

GENERAATTORIN MAGNETOINTIVIRTOJEN JAKAUTU-
MINEN HARJASILLALLA JA HIILIEN KULUMINEN

Timonen Jari

Opinnäytetyö
Tekniikka ja liikenne
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Insinööri (AMK)

2020

Tekniikan ja liikenne
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Jari Timonen	Vuosi	2020
Ohjaaja	Ins. (YAMK) Aila Petäjäjärvi		
Toimeksiantaja	Kemijoki Oy		
Työn nimi	Generaattorin magnetointivirtojen jakautuminen harjaisillalla ja hiilien kulumisen		
Sivu- ja liitesivumäärä	66 + 0		

Opinnäytetyön aiheena oli Kemijoki Oy:n Taivalkosken vesivoimalaitoksen generaattori TA1 hiilien kulumisen. Tavoitteena oli saada hiilien kulumisen normaalitasolle. Työ tehtiin Kemijoki Oy:lle keväällä 2020

Generaattorin magnetointihiilet kuluvat normaalista poikkeavalla tavalla tangentin suuntaan, tämän takia hiiliä joudutaan vaihtamaan kausihuolloissa normaalia enemmän. Hiilien epänormaali kulumisen tuo ylimääräisiä taloudellisia kuluja.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa käsiteltiin hiiliharjojen kulumista eri kirjallisuudesta saatujen tietojen perusteella. Tutkimusmenetelminä käytettiin eri tavoin toteutettuja mittauksia lämpötilasta ja kosteudesta sekä virtojen mittausta hiiliharjojen johtimista.

Työssä tutkittiin myös muut hiiliharjan kulumiseen johtavat tekijät, kuten ilman kosteus, hiilenpitimien jousipaine, hiiliharjan virtatiheys, liukurenkaan lämpötila sekä liukurenkaan kehänopeus. Ilmanlaadun epäpuhtauksiin ei tässä työssä otettu kantaa. Tuloksia verrattiin kirjallisuudessa esiintyviin tuloksiin.

Työn tulokseksi saatiin, että liukurenkaiden lämpötila oli alhainen, jolloin kitka nousee hiilen ja liukurenkaan välissä. Absoluuttinen kosteus liukurengastilassa oli alle ihannearvojen, osaltaan myös nosta pintojen välistä kitkaa. Kaikki osatekijät aiheuttivat hiilien korkeataajuisen värinän, joka ilmeni voimakkaana hiilien vikinänä.

Avainsanat

liukurengas, hiiliharja, hiilenpidin, magnetointi, vesivoima, generaattori

Technology, Communication and transport
Electrical and Automation Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Jari Timonen	Year	2020
Supervisor	Aila Petäjäjärvi, M.Sc		
Commissioned by	Lapland University of Applied Sciences		
Subject of thesis	Distribution of generator excitation current on brush carriage and wear of carbon		
Number of pages	66 + 0		

The subject of this thesis was the wear of the brush generator TA1 of the Taivalkoski Hydropower Plant of Kemijoki Oy. The goal was to get the wear of carbon to normal levels. The work was done for Kemijoki Oy in spring 2020.

The generator's excitation carbon wear abnormally to the tangent direction, which results in more carbon replacement during seasonal maintenance. Abnormal wear of carbon causes additional economic costs.

The theory of the thesis deals with carbon brush wear based on information from different literature. The methods used in the thesis were various measurements of temperature and humidity, as well as measurement of currents from carbon brush conductors.

Other factors leading to carbon brush wear such as air humidity, carbon holder spring pressure, carbon brush current density, slip ring temperature, and slip ring circumference were also investigated. No air quality pollutants were considered in this work. The results were compared with those found in the literature.

According to the results and observations of the work, the temperature of the slip rings was low, in addition to which the friction increases between the carbon and the slip ring. The absolute humidity in the slip ring space was also below the ideal values, which also included increasing the friction between the surfaces. All components result in high-frequency vibration of the brush, which manifested itself as a strong squeak of the brushes.

Key words Slip ring, carbon brush, carbon holder, excitation, hydro-power, generator

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	KEMIJOKI OY	8
2.1	Historia	8
2.2	Taivalkosken voimalaitos	9
3	VESIVOIMA	11
3.1	Vesivoima säätövoimana	12
3.2	Johtopyörä	13
3.3	Turbiini	13
4	TAHTIGENERAATTORI	16
4.1	Toimintaperiaate	18
4.2	Tahtigeneraattorin toiminta-alue	23
5	NAPAPYÖRÄN MAGNETOINTI	25
5.1	Harjaton magnetointijärjestelmä	26
5.2	Staattinen magnetointi	27
5.2.1	Magnetointimuuntaja	27
5.2.2	Tasasuuntaaja	28
5.2.3	Kentän heikennys	29
6	HIILIHARJAT JA LIUKURENGAS	32
6.1	Hiiliharjan kulumiseen vaikuttavat tekijät	32
6.1.1	Mekaaninen kuluminen	33
6.1.2	Virtatiheys	34
6.1.3	Lämpötila	35
6.1.4	Ilmankosteus	35
6.1.5	Kehänopeus	36
6.1.6	Liukurenkaan pinta	36
6.1.7	Hiilenpidin	37
6.1.8	Häviöt hiilen ja liukurenkaan välillä	41
6.1.9	Harjamelu	41
7	TUTKIMUSMENETELMÄT	42
7.1	Virran tiheys	42

7.2	Kosteus ja lämpötila.....	42
7.3	Virtojen mittaus harjasillalta	45
7.4	Hiiliharjapaine	47
7.5	Kehänopeus.....	47
8	TULOKSET.....	48
8.1	Ilman kosteus ja lämpötilat.....	48
8.2	Liukurenkaiden lämpötila	49
8.3	Virtojen mittaus harjasillalta	52
8.4	Kehänopeus.....	56
8.5	Virrantiheys.....	56
8.6	Harjapaine	57
9	TULOSTEN KÄSITTELY	59
9.1	Ilmankosteus.....	59
9.2	Liukurenkaan lämpötila	59
9.3	Virtojen mittaus harjasillalta	60
9.4	Kehänopeus.....	61
9.5	Virrantiheys.....	61
9.6	Harjapaine	61
9.7	Toimenpiteet.....	62
10	POHDINTA.....	63
	LÄHTEET.....	64

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Kemijoki Oy:lle. Haluan kiittää Jukka Hahkaa ja Jouko Kangasta. Lisäksi haluan kiittää työnantajani ABB:tä, sekä Kalle Rantalaa mahdollisuudesta opiskelun mahdollistamiseen. Iso kiitos kuuluu myös opettajaleni Aila Petäjäjärvelle ohjauksesta, sekä kiitos Neutek Oy Petri Kupiaiselle.

Suuri kiitos tietenkin vaimolleni, joka on ollut suurena henkisenä tukena opiskelijien edetessä.

Oulu 15.05.2020

Jari Timonen

1 JOHDANTO

Tässä työssä käsitellään Kemijoki Oy:n Taivalkosken vesivoimalaitoksen hiilien kulumista. Hiilet ovat vesivoimageneraattorin magnetoinnin kuluvia osia, niitä vaihdetaan ja huolletaan kausihuoltojen yhteydessä. Vaihtovälit riippuvat hyvin pitkälti ulkoisista tekijöistä ja kuinka hyvin ne on otettu huomioon hiiltä valittaessa.

Taivalkosken hiilien kuluminen on tällä hetkellä hallitsematonta, hiilet eivät kulu normaalisti ja hiilet joudutaan vaihtamaan joka kolmas kuukausi. Tämä ilmiö on tullut sen jälkeen esille, kun harjasiltaa muutettiin hiilihuoltoon helpottamaan. Ennen harjasillan muutosta jouduttiin hiilihuolto tekemään osin roottorin päältä, tämän vuoksi turvatoimena yläluukut jouduttiin laskemaan. Luukkujen lasku ja nosto vie aikaa ison osan kausihuolto seisakista.

Työn tarkoituksena on selvittää, kirjallisuuden ja mittauksien avulla, hiilien kulumiseen mahdolliset ulkoiset syyt. Työssä tutkitaan ulkoisia tekijöitä kuten mittamalla lämpötiloja, ilmankosteuksia, hiiliharjapaineita, sekä laskettiin hiiliharjan virtatiheyksiä magnetoinnin virta-arvoista. Työssä mitataan myös magnetointivirtoja harjasillan eri kohdista.

Työn tavoitteena on löytää ulkoisia tekijöitä hiilien kulumiselle ja saada kuluminen sallitulle tasolle.

2 KEMIJOKI OY

Kemijoki Oy on huomattava vesi- ja säätövoiman tuottaja Suomessa. Kemijoki Oy omistaa 20 vesivoimalaitosta, joista 16 sijaitsee Kemijoen vesistöalueella, kaksi Kymijoen ja kaksi Lieksanjoessa. Kolmella jokivarrella on mittaa yhteensä yli 1000 km ja asukkaita alueella on noin 200 000. (Kemijoki 2019b; 2019d; 2019e.)

Kemijoki Oy laitokset tuottivat sähköenergiaa vuonna 2018 yhteensä 4501 GWh, mikä on noin kolmannes kotimaisella vesivoimalla tuotetusta sähköstä, siitä riittäisi sähköä noin 640 000 nelihenkiselle kotitaloudelle vuodeksi. Kokonaisteho laitoksilla on yli 1100 MW. (Kemijoki 2019b; 2019d; 2019e.)

Kemijoki Oy on 50,1 prosenttisesti valtion omistama ja henkilöstön määrä 2018 oli 35 henkilöä, päätoimipaikka on Rovaniemellä (Kemijoki 2019e).

2.1 Historia

Toisessa maailmansodassa Suomi menetti kolmanneksen silloisesta vesivoimasta. Sodan jälkeen noin 80 prosenttia Suomen sähköstä tuotettiin vesivoimalla. Sotakorvausten ja kiivaan jälleenrakentamisen vuoksi oli suuri tarve sähkövoiman tuotannolle, tämän vuoksi katseet käännettiin kolmeen pohjoisen jokeen Kemijokeen, Iijokeen, sekä Oulujokeen. (Padottu voima 2015.)

Kemijoen historia vesivoiman osalta voidaan katsoa aloitetuksi jo 1920-luvulla, jolloin tehtyjen hydrologisten mittausten perusteella yksityiset ja valtio lunastivat koskiosuuksia. Valtion innostus kuitenkin laimeni, kun Imatran voimalaitosta ryhdyttiin rakentamaan 1926. (Säynäjäkangas & Aaltonen 2013, 22.)

Lapin sodassa 8.10.1944 räjäytetyn Isohaaran sillan tilalle teollisuuden omistama Pohjolan voima aloitti vesivoimalaitoksen rakentamisen 1945. Rakennettu pato mahdollisti Lapin jälleenrakentamisen. (Säynäjäkangas & Aaltonen 2013, 21-22).

Sotakorvausten ja jälleenrakentamisen kasvaessa teollisuuden energian tarve pakotti jatkamaan Kemijoen rakentamista. Vallitsevassa tilanteessa valtio katsoi välttämättömäksi perustaa valtioenemmistöisen yhtiön huolehtimaan koko Kemijoen rakentamisesta. Kemijokilaki 458/52 vahvistettiin 28.12.1952, jossa Kemijoki

Oy nimiselle yhtiölle annettiin Kemijoessa ja sen lisäjoissa vesivoimaoikeudet. Tulkintavaikeuksien vuoksi lakia muutettiin ja nimeksi tuli Kemijoen vesistöissä olevan koskiomaisuuden luovuttamisesta ja vaihdosta. (Säynäjäkangas & Aaltonen 2013, 23.)

Kemijoen perustava yhtiökokous pidettiin 15.10.1954. Perustajaosakkaat olivat Suomen valtio, Imatran voima Osakeyhtiö, Veitsiluoto osakeyhtiö. (Säynäjäkangas & Aaltonen 2013, 23).

Ensimmäisen vesivoimalaitoksen rakentaminen aloitettiin 1953 väliaikaisella lupapäätöksellä ja valtion rahoituksen turvin. Laitos valmistui 1957. (Säynäjäkangas & Aaltonen 2013, 31).

2.2 Taivalkosken voimalaitos

Taivalkosken voimalaitos Keminmaassa on yksi Suomen suurimmista vesivoimalaitoksista (kuva 1). Voimalaitos on rakennettu vuosina 1972-1976. Voimalaitosta rakentamassa oli enimmillään 830 henkeä. Voimalaitoksella kolmessa pystyakselisessa koneessa on Kaplan-turbiinit, jotka tuottavat yhteensä 151 MW. Turbiinin halkaisija on 6,756 m ja pyörimisnopeus 88,2 kierrosta minuutissa. Keskiolosuhteissa voimalan vuotuinen energiantuotto on 529 GWh. (Kemijoki 2019a.)



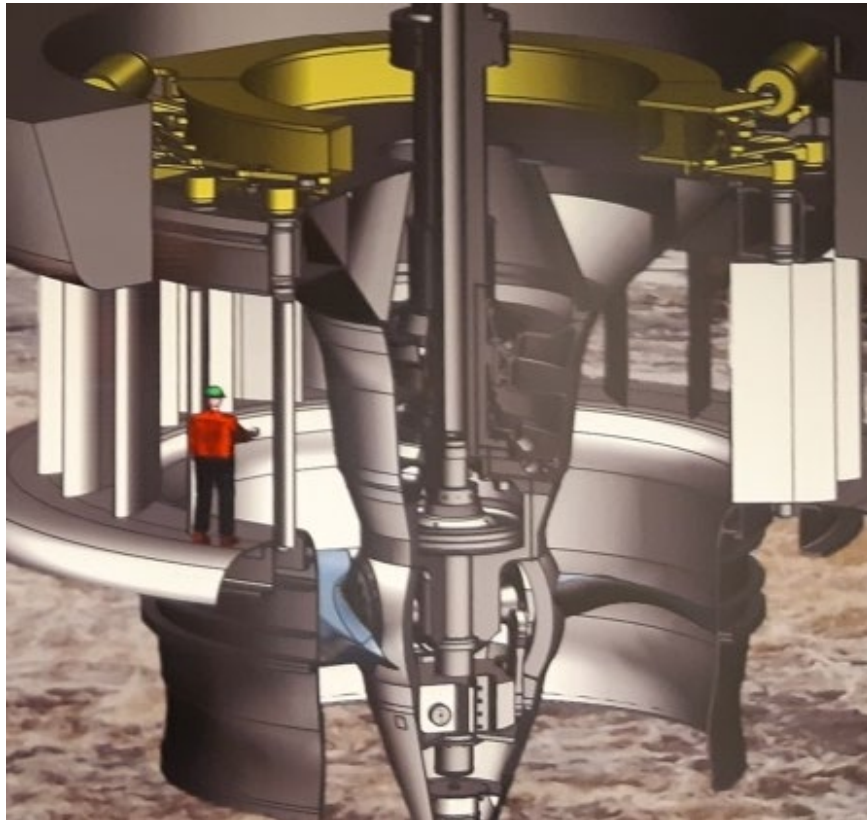
Kuva 1 Taivalkosken voimalaitos (Kemijoki 2019).

Laitos peruskorjattiin 2015-2017, jolloin turbiinit uusittiin. Turbiinit ovat Andritz Hydro Oy:n Tampere valmistamat (entinen Tampella). Andritz on ainoa Suomessa turbiineja valmistava yritys. (Salminen, 2020).

Turbiinit ovat uutta designia ja hyötysuhteen paraneminen on mallikokeilla todennettu. Turbiinit ovat öljyvapaita eli öljyn sijaan navoissa voiteluaineena on vesi, tällä toteutuksella ne ovat ympäristöystävällisempiä. (Salminen, 2020).

Turbiinin massa on 85 500 kg ja ne ovat tällä hetkellä johtopyörän halkaisijaltaan Suomen suurimmat Kaplan-turbiinit.

Kuviossa 1 nähdään turbiini, säätörengas, sekä johtosiivet, ne sulkeutuvat säätörengalla säädettäessä tiiviiksi.



Kuvio 1 Säätörengas, johtosiivet ja turbiini (Salminen, 2020)

3 VESIVOIMA

Vesivoima on tärkein uusiutuvan sähköntuotannon muoto. Vesivoima hillitsee osaltaan ilmaston muutosta ja korvaa fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Vesivoimalla tuotetaan Suomessa yli puolet uusiutuvasta energiasta ja maailmanlaajuisesti 75-80 %. (Kemijoki Oy 2019c.)

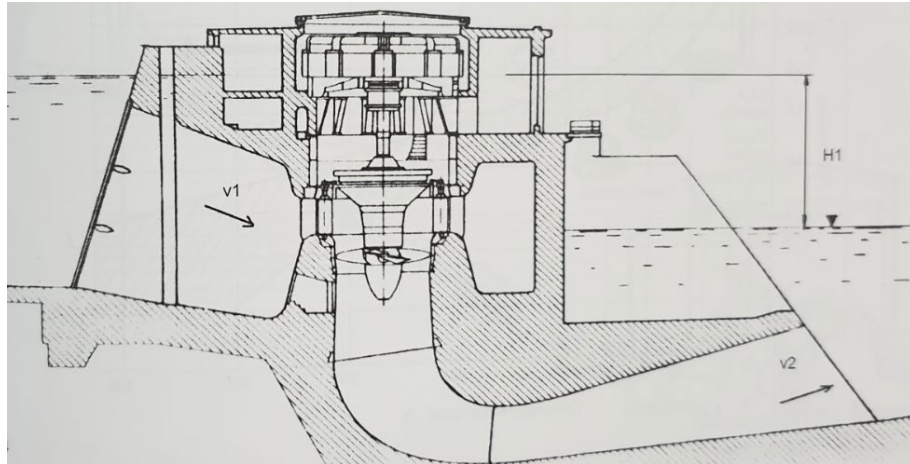
Kotimaisella vesivoimalla on hyvien säätöominaisuuksiensa vuoksi erittäin tärkeä merkitys sähköntuotannon ja kulutuksen tasapainottamisessa sekä vuorokausitasolla, että reaaliajassa. Muuttuvassa sähköjärjestelmässä tarvitaan joustavaa tuotantoa edelleen vuorokausisäätöön ja lisääntyvän sääriippuvan tuotannon vaihteluiden hallintaan. Vesivoiman säätöominaisuudet mahdollistavat siirtymisen hiilineutraaliin sähköjärjestelmään. (ÅF-Consult Oy 2018-2019, 26.)

Vesivoiman tuotanto perustuu altaisiin ja järviin varastoidun veden potentiaalienergiiaan. Kun vesi johdetaan altaasta vesivoimageneraattorin läpi, veden kineettinen energia pyörittää generaattorin turbiinia. Turbiini pyörittää generaattoria, joka muuttaa veden kineettisen energian sähköksi. (Kemijoki Oy 2019d.)

Vesivoimalaitoksessa veden potentiaalienergia muutetaan liike-energiaksi vesiturbiinissa, jonka pyörittämä generaattori kehittää sähköenergiaa. (Kemijoki Oy 2019d).

Vesivoimalaitoksen sähköjärjestelmään kuuluu generaattori, keski- ja pienjännitejärjestelmä, tehomuuntaja verkkoon liittymistä varten, omakäyttömuuntaja, apusähköjärjestelmä sekä valvonta-, ohjaus- ja suojausjärjestelmät. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-7b, 1).

