaus on huomattavasti nopeampi ja vähemmän työpanosta vaativa. EL-CID mittalaitteistolla tuloksesta voidaan tulkita onko vika joko levypaketin hampaiden puolella, tai syvemmällä sisällä. Vian ollessa pinnassa saadaan selvä piikki magneettivuon mittauksesta juuri vian kohdalla. Vian ollessa syvemmällä levypaketissa huomataan se useimmiten isomman alueen skannauksessa. Syvällä levypaketissa oleva vika näkyy ennen ja jälkeen vikapaikan. (Klempner 2004 s.474)



**Kuva 38.** EL-CID mittaussignaali vian ollessa erikohdissa levypaketissa. (Klempner 2004 s.475)

EL-CID mittauksen tuloksia on verrattu rautasulkumittauksen saatuihin kohonneisiin staattorin levypaketin lämpötiloihin. Vertauksen avulla on saatu selville, että 100mA arvo EL-CID mittauksesta vastaa noin 5-10°C lämpötilan nousua rautasulkumittauksessa. Näin ollen voidaan saada hyvä oletamus levypaketin kunnosta pelkästään seuraamalla lämpötilan muutoksia levypaketissa rautasulkumittauksen aikana. EL-CID mittauksen ja rautasulkukokeen välistä korrelaatiota kuitenkin rajoittaa teytyjen mittauksien vaihtelevuudet. Rautasulkukokeessa käytetään joko 80 % tai 100 % arvoa vuosta, jolloin tulokset vaihtelevat. Sen lisäksi, että vuon arvo muuttuu, on muuttujana myös käytetty aika, jolla levypakettia magnetoidaan. Kuitenkin muuttuvasta magneettivuon arvosta riippumatta voidaan havaita yhtäläisyys EL-CID kokeen virranarvolla ja lämpötilan nousulla. Havaitessa 80 % vuon arvolla 10°C lämpötilan nousu on se merkitykseltään paljon suurempi vika kuin 100 % vuon arvolla. Tämä johtuu siitä, että 80% vuon arvolla saatu lämpötila kasvaa BH-käyrän mukaan eksponentiaalisesti, mikäli vuon arvo kasvatetaan 100%:iin. (Klempner 2004 s.475–477)

## 8.2 Rautasulkukoe

Staattorin levypaketin kuntoa voidaan mitata rautasulkumittauksena rengaskokeena. Mittauksessa staattorin levypaketti magnetoidaan lähes nimelliskuolla. Normaalisti käytetään noin 80 % magnetointia nimellisestä. Rengassulkukoe aiheuttaa levypaketin viasta johtuen vikavirtoja ja levypaketin lämpenemistä. Lämpenemistä voidaan rautasulkukokeen aikana tarkkailla lämpökameran avulla. Rautasulkukokeessa staattorin sisältä ulos viedään kaapelia, jolla magnetointi saavutetaan aivan kuten EL-CID kokeessa. Erona EL-CID mittaukseen on rautasulkukokeen vaatima suurempi teho, jotta saavutetaan haluttu magnetointi. Normaalisti kaapeli kytketään laitoksella olevaan keskijännite katkaisijan taakse, tai mahdollisesti voidaan käyttää liikuteltavaa diesel generaattoria. Kaavasta 6 voidaan määrittää tarvittava jännite ja staattorin läpi vietävien kaapelien määrä. (Klempner 2004 s.478–479)

$$\text{Testikäänin jännite per kierros} = \frac{1,05 \cdot V_{LL}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot K_w \cdot N} \quad (6)$$

