



# **EPÄTAHTIKONE VARAVOIMAGENERAATTORINA**

Harri Vaitomaa

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2013  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tampere University of Applied Sciences

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikka  
Sähkövoimatekniikka

Harri Vaitomaa  
Epätahtikone varavoimageneraattorina

Opinnäytetyö 34 sivua, joista liitteitä 2 sivua  
Huhtikuu 2013

---

Tässä työssä käsiteltiin epätahtikoneen sopivuutta varavoimageneraattoriksi. Työssä esitettiin epätahtikoneen toimintaperiaate sekä moottorina että generaattorina. Epätahtimoottoreita ja niiden käyttökohteita tarkasteltiin, selvitettiin epätahtigeneraattorin magnetointivaihtoehtoja ja esitettiin, miksi juuri epätahtigeneraattoria käytetään tietyissä sovelluksissa.

Työssä käsiteltiin myös varavoimakoneen liittämistä sähkölaitteistoon ja esitettiin suojaukseen ja turvallisuuteen liittyvät vaatimukset. Erilaisten generaattorityyppien käyttäytymistä oikosulkutilanteissa selvitettiin ja tarkasteltiin niiden suojalaitteivaihtoehtoja. Varavoimakoneen asennuksen suojausvaatimukset käsiteltiin ja esitettiin, miten varavoimakoneen vikasuojaus ja ylivirtasuojaus toteutetaan. Myös varavoimakoneen valintaan liittyviä valintakriteereitä tutkittiin.

Mittauksissa mitoitettiin epätahtigeneraattorin vaatimat magnetointikondensaattorit ja tutkittiin generaattorin heräämistä. Epätahtigeneraattorille tehtiin useita mittauksia ja selvitettiin, minkälaisella kuormituksella epätahtigeneraattoria voidaan kuormittaa. Epätahtigeneraattorin käyttäytymistä kuormitusmuutoksissa tutkittiin ja pohdittiin kuormitusmuutosten tuomien ongelmien ratkaisumahdollisuuksia.

## **ABSTRACT**

Tampere University of Applied Sciences  
Electrical Engineering  
Electric Power Engineering

Harri Vaitomaa  
Asynchronous Machine as a Backup Generator

Bachelor's thesis 34 pages, appendices 2 pages  
April 2013

---

This thesis is about finding out whether asynchronous machine is a good choice as a backup generator. This thesis introduced the asynchronous machine theory both as a motor and as a generator. It also analysed different asynchronous motors and their applications, explained asynchronous generator exciting options and introduced why the asynchronous generator is used in specific applications.

This thesis also discussed connecting a backup machine to an electrical device and introduced protection and safety related demands. In addition, it explained the behavior of different generator types in short-circuit situations and analysed their protection device options.

In measurements asynchronous generators exciting capacitors were calculated and generators awakening was investigated. Measurements were performed to asynchronous generator and found out what sort of loads asynchronous generator can be loaded with.

---

Key words: asynchronous, machine, generator, backup

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	VAIHTOSÄHKÖKONEET .....	6
2.1	Epätahtimoottorit .....	7
2.1.1	Oikosulkumoottorit .....	7
2.1.2	Liukurengasmoottori .....	11
2.2	Epätahtigeneraattorit .....	12
2.2.1	Verkkomagnetoitu epätahtigeneraattori .....	13
2.2.2	Kondensaattorimagnetoitu epätahtigeneraattori.....	14
2.2.3	Generaattorin mallintaminen.....	15
2.2.4	Epätahtigeneraattorin toiminta jakeluverkkoon liitettynä.....	18
2.2.5	Epätahtigeneraattorin toiminta saarekekäytössä .....	18
3	VARAVOIMAKONEEN LIITTÄMINEN SÄHKÖLAITTEISTOON .....	19
3.1	Yleiset ominaisuudet.....	19
3.2	Varavoimalaite oikosulkuilanteessa .....	20
3.2.1	Generaattori ei syötä jatkuvaa oikosulkuvirtaa .....	20
3.2.2	Generaattori syöttää oikosulkuvirtaa.....	20
3.3	Varavoimakoneen asennuksen suojausvaatimukset .....	21
3.3.1	Varavoimakoneen vikasuojaus.....	21
3.3.2	Varavoimakoneen ylivirtasuojaus .....	22
3.4	Varavoimakoneen hankintaan vaikuttavia valintakriteereitä.....	22
4	MITTAUKSET .....	24
4.1	Magnetointikondensaattoreiden mitoitus.....	25
4.2	Jännitteen nousu.....	26
4.3	Kuormitettavuus.....	27
4.4	Epäsymmetrinen kuormitus .....	27
5	YHTEENVETO .....	29
	LÄHTEET.....	31
	LIITTEET .....	33