Kuviossa 2 on esitetty voimalaitoksen periaate, vesi johdetaan tuloputken V1 kautta generaattorille. Turbiinissa vesi johdetaan johtopyörän läpi juoksupyörään, jota veden liike-energia pyörittää. Johto- ja juoksupyörää ohjataan säätöhydrauliikalla yhdessä tai erikseen. Vesi poistuu imurin V2 kautta. H1 esittää putouskorkeuden.



Kuvio 2 Vesivoimalaitoksen periaate (Huhtinen, Korhonen, Pimiä, & Urpalainen, 2013, 265)

3.1 Vesivoima säätövoimana

Sähkön kulutuksen ja tuotannon tulee olla tasapainossa. Tämän vuoksi sähköä tulee tuottaa sama määrä kuin sitä kulutetaan. Sähkön kulutus riippuu vuodenaikasta, viikonpäivästä ja vuorokauden ajasta. Sähköjärjestelmän pitää kyetä vastaamaan kulutuksen tarpeisiin. Jos sähköjärjestelmä tuottaa enemmän sähköä kuin kuluttaa, alkaa sähköntaajuus nousta ja vastaavasti, jos kulutus on suurempaa kuin sähköntuotanto, sähköntaajuus laskee. Parhaiten näihin kysynnän vaihteluihin pystytään vastaamaan vesivoimatuotannolla. (ÅF-Consult Oy 2018-2019, 11.)

Vesivoimalla on erinomaiset säätöominaisuudet verrattuna muihin tuotantomuotoihin. Nykyisistä tuotantomuodoista se soveltuu nopeutensa ansiosta parhaiten tuntitasoon ja sitä nopeampaan säätöön. Seisova (ei käynnissä oleva) vesivoimakoneisto saadaan täyteen tuotantotehoon yleisesti ottaen muutamassa minuutissa. Jo käyvän koneiston tuotantotehon kasvattaminen tapahtuu yleisesti sekunneissa. (ÅF-Consult Oy 2018-2019, 23.)

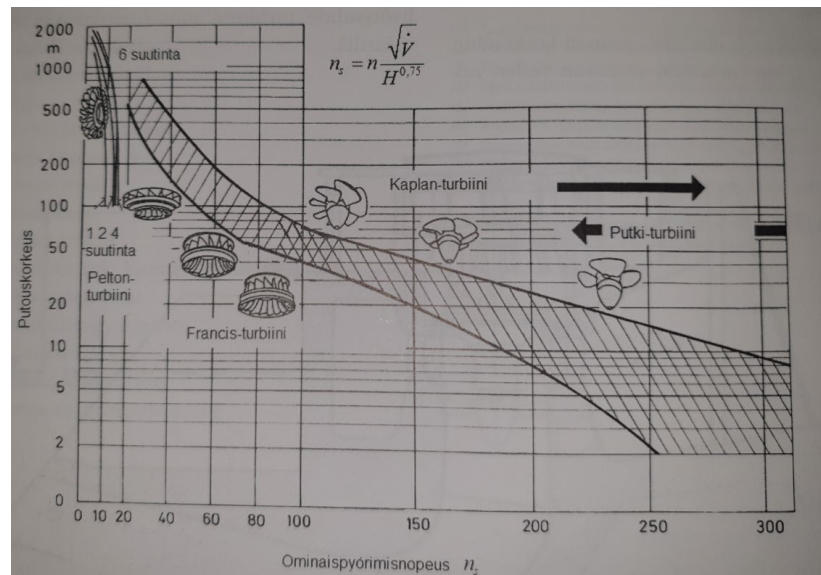
Vesivoima vastaa tuontisähkön kanssa tänä päivänä lähes kaikesta tarvittavasta säätövoimasta. Vesivoima on erittäin hyvä tuotantomuoto säädettävyydeltään. (ÅF-Consult Oy 2018-2019, 32.)

3.2 Johtopyörä

Turbiinin johtopyörä toimii generaattorin käynnistys-, säätö-, ja sulkulaitteena. Laitteessa on yleensä 12-24 kiertyvää johtosiipeä, jotka säätävät yleensä säätörenkaan mukaan yhdenaikaisesti turbiinin ympärillä. Säätörenkasta ohjaa johtopyörän servomoottori, joka on tavallisesti hydraulisylinteri. (Huhtinen ym. 2013, 274.)

3.3 Turbiini

Vesivoimalaitosten turbiinityyppejä ovat putkiturbiinit, potkuriturbiinit, Pelton-turbiinit, Kaplan-turbiinit ja Francis-turbiini. Yleisimpänä käytetään Kaplan-turbiineja, Francis-turbiineja ja putkiturbiineja. Kuviossa 3 on esitetty eri turbiinityypien käyttöalueet putouskorkeuden ja ominaispyörimisnopeuksien mukaan. (Huhtinen ym. 2013, 267.)



Kuvio 3 Vesiturbiinien käyttöalueet (Huhtinen ym. 2013, 266.)

Francis-turbiinia käytetään putouskorkeuksissa 5 -700 metriä. Turbiinit ovat pieniä ja vesimäärä on noin 20 m³/s ja teho noin 8 MW. Suuret turbiinit tehdään pystyakselisiksi ja spiraalipesä on valmistettu teräslevyistä, jotka on osittain tai kokonaan valettu betoniin. Francis-juoksupyörä on kiinteäsiipinen ja yleensä johtopyörä on säädettävä, hätäsulkulaitteena voi olla läppäventtiili. Kuvassa 2 on esitetty Francis-turbiini. (Huhtinen ym. 2013, 267-268.)



Kuva 2 Francis-turbiini vaakakoneessa

Kaplan-turbiini vedenputouskorkeus on 2-70 metriin eli se sopii Suomen olosuhteisiin, missä putouskorkeudet ovat pieniä. Turbiinissa on normaalisti neljästä kuuteen säädettävää siipeä. Siivet valmistetaan ruostumattomasta teräksestä, joka sisältää kromia ja nikkeliä.

Aikaisemmin juoksupyörien navat, joissa on siipiä kääntävä mekanismi, olivat täynnä öljyä laakerointien voitelemiseksi, mutta 2000-luvun alkupuolelta lähtien on varsinkin Suomessa alettu pääsääntöisesti käyttämään ns. voitelemattomia napoja, joissa öljyn tilalla on joko vesi tai ilma. Tällä estetään öljyn pääseminen vesistöön mahdollisissa siipitiivistevuodoissa. (Hahka 2020)

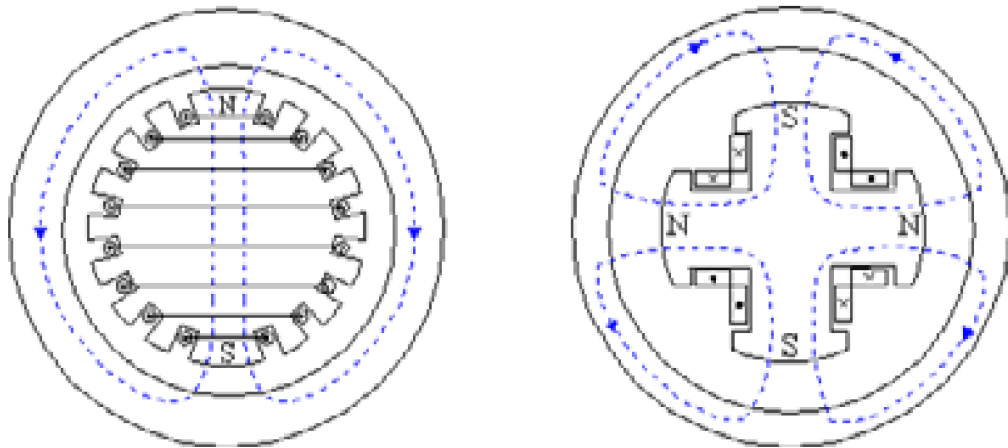
Kaplan-turbiinin kammio muotoillaan pallon tai joissain tapauksissa puolipallon muotoiseksi siiven ja kammion välisen raon pitämiseksi mahdollisimman pienenä siiven eri asennoissa ja sitä kautta häviöiden minimoimiseksi. Välykammion ja siiven välissä on 0,5-1,0 ‰ juoksupyörän halkaisijasta. Kuvassa 3 nähdään Kaplan-turbiini sekä johtosiivet ennen kannen asennusta. (Huhtinen ym. 2013, 269; Hahka 2020)



Kuva 3 Johtosiivet ja Kaplan-turbiini

4 TAHTIGENERAATTORI

Tahtikone on vaihtosähkökone ja se on osa vaihtovirtakoneiden ryhmää. Tahtikoneen staattorin eli seisojan rakenne on samanlainen kuin epätahtikoneessa. Suurin ero epä-tahtikoneeseen verrattuna on roottorin rakenteessa. Roottori eli napapyörä on joko umpinapainen kuvassa 4a tai avonapainen kuvassa 4b. Roottori pyörii koneen sisäisen magneettikentän ja syöttävän verkon kanssa suoraan samassa tahdissa eli tahtinopeudella. Tämän takia koneesta voidaan käyttää nimitystä tahtikone. (Korpinen 2008.)



Kuvio 4 a) 2-napainen lieriö- eli umpinaparoottori ja b) 4-napainen avonaparoottori (Korpinen 2008).

Tahtikoneiden yleisin käyttösovellus on kuitenkin sähköenergian tuotantoon käytettävä tahtigeneraattori. Kuvassa 4 on esitetty avonapatahtigeneraattori. Suurimmillaan tahtigeneraattoreiden tehot voivat olla 1000 MVA ja jännite 10-30 kV. Voimalaitosten generaattorit ovat poikkeuksetta kolmivaiheisia ja ne kytetään tähteen. (Korpinen 2008.)



Kuva 4 Avonapa tahtigeneraattori

Tahtikoneen pyörimisnopeus on sidoksissa syöttävän verkon taajuuteen f

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

Missä

p = Generaattorin napapariluku

Taulukko 1 Generaattoreiden pyörimisnopeudet ja napapariluvut, kun taajuus $f=50$ Hz (Aura & Tonteri 2009, 347).

p	$\frac{n}{r/min}$	p	$\frac{n}{r/min}$	p	$\frac{n}{r/min}$	p	$\frac{n}{r/min}$
1	3000	8	375	15	200	28	107 1/7
2	1500	9	333 1/3	16	187 1/2	30	100
3	1000	10	300	18	166 2/3	32	93 3/4
4	750	11	272 8/11	20	150	34	88 4/21
5	600	12	250	22	136 4/11	36	83 1/3
6	500	13	230 1/13	24	125	38	78 18/19
7	427 4/7	14	214 2/7	26	115 5/13	40	75

Avonapakoneita käytetään hitaasti pyörivissä sovelluksissa, esimerkiksi kompressorikäytöissä sekä vesivoimageneraattoreina. Avonapakoneet ovat suuria,

korkeita ja leveitä halkaisijaltaan. Hitaan pyörimisnopeuden vuoksi avonapakoneen napaparilukua on kasvatettava, jotta kone saadaan pyörimään verkon taajuuden nopeudella (Taulukko 1). (Korpinen 2008.)

Tahtikoneen staattorissa on kolmivaiheinen vaihtovirtakäämitys kuten epätahtikoneissakin. Ero epätahtikoneisiin on, että roottorin magnetointikäämityksiin on johdettava magnetointivirtaa, joka on tasavirtaa. Tämä tasavirta synnyttää roottorin magneettinapaan pysyvän magneettivuon, vaikka roottori pyöriikin. Tätä magnetoimisvirran synnyttämää magneettivuota sanotaan päävuoksi. (Korpinen 2008.)

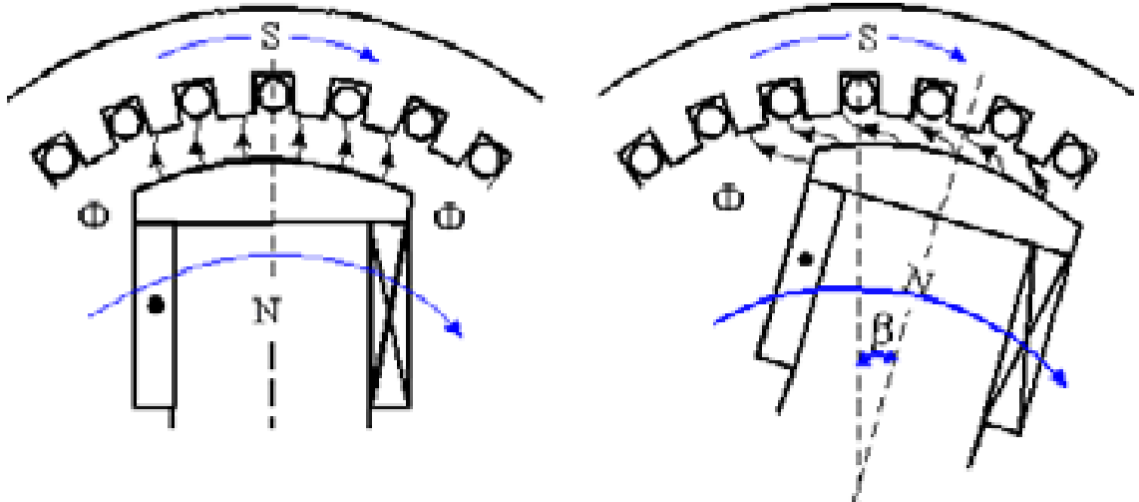
Avonaparoottorissa on akselille sijoitettu koneen napaluvun mukainen määrä magneettinapoja. Staattorikäämitys on aina tehty samalle napaluvulle kuin roottori. Jokaisella navalla on omat magnetointikääminsä, jotka on kytketty sarjaan siten, että navat magnetoituvat vuorotellen S- ja N- navoiksi. Koska napojen vuo ei tasavirralla vaihtelee, ei niissä synny rautahäviöitä, jolloin ne tehdään massiivisesta teräksestä. Navan päässä on napakenkä, joka on muotoiltu siten, että vuon jakautuminen napakengän ja staattorikehän välissä on mahdollisimman sinimäinen. Ilmaväli ei siis ole vakio, vaan suurenee reunoille päin. Avonapaisia koneita käytetään hitaasti pyörivissä koneissa (75- 500 rpm), kuten vesivoimalaitosten generaattoreissa. Suurten avonapageneraattoreiden halkaisijat voivat olla useita metrejä. (Korpinen 2008.)

Tahtimoottorit ja useimmat generaattoritkin ovat vaaka-akselikoneita. Vesivoimalaitosten generaattorit sen sijaan ovat yleensä pystyakselikoneita. Niiden akseli tuetaan ohjaus- ja kannatuslaakereilla. Kannatuslaakerin varassa on kaikkien pyörivien osien paino sekä vesiturbiinin hydraulinen voima. Kannatuslaakeri voi olla joko napapyörän ylä- tai alapuolella.

4.1 Toimintaperiaate

Tahtikoneessa toimintaideana on, että staattorin ja roottorin magneettinapojen välille luodaan magneettinen kytkentä. Tässä kytkennässä staattorin N-navat ovat "kiinni" roottorin S-navoissa ja päinvastoin. Tämä kytkentä saa staattorin

magneettikentän ja roottorin pyörimään täsmälleen samalla nopeudella. Kuormitetun tahtikoneen käyttäytymistä voidaan tarkastella kuvion 5 avulla. (Korpinen 2008.)



Kuvio 5 Generaattorin staattorin ja roottorin magneettikenttien välinen kytkentä a) tyhjäkäynnissä ja b) kuormitettuna (Korpinen 2008.)

Kuviossa 5 on esitetty staattorin ja roottorin magneettikenttien välinen kytkentä generaattorikäytössä. Tyhjäkäynnissä kenttien vastakkaismerkkiset navat ovat tarkalleen vastakkain. Kun voimakoneen tehoa lisätään (kuva b), pyrkii roottori kiihtymään verkon taajuudella pyörivän staattorikentän edelle, jolloin napojen välinen kulma β (ns. tehokulma) pyrkii kasvamaan. (Korpinen 2008.)

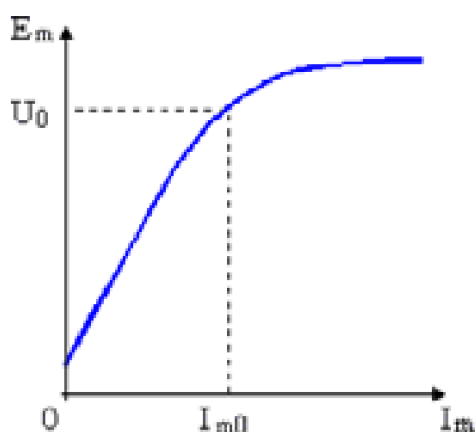
Kun tahtikonetta käytetään generaattorina, staattorin kolmivaihekäämityksiin induoituvan sähkömotorisen jännitteen taajuus määräytyy napapyörän pyörimisnopeudesta ja sen tehollisarvo saadaan kaavasta 2 (Korpinen 2008).

$$E_m = 4,44 * f * N * \varphi \quad (2)$$

missä

f	on	taajuus
N	on	staattorin vaihekäämin kierrosmäärä
φ	on	yhden navan päävuo. (Korpinen 2008).

Yhtälöstä 2 havaitaan, että kaikki muut ovat vakioita paitsi magnetoimisvirran synnyttämä magneettivuon suuruus. Vuon suuruus puolestaan riippuu magneetoivien ampeerikierrosten lukumäärästä, jolloin siihen voidaan vaikuttaa suoraan magnetoimisvirtaa säätämällä. Jos magnetoimisvirta on nolla, ei kone kehitä jännitettä kuviossa 6 nähdään koneen kehittämän jännitteen muuttuminen, kun magnetointivirtaa I_m muutetaan (Korpinen 2008.)

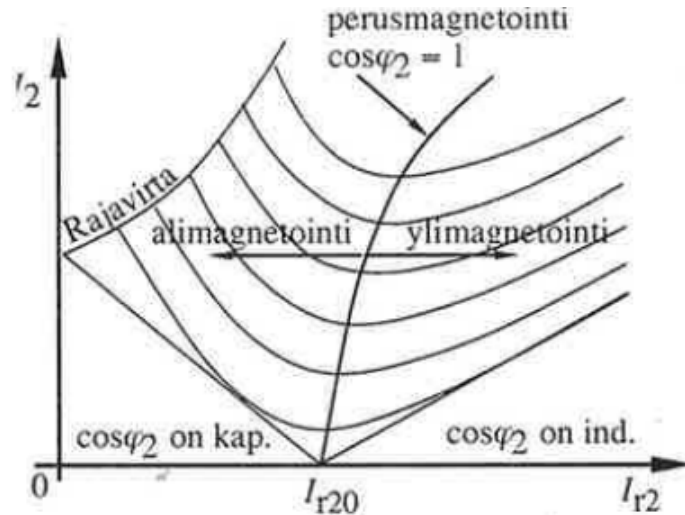


Kuvio 6 Staattorikääditykseen indusoituva jännite U magnetoimisvirran I_m funktiona (Korpinen 2008).

Kaavan 2 mukaan generaattorin magnetointia kasvattamalla kasvaa generaattorin kehittämä jännite E_m . Tästä seuraa, että generaattorin liitinjännite kasvaa. Generaattorin ollessa liitettynä ns. jäykkään sähköverkkoon, jossa jännite on vakio, ei koneen magnetoimisvirran nostaminen vaikuta generaattorin liitinjännitteeseen, vaikka se vaikuttaakin generaattorin kehittämään sähkömotoriseen jännitteeseen E_m . Staattorivirran pätökomponentti ei voi muuttua, koska generaattoria pyörittävän voimakoneen teho määrää generaattorin antaman pätötehon suuruuden. Magnetointivirran suuruudella voidaan tällöin vaikuttaa vain virran loiskomponenttiin. Kun magnetointia pienennetään, ottaa kone verkosta tarvitsemansa loisvirran eli kone kuluttaa tällöin loistehoa. Vastaavasti ylimagnetoituna kone tuottaa loistehoa verkkoon. (Korpinen 2008.)