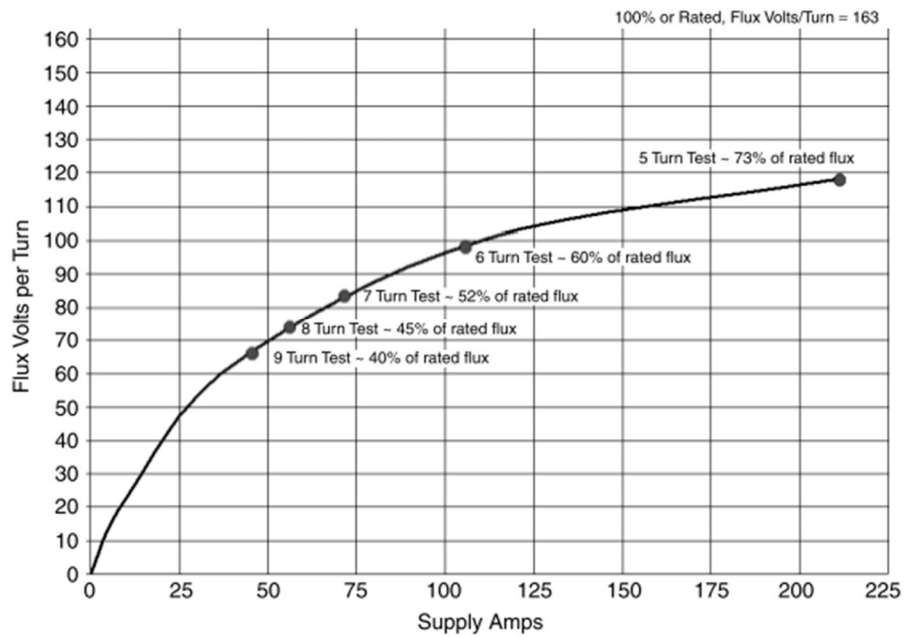
jossa,

$V_{LL}$  pääjännite

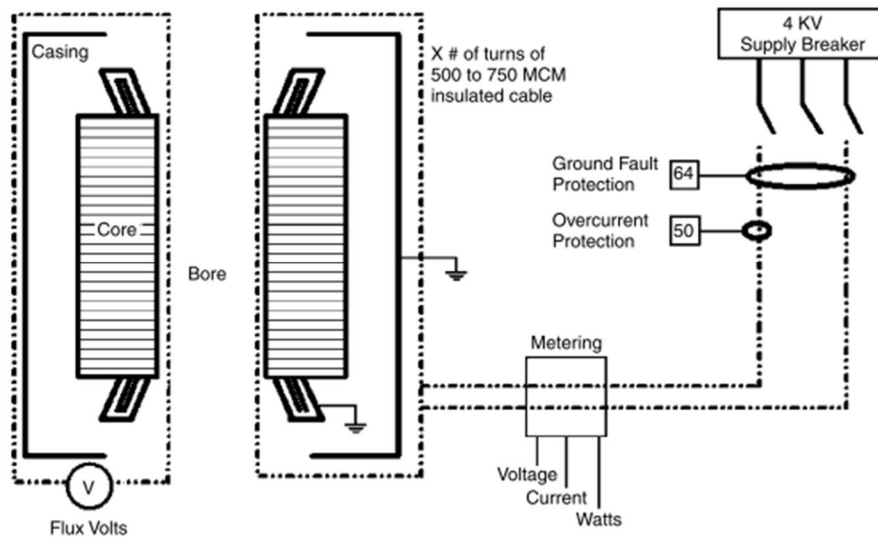
$K_w$  käänimikerroin

$N$  kierrosten lukumäärä per vaihe

Mikäli kaavasta saatu kierrosten määrä on murtoluku, tulee käyttää seuraava suurempaa kierrosten määrää. Rautasulkukokeessa on vaarana levypaketin vahingoittaminen, mikäli käytetään liian suurta vuota. Kokeen aikana ei generaattorilla ole jäähtytystä, mitä sillä normaalissa käytössä on. Rautasulkukokeetta tehtäessä generaattorista tulee tietää kyseisen koneen levypaketin BH käyrä, mikäli kyseistä käyrää ei ole tiedossa, tulee käyttää mahdollisimman lähellä olevaa tunnettua käyrää. Usein voidaan laskea vuon arvoa, jonka avulla voidaan varmistua, että generaattori ei vahingoitu mittauksessa. (Klempner 2004 s.479)



**Kuva 39.** BH-Käyrä. (Klempner 2004 s.480)



**Kuva 40.** Rautasulkukokeen mittauksen periaatekuva. (Klempner 2004 s.480)

Rautasulkukokeessa vuon synnyttämiseen tarvittavat kaapelit suojataan kokeen ajaksi maasulkusuojalla ja ylivirtasuojalla. Kokeen aikana generaattorin runko ja käämit ovat maadoitettuja. Staattorin läpi kiertää yksi ylimääräinen kierros kaapelia, jolla mitataan testissä käytettävää vuota. Kokeen aikana voidaan staattorilevypaketin lämpötilan nousua kuvata generaattorin avattujen päätyjen kautta lämpökameralla. Testivuota pidetään yllä 0,5-1h, jonka aikana tarkkaillaan levypaketin lämpöä. Lämmön ei tulisi kohota yli



käyttöarvojen. Kokeen aikana etsitään kohtia, jossa levypaketti lämpenee enemmän kuin muut osat levypakettia. Mikäli levypaketissa ilmenee kuumia kohtia, voidaan havaintojen perusteella laatia korjaussuunnitelma. (Klempner 2004 s.481)

### **8.3 Käämin vastusmittaus**

Käämin vastusmittaus suoritetaan sekä roottorin, että staattorin käämeille. Käämin vastusmittauksella saadaan selville mahdolliset löysät ja virheelliset liitokset käämissä, sekä avoimet piirit. Mittauksesta saatua vastusarvoa tulee verrata alkuperäiseen kääminvastusarvoon, jotka valmistaja on suorittanut staattorille ja roottorille tehtaalla. Kääminvastusarvoja verrataan vaihekohtaisesti toisiinsa ja arvoilla ei saisi olla yli 0,5% eroa. Kääminvastusmittaus on herkkä lämpötilanmuutoksille, joten mittauksia suorittaessa generaattorin käämin tulisi olla tasalämmössä. (Klempner 2004 s.492)

### **8.4 Eristysvastusmittaus**

Eristysvastusmittauksella tutkitaan käämien ja maan välistä vastusarvoa. Eristysvastusmittaus antaa yleiskuvan staattorin ja roottorin eristyksen kunnosta, ja siitä voidaanko generaattorin kunnonvalvontaa jatkaa muilla mittauksilla. Mittaus kertoo eristyksen puhtaudesta, siitä onko eristys kuiva ja onko eristyksessä vaurioita. Staattorille eristysvastusmittaus suoritetaan joko 500VDC, tai 5000VDC jännitteellä. Vastaavasti roottorille suoritettava eristysvastusmittaus tehdään joko 500VDC, tai 1000VDC jännitteellä. Eristysvastusmittauksessa tulee ottaa huomioon oikea mittausjännite, jotta ei vahingoiteta generaattorin eristystä. Liian pienellä jännitteellä tehty eristysvastusmittaus ei anna oikeaa kuvaa eristyksen kunnosta. (Klempner 2004 s.492–493)