## 1 JOHDANTO

Tässä työssä on tarkoitus selvittää epätahtigeneraattorin sopimista varavoimageneraattorikäyttöön. Opinnäytetyön aihe on saatu Tampereen ammattikorkeakoululta. Mittaukset suoritetaan sähkötekniikan laboratoriossa. Aiheen valintaan vaikutti oma kiinnostus sähkömoottoreista ja -generaattoreista.

Työssä käydään läpi epätahtikoneen toimintaperiaate moottorina ja generaattorina. Selvitetään varavoimageneraattorin vaatimukset sekä suojaukseen ja turvallisuuteen liittyvä teoria. Lasketaan myös mittauksissa käytettävän oikosulkumoottorin loistehon tuottoon vaadittavat kondensaattorit.

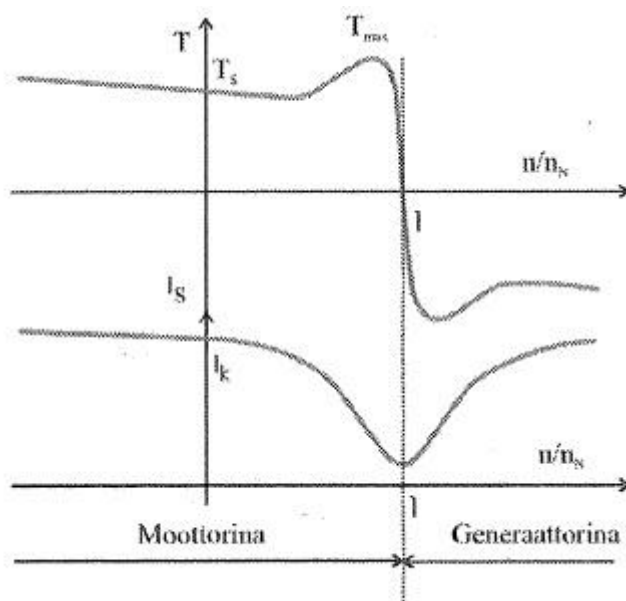
Mittauksissa käytetään oikosulkukonetta, joka on yleisin epätahtikone. Selvitetään epätahtigeneraattorin kuormitettavuus erilaisilla kuormitustyypeillä, kuten yksi- ja kolmi-vaihe kuormituksilla. Lisäksi tarkastellaan epäsymmetrisen kuormituksen vaikutusta.

Työn tavoitteena on selvittää epätahtikoneen soveltuvuus generaattorikäyttöön, erityisesti varavoimakäyttöön. Tarkastellaan myös sen hyviä ja huonoja puolia ja pyritään saamaan mittauksilla selville, millaiseen käyttökohteeseen epätahtigeneraattori olisi hyvä ratkaisu.

## 2 VAIHTOSÄHKÖKONEET

Vaihtosähkökoneita ovat moottori ja generaattori. Kun sähkökone muuntaa mekaanisen energian sähköenergiaksi, puhutaan generaattorista ja kun sähkökone muuntaa sähköenergian mekaaniseksi energiaksi, puhutaan moottorista. (Aura & Tonteri, Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet, 2005)

Vaihtosähkökoneen toiminta perustuu pyörivään magneettikenttään. Vaihtosähkökoneet luokitellaan tahti- ja epätahtikoneisiin. Tahtikoneissa koneen roottori pyörii staattorikäämityksen kehittämän pyörivän magneettikentän kanssa samassa tahdissa eli samalla nopeudella. Epätahtikoneissa koneen roottori pyörii epätahdissa eli eri nopeudella mitä staattorikäämityksen kehittämä pyörivä magneettikenttä. Teollisuudessa yleisimmin käytetyt vaihtosähkömoottorit ovat kestopagneettitahtimoottori, vierasmagnetoitu tahtimoottori ja oikosulkumoottori. Kuvassa 1 on esitetty epätahtikoneen momentin ja virran käyttäytyminen moottorina ja generaattorina. Moottorina momentti vaikuttaa pyörimissuuntaan ja generaattorina vastakkaiseen suuntaan. Epätahtikone toimii generaattorina magneettikenttää suuremmilla pyörimisnopeuksilla ja vaatii siten ulkoisen voimakoneen pyörittämään roottoria. (Aura & Tonteri, Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet, 2005)