Kuviossa 7 on esitetty, kuinka koneen staattorivirta muuttuu magnetoimisvirran funktiona. Käyrien muodon perusteella niitä kutsutaan V-käyriksi. Kuvasta havaitaan, että magnetointia voidaan pienentää vain tiettyyn rajaan asti, mikä määräy-

tyy kuormituksesta. Jos magnetointia pienennetään tämän rajan yli, ei kone kykene enää kehittämään kuormituksen vaatimaa momenttia ja kone putoaa tahdista. (Korpinen 2008.)



Kuvio 7 Tahtigeneraattorin teoreettinen kuormitus eli V-käyrä (Korpinen 2008).

Jos voimakoneen tehoa kasvatetaan liikaa, kasvaa $\beta > 90^\circ$, jolloin staattorin ja roottorin magneettinapojen välinen yhteys katkeaa ja kone putoaa tahdista. Jos tahtikone putoaa tahdista, toimii se vuorotellen generaattorina ja moottorina magneettinapojen asemasta riippuen. Tämä aiheuttaa verkossa teho- ja jänniteheilahteluja, jotka voivat aiheuttaa verkkoon vakavia häiriöitä. Tahdistasta pudonnut generaattori on irrotettava verkosta. (Korpinen 2008.)

Tahtigeneraattori pyörii synkronisella nopeudella verkkoon nähden. Jos verkkoon syötettävää pätötehoa halutaan lisätä, on generaattoria pyörittävän turbiinin tehoa lisättävä. Tehon nosto siirtää generaattorin napapyörää δ verran eteenpäin pyörimisnopeuden pysyessä vakiona. Kuvassa 5a on esitetty edellä mainittu tehon lisäys. Turbiinin tehoa lisättäessä siirtyy napapyörä δ_1 edellisestä asentoon edelle. Syötettävä teho verkkoon P_1 , tehoa lisättäessä kasvaa tehokulma δ lisättyä tehoa vastaavaan asemaan δ_2 ja verkon syötetään tehoa P_2 . Turbiinin tehoa voidaan lisätä P_{\max} arvoon, joka on generaattorin rajateho. Jos turbiinin tehoa lisätään vielä edellisestä, pienentyy verkkoon syötettävä teho, tämä merkitsee generaattorin voimakoneelle kehittämän vastamomentin pienenemistä, generaattorin pyörimisnopeus kasvaa ja putoaa tahdistasta. (Aura & Tonteri 1993, 104.)

Normaalisti verkkoon kytketty tahtigeneraattori käy samassa tahdissa verkon kanssa. Rajatehojen ylittäminen ei yleensä tipauta generaattoria tahdist, poikkeuksellisia syitä tahdista tipahtamiseen voi olla esimerkiksi verkon vikatilanne, jossa jännite pienenee ja impedanssi kasvaa, jolloin rajateho pienenee ja generaattori joutuu epästabiilille alueelle ja tipahtaa tahdist. (Aura & Tonteri 1993, 104.)

Kuviossa 5b nähdään jännitteen U tai sähkömotorisenvoiman E :n pienentää rajatehoa ja tehokulma δ lisääntyy. Tehokulmayhtälön mukainen käyrä esittää tilannetta, jossa pienentynyt jännite on saanut tehokulman 90° ja generaattorin rajateho pienentyy arvoon P_G , generaattori putoaa tahdist, jos tehokulma vielä kasvaa. (Aura & Tonteri 1993, 104.)

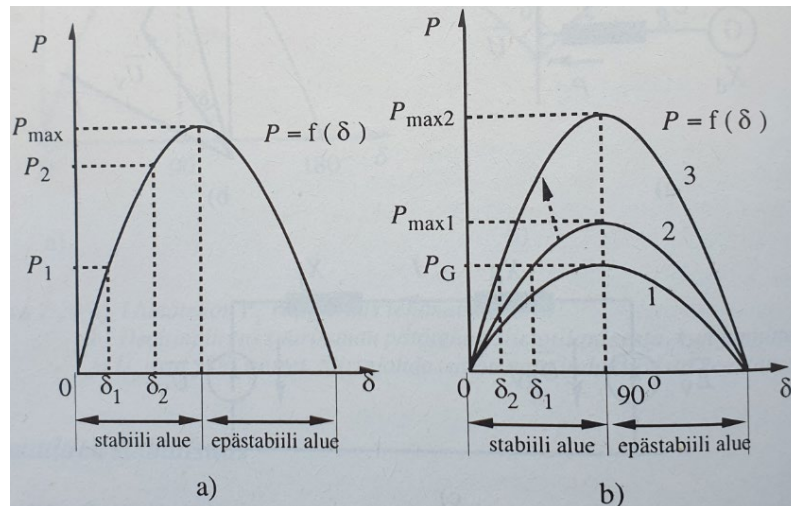
Tehokulmayhtälön kaava

$$P = \frac{U * E}{X_d + X_j} * \sin \delta \quad (3)$$

missä

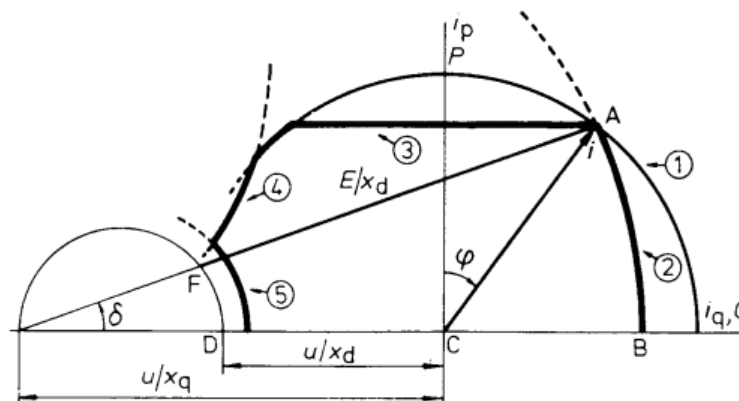
P	on	Teho
U	on	jäykän verkon jännite
E	on	sähkömotorinenvoima
X_d	on	pitkittäisreaktanssi
X_j	on	johdon reaktanssi
$\sin \delta$	on	tehokulma. (Aura & Tonteri 1993, 104)

Magnetointia lisäämällä voidaan tehokulmaa pienentää tahdissa pyörivässä generaattorissa. Kuvassa 5b nuolella esitetään tehokulmakäyrän siirtyminen ja tehokulman pienentyminen arvosta δ_1 arvoon δ_2 .



Kuvio 8 a) Tahtigeneraattorin tehokulman muutos lisääessä turbiinin tehoa
 b) Tahtigeneraattorin tehokulman muutos jännitettä muutettaessa (Aura & Tonteri 1993, 104).

4.2 Tahtigeneraattorin toiminta-alue



Kuvio 9 Tahtigeneraattorin PQ-diagrammi (ABB:n TTT-käsikirja 2000-7b, 17).

Kuviossa 9 on esitetty PQ-diagrammin kuvalla, miten generaattori voi ottaa loistehoa verkosta ja antaa pätötehoa verkkoon. Kuvassa myös generaattorin toimintapisteet pätötehoa ja loistehoa rajoittavat rajat.

- A. Kuormituspiste eli nimellinen käyttöpiste
- B. Tyhjäkäyntipiste nimellisellä magnetoinnilla
- C. Tyhjäkäyntipiste tyhjäkäyntimagnetoinnilla
- D. Tyhjäkäyntipiste ilman magnetointia

1. Vakiostaattorivirtakäyrä, staattorin lämpenemisen asettama raja
2. Vakiomagnetointikäyrä, roottorin lämpenemisen asettama raja
3. Voimakoneen pätötehoraja
4. Käytännön stabiilisuusraja
5. Alimagnetointiraja. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-7b, 17)

5 NAPAPYÖRÄN MAGNETOINTI

Tahtikone tarvitsee napapyörän magnetointiin tasavirran. Harjallisessa tahtikoneessa tasavirta syötetään ulkopuoliselta magnetointilaitteelta hiiliharjojen ja liukurenkaiden kautta napapyörään. Harjattoman tahtikoneen akselille on rakennettu pieni vaihtovirtageneraattori, jonka pyörivästä ankkurista saadaan diodisilan kautta magnetoimivirta. Tämän apukoneen navat ovat kiinteät (staattorissa) ja syötettävissä suoraan ulkopuolelta ja tarvittava magnetoimisteho on pieni. (Korpinen 2008.)

Tahtigeneraattorin magneettinavat on toteutettu muotoilemalla tai käämitystekniskeinoin siten, että ne magnetoitaessa synnyttävät ilmaväliin sinimuotoisen magneettikentän. Kun napapyörää pyöritetään voimakoneella, leikkaavat roottorinvuoviivat staattorikäämityksiä, jolloin staattoriin indusoituu sinimuotoinen vaihtojännite. Magnetoimismenetelmien perusteella koneet voidaan jakaa harjallisiin ja harjattomiin tahtikoneisiin. (Korpinen 2008.)

Generaattoreissa käytetään aina magnetointia säätäviä laitteita, sekä jännitteen säätäjiä. Säätäjä pitää kuormituksesta riippumatta jännitteen, taajuuden ja lämpötilan halutussa asetteluarvossa. Generaattoreiden tai verkon rinnan käytössä säätäjä säätää reaktiivista tehoa verkon asettelusta ja jännitteestä riippuen. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-7b, 18.)

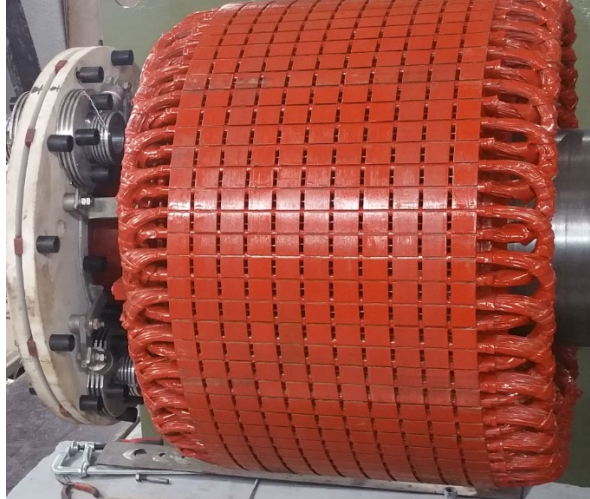
Tahtigeneraattorin magnetointijärjestelmä jaetaan toiminnallisesti kolmeen eri osaan:

1. magnetointilaitteisto
2. säätöjärjestelmä
3. käsiohjauslaitteisto

Magnetointilaitteisto muuttaa mekaanisen tehon tai vaihtosähkötehon tasasähköksi, jolla generaattoria magnetoidaan. Säätäjä käsittelee generaattorista mitattuja suureita ja ohjaa magnetointilaitteistoa. Magnetointia voidaan säätää myös manuaalisesti käsiohjauslaitteistolla. (Mörsky & Mörsky 1994, 72.)

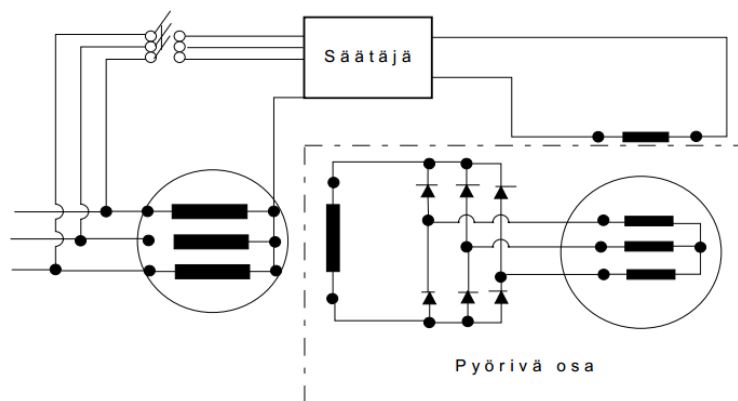
5.1 Harjaton magnetointijärjestelmä

Harjattomasti magnetoidussa tahtigeneraattorissa magnetoimisvirta synnytetään roottorin kanssa samalle akselille sijoitetulla magnetointigeneraattorilla, jolloin magnetointiteho saadaan suoraan päägeneraattorin akselilta.



Kuva 5 Magnetointigeneraattorin roottori ja tasasuuntaussilta

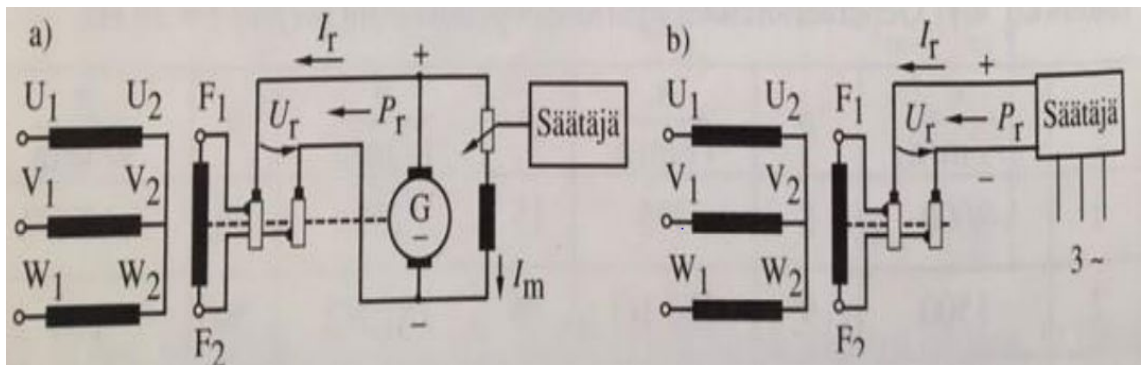
Kuvassa 5 nähdään magnetointigeneraattorin kolmivaihekäämityn roottorin, magnetoimiskäämi on staattorissa. Päägeneraattorin magnetoimisvirta syötetään akselille kiinnitetyllä tasasuuntaussillalla. Magnetointigeneraattorin magnetointia säädetään säätäjällä, joka on periaatteessa samanlainen kuin harjallisenkin, mutta käytetyt tehot ovat paljon pienemmät (kuvio 10). Haittapuolena on hitaus ja se, ettei akselilla olevaa tasasuuntaussiltaa voi huoltaa generaattorin ollessa käynnissä. (Mörsky & Mörsky 1994, 73.)



Kuvio 10 Generaattorin harjaton magnetointi (ABB:n TTT-käsikirja 2000-7b, 19).

5.2 Staattinen magnetointi

Varsin yleinen käytössä oleva harjallinen magnetointi kuviossa 11. Harjallisesti magnetoitussa generaattorissa synnytetään aikaisemmin magnetoimisvirta tasasähkögeneraattorilla. Nykyään magnetoimisteho saadaan generaattorin navoista magnetointimuuntajalla. Staattinen magnetointilaitteisto syöttää magnetoimisvirran roottoriin harjojen ja liukurenkaan välityksellä. Laitteiston hyviä puolia ovat varsin suuri nopeus ja se, ettei siinä ole liikkuvia, nopeasti kuluvia osia. Huonoja puolia ovat kuluvat harjat, sekä suuret tehot tasasuuntaajassa. Epäkohtien merkitys on kuitenkin hyvin pieni hyviin puoliin verrattuna. (Mörsky & Mörsky 1994, 72-73.)



Kuvio 11 Harjallisen tahtigeneraattorin magnetoimismenetelmät a) Magnetointi tasasähkölähteestä b) Magnetointi vaihtosähkölähteestä. (Aura & Tonteri 2009, 348).

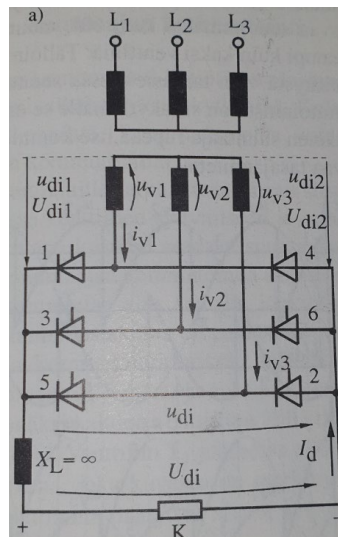
5.2.1 Magnetointimuuntaja

Magnetointijännite muunnetaan sopivaksi magnetointimuuntajalla, johon teho voidaan ottaa generaattorin kiskostosta tai muusta ulkoisesta jännitelähteestä. Muuntajana voidaan käyttää hartsieristeisiä kuivamuuntajia, jotka kestävät samat koe- ja syöksyjännitteet kuten öljyeristeinen muuntaja. Kuivamuuntajat ovat huoltovapaita ja pienen palokuorman sekä itsesammuvuutensa ansiosta soveliaita palovaarallisiin tiloihin. (ABB:n TTT-käsikirja 2000-11a, 13.) Muuntaja mitoitetaan roottorille tasasuunnattavan virran ja jännitteen mukaan.

5.2.2 Tasasuuntaaja

Generaattorin magnetointijännite tasasuunnataan diodi- tai tyristorisillalla. Vaihtosähkö tasasuuntaukseen tuodaan magnetointimuuntajalta tai muusta tehollähteestä. Verkkokommutoivia suuntaajia eli diodisilloja käytetään, jos magnetointivirran suuruutta ei tarvitse säätää. Pakkokommutointipiirejä käytetään suuritehoisissa laitteissa vaihtosuuntaajissa ja tasavirtakatkojissa, jotka on valmistettu tyristoreista. (Aura & Tonteri 2009, 394.)

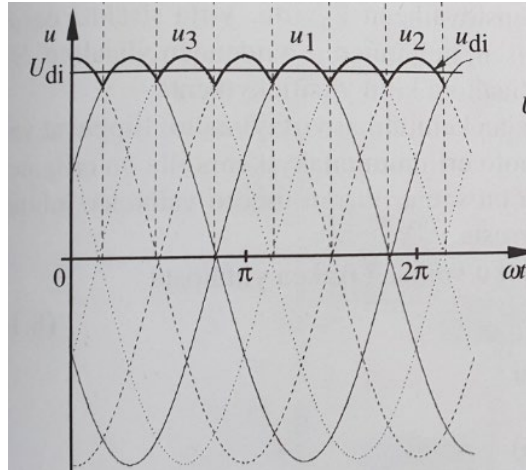
Kuviossa 12 kolmivaiheinen siltakytkenä. L1, L2 ja L3 esittää tasasuuntaus sillan kolmivaiheista syöttöverkkoa. Alhaalla olevilta plus- ja miinusnavoilta saadaan tasasuunnattu jännite.



Kuvio 12 Kolmivaiheinen siltakytkenä (Aura & Tonteri 2009, 408.)

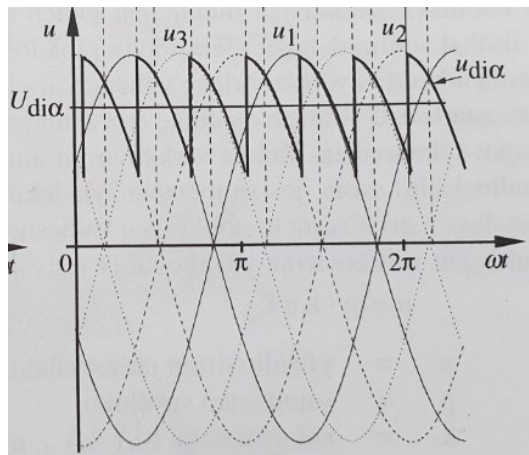
Kun tyristorit saavat sytytyspulssin ne siirtyvät johtavaan tilaan, pulssi tulee jännitteensäätäjältä jännitteen ollessa positiivinen tyristorin yli. Tyristoreiden sytytyskulman α suuruuden määrää myös jännitteensäätäjä. Vaadittu magnetointivirta saadaan sytytyskulmaa säätämällä, jolloin saadaan haluttu jännite generaattorilta verkkoon. Sytytyskulman α ollessa 0 tyristorisilta toimii kuten diodisilta ja plus ja miinus navoilta saatava jännite on suurimmillaan, kun sytytyskulmaa viivästytetään, pienenee magnetoimiskäämityksen jännite. (Ahokas 2011,18, Boldean 2006, 448 mukaan)

Kuviossa 13 nähdään ohjatun kolmivaihe siltakytkennän jännitteen keskiarvon, ohjauskulman α ollessa 0° , kuvio voisi esittää myös diodisuuntaajaa.



Kuvio 13 Diodisuuntaajan tai tyristorisuuntaaja, ohjauskulman ollessa $\alpha=0^\circ$. (Aura & Tonteri 2009, 409).

Kuviossa 14 näemme siltakytkennän, josta näkyy jännitteen keskiarvo sytytyskulma ollessa $\alpha=40^\circ$



Kuvio 14 Tyristorisuuntaaja, jossa ohjauskulma $\alpha=40^\circ$ (Aura & Tonteri 2009, 408).

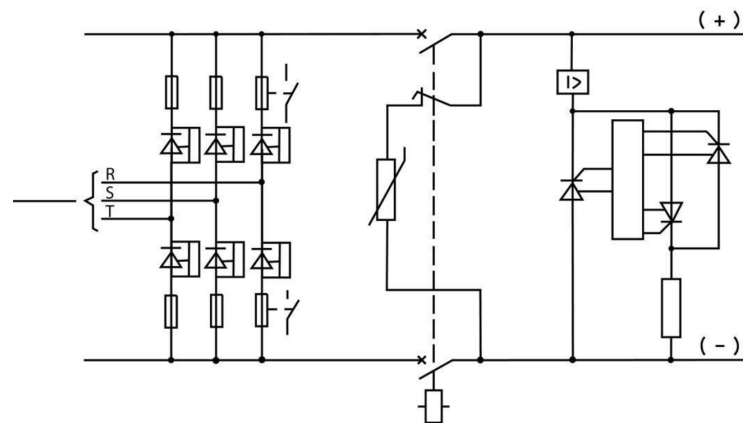
5.2.3 Kentän heikennys

Generaattorin häiriö- ja vikatilanteissa voivat oikosulkuvirrat olla erittäin suuria generaattorissa ja magnetointijärjestelmässä, tämän vuoksi tulee magneettikenttä katkaista mahdollisimman nopeasti. Pelkkä generaattorikatkaisijan avaus

ei riitä, vaan tarvitaan kentänheikennysjärjestelmää erottamaan roottoriipiiri järjestelmästä ja magnetointiteho saadaan nopeasti pieneen määrään. Pahin tilanne, joka määrää järjestelmän mitoituksen, on kolmivaiheinen oikosulku generaattorin navoissa. (Marttinen 2010, 10, Jurin, Brklja & Koli 2005, 55-59 mukaan)

Staattisen magnetoinnin kentänheikennys koostuu kenttäkatkaisijasta sekä epälinearisesta kentänheikennysvastuksesta. Vikatilanteissa virran syöttö roottori-käämeihin voidaan katkaista kenttäkatkaisijalla. Kentänheikennyksessä katkaisijan avautuessa energia muuttuu lämmöksi kentänheikennysvastuksella. Vastuksella saadaan virta pieneen määrään mitä isompi vastus on. Kenttäkatkaisija voidaan sijoittaa vaihto- tai tasasähköpuolelle. (Marttinen 2010, 10, Jurin, Brklja & Koli 2005, 55-59 mukaan)

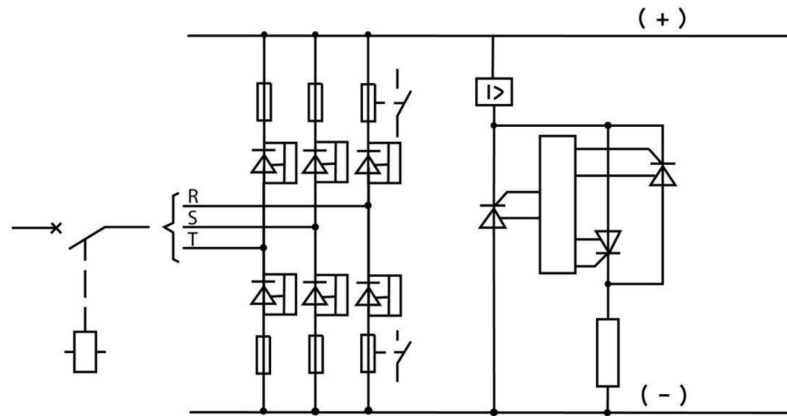
Yleensä kentänheikennysjärjestelmässä käytetään DC-puolen kenttäkatkaisijaa, joka sijoitetaan magnetointipiiriin ja tyristorisillan väliin (kuvio 15). Katkaisija erottaa molemmat navat ja ylijännite suojaus toimii erillisenä toimintona. Jos kentänheikennysvastus tai kenttäkatkaisija ei toimi, roottorin ylijännitesuojaus voi toimia kentänheikentäjänä. (Marttinen 2010, 10, Jurin, Brklja & Koli 2005, 55-59 mukaan)



Kuvio 15 Kentänheikennysjärjestelmä DC-kenttäkatkaisijassa ja erillisellä roottorin ylijännitesuojapiirillä. (Marttinen 2010, 10, Jurin, Brklja & Koli 2005, 55-59 mukaan).

Kenttäkatkaisija voi sijaita myös vaihtosähköpuolella ennen tyristorisiltaa, jolloin katkaisijan avautuminen aiheuttaa ylijännitteen magnetointikäymyksessä, kuvio

16. Ylijännite aktivoi ylijännitesuojan, jolloin ylijännite pienenee ja poistaa magnetoinnin. Vikaantuessa ei ole olemassa vaihtoehtoista kentänheikennystä estämään roottorin vikaantumista. (Marttinen 2010, 11, Jurin, Brklja & Koli 2005, 55-59 mukaan)



Kuvio 16 AC-kenttäkatkaisijalla ja yhteisellä kentänheikennysvastuksella roottorin ylijännitesuojauksen kanssa. (Marttinen 2010, 11, Jurin, Brklja & Koli 2005, 55-59 mukaan).

6 HIILIHARJAT JA LIUKURENGAS

Hiiliharjojen ja liukurenkaiden avulla syötetään virta roottorin navoille. Harjat ovat useimmiten valmistettu sähkögrafiitista, koska sen käyttöalue on laaja (Schunk 2004,17) ja liukurenkaat messingistä tai teräksestä. Renkaita on vähintään kaksi + (anodi), jossa virta kulkee hiileltä liukurenkaalle, sekä – (katodi), jossa virta kulkee liukurenkaalta hiileen. Hiili asennetaan hiilenpitimeen, jossa se puristetaan jousen avulla liukurengasta vasten, puristuspaine määräytyy monesta eri tekijästä, esimerkiksi hiilenlaadusta, värinästä, käyttötarkoituksesta sekä liukurenkaan kehänopeudesta. Hiilen päätehtävä on mahdollisimman hyvä sähköinen kontakti, sekä minimaalinen mekaaninen kuluminen. Hiiliä on yhtä paljon + ja – puolella.

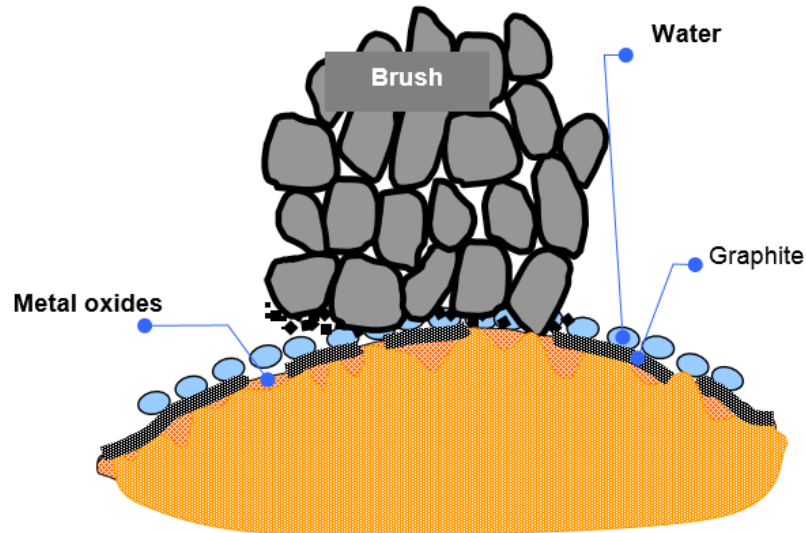
6.1 Hiiliharjan kulumiseen vaikuttavat tekijät

Hiiliharjojen kuluminen riippuu suoraan mekaanisista ja sähköisistä häviöistä. Harjojen kuluminen voi johtua myös epäsuorasti monista muista tekijöistä, jotka ovat konekohtaisia:

- muuttuva kuormitus ja nopeus
- virran ja jännitteen laatu (harmoniset yliaallot)
- värinä tai epätasainen liukurenkaan pinta
- jännitteen napaisuus (positiivinen kuluu nopeammin kuin negatiivinen)
- jäähdytysilman laatu (kosteus, kaasut, pöly).
- lämpötila
- hiilenpitimien kunto
- liukurenkaan pinna kunto. (Mersen 2017a)

Hiilien kuluminen ei saavuta hyvää minimitasoa ilman liukurenkaaseen syntyvää patinaa (Oksidi). Patina on puolijohtava μm murto-osia vahva kalvo. Patina vähentää liukurenkaan ja hiilen välistä kitkaa. Patina syntyy, kun lämpötila, kehänopeus, harjanlaatu, virtatiheys, harjan kiillotusvaikutus ja ympäristötekijät (ilman

kosteus ja jäähditysilmän puhtaus) ovat ihanteelliset (Morganite 1978, 157). Kuviossa 17 nähdään patinan muodostuminen. Patina näkyy harjaradalla ruskean-sävyisenä selvästi liukurengas pinnasta erottuvana pintana. Väri voi vaihdella vaaleanruskeasta lähes mustaan ja hyvä patina on väriltään tasainen (ei aina). (Morgan national 1998, 8; Mersen 2017.)



Kuvio 17 Patinan muodostuminen. (Schunk 2004, 59.)

Patina voi myös patinanmuodostukselle edullisissa olosuhteissa kasvaa niin paksuksi, että se alkaa lohkeilla pois. (Pirhonen 1998).

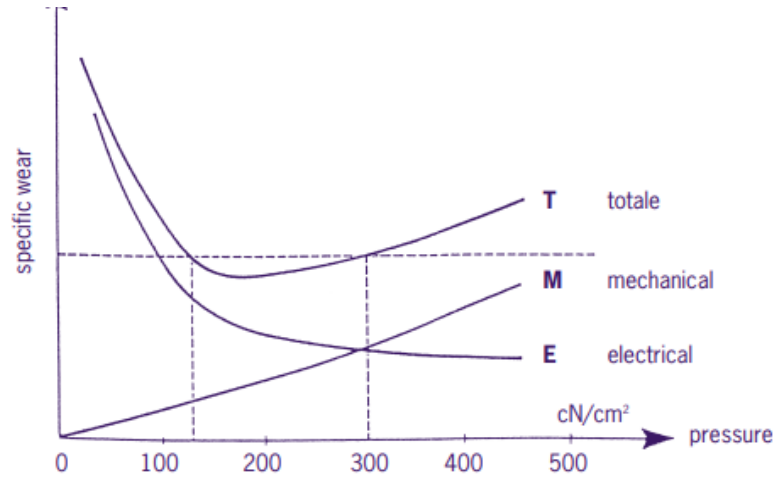
Koska patina on puolijohtavaa ainetta, olosuhteet lohkeilevan patinan yhteydessä ovat harjoille vaikeat. Samoin liukurenkaan pinnanlaatu huononee. (Pirhonen 1998).

Hiiliharjojen kulumiselle on erittäin hankala tai käytännössä mahdotonta antaa kiinteää vastausta. Kuormituksesta käyttöolosuhteista ja hiiliharjan materiaaleista johtuvat kulumiset ovat normaali tasolla 2-7 mm/1000h. Päätekijä kuitenkin kulumiselle on hiilen kulkema matka liukurenkaalla. (Schunk 2004, 57-58.)

6.1.1 Mekaaninen kuluminen

Kuviossa 18 on esitetty hiilen kulumisen johtavat tekijät. Harjan mekaaninen kuluminen (M) on suunnilleen verrannollinen mekaaniseen harjapaineeseen. Har-

jan sähköinen kulumisen (E) on voimakasta alhaisella harjapaineella, koska kosketus on huono. Harjan kokonaiskulutus (T) muodostuu mekaanisen ja sähköisen kulumisen summasta. (Mersen 2017a)



Kuvio 18 Harjan mekaaninen ja sähköinen kulumisen (Mersen 2017a)

6.1.2 Virtatiheys

Virtatiheys sähkögrafiittiharjoille on jatkuvassa käytössä noin 8-12 A/cm², mutta jonkin verran suurempiakin käytetään edullisissa olosuhteissa. Liian suuresta jatkuvasti esiintyvistä virtatiheydestä voi aiheutua paitsi lisääntyneitä lämpenemistä ja kulumista, myös patinan kasvamista liian paksuksi sekä harjalaitteiden likaantumista.

Virtatulva hiiliharjan ja liukurenkaan välillä ei ole koko pinta-alalla kattava vaan pieni osa kosketuspisteistä johtaa ja siirtää kokonaisvirtaa. Virta hiiliharjan eri kosketuspisteissä on erittäin korkea, tämän takia pieni määrä kuparista ionisoituu. Kun kosketuspiste lakkaa toimimasta, syntyy uusi kosketuspiste, näin ollen hiiliharjan ja renkaan välissä on useita suuren virran omaavia kosketuspisteitä. Kuparioksidihiuksien jääminen liukurenkaan pinnalle, kun kosketuspiste lakkaa ja tästä syntyy patina. (Morganite 1978, 68.)

Lyhytaikaisesti voidaan harjojen kannalta sallia tuntuvasti suurempia virtatiheyksiä. Käynnistyksissä ja muissa lyhytaikaisissa kuormitustilanteissa voi virtatiheys nousta esim. arvoon 25 A/cm² aiheuttamatta haittaa.

Virrantiheys (A/cm²) voidaan laskea kaavalla. (Schunk 2004, 47).

$$A/cm^2 = \frac{\text{Kokonaisvirta [A]}}{\frac{\text{Hiilen lukumäärä} * t [cm] * a [cm]}{2}} \quad (3)$$

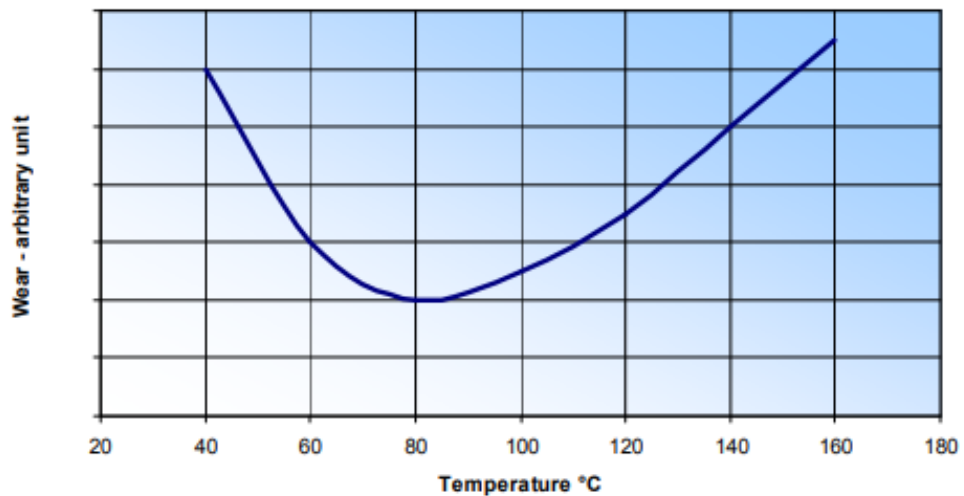
missä

t on Tangentiaalinen hiilenmitta[cm]

a on Aksiaalinen hiilenmitta[cm].

6.1.3 Lämpötila

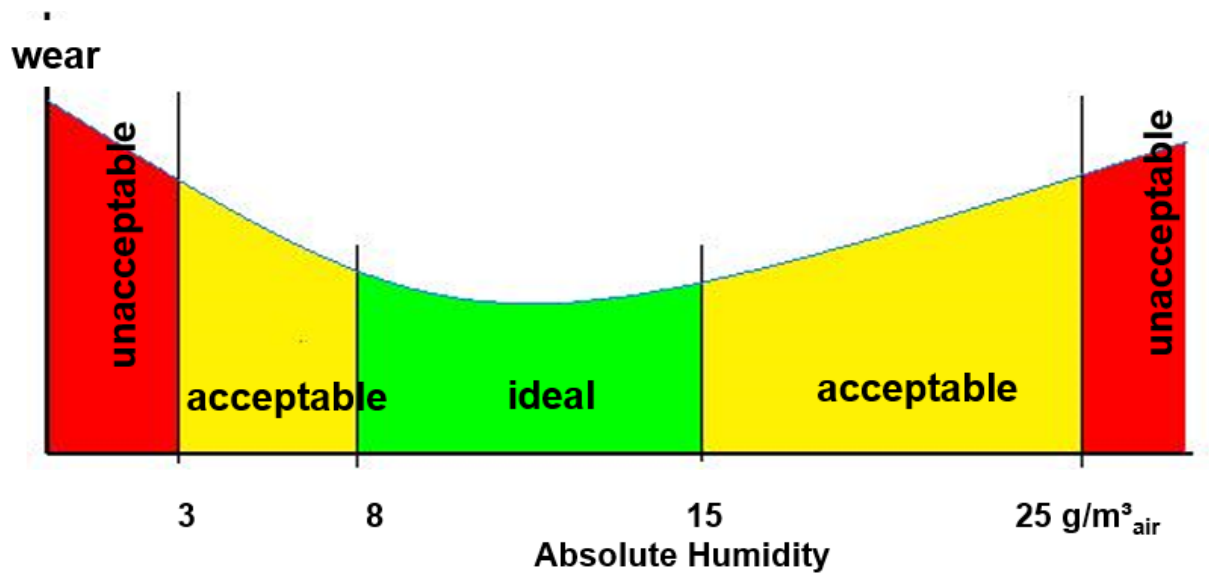
Kuviossa 19 esitetään suositeltava kommutaattorin käyntilämpötila. Lämpötilan tulisi olla 60-90 °C, alle 40 °C:n käyntilämpötilaa ei suositella, koska patinan muodostuminen on erittäin heikko ja hiiliharjan kitka kasvaa. (Pirhonen 1998; Schunk 2014).