Normaalisti mitattu eristysvastusarvo generaattorilla on mega-ohm luokassa. Hyväksymisrajana eristysvastusarvolle voidaan laskea IEEE 43 standardin mukaan kaavasta:

$$IR_{\min} = kV + 1 \quad (7)$$

jossa,

$IR_{\min}$  eristysvastuksen minimiarvo

$kV$  generaattorin nimellisjännite

Vesijähdytteisissä generaattorikämeissä tulee varmistaa jäähdytys, vesipiirin tyhjennys ja kuivaus. Mikäli kuivausta ei ole suoritettu, voi eristysvastusmittaus näyttää liian alhaista tulosta, jolloin ei päästä käsiksi mahdolliseen eristysvikaan. Eristysvastusmittaus on herkkä lämpötilan muutoksille sekä lialle. Mittaustuloksena saatu eristysvastusarvo tulee skaalata  $40\text{ °C}$ :n lämpötilaan kaavan 8 avulla.

$$R_C = K_T \cdot R_T \quad (8)$$

jossa,

$R_C$  eristysresistanssi skaalattuna  $40\text{ °C}$ :een

$K_T$  eristysresistanssi lämpötilakerroin lämpötilassa T

$R_T$  eristysresistanssi lämpötilassa T

Roottorin eristysvastusmittauksessa on varmistettava, ettei roottori ole kostea. Kosteus vaikuttaa mittaustulokseen alentavasti. (Klempner 2004 s.492–493)

## 8.5 Polarisaatioindeksi

Eristysresistanssiarvo riippuu mittauksen kestosta, ja siitä miten puhdas eristys on.

Polarisaatioindeksi avulla kuvataan suhdetta, joka saadaan vertaamalla eri ajankohdalla tehtyjen eristysvastuumittausten arvoja keskenään.

$$PI = \frac{IR_{10\min}}{IR_{1\min}} \quad (9)$$

jossa,

$PI$	polarisaatioindeksi
$IR_{10\text{min}}$	eristysvastuksen arvo ajanhetkellä 10min
$IR_{1\text{min}}$	eristysvastuksen arvo ajanhetkellä 1min

Polarisaatioindeksin avulla saadaan selville onko eristys mahdollisesti likaantunut tai kastunut. Polarisaatioindeksin laskemisessa ei tarvitse ottaa huomioon lämpötilan vaikutusta, sillä lämpötilan muutos ei ole suuri 10min kestävässä mittauksessa. Taulukossa 1 on esitetty minimipolarisaatioindeksi arvo erilaisille käämineristysluokille. Mikäli polarisaatioindeksi on pienempi kuin taulukossa oleva arvo, voidaan olettaa käämityksen olevan likainen, kostea, tai eristys on rikkoutunut. Käämityksen ollessa kunnossa nousee eristysvastuksen arvo kun mittausaikaa pidennetään. Mikäli käämityksen eristys on likainen, märkä tai rikkoutunut pienenee eristysvastuksen arvo mittausajan kasvaessa. Tästä seuraa että kaavasta 9 laskemalla saadaan taulukossa 1 suositeltuja arvoja pienempiä polarisaatioindeksi tuloksia. (Klempner 2004 s.493–495)

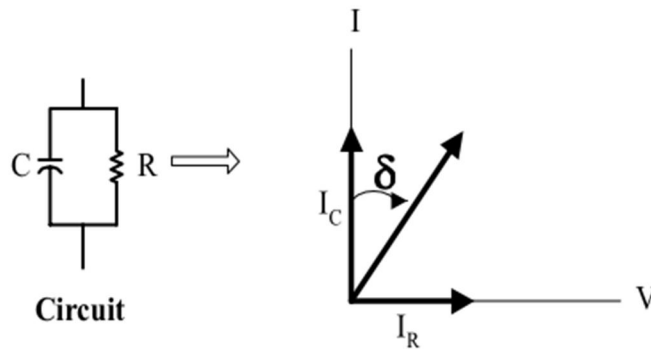
Terminen luokka	Polarisaatioindeksi
Luokka A	1,5
Luokka B	2,0
Luokka C	2,0

Taulukko 1. Polarisaatioluokat. (Klempner 2004 s.495)

## 8.6 Häviökulmamittaus

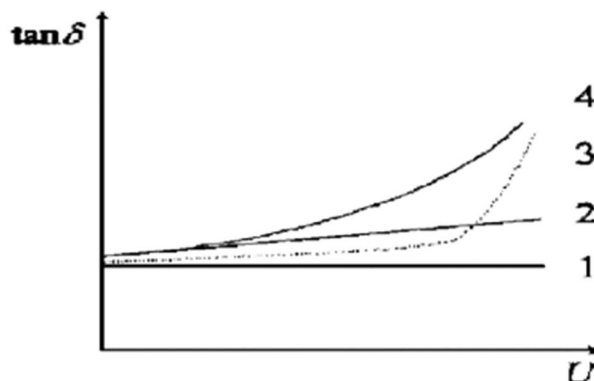
Häviökulmamittauksella ( $\tan \delta$ ) pystytään arvioimaan staattorin eristemateriaalien ja hohtosuojauksen kuntoa. Sen lisäksi voidaan nähdä mahdollinen staattorieristyslikaisuus ja kosteus. Mittauksen avulla voidaan arvioida eristyksen jäljellä olevaa käyttöikä. Staattorikämin eristyksen johtavuus kasvaa, mitä suuremmaksi eristeen lämpötila nousee. Lämpöhäviöitä ei voida estää, koska mikään eriste ei ole ideaalinen, vaan jokainen eristemateriaali johtaa vähän sähköä. Ideaali eriste toimii kuten kondensaattori, jossa virran ja jännitteen välillä on  $90^\circ$  vaihesiirto. Mikäli eristyksessä on