Kuva 1. Epätahtikoneen momenttikäyrä nopeuden ja jättämän funktiona. (Hietalahti, 2011)

## 2.1 Epätahtimoottorit

Epätahtimoottoreita ovat kolmivaiheiset oikosulkumoottorit, yksivaiheiset oikosulkumoottorit ja liukurengasmootorit. (Aura & Tonteri, Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet, 2005)

### 2.1.1 Oikosulkumoottorit

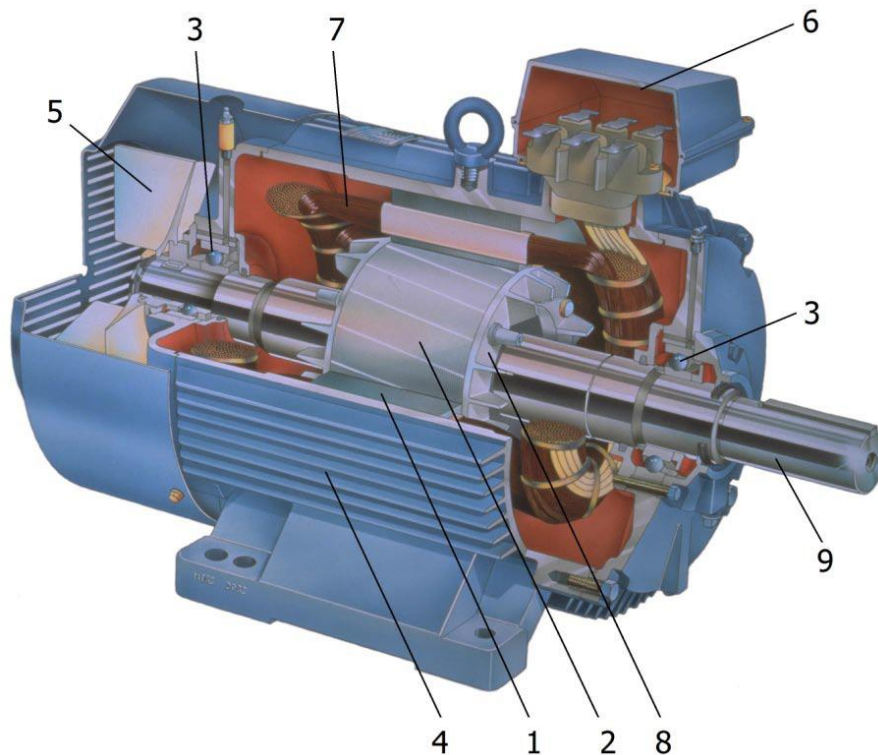
Oikosulkumoottori on yleisimmin käytetty moottorityyppi. Se saa nimensä oikosuljetusta roottorikäännyksestä. Oikosulkumoottorin häkkikäännyksessä on tehty eristämättömistä sauvoista ja yhdistetty molemmista päistä oikosulkurenkailla. Käännyksessä on urissa roottorin levypaketin pinnalla joko alumiinista painevalumenetelmällä valettu tai kuparisauvoista oikosulkurenkaisiin juotettu. Kuvassa 2 on esitetty oikosulkumoottorin häkkikäännyksen muoto. (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2, 1986)



Kuva 2. Oikosulkumoottorin häkkikäännyksen muoto. (Kosonen)

Oikosulkumoottorin toiminnan edellytyksenä on, että roottoriin kehittyy pyörivä magneettikenttä. Staattorikäännyksessä kulkeva virta synnyttää staattoriin vaihtojännitteen taajuudella pyörivän magneettikentän, jonka pyörimisnopeus riippuu käytetystä jännitteestä sekä kolmivaiheikäännyksen napaluvusta. Pyörivä magneettikenttä leikkaa roottorisauvoja indusoiden niihin jännitteen, joka aiheuttaa virran roottorisauvoihin. Roottorisauvojen virta aiheuttaa oman magneettikentän, joka leikatessaan staattorin magneetti-

kenttää aiheuttaa sähkövääntömomentin, joka saa roottorin pyörimään. (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2, 1986)