Kuvio 19 Ihanteellinen lämpötilakäyrä (Schunk 2014).

6.1.4 Ilmankosteus

Merkittävä tekijä harjojen kulumiseen on ilman kosteus. Kuviossa 20 on esitetty ihanteellinen absoluuttisen kosteuden arvo, jonka tulisi olla 8-15 g/m³. Ilmankosteuden tippuessa alle 3 g/m³ hiilien kulumisen lisääntyä toisin sanoen kitka kasvaa, yli 25 g/m³ ilmankosteus lisää patinan kasvua. (Schunk 2004, 53.)



Kuvio 20 Imankestus (Schunk 2004, 53)

6.1.5 Kehänopeus

Sähkögrafiittiharjoja voidaan ajaa suhteellisen kovilla kehänopeuksilla 50-60 m/s ja on myös laatuja, joissa nopeudet voivat olla jopa 80 m/s. Liukurenkaan kehänopeus v (m/s) voidaan laskea kaavalla 4. (Morganite 1978, 180; Schunk 2004,17.)

$$v = \pi * d * n \quad (4)$$

missä

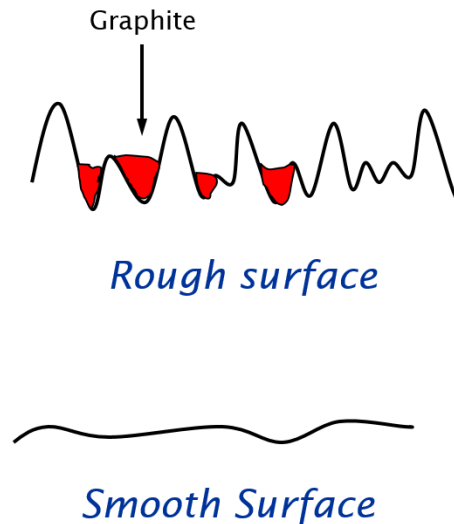
d on liukurenkaan halkaisija [m].

n on liukurenkaan pyörimisnopeus[r/s].

6.1.6 Liukurenkaan pinta

Liukurenkaan pinnankarheus on yksi tärkeimmistä tekijöistä, joka määrää harjan toiminnan. (Schunk 2004, 107).

Jos liukurenkaan pinta on liian sileä, voi kitka olla liian suuri ja aiheuttaa huonon kosketuksen liukurenkaalle. Lisäksi grafiittihiukkaset eivät tartu riittävästi sileisiin pintoihin, joten patina muodostuu hitaasti ja epätäydellisesti. (Schunk 2004, 107.)



Kuvio 21 Kuvaus patinan syntymisestä liukurenkaalla. (Schunk 2004, 107).

Jos liukurenkaan pinta on karkea, voi alkuvaiheessa tapahtua voimakasta hiilien kulumista. Hiiliharjan grafiitti leviää nopeammin pintaan, jolloin patina syntyy nopeammin ja pinta tasoittuu. Yleisesti voidaan katsoa, että jonkin verran liian karkea pinta on vähemmän kriittinen kuin sileä pinta. Kuviossa 21 nähdään patinan muodostuminen karheaan pintaan. (Schunk 2014, 108.) Liukurenkaan pinnan tulisi olla huipusta huippuun arvona R_z noin $5-8 \mu\text{m}$ ($R_a=0,8-1,2 \mu\text{m}$). (Schunk 2004, 98).

6.1.7 Hiilenpidin

Hiilenpitimen tarkoitus on asemoida hiiliharja mahdollisimman värinättömästi ja riittävän tarkasti, sekä kehittää liukurenkaan ja hiiliharjan väliin tarvittava harjapaine (ABB 1998, 2.32). Harjapaine määräytyy hyvin pitkälti harjatyypin, kehänopeuden ja liukurengasmateriaalin mukaan. Eri valmistajilla on omia suosituksia harjapaineille, kuten taulukosta 2 ja kuviosta 22 huomataan. Schunk antaa arvot liukurenkaan mukaan ja Mersen hiililaadun mukaan.

Taulukko 2 Hiilipaineet (Schunk 2004, 79).

Slip ring drives - Data in cN/cm² (PSI)

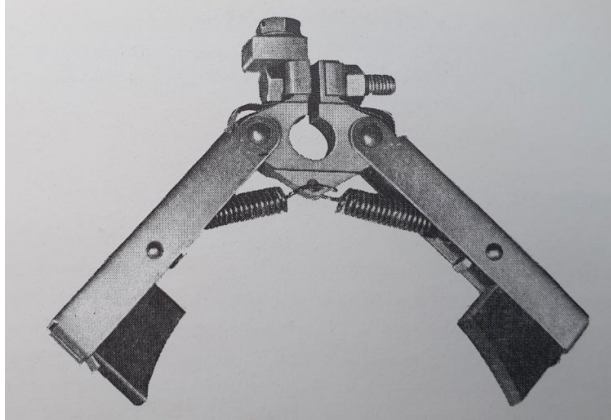
Counter material	Standard holder	Leg type holder
Bronze and copper	200 – 250 (2.8 – 3.6)	250 – 400 (3.6 – 5.7)
Ungrooved steel rings	200 – 250 (2.8 – 3.6) max 30 m/s	250 – 400 ((3.6 – 5.7)
Grooved steel rings F brush grades	130 – 160 (1.8 – 2.3)	–
Grooved steel rings E brush grades	200 – 220 (2.8 – 3.1)	–

04 - RECOMMENDED SPRING PRESSURE

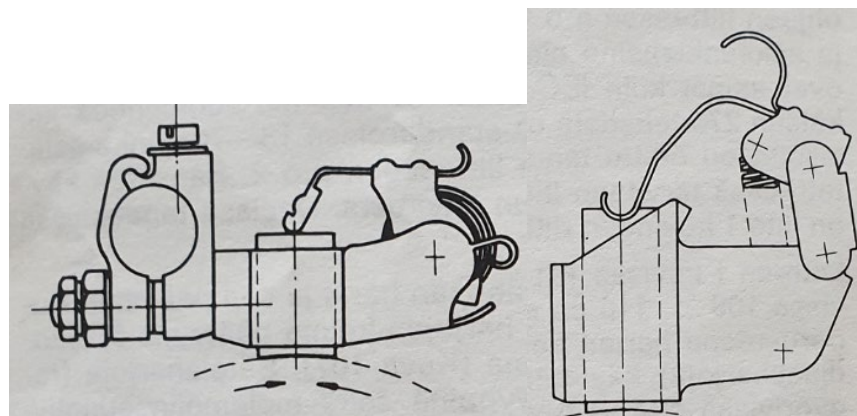
Recommended spring pressure P for each grade family	Slip ring	Commutator	
		Stationary machines	Traction machines
Carbographic (amorphous or hard)		18 – 20	
Electrographitic	18 – 20	18 – 20	36 - 45
Resin impregnated electrographitic	*	18 – 20	36 - 55
Soft graphitic	11 – 20*	13 – 18	
Metal-graphite	rated speed	18 – 20	*
	speed < 1m/s	25 – 27	

Kuvio 22 Hiilipaineet hiililaadun mukaan. (Mersen 2017 b).

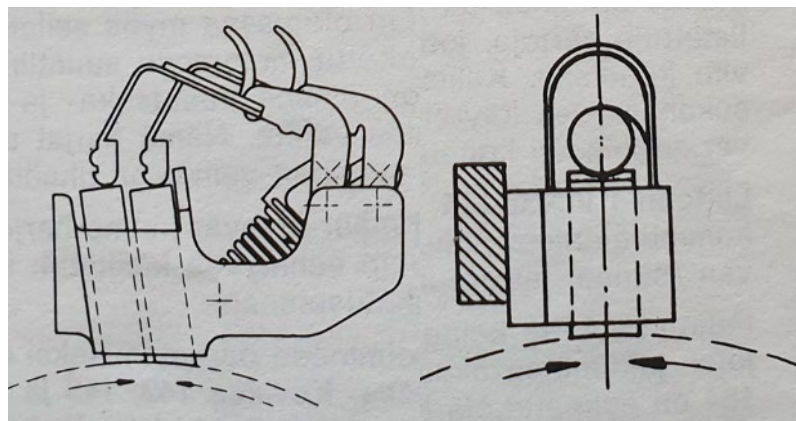
Liukurengaspitimiä on kahta päämallia, ensimmäistä voidaan kutsua kahdella eri nimellä, kaksikytkinen liukurenkaan harjapidin tai kaksipuoleinen peltipidin, jossa hiiliharja on kiinnitetty jalkaan kuva 6, sekä kohtisuoraan asennettava pidin, jossa hiiliharja on kanavassa tai taskussa. (Morganite 1978, 111.) Kuviossa 23 ja 24 on kolmea tyyppiä edellä mainittua mallia: säteis- vastasuka- ja myötäsukapitimet. Jouset pitimissä voivat olla vetojousi-, kellonjousi-, tai rullajousityyppiä. (Strömberg, 5).



Kuva 6 Peltipidin, kahdella jalalla (Morganite 1978, 112).



Kuvio 23 vasemmalla säteispidin kellojousella, oikealla säteispidin vetojousella. (Strömberg n.d. 5).



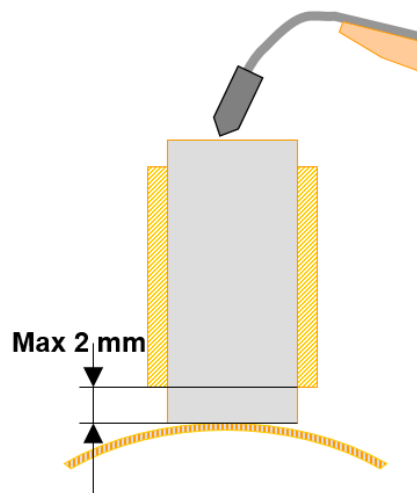
Kuvio 24 Vasemmalla myötäsuka-tandempidin vetojousella, oikealla säteispidin rullajousella. (Strömberg n.d. 5).

Tutkitussa generaattorissa on kuvassa 7 esitetty kohtisuoraan asennettava, normaalijousipitimellä varustettu hiilenpidin. Tämä hiilenpidin on tarkoitettu suurille virroille ja liukurengaskäyttöön. (Kupiainen, 2020)



Kuva 7 Tutkitun generaattorin hiilenpidin

Hiilenpitimen ja liukurenkaan välistä on eri valmistajilla omia suosituksia, esimerkkinä Morgan, 2,5 mm, jos mitta on alle 1,6 tai yli 3,2 mm tulisi pitimet säätää. (Morganite 1978, 136) Kuviossa 25 on esitetty Schunkin suositus etäisyys ja miten se mitataan.



Kuvio 25 Hiilen ja liukurenkaan etäisyys (Schunk 2004, 83).

Pitimen tyypilliset ongelmat ovat:

- jousen kuoleentuminen (Paine)
- nivelten kuluminen
- painimen väärä asento
- harjakotelon muotovirheet
- liian väljä harjakotelo. (ABB 1998, 2.32)

6.1.8 Häviöt hiilen ja liukurenkaan välillä

Liukurenkaan alkaessa pyöriä kontakti hiilen ja liukurenkaan välissä putoaa noin 30 %, eli häviö kasvaa. Yleensä katodin (-) renkaalla häviö on pienempi kuin anodin (+) renkaalla, kuitenkin sähkögrafiittiharjoilla ero on pieni. Nopeuden kasvaessa kosketushäviö kasvaa ja kitka pienenee. (Morganite 1978, 79.)

Jos hiilen ja liukurenkaan välinen jännitehäviö on esimerkiksi 0,97 V ja ohimenevän häiriön takia toisen hiilen häviö kasvaa 5 % (1,02 V) ja toisen laskee -5 % (0,92 V), tästä syntyy 3/2 epätasapainosuhte. Jos molemmille hiiliharjoille jaettaisiin 100 A:n kuorma se jakautuisi 40/60 ampeeriin, eli häiriö virran jakautumisessa olisi 20 % (Morganite 1978, 163.) Hiilenpitimien jousipaineen tulisi olla ± 10 % sisään, jotta virrat jakautuisivat tasaisesti hiiliharjoilla (Morganite National 1998).

Tavallisesti teollisuudessa hiilenpitimen paine on asetettu kokonaishäviökäyrän yläpäähän (kuvio 18). Harjojen virranjako on yhtenäisempi korkeissa harjapaineissa. Useissa harjapitimissä paine laskee harjan kuluessa. Kun paine asetetaan vähän korkeammalle, vähenee mahdollisuus pitimen paineen laskun tuomaan häviön laskuun. (Morganite 1978, 74.)

6.1.9 Harjamelu

Kun harja liukuu liukurenkaalla, se nousee ja laskee edestakaisin. Kitka liukurenkaan ja hiilenvälissä saattaa aiheuttaa harjan tärinää tai resonanssivärähtelyä harjan pidikkeessä ja pitimen tukiosissa. Jos kitkavoima kasvaa tärinä kasvaa, saattaa se aiheuttaa harjamelua. Kevyissä kuormaolosuhteissa, kun kitka on suurempi, harjamelu voi kasvaa. Kuivissa olosuhteissa voi esiintyä hyvin suurta harjamelua, jos harjoissa ei ole grafiittia tai sitä on vähän, joissakin tapauksissa voidaan käyttää grafiittisempaa hiililaatua, jolla kompensoidaan alhaista ilman-kosteutta. (Morganite 1978, 237-238.)

Luonnollisen grafiitin vaimennus on huomattavasti suurempi kuin sähkögrafiitilla. Luonnolliset grafiittilaadut ei ole niin alttiita harjamelulle kuin muut hiililuokat. (Morganite 1978, 237.)

7 TUTKIMUSMENETELMÄT

Taivalkosken voimalaitokselta tutkittiin hiilien kulumista eri kirjallisuuden ja sähköisten ja mekaanisten mittausten avulla. Voimalaitoksella tutkittiin kulumiseen johtavia suureita:

- lämpötilat harjalaitteiden ympäristössä ja liukurenkailla
- suhteellinen kosteus
- virrat harjasillalla
- harjapaineet
- kehänopeus

Edellisistä mittauksista saatiin laskettua virran tiheys hiiliharjoilla sekä absoluuttinen ilmankosteus.

7.1 Virran tiheys

Hiilien mitta ja lukumäärä tutkittiin laitoksella harjalaitteistosta kausihuollon yhteydessä. Magnetointivirrat saatiin henkilökunnan toimittamalla sähköpostilla. Näistä saatiin laskettua virran tiheys kaavalla 3.

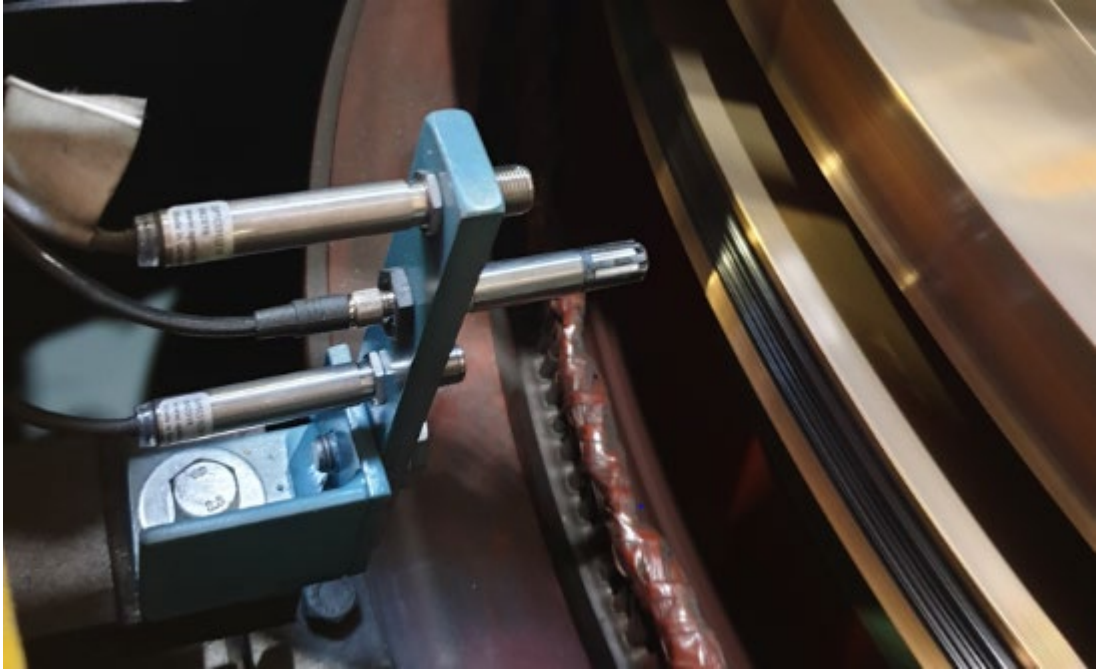
7.2 Kosteus ja lämpötila

Liukurengastilan kosteus ja lämpötila mitattiin Vaisalan HMP110 anturilla.

Anturilla päästää $\pm 1,5$ % tarkkuuteen mitattaessa suhteellista kosteutta ja mitaus alue kosteudelle on 0-100 % ja vastaavasti lämpötila alue anturissa on -40 - +80 °C, kotelointiluokka on IP-65. Anturilta saatu mittaustulos saadaan analogia jännitteenä 0-10 V. Mittausanturi asennettiin lähelle liukurengasta sitä varten rakennettuun anturijalkaan (Kuva 8).

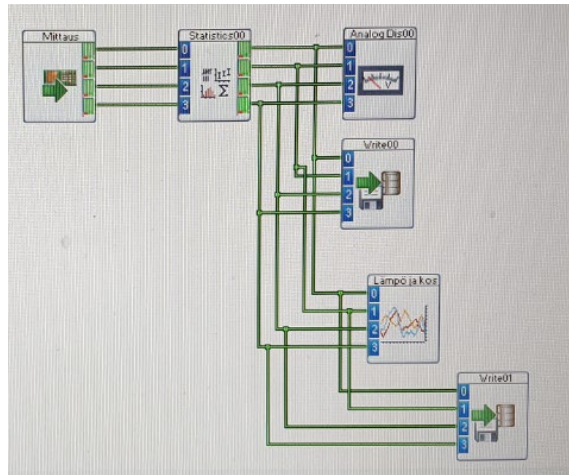
Liukurenkaiden lämpötilat mitattiin Optris CSTC infrapuna-anturilla. Anturin mitaus perustuu lämpösäteilyyn. Jokainen esine, joka on absoluuttisen nollapisteen yläpuolella (-273,15 °C = 0 kelvin) lähettää pinnastaan lämpösäteilyä, jonka määrä on suhteellinen sen luontaiseen lämpötilaan, osa tästä on infrapunasäteilyä, jota hyödynnetään kappaleen lämpötilan mittaukseen. Kuvassa 8 on esitetty

anturointi telineessä. Ylhäällä ja alhaalla on Optris CSTC anturit ja välissä Vaisala HMP 110 anturi.



Kuva 8 Anturien sijoitus mittaustelineessä.