epäpuhtauksia tai mahdollisia vikaantumisia, laskee eristyksen vastus samalla kasvattaen resistiivistä virtaa eristeen läpi. Näin ollen eristys ei toimi enää kondensaattorina ja vaihesiirto on vähemmän kuin  $90^\circ$ . Vertaamalla eri vaiheista saatavaan vaihesiirtokulmaan voidaan nähdä missä vaiheessa mahdollinen eristevika on. Ideaalissa tilanteessa  $\tan \delta$  on nolla, mutta todellisuudessa myös kunnossa oleva eristys antaa pienen kulman arvon. Mitä suurempi  $\tan \delta$  on sitä huonommassa kunnossa eristys on. (High Voltage INC, 2016)



**Kuva 41.**  $\tan \delta$  vaihesiirtokulma. (High Voltage INC, 2016)

$\tan \delta$  arvo muuttuu lineaarisesti jännitteen lisääntyessä.  $\tan \delta$  muutosta voidaan mitata lisäämällä staattorin jännite 25 % aina 100 % asti. Kuvassa NUMERO on esitetty miten jännite vaikuttaa  $\tan \delta$  arvoon. Kuvaajaan piirretään  $\tan \delta$  arvo jännitteen funktiona. Kuvaan on piirretty 6 erilaista  $\tan \delta$  käyrää. Käyrän muodosta voidaan päätellä eristeen kunto. (High Voltage INC, 2016)



**Kuva 42.**  $\tan \delta$  käyriä. (Aro et al. 2003.)

1. Käyrä esittää ideaalista eristettä

2. Käyrä todellisesta kunnossa olevasta eristeestä
3. Käyrässä  $\tan \delta$  arvo nousee äkillisesti kun saavutetaan tietty jännitetaso
4. Käyrä kuvaa eristettä joka on vanhentunut

Staattorille tehtävä mittausta suoritetaan generaattorin ollessa pois käytöstä. Roottori voi olla generaattorin sisällä, mutta vesijäähdytetty staattorikäämi tulisi olla kuivattu. Mittauksen tulokseen vaikuttaa mitattavan kohteen lämpötila. Mittaustuloksista saadaan paras kuva eristyksen kunnosta, kun tuloksia verrataan aikaisempiin mittauksiin. Mittaustuloksia verrattaessa tulee varmistaa, että mittaolosuhteet ovat olleet samanlaiset, jotta tuloksia voidaan verrata luetettavasti. Standardi VDE 530 antaa raja-arvot  $\tan \delta$  arvoista lasketuille tunnusluvuille. Taulukossa 2 on vertailtu mittaustuloksia aikaisempiin mittaustuloksiin. (Klempner 2004 s.503)

	17.8.2005	7.7.2000	VDE 530
$\tan \delta_{0,2}$	10,8	11,0	30
$\frac{\tan \delta_{0,6} - \tan \delta_{0,2}}{2}$	0,55	0,49	2,5
$\Delta \tan \delta_{0,2 \max}$	0,6	0,7	5
$\tan \delta_{1,0} - \tan \delta_{0,2}$	1,9	2,2	-
Lämpötila	30	30	-

**Taulukko 2.** Mittaushistorian vertaaminen.

## 8.7 Jännitekoee

Staattorinkäämille voidaan suorittaa jännitekoee, jonka avulla voidaan varmistaa eristyksen kunto ja kestävyys. Mittauksen avulla selviää kestäkö eristys käytönaikaisen jännitteen, mahdollisesti käytössä syntyvät ylijännitteet ja transientteja ilman, että eristys vioittuu. Mittauksen tarkoituksena ei ole rikkoa eristystä. Mittaus suoritetaan sekä DC, että AC jännitteellä. Mittaus voidaan suorittaa vaihekohtaisesti, jolloin kaksi muuta vaihetta on

maadoitettu, tai vastaavasti mittaamalla kaikki kolme vaihetta kerrallaan. Mittausaikana käytetään 1 min. Kaavalla  $[(2 \cdot V_{LL} + 1000) \cdot 1,7]kV$  lasketaan DC koestusjännite uudelle eristykselle. Kaavassa  $V_{LL}$  tarkoittaa pääjännitettä. Vanhan eristyksen mittaamisessa käytetään pienempää jännitettä DC jännitettä, jonka arvo lasketaan kaavan  $(V_{LL} \cdot 1,7)kV$  avulla. Vanhan eristyksen jännitekoemittauksessa käytetty jännitteenarvo riippuu eristyksen iästä ja kokemusperäisestä tiedosta eristyksen kunnosta. Vanhaa eristystä ei usein haluta mitata liian suurella jännitteellä, koska riskinä on eristyksen rikkoutuminen mittauksen aikana. Uuden eristyksen AC mittausjännite lasketaan kaavan  $(2 \cdot V_{LL} + 1000)kV$  avulla. Vanhan eristyksen AC mittausjännitteenä käytetään pääjännitteen arvosta 1,25–1,5 kertaista arvoa. Jännitekokeesta saatava mittaustuloksen perusteella todetaan eristyksen olevan kunnossa tai viallinen, jolloin eristys pitää kunnostaa. Vesijäähdytteisissä staattorikäimeissä tulee vesikierto olla pois päältä ja vesikanavat kuivattu. Joissakin tapauksissa AC- mittaus voidaan suorittaa veden ollessa staattorinkäimin sisällä. Mittaus suoritetaan vedet päällä, jos käämin eristys ei ole ollut kunnossa DC-mittauksessa, mutta AC- mittaus näyttää hyvää eristyksen kuntoa. Tällöin voidaan epäillä veden vuotoa, jonka seurauksena eristys ei kestä jännitettä. (Klempner 2004 s.498–499)