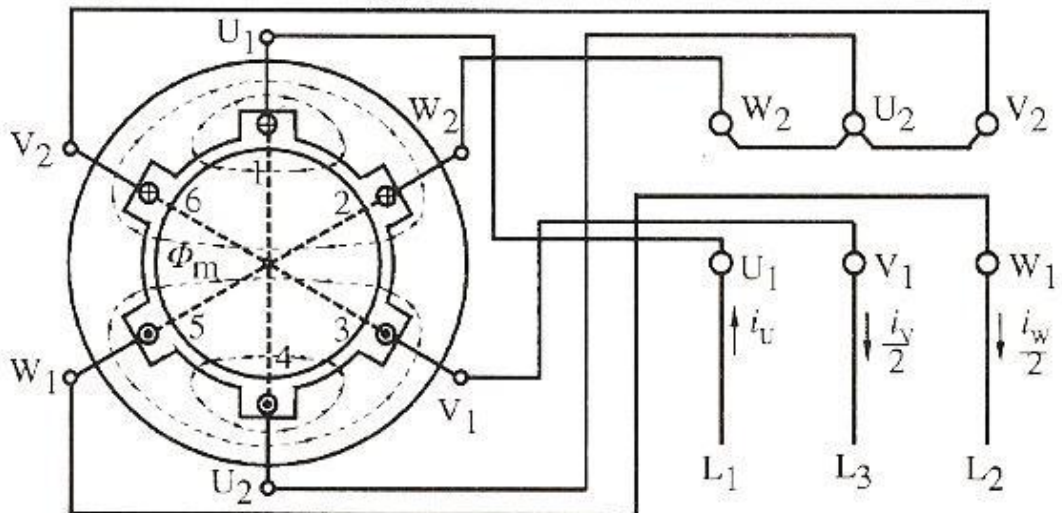


Kuva 3. Oikosulkumoottorin rakenne: 1 staattori, 2 roottori, 3 laakerit, 4 staattorin runko, 5 tuuletin, 6 liitännäkotelo, 7 staattorin käämitys, 8 roottorin käämitys, 9 akseli. (Salenius, 2012)

Epätahtikoneen rakenne on esitetty kuvassa 3, josta selviää oikosulkumoottorin tärkeimmät perusosat. Koneen sähköisen toiminnan aktiiviset osat ovat staattorin käämitys levypaketteineen sekä roottorin käämitys levypaketteineen. Nämä ovat tärkeimmät osat koneen toiminnan kannalta. Muut ovat passiivisia osia, jotka pitävät aktiiviset osat paikoillaan, johtavat sähköä koneeseen ja välittävät pyörivän liikkeen moottorista työkooneeseen. (Aura & Tonteri, Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet, 2005)