Anturin mittausalue on $-40-350\text{ }^{\circ}\text{C}$, anturilta saatava mittausjännite muutettiin ohjelmallisesti $0-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ vastaamaan analogia lähtöjännittä $0-10\text{ V}$. Anturit kytkettiin riviliittimille, jossa oli 24 VDC jännitelähde antureille. Riviliittimiltä mitattu analogiasuure (V), kytkettiin DASYlab 13.0 dataloggeriin. Loggeriin tehtiin mittausohjelma lohko (kuva 9), johon laitettiin näytteenottotaajuus ($0,2\text{ s}$), eli minkä ajan välein otetaan mittausarvo antureilta. Toiseksi ohjelmoitiin lohko, joka laski keskiarvoa otetusta näytteistä määrätyn ajan välein (2 s). Kolmanneksi laitettiin lohko, joka muutti arvot ASC muotoon ja tallensi ne ulkoiselle kovalevyllä.



Kuva 9 Ohjelmalohkot

Absoluuttisesta ilmankosteudesta tiedetään veden määrä tilavuusyksikköä kohden A (g/m^3). Kun tiedetään suhteellinen kosteus (RH) sekä ilman lämpötila (T) voidaan absoluuttinen kosteus laskea kaavalla:

$$A = C * P_w / T \quad (5)$$

missä

C	on	2,16679 gK/J
P_w	on	höyrypaine [Pa]
T	on	absoluuttinen lämpötila [K].

P_w lasketaan kaavalla:

$$P_w = \left(P_{ws}(T) * \frac{RH}{100} \right) * 100 \quad (6)$$

missä

$P_{ws}(T)$	on	kyllästymishöyrynpaine T [$^{\circ}\text{C}$]
RH	on	suhteellinen ilmankosteus.

$P_{ws}(T)$ lasketaan kaavalla:

$$P_{ws} = A * 10^{\frac{m*T}{T+T_n}} \quad (7)$$

missä

A,m,Tn ovat alla olevassa kuviossa 27 olevia vakioita

T on lämpötila [°C]

	A	m	Tn	max error	Temperature range
water	6.116441	7.591386	240.7263	0.083%	-20...+50°C
	6.004918	7.337936	229.3975	0.017%	+50...+100°C
	5.856548	7.27731	225.1033	0.003%	+100...+150°C
	6.002859	7.290361	227.1704	0.007%	+150...+200°C
	9.980622	7.388931	263.1239	0.395%	+200...+350°C
	6.089613	7.33502	230.3921	0.368%	0...+200°C

Kuvio 26 Vakioita kaavalle (7). (Vaisala 2013, 6).

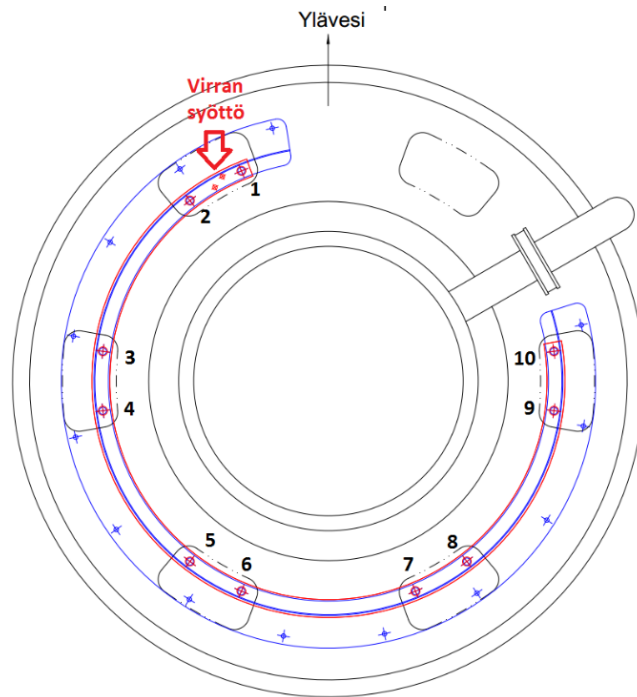
7.3 Virtojen mittaus harjasillalta

Kuvassa 10 on esitetty ABB Argus CC/4P-tietokone, jolla kerättiin jännite- ja virtatietoja magnetoinnin syötöstä sekä hiiliharjojen johtimista harjasillan eri alueilta. Virtojen mittaukseen käytettiin myös Fluke I1010-virtapihtejä



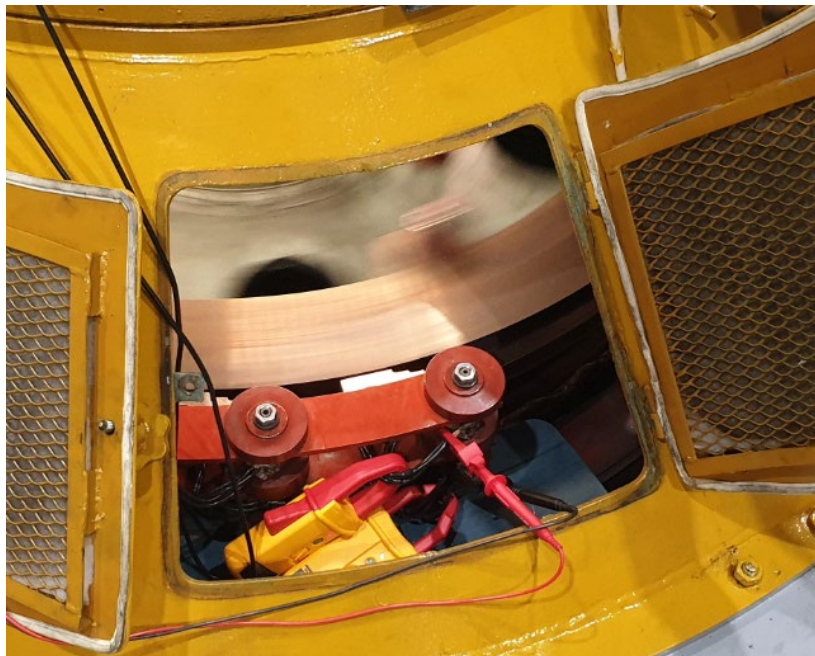
Kuva 10 ABB Argus CC/4P tiedonkeruu tietokone

Virtoja mitattiin kuudesta eri kohtaa harjasillalla. Harjanjohtimista pisteestä 2 anodin ja katodin väliltä, samoin myös harjanjohtimista 6 ja 10, sekä syöttökaapeleista jännite ja virta. Pisteistä 2,6 ja 10 mitattiin myös katodivirrat samanaikaisesti sekä samoista pisteistä anodivirrat. Kuviossa 27 on numeroitu harjanpitimet ja virransyöttökohta.



Kuvio 27 Harjan pitimien paikat ja harjasillan virransyöttökohta (Hirvonen 2017)

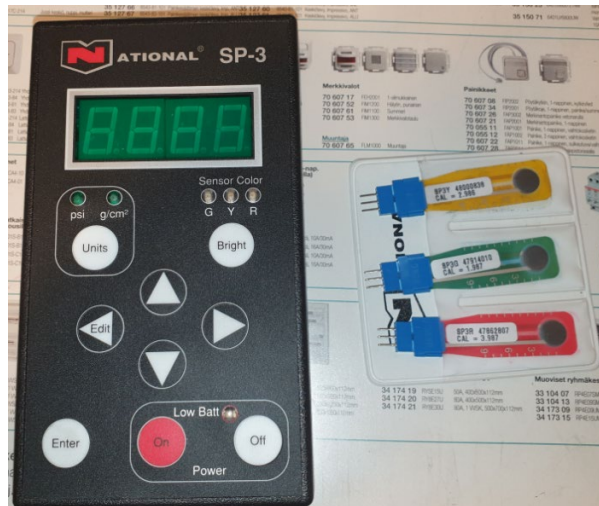
Kuvassa 11 on esitetty virtojen ja jännitteen mittaus pisteestä 10. Virrat mitattiin harjojen johtimista virtapihdeillä Fluke I1010 ja jännite suoraan anodin ja katodin väliltä.



Kuva 11 Piste 10 mittaus.

7.4 Hiiliharjapaine

Hiiliharjapaine mitattiin hiilen ja liukurenkaan välistä National SP3 hiilipainemittarilla. Hiilipaineita ei voitu mitata jousivaa'alla hiilenpitimistä, koska koneiston rakenne on niin lähellä pitimiä. Hiilipainemittari on kalibroitava joka kerta ennen mitausta sopivalle mittapäälle. Mittapäät kuvan 12 oikeassa reunassa.



Kuva 12 Harjapainemittari National SP-3

Mittariin syötetään hiilen mitat kalibroinnin yhteydessä, tämän jälkeen tulokseksi saadaan suoraan g/cm^2 . Anturi tulisi saada mahdollisimman lähelle hiilen keskipistettä.

7.5 Kehänopeus

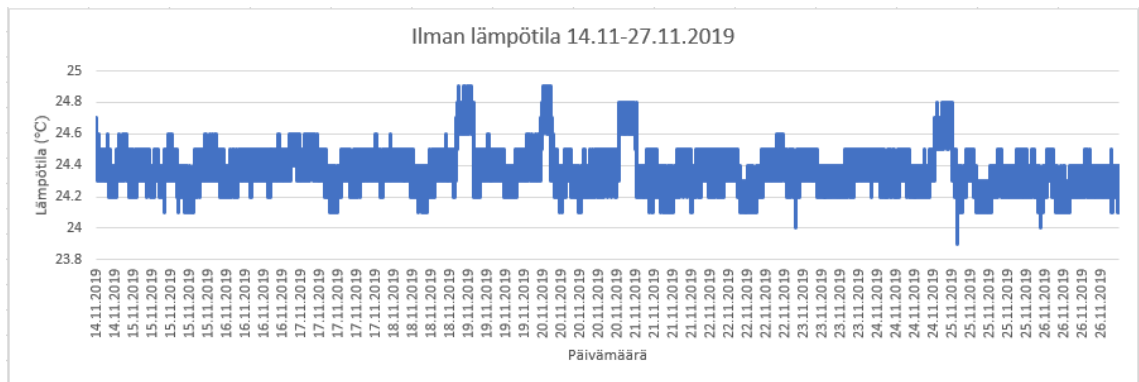
Kehänopeuden laskemiseen tarvitaan kehän pituus tai halkaisija kuten kaavassa 4. Kehämittaa mitattiin mittauskäyntien yhteydessä. Kehän mittaus suoritettiin asentamalla renkaan ympärille eristeliуска, johon merkittiin mitta. Liuskan merkeistä mitattiin kehän pituus 4394 mm, eli 4,394 m.

8 TULOKSET

Lämpötilojen ja kosteuden mittaukset suoritettiin 14-27.11.2019 välisenä aikana. Laitoksella mitattiin myös harjasillan virrat ja jännitteet eri pisteistä sekä harjapaineet.

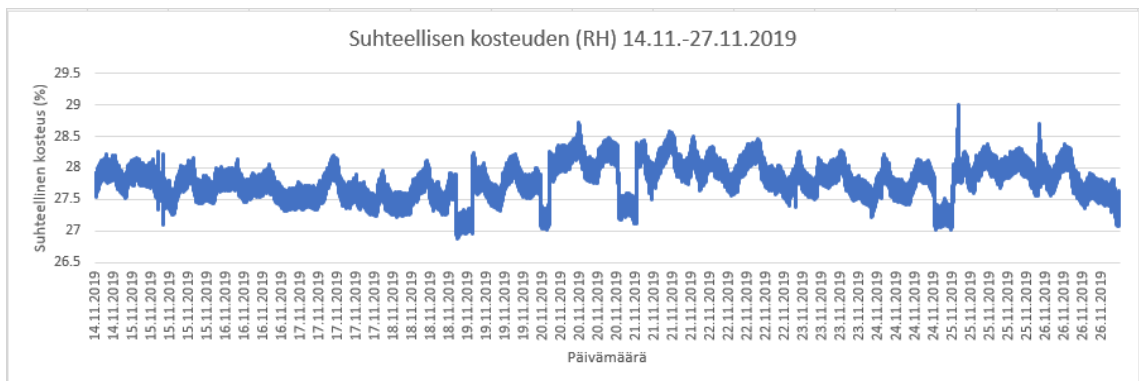
8.1 Ilman kosteus ja lämpötilat

Kuviossa 28 on esitetty 14.11-27.11.2019 välisenä aikana tehty ilman lämpötilanmittaus. Mittaukset suoritettiin luvussa 7.2 esitetyllä Vaisalan HMP110 anturilla. Anturi asennettiin lähelle liukurengasta, kuten kuvassa 8 nähdään.



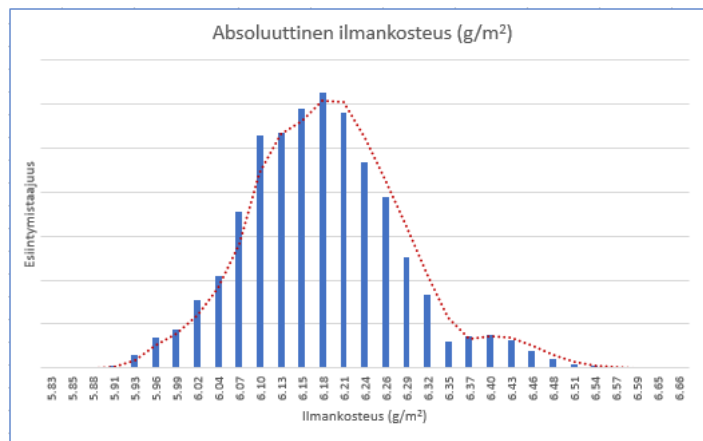
Kuvio 28 Ilman lämpötila

Ilman suhteellinen kosteus mitattiin samalla Vaisalan HMP110 anturilla, kuten edellä oleva lämpötilan mittaus, mittausajanjakso on myös sama. Kuviossa 29 nähdään kosteuden vaihtelun kyseisenä aikana.



Kuvio 29 Suhteellinen kosteus

Lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta laskettiin absoluuttiset ilmankosteudet kaavoilla 5, 6 ja 7, tuloksista tehtiin esiintymistaajuus kaavio, joka on esitetty kuviossa 30.



Kuvio 30 Absoluuttinen ilman kosteus.

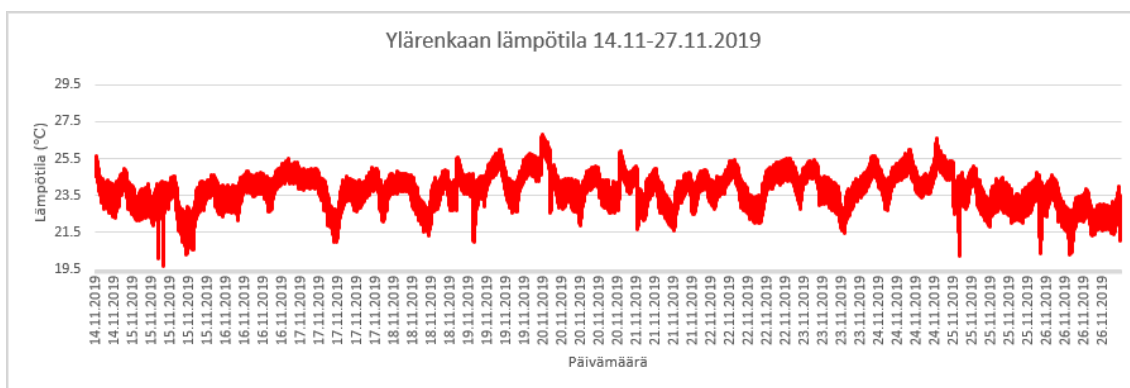
Absoluuttisen ilmankosteuden esiintymistä tehtiin tunnuslukutaulukko 3. Taulukossa on esitetty eri tunnuslukuja mittausajalta.

Taulukko 3 Absoluuttisen kosteuden tunnuslukuja.

Absoluuttisen kosteuden tunnuslukuja		
Keskiarvo	6.16	g/m^3
Pienin arvo	5.83	g/m^3
Mediaani	6.16	g/m^3
Suurin arvo	6.65	g/m^3
Vaihtelu väli	0.82	g/m^3

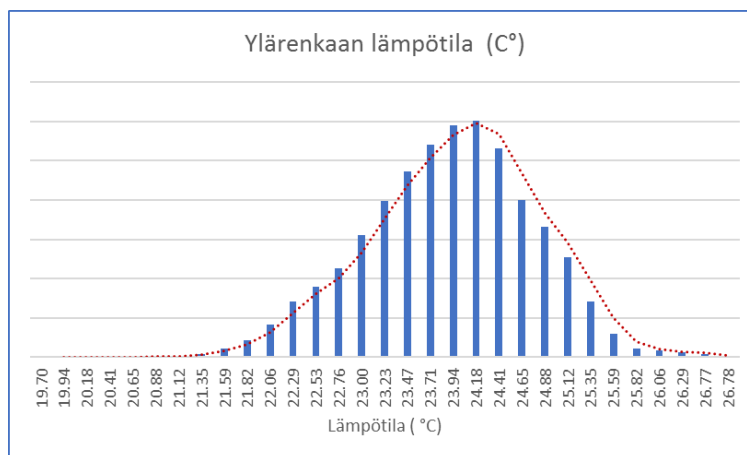
8.2 Liukurenkaiden lämpötila

Kuviossa 31 on esitetty ylärenkaan lämpötilakäyrä ajalta 14.11-27.11.2019. Mittaus suoritettiin kohdassa 7.2 esitetyllä Optris CSTC anturilla. Anturit asennettiin liukurenkaan rinnalle kuten kuvassa 8 nähdään.



Kuvio 31 Ylärenkaan lämpötiläkäyrä.

Kuviossa 32 on esitetty ylärenkaan lämpötilojen esiintymistaajuuudet mittausajalta 14.11-27.11.2019. Taajuuudet laskettiin ylärenkaan mittauksista saaduista tuloksista.



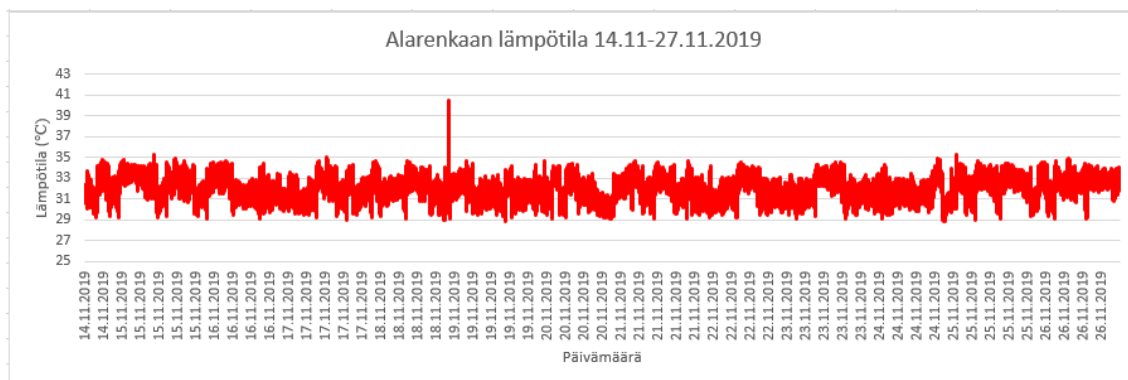
Kuvio 32 Ylärenkaan lämpötilataajuus.

Taulukossa 4 esitetään ylärenkaan tilastollisia tietoja samalta ajankohdalta kuten edelliset mittaukset. Tiedot laskettiin ylärenkaan lämpötilamittauksista saadusta tuloksista.

Taulukko 4 Ylärenkaan lämpötilamittauksesta tilastollisia tietoja.

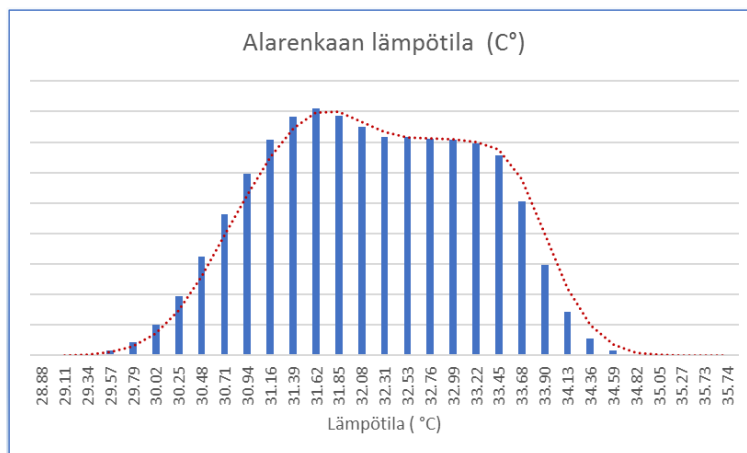
Ylärenkaan tilastollisia tunnuslukuja		
Keskiarvo	23.77	°C
Pienin arvo	19.70	°C
Mediaani	23.82	°C
Suurin arvo	26.77	°C
Vaihtelu väli	7.06	°C

Kuviossa 33 alarenkaan lämpötiläkäyrä ajalta 14.11-27.11.2019. Lämpötila mitattiin samanlaisella Optris CSTC anturilla kuten ylärengaskin.



Kuvio 33 Alarenkaan lämpötiläkäyrä.

Kuviossa 34 on esitetty alarenkaan lämpötilojen esiintymistaajuuudet mittausajalta 14.11-27.11.2019. Taajuuudet laskettiin alarenkaan mittauksista saaduista tuloksista.



Kuvio 34 Alarenkaan lämpötilataajuus.

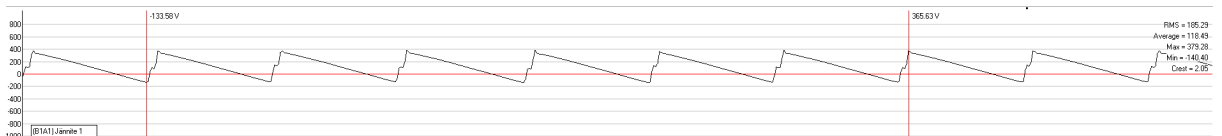
Taulukossa 5 esitetään alarenkaan tilastollisia tietoja samalta ajankohdalta kuten edelliset mittaukset. Tiedot laskettiin alarenkaan lämpötilamittauksista saadusta tuloksista.

Taulukko 5 Alarenkaan lämpötilamittauksesta tilastollisia tietoja.

Alarenkaan tilastollisia tunnuslukuja		
Keskiarvo	32.04	°C
Pienin arvo	28.88	°C
Mediaani	32.02	°C
Suurin arvo	35.73	°C
Vaihtelu väli	6.85	°C

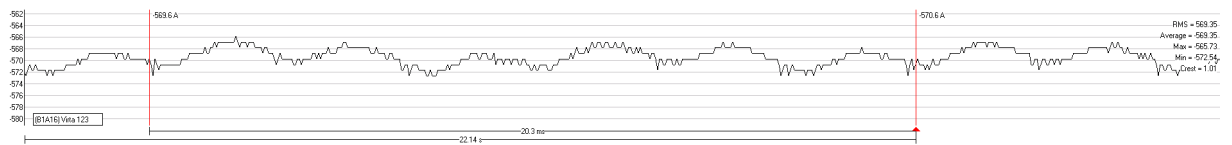
8.3 Virtojen mittaus harjasillalta

Kuviossa 35 esiintyvä syöttöjännite mitattiin harjasillalle menevistä magnetointikaapeleiden + ja – navoista. Luvussa 7.3 olevassa liukurengas kuviossa 27 on numeroitu mittapisteeet. Mittapisteen kohdalla on sekä + ja – hiilet. Kaikki virta- ja jännitemittaukset suoritettiin noin 15 MW generaattorin toimintateholla. Mittausaika kuvioden 35-48 mittauksissa on noin 20 ms.



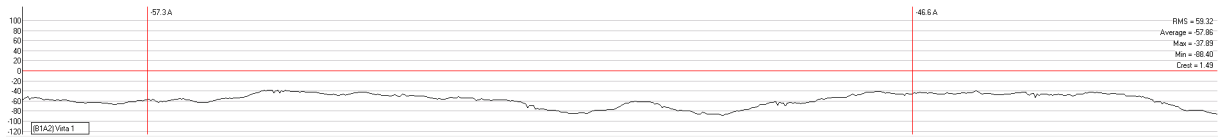
Kuvio 35 Magnetoinnin syöttöjännite.

Kuvion 36 magnetointivirta mitattiin syöttökaapeleista virtapihdillä samasta pisteestä jännitemittauksen kanssa.



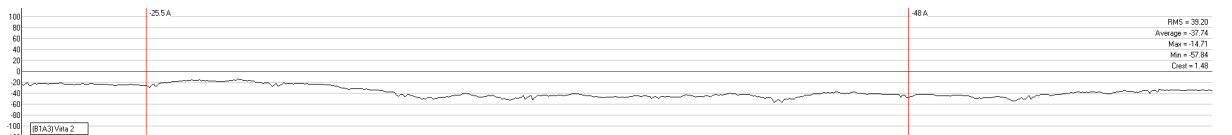
Kuvio 36 Magnetointivirta.

Kuvioden 37,38 ja 39 mittaukset tehtiin hiilien – (katodi) johtimista samanaikaisesti jännitteen keskiarvon ollessa 118 V. Kuviossa 37 virran keskiarvo on noin 58 A.



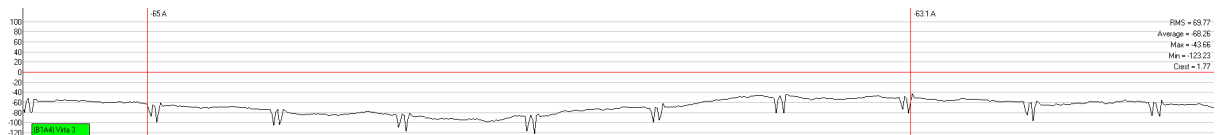
Kuvio 37 Mittapisteen 2 -hiili.

Kuviossa 38 virran mitattu keskiarvo on noin -38 A jännitteen ollessa 118 V.



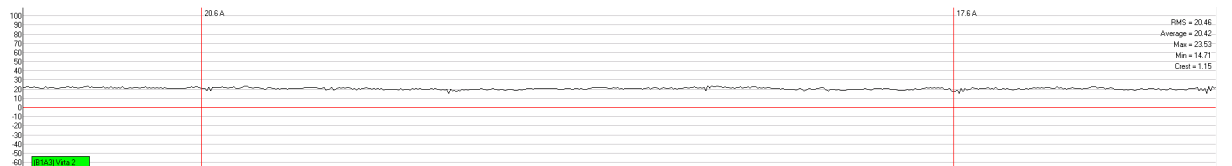
Kuvio 38 Mittapisteen 6 -hiili.

Kuviossa 39 virran mitattu keskiarvo on noin 68 A ja jännite 118 V.



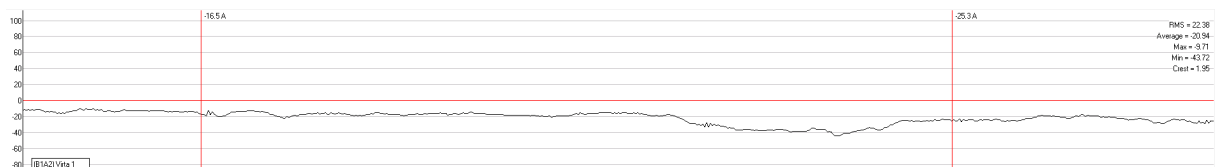
Kuvio 39 Mittapisteen 10 -hiili.

Kuvioissa 40-41 mitattiin virtoja pisteen 2 +(anodi) ja -(katodin) väliltä. Kuvasta 10 nähdään, miten mittaus on suoritettu. Kuviossa 40 jännitteen keskiarvo on 106 V ja virran keskiarvo noin 21 A.



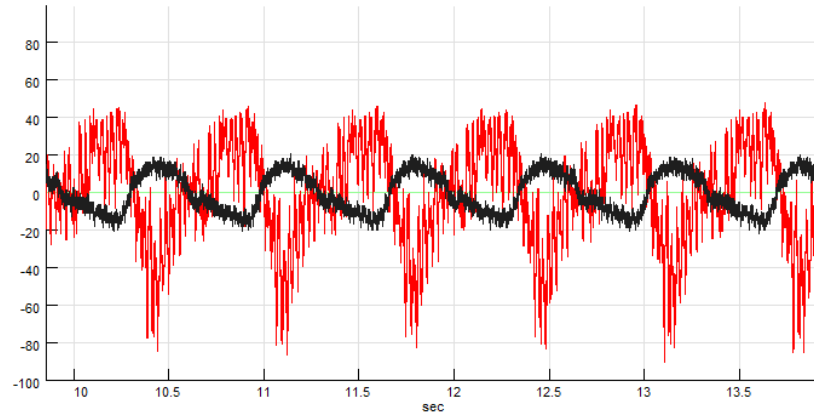
Kuvio 40 Mittapisteen 2 +hiili.

Kuviossa 41 jännitteen mitattu keskiarvo on 106 V ja virran keskiarvo noin 20 A.



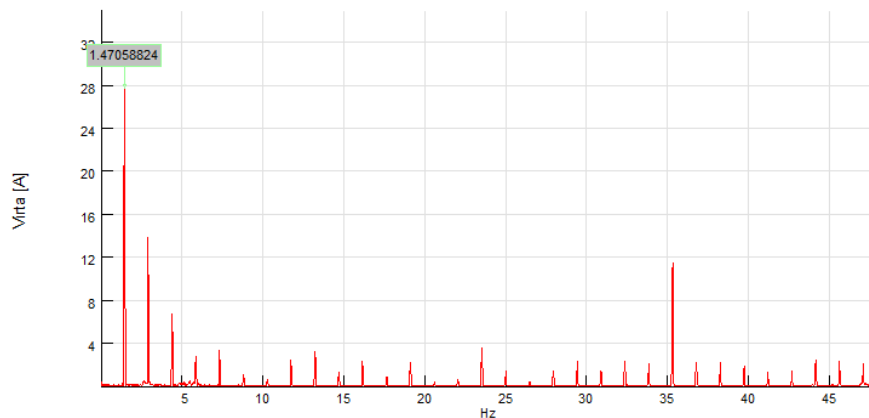
Kuvio 41 Mittapiste 2 -hiili.

Alla kuvioissa 42 mittapisteestä 6 noin 14 sekunnin mittaus + ja - hiilen johtimista. Kuviossa 43 ja 44 huomataan, että virta moduloituu generaattorin pyörimistaajuudella 1,47 Hz generaattorin pyörimisnopeuden ollessa 88,2 rpm.



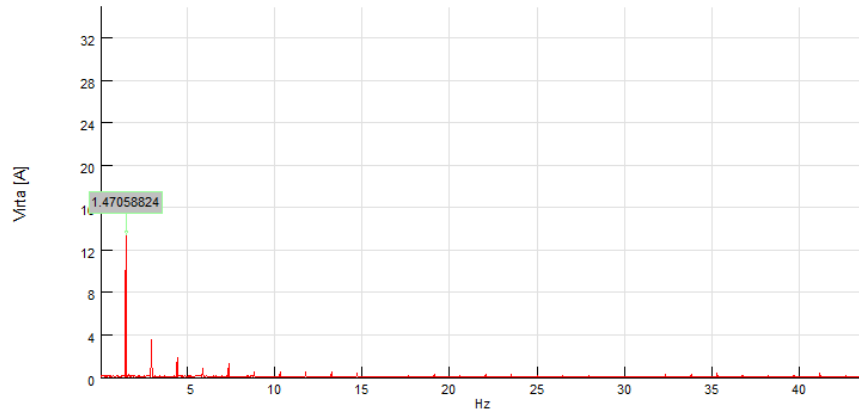
Kuvio 42 Virran AC-komponenttien aikatason käyrämuodot (+ mustalla ja - pu-naisella).

Kuviossa 43 huomataan, että liukurenkaalta tuleva -virta moduloituu generaatto-rin pyörimistaajuudella 1,47 Hz, myös kerrannaiset $2 \times 1,47$ Hz, $3 \times 1,47$ Hz jne. havaitaan spektrissä. Generaattorin pyörimisnopeus oli 88,2 rpm.



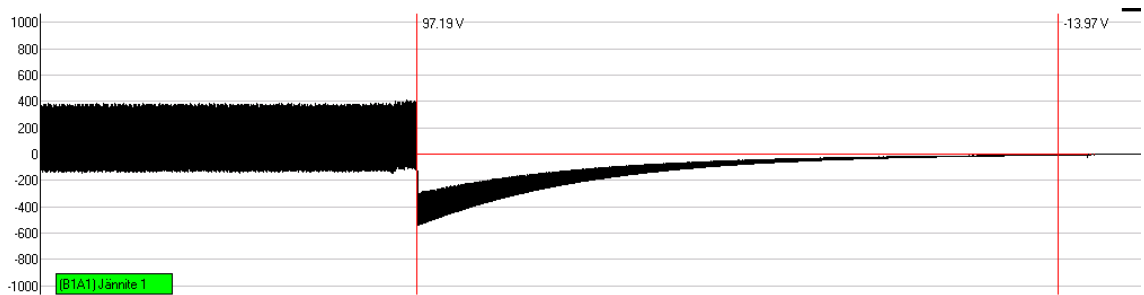
Kuvio 43 - virran AC-komponentin spektri.

Kuviossa 44 havaitaan sama moduloituminen pyörimistaajuudella, myös kerran-naiset nähdään, hieman heikompana.



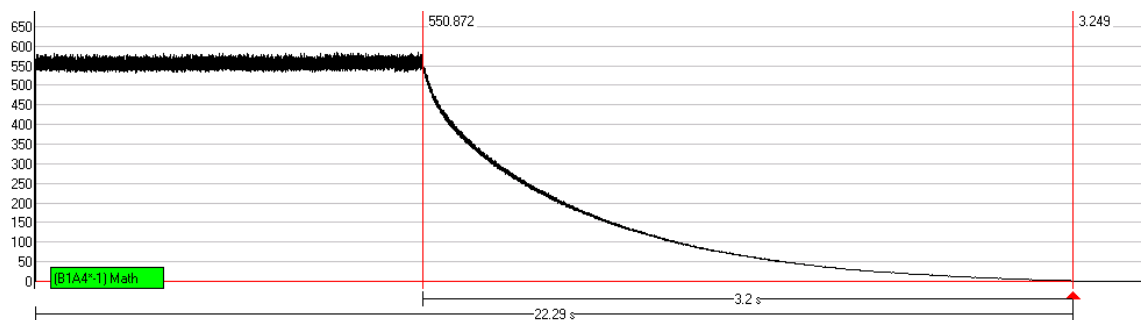
Kuvio 44 + virran AC-komponentin spektri.

Kuvioissa 45 nähdään jännitteen käyttäytyminen pikasulussa kenttäkatkaisijan avautuessa. Pikasulku tehtiin 20 MW tehoilta.



Kuvio 45 Magnetoinnin jännite kuvaaja.

Kuviossa 46 nähdään virran käyttäytyminen pikasulussa kenttäkatkaisijan avautuessa 20 MW tehoilta.



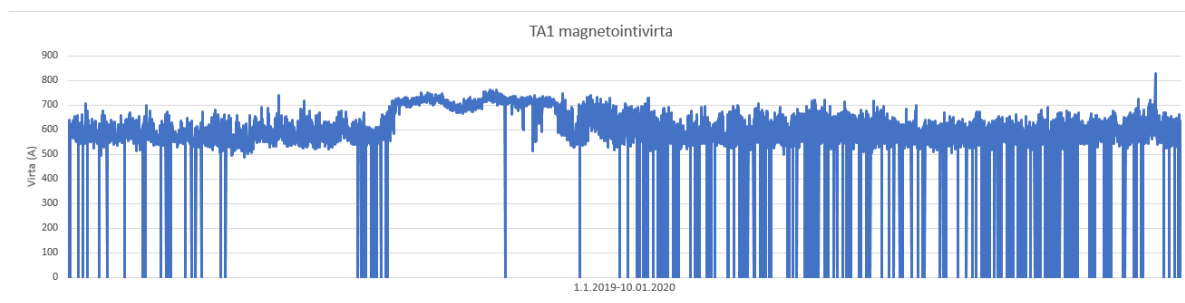
Kuvio 46 Magnetoinnin virran kuvaaja.

8.4 Kehänopeus

Generaattorin pyörimisnopeus oli 88,2 rpm, eli 1,47 m/s (88,2 rpm /60 s) ja kehän mitta 4394 mm, joka mitattiin laitoksella. Luvun 6.1.5 kaavalla 4 saadaan kehänopeudeksi ≈ 6.5 m/s.

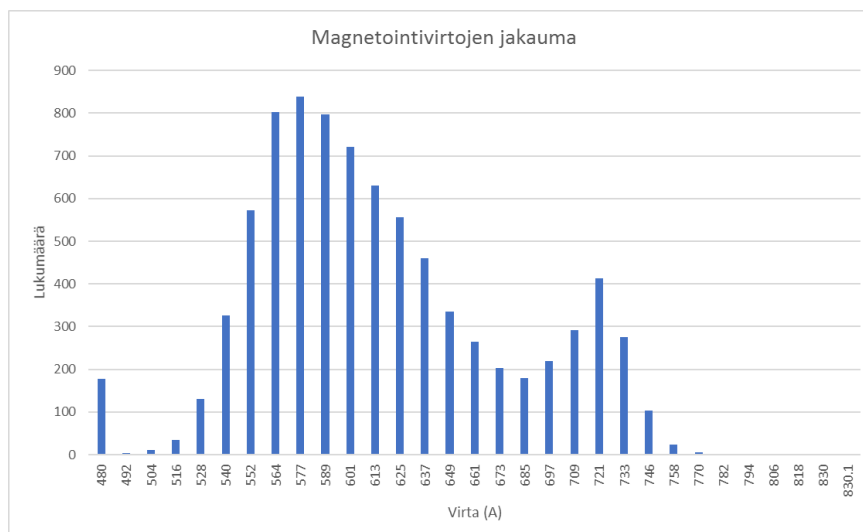
8.5 Virrantiheys

Kuviossa 47 Taivalkoski 1 magnetointivirrat aikavälillä 01.01.2019-10.01.2020. Virrat saatiin laitoksen järjestelmästä.



Kuvio 47 TA1 magnetointivirrat.

Kuviossa 48 magnetointivirran jakauman. Jakauma laskettiin saatujen magnetointivirta tietojen mukaan.



Kuvio 48 TA1 magnetointivirran jakauma.

Taulukossa 6 nähdään tilastolliset tiedot edellä mainitulle ajankohdalle. Hiilien virtatiheys on laskettu kaavalla 3 taulukossa 6 esiintyvien magnetointivirtojen mukaan. Hiiliharjan mitta on 25+25 mmx20 mm.

Taulukko 6 Magnetointivirran tilastolliset tiedot.