Roottorin käämitykselle suoritettussa jännitekokeessa käytetään mittausjännitteenä 1500VDC aina kymmenkertaiseen arvoon nimellisjännitteestä. Mittausjännitettä pidetään yllä minuutin ajan. AC jännitteellä tehtävässä mittauksessa käytetään arvoja nimellisjännitteestä aina kymmenkertaiseen nimelliseen oleviin jännitetasoihin. Mittausjännitettä pidetään yllä minuutin ajan. (Klempner 2004 s.517)

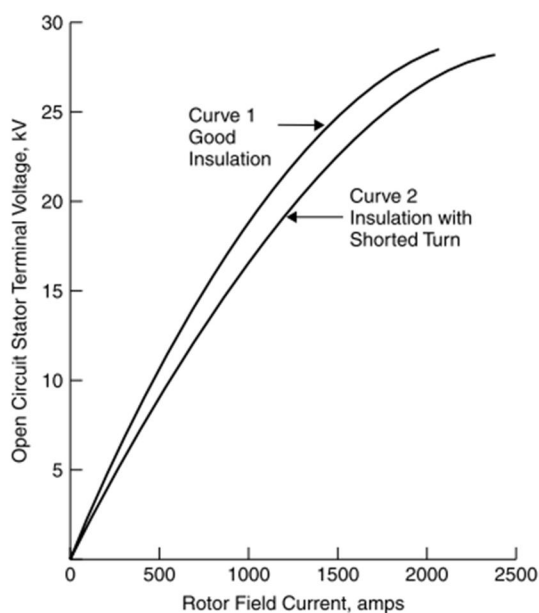
## **8.8 Roottorin kierrossulku**

Roottorin kierrossulku tapahtuu roottorin käämien osuessa yhteen. Kierrossulun syntyyn vaikuttaa rikkoutunut eristys käämien välissä, tai mahdollisesti roottorin sisällä syntynyt läpilyönti. Kierrossulku voi syntyä myös roottorin ollessa likainen ja kostea. Kierrossulun syntyessä roottorin synnyttämä ampeerikierrosten määrä vähenee, jolloin saavuttaakseen saman magneettikentän roottorin virtaa on suurennettava. Virran lisäyksen takia roottorin käämit kuumenevat. Kuumeneminen voi johtaa tilanteeseen, jossa eristys käämien välillä rikkoutuu, jolloin kierrossulkuja syntyy lisää. Tilanne voi johtaa lopulta

roottorinmaasulkuun. Roottorin käämin lämpeneminen epätasaisesti voi lisätä roottorin värähtelyä. Kierrossulun lämmittämä käämi vääntää roottoria kaarelle, jolloin värähtelyjä syntyy epätasapainon takia. Generaattorin ollessa pois verkosta on olemassa erilaisia mittauskeinoja, joilla voidaan havaita roottorin kierrossulkuja. (Klempner 2004 s.518)

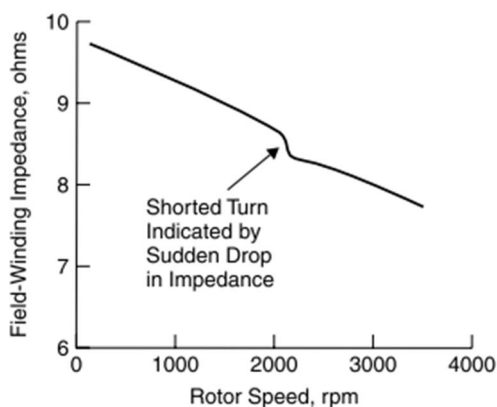
RSO ( Recurrent Surge Oscillation) mittauksessa roottorin liukurenkaisiin syötetään matalajännitteinen korkeataajuinen syöksyaalto. Mittauksessa verrataan molemmista liukurenkaista saatavaan signaalin aallonmuotoja. Mikäli signaalit ovat muodoltaan samanlaisia, ei roottorin käämissä ole kierrossulkuja. Mittaus voidaan suorittaa roottorille joka on liikkeessä, näin saadaan selville syntykö kierrossulku tietyllä roottorin nopeudella. Kierroksilla olevaan roottoriin vaikuttaa mekaaniset voimat, jotka liikuttavat roottorin käämejä. Mitattaessa paikoillaan olevaa roottoria ei nähdä mekaanisten voimien vaikutusta käämeihin. RSO mittauksen avulla saadaan aallonmuodosta selville missä kohtaa roottoria mahdollinen kierrossulku on. Lähempänä liukurenkaita olevat kierrossulut näkyvät poikkeaman vasemmassa reunassa RSO mittauksen käyrällä. Poikkeama kasvaa suuremmaksi, mitä enemmän käämejä on kierrossulussa. Kierroksilla olevalle roottorille tehtävässä RSO mittauksessa mittaus saadaan kiinni hiiliharjojen kautta roottorin käämeihin. RSO mittaus on erittäin herkkä häiriöille, joita magnetointilaitteisto voi synnyttää. Mittauksen ajaksi magnetointilaitteisto pitää erottaa, jotta sieltä tulevat häiriöt eivät vaikuta mittauksen tuloksiin. (Klempner 2004 s.519-520)

Kierrossulkuja voidaan havaita vertaamalla roottorin magnetoinnin virran suuruutta alkuperäisiin arvoihin. Staattorin jännitetaso saavutetaan tietyllä roottorin magnetoinnilla. Tilanteessa, jossa roottorissa on kierrossulkuja, ei alkuperäisellä magnetointivirta-arvolla saavuteta staattorin haluttua jännitetasoa. Kyseistä mittausta voidaan käyttää harjattomissa generaattoreissa käytönaikana, joissa RSO mittauksen suorittaminen vaatii mittavat työt. Ongelmana mittauksessa on yksittäisen kierrossulun havaitseminen. Mittaus voidaan suorittaa kaikille generaattoreille ja jokaisesta generaattorista saatava käyrä on uniikki. (Klempner 2004 s.523)



**Kuva 43.** Magnetointivirran muutos. (Klempner 2004 s.524)

Roottorin nopeuden vaikutus kierrossulkuihin voidaan havaita mittaamalla roottorikäämin impedanssia roottorin kiihdyttäessä tai rullatessa kierroksilta alas. Impedanssin arvossa tapahtuva muutos tietyllä kierrosnopeudella viittaa kierrossulkuun roottorin käänissä. Kierrossulun rajana käytetään 10 % muutosta impedanssin arvoon. (Klempner 2004 s.523–524)



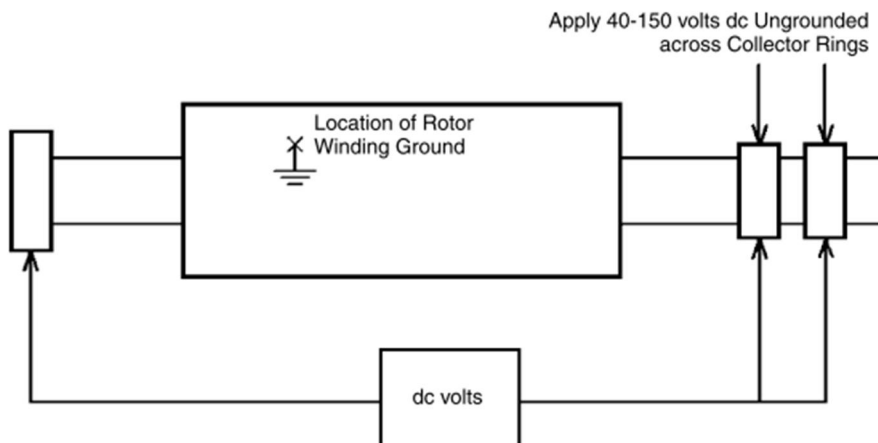
**Kuva 44.** Impedanssin muutos. (Klempner 2004 s.524)



## 8.9 Roottorin maasulkumittaus

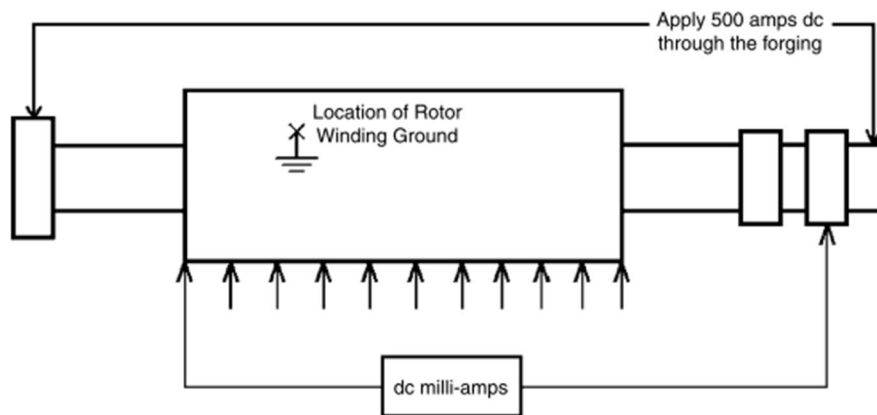
Roottorin joutuessa kovalle mekaaniselle rasitukselle, voi roottoriin syntyä maasulku. Yksi syntynyt maasulku aiheuttaa roottorissa vain pienen vikavirran. Mikäli roottoriin tulee toinen maasulku, voivat seuraukset olla vakavammat. Kahden maasulun välillä oleva vikavirran arvo voi kasvaa suureksi, jolloin vikavirta voi vahingoittaa roottorin käämejä ja eristyksiä. (Klempner 2004 s.527)

Roottorin maasulun paikka voidaan etsiä syöttämällä roottorin toiseen liukurenkaiseen 150 VDC jännite, jonka jälkeen mitataan roottorin turbiinin puoleisesta kytkimen päästä DC jännite. Sen jälkeen vastaava mittaus suoritetaan toiselle liukurenkaalle. Mikäli molemmat mittaustulokset ovat samat, voidaan maasulun olettaa olevan keskellä roottorin käämiä. Mittausten tuloksissa oleva 2 % ero, kertoo maasulun sijainnin olevan roottorin magnetointipäässä. Mittauksen avulla voidaan kartoittaa työmäärää, jotta päästään käsiksi vikaan ja miten kauan maasulun korjaaminen kestää. (Klempner 2004 s.527)



**Kuva 45.** Roottorin maasulkupaikan etsiminen. (Klempner 2004 s.528)

Maasulunpaikkaa aksiaalissuunnassa roottorissa voidaan mitata syöttämällä roottoriin magnetoinnin puolesta päästä 500 A DC virtaa turbiinin puoleiseen päätyyn. DC virtamittarilla etsitään roottorista maasulun kohtaa. Toinen pää mittalaitteesta on kytketty uloimmaiseen liukurenkaaseen ja toista mittapäätä kuljetetaan aksiaalissuunnassa roottoria pitkin. Kohdassa jossa on maasulku, muuttuu mittarin virta-arvo nolnaan.



**Kuva 46.** Roottorin maasulkupaikan etsiminen aksiaalissuunnassa. (Klempner 2004 s.528)

## 9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kymijärvi I voimalaitoksen generaattorin käyttöikä ei ole jäljellä kuin noin 15 000h. Generaattorin revisio tehtiin vuonna 2014, jolloin todettiin generaattorin levypaketin ladontatapin alkaneen liikkumaan. Liikkumisen takia generaattorin sisälle on syntynyt likaa. Jatkotoimenpiteenä generaattorille on suoritettava jokaisella ajokaudella ilmivälivuomittaus, jolla saadaan selville roottorin kunto. Staattorin eristykselle on suoritettava PD-mittaus ajokaudella. Seisokeissa on mitattava staattorin ja roottorin eristysvastus, sekä käämin vastusarvo. Seuraavassa kesäseisokissa on puhdistettava vetyjäähdyttimet. Jäähdyttimiin vaihdetaan uudet tiivisteet. Jäähdyttimet pitää nostaa generaattorista pois puhdistuksen ajaksi, jolloin on mahdollisuus tehdä levypaketille endoskoopitarkastus jäähdyttimien aukoista. Tarkoituksena tutkia onko levypaketin ladontatapin irtonaisuus kasvanut merkittävästi. Liukurenkaiden kunto pitää tarkastaa, sekä maadoitushiilen tarkastus tehtävä seuraavassa seisokissa. Liukurenkaiden kulutuspinnan ollessa ruosteinen tai muuten pinttynyt, suoritetaan liukurenkaille hionta. Jokaisen ajokauden jälkeen on vaihdettava roottorin magnetoinnin napaisuus.

Kymijärvi II voimalaitoksen vuonna 2012 käyttöönotetulle generaattorille on suoritettu käynninaikaisia kunnonvalvontamittauksia ajokausittain. Generaattorista on käytönaikana mitattu ilmivälivuomittaus, sekä PD- mittaus. Vuosittain seisokissa on mitattu staattorikäämin ja roottorikäämin eristysvastusmittaus, sekä käämin vastusmittaus.

Kunnonvalvonnan mittauksia tulee jatkaa samassa syklillä myös tulevaisuudessa. Generaattorille on suoritettava avaava perushuolto kun saavutetaan 50 000h käyttötuntia. Huollossa avataan generaattorin päädyt ja otetaan roottori ulos koneesta. Staattorista tarkastetaan kiilojen tiukkuus, kääminpäiden tuennat ja staattorin siisteys. Staattorin ollessa likainen tulee selvittää syy mistä likaisuus johtuu. Levypaketin kunto tarkistetaan endoskoopin avulla. Endoskoopilla katsottuna levypaketin ollessa siisti, ja levypaketin kiristyspulttien ollessa tiukat, ei levypaketille tarvitse suorittaa sähköisiä mittauksia. Levypaketin kuntoa epäillessä täytyy sille suorittaa EL-CID mittaus. Staattorikäämin läpiviennit on tutkittava silmämääräisesti. Staattorikäämille suoritetaan eristysvastusmittaus, sekä käämin vastusmittaus. Staattorin jäähdytin avataan ja puhdistetaan, tiivisteet vaihdetaan ja puhdistuksen jälkeen suoritetaan painekoe. Painekokeen läpimenon jälkeen voidaan jäähdytin ottaa käyttöön. Ulos vedetylle roottorille tulee rakentaa telta, jossa on ilmankuivain. Roottorin kiilaus pitää tarkistaa ja tutkia onko roottori likainen ja jos likaa on havaittavissa, tulee sen alkulähde selvittää. Roottorin käämille suoritetaan eristysvastusmittaus, sekä käämin vastusmittaus. Roottorin kapoille suoritettava NDT tarkastus, jotta varmistutaan kappojen kunnosta. Roottorin tuulettimen siivistä katsotaan NDT tarkastuksella onko siivissä säröjä. Generaattorin laakereille tehdään väriainetarkastus, jolla tutkitaan myös mahdollisia säröjä laakerissa. Generaattorissa on pyörivä magnetointilaitteisto, josta tarkistetaan diodisiltojen kiinnitys revisiossa. Maadoitushiilet tulee tarkistaa, sekä puhdistaa roottorin akseli ja hiilen pitimet. Generaattorissa olevat ilmansuodattimet on vaihdettava, sekä staattorin seisontalämmityksen kunto varmistettava. Liitteessä 1 on Kymijärvi II generaattorille laadittu kunnossapito ohjelma, jossa huoltotoimenpiteet määräytyvät käyttötuntien mukaan.

Kymijärven kaasuturbiinin generaattorille suoritetaan vuosittain eristysvastusmittaus, sekä käämin vastusmittaus sekä staattorille ja roottorille. Generaattorin vähäisten käyttötuntien takia ei generaattorille ole näkyvissä lähivuosina avaavaa revisiota. Generaattorille voidaan tulevaisuudessa suorittaa kannettavalla laitteistolla PD mittaus, sekä roottorin kierrossulkuja voidaan tutkia alasajomittauksella.

## 10 YHTEENVETO

Tämän työn tarkoituksena oli perehtyä generaattorin toimintaan erityisesti voimalaitoksissa käytettävään turbogeneraattoriin. Työssä käydään läpi generaattorin ja roottorin rakenne. Työssä tutkitaan myös generaattoreiden apujärjestelmien rakennetta ja toimintaa. Työssä käydään läpi generaattorin toiminnan teoriaa, ja kuinka erilaiset kuormat vaikuttavat generaattoriin. Teoriaosuudessa kerrotaan generaattorin magnetoinnin periaatteet, kuinka generaattori tahdistetaan verkkoon ja miten generaattorin tehoa säädetään.

Työssä käydään tarkemmin lävitse toimenpiteet ja tarkastukset, joita generaattorille tehdään revisiossa. Revisiotarkastusten lisäksi on kerrottu generaattorin käytinaikaisesta kunnonvalvonnasta. Käytönaikainen kunnonvalvonta pitää sisällään päivittäisen käytön seurannan mittaukset, sekä erikseen suoritettavat sähköiset mittaukset, jotka tehdään generaattorin ollessa verkossa. Työssä kerrotaan eriteltynä staattorille, roottorille ja generaattorin apujärjestelmille tehtävät huoltotoimenpiteet sekä tarkastukset. Tarkastukset on jaettu kahteen eri osa-alueeseen. Ensimmäisessä käydään läpi staattorille ja roottorille suoritettavat mekaaniset tarkastukset. Toisessa osiossa käydään läpi staattorin ja roottorin sähköiset kunnonvalvontamittaukset.

Työssä laaditaan suuntaviivat Kymijärven voimalaitoksen generaattoreiden kunnossapidolle. Kahdelle generaattoriyksikölle on tehty avaava revisio äskettäin, joten generaattorin avaamista suositellaan vain Kymijärvi II generaattorille. Kymijärvi II generaattorille laadittu käyttötuntiperusteinen huolto-ohjelma antaa yksikertaisen mallin lähestyä generaattorin kunnossapitoa. Työn jatkokehityksenä tulisi käyttötuntien lisäksi ottaa huomioon generaattorin ylös- ja alasajojen määrä ja niiden vaikutus generaattorin kuntoon. Huolto-ohjelmaan tulisi laatia lisäksi toimenpiteet ja tarkastukset, jotka olisi tehtävä joko verkossa tapahtuvan vian jälkeen, tai itse generaattorissa tapahtuvan vian jälkeen.

## LÄHTEET

Aura, L. & Tonteri, A. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Helsinki: Werner Söderström Osakeyhtiö.

Aro M, Elovaara J, Karttunen M, Nousiainen K, Palva V. 2003. Suurjännitetekniikka. Otatieto / yliopistokustannus Oy

Brush, 1986. Brush Electrical Machines.

Ganz. 1974. Generaattori ORV-150, Tekniset arvot ja asennus- ja käyttöohje.

High Voltage INC. 2016. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 1.11.2016] Saatavissa: [http://www.hvinc.com/downloads/Tan\\_Delta\\_FAQ.pdf](http://www.hvinc.com/downloads/Tan_Delta_FAQ.pdf)

Iris power. 2016. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 21.10.2016] Saatavissa: <http://www.irispower.com/pdf/techpapers/Rotor%20Turbo/continuous%20automated%20flux%20monitoring%20for%20turbine%20generator%20rotor%20condition%20assessment%20-epr%202004.pdf>

Klempner, G. & Kerszenbaum, I. 2004. Operation and maintenance of large turbo-generators. A John Wiley & Sons, INC publication.

Lahti Energia. 2016. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.9.2016] Saatavissa: <http://www.lahtienergia.fi/>

Lahti Energia, 2013. Bio2020-Hanke Ympäristövaikutusten arviointiohjelma.

Pöyhönen, W. 1975. Sähkötekniikan käsikirja 1. Tammi

RetubeCo, Inc. 2016. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 10.11.2016] Saatavissa:  
<http://www.retubeco.com/heat-exchanger-solutions/generator-hydrogen-coolers/>

Siemens AG 2011. Turbogenerator Operating and Maintenance Manual.

# LIITE 1

## Kymijärvi II generaattorin huoltosuunnitelma

	10 000h	20 000h	30 000h	40 000h	50 000h	60 000h	70 000h	80 000h	90 000h	100 000h
<b>Staattori</b>										
<b>Sähköiset mitaukset</b>										
Käämin eristysresistanssi	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Lämpötilamittauksen eristysresistanssi					X					
Käämin resistanssi	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Jännitekoe					X					
tan δ					X					
EL-CID mittaus					X					
<b>Visuaalinen tarkastus</b>										
Kiilojen tarkastus					X					X
Käämpäiden tarkastus					X					X
Levypaketin kiristyksen tarkastus					X					X
Käämien eristyksen tarkastus					X					X
Tiivisteiden tarkastus					X					X
Jäähdytysjärjestelmän tarkastaminen					X					X
Endoskooppi tarkastus		X		X	X		X		X	X
<b>Roottori</b>										
<b>Sähköiset mitaukset</b>										
Käämin eristysresistanssi	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Käämin resistanssi	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Maadoitushiljen mittaus	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Visuaalinen tarkastus</b>										
Kiilojen tarkastus					X					X
Kappojen tarkastus					X					X
Laakereiden tarkastus					X					X
Tuuletin siipien tarkastus					X					X
Tasapainotus palojen tarkastus					X					X
Diodisillan tarkastus					X					X
Magnetointikoneiston tarkastus					X					X
Maadoitushiljen tarkastus*					X					X
Endoskooppi tarkastus		X		X	X		X		X	X

\*Tarkastus viikottain