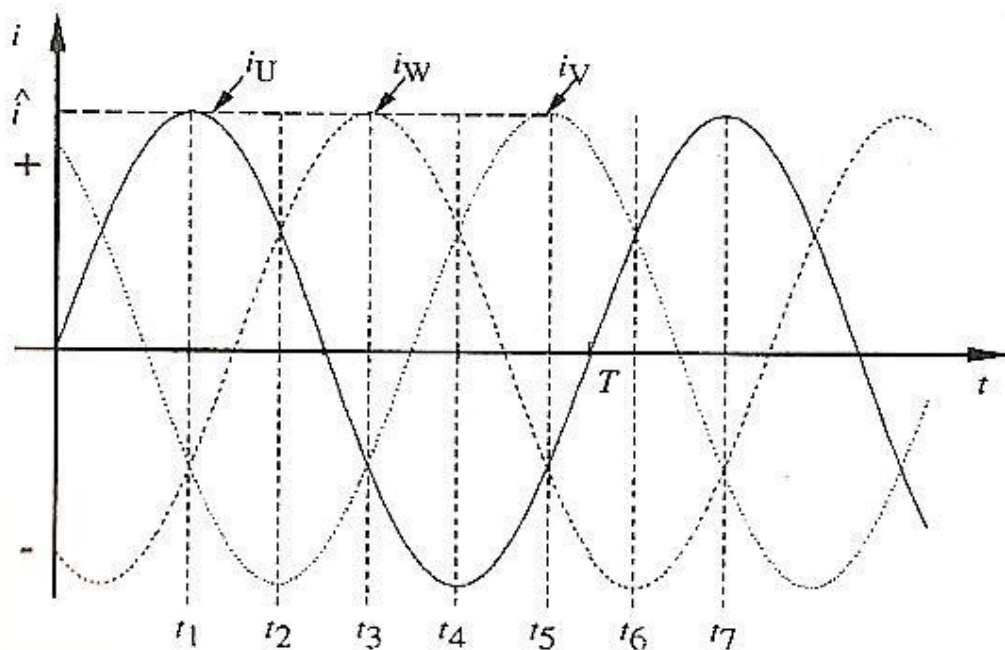
Kuva 4 esittää yksinkertaistettua vaihtosähkökoneen kolmivaihekäämitystä, jossa on vain kuusi uraa eli kaksi uraa vaihetta kohti. Käytännössä koneissa on staattorissa enemmän kuin kaksi uraa vaihetta kohti. Käämitys on tähtikytkentään kytketty yhdistämällä vaihekäämien loppupäät  $U_2$ ,  $V_2$  ja  $W_2$ . Kun vaihekäämien alkupäät  $U_1$ ,  $V_1$  ja  $W_1$  liitetään kolmivaihesyöttöön, alkaa käämituksen läpi kulkea kolmivaihevirta. (Aura & Tonteri, Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet, 2005)