Laskettu 10 hiilellä/ rengas		
	Magnetointivirta (A)	Virtatiheys A/cm ²
Max	830	8
Keskiarvo	599	6
Mediaani	597	6
Jakaumalla eniten esiintyvä	577	6
Jakaumalla esiintyvä 721 A	721	7
Generaattorin nimellinen	880	9

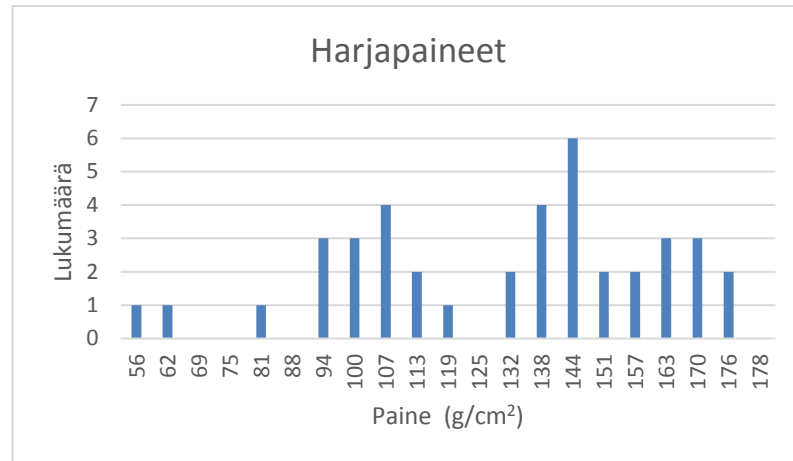
8.6 Harjapaine

Taulukossa 7 on esitetty liukurenkaiden harjapaineet g/cm². Mittausten perusteella paineissa on vaihteluväli 120 g/cm².

Taulukko 7 Harjapaineet g/cm².

1		2		3		4		5	
105	168	98	176	105	154	91	140	91	105
148	133	168	133	140	112	154	140	133	160
6		7		8		9		10	
77	126	91	105	119	146	165	133	56	98
140	112	140	176	62	162	140	162	126	98

Kuviossa 49 esitetään harjapaineiden esiintymistäajuus. Taajuus laskettiin taulukosta 7 saaduista arvoista.



Kuvio 49 Harjapaineiden esiintymistajuuus.

Taulukon 8 tilastolliset tiedot laskettiin mitatuista harjapaineista, jotka esitetään taulukossa 7.

Taulukko 8 Tilastollisia lukuja harjapainemittauksesta.

Suurin paine	176	g/cm ²		
Pienin paine	56	g/cm ²		
Vaihteluväli	120	g/cm ²		
Mediaani	133	g/cm ²		
Keskihajonta	30	g/cm ²		
Alle 10 % mediaanista	120	g/cm ²	16	kpl
Yli 10 % mediaanista	146	g/cm ²	12	kpl

9 TULOSTEN KÄSITTELY

Työn tarkoituksena oli löytää syy hiiliharjojen epämääräiseen kulumiseen. Hiiliharjat kuluvat tangentin suuntaan.



Kuva 13 Vasemmalla kuluneet hiilet, oikealla uusi hiilipari.

Mittauksissa selvitettiin hiilien kulumiseen johtavat suureet, ilmankosteus, lämpötilat, liukurenkaan kehänopeus, hiilenpitimen jousipaine ja virtatiheys.

9.1 Ilmankosteus

Ilmankosteus ja lämpötila mitattiin liukurengastilasta. Absoluuttinen ilmankosteus laskettiin kaavoilla 5,6, ja 7. Verrattaessa tuloksia luvusta 8.1 speksien mukaiseen absoluuttiseen kosteuteen mittausarvot ovat alhaiset, mutta sallituissa rajoissa. Mittausarvot eivät alittaneet luvun 6.1.4, 3 g/m^3 alarajaa. Mittausarvojen mediaani oli $6,16 \text{ g/m}^3$ ja vaihteluväli $0,82 \text{ g/m}^3$. Ilmankosteuden alhainen arvo ei välttämättä ole syy hiilien kulumiseen, vaikkakin se voi olla yksi osatekijä koko kokonaisuudessa.

9.2 Liukurenkaan lämpötila

Liukurenkaiden pinnoista mitattiin lämpötilat. Mittaustulokset ovat luvussa 8.2. Mittaustuloksissa ylärenkaan lämpötila oli $19,7\text{-}26,7 \text{ }^\circ\text{C}$ välillä, keskiarvo oli noin $23,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Alarenkaan lämpötila oli $28,8\text{-}35,7 \text{ }^\circ\text{C}$, keskiarvo oli noin $32,0 \text{ }^\circ\text{C}$. Liukurenkaiden lämpötilat ovat erittäin matalat, yläliukurenkaalle ei kehity patinaa ja kitka on suuri. Kuten luvussa 6.1.3 on mainittu, lämpötilojen tulisi olla $60\text{-}90 \text{ }^\circ\text{C}$,

jotta kitka olisi pienemmillään ja patina muodostuisi liukurenkaan pintaan. Lämpötilalla ja kitkalla saattaa olla suuri merkitys hiiliharjojen kulumiseen. Alarenkaalle on kehittynyt tumma patina.

10-11.4.2018 tehdyssä kausihuollossa alarengas oli + (anodi), ylärenkaassa – (katodi), tällöin ylärenkaassa oli alkavaa patinaa ja alarenkaan hiilet kuluivat, myös liukurengas oli jonkin verran kulunut urille.

26.02.2019 tehdyssä kausihuollossa huomattiin, että napaisuus oli muutettu edellisen huollon jälkeen ja nyt kuluivat ylärenkaan hiilet ja alkava patina oli hioutunut pois.

Liukurenkaan lämpötilamittauksissa ja kausihuolloissa tehtyjen havaintojen pohjalta havaittiin, että liukurenkaiden välinen lämpötila ero ei ole suuri, mutta vaikuttaa suuresti patinan kehittymiseen liukurenkaan pinnalle.

9.3 Virtojen mittaus harjasillalta

Kuviossa 35 ja 36 on magnetoinnin jännite ja virta. Punaisten viivojen väli on noin 20 ms eli yksi 50 Hz jakson aika. Jännitteen kuusi pulssia näkyy hyvin kuviossa. Myös virroissa näkyy sama AC komponentti, kuin jännitteessä. Jännite ja virta ovat kirjallisuudesta saamien speksien mukaiset.

Kuvioissa 37-39 nähdään miten virran transientit voivat olla nopeitakin harjapinnan kosketuspisteiden muuttuessa.

Kuvioissa 42 nähdään virran AC-modulaation pyörimisnopeuden taajuudella. Samaa aikatasoon on sijoitettu + ja –, jolloin voidaan verrata niiden aikatasoa.

Kuvioissa 43-44 nähdään spektrissä modulointitaajuus eli pyörimisnopeus 1,47 Hz ja sen kerrannaiset. roottorin pyörimisnopeus 88,2 rpm. AC-modulointi muodostuu liukurenkaan heitosta ja pitimen heikosta harjapaineesta. Liukurenkaaseen on jätetty heittoa, jotta hiilet liukuisivat pitimessä eivätkä takertuisi kiinni pitimeen. Miinuspuolen virran heittäly johtuu liukurenkaan epätasaisesta pinnasta.

Kuvioissa 45 ja 46 nähdään jännitteen ja virtojen käytöksen kenttäkatkaisijan avautuessa noin 20 MW tehoilta. Kuvioista huomataan, miten kenttäkatkaisijan avaus laskee virran noin 3 sekunnissa.

9.4 Kehänopeus

Sähkögrafiittiharjojen suositeltu kehänopeus 50-60 m/s raja-arvo esiteltiin luvussa 6.1.5. Generaattorin kehänopeus on 6,5 m/s, eli ne eivät ole lähellekään spesifikaatioiden ylärajoja. Tästä voidaan päätellä, että hiiliharjojen kuluminen ei johdu kehänopeudesta.

9.5 Virrantiheys

Laskettu virrantiheys oli alhainen verrattaessa hiilitoimittajan antamiin suosituksiin. Generaattorin nimellisellä magnetointivirralla 880 A saatiin 10 hiiliparille virtatiheydeksi 9 A/cm², generaattorin alkuperäisellä hiililaadulla EG34D virtatiheys hiilelle on 12 A/cm², paikallaan olevalle hiililaadulle RE80, valmistajan antama virtatiheys on 10 A/cm². Kuitenkin generaattorin magnetointivirran huippu on ollut 830 A, jolloin laskennallinen virtatiheys on 8 A/cm².

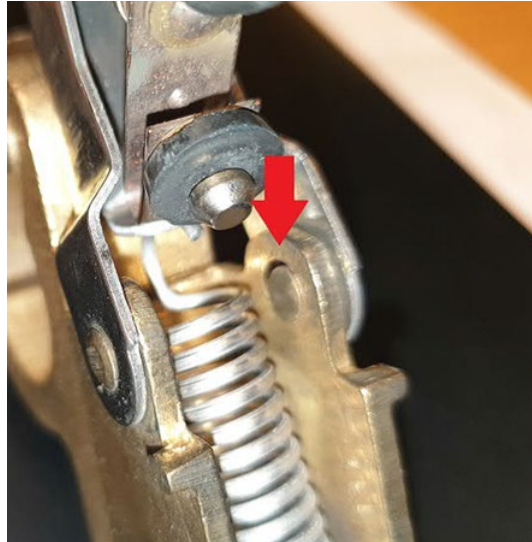
Harjasillalta voisi vähentää hiiliparit yhdeksään (18 hiiltä), jotta virtatiheyttä saataisiin nousemaan. Tällöin virtatiheys olisi generaattorin nimellisellä virralla 10 A/cm², magnetoinnin huippuarvolla 830 A virtatiheys olisi 9 A/cm², tällä saataisiin liukurenkaan lämpötila nousemaan, josta seuraisi kitkan väheneminen ja harjojen ja liukurenkaan välisen korkeataajuisen vikinän vaimeneminen.

9.6 Harjapaine

Luvussa 8.5 esitetyt harjapaineet ovat luvussa 6.1.7 esitettyjen speksien alle huomattavasti. Shunkin mukaan harjapaine tulisi olla 200-250 g/cm² ja Mersenin 180-200 g/cm² nyt kuitenkin suurin tulos oli 176 g/cm² ja pienin tulos 56 g/cm² medianin ollessa 133 g/cm². Harjapaineiden keskinäinen heitto saisi olla ±10 %.

Harjapitimen nivelistä löytyi tutkimuksissa huomattaviakin kulumisia (kuva 13), nämä aiheuttavat huomattavat harjapaineiden pudotuksen, myös ikääntyneet hii-

lenpitimen jouset voivat olla syy alhaisiin arvoihin. Paine-erot harjanpitimillä aiheuttaa virtojen epätasaisen jakautumisen hiiliharjojen kesken, tästä voi seurata epätasainen kuluminen harjojen kesken.



Kuva 14 Hiilenpitimen kulunut nivel.

9.7 Toimenpiteet

Tutkimuksia tehdessä myös muut laitoksen generaattorit alkoivat oireilla kuten generaattori 1.

Generaattori 3 asennettiin koehiilarja Schunk E43, tätä hiiltä käytetään Norjassa vesivoimageneraattoreissa hyvinkin paljon. Hiili erosi alkuperäiseen verrattuna sen kokonsa vuoksi, myös hiileen materiaali oli hiukan erilainen, mutta valittavasti hiilen tarkkoja tietoja ei ole saatavissa. Alkuperäinen hiili on kuvan 14 mukainen tandemhiili 25+25x20, uusi hiili on saman kokoinen kuten alkuperäinen, mutta singlehiili 50 mmx20.

Hiilet vaihdettiin maaliskuussa 2019 ja käytönaikana tehdyissä havainnoissa ei epänormaalia kulumista ole enää havaittu. Hiilet mitattiin joulukuun kausihuollossa ja kuluminen oli sallituissa rajoissa 2-5 mm.

Hiilenpitimet olisi kuitenkin syytä vaihtaa, jotta virrat jakautuisivat tasaisemmin ja hiilet kuluisivat sitä myötä samaa tahti

10 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää hiilien kulumisen Taivalkosken voimalaitoksella. Kulumisen oli hyvin epänormaalia, eikä siitä löydy pohjatietoa kirjallisuudesta. Työn alussa sain englanninkielisen kirjan hiilistä ja sähkömoottoreista, kuitenkin osoittautui, että kirja oli hyvin teknistä sanastoa, joten sen ymmärtäminen oli erittäin haasteellista. Hiilien kulumisesta yleensäkin on hyvin vähän kirjallisuutta suomeksi.

Työssä selvitettiin syitä hiiliharjojen kulumiseen. Syitä hiiliharjojen kulumiseen löydettiin ja siltä osin asetetut tavoitteet saavutettiin. Yksittäisen osasyyn ei voi varmuudella sanoa aiheuttavan hiiliharjojen kulumisilmiötä. On todennäköistä, että kulumisen aiheutuu usean osasyyn yhteisvaikutuksesta. Hiilien virtatiheys ja renkaiden lämpötila oli alhainen, jolloin patina ei synny renkaalle, myös hiilenpitimien puristusvoima oli osassa pitimiä heikko. Mittauksissa olisi voitu mitata vielä värähtelyä harjasillalta, mutta vertailukohteen puuttumisen vuoksi sitä ei tehty. Hiiliharjojen kulumisongelma ratkaistiin hiililaatua vaihtamalla, joten täyttä varmuutta eri osatekijöiden vaikutuksesta ei voi varmuudella todeta.

Virranmittauksissa voitiin osoittaa virtojen jakautuminen liukurenkaiden välillä, sekä hiilien keskinäiset virtojen erot. Myös virtojen käyttäytyminen liukurenkaan ja hiilen välissä voitiin tutkia mittauksissa.

Opinnäytetyön aihe oli erittäin hyvä. Hiiliharjoista opittu tieto on tulevaisuudessa tarpeellista, sekä työssä tehdyt mittaukset tukevat myös tämänhetkistä työtäni. Työssäni satuja tuloksia voidaan hyödyntää staattisen magnetoinnin harjaongelmissa.

Jatkotutkimusaiheena voisi tulevaisuudessa olla korkeataajuisen värinän tutkimisessa ja tarkemmin harjasillan rakennemuutoksen tuomat värinätaajuuksien ja ominaisuuksien muutokset.

LÄHTEET

ABB Oy 1998. DC-konerakenteet ja hiilihuolto. Sisäinen koulutusmateriaali.

ABB Oy TTT-käsikirja 2000-07a. Luku 11 Tehomuuntajat. Viitattu 01.03.2020
http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/11_Tehomuuntajat.pdf

ABB Oy TTT-käsikirja 2000-07b Luku 14 Voimalaitokset. Viitattu 01.03.2020
http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/14_Voimalaitokset.pdf

ABB 2000. TTT-käsikirja 2000-7c Luku 17.7 Tahtikoneet. Viitattu 28.02.2020
<https://docplayer.fi/283967-17-moottorit-ja-generaattorit.html>

Ahokas, T. 2011. Voimalaitosgeneraattorien suojaus ja magnetointi. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö.

Aura, L. & Tonteri, A. J. 1993. Sähkölaitostekniikka. Helsinki: WSOY.

Aura, L. & Tonteri, A. J. 2009. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet.3-6 painos. Helsinki: WSOY

Boldea, I. 2006. Synchronous Generators. CRC Press. 448 p

Hahka, J. 2020. Kemijoki Oy. Projektipäällikkö haastattelu 15.05.2020

Hirvonen, M. 2017. Taivalkosken harjasillan kuva. ABB:n arkisto

Huhtinen, M., Korhonen, R., Pimiä, T. & Urpalainen, S. 2013. Voimalaitostekniikka. 2. tark. p. Helsinki: Opetushallitus

Jurin, Z., Brklja, B. & Koli, M. 2005. Excitation Systems for High Power Synchronous Generators with Redundant Configurations. 7. Konferenca Slovenskih Elektroenergetikov (7th Slovenian Electrical Energy Expert Conference), Velenje, Slovenia, 55–59.

Kemijoki Oy 2019a.Taivalkoski. Viitattu 12.07.2020. <https://www.kemijoki.fi/toimintamme/voimalaitokset-ja-tuotanto/taivalkoski.html>

Kemijoki Oy, 2019b. Tuotanto. Viitattu 30.06.2019. <https://www.kemijoki.fi/toimintamme/voimalaitokset-ja-tuotanto.html>

Kemijoki Oy, 2019c. Vesivoima. Viitattu 30.06.2020. <https://www.kemijoki.fi/vesivoima.html>

Kemijoki Oy 2019d. Vesivoiman tuotanto. Viitattu 30.06.2020, <https://www.kemijoki.fi/vesivoima/vesivoiman-tuotanto.html>

Kemijoki Oy, 2019e. Vuosiraportti, Viitattu 12.02.2020, <https://www.kemijoki.fi/media/liitteet/vuosikertomukset/kemijoki-vuosiraportti-2018-print.pdf>

Kemijokilaki 29.12.1952/458

Kupiainen, P. 2020. Neutek Oy. Toimitusjohtajan haastattelu 11.02.2020

Korpinen, L. (toim.) 1998. Sähkövoimatekniikkaopus. Luku 10: Sähkökoneet. Viitattu 06.11.2019. http://leenakorpinen.com/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf

Mersen 2017a. Technical Data Sheet AE-TDS/15. Viitattu 23.03.2020. <https://www.mersen.com/sites/default/files/publications-media/ae-tds-15-gb.pdf>

Mersen 2017b. Technical Data Sheet TDS/11. Viitattu 23.03.2020. <https://www.mersen.com/sites/default/files/publications-media/2017-ptt-tds-11-pressure-on-carbon-brushes-mersen.pdf>

Marttinen, M. 2010. Vesivoimageraattorien magnetointijärjestelmien eliniänarviointi. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö.

Morganite 1978. Carbon Brushes and Electrical Machines. Morganite Electrical Carbon Limited.

Morganite National 1998. Esite, Hiiliharjat, kommutaattorit, viitattu 04.03.2020

Mörsky, J. & Mörsky, J. 1994. Voimalaitosten yhteiskäytön tekniikka. Helsinki: Otatieto.

Padottu voima 2015. Elokuva. Ohjaus: Michael Franck. Tuotanto: Franck media, viitattu 06.06.2020

Salminen, E. 2020. Andritz Hydro Oy. Projektipäällikön haastattelu 10.02.2020

Pirhonen, S 1998. DC-konerakenteet ja hiilihuolto. ABB sisäinen ohje, viitattu 04.04.2020

Schunk 2004. Frequently asked question. Viitattu 02.02.2020. <https://vdocuments.mx/schunk-kohlenstofftechnik-skt-gb4-page-1-frequently-asked-questions-frequently-asked-questions-faq.html>

Schunk 2014. Brush Performance at High Temperature. Viitattu 02.02.2020. http://www.sirmaschunk.com/sixcms/media.php/1701/21_201408_brush%20temperature.pdf

Strömberg, n.d. Tasavirtakoneiden harjalaitteiden ja kommutaattorin huollosta. Sisäinen ohje. Viitattu 05.03.2020.

Säynäjäkangas, O. & Aaltonen, M. 2013. Pyörteistä voimaa: Historiikki Kemi-joesta. Luusua: Luusuan kyläseura.

Vaisala 2013. Humidity conversion formulas. Viitattu 06.04.2020. https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Humidity_Conversion_Formulas_B210973EN-F.pdf

ÅF-Consult Oy. 2018-2019. Loppuraportti. Viitattu 07.11.2019. Vesivoiman merkitys Suomen energiajärjestelmälle https://energia.fi/files/3427/Vesivoimaselvitys_FINALrev1_20190206.pdf