

Ilkka Pahkala

GENERAATTORIN JÄNNITESÄÄDÖN PERIAATTEET, VAATIMUKSET JA MITTAAMINEN

Opinnäytetyö
Sähkötekniikan koulutusohjelma


Huhtikuu 2015




MAMK

University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

	Opinnäytetyön päivämäärä 28.4.2015
Tekijä(t) Ilkka Pahkala	Koulutusohjelma ja suuntautuminen Sähkötekniikan koulutusohjelma
Nimeke Generaattorin jännitesäädön periaatteet, vaatimukset ja mittaaminen	
Tiivistelmä <p>Tämän työn tarkoituksena oli koota yhteen tahtigeneraattorin magnetointijärjestelmien uusintaprojekteja varten magnetointijärjestelmiin liittyvät teoriat, asetetut määräykset, liittyvät standardit sekä käyttöön-otossa suoritettavat mittaukset ja toimintojen testaukset sekä niissä huomioitavat vaatimukset. Työssä pohdittiin myös magnetointijärjestelmän käyttöön ja kunnossapitoon liittyviä asioita.</p> <p>Työssä tutustuttiin tahtigeneraattorin toimintaan ja magnetointijärjestelmän osuuteen tahtigeneraattorin jännitteen synnyssä ja säädössä. Työssä tutustuttiin myös erilaisiin tahtigeneraattorin magnetoimistapoihin ja magnetointijärjestelmien kokoonpanoihin sekä tarkasteltiin magnetointijärjestelmän mitoitus- ja toteutusolosuhteita. Työssä paneuduttiin kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:n asettamiin voimalaitosten järjestelmätekniisiin vaatimuksiin generaattorin jännitesäädön näkökulmasta, sekä kansainvälisiin IEEE-standardeihin. Työn aikana suoritettiin magnetointijärjestelmän liityntöjen suunnittelu voimalaitoksen sähkö ja automaatiojärjestelmiin sekä osallistuttiin uusitun generaattorin uuden magnetointijärjestelmän käyttöönottoon.</p> <p>Tarvittavilla käyttöönottomittauksilla on osoitettava, että magnetointijärjestelmä täyttää asetetut vaatimukset niin, että se voidaan liittää osaksi sähköverkkoa. Suoritetuista käyttöönottomittauksista on toimitettava aina pöytäkirjat myös sähköverkon haltijalla. Tässä esimerkkinä olevassa tapauksessa suoritettujen käyttöönottomittaukset osoittivat, että uusittu magnetointilaitteisto täytti sille asetetut vaatimukset.</p> <p>Työn aihealue oli erittäin laaja ja sisälsi monia eri kokonaisuuksia, jotka liittyvät toimivassa voimalaitosprosessissa kiinteästi toisiinsa. Koska magnetointijärjestelmä on olennainen osa voimalaitoksen generaattoria ja sähköjärjestelmää, vaaditaan koko voimajärjestelmän syvällistä tuntemusta magnetointijärjestelmän toimintaa arvioitaessa. Työn lopputuloksena saatiin koottua yhteen kattava paketti magnetointijärjestelmän uusinnassa huomioitavia asioita.</p>	
Asiasanat (avainsanat) Tahtigeneraattori, jännitesäätö, magnetointijärjestelmä, vesivoimalaitos, VJV2013	
Sivumäärä 60	Kieli Suomi
Huomautus (huomautukset liitteistä) Liitteiden lukumäärä 1	
Ohjaavan opettajan nimi Arto Kohvakka	Opinnäytetyön toimeksiantaja Fortum Power and Heat Oy

DESCRIPTION

	Date of the barchelor's thesis 28.4.2015
Author(s) Ilkka Pahkala	Degree programme and option Electrical engineering
Name of the barchelor's thesis Principals, requirements and measurements of generator voltage control	
Abstract <p>The purpose of this thesis was bring together the theories, requirements, standards, as well as commissioning measurements and functional tests and their requirements for the renewal projects of synchronous generator excitation system. The work also discusses the operation and maintenance of an excitation system.</p> <p>The work explores the basics of synchronous generator operations and the excitation system of the synchronous generator voltage generation and control. The work also explores alternative synchronous generator excitation methods and configurations, as well as the dimensioning of an excitation system. The work elaborated technical requirements set by Fingrid Oyj on the generator voltage control, as well as international IEEE standards. During the work the excitation system interfaces of the excitation system into the power plant electrical and automation systems were designed.</p> <p>With the sufficient commissioning measurements it have been proved that the excitation system meets the requirements so that it can be integrated into the power system network. The protocol of the commissioning measurements carried out must always be sent also to electrical grid owner. In this example case executed commissioning measurements showed that the renewed excitation system fulfils all the requirements.</p> <p>Since the excitation system is an essential part of the power plant generator and the electrical system, deep knowledge of the whole power system is needed when excitation system performance is evaluated. The end result of the thesis gathered together a comprehensive package of considerable facts for excitation system renewals.</p>	
Subject headings, (keywords) Synchronous generator, voltage control, excitation system, hydro power plant, VJV2013	
Pages 60	Language Finnish
Remarks, notes on appendices Number of appendices 1	
Tutor Arto Kohvakka	Bachelor's thesis assigned by Fortum Power and Heat Oy

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	IMATRAN VESIVOIMALAITOS	2
2.1	Peruskorjaushanke	2
2.2	Vesivoimalaitosten tekniikasta	3
3	TAHTIGENERAATTORIT	6
3.1	Tahtigeneraattorin magnetointi ja kuormitettavuus.....	8
3.2	Tahtigeneraattorin toiminta-alue	11
4	MAGNETOINTIJÄRJESTELMÄT	12
4.1	Pyörivä magnetointijärjestelmä	13
4.2	Staatinen magnetointijärjestelmä.....	14
4.2.1	Magnetointimuuntaja	16
4.2.2	Tasasuuntaussilta	16
4.2.3	Kentänheikennys	18
4.2.4	Hiiliharjat	21
4.3	Harjaton magnetointijärjestelmä.....	21
4.4	Magnetointijärjestelmien vertailua	22
5	GENERAATTORIN JÄNNITESÄÄDÖLLE ASETETUT VAATIMUKSET ...	24
5.1	Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset.....	25
5.2	Vaatimukset voimalaitosten mittauksille ja tiedonvaihdolle	27
5.3	Vaatimukset voimalaitosten toiminnalle eritasoisilla jännitteillä ja taajuuksilla	27
5.4	Vaatimukset voimalaitosten toiminnalle lyhytaikaisen jännitehäiriön yhteydessä	29
5.5	Vaatimukset tahtikonevoimalaitosten taajuuden ja pätötehon säädölle	30
5.6	Vaatimukset tahtikonevoimalaitosten loistehokapasiteetille.....	31
5.7	Vaatimukset tahtikonevoimalaitosten jännitesäädölle.....	32
5.7.1	Jännitesäätäjän toiminnallisuus.....	33
5.7.2	Jännitesäätäjän redundanttisuus	33
5.7.3	Jännitesäätäjän kattojännite	33
5.7.4	Jännitesäätäjän dynamiikka	34
5.7.5	Jännitteensäätäjän statiikka.....	34
5.7.6	Jännitteensäätäjän suojaukset ja rajoittimet.....	35

5.7.7	Jännitteensäätäjän lisästabilointi	36
5.8	Käyttöönotto	36
6	GENERAATTORIN MAGNETOINTIJÄRJESTELMIIN LIITTYVÄT STANDARDIT	38
6.1	Magnetointijärjestelmien tekniset määritykset	39
6.2	Magnetointijärjestelmän toiminnoista	41
6.3	Magnetointijärjestelmän suorituskyvyn määrittäminen ja testaukset	42
7	MAGNETOINTIJÄRJESTELMÄN MITOITUS	43
8	MAGNETOINTIJÄRJESTELMÄN SUOJAUS JA LIITYNNÄT	44
8.1	Magnetointijärjestelmän suojaukset	45
8.2	Magnetointijärjestelmän liitynnät	47
9	KÄYTTÖÖNOTTOMITTAUKSET	49
10	KÄYTTÖÖNOTTOMITTAUSTEN ANALYYSINTI	51
11	MAGNETOINTIJÄRJESTELMÄN KÄYTTÖ JA YLLÄPITO	52
11.1	THYNE 5-jännitesäätäjän ylläpito ja huolto	54
11.1.1	WinOper-ohjelmisto	54
12	YHTEENVETO	57
	LÄHTEET	59

LIITTEET

1 Magnetoinnin ± 10 % askelvastekoe jännitesäätäjän automaattisäädöllä

1 JOHDANTO

Voimalaitoksen tahtigeneraattorin tehtävä on syöttää energiaa sähköverkkoon luotettavasti ja hyvällä hyötysuhteella. Tahtigeneraattorin on pysyttävä tahdissa sen ollessa kytkettynä sähköverkkoon. Tahdissa pysymisestä vastaa magnetointijärjestelmä, joka vastaa generaattorin jännitteen nostamisesta tai laskemisesta sähköverkon tasolle eri kuormitustilanteissa. Lisäksi magnetointilaitteisto vastaa jännitetason ylläpitämisestä nopeissa sähköverkon häiriötilanteissa tukien samalla sähköverkon stabiilisuutta.

Tässä työssä käsitellään tahtigeneraattorin jännitesäädön periaatteita, asetettuja vaatimuksia sekä niiden todentamista käyttöönottokokein. Generaattorin jännitteensäätö toteutetaan säätämällä generaattorin roottorin magnetointivirtaa erillisen magnetointijärjestelmän avulla.

Työn tarkoituksena oli koota yhteen tahtigeneraattorin jännitesäädölle ja magnetointijärjestelmälle asetetut vaatimukset ja määräykset sekä käsitellä magnetointijärjestelmän oikeanlaisen toiminnan todentamista. Työ tuli ajankohtaiseksi Fortumin Imatran vesivoimalaitoksen peruskorjauksen yhteydessä, kun laitoksella uusittiin vesivoimakoneen generaattori ja sen vanha magnetointijärjestelmä. Fortum on toteuttanut ja tulee toteuttamaan tulevaisuudessa vastaavia vesivoimalaitosten peruskorjaushankkeita.

Aluksi työssä käsitellään tahtigeneraattorin yleistä toimintaa ja rakennetta sekä tutustutaan erilaisiin magnetointijärjestelmiin ja niiden komponentteihin. Tämän jälkeen työssä käydään läpi kantaverkkoyhtiön voimalaitoksille asettamia järjestelmätekniisiä vaatimuksia generaattorin jännitesäädön näkökulmasta ja tutustutaan kansainvälisiin IEEE-standardeihin. Lopussa käsitellään magnetointijärjestelmille suoritettavia käyttöönottomittauksia ja testauksia, joilla todennetaan voimalaitoksen liitettävyyttä valtakunnalliseen kantaverkkoon ja verrataan työssä käsitellyn esimerkkitapauksen käyttöönotossa todennettuja arvoja asetettuihin vaatimuksiin.

2 IMATRAN VESIVOIMALAITOS

Fortum tuotti Pohjoismaissa vesivoimaa 18 terawattituntia vuonna 2013. Yhtiön koko sähköntuotannosta vesivoima kattoi 26 %. Osuus vaihtelee vuosittain jonkin verran vesitilanteen mukaan. [1.]

Fortum omistaa vesivoimaa yhteensä lähes 4 600 megawattia. Merkittävä osa Fortumin vesivoimakapasiteetista sijaitsee Keski-Ruotsin 127 voimalaitoksessa. Suomessa voimalaitoksia on 33. Pääosa Fortumin omasta vesivoimatuotannosta Suomessa sijaitsee Oulujoen ja Vuoksen vesistöissä. Lisäksi Fortum on osakkaana Kemijoki Oy:ssä. [1.]

Fortumin omistamat Imatran ja Tainionkosken vesivoimalaitokset sijaitsevat Saimaasta Laatokkaan virtaavan Vuoksen varrella. Imatran voimalaitoksen rakentaminen aloitettiin vuonna 1922 ja ensimmäisen koneiston koekäyttö alkoi vuonna 1928. Viimeinen eli seitsemäs koneisto otettiin käyttöön vuonna 1952. Imatran voimalaitoksen tuotantokyky oli pitkään 178 megawattia. Vuosina 2014 - 2015 toteutettiin Imatran voimalaitoksella laaja peruskorjaus kahdelle koneistolle, jonka jälkeen voimalaitoksen tuottama kokonaisteho nousi 192 megawattiin. [1.]

Tainionkosken voimalaitos sijaitsee noin kuusi kilometriä Imatran voimalaitoksesta ylävirtaan. Se valmistui vuonna 1950. Voimalaitoksessa on nykyään neljä koneistoa ja sen kokonaisteho on 62 megawattia. [1.]

2.1 Peruskorjaushanke

Vuosina 2014 - 2015 toteutettiin mittavat peruskorjaukset kahdelle Imatran vesivoimalaitoksen seitsemästä koneistosta. Peruskorjauksessa korjattiin täydellisesti voimalaitoksen koneistot kolme ja neljä jotka olivat tuottaneet sähköä jo vuodesta 1929 ja 1930.

Peruskorjaushankkeessa uusittiin koneistojen turpiinit, generaattorit sekä niiden apu-, sähkö- ja automaatiojärjestelmiä. Lisäksi koneistojen vesiteitä korjattiin laajasti virtaaman kasvattamiseksi. Peruskorjauksen ansiosta koneistokohtainen teho nousi lähes

seitsemän megawattia ollen nyt 27 megawattia per kone. Imatran voimalaitoksen kokonaisteho nousi näin 192 megawattiin.

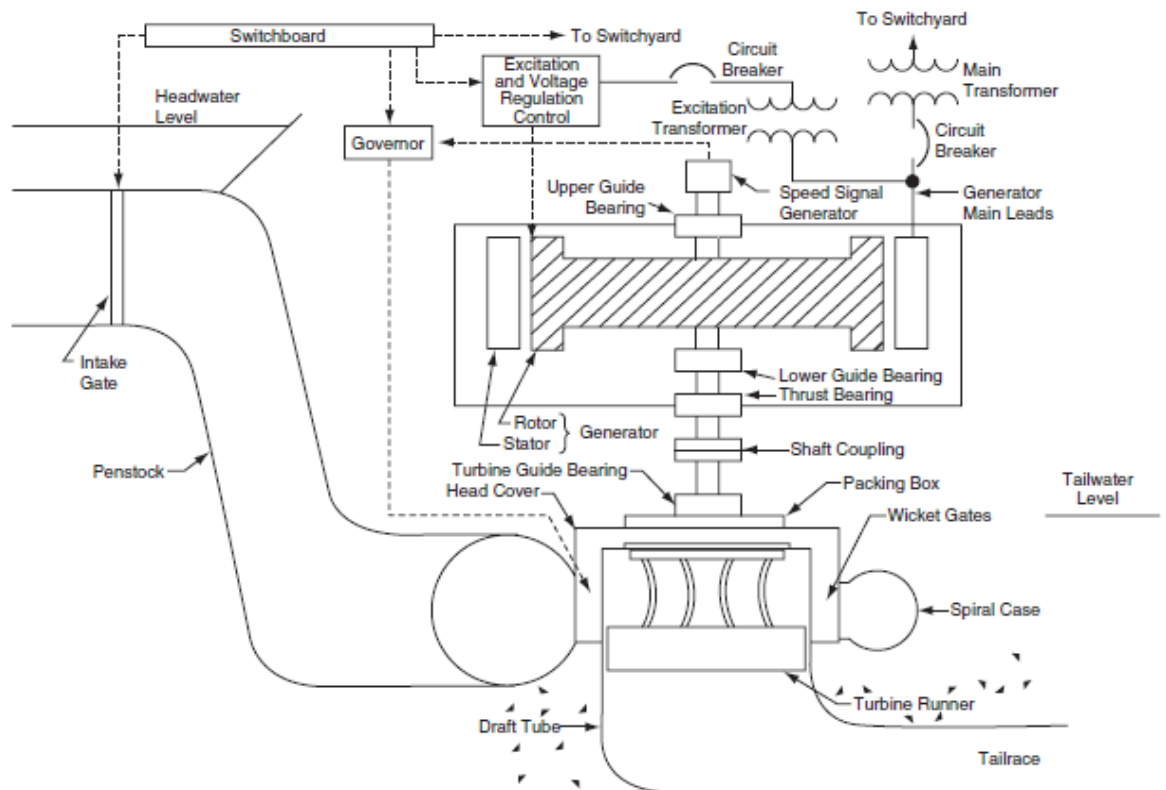
Voimalaitoksen pääkomponenteista uudet turpiinit asennuksineen toimitti ranskalais-slovenialainen Andino Hydropower Engineering Sarl ja generaattorit kroatialainen Koncar Generators and Motors Inc. Tässä työssä paneudutaan itävaltalaisen teknologiakonserni Andritz Hydron toimittamiin generaattorin magnetointijärjestelmiin, niiden toimintaan ja niille asetettuihin vaatimuksiin.

2.2 Vesivoimalaitosten tekniikasta

Kaikki vesivoimalaitokset koostuvat karkeasti seuraavista pääkomponenteista, jotka uusittiin suurelta osin Imatran voimalaitoksen peruskorjaushankkeen yhteydessä koneistojen kolme ja neljä osalta:

- Vesitiet (tulokanava ja poistokanava eli imuputki)
- Turpiini apulaitteineen
- Generaattori apulaitteineen
- Sähkönjakelu sisältäen suurjännitemuuntajan
- Ohjaus- ja säätöjärjestelmät

Lueteltujen komponenttien lisäksi tärkeä osa vesivoimalaitosta on patorakenne, johon vesi padotaan ennen sen juoksuttamista vesivoimalaitoksen läpi. Patorakenne pitää olla aina varustettu myös ohijuoksutuksen mahdollistavilla tulvaluukuilla, jotta voimalaitoksen häiriötilanteissa veden juoksutusta voidaan jatkaa normaalin lupaehtojen mukaisesti. Kuvassa 1 on esitetty IEEE-standardin 1020 mukainen kuvaus vesivoimalaitoksen pääkomponenteista pysty akselisessa vesivoimakoneistossa.



KUVA 1. Standardin IEEE 1020 mukainen kuvaus vesivoimalaitoksen pääkomponenteista pysty akselikoneistossa [2]

Turpiinityyppinä Imatran peruskorjattavissa koneistoissa on Francis-turpiini. Francis-turpiineissa on kiinteät juoksupyörän siivet, joten turpiinin säätö tapahtuu johtosolukkeiden avausta säätämällä. Francis-turpiinissa vesi johdetaan johtosolukkeiden kautta juoksupyörän ulkokehälle. Vesi kulkee juoksupyörän siipien välistä sisäkehälle ja poistuu imuputkeen (kuva 1). Kuvassa 2 on esitetty Imatran koneistoilla 1-6 käytössä olevan Francis-tyyppisen turpiinin juoksupyörä.



KUVA 2. Francis-turpiinin juoksupyörä [3]

Toinen suuri päälaitetoimitus koski koneistojen generaattoreiden uusintaa. Koska vesivoimakoneissa on yleisesti pieni pyörimisnopeus ja taajuus on vakio, tulee generaattorin napapariluvun olla suuri, mikä tarkoittaa sitä, että koneen halkaisijasta tulee suuri. Myös turpiinin koko voi asettaa rajoituksia staattorin kokoon.

Imatralla koneistojen kolme ja neljä generaattorien staattorien kokonaishalkaisijat olivat lähes 9 metriä ja tämä asettikin omat haasteensa peruskorjaushankkeeseen. Generaattoritoimittaja toimitti tehtaaltaan neljä esivalmisteltua staattorilohkoa voimalaitokselle, jossa lopullinen kääminta suoritettiin. Kun staattori oli käämitty valmiiksi, tehtiin sille vaatimusten mukaiset suurjännitetestaukset, ennen kuin se nostettiin oikealle paikalleen. Kuvassa 3 on nähtävissä Imatran koneiston kolme uuden generaattorin staattori kasausvaiheessa.



KUVA 3. Vesivoimakoneen generaattorin staattori

Kuten hitaasti pyörivissä vesivoimakoneissa yleisestikin, kyseessä on avonapa-generaattori, jonka nimellinen pyörimisnopeus on 125 rpm napapariluvun ollessa näin 24. Kyseisen generaattorin nimellisteho on 34 MVA tehokertoimella 0,9 jännitteen ollessa 10,5 kV ja virran 1870 A.

3 TAHTIGENERAATTORIT

Tahtigeneraattori on vaihtosähkökone, joka muuttaa voimakoneen sille antaman mekaanisen tehon sähkötehoksi. Voimakoneina sähkövoimalaitoksissa käytetään joko vesi-, höyry- tai kaasuturpiineja. Voimakoneen ominaisuudet vaikuttavat merkittävästi myös siihen kytketyn generaattorin mekaaniseen rakenteeseen. [4, s. 345]

Vesivoimalaitosten koneistot ovat suuremmissa voimalaitoksissa pystyakselikoneistoja. Vesivoimalaitoksissa tehoihin nähden pienehköt pyörimisnopeudet (75...500 rpm) ja tehon heilahtelujen vaimentamiseksi tarvittavat suuret hitausmomentit vaativat, että generaattoreissa on suuret halkaisijat. Näin ollen generaattorit ovat akselin suunnassa lyhyitä. Hitaasti pyörivät generaattorit ovat yleisesti roottorirakenteensa puolesta avonapakoneita. [4, s. 345]

Höyry- ja kaasuturpiinivoimalaitosten turpiinit vaativat taas suurta nopeutta ja ne rakennetaan yleensä vaaka-akselikoneiksi, joiden roottorin pituus voi olla tehojen kasvaessa kymmeniä metrejä. Generaattoreiden nimellinen pyörimisnopeus 50 Hz taajuudella on yleisesti 3000 rpm. Höyry- ja kaasuturpiinivoimalaitosten nopeakäyntiset generaattorit ovat umpinapakoneita. [4, s. 345]

Generaattorin toiminta perustuu induktiolakiin ja pyörivään magneettikenttään. Sähkömagneettisessa induktiossa liikkuvan magneettikentän leikatessa johdinta siihen indusoituu jännite ja suljettuun virtasilmukkaan syntyy virta. Kyseinen tilanne saavutetaan joko liikuttamalla johtavaa materiaalia magneettikentässä tai vaikuttamalla paikalla olevaan johtimeen muuttuvalla magneettikentällä. Tahtigeneraattorissa tarvittava magneettikenttä saadaan johtamalla roottorin eli pyörijän magnetointikäämeihin tasavirtaa. Virran muodostama magneettikenttä leikkaa seisijan eli staattorin käämityksiä, kun roottori on liikkeessä staattorin suhteen indusoiden vaihtovirran staattorin käämityksiin. Staattorin ja roottorin napojen välille syntyy magneettinen yhteys virrallisten magnetointikäämien ympärille syntyneen magneettikentän ja staattorivirran synnyttämän magneettikentän välillä. Tästä johtuen verkkoon kytketyn tahtigeneraattorin pyörimisnopeus on suoraan riippuvainen sähköverkon taajuudesta.

[4, s. 346 – 348.]

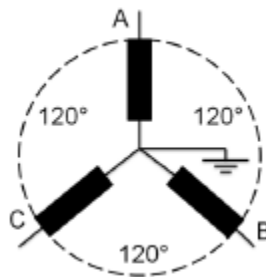
Sähköverkkoon liitetyn tahtigeneraattorin nopeuteen ei voida juurikaan vaikuttaa, sillä se määräytyy suoraan verkon nimellistaajuudesta. Täten tahtigeneraattori tuottaa energiaa vain yhdellä nopeudella, mutta nopeus voi vaihdella riippuen tahtigeneraattorien rakenteista. Nopeus määräytyy sähköverkon nimellistaajuudesta sekä generaattorin napojen lukumäärästä. Tahtigeneraattorin pyörimisnopeus n määräytyy kaavan (1) mukaisesti:

$$n = \frac{f}{p} \quad (1)$$

jossa f on taajuus ja p generaattorin napapariluku. [4, s. 346.]

Sähköverkossa, jonka nimellistaajuus on 50 Hz, kaksinapaisen generaattorin pyörimisnopeus on 3000 kierrosta minuutissa koska napaparilukuna on yksi. Vastaavasti kaksikymmentänäljänapainen vesivoimageneraattori pyörii hitaammalla 125 kierroksen minuuttinopeudella.

Generaattorin staattorikäämitykset valmistetaan niin, että ne muodostavat kolme ankurikäämistä A, B ja C kuvan 4 mukaisesti. Käämien päät kytetään yhteen siten, että ne muodostavat staattorikäämityksille yhteisen tähtipisteen. [6, s. 6.]



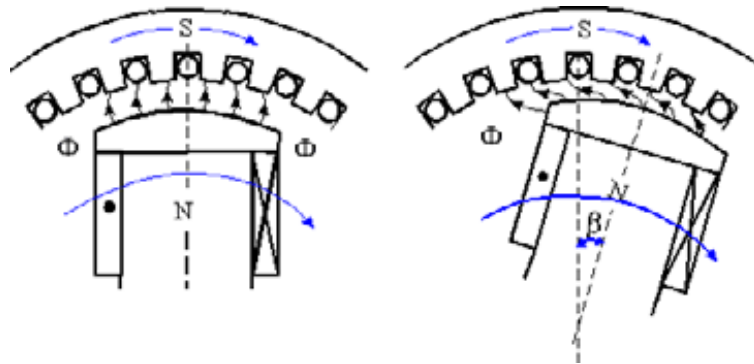
KUVA 4. Staattorin tähtipisteestä maadoitetun generaattorin käämitys [6, s. 6]

Tähtikytkettyihin kolmivaiheisiin staattorikäämityksiin induoituneiden jännitteiden välille muodostuu 120° vaihe-ero. Tähtikytkennän kautta toteutetaan myös generaattorin maadoitus vikatilanteissa syntyneiden transienttijännitteiden pienentämiseksi.

[6, s. 6.]

3.1 Tahtigeneraattorin magnetointi ja kuormitettavuus

Tahtikoneen toimintaideana on, että staattorin ja roottorin magneettinapojen välille luodaan magneettinen kytkentä, joka saa staattorin magneettikentän ja roottorin pyörimään täsmälleen samalla nopeudella. Kuvassa 5 on esitetty staattorin ja roottorin magneettikenttien välinen kytkentä generaattorikäytössä. Tyhjäkäynnissä kenttien vastakkaismerkkiset navat ovat tarkalleen vastakkain. Kun voimakoneen tehoa lisätään, pyrkii roottori kiihtymään verkon taajuudella pyörivän staattorikentän edelle, jolloin napojen välinen kulma β (ns. tehokulma) pyrkii kasvamaan. [5, s. 3.]



KUVA 4. Generaattorin staattorin ja roottorin magneettikenttien välinen kytkentä [5, s. 3]

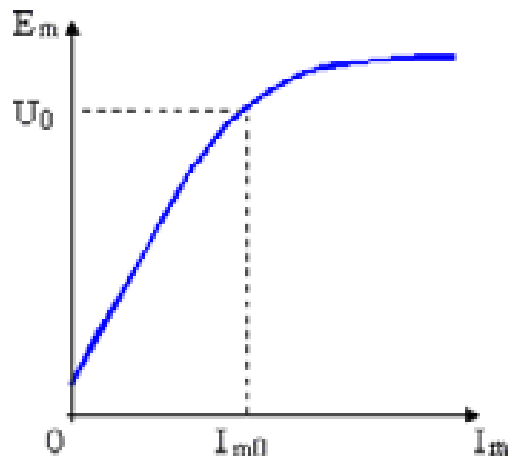
Tahtigeneraattorin staattorin kolmivaihekäämityksiin indusoituvan sähkömotorisen jännitteen E_m taajuus määräytyy napapyörän pyörimisnopeudesta ja sen tehollisarvo on kaavan (2) mukaisesti:

$$E_m = 4,44 \times f \times N \times \emptyset \quad (2)$$

jossa f on taajuus, N on staattorin vaihekäämin kierrosmäärä ja \emptyset yhden navan magneettivuon. [5, s. 4.]

Yhtälöstä 2 havaitaan, että kaikki muut ovat vakioita paitsi magnetoimisvirran synnyttämän magneettivuon suuruus. Vuon suuruus puolestaan riippuu magnetoivien ampeerikierrosten lukumäärästä, jolloin siihen voidaan vaikuttaa suoraan magnetointivirtaa säätämällä. Jos magnetointivirta on nolla, ei kone kehittä jännitettä. Kuvasta 5 nähdään koneen kehittämän jännitteen muuttuminen, kun magnetointivirtaa I_m muutetaan.

[5, s. 4.]



KUVA 5. Generaattorin staattorikämmityksiin indusoituva jännite U magne-toimisvirran I_m funktiona [5, s. 4]

Tahtikone voidaan esittää yksinkertaistamalla se yksivaiheisen sijaiskytkennän avulla. Yksivaiheisesta sijaiskytkennästä voidaan kirjoittaa tahtikoneen jänniteyhtälöksi (3):

$$U_s = E_m - (R + jX_d) \times I \quad (3)$$

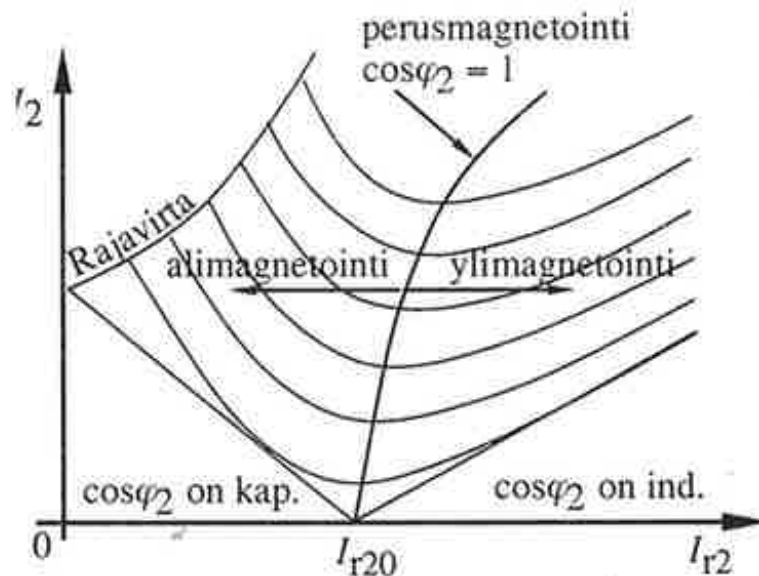
jossa U_s on koneen liitinjännite, R on koneen resistanssi ja I on koneen virta.

[5, s. 5.]

Kaavan 2 mukaan kasvattamalla koneen magne-tointia kasvaa myös koneen kehittämä jännite E_m . Tästä seuraa yhtälön 3 mukaan se, että myös koneen liitinjännite kasvaa. Kun tahtikone on kytketty ns. jäykkään sähköverkkoon, jossa jännite on vakio, ei ko-noon magne-toimisvirran kasvattaminen kuitenkaan vaikuta koneen liitinjännitteeseen, vaikka se vaikuttaakin koneen kehittämään sähkömotoriseen jännitteeseen E_m . Magne-tointivirtaa säädettyessä muuttuu staattorinvirta I siten, että jännitehäviö koneen tahti-reaktanssissa ja resistanssissa kumoaa E_m :n muutoksen. Staattorivirran päätökompo-nentti ei voi muuttua, koska generaattoria pyörittävän voimakoneen teho määrää gene-raattorin antaman päätötehon suuruuden. Magne-tointivirran suuruudella voidaan tällöin vaikuttaa vain virran loiskomponenttiin. Kun magne-tointia pienennetään, ottaa kone verkosta tarvitsemansa loisvirran eli kone kuluttaa tällöin loistehoa. Vastaavasti yli-magne-toituna kone tuottaa loistehoa verkkoon. [5, s. 5.]

Tahtikoneen kuormituskäyrillä eli V-käyrillä tutkitaan erikokoisten kuormitusten vai-kutusta tahtikoneen magne-toimisvirtaan ja staattorivirtaan ali- ja ylimagne-toimalla konetta. Yksittäinen kuormituskäyrä määritetään aina jollakin vakioteholla. Kuormi-tuskäyrillä voidaan myös havainnollistaa tahtikoneen käyttöä tahtigeneraattorina lois-

tehon kompensointiin. Kuvassa 6 on esitetty V-käyrien avulla kuinka koneen staattorivirta I_2 muuttuu magnetoimisvirran I_{r2} funktiona. Kuvasta havaitaan, että magnetointia voidaan pienentää vain tiettyyn rajaan asti, mikä määräytyy kuormituksesta. Jos magnetointia pienennetään tämän rajan yli, ei kone kykene enää kehittämään kuormituksen vaatimaa momenttia ja kone putoaa tahdistista. [5, s. 5 – 6.]



KUVA 6. Tahtigeneraattorin teoreettiset kuormitus eli V-käyrät [4, s. 234]

Kun tahtikonetta kuormitetaan, kasvaa ns. tehokulma β , kuten kuvassa 4 esitettiin. Kulma β on sama kuin roottorikäänin indusoiman jännitteen E_m ja generaattorin napajännitteen U_s välinen kulma. Tehokulmayhtälön (4) mukaisesti generaattorin verkkoon syöttämä pätöteho P kasvaa kun tehokulma β kasvaa.

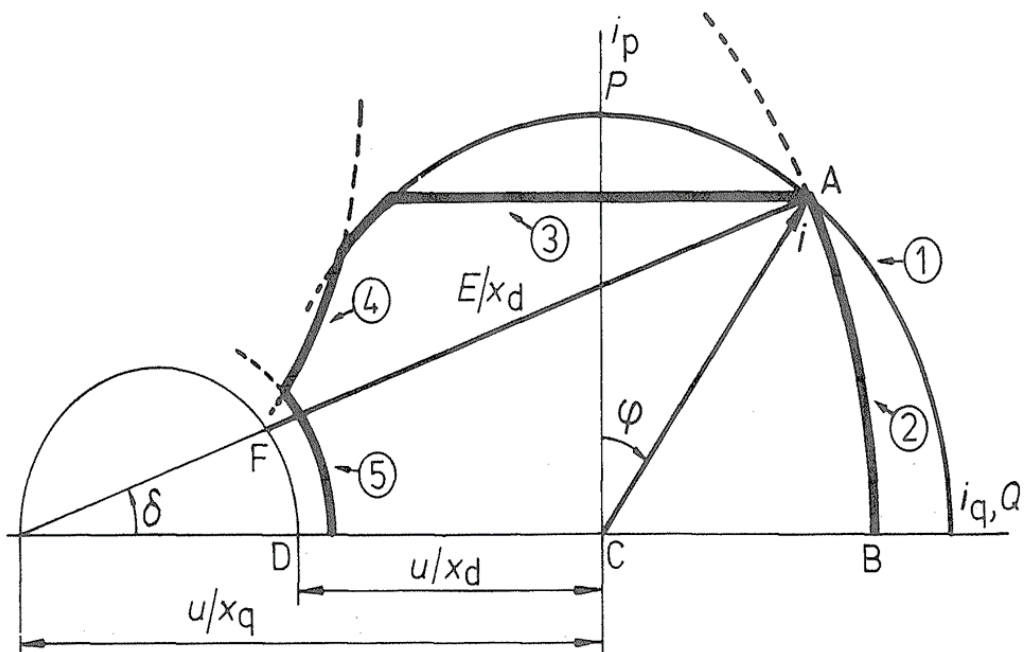
$$P = \frac{3 \times E_m \times U_s}{X} \sin \beta \quad (4)$$

jossa X tahtikoneen reaktanssi. [5, s. 6.]

Jos voimakoneen tehoa kasvatetaan liikaa, kasvaa $\beta > 90^\circ$, jolloin staattorin ja roottorin magneettinapojen välinen yhteys katkeaa ja kone putoaa tahdistista. Jos tahtikone putoaa tahdistista, toimii se vuorotellen generaattorina ja moottorina magneettinapojen asemasta riippuen. Tämä aiheuttaa verkossa teho- ja jänniteheilahteluja, jotka voivat aiheuttaa verkkoon vakavia häiriöitä. Tahdistista pudonnut generaattori on irrotettava verkosta. [5, s. 6.]

3.2 Tahtigeneraattorin toiminta-alue

Generaattorin valmistaja määrittää generaattorille pätö- ja loistehon mukaan toiminta-alueen, jossa generaattoria voidaan käyttää turvallisesti. PQ-diagrammista saadaan selville, kuinka paljon generaattorilla voidaan tuottaa pätö- ja loistehoa koneen toimintarajojen sisäpuolella pysyttäessä. Toimintarajat asettavat rajat, joissa tahtigeneraattoria voidaan ajaa jatkuvasti ilman laitteiden vaurioitumista. Rajat tahtigeneraattorille piirretään kyseisen koneen lämpenemän ja stabiilisuusrajojen perusteella. Vaaka-akselilla on loistehon ja pystyakselilla pätötehon suhteelliset arvot. PQ-diagrammista saadaan rajoitusasettelut staattorivirrälle, roottorivirrälle, magneutinnille ja loisteholle. [6, s. 10.]



KUVA 7. Tahtigeneraattorin PQ-diagrammi [7, s. 17]

Kuvassa 7 esitetty PQ-osoitindiagrammi kuvaa sitä, miten generaattori voi antaa pätötehoa verkkoon ja miten paljon se voi antaa ja ottaa loistehoa verkosta. Kuvassa generaattorin toimintapisteet sekä loistehoa ja pätötehoa rajoittavat rajat ovat:

- A. Kuormituspiste eli nimellinen käyttöpiste
- B. Tyhjäkäyntipiste nimellisellä magneutinnilla
- C. Tyhjäkäyntipiste tyhjäkäyntimagneutinnilla
- D. Tyhjäkäyntipiste ilman magneutintia

1. Vakiostaattorivirtakäyrä, staattorin lämpenemisen asettama raja
2. Vakiomagnetointikäyrä, roottorin lämpenemisen asettama raja
3. Voimakoneen pätötehoraja
4. Käytännön stabiilisuusraja
5. Alimagnetointiraja [7, s. 17.]

Magnetointivirtaa säädettäessä tulee huomioida alimagnetointiraja (5), jota ei voida alittaa, jotta saadaan pidettyä tahtigeneraattori tahdissa. Loistehon tuotantoa suurentaessa koneen lämpeneminen asettaa maksimirajan (2) sille, kuinka suurta virtaa roottoriin voidaan johtaa vahingoittamatta magnetointikämejä. Staattorikämmien kesämä maksimivirta (1) ja voimakoneen tehoraja (A) asettavat ylärajan sille, kuinka paljon generaattorilla voidaan tuottaa näennäistehoa verkkoon. Generaattorin jäähtymisen parantamisella voidaan vaikuttaa PQ-diagrammin muotoon, sillä lämpötila saadaan pidettyä samassa arvossa suuremmilla virran arvoilla. [6, s. 10.]

4 MAGNETOINTIJÄRJESTELMÄT

Tahtigeneraattoriin on siis synnyttävä tasavirralla magneettikenttä eli magneettivuo, joka roottorin mukana pyöriessään indusoi kolmivaiheiseen staattorikämmitykseen symmetrisen vaihtojännitteen. Magnetointilaitteiston päätehtävä on syöttää roottorikämmityksiin tasavirtaa tarvittavan magneettikentän luomiseksi. Generaattorin jännitteensäätö tapahtuu muuttamalla magnetointikämeihin syötetyn tasavirran suuruutta. Magnetointivirtaa säätämällä vaikutetaan generaattorin napajännitteeseen ja sitä kautta myös tehokertoimeen sekä loistehoon generaattorin ollessa kytkettynä sähköverkkoon. Generaattorin pätöteho ja taajuus määräytyvät aina turpiinin säätöjen mukaan. [6, s. 136 – 137; 8, s. 136 – 140]

Magnetointijärjestelmältä vaaditaan myös sähköverkon stabiilisuuden ylläpitoa ja tukemista häiriötilanteissa sekä osaltaan generaattoria suojaavia toimintoja vikatilanteissa. Magnetointijärjestelmän suunnittelussa onkin huomioitava se, että laitteiston on erilaisissa poikkeustilanteissa kyettävä toimimaan sähköverkon stabiilisuuden ylläpitämiseksi hetkiä, jopa tahtigeneraattorin toimintarajojen ulkopuolella. Näitä kanta-verkkoyhtiö Fingridin asettamia voimalaitosten järjestelmänteknisiä vaatimuksia käsitellään tarkemmin luvussa 5.

Magnetointijärjestelmät voidaan jakaa karkeasti kahteen erilliseen laitekokonaisuuteen. Näitä ovat automaattinen jännitteensäätäjä ja itse magnetointilaitteisto. Jännitteensäätäjään kuuluvat magnetointijärjestelmään sisältyvät säätö-, suojaus- ja rajoitintoiminnot. Magnetointilaitteiston tehtävänä on puolestaan virran ja jännitteen muuntaminen generaattorille halutun muotoiseksi ja suuruiseksi. [6, s. 8, 16.]

Tarvittavan magnetoinnin saavuttaminen generaattorissa voidaan toteuttaa syötettävän sähkövirran sijasta myös kiinnittämällä kestopagneetit roottoriin. Kestomagneettien käyttö yksinkertaistaisi magnetointilaitteistoa, mutta silloin jännitteen- tai loistehonsäätö ei ole mahdollista, koska magneettikenttä ei ole muutettavissa.

Nykyisin, kun tehoelektroniikkakomponenttien avulla tasasuunnattua vaihtosähköä hyödynnetään generaattorin magnetoimisessa, on jännitteen nousuaika huomattavasti vanhaa tasasähkömagnetointia nopeampi. Tasasähkömagnetoinnilla jännitteen nousuaika on tyypillisesti 1 – 2 sekuntia. Harjallisella vaihtosähkömagnetoinnilla vastaava arvo on 0,15 – 0,3 sekuntia ja harjattomalla hieman hitaampi 0,4 – 0,6 sekuntia.

[6, s. 17.]

Magnetointijärjestelmät jaetaan pyöriviin, staattisiin tai harjattomiin magnetointijärjestelmiin magnetointivirran tuotantotavan tai sen mukaan miten magnetointivirta johdetaan roottorikäimitykseen.

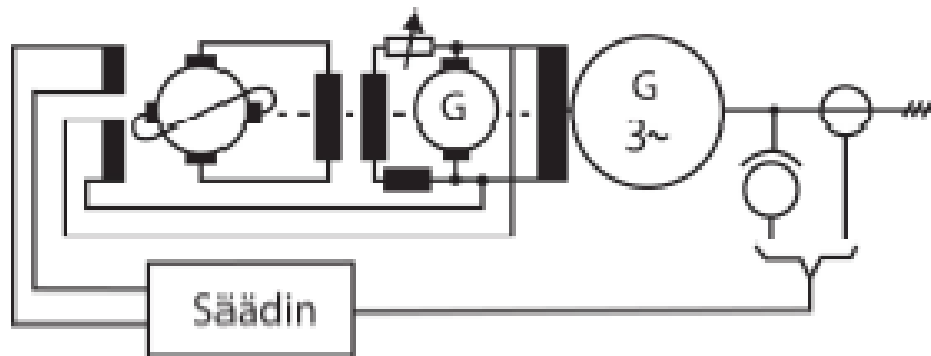
4.1 Pyörivä magnetointijärjestelmä

Etenkin vanhojen hitaasti pyörivien vesivoimageneraattoreiden magnetointi hoidettiin aikaisemmin tahtikoneen kanssa samalla akselilla pyörivällä tasavirtageneraattorilla. Tasasähkögeneraattori voi olla tyypiltään itseherätteen, jolloin sen tarvitsema magnetointikenttä tuotetaan päägeneraattorin navoista otetulla teholla tai vierasherätteen, jolloin magnetointikenttä tuotetaan apumagnetointikoneen kestopagneetin avulla.

[8, s. 137.]

Diodi ja tyristorikomponenttien yleistymisen sekä vanhojen tasasähkögeneraattoreiden vaatima runsas huolto, varaosien saamisen vaikeutuminen ja generaattoreiden mitoitustehojen nousut ovat johtaneet vanhojen magnetointijärjestelmien korvaami-

seen uusilla staattisilla tai harjattomilla magnetointijärjestelmillä. Kuvassa 8 on esitetty vierasherätteisen pyörivän magnetointijärjestelmän periaatekuva. [8, s. 137.]



KUVA 8. Pyörivän tasasähkömagnetointijärjestelmän periaatekuva [9, s. 4]

Imatran voimalaitoksen peruskorjauksen yhteydessä uusitut vanhat magnetointilaitteistot olivat tyypiltään ns. pyöriviä magnetointijärjestelmiä, jotka korvattiin uusilla staattisilla magnetointijärjestelmillä.

4.2 Staattinen magnetointijärjestelmä

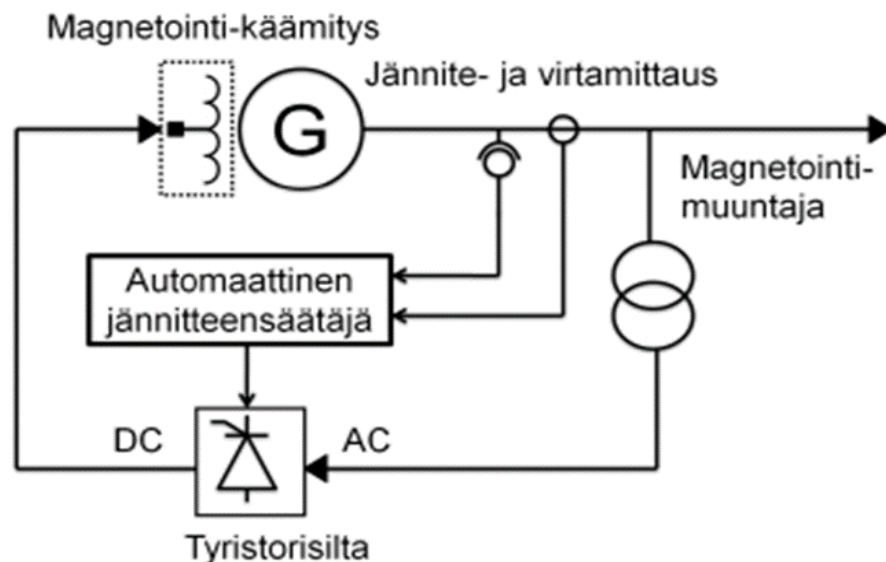
Nimitys staattiselle magnetointijärjestelmälle tulee siitä, että magnetointivirran tuotantoon ja säätöön liittyvät laitteistot pysyvät paikallaan. Staattisessa magnetointijärjestelmässä ei käytetä pyöriviä osia, kuten erillistä magnetointigeneraattoria, niin kuin muissa magnetointimenetelmissä. Laitteisto tarvitsee erillisen magnetointimuuntajan, jotta generaattorikiskostosta tai erillisestä vaihtosähkölähteestä johdettu magnetointiin käytetty sähköenergia saadaan muunnettua jännitetasoltaan magnetointilaitteistolle sopivaksi. [8, s 137.]

Jos tarvittava magnetointiteho otetaan generaattorin omista liittimistä, tarvitaan käynnistämistä varten ns. alkumagnetointi, joka otetaan useasti voimalaitoksen tasasähköakustosta. Kun generaattoria käynnistetään ja magnetointi kytketään päälle, käynnistyy alkumagnetointi. Generaattorijännite alkaa nousemaan ja kun se on noussut 5 %:iin nimellisestä arvostaan, alkaa tyristorisilta toimia ja nostaa jännitteen lähelle nimellisarvoa. Alkumagnetointi päättyy, kun magnetointivirta vaihtosähköpuolelta mitattuna nousee 10 %:iin tyhjäkäyntivirrasta. [10.]

Magnetointimuuntajalta saatu oikean suuruinen vaihtosähkö tuodaan jännitesäätäjän ohjaamaan tyristoreista koottuun tasasuuntaussiltaan. Tasasuuntaussillan aikaansaama tasavirta johdetaan hiiliharjojen ja liukurenkaiden kautta roottoriin magnetointikämmityksille.

Kuvassa 9 on esitetty harjallisen staattisen magnetointilaitteiston periaatteellinen rakenne. Staattinen magnetointijärjestelmä koostuu kuvan mukaisesti seuraavista pääkomponenteista:

- magnetointimuuntaja
- tasasuuntaaja
- ohjaus-, säätö- ja suojausjärjestelmä



KUVA 9. Staattisen magnetointijärjestelmän periaatekuva [6, s. 20]

Vanhempia tasasähkömagnetointeja korvataan usein juuri staattisilla magnetointijärjestelmillä, koska molemmat laitteistot siirtävät magnetointivirran roottorin liukurenkaihin hiiliharjojen kautta. Näin meneteltiin myös Imatran peruskorjaushankkeessa, jossa vanhat pyörivät tasasähkömagnetoinnit korvattiin uusilla staattisilla magnetointijärjestelmillä.

Harjallisten magnetointijärjestelmien haittapuolena on liukurenkaiden ja hiiliharjojen säännöllisen huollon tarve. Tarvittavan magnetointivirran siirtäminen liukurenkaiden kautta saattaa myös asettaa rajoituksia käytettävän magnetointivirran suuruuteen.

4.2.1 Magnetointimuuntaja

Suoraan generaattorin kiskostosta tai ulkoisesta lähteestä otettu teho muunnetaan magnetointilaitteistolle sopivaksi järjestelmään kuuluvalla magnetointimuuntajalla. Magnetointimuuntajana on yleisesti vapaajäähdytteinen ja huoltovapaa valuhartsieristeinen kuivamuuntaja. Kuivamuuntaja on myös palamattomuutensa ansiosta turvallisempi kuin esimerkiksi öljymuuntaja.

Muuntaja mitoitetaan magnetointijärjestelmän suurimman kattojännitteen ja generaattorin magnetointikämmityksen suurimman jatkuvan virran perusteella. Mitoitukseen vaikuttaa siis sekä generaattorin ominaisuudet että asetetut vaatimukset järjestelmän toiminnalle sähköverkon häiriötilanteissa.

Magnetointimuuntajat suojataan mahdollisimman hyvin vikaantumista vastaan. Käytössä ovat yleisesti mm. ylivirta ja oikosulkusuojat, jotka erottavat vikatilanteessa muuntajan verkosta. Muuntajan mahdollista ylikuormitusta valvotaan muuntajan käämien lämpötilojen termistorireleellä. [11.]

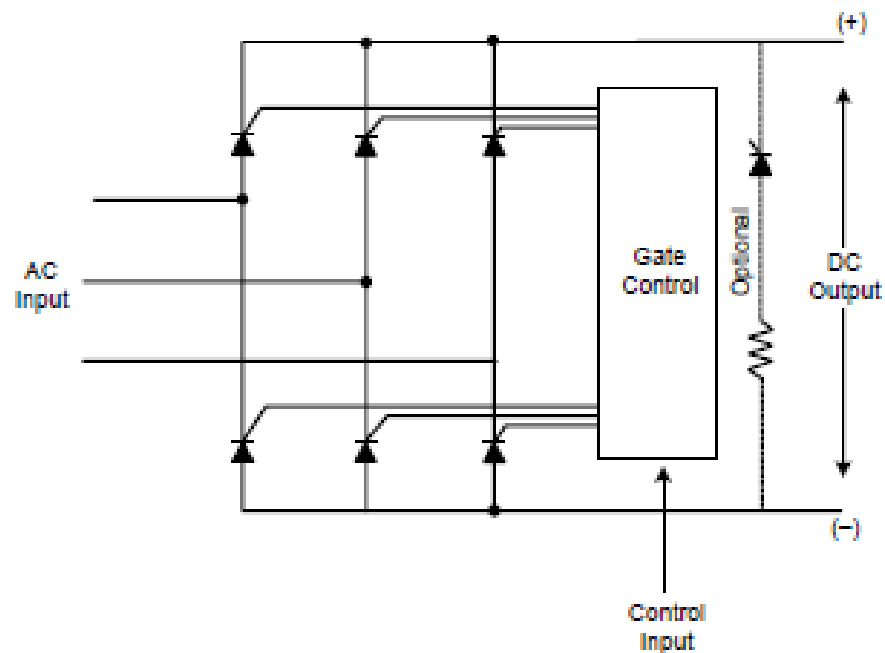
4.2.2 Tasasuuntaussilta

Magnetointimuuntajalta tai muusta tehollähteestä saatavan vaihtosähkön tasasuuntaukseen käytetään magnetointilaitteistossa kolmivaiheisia diodi- tai tyristorisiltoja. Tyristorisiltoja käytetään magnetointijärjestelmässä diodisiltojen sijasta yleisemmin, koska tasasuuntauksen lisäksi niillä voidaan säätää magnetointivirran suuruutta. [6, s. 17.]

Staattinen tasasuuntaaja koostuu yhdestä tai useammasta täysin ohjatusta tyristorisillasta. Tasasuuntaussilta on tarpeen mukaan joko puoli- tai kokoaaltosilta. Kokoaaltosillalla saavutetaan nopeampia jännitteen muutoksia, koska sillan lähtöjännitettä voidaan säätää sekä positiiviseen että negatiiviseen suuntaan. [11.]

Esimerkkitapauksessa magnetointilaitteiston kolmivaiheinen kuusipulssityristorisilta muodostuu periaatekuvan 10 mukaisesti kolmesta kahden sarjaan kytketyn tyristorin yksiköstä. Lämpötilan valvontaa varten jokainen yksikkö on lisäksi varustettu yhdellä lämpökytkimellä hälytystä ja laukaisua varten. Tyristoreja ohjataan erillisillä sytytys-

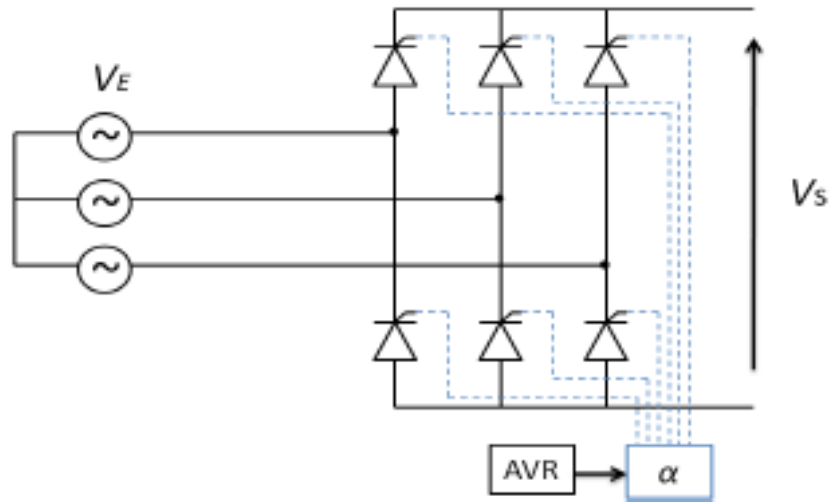
pulssivahvistimilla. Jäähdytys tapahtuu tasasuuntaajakaapin päällä olevilla jäähdytyspuhaltimilla, joita laitteiston oma valvontayksikkö ohjaa. [10.; 11.]



KUVA 10. Kokoaaltotasasuunnatun tyristorisillan periaatekuva [12, s. 20]

Esimerkkitapauksen magnetointilaitteistossa tyristorisillat on lisäksi suojattu ylivirtapiikeiltä valvotuilla nopeilla puolijohdesulakkeilla. Vastaavasti jännitepiikkien vaihentamiseksi on kunkin tyristorisillan rinnalle asennettu RC-suodattimet. Tasasuuntaussillan rakenteessa on huomioitu myös mahdolliset generaattorin roottoriin tulevat häiriöt. [11.]

Magnetointia säädetään ohjaamalla tyristorisillaa jännitesäätäjän AVR (engl. Automatic Voltage Regulator) erillisillä sytytyspulssiyksiköillä. Magnetointivirran suuruus määräytyy suoraan tyristorisillan ulostulojännitteestä V_S eli generaattorilta vaadittavasta ulostulojännitteestä. Pulssien ajoitusta suhteessa tyristorisillan syöttöjännitteeseen V_E ohjataan sytytyskulmalla α , joka kertoo kuinka paljon sytytystä on viivästetty siitä, kun tyristorin yli oleva jännite muuttuu positiiviseksi. Sytytyskulma määräytyy magnetointivirran säätimessä, jonka säätösilmukassa lasketaan kyseisen kulman arvo. Kuvassa 11 on esitetty yksinkertaistettu malli sytytyspulssiohjatusta tyristorisillasta. [6, s. 17 – 18.; 11.]



KUVA 11. Kokoaaltotasasuunnatun tyristorisillan toiminta [6, s. 18]

Automaattinen jännitesäätiä AVR säätää jatkuvasti tyristorien ohjauskulmaa kuormitustilanteen mukaan pitääkseen generaattorin napajännitteen vakiona. Andritzin staattisessa magnetointilaitteistossa käytettävissä oleva ohjausalue on rajoitettu välille $150^\circ - 10^\circ$. Kaavan (5) mukaisesti sytytyskulman α ollessa 0 tyristorisilta toimii diodisillan tavoin ja magnetointijännite V_S on suurimmillaan. [10.; 11.]

$$V_S = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \sqrt{3} V_E \cos(\alpha) \quad (5)$$

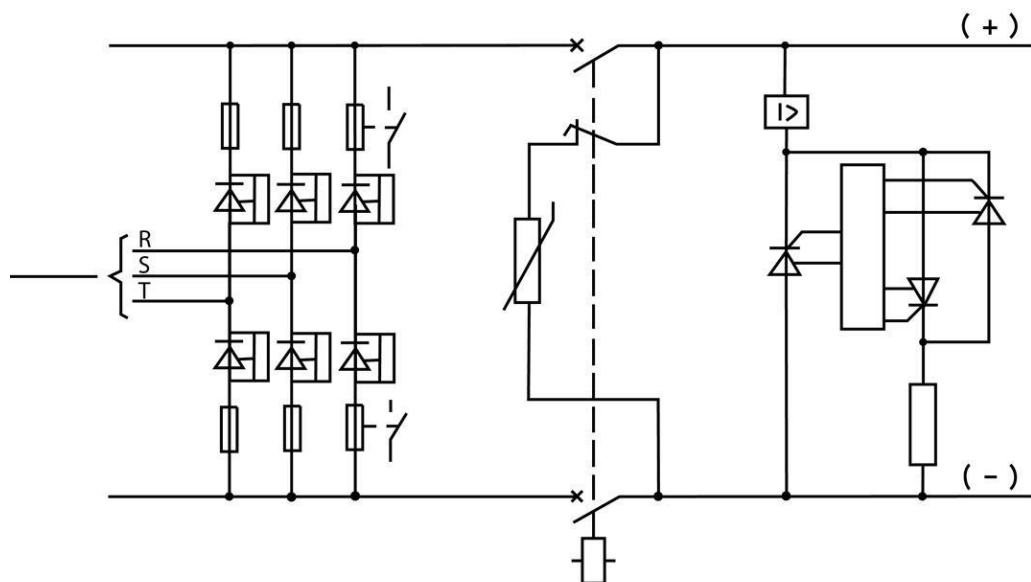
Normaalilla kuormituksella sytytyskulman α arvo on noin 90° . Mitä pienempi sytytyskulman α arvo on, sitä suurempia ovat tyristorisillan lähtöjännite ja roottorille syötetty magnetointivirta, mistä johtuen myös generaattorin napajännite kasvaa. Vastavasti mitä enemmän sytytyskulmaa α kasvatetaan eli viivästytetään, sitä pienempi on magnetointikäymitykseen vaikuttava jännite. [6, s. 17 – 18.; 11.]

4.2.3 Kentänheikennys

Staattinen magnetointijärjestelmä tulee varustaa kenttäkatkaisijalla, jolla voidaan nopeasti katkaista virran syöttö magnetointikämeihin. Tätä käytetään generaattorin sisäisissä häiriö- ja vikatilanteissa, jolloin generaattorin magneettikenttä on pienennettävä mahdollisimman nopeasti generaattorin ja magnetointijärjestelmän suojaamiseksi.

Generaattorin vikatilanteessa voi aina syntyä merkittävän suuri oikosulkuvirta, jolloin magnetointikenttä tulee katkaista mahdollisimman nopeasti vikavirran aiheuttaman vahingon ehkäisemiseksi. Vikatilanteissa pelkän generaattorikatkaisijan avaaminen ei riitä, vaan tarvitaan magnetointilaitteiston kentänheikennysjärjestelmää pienentämään magnetointiteho nopeasti sekä erottamaan roottoripiiri magnetointijärjestelmästä. Pahin vikatilanne on kolmivaiheinen oikosulku generaattorin navoissa ja se määrää kentänheikennysjärjestelmän mitoituksen. [9, s. 10 – 11.]

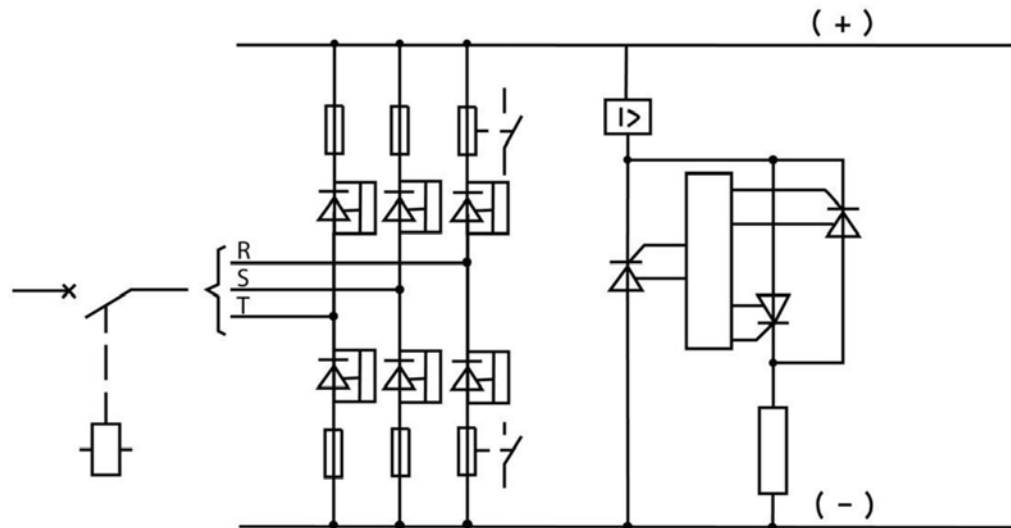
Kentänheikennysjärjestelmä koostuu kenttäkatkaisijasta ja kentänheikennysvastuksesta. Kenttäkatkaisijalla hallitaan magnetointitehon syöttöä ja sillä voidaan vikatilanteessa katkaista nopeasti magnetointivirran syöttö roottorikäämiin. Kenttäkatkaisija kytkee avautuessaan generaattorin roottoripiiriin kentänheikennysvastuksen, joka lisää magnetointipiirin vastusta. Roottoripiirin virta saadaan näin pienemmään sitä nopeammin, mitä suurempi roottoripiiriin kytketyn vastuksen arvo on. Kentänheikennys on siis käytännössä magneettikentän energian muuttamista lämmöksi erillisessä vastuksessa. Kuvassa 12 on esitetty kentänheikennys järjestelmän periaate niin, että kenttäkatkaisija on sijoitettu tasasähköpuolelle. [9, s. 10 – 11.]



KUVA 12. Magnetointilaitteiston kentänheikennys toteutettuna tasasähköpuolen kenttäkatkaisijalla [9, s. 10]

Kentänheikennysjärjestelmän yleisempi toteutus on ollut käyttää tasasähköpuolen kenttäkatkaisijaa. Kenttäkatkaisija sijoittuu magnetointilaitteiston tyristorisillan ja

roottorin magnetointipiirin väliin ja erottaa generaattorin magnetoinnin tyristorisillan molemmista navoista. Generaattorin roottoripiirin ylijännitesuojaukseen on toteutettu erillisenä piirinä. Jos kenttäkattaisija tai kentänheikennysvastus eivät jostain syystä toimisi oikein, roottorin ylijännitesuojaukseen voi tarvittaessa toimia varakentänheikentäjänä. [9, s. 10 – 11.]



KUVA 13. Magnetointilaitteiston kentänheikennys toteutettuna vaihtosähköpuolen kenttäkattaisijalla [9, s. 11]

Nykyisin kenttäkattaisija sijoitetaan useasti magnetointijärjestelmän vaihtosähköpuolelle ennen tyristorisiltaa kuvan 13 mukaisesti. Tällöin kentänheikennys toimii siten, että kattaisijan avautuminen aiheuttaa ylijännitteen generaattorin magnetointikäimitykseen. Ylijännite aktivoi ylijännitesuojan, joka pienentää ylijännitteen ja poistaa generaattorin magnetoinnin. Tässä tapauksessa samaa vastusta käytetään sekä kentänheikennykseen että magnetointipiirin ylijännitesuojaukseen, joten sen vikaantuessa ei ole olemassa redundanttista kentänheikennystä estämään roottorikäimityksen vahingoittumista. [9, s. 11.]

Nykyisin suositaan vaihtosähköpuolen kenttäkattaisijaa pienempien kustannusten ja kattaisijan pienemmän fyysisen koon takia. Esimerkkitapauksen magnetointijärjestelmässä kenttäkattaisija on sijoitettu vaihtosähköpuolelle.

4.2.4 Hiiliharjat

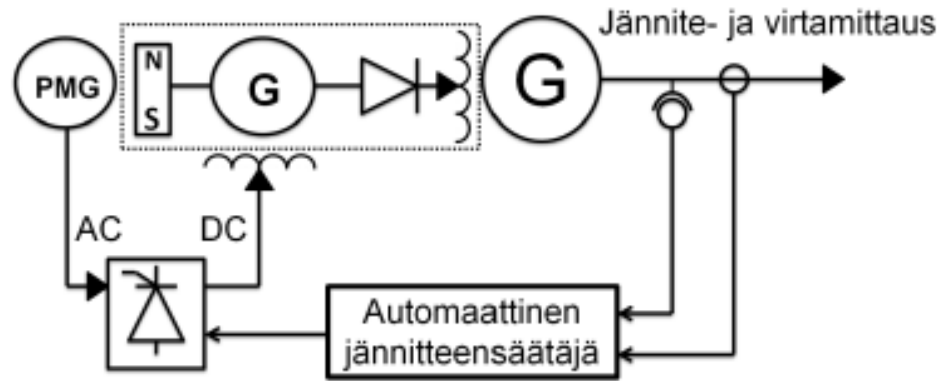
Staattisessa magnetointilaitteistossa tasasuunnattu magnetointivirta johdetaan roottorin magnetointikäimityksiin kiinnitettyihin liukurenkaisiin useimmiten grafiitista tehtyjen hiiliharjojen avulla. Nykyiset hiiliharjat ovat resistiivisyydeltään pieniä eivätkä ne juuri aiheuta häviöitä magnetointitehoon. Hiiliharjat kuluvat ja tuottavat hiilipölyä liukurengasta hangatessaan ja vaativat siten säännöllistä huoltoa, mutta ne ovat huomattavasti kestävämpiä kuin vanhojen tasasähkökoneiden kupariliuskoista valmistetut hiiliharjat. Vierekkäisten liukurenkaiden polariteetti on vastakkainen, sillä toinen kuljettaa virtaa roottoriin ja toinen roottorista pois päin. [8, s. 613 – 618.]

Hiiliharjoista on lisäksi varmistettava, että ne painautuvat riittävällä voimalla liukurenkaita vasten. Tarvittava harjapaine toteutetaan laitteistoon kuuluvilla jousilla, jotka painavat harjoja riittävällä voimalla liukurenkaisiin ja varmistavat näin riittävän kulutien magnetointivirralle. Hiiliharjoja käytettäessä jousien antama oikeanlainen paine on yksi kriittisimmistä tekijöistä hiiliharjallisen magnetointilaitteiston ja täten myös generaattorin toiminnan kannalta. [8, s. 624 - 626.]

4.3 Harjaton magnetointijärjestelmä

Harjattomassa magnetoinnissa ei nimensä mukaisesti tarvita harjalaitteistoa magnetointivirran johtamiseksi roottorin magnetointikäimitykseen, vaan magnetointienergia tuotetaan generaattorin akselilla ja tasasuunnataan roottorilla sijaitsevalla tasasuuntaajasilalla. Harjattomassa magnetointilaitteessa herättimenä toimiva vaihtosähkögeneraattori syöttää tasasuuntaajan avulla tasavirran suoraan generaattorin roottorille.

Herätinkoneen magnetointikäimitys on sijoitettu koneen staattoriin. Kolmivaiheinen ankkurikäimitys, johon jännite indusoidaan, on sijoitettu koneen pyörivään roottoriin. Diodeilla toteutettu pyörivä tasasuuntaajasilta tasasuuntaa roottorissa kulkevan virran, ennen kuin se johdetaan päägeneraattorin magnetointikäimityksille. Pyörivä kestopagneetti indusoi jännitteen kestopagneettigeneraattorin staattoriin, josta se johdetaan tasasuunnattuna herätinkoneen magnetointikäimeihin. Päägeneraattorin jännitteensäätäjä ohjaa apuherättimen tuottamaa magnetointivirran suuruutta tyristoreiden sytytyskulmaa säätämällä. [6, s. 20 – 21.]



KUVA 14. Harjattoman magnetointijärjestelmän periaatekuva [6, s. 21]

Harjaton magnetointijärjestelmä on huoltovapaampi kuin staattiset magnetointilaitteistot, koska siinä ei ole huoltoa vaativia hiiliharjoja. Laitteiston luotettavuutta lisää myös se, että se on riippumaton magnetointimuuntajaa syöttävän verkon häiriöistä, koska magnetointivirta tuotetaan generaattorin pääakselilla olevalla magnetointigeneraattorilla.

Harjattomaan magnetointijärjestelmään ei kuulu erillistä kentänheikennyskatkaisijaa eikä purkausvastusta. Magnetointikentän heikennys toteutetaan vaimentamalla magnetointikoneen kenttä, mikä onnistuu nopeasti sitä syöttävän tyristoritehoasteen invertoinnilla. Magnetointikoneen aikavakio on suhteellisen pieni, joten kentänheikennykseen tarvittava aika on vain hieman pidempi kuin perinteisessä kenttäkatkaisijalla varustetussa kentänheikennyksessä. [9, s. 15]

4.4 Magnetointijärjestelmien vertailua

Magnetointijärjestelmän valinnan ja suunnittelun lähtökohtana on luonnollisesti generaattori, jolle tarvittava magnetointivirta muokataan ja johdetaan. Koska magnetoinnilla ohjataan suoraan generaattorin jännitettä, voidaan magnetointijärjestelmän ulostulojännitteen nousuaikoja pitää oleellisena arvona magnetointilaitteistoja vertailtaessa. Mitä nopeampaan jännitteen muutokseen magnetointilaitteisto pystyy, sitä helpompi on pitää yllä sähköverkkoon kytketyn generaattorin stabiilisuutta ja näin välttyä tahdistatippumiselta. Toinen merkittävä vertailuarvo on magnetointilaitteiston tuottaman kattojännitteen suuruus suhteessa generaattorin nimellijännitteeseen ja se, kuinka nopeasti jännitettä saadaan nostettua. [6, s. 47 – 51.]

Generaattorin teho taas määrää sen, miten suurta magnetointivirtaa generaattorin magnetointikämeihin on johdettava ja täten käytettyjen magnetointijärjestelmän komponenttien mitoituksen. Magnetointijärjestelmän valinnassa tulee myös huomioida järjestelmältä vaaditut ominaisuudet, kuten jännitteennousuajat ja luotettavuus. Myös hankinta- ja käyttökustannukset ovat merkittäviä tekijöitä tarvittavan huollon ja laitteiston eliniän arvion ohella. [6, s. 47 – 51.]

Taulukossa 1 on vertailtu erityyppisten magnetointijärjestelmien ominaisuuksia. Staattinen magnetointi on säätöteknisiltä ominaisuuksiltaan hyvä ja se soveltuu hyvin dynaamisesti vaativiin kohteisiin käännavirran nopean säädön ansiosta. Staattisella magnetoinnilla saavutetaan 0,15 – 0,3 sekunnin napajännitteen nousuaika, kun vastaava arvo harjattomalla magnetoinnilla on 0,4 – 0,6 sekuntia. Harjattomassa magnetointijärjestelmässä jokainen pyörivä komponentti kuluttaa aina omaa aikavakiota vastaavan ajan muutostilassa. Staattisessa magnetointilaitteistossa ei ole vastaavia pyöriä laitteita, sillä magnetointivirta otetaan verkosta magnetointimuuntajan läpi.

[6, s. 17, 47 – 51.]

TAULUKKO 1. Magnetointijärjestelmien vertailua [6, s. 51]

Ominaisuus	Pyörivä tasasähkömagnetointi	Staattinen magnetointi	Harjaton magnetointi
Dynaamisuus	Heikko	Erinomainen	Kohtalainen
Negatiivinen magneettikenttä	Mahdollinen	Mahdollinen	Ei mahdollinen
Kentänheikennys	Kenttäkatkaisija ja heikennysvastus	Kenttäkatkaisija ja heikennysvastus	Ei mahdollinen
Huolto	Hiiliharjat, liukurenkaat ja herätinkone (kommutaattori)	Hiiliharjat ja liukurenkaat	Pyörivä diodisilta
Kattojännite	Rajoitettu	Rajoittamaton	Rajoitettu
Aikavakiot	Tasavirtageneraattori ja ohjauspiirit	Ohjauspiirit	Herätinkone ja ohjauspiirit
Kahden tasasuuntaajan käyttö	Mahdollinen	Mahdollinen	Ei mahdollinen
Tasasuuntaus	Ei	Tasasuuntaussilta	Pyörivä diodisilta

Staattisella magnetointijärjestelmällä saavutetaan myös parempi hyötysuhde kuin harjattomalla magnetoinnilla. Magnetoinnin aiheuttamat tehohäviöt koostuvat virtahäviöiden lisäksi tavasta, jolla virta johdetaan generaattorin magnetointikäämyksiin. Staattisessa magnetoinnissa syntyy lisähäviöitä, kun virta johdetaan liukuharjojen avulla liukurenkaille ja harjattomassa järjestelmässä häviöt syntyvät pyörivässä tasasuuntauslaitteistossa. [6, s. 47 – 51.]

Harjallisten magnetointijärjestelmien haittapuoleksi pitää laskea liukurenkaiden ja hiiliharjojen säännöllisen huollon tarve. Tarvittavan magnetointivirran siirtäminen liukurenkaiden kautta voi asettaa myös rajoituksia käytettävän magnetointivirran suuruuteen.

Koska staattinen magnetointilaitteisto ottaa tehonsa generaattorilta tai erillisestä syööstä on sen toiminta riippuvainen sähköverkosta. Verkossa tapahtuvat viat ja häiriöt vaikuttavat saatavissa olevaan magnetointivirtaan, mutta toisaalta kattojännitteen tuotantokyky on suurempaa kuin magnetointigeneraattorista saatu. Staattiselta magnetointilaitteistolta vaadittu kattojännite voi joissain tilanteissa olla suuri verrattuna normaalin käyttötilanteen ulostulojännitteeseen. Tällöin voidaan käyttää kahta erillistä eri tilanteisiin mitoitettua tyristorisiltaa tasasuuntaukseen. [6, s. 47 – 51.]

5 GENERAATTORIN JÄNNITESÄÄDÖLLE ASETETUT VAATIMUKSET

Suomen sähkönsiirron kantaverkosta vastaa Fingrid Oyj. Koko maanlaajuinen kantaverkko on sähkönsiirron runkoverkko, johon ovat liittyneet suuret voimalaitokset ja tehtaat sekä alueelliset jakeluverkot. Suomen kantaverkko on osa yhteispohjoismaista sähköjärjestelmää.

Fingridin vastuulla ovat kantaverkon käytön suunnittelu ja valvonta sekä verkon ylläpito ja kehittäminen. Fingrid on asettanut järjestelmätekniisiä vaatimuksia Suomen sähköjärjestelmään liittyville voimalaitoksille. Vaatimusten lähtökohtana on pohjoismainen sääntökokoelma ”Nordic Grid Code”. Voimalaitosten järjestelmätekniisten vaatimusten asettamisella pyritään varmistamaan, että:

- Voimalaitos kestää sähköjärjestelmässä esiintyvät jännite- ja taajuusvaihtelut.

- Voimalaitos tukee sähköjärjestelmän toimintaa häiriötilanteiden yhteydessä sekä toimii luotettavasti niiden aikana ja niiden jälkeen.
- Voimalaitos ei verkossa ollessaan aiheuta haittaa muille sähköjärjestelmään kytketyille laitteille.
- Liittymispisteen verkonhaltijalla ja Fingridillä on käytössään sähköjärjestelmän ja sen käytön suunnitteluun sekä käyttövarmuuden ylläpitoon tarvittavat tiedot voimalaitoksesta. [13, s. 6.]

5.1 Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset

Fingridin asettamat järjestelmätekniset vaatimukset VJV 2013 koskevat niitä Suomen sähköjärjestelmään kytkettyjä tai kytkettäviä voimalaitoksia, joiden nimellisteho on yli 0,5 MW. Vaatimusten taso riippuu voimantuotantomuodon, voimalaitoksen mitoitustehon ja maantieteellisen sijainnin perusteella. Voimalaitosten teholuokat on esitetty taulukossa 2. Vaatimukset koskevat sähköjärjestelmään liitettäviä uusia voimalaitoksia, mutta niitä tulee soveltaa myös käytössä oleviin voimalaitoksiin silloin, kun niiden järjestelmäteknisiä ominaisuuksia muutetaan. [13, s. 10.]

TAULUKKO 2. Voimalaitosten teholuokat [13, s. 10]

Teholuokka	Voimalaitoksen mitoitusteho
Teholuokka 1	$0,5 \text{ MW} \leq P_{\max} < 10 \text{ MW}$
Teholuokka 2	$10 \text{ MW} \leq P_{\max} < 25 \text{ MW}$
Teholuokka 3	$25 \text{ MW} \leq P_{\max} < 100 \text{ MW}$
Teholuokka 4	$P_{\max} \geq 100 \text{ MW}$ (tai $\geq 10 \text{ MW}$ tietyt voimalaitokset Lapissa)

Sähköverkkoon liittyjällä on vastuu asetettujen vaatimusten täyttämisestä ja todentamisesta sekä niihin liittyvistä kustannuksista. Liittyjän vastuulla on täyttää ja ylläpitää ne voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset, jotka ovat voimassa voimalaitoksen liittymissopimusta tehtäessä. Liittymispisteen verkon haltijan on määritettävä voimalaitoksen VJV-referenssipiste, jossa asetetut vaatimukset on täytettävä. Tahtikonevoimalaitoksilla VJV-referenssipiste on yleisesti generaattorimuuntajan yläjännitepuolella. [13, s. 12, 26.]

Fingrid voi halutessaan vaatia lisäselvityksiä ja toimenpiteitä, jos poikkeavuuksia asetetuista vaatimuksista havaitaan missä tahansa voimalaitosprojektin vaiheessa tai voi-

malaitoksen normaalin käytön aikana. Jos voimalaitoksen toiminnan puutteet vaikuttavat sähköjärjestelmän toimintaan, Fingridillä on järjestelmävastaavana oikeus myös rajoittaa voimalaitoksen toimintaa ja asettaa voimalaitoksen käyttöön liittyviä ehtoja. Asetetut rajoitteet ovat voimassa, kunnes voimalaitoksen toiminnassa havaitut puutteet on korjattu ja voimalaitoksen kyky täyttää järjestelmätekniiset vaatimukset on todennettu. [13, s. 13.]

Kun käytössä olevaan voimalaitokseen tai sen järjestelmätekniisiin ominaisuuksiin vaikuttaviin laitteistoihin tai järjestelmiin tehdään muutoksia, liittyjän tulee ennen muutosten toteuttamista ilmoittaa liittymispisteen verkonhaltijalle sekä Fingridille muutoksista ja niiden vaikutuksesta voimalaitoksen kykyyn täyttää asetetut vaatimukset. [13, s. 13.]

Sähköverkkoon liittyjän vastuulla on myös määrittää voimalaitoksen ja voimalaitosliitynnän suojausasettelut henkilö- ja laiteturvallisuuden takaamiseksi sekä laitevaurioiden välttämiseksi. Suojausasettelut tulee asettaa siten, että voimalaitos pysyy verkossa sähköjärjestelmän häiriöiden aikana, niin kauan kuin se on voimalaitoksen teknologian ja toiminnallisen turvallisuuden sallimissa rajoissa mahdollista. Asettelujen tulee perustua laitteiden kykyyn kestää voimakkaita vaihteluita järjestelmän taajuudessa ja VJV-referenssipisteen jännitteessä. [13, s. 25.]

Järjestelmätekniisten vaatimusten todentamiseen ja täyttymiseen liittyvien toimenpiteiden tulee olla hyväksytysti suoritettuina viimeistään 12 kk kuluttua hetkestä, kun muutosten toteuttaminen käytössä olevan voimalaitoksen laitteistoon on aloitettu tai uusi voimalaitos on ensimmäisen kerran syöttänyt pätötehoa sähköjärjestelmään.

[13, s. 13 – 14.]

Liittyjän tulee suorittaa vaatimusten mukaiset toimenpiteet määrätyn todentamisprosessin mukaisesti neljässä vaiheessa. Toimenpiteisiin kuuluvat yleisten voimalaitostietojen toimittaminen, käyttöönottokoneiden suunnittelu ja suorittaminen, dokumentointi sekä vaatimusprosessin hyväksyntä. [13, s. 18 – 21.]

Liittymispisteen verkonhaltijan tulee valvoa vaatimusten todentamisprosessia mukaan lukien käyttöönottokokeet voimalaitosprojektin aikana sekä suorittaa prosessin vaatima tiedonvaihto liittyjän ja Fingridin kanssa. [13, s. 14.]

5.2 Vaatimukset voimalaitosten mittauksille ja tiedonvaihdolle

Asetettujen vaatimusten mukaan verkkoon liittyjän on toimitettava vähintäänkin voimalaitoksen energianmittaustieto Fingridille (teholuokan 1 laitokset). Teholuokan 2 ja 3 voimalaitoksilta tulee Fingridille toimittaa reaaliaikaisesti pätö- ja loistehomittaus-tiedot, tuntikohtainen energianmittaustieto sekä kytkinlaitteiden tilatiedot. Näiden lisäksi teholuokan 4 voimalaitoksilla täytyy olla häiriö- ja heilahtelutallentimet. Tallentimet mahdollistavat voimalaitoksen ja sen säätäjien toiminnan mittaamisen ja tallennuksen sähköjärjestelmän häiriö- ja muutostilanteissa. Tallennusjärjestelmälle on asetettu seuraavat vaatimukset:

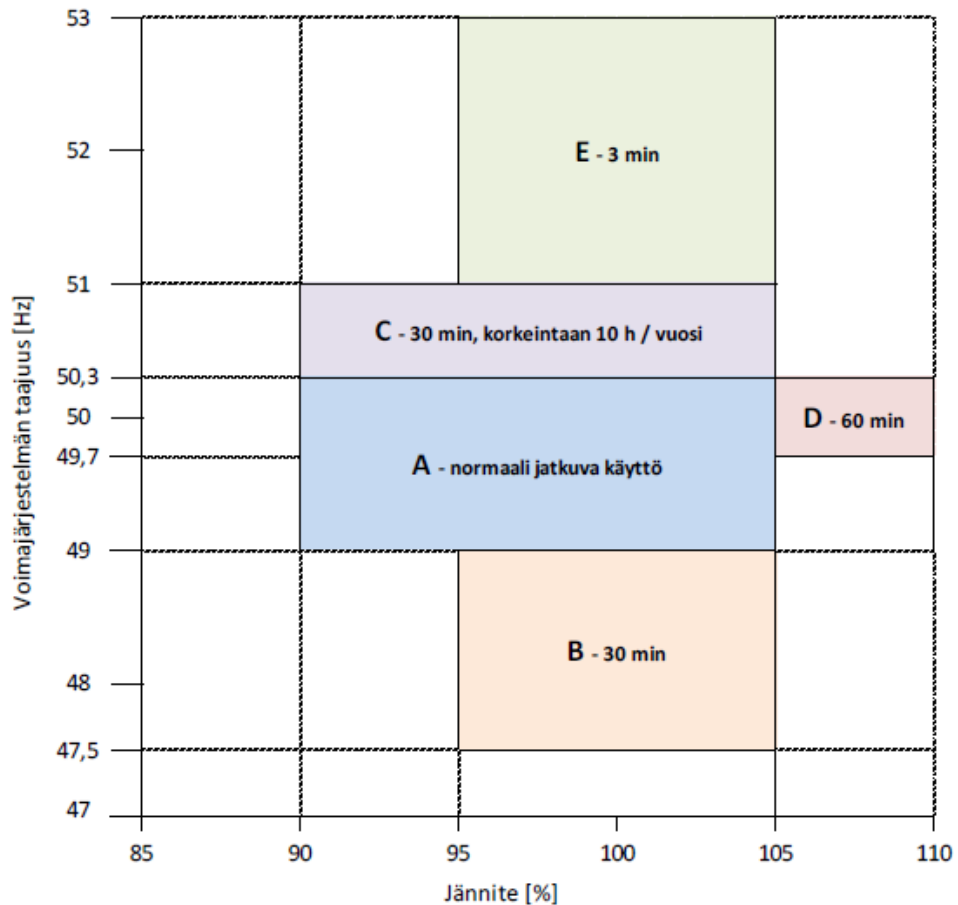
- Häiriötallentimen näytteenotto- sekä tallennustaajuuden tulee olla korkea (1 kHz tai suurempi). Tallennusajan tulee olla muutamia sekunteja.
- Heilahtelutallentimen näytteenottotaajuuden tulee olla korkea (1 kHz) ja tallennustaajuus voi olla matala (50 Hz tai suurempi). Tallennusajan tulee olla kymmeniä sekunteja.
- Tallennusjärjestelmät tulee toteuttaa siten, että Fingrid saa käyttöönsä järjestelmän tallenteet viimeistään 24 tunnin kuluessa siitä, kun Fingrid esittää pyynnön liittyjälle.
- Tallennusjärjestelmien käynnistymisarvot VJV-referenssipisteeseen liittyvien suureiden osalta tulee asetella yhteistyössä Fingridin kanssa. [13, s. 23 – 24.]

5.3 Vaatimukset voimalaitosten toiminnalle eritasoisilla jännitteillä ja taajuuksilla

Suomen kantaverkon nimellisjännitteet ovat 110 kV, 220 kV ja 400 kV. Suunnittelun lähtökohtana käytettävät normaalit liittymispisteen jännitteet ovat vastaavasti 118 kV, 233 kV ja 410 kV. Kaikille jännitetasoille on määritelty vaihtelualueet normaali ja häiriötilanteissa. Esimerkiksi 110 kV:n verkossa jännitteen normaali vaihtelualue on 105 -123 kV ja häiriö- ja poikkeustilanteessa 100 – 123 kV.

Pohjoismaisen sähköjärjestelmän taajuus on normaalisti 49,9 - 50,1 Hz. Taajuus voi kuitenkin vaihdella 49,5 - 50,5 Hz välillä tai poikkeuksellisesti jopa välillä 47,5 – 53 Hz. [13, s. 27.]

Voimalaitoksen on pystyttävä toimimaan jatkuvasti ja normaalisti, kun VJV-referenssipisteen jännite on 90 - 105 % ja taajuus on 49,0 - 50,3 Hz. Jos referenssipisteen jännite, taajuus tai molemmat poikkeavat näistä arvoista, on voimalaitoksen pystyttävä sähköjärjestelmässä vähintään vaatimusten määrittämät ajat kuvan 15 mukaisesti. [13, s. 27 – 28.]



KUVA 15. Voimalaitoksen toiminta-alueet, joiden rajoissa verkkokäyttöä on jatkettava teknologian sallimissa rajoissa [13, s. 28]

- **A:** Normaali jatkuva voimajärjestelmän käyttöalue, jonka sisällä ei voimalaitoksen pätö- tai loistehon tuotantokyvyn alenemista sallita.
- **B:** 30 minuutin yhtäjaksoinen käyttöalue siten, että suurin sallittu lineaarinen tehon alenema 49 Hz:n taajuudella on 0 % ja 47,5 Hz:n tasolla 15 %.
- **C:** 30 minuutin yhtäjaksoinen käyttöalue korkeintaan 10 tunnin ajan vuosittain siten, että 10 % tehon alenema sallitaan, mikäli se ei aseta rajoituksia toiminnan jatkamiselle täydellä teholla taajuuden palattua alle 50,3 Hz:n.
- **D:** 60 minuutin yhtäjaksoinen käyttöalue, jossa sallitaan 10 % tehon alenema täydestä tehosta.

- **E:** 3 minuutin yhtäjaksoinen käyttöalue, jossa sallitaan voimakas tehon alenus. [13, s. 28.]

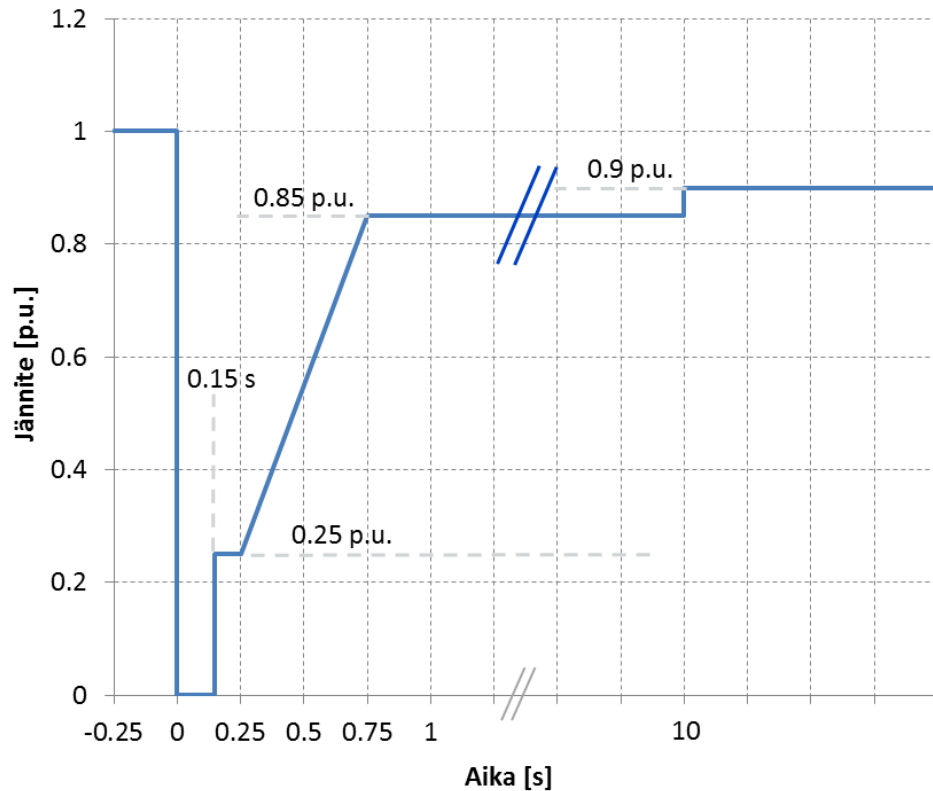
5.4 Vaatimukset voimalaitosten toiminnalle lyhytaikaisen jännitehäiriön yhteydessä

Sähköverkkoon liittyjä vastaa siitä, että voimalaitoksen suojausten suunnittelussa otetaan huomioon sähköjärjestelmässä tapahtuvien häiriöiden ja vikojen aiheuttamat lyhytaikaiset voimakkaat muutokset sähköverkon jännitteissä, virroissa ja taajuudessa sekä voimajohtojen käytön palautuksessa yleisesti käytettävät pika- ja aikajälleenkytkennät. Liittyjän vastuulla on myös koordinoida suojausten asetteluarvot liittymispisteen verkonhaltijan kanssa. [13, s. 25.]

Sähköjärjestelmään liitettävien voimalaitosten tulee kestää häiriöiden aiheuttamia voimakkaita muutoksia VJV-referenssipisteen jännitteessä sekä häiriöiden aiheuttamaa jännitteen epäsymmetriaa vähintään sähköjärjestelmän suojausten toiminta-aikojen mukaisesti. [13, s. 25.]

Vaatimusten mukaisesti on voimalaitosten pystyttävä jatkamaan toimintaansa sähköjärjestelmän häiriöiden aikana ja niiden jälkeen. Tahtikonevoimalaitokset omakäyttöineen on suunniteltava siten, että ne kestävät lyhytaikaisen referenssipisteessä tapahtuvan jännitteen vaihtelun irtoamatta verkosta ja menettämättä tahtikäyttöään. Häiriön jälkeen voimalaitoksen tulee kyetä toimimaan irtoamatta verkosta jännitehäiriötä seuraavien, mahdollisten laitoskohtaisten tai järjestelmätaajuisten sähkömekaanisten heilahteluiden aiheuttamien lyhytaikaisten jännitteen amplitudin ja vaihekulman vaihteluiden ajan. [13, s. 29.]

Kuvassa 16 on esitetty voimalaitos teholuokkien 1, 2 ja 3 lyhytaikaisen jännitehäiriön kuvaus, jonka jälkeen voimalaitoksen tulee pystyä jatkamaan normaalitoimintaansa. Yli 10MW laitosten on lisäksi kyettävä palauttamaan häiriötä edeltänyt tehotaso yhden sekunnin kuluessa. [13, s. 30.]



KUVA 16. Lyhytaikaista 150ms jännitehäiriötä VJV-referenssipisteessä kuvaa suhteellinen jännite [13, s. 29]

Voimalaitoksen sähköntuotantolaitteiston toiminnasta mahdollisen lyhytaikaisen jännitehäiriön yhteydessä tulee toimittaa laskelmat verkonhaltijalle heti vaatimusten todentamisprosessin vaiheessa 1. Lähivikalaskelman tarkoitus on osoittaa, että voimalaitos kykenee säilyttämään tahtikäytön ja palautumaan stabiiliin toimintapisteeseen kolmivaiheisen oikosulun jälkeen, joka tapahtuu sähköisesti lähellä generaattoria.

[13, s. 30.]

5.5 Vaatimukset tahtikonevoimalaitosten taajuuden ja pätötehon säädölle

Tahtikonevoimalaitoksella pitää olla tuotantotehon säätöön ja ylläpitoon sekä pyörimisnopeudensäätöön vaadittavat toiminnallisuudet. Fingridillä on oikeus vaatia voimalaitoksia säätämään tehoa asetettujen vaatimusten ja verkon tilanteen mukaan.

[13, s. 36.]

Voimalaitosten minimitehon tulee olla mahdollisimman pieni. Suunnitteluperusteina voidaan käyttää kaasuturpiini-, moottorivoima- ja vesivoimalaitoksilla 10 % mitoitus-tehostaan. Muille voimalaitoksille sekä sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksille

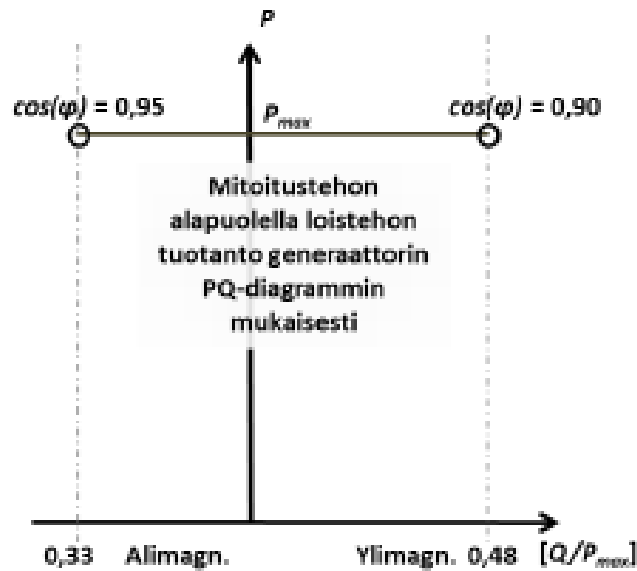
sallitaan 40 % mitoitustehosta. Laitoksen maksimitehoon mahdollisesti vaikuttavista riippuvuuksista ja rajoituksista pitää tehdä ilmoitus Fingridille. Lisäksi kaasuturpiini-, moottorivoima- ja vesivoimalaitoksille on asetettu 10 minuutin käynnistysaikavaatimus. [13, s. 36 – 37.]

Voimalaitokset tulee varustaa turpiinisäätäjällä sekä pyörimisnopeuden säädöllä. Tehosäädön pitää mahdollistaa tehon asetteleminen ja säätäminen manuaalisesti turpiinisäätäjällä, lisäksi tehon muutosnopeuden tulee olla aseteltavissa. Taajuussäädön toteutus tulee olla sellainen, että voimalaitos pystyy osallistumaan automaattisesti sähköverkon taajuuden tukemiseen häiriötilanteissa. Taajuussäädöllä tulee olla vähintään kaksi toimintatilaa: normaalitila ja häiriötila, lisäksi säädölle tulee olla aseteltavissa kuollut alue välillä 0,0 – 1,0 Hz sekä lineaarinen säätöstatistiikka välillä 2 - 12 %. Taajuussäädön herkkyyden tulee olla enintään 10 mHz ja reagointiajan 2 sekuntia. [13, s. 37 – 38.]

Pätötehon muutosnopeusvaatimus on määritelty suurimpana tehonmuutosnopeutena generaattorin tuotantotehon asetteluarvon muutokselle. Muutosnopeuden tulee olla kaasuturpiini-, moottorivoima- ja vesivoimalaitoksilla normaalissa käyttötilanteessa ± 40 % laitoksen mitoitustehosta minuutissa, kun voimalaitoksen teho on alueella 40 – 100 %. Muilta voimalaitoksilla vaaditaan ± 5 % muutosnopeutta minuutissa, kun laitoksen teho on 60 – 90 % mitoitustehosta. Verkon häiriötilanteille on asetettu tiukemmat muutosnopeuden rajat, mutta vastaavasti säätöalue ja sitä vastaava voimalaitoksen toiminnan tehoalue ovat pienempiä. Häiriössä puolet vaaditusta tehonmuutoksesta tulee saavuttaa 5 sekunnissa ja kokonaisuutos 30 sekunnissa. [13, s. 38 – 39.]

5.6 Vaatimukset tahtikonevoimalaitosten loistehokapasiteetille

Perusvaatimuksena voimalaitoksen generaattorin ja generaattorimuuntajan reaktanssi tulee olla mahdollisimman pieniä, kuitenkin huomioiden tekniset ja taloudelliset rajoitukset niin, että voimalaitos tukee tehokkaasti voimajärjestelmän stabiilia toimintaa. Generaattorin tulee kyetä toimimaan jatkuvasti mitoitustehollaan P_{\max} , kun generaattorin liittimistä mitattava tehokerroin on alimagnetointitilanteessa 0.95_{kap} ja ylimagnetointitilanteessa 0.9_{ind} , kuvan 17 mukaisesti.



KUVA 17. Tahtikonevoimalaitokselta vaadittava loistehokapasiteetti [13, s. 39]

Tahtikonevoimalaitoksen tulee kyetä:

- Rajoittaa VJV-referenssipisteen jännitteen nousua syöttämällä referenssipisteeseen induktiivista loistehoa, kun referenssipisteen jännite on korkeampi kuin liittymispisteen verkonhaltijan määrittämä normaali käyttöjännite.
- Rajoittaa VJV-referenssipisteen jännitteen laskua syöttämällä referenssipisteeseen kapasitiivista loistehoa, kun referenssipisteen jännite on matalampi kuin liittymispisteen verkonhaltijan määrittämä normaali käyttöjännite.

[13, s. 39 – 41.]

Voimalaitoksen loistehokapasiteetista on toimitettava laskelma verkonhaltijalle. Laskelmassa osoitetaan voimalaitoksen kyky tuottaa ja kuluttaa loistehoa määritetyillä VJV-referenssipisteen jännitetasoilla ja voimalaitoksen tehotasoilla. [13, s. 40.]

5.7 Vaatimukset tahtikonevoimalaitosten jännitesäädölle

Seuraavassa käsitellään voimalaitosten järjestelmätekniisten vaatimusten VJV2013 asettamia vaatimuksia voimalaitoksen jännitesäätäjälle ja sen ominaisuuksille.

5.7.1 Jännitesäätäjän toiminnallisuus

Voimalaitoksen generaattoreilla on oltava generaattorin liitinjännitteen vakiojännitesäätö, jonka avulla ohjataan generaattorin loistehoa. Säätö tulee toteuttaa siten, että säädön toiminta on jatkuvaa ja säädön toiminnan vaikutuksesta loistehon muutokset VJV-referenssipisteessä tapahtuvat portaattomasti. Säädön toiminta ei saa häiriintyä verkon jännitteen ja taajuuden muutoksista tai lyhytaikaisista jännitehäiriöistä.

[13, s. 42.]

Generaattorin jänniteensäädön ensisijainen käyttötapa on liitinjännitteen vakiojännitesäätö. Jänniteensäädön asetusarvon tulee olla aseteltavissa enintään portaissa $0,01 \times$ generaattorin nimellisjännite. Jos halutaan käyttää muuta säätötapaa, kuten vakioiloistehosäätöä, vakiotehokerroinsäätöä tai ylempää voimalaitostason säätöä, tulee säädön pystyä vastaamaan jännitemuutoksiin kuten generaattorin liitinjännitteen vakiojännitesäätö. Mikäli voimalaitoksella käytetään vakioiloistehonsäätöä, tulee sen olla aseteltavissa enintään 1 Mvarin portaissa. Muun kuin vakiojänniteensäädön käyttämisestä voimalaitoksen jänniteensäädössä on sovittava aina erikseen Fingridin kanssa.

[13, s. 42 – 43.]

Mahdollisen jänniteensäädön toimintatilan (auto-käsi) tai asetusarvon muutosten tulee tapahtua ilman merkittäviä heilahteluita laitoksen tuottamassa tehossa. Lisäksi muutokset tulee kyetä suorittamaan paikallisesti tai kaukokäyttöjärjestelmän kautta etäohjauksina. [13, s. 42, 44.]

5.7.2 Jännitesäätäjän redundanttisuus

Sähköjärjestelmän käyttövarmuuden turvaamiseksi generaattorin jänniteensäätäjä tulee toteuttaa kaksikanavaisena niin, että molemmissa kanavissa on automaattinen generaattorin liitinjännitteen vakiojännitesäätö ja sen varajärjestelmänä magnetointivirran käsissäätö mahdollisuus. [13, s. 42.]

5.7.3 Jännitesäätäjän kattojännite

Lyhytaikaisen jännitehäiriön aikana vielä jännitetasolla 85 % nimellisjännitteestä on generaattorin pystyttävä tuottamaan loistehoa nimellisen pätötehonsa mukainen määrä

vähintään 10 sekunnin ajan. Jännitesäätäjä onkin mitoitettava niin, että se pystyy syöttämään häiriöissä vaadittavan magneutinnin kattojännitteen seuraavasti:

- Staattisella harjallisella magneutintijärjestelmällä 2 kertaa mitoituskormituspistettä vastaava magneutintijännite.
- Harjattomalla magneutintijärjestelmällä 1,6 kertaa mitoituskormituspistettä vastaava magneutintijännite. [13, s. 42 – 43.]

5.7.4 Jännitesäätäjän dynamiikka

Vaatimusten mukaisesti, kun tyhjäkäyvän ja verkosta irti olevan generaattorin jännitesäätäjän asetusarvoa muutetaan ylöspäin 95 prosentista 105 prosenttiin tai alaspäin 105 prosentista 95 prosenttiin, on mitatun askelvasteen oltava:

- Harjallisella magneutinnilla tulee askelvasteen nousu- ja laskuaika nolasta 90 prosenttiin olla liitinjännitteen kokonaismuutoksesta 0,2 – 0,3 sekuntia.
- Harjattomalla magneutinnilla tulee askelvasteen nousu- ja laskuaika nolasta 90 prosenttiin olla liitinjännitteen kokonaismuutoksesta nostossa 0,2 – 0,5 sekuntia ja laskussa 0,2 – 0,8 sekuntia. [13, s. 43.]

Jännitesäätäjä asetteluissa on kuitenkin huomioitava, että askelvaste ei värähtele. Laitteiston käyttöönottomittauksissa suoritettavissa askelvastekokeissa on todettava, ettei ylitys ole yli 15 prosenttia liitinjännitteen kokonaismuutoksesta. [13, s. 43.]

5.7.5 Jännitteensäätäjän statiikka

Statiikalla tarkoitetaan voimalaitoksella tuotetun pätötehon suhteellista muutosta taajuuden muutokseen. Jännitesäätäjien yhteydessä tarkastellaan loistehostatiikka, joka tarkoittaa tuotetun loistehon suhteellista muutosta jännitteen muutokseen. Vaatimuksen mukaan loistehostatiikan tulee olla lineaarinen ja aseteltavissa alueella 1...10 %. [13, s. 44.]

Sähköverkon loistehokuorman kasvaessa pienennetään generaattorin jänniteohjetta verrannollisesti loisvirran muutokseen. Statiikasta johtuen verkkojännite pienenee reaktiivisella kuormituksella. Loistehostatiikkaa voidaan käyttää yksittäisen generaat-

torin sekä rinnankäyvien generaattoreiden säädössä. Yksittäisen generaattorin tapauksessa säädön ainoa tehtävä on pitää jännite asetetuissa rajoissa. Useamman generaattorin tapauksessa loistehostatiikka huolehtii jännitesäädön lisäksi generaattoreiden välistä loistehotasapainosta, jolla taataan generaattoreiden stabiili toiminta. Esimerkkitapauksessa loistehostatiikan arvoksi on aseteltu -3 prosenttia, jolloin lähdejännite putoaa niin, että nimellisen loisvirran kohdalla jännitteen lasku on 3 prosenttia.

[14, s. 8 – 9.]

5.7.6 Jännitteensäätäjän suojaukset ja rajoittimet

Generaattorin ja voimalaitoksen jännitesäädön rajoittimet tulee suunnitella ja asettaa siten, että niiden toiminta rajoittaa mahdollisimman vähän voimalaitoksen kykyä tuottaa ja kuluttaa loistehoa. Loistehokapasiteetin rajoittamiseksi käytettävien magne-toinnin lisäsäätöjen, rajoittimien ja magne-toinnin toimintaan liittyvien suojien tulee olla koordinoitu siten, että generaattorinloistehokapasiteetti tulee hyödynnettyä tehokkaasti ilman generaattorin verkosta irti kytkeytymisen riskiä. [13, s. 40 – 41.]

Jännitteensäätöjärjestelmään tulee kuulua myös toiminnollisuudet generaattorin yli-kuormituksen suojaukseen. Generaattorin roottorin ja staattorin virranrajoittimilla tulee olla käänteinen aikakarakteristika, jotta generaattorin jännitteensäätölaitteiden yli-kuormitusalueita voidaan hyödyntää erilaisissa käyttötilanteissa. Rajoittimien toiminnan tulee ohjata mahdollisimman suoraan ja viiveettömästi jännitteensäätäjän toimintaa mahdollisten voimakkaiden yli- tai alijännitteiden välttämiseksi voimalaitoksen VJV-referenssipisteessä.

- Alimagne-toinnin rajoittimen toiminta tulee koordinoita virtarajoittimien (staattori, roottori, magne-tointi) sekä magne-toinnin menettämissuojauksen ja mahdollisen lisästabilo-intipiirin kanssa.
- Ylimagne-toinnin rajoittimen toiminnan tulee koordinoita virtarajoittimien (staattori, roottori, magne-tointi) sekä ylivirtasuojien ja mahdollisen lisästabilo-intipiirin kanssa. [13, s. 44.]

5.7.7 Jännitteensäätäjän lisästabilointiipiiri

Suurten teholuokan 4 voimalaitosten generaattoreilla on lisäksi käytettävä lisästabilointiipiiriä (PSS, Power System Stabilizer), jolla pyritään parantamaan matalataajuisien tehoheilahtelujen vaimennusta laitostason paikallisten heilahtelujen sekä sähköjärjestelmän välisen heilahtelun osalta. [13, s. 44.]

Lisästabiloinnin tulee olla sellainen, että piiri voidaan virittää vaimentamaan generatorin ja sähköjärjestelmän välisiä heilahteluja 0,2 – 2,0 Hz:n taajuuksilla. Lisästabiloinnin on oltava poiskytkettävissä ja lisästabilointisignaalin suuruutta on rajoitettava rajoittimilla, joiden asetelut voidaan valita. Lisästabilointiipiirin vaatimusten mukainen toiminta tulee todentaa käyttöönottokokeiden yhteydessä. Lisästabilointiipiirin virittämisestä järjestelmätaajuisien heilahteluiden vaimentamiseksi tulee sopia erikseen Fingridin kanssa. [13, s. 44.]

5.8 Käyttöönottokokeet

Liittyjän vastuulla on todentaa voimalaitoksen toimivan sille asetettujen vaatimusten mukaisesti. Vaatimukset tulee todentaa ensisijaisesti voimalaitoksen käyttöönoton yhteydessä suoritettavilla käyttöönottokokeilla. Käyttöönottokokeet on suunniteltava ja toteutettava siten, että voimalaitoksen todellisen toiminnan ja dynamiikkamallinustietojen vastaavuus voidaan osoittaa laskelmin. Käyttöönottokokeet tulee suorittaa yhteistyössä liittyjän, verkonhaltijan ja Fingridin kanssa. Fingridin edustajilla on oikeus osallistua halutessaan kaikkiin käyttöönottokokeisiin. [13, s. 45 – 46.]

Liittyjän velvollisuus on laatia voimalaitoskohtainen käyttöönottokoesuunnitelma. Liittyjän tulee toimittaa käyttöönottokoesuunnitelma, alustavat käyttöönotto-ohjeet ja kuvaus kokeiden käytännön järjestelyistä. Kuvauksen käytännön järjestelyistä tulee sisältää mittausjärjestelyt, vastuuhenkilöt ja alustavan aikataulun. Asiakirjat on toimitettava verkonhaltijalle viimeistään 3 kuukautta ennen käyttöönottokokeiden suunniteltua aloitusajankohtaa. [13, s. 45.]

Viimeistään 2 kuukautta ennen käyttöönottokokeita on järjestettävä tapaaminen sähköverkkoonliittyjän, verkonhaltijan ja Fingridin välillä. Tapaamisessa sovitaan lopullinen käyttöönottokoesuunnitelma, aikataulu ja käytännön järjestelyt. Mikäli tapaamis-

ta ei järjestetä, tulee tiedonvaihto suorittaa muulla sovitulla tavalla. Jokaisen edellä mainitun osapuolen tulee nimittää vähintään yksi yhteyshenkilö käyttöönottoa varten. [13, s. 46.]

Voimalaitoksen käyttöönottokokeissa todennetaan seuraavat asiat ja niiden vaatimusten täyttyminen:

- voimalaitoksen toiminta minimiteholla
- voimalaitoksen todellinen loistehokapasiteetti
- generaattorin loistehon ja jännitteensäädön toiminta
 - generaattorin magnetoinnin toiminta ja ominaisuudet
 - generaattorin vakiojännitesäädön toiminta ja aseteltavuus
 - generaattorin jännitteensäädön alimagnetointirajoittimen toiminta
 - generaattorin jännitteensäädön ylimagnetointirajoittimen toiminta
- voimalaitoksen kyky osallistua sähköjärjestelmän tehon ja taajuuden säätöön suurten taajuusmuutosten yhteydessä
 - taajuussäädön nopean vasteen ominaisuudet
 - taajuussäädön hitaan vasteen ominaisuudet
 - taajuussäädön statiikan kuollut alue ja asettelu mahdollisuudet
- voimalaitoksen pätötehon säädön ja pätötehon muutosnopeus
- voimalaitoksen siirtyminen omakäytölle ja toiminta omakäytöllä
- voimalaitos toimii lyhytaikaisen jännitehäiriön aikana ja jännitehäiriön jälkeen vaatimusten mukaisesti
- generaattorin jännitteensäädön lisästabiloointipiirin toiminta ja vaste, jos stabilointi on käytössä. [13, s. 47 – 49.]

Kaikissa käyttöönottokokeista tulee mitata ja tallentaa ainakin seuraavat suureet vähintään 50 Hz:n tallennustaajuudella: generaattorin liitinjännite, magnetointijännite, taajuus, magnetointivirta, pätöteho ja loisteho. Lisäksi tulee tallentaa käyttöönottokokeessa säädettävän suureen asetteluarvo sekä asetteluarvon muutokset. [13, s. 46.]

Verkkoon liittyjän vastuulla on dokumentoida kaikki käyttöönottokokeet ja niiden tulokset käyttöönottoraporttiin. Liittyjän tulee toimittaa käyttöönottoraportti sähköisenä asiakirjana sekä käyttöönottokokeiden tulokset numeerisessa muodossa verkonhaltijalle. [13, s. 47.]

Tahtikonevoimalaitosten ja sähköverkon vuorovaikutuksen mallinnusta ja dynamiikkalaskentaa varten on turpiinigeneraattorista toimitettava lohkokaaeviotason kuvaus verkonhaltijalle. Toimitetut tiedot todennetaan vertaamalla mallinnustietojen laskentatuloksia voimalaitoksen käyttöönottokokeiden tuloksiin. Tahtikonevoimalaitoksista todennettavat osa-alueet on esitetty teholuokittain taulukossa 3. [13, s. 50 – 51.]

TAULUKKO 3. Tahtikonevoimalaitosten todentamisvelvoitteet teholuokittain [13, s. 51]

Todennettava osa-alue	Teholuokka 2	Teholuokka 3	Teholuokka 4
Jännitteen askelvaste (nousu ja lasku)	X	X	X
Jännitteensäädön statiikka kahdella asetusarvolla		X	X
Lisästabilointipiirin toiminta			X
Ylimagnetointirajoittimen toiminta			X
Alimagnetointirajoittimen toiminta			X
Lähivikakoe			X

Voimalaitoksen teholuokasta riippuen toimitetaan vaadittujen käyttöönottokokeiden mittaustiedot numeerisessa muodossa verkonhaltijalle. Näihin käyttöönotossa mitattuihin arvoihin verrataan mallinnustiedoilla laskettuja arvoja ja todennetaan näin tahtikonevoimalaitoksen täyttävän asetetut vaatimukset. [13, s. 50 – 53.]

6 GENERAATTORIN MAGNETOINTIJÄRJESTELMIIN LIITTYVÄT STANDARDIT

Kansainvälisiltä tekniikan alan järjestöiltä IEC (International Electrotechnical Commission) ja IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) löytyy standardeja ja ohjeistuksia magnetointijärjestelmiä koskevien käsitteiden, rakenteiden, toimintojen, käyttöönottotestausten, suorituskyvyn sekä hankintamäärittysten laadintaa varten seuraavasti:

- IEC 60034-16-1 - Rotating electrical machines - Part 16-1: Excitation systems for synchronous machines – Definitions
- IEC 60034-16-2 - Rotating electrical machines - Part 16-2: Excitation systems for synchronous machines - Chapter 2: Models for power system studies
- IEC 60034-16-3 Rotating electrical machines - Part 16-3: Excitation systems for synchronous machines - Section 3: Dynamic performance
- 421.1-2007 - IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines
- 421.2-2014 - IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems
- 421.3-1998 - IEEE Standard for High-Potential Test Requirements for Excitation Systems for Synchronous Machines
- 421.4-2014 - IEEE Guide for the Preparation of Excitation System Specifications
- 421.5-2005 - IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies

6.1 Magnetointijärjestelmien tekniset määritykset

Imatran voimalaitoksella uusien magnetointijärjestelmien hankinta tuli ajankohtaiseksi vanhojen pyörivien ja analogisten magnetointijärjestelmien korkean iän sekä vesivoimakoneistojen kolme ja neljä perusparannushankkeen myötä. Hankintamäärittelyssä oli määritelty tarkasti uusilta magnetointijärjestelmiltä halutut ominaisuudet ja se noudatti rakenteeltaan lähes standardin IEEE 421.2 kuvaamaa rakennetta. Määrittelyssä ei kuitenkaan viitattu IEEE-standardeihin vaan siinä tukeuduttiin yksittäisten komponenttien, kuten pyörivät sähkökoneet (IEC 60034), puolijohdesillat (IEC 60146), tehomuuntajat (IEC 60076 ja 60726) ja pienjännitekojeistot (IEC 61439) IEC-standardeihin sekä kansallisiin velvoittaviin SFS-sähköturvallisuus standardeihin.

IEEE 421-standardien mukaisesti magnetointijärjestelmien hankinnassa ja teknisissä määrittelyissä täytyy huomioida seuraavat yleiset asiat:

- magnetointijärjestelmien yleiset toimintavaatimukset liittyvässä sähköjärjestelmässä (sisältäen mahdolliset sähköjärjestelmän dynamiikasta tulevat lisävaatimukset, kuten esim. tarve lisästabiloinnille)
- tuleva toimintaympäristö (voimalaitostyyppi ja käyttövaatimukset)
- asennuspaikka ja muut asennuksessa huomioitavat asiat
- paikalliset standardit ja muut huomioitavat määräykset
- eristysluokka, jos kyseessä pyörivä magnetointilaitteisto
- tasasuuntauskomponentit tai ainakin niiden jännitekestoisuus vaatimus (tyristorit vai diodit)
- käytettävyyksivaatimus (kahdennettujärjestelmä, mahdollisuus käsikäyttöön)
- suositellut varaosat. [15, s. 3 – 6.]

Magnetointilaitteiston mitoittamiseen liittyvät sähköiset arvot täytyy määrittellä erityisen tarkasti, jottei laitteiston kapasiteetti jäisi liian pieneksi tai kasvaisi turhaan liian suureksi, jolloin laitteiston hinta nousee kalliiden komponenttien takia. Onkin suositeltavaa, että mitoituksessa käytettävät sähköiset arvot mainitaan esimerkiksi teknisen määrityksen liitteissä vain kerran, jotta sekaantumisen vaaraa ei tulisi.

Magnetointilaitteiston mitoittaminen jo käytössä olevalle generaattorille on aina astetta haastavampaa kuin kokonaan uuden voimalaitoksen generaattorille, koska käytössä olevasta sähköjärjestelmästä tarvitaan generaattorin sähköisten arvojen lisäksi mm. suojausten sekä ohjaus- ja säätöjärjestelmien tietoja. Uusissa voimalaitosprojekteissa generaattori ja magnetointilaitteisto tulevat useasti samalta toimittajalta, joten tiedonvaihto ongelmia hankintavaiheessa ei tule eteen. Magnetointilaitteiston mitoittamista varten tarvittavat generaattorin arvot ovat:

- generaattorin teho
- generaattorin tehokerroin
- generaattorin taajuus
- generaattorin nimellisjännite
- generaattorin pyörimisnopeus
- roottorin tyyppi
- generaattorin reaktanssi arvot
- ilmavälin magnetointivirran suuruus (vain uusinnassa)

- magnetointivirran ja -jännitteen suuruus tyhjäkäynnillä (vain uusinnassa)
- magnetointivirran ja -jännitteen suuruus maksimi kuormalla (vain uusinnassa)
- magnetointivirran ja -jännitteen suuruus normaalikäyttöolosuhteissa (vain uusinnassa). [15, s. 9 – 10.]

Lisäksi magnetointilaitteiston normaalia -ja häiriötilankäyttöä varten on annettava seuraavia mitoitus tietoja:

- magnetointilaitteistolta vaadittu magnetointivirta (vaatimus ± 5 % ellei muuta määritetä)
- magnetointilaitteistolta vaadittu magnetointijännite (vaatimus ± 5 % ellei muuta määritetä)
- tehosuuntaajan mitoitusohjeet (ylimitoitus antaa teho-osalle lisää käyttöikä ja mahdollistaa generaattorin tehon kasvattamisen myöhemmin)
- magnetoinnilta vaadittava maksimi kattojännite (tapauskohtaisesti myös kattovirta voidaan määrittellä)
- generaattorin resistanssiarvot (vikatilanteiden oikosulkulaskentaa varten). [15, s. 7 – 9.]

6.2 Magnetointijärjestelmän toiminnoista

Nykyaikaiset magnetointijärjestelmät sisältävät monipuoliset säätö- ja ohjauslaitteistot haluttujen säätö- ja rajoitustoimintojen suorittamiseksi. Käyttöön valitut toiminnot vaikuttavat keskeisesti magnetointijärjestelmän kokonaissuorituskykyyn. Kaikkia magnetointijärjestelmien lisätoimintoja ei ole aina tarvetta käyttää tai ne aktivoituvat tapauskohtaisesti esimerkiksi silloin, kun jännitesäätö on päällä. Yleisimmät käytössä olevat säätö- ja rajoitustoiminnot ovat:

- automaattinen jännitesäätö
- jännitteen käsiasäätö
- loisvirran kompensointi
- ali-magnetoinnin rajoitin
- yli-magnetoinnin rajoitin
- sähköverkon lisästabilointi

- jännite/taajuus rajoitin
- säädönseuranta ominaisuus säädön toimintatilan vaihtotilanteissa
- sähköverkosta aiheutuvan vääntömomentin stabilointi
- loisteho- tai tehokerroinsäätö
- yhteisjännitesäätö useamman generaattorin kesken. [15, s.17 – 21.]

6.3 Magnetointijärjestelmän suorituskyvyn määrittäminen ja testaukset

Standardi määrittelee yleisimmät magnetointijärjestelmien suorituskyvyn määrittämiseen käytetyt suureet. Magnetointijärjestelmän suorituskyvyn määrittämisessä tulee huomioda se, että voimalaitoksen muutkin ominaisuudet kuten generaattorin ja sähköjärjestelmän impedanssi vaikuttavat suuresti laitteiston suorituskykyyn. Seuraavassa on lueteltu IEEE-standardin mukaisia suorituskyvyn osoittamiseen käytettyjä mittareita, joita käytetään magnetointilaitteiston ominaisuuksien määrittämiseen:

- toiminta käsisäädöllä
- toiminta automaattisäädöllä
 - normaalitilassa
 - pienissä muutostilanteissa
 - suurissa muutostilanteissa
- magnetointilaitteiston matemaattinen mallinnus. [15, s.13 – 14.]

Magnetointijärjestelmän toiminnallisuuden määrittämiseen käytetään tehdastestauksia ja voimalaitoksella suoritettavia käyttöönottokestuksia. Laitteiston tehdastestit eivät ole välttämättömyys, koska suuri osa toiminnallisuuksista pystytään osoittamaan käyttöönottovaiheessa, mutta tilaaja voi halutessaan vaatia myös tehdastestejä järjestettäväksi. Testit sisältävät yleisesti laitteiston yleiset tarkastukset, mahdolliset tyyppitestit, suurjännitetestit sekä toiminnalliset testaukset. Voimalaitoksen käyttöönottovaiheessa todetaan kaikkien määritettyjen toimintojen toimivuus generaattorin käydessä tyhjäkäynnillä jännitteisenä sekä verkkoon kytkettynä. [15, s.28 – 33.]

7 MAGNETOINTIJÄRJESTELMÄN MITOITUS

Magnetointijärjestelmän tarkoitus on syöttää oikean suuruista tasavirtaa generaattorin roottorikäimitykseen tarvittavan magneettikentän luomiseksi sekä oikean suuruisen generaattorin napajännitteen ja tehokertoimen aikaansaamiseksi. Lisäksi magnetointijärjestelmän on kyettävä syöttämään voimajärjestelmän teknisten vaatimusten mukaisesti generaattorin magnetointiin riittävän suurta kattojännitettä määrätyn ajan sähköverkon häiriötilanteissa järjestelmän stabiilisuuden ylläpitämiseksi. Tämä kattojännitteen arvo määrää samalla suurimman magnetointijännitteen arvon, mistä saadaan myös lähtöarvot magnetointimuuntajan mitoitusta varten. Tarvittava magnetointijännitteen suuruus määräytyy generaattorin käämyksen sekä käämyksen resistanssin ja käyttölämpötilan mukaan. [8, s. 237 – 238.]

Generaattori valmistaja määrittää generaattorin sähköiset arvot mukaan lukien magnetointilaitteiston mitoituksessa vaadittavat arvot. Magnetointijärjestelmän mitoitukseen tarvittavia suureita käsiteltiin tarkemmin luvussa 6.1. Magnetointilaitteiston tehoa kuvaavat suureet ovat tarvittava magnetointivirta I_{fN} ja magnetointijännite U_{fN} . Tarvittava kattojännitteen U_p suuruus määräytyy sähköverkon vaatimusten mukaan ja se on staattisella magnetointilaitteistolla kaksi kertaa normaalintilan magnetointijännitteen suuruinen. Esimerkkitapauksen magnetointilaitteistolta vaaditut arvot olivat:

- magnetointivirta $I_{fN} = 718 \text{ A}$
- magnetointijännite $U_{fN} = 232 \text{ VDC}$
- magnetoinnin kattojännite $U_p = 526 \text{ VDC}$.

Koska kyseessä on staattinen magnetointilaitteisto ja tarvittava magnetointiteho otetaan suoraan generaattorikiskostosta erillisen magnetointimuuntajan kautta, tarvitaan muuntajan mitoitukseenkin generaattorin sähköisiä arvoja kappaleen 6.1 mukaisesti. Annettujen suureiden perusteella magnetointilaitteiston valmistaja oli valinnut magnetointimuuntajaksi kolmivaiheisen 615 kVA:n kuivamuuntajan muuntosuhteella 10500/420 V, vastaavat muuntajan virta-arvot olivat 3,8/845 A.

Magnetointimuuntajan mitoitusta voidaan tarkastella jo esitetyn kaavan 5 avulla, jonka mukaan kuusipulssisen tasasuuntaajasillan tasajännitteen arvo on noin 1,35 kertaa syöttävän pääjännitteen suuruus. Magnetointijärjestelmältä vaadittu suurin kattojänni-

te U_P määrää tyristorisiltä syöttävältä magnetointimuuntajalta saatavan tyristorisillan syöttöjännitteen U suuruuden:

$$U \approx \frac{U_P}{1,35} = 389 \text{ VAC} \quad (5)$$

IEEE-standardin mukaisesti magnetointijärjestelmä pitää ylimitoittaa vähintään 5 % tehon nousua varten. Järjestelmän tilaaja voi kuitenkin asettaa omia vaatimuksia laitteiston mitoitukseen, kuten tässä tapauksessa vaadittiin 10 % ylimitoitus nimellisiin arvoihin verrattuna. Tämä mitoitusvaatimus määrittää magnetointimuuntajalta vaadituksi nimellistehoksi S kaavan 6 mukaan:

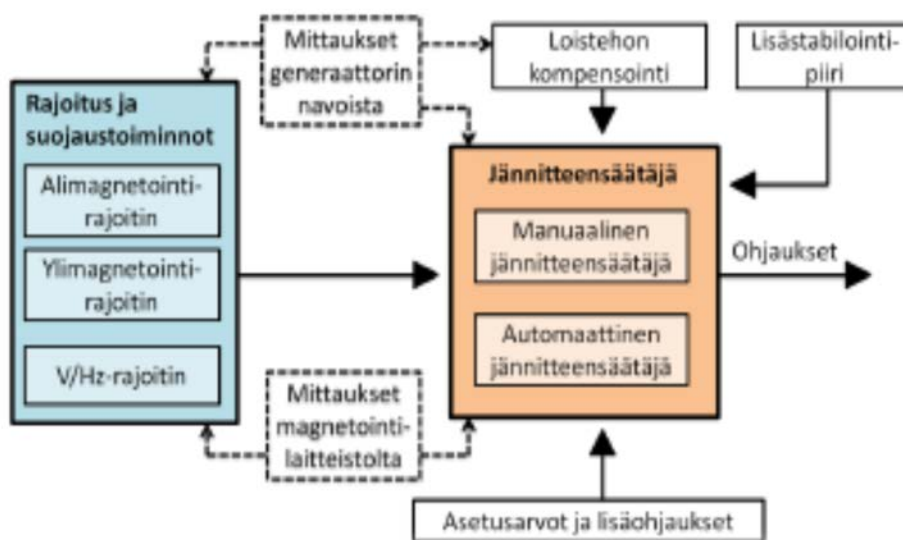
$$S = 1,1 \times (\sqrt{3} \times U \times I_{fN}) = 1,1 \times (\sqrt{3} \times 389V \times 718A) \approx 579kVA \quad (6)$$

Tarkastelu osoittaa, että järjestelmän toimittajan tekemä magnetointimuuntajan mitoitus täyttää tilaajan määrittämät vaatimukset myös ylimitoituksen osalta.

8 MAGNETOINTIJÄRJESTELMÄN SUOJAUS JA LIITYNNÄT

Vaikka magnetointijärjestelmän päätehtävänä on riittävän magnetointivirran ja sitä kautta halutun suuruisen generaattorijännitteen tuottaminen, on sille asetettu myös useita muita vaatimuksia. Magnetointijärjestelmästä voi löytyä useita aputoimintoja, kuten rajoittimia, suojauksia, kompensattoreita ja stabilointipiirejä joita on kuvattu kuvassa 18. Näiden toimintojen toteutuksessa ja suunnittelussa tulee ottaa huomioon muun muassa voimakoneen tyyppi, generaattorin koko ja tärkeys sekä siltä vaaditut ominaisuudet ja tehtävät.

[6, s. 22 – 23.]



KUVA 18. Periaatekuvaus magnetointijärjestelmän säätö- ja suojausjärjestelmästä [6, s. 21]

8.1 Magnetointijärjestelmän suojaukset

Voimalaitoksille asetetut järjestelmätekniset vaatimukset, kuten myös kansainväliset IEEE-standarditkin määrittävät magnetointilaitteistolta sekä jänniteensäätäjältä vaadittavia suojaus- ja rajoitustoimintoja. Yleisimmät rajoitustoiminnot ovat ali- ja ylimagnetointirajoittimet sekä roottori ja staattorivirran rajoitustoiminnot. Suojaukset magnetoinnin puuttumisesta tai generaattorin ylivirrasta toteutetaan yleensä osana generaattorisuojauksia erotettuna magnetointijärjestelmästä.

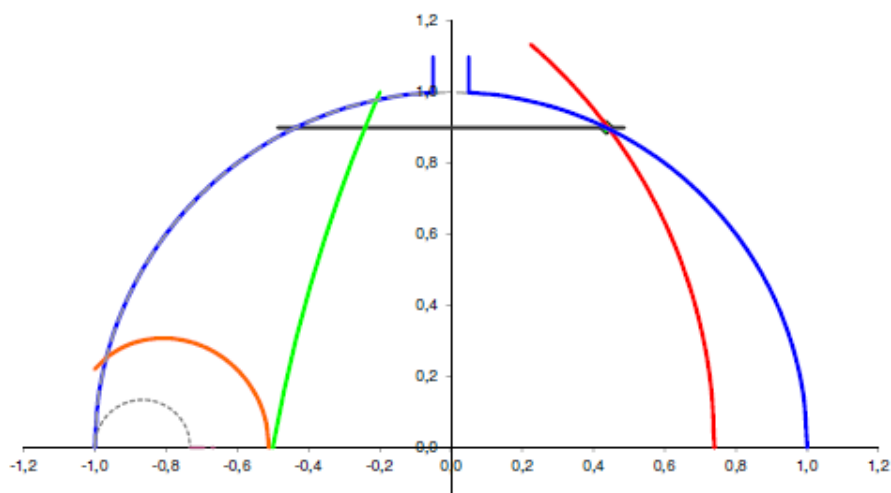
Magnetointijärjestelmän alimagnetointirajoitin valvoo, että generaattoria ei ajeta alle generaattorille määritetyn PQ-diagrammin alimagnetointi- tai stabiilisuusrajan alapuolella. Stabiilisuusraja määräytyy generaattorin maksimi kuormituskulman avulla, joka on generaattoriin indusoituneen sisäisen jännitteen ja generaattorin ulkoisen liitinjännitteen välinen kulma. Rajoittimien asetteluissa ja toiminnoissa on otettava huomioon myös generaattorin alimagnetointisuojaus. [6, s. 23.]

Vastaavasti järjestelmän ylimagnetointirajoittimen tarkoituksena on rajoittaa roottoriin magnetointikämmityksille johdettua magnetointivirtaa. Täten suojataan generaattorin staattorikämmityksiä ylikuormittumasta. U/f rajoittimen tehtävänä on suojata generaattoria ja päämuuntajaa ylimagnetoitumiselta. Se estää generaattorin liitinjännitteen ja taajuuden suhteen ylittämästä asetettua maksimiarvoa pyörimisarvosta riippumatta.

Rajoittimen on kuitenkin sallittava hetkellisiä asetteluarvon ylityksiä tilanteissa, joissa jännite nousee sähköverkon transienttien takia. Ylimagnetointirajoittimen lisäksi generaattoria suojataan erillisellä ylimagnetointisuojujalla, mikä tulee ottaa huomioon rajoittimen ja suojausten asetteluissa. [6, s. 23.]

Kuvassa 19 on esitetty esimerkkitapauksen generaattorin magnetointilaitteiston rajoitus- ja suojaustoimintojen määrittämiset PQ-diagrammissa. Generaattorin nimellistehon ollessa 34 MW, jännitteen 10,5 kV, virran 1870 A ja tehokertoimen 0,9 sekä vaaditun magnetointivirran 718 A on magnetointilaitteiston suojausparametreiksi määritetty seuraavat raja-arvot:

- maksimi magnetointivirta 747 A
- minimi magnetointivirta 85 A
- maksimi generaattorijännite 11,06 kV
- minimi generaattorijännite 9,98 kV
- viiveellinen ylimagnetointivirtaraja 720 A (punainen viiva kuvassa 19)
- alimagnetointivirtaraja 108 A (oranssi viiva kuvassa 19)
- maksimi kuormituskulma 80° (vihreä viiva kuvassa 19)
- stabiilisuusrajan kuormituskulma 85°
- U/f rajoitin 105 %
- viiveetön ylimagnetointivirtaraja 1008 A (maksimi 10 sekuntia verkon häiriötilanteissa)
- loistehostatiikka -3 %. [16. s. 12 – 17.]



KUVA 19. Esimerkki generaattorin PQ-diagrammi, jossa esitettynä magnetointijärjestelmän rajoitus ja suojaustoimintojen raja-arvot [16, s. 17]

Jännitesäätäjän mahdollinen lisästabilointipiiri on oltava käytössä teholuokan 4 voimalaitoksissa. Lisästabilointipiirin tehtävänä on vaimentaa generaattorin ja sähkövoimajärjestelmän heilahteluja. Lisästabiloinnin on oltava poiskytkettävissä ja lisästabilointisignaalin suuruutta on rajoitettava rajoittimilla, joiden asetelut voidaan valita.

[13, s. 44.]

Vaadittavat suojat ja suojausmenetelmät riippuvat paljolti siitä, minkälaista magnetointimenetelmää generaattorin magnetointiin käytetään. Tämän vuoksi suojaus olisi hyvä olla osana magnetointijärjestelmää. Usein rajoitustoiminnot sisällytetäänkin magnetointijärjestelmään ja tärkeät suojaustoiminnot toteutetaan erotettuna magnetointijärjestelmästä. [6, s. 23.]

Staattisen ja harjattoman magnetointilaitteiston suojauksessa on pieniä eroavaisuuksia johtuen erilaisista komponenteista. Staattisen magnetointilaitteiston suojauksessa on huomioitava magnetointimuuntajan ylivirta- ja käämien ylikuormitussuojaus. Vastavasti harjattomassa magnetoinnissa magnetointigeneraattoria on suojattava mekaaniselta tärinältä ja staattorikäämien ylikuormittumiselta. Muita magnetointijärjestelmän suojaustoimintoja, joita yleensä käytetään molemmissa magnetointimenetelmissä, ovat oikosulku-, maasulku-, ylivirta- ja vinokuormitussuojaus. Usein myös käytetään jännitteen ja taajuuden suuruutta sekä jäähdytysjärjestelmän vikaantumista tarkkailevia suojaustoimintoja. [6, s. 23.]

8.2 Magnetointijärjestelmän liitynnät

Insinööriyön aikana suunniteltiin, asennettiin ja käyttöön otettiin Andritz Hydron THYNE 5-mallisen magnetointijärjestelmän suojaus-, ohjaus- ja valvontaliitynnät osaksi voimalaitoksen sähkö- ja automaatiojärjestelmiä. Kuvassa 20 on esitetty THYNE 5-magnetointijärjestelmän laitekaapit.

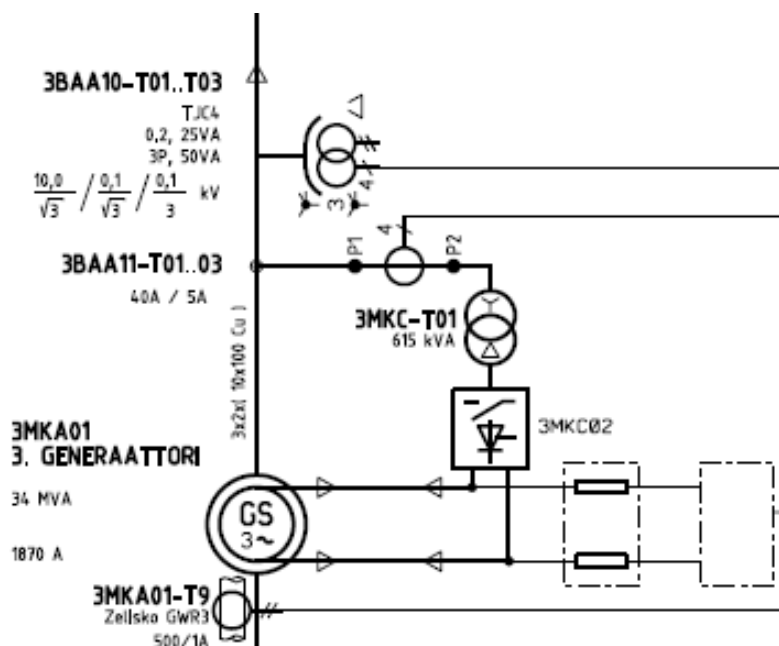
Magnetointilaitteisto liitetään kiinteäksi osaksi voimalaitoksen sähkö-, suojaus- ja valvontajärjestelmiä. Esimerkkitapauksessa magnetointilaitteisto saa apusähkösyötönsä sekä alkumagnetointiin tarvitseman energiansa 220 VDC- tasasähköjärjestelmästä kahdennettuna. Magnetointitehon tuottava 615 kVA:n magnetointimuuntaja on liitetty suoraan kiskostolla 10,5 kV generaattorikiskostoon ja muuntajan 420 V pienjännitepuoli kaapelijärjestelmällä magnetointijärjestelmään.



KUVA 20. THYNE 5-magnetointijärjestelmän laitekaapit

Generaattorin tarvitsema magnetointivirta syötetään roottorin magnetointinapoihin vastaavasti kaapelijärjestelmän avulla. Kuvassa 21 on esitetty 3MKC-magnetointilaitteisto osana generaattorin suojauskaaviota. Kuvasta nähdään magnetointijärjestelmän periaatteelliset liittynät 10 kV-sähköjärjestelmään. Generaattorin jännitteensäätöön tarvittavat staattorin virta- ja jännitemittaukset kaapeloidaan suoraan mittamuuntajilta magnetointilaitteistolle.

Kaikki magnetoinnin suojausliittynät on kahdennettu ja ne on yhdistetty generaattorisuojauksiin. Generaattorisuojat on toteutettu kahdennettuna VAMP 210-suojareleillä. Esimerkkitapauksessa myös roottorin maasulkuvalvonta on toteutettu osana generaattorisuojaa, mutta se on mahdollista toteuttaa myös osana magnetointilaitteistoa. Magnetointimuuntajan ylivirtasuojaus on toteutettu VAMP 50-suojareleellä, mutta sen lämpötilavalvonta on osa magnetointilaitteistoa.



KUVA 21. Magnetointilaitteisto generaattorin suojauskaaviossa

Nykyaikaiset magnetointijärjestelmät ovat liitettävissä täydellisesti voimalaitoksen automaatiojärjestelmiin. Liitynnät voidaan tehdä joko erilaisilla väyläratkaisulla tai johdottamalla kosketintietoja järjestelmien välillä. Johdotetut mittaussignaalit ovat yleisesti mittamuuntajilla erotettuja ja ne ovat signaalitasoltaan 4...20 mA. Digitaaliset magnetointijärjestelmät mahdollistavat monipuolisesti asettelujen muuttamisen, järjestelmän ohjaamisen sekä mittaustietojen seuraamisen etävalvonnan kautta.

9 KÄYTTÖÖNOTTOMITTAUKSET

Kuten kappaleessa 5 todettiin, on sähköverkkoon liittyjän vastuulla todentaa ja dokumentoida voimalaitoksen toimivan sille asetettujen vaatimusten mukaisesti. Fingridin asettamat vaatimukset tulee todentaa ensisijaisesti voimalaitoksen käyttöönoton yhteydessä suoritettavilla käyttöönotokokeilla. Yksi tärkeimmistä käyttöönotokokeissa todennettavista asioista on voimalaitoksen todellinen loistehokapasiteetti ja generaattorin loistehon ja jännitteensäädön toiminta. Käyttöönottomittauksia tehdään generaattorin ollessa tyhjäkäynnillä sekä sen ollessa tahdistettuna verkkoon. Vaatimusten mukaisesti tulee käyttöönotokokeissa mitata ja tallentaa säädettävän suureen lisäksi ainakin generaattorin liitinjännite, magnetointijännite, taajuus, magnetointivirta, pätöteho ja loisteho.

Imatralla uusitun generaattorin uudelle magnetointijärjestelmälle suoritettiin tilaajan ja järjestelmän toimittajan kanssa tiiviissä yhteistyössä alla luetellut käyttöönottomittaukset, joissa todettiin jännitesäätäjän täyttävän sille asetetut vaatimukset. Käyttöönoton mittalaitteina käytettiin kalibroitujen yleismittareiden sekä Megger PMM-1-tehoyleismittarin lisäksi DEWE-2010-mittalaitetta, jolla saatiin mitattua ja tallennettua tarvittavat mittausarvot sekä piirrettyä mittaustrendit halutuista suureista.

Laitteistolle suoritettiin seuraavat mittaukset ja toimintojen testaukset generaattorin ollessa tyhjäkäynnillä:

- $\pm 10\%$ ja $\pm 20\%$ askelvastekokeet automaatti- ja käsisäädöllä
- magnetoinnin käynnistys automaattilla ja käsin
- suojalaukaisuiden testaukset ($I>$, $U>$, $U_0>$ ja I_0)
- magnetointilaitteiston kentänheikennyksen toiminta
- laukaisu magnetointimuuntajan yllilämmöstä
- U/f -rajoittimen toiminta
- roottorin virtarajoittimien toiminta
- jännitesäätäjän auto/käsin -tilan vaihdon toiminta
- mittaus- ja apujännitejohdonsuojien laukaisun vaikutus magnetointiin
- jännitteensäädön toiminta automaatiosta ja valvomosta
- jännitesäätäjän ja tahdistuslaitteen yhteistoiminta.

Lisäksi magnetointilaitteelle suoritettiin seuraavat mittaukset ja toimintojen testaukset generaattorin ollessa tahdistettuna verkkoon:

- voimakoneiston kaukokäynnistys valvomosta verkkoon
- staattorivirtarajoittimien toiminta; induktiivinen ja kapasitiivinen
- loistehon poislyöntikoe
- alimagnetointirajoittimen toiminta
- alimagnetointi laukaisu
- lisästabilointipiirin vaikutus sähköjärjestelmän toimintaan.



KUVA 22. Magnetointijärjestelmän käyttöönottomittausten mittausjärjestelyt

Kuvassa 22 on esitetty magnetointijärjestelmän käyttöönoton mittausjärjestelyt. Käyttöönottokokeiden mittaussuureet tallennettiin myös magnetointijärjestelmän toimittajan omalla WinOper-mittaussovelluksella, jota esitellään tarkemmin luvussa 11. Liitteessä 1 on esitetty jännitesäätäjän automaattisäädöllä tehdyn $\pm 10\%$ askelvastekokeen mittaustrendit WinOper-sovelluksessa.

10 KÄYTTÖNOTTOMITTAUSTEN ANALYSOINTI

Voimajärjestelmän teknisten vaatimusten mukaisesti (luku 5) tyhjäkäyvän ja verkosta irti olevan generaattorin jännitesäätäjän $\pm 10\%$ asetusrvon muutos t_{90} saa harjallisella magnetoinnilla olla askelvasteen nollostaprozentista 90 prosenttiin 0,2 – 0,3 sekuntia. Vastaavat ajat harjattomalla magnetoinnilla ovat jännitteen nostossa $t_{90} = 0,2 - 0,5$ sekuntia ja laskussa $t_{90} = 0,2 - 0,8$ sekuntia. Jännitesäätäjän asetteluissa on kuitenkin huomioitava, ettei askelvaste värähtelee liikaa. Askelvastekokeissa onkin lisäksi todettava, ettei generaattorijännitteen ylitys ole muutostilanteessa yli 15 prosenttia jännitteen kokonaismuutoksesta.

Tarkastellessa liitteen 1 tapausta, jossa tyhjäkäynnissä olevan generaattorin jännitteeseen tehdään jännitesäätäjän ollessa automaattisäädöllä ± 10 % askelvastekokeet, voidaan havaita jännitteen t_{90} nousu- sekä laskuaikojen olevan karkeasti noin 0,2 sekuntia. Tarkempi tarkastelu DEWE-2010-mittalaitteen DasyLab8-ohjelmistolla tallennettuihin mittausarvoihin antaa tarkaksi nousuajaksi 0,20 sekuntia ja laskuajaksi 0,19 sekuntia. Kun vastaava koe suoritettiin jännitesäätäjän ollessa käsisäädöllä, oli nousuaika 0,97 sekuntia ja laskuaika 1,2 sekuntia.

Jänniteensäätäjän ollessa automaattisäädöllä päästiin suuremmalla ± 20 % askelvastekokeella nousu aikaan 0,22 sekuntia ja lasku aikaan 0,23 sekuntia. Suoritetuissa askelvastekokeissa ei ollut havaittavissa määritysten mukaista liian suurta generaattorinjännitteen ylitystä, joten voidaankin todeta, että magnetointilaitteisto täyttää tältä osin asetetut vaatimukset.

Magnetointijärjestelmälle suoritettiin kaikki luvussa 9 esitetyt käyttöönottomittaukset ja toimintojen testaukset, saadut tulokset tallennettiin tarkempaa tarkastelua ja raportointia varten.

11 MAGNETOINTIJÄRJESTELMÄN KÄYTTÖ JA YLLÄPITO

Koska magnetointijärjestelmän toimimattomuus tai vaurioituminen aiheuttavat aina myös generaattorin käyttökatkoksen niin pitkäksi ajaksi, kunnes vikaantunut komponentti on korjattu tai vaihdettu uuteen, on magnetointijärjestelmän luotettavuus erittäin tärkeää. Magnetointijärjestelmän oikeanlainen käyttö, kunnossapito ja oikeanlaiset ympäristöolosuhteet lisäävät laitteiston toimintavarmuutta ja odotettua käyttöikää. Järjestelmän oikeanlaisella ja ennakoivalla kunnossapidolla voidaan varautua komponenttien vaurioitumiseen ja pienentää näin mahdollisten tuotantomenetysten riskiä.

Koska nykyaikaiset digitaaliset magnetointijärjestelmät sisältävät suuren määrän elektroniikkakomponentteja on yksi tärkeimmistä huomioitavista asioista vallitsevat ympäristöolosuhteet. Järjestelmää hankittaessa onkin muistettava määrittää tarkasti vallitsevat ympäristöolosuhteet lämpötilan, kosteuden sekä värinän osalta, jotta järjestelmän toimittaja osaa ottaa ne huomioon laitteistosuunnittelussaan.

Magnetointilaitteiston tasasuuntaussillan komponentit ovat merkittävä osa magnetointijärjestelmää ja niiden kestävyydellä onkin suuri merkitys magnetointijärjestelmälle. Se, kuinka suurta magnetointivirtaa syötetään magnetointikämeihin eli kuinka paljon tasasuuntaajaa kuormitetaan suhteessa sillan nimellisarvoon, on merkittävä tekijä laitteiston odotettua elinikää arvioidessa. Tämän takia tasasuuntaussillan komponentit yleisesti ylimitoitetaan huomioiden kuitenkin tarkasti tekniset ja taloudelliset hyödyt.

Tasasuuntaussillalle suositellaan tehtäväksi vuosittain visuaalinen ja tekninen tarkastelu, jossa tarkastetaan laitteiston jäähdytyspuhaltimien toiminta ja ilmansuodattimien puhtaus sekä tehdään havaintoja mahdollisesti esiintyvistä vieraista hajuista, korroosiosta sekä löysistä pulteista ja liitoksista. [10.]

Harjallisten magnetointijärjestelmien hiiliharjalaitteistot vaativat järjestelmän komponenteista eniten huoltoa. Vesivoimakoneissa suoritetaan yleisesti muutaman kerran vuodessa ns. kausihuolto, jolloin harjalaitteiston hiiliharjat sekä liukurenkaat puhdistetaan ja niiden kunto tarkastetaan. Suositeltavaa on myös mitata hiiliharjojen jousipaineet säännöllisesti, jotta varmistetaan hiiliharjojen oikeanlainen ja tasainen paine liukurenkaita vasten. Oikeansuuruisella harjapaineella varmistetaan hiiliharjojen tasainen ja oikean suuruinen kuluminen, sekä estetään huonosta kontaktista johtuvaa kipinöintiä. [17.]

Magnetointivirran syötön katkaisevan kenttäkatkaisijan toiminta ja kunto suositellaan myös tarkastettavaksi vuosittain. Tarkastuksessa katkaisijan kontaktipinnat sekä asennonosoittimet tarkastetaan, puhdistetaan ja rasvataan. Lisäksi tarkastetaan kentänheikennysvastusten kunto sekä kiskostojen ja johtoliitosten kireys. Huollon lopuksi varmistetaan katkaisijan virheetön toiminta ja testataan tilatietojen toimivuus. Katkaisijan perusteellisempi huolto tehdään katkaisija valmistajan suosittamin määrävälein sekä valmistajan ohjeiden ja kokemuseräisten tietojen perusteella. [9, s. 32.]

Pyörivän magnetointilaitteiston huollossa täytyy muistaa kiinnittää tarpeeksi huomiota myös päägeneraattorin akselilla pyörivään magnetointivirtageneraattoriin ja sen kuntoon. Suositeltavaa onkin suorittaa tälle magnetoinnin herätinkoneelle vastaavan laajuiset tarkastukset kuin itse päägeneraattorillekin. [8, s. 671.]

Harjaton magnetointijärjestelmä vastaavasti ei tarvitse juurikaan mekaanista huoltoa, pelkästään visuaalinen tarkastelu on usein riittävää. Harjattomassa magnetoinnissa elektroniikkakomponentit ovat lähinnä pyörivässä tasasuuntaajassa ja säädinyksikössä, joiden kuntoa tulee tarkastella pyörimisliikkeestä johtuvien rasitusten takia. Pyöri-
vien diodien puhtaus, tuenta ja suojaavien sulakkeiden kunto suositellaan tarkastettavaksi säännöllisin väliajoin. [7, s. 668 – 670.]

11.1 THYNE 5-jännitesäätäjän ylläpito ja huolto

Esimerkkitapaukseen THYNE 5-magnetointijärjestelmän toimittanut Andritz Hydro lähtee siitä, että laitteiston elektroniset osat eivät tarvitse erityistä huoltoa. Tyristorisillan jäähtytyksestä on kuitenkin huolehdittava eli jäähdytyslevyt, laitteistokaapin ilmanottoaukot sekä poistoilmapuhaltimet tulee puhdistaa säännöllisin väliajoin. [10.]

Magnetointijärjestelmä koostuu kahdesta laitekaapista, joissa toisessa niin sanotussa tehoyksikkökaapissa sijaitsee tyristorisillat lisälaitteineen sekä AC-katkaisija magnetointitehon katkaisua varten. Toisessa laitekaapissa sijaitsee THYNE 5-jännitesäätäjä, joka käyttää säätö- ja ohjausyksikkönä ELIN:n GMR3-mikroprosessoriyksikköä. [10.]

Järjestelmän on varustettu magnetointivirran napaisuudenvaihtokytkimillä. Napaisuuden vaihdolla saavutetaan harjallisessa magnetoinnissa harjojen ja liukurenkaiden taiseempi kuluminen, jonka takia napaisuuden vaihtoa suositellaankin säännöllisin väliajoin. [10.]

Mahdollisissa järjestelmän vikatilanteissa laitetoimittaja neuvoo tarkastamaan jännitesäätäjän LCD-paikallisohtauspaneelista hälytyksen lisätekstit ja aloittamaan häiriön selvittämisen järjestelmän dokumentaation avulla. Yleisempien vikojen, kuten apujännitteiden puuttumiseen tai tasasuuntaussillan mahdolliseen tyristorisillan vikaantumiseen laitetoimittaja antaa yksityiskohtaisempaa ohjeistusta laitteiston käyttöohjeessa. [10.]

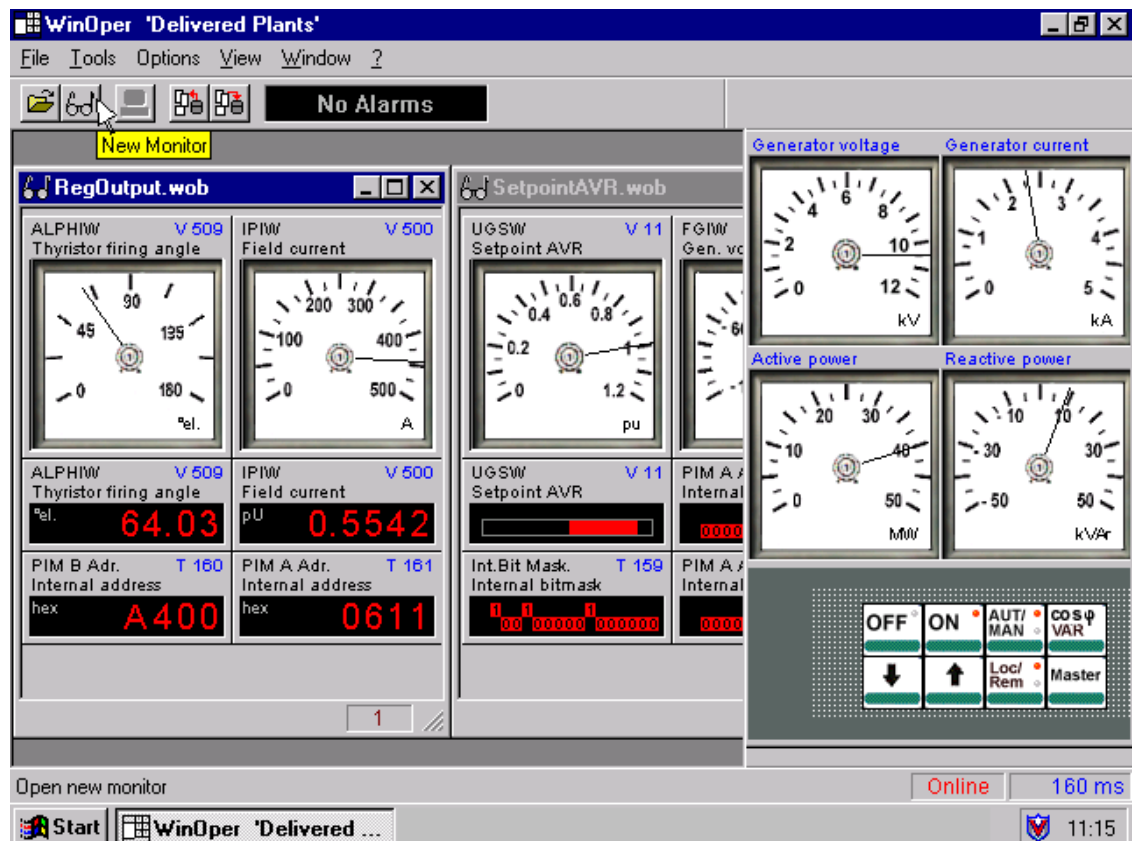
11.1.1 WinOper-ohjelmisto

Andritz Hydron magnetointijärjestelmän mukana toimitetaan WinOper-ohjelmisto, jolla voidaan monitoroida THYNE-jännitesäätäjää. Ohjelmisto mahdollistaa magne-

tointilaitteiston täydellisen ohjaamisen ja parametroidinkin sen kautta, mutta suositeltavaa on kuitenkin käyttää ohjelmaa vain monitorointiin ja vian etsintää. [18.]

Jännitesäätäjän toiminta perustuu sen prosessorikortilla pyörivään vapaan lähdekoodin ECS-ohjelmistoon. Säätäjän ohjelmisto rakentuu erilaisista valmiista toimintalohkoista joilla ohjelmoidaan jännitesäätäjälle siltä halutut toiminnot. Myös ECS-ohjelmisto toimitetaan magnetointilaitteiston mukana ja sillä voidaan tarvittaessa tarkastella ja muuttaa jännitesäätäjän parametreja sekä toimintakoodia.

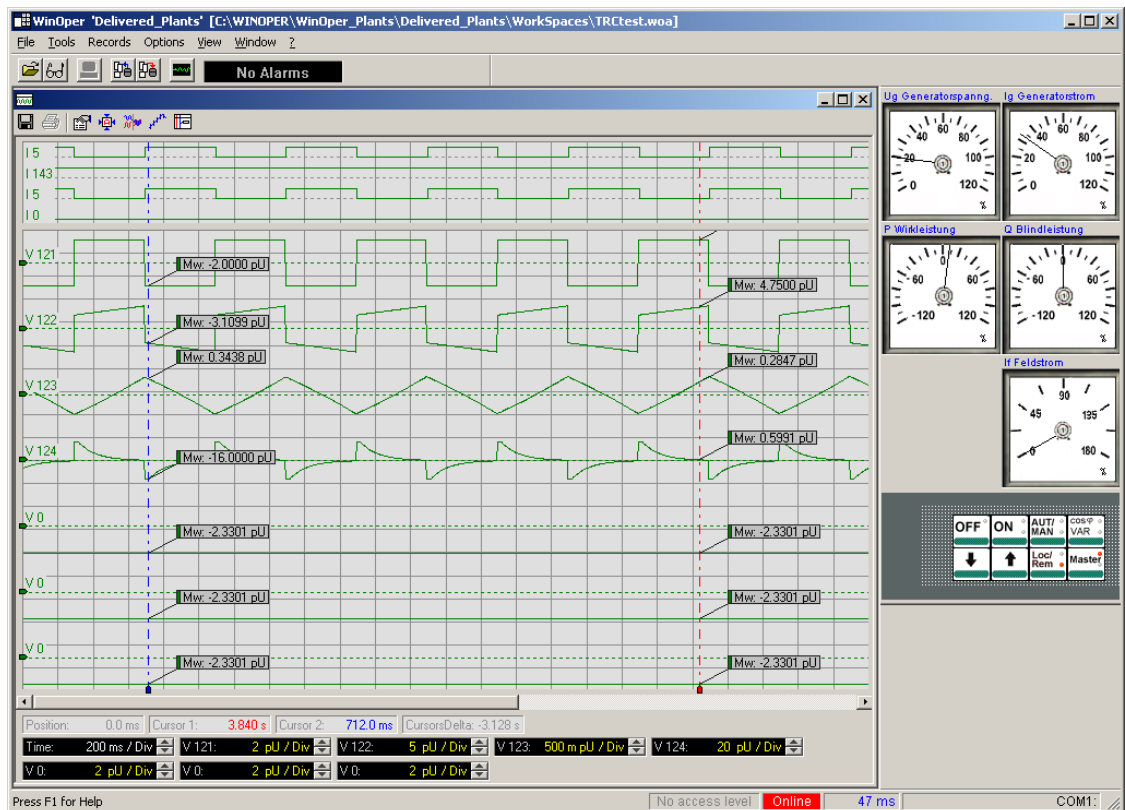
WinOper-ohjelmisto mahdollistaa kaikkien jännitesäätäjään kytkettyjen ulkoisten sekä säätäjän sisäisten signaalien monitoroinnin. Kuvassa 23 on järjestelmätoimittajan luoma esimerkinäyttö. Näytön oikeassa reunassa näkyvät mittaukset generaattorin jännitteestä, virrasta sekä pätö- ja loistehosta ovat aina vakiona ohjelmiston perusnäytössä. Myös mittausten alla näkyvät magnetoinnin ohjauspainikkeet ovat vakiona aloitusnäytössä.



KUVA 23 THYNE-jännitesäätäjän WinOper-ohjelmiston monitorointi- ja ohjausnäyttö [18]

Käyttäjä voi luoda haluamansa näköisen monitorointinäytön luomalla uusia työpöytiä ja valitsemalla niihin haluamiaan mittauksia. Kuvassa 23 on monitorointinäyttöön valittu tarkasteltavaksi mittausarvot tasasuuntaussillan tyristorien sytytyskulmasta sekä magnetointivirrasta.

Ohjelmistossa on myös oskilloskooppitoiminto, jonka avulla halutuista signaaleista saadaan piirrettyä mittaustrendejä kuvan 24 mukaisesti. Näyttöön voidaan valita yhtä aikaan 16 digitaalista arvoa ja 7 analogista mittausta.



KUVA 24. THYNE-jännitesäätäjän WinOper-ohjelmiston trendityökalu [18]

Ohjelmisto sisältää myös valmiin hälytyskäsitteilyn ja se ilmoittaa magnetointijärjestelmän mahdollisista hälytyksistä, kun ohjelmiston kautta ollaan kytkettyneenä jännitesäätäjään. Hälytysnäytön kautta voi tarvittaessa siirtyä tarkempaan lisätietokuvaan, missä kuvataan tarkemmin aktiivista hälytystä. [18.]

12 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli kartoittaa tahtigeneraattorin magnetointijärjestelmän uusinnassa huomioon otettavat vaatimukset ja standardit sekä tutustua magnetointijärjestelmän käyttöönottomittauksiin ja toiminnan arviointiin. Käyttöönnotossa mitattuja arvoja verrattiin asetettuihin vaatimuksiin. Työssä tutustuttiin lisäksi erityyppisiin magnetointijärjestelmiin pääpainon ollessa kuitenkin harjallisessa staattisessa magnetoinnissa. Työn aikana suoritettiin myös uusittavan magnetointijärjestelmän liityntäsuunnittelu ja tutustuttiin näin magnetointijärjestelmän suunnittelun periaatteisiin.

Magnetointijärjestelmän päätehtävänä on tarvittavan magnetointivirran tuottaminen tahtigeneraattorille. Magnetointivirran avulla säädetään verkkoon kytketyn generaattorin jännitettä sekä loistehon tuottoa tai kulutusta. Magnetointimenetelmät jaetaan harjallisiin ja harjattomiin magnetointiin.

Staattinen harjallinen magnetointijärjestelmä sopii hyvin dynaamisesti vaativiin käyttöihin, koska generaattorin ulostulojännite on muutettavissa erittäin nopeasti. Vanhoja tasasähkömagnetointilaitteistoja uusitaan usein staattisilla magnetointilaitteistolla, koska silloin voidaan hyödyntää jo olemassa olevia liukurenkaita ja hiiliharjoja.

Harjattomassa magnetoinnissa hiiliharjat on korvattu pyörivällä diodisillalla, joka poistaa hiiliharjojen ja liukurenkaiden huollon tarpeen. Omalla kestromagneetti-generaattorilla varustetulla harjattomalla magnetointilaitteistolla saavutetaan lisäksi parempi luotettavuus ja riippumattomuus sähköverkosta mutta sen säätödynamiikka on magnetointikämmityksestä johtuen hitaampaa.

Kantaverkkoyhtiö Fingridin asettamat voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset luovat perusteet myös sähköverkkoon kytketyn generaattorin magnetointijärjestelmän toiminnalle. Magnetoinnilta vaaditaan luotettavuutta, nopeutta ja kykyä tukea sähköverkkoa mahdollisissa lyhyissä verkon häiriötilanteissa. Magnetointijärjestelmän uusintaa suunniteltaessa kannattaa tutustua myös IEEE 421-standardeihin. Standardit kuvaavat kattavasti huomioitavat asiat, niin magnetointijärjestelmän hankintaa, rakennetta kuin käyttöönottoaakin varten.

Käyttöönottomittauksissa todennetaan magnetointijärjestelmän soveltuvuus sähköjärjestelmään asetettujen vaatimusten mukaisesti ja testataan toiminnan kannalta tärkeiden suojaus- ja rajoitintoimintojen toimivuus. Suoritetuista käyttöönottomittauksista on aina toimitettava mittauspöytäkirjat verkonhaltijalle, joka todentaa vielä voimalaitoksen soveltuvuuden osaksi sähköjärjestelmää.

Työn aihealue on erittäin laaja ja mielenkiintoinen kokonaisuus, mutta sen rajaaminen insinööriyöksi osoittautui haastavaksi. Ensin on ymmärrettävä generaattorin toiminta ja magnetointijärjestelmän tarkoitus sekä sen toiminta. Tämän jälkeen vastaan tulee magnetointijärjestelmän valinta ja mitoitus generaattorin mukaan. Valintaan vaikuttavat osaltaan myös Fingridin asettamat voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset jännitesäädön toiminnalle ja mitoitukselle. Generaattori ja magnetointijärjestelmä ovat kiinteä osa toisiaan ja niiden yhteistoiminta todennetaankin monipuolisilla käyttöönottomittauksilla, ennen kuin voimalaitos voidaan kytkeä osaksi sähköverkkoa.

LÄHTEET

1. Fortum Oyj. Energiantuotanto, vesivoima. WWW-dokumentti.
<http://www.fortum.com/fi/energiantuotanto/vesivoima/pages/default.aspx>. Päivitetty 7.7.2014. Luettu 20.10.2014.
2. Brockschink, Steven, Gurney, James, Seely, Douglas 2006. Electric Power Generation, Transmission and Distribution. Chapter 4: Hydroelectric Power Generation. WWW-dokumentti. ftp://ip-240.net-80-236-71.issy.rev.numericable.fr/Multimedia/TEXT/Electronics/35%20Electrical%20and%20Electronics%20Engineering%20Books/Power%20System%20Stability%20and%20Control/0849392926/PDFs/9292_c004.pdf. Päivitetty 16.5.2007. Luettu 28.2.2015.
3. Francis-turpiinin juoksupyörän esimerkkikuva. WWW-dokumentti.
<http://www.hydroquebec.com/learning/hydroelectricite/images/turbine-francis.jpg>
Luettu 28.2.2015.
4. Aura, Lauri, Tonteri, Antti 2002. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Helsinki: WSOY.
5. Lehtelä, R. Korpinen, L. Sähkövoimatekniikkaopus. Luku 10 Sähkökoneet. WWW-dokumentti. www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf. Päivitetty 21.11.2007. Luettu 30.3.2015.
6. Ahokas, Tomi 2011. Voimalaitos generaattorien suojaus ja magnetointi. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. PDF-dokumentti. http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20dyot/Ahokas_Tomi_julk.pdf. Päivitetty 5.10.2011. Luettu 15.1.2015.
7. ABB 2000. TTT-käsikirja 2000-7. Luku 17.7 Tahtikoneet.
8. Klempner, Goeff, Kerszenbaum, Isidor 2008. Handbook of large turbo-generator operation and maintenance. Second edition. New Jersey: WILEY.
9. Marttinen, Minna 2010. Vesivoimageneraattorien magnetointijärjestelmien eliniän arviointi. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. PDF-dokumentti. http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/pdf%20julkiset%20dyot/Marttinen_Minna_julk.pdf. Päivitetty 31.5.2010. Luettu 15.1.2015.
10. Toimintaselostus ja käyttöohje. Magnetointilaitteisto ja jännitesäätäjä THYNE5. Andritz Hydro 17.10.2014.
11. Magnetointikoulutus Inkoo 01/2012. Koulutusmateriaali. Fortum Power and Heat Oy.
12. IEEE Standards. 421.1-2007, IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines. 15.7.2007
13. Fingrid Oyj, Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset VJV2013. PDF-dokumentti. <http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Liittyminen/2013/Voimalaitosten%20j%C3%A4rjestelm%C3%A4tekniset%20vaatimukset%20VJV2013.pdf>. Päivitetty 27.9.2014. Luettu 20.10.2014.

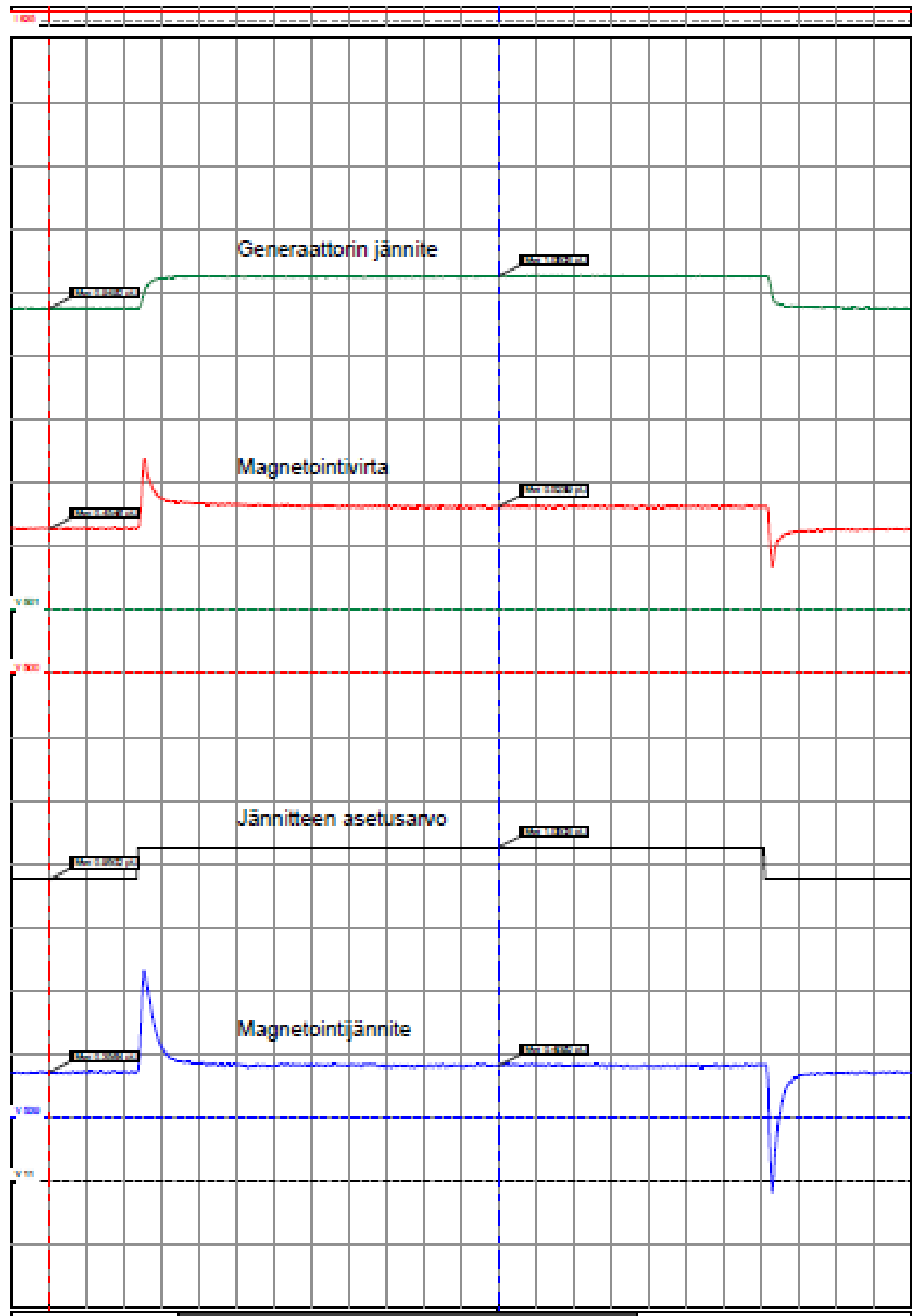
14. GMR3 Voltage Regulator and Gate Control. Functional Description. Andritz Hydro 17.3.2011.
15. IEEE Standards. 421.4-2004, IEEE Guide for the Preparation of Excitation System Specifications. 22.10.2004
16. Commissioning test report. Imatra G3 excitation system. Andritz Hydro 26.9.2014.
17. Liukurenkaiden huolto. Fortum Power and Heat Oy 10.12.2012. Sisäinen työohje.
18. WinOper Operation Toll for THYNE/GMR3. Operation tool. Andritz Hydro 6.5.2011.

Magnetoinnin $\pm 10\%$ askelvastekoe jännitesäätäjän automaattisäädöllä

WinOper Recorded Signals

VA TECH SAT

Plant: Instra Unit: U3 Description: 04. 10% Step response in AUTO mode Time: 2014-09-25 13:03:18



Time: 500 ns / Div V 500: 200 m pU / Div V 501: 200 m pU / Div V 539: 500 m pU / Div V 574: 5 m pU / Div V 65: 5 m
 V 503: 5 m pU / Div V 11: 200 m pU / Div