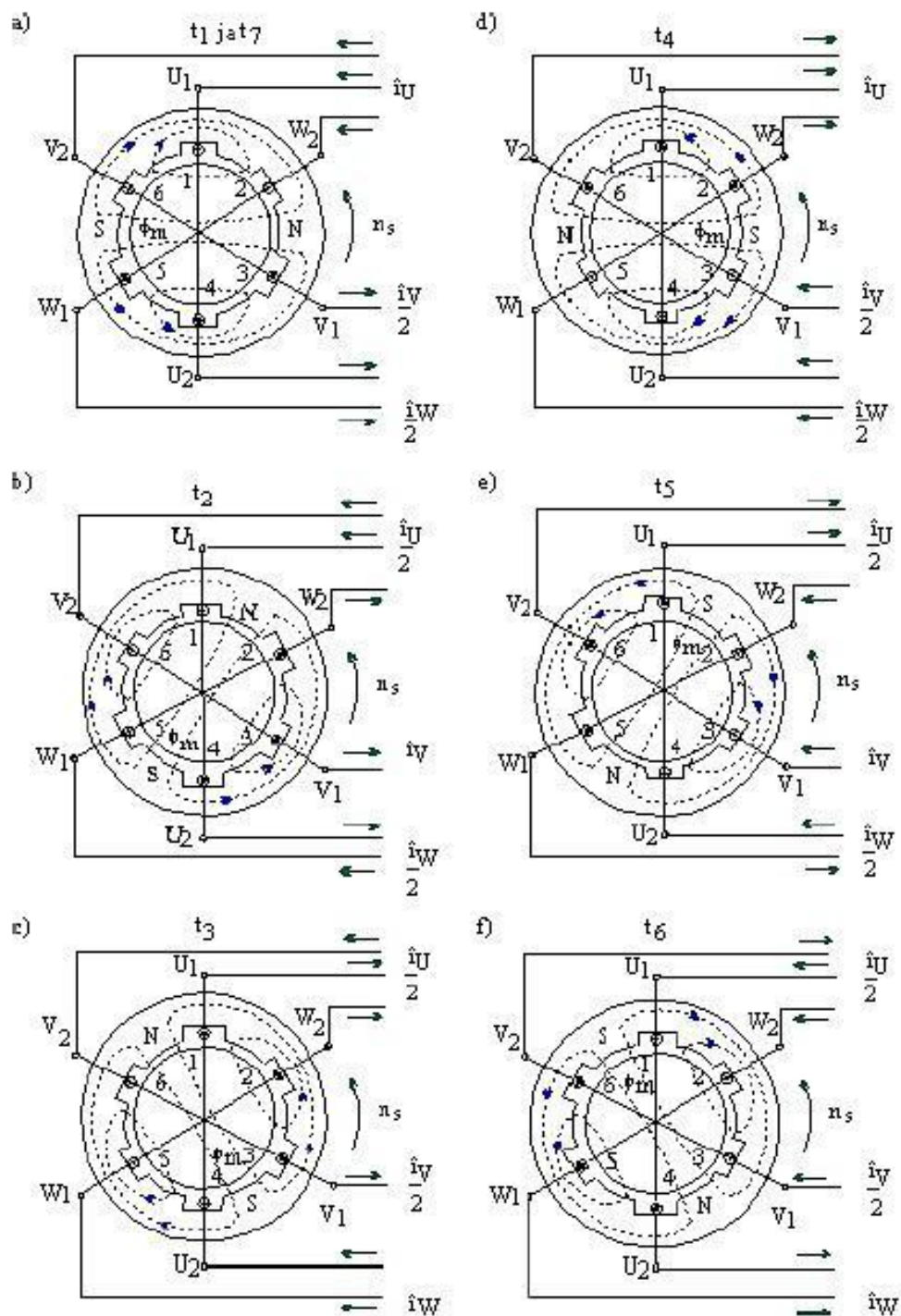


Kuva 4. Yksinkertaistettu kaaviollinen esitys vaihtosähkökoneen kolmivaihekäämityksen synnyttämästä pyörivästä magneettikentästä. (Aura & Tonteri, Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet, 2005)

Kuvalla 6 on havainnollistettu kolmivaihekäämityksen synnyttämää pyörivää magneettikenttää, kun kuvan 4 esittämään vaihtosähkökoneeseen johdetaan kuvan 5 mukainen symmetrinen sinimuotoinen kolmivaihevirta. Kuvan 5 perusteella on valittu seitsemän ajankohtaa siten, että jonkin käämin virta on huippuarvossaan.



Kuva 5. Kolmivaiheisen vaihtosähkökoneen vaihekäämien virrat.

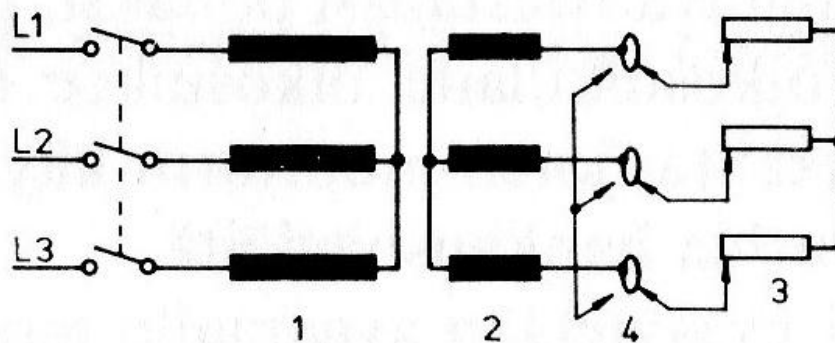


Kuva 6. Kolmivaihekäämityksen synnyttämä pyörivä magneettikenttä. (Aura & Tonteri, Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet, 2005)

Kuvan 6 mukainen käämitys kehittää magneettikentän, jossa on yksi N- ja yksi S- magneettinapa. Napaluku on tällöin 2 eli napapariluku on  $p = 1$ . Kaksinapainen magneettikenttä pyörähtää yhden kierroksen yhden jakson aikana. Kolmivaihevirta johdettuna kolmivaihekäämitykseen synnyttää vakiona pysyvän pyörivän magneettikentän, joka on aina kohtisuorasti sen käämin tasoa vastaan, jossa virralla on huippuarvo.

## 2.1.2 Liukurengasmoottori

Liukurengasmoottori eroaa rakenteeltaan oikosulkumoottorista vain roottorin osalta. Roottorikäänitys on eristetty ja yhdistetty liukurenkaisiin, joita laahaavat hiiliharjat. Näin vaihekäämeihin voidaan liittää käynnistyksen ajaksi ulkoista resistanssia, jonka avulla voidaan asettaa käynnistysvirtaa ja -momenttia. Tämä ei oikosulkumoottoreissa ole mahdollista. (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2, 1986)



Kuva 7. Liukurengasmoottorin käynnistyskytkentä. 1 staattori, 2 roottori, 3 vastuskäynnistin, 4 harjat liukurenkaineen sekä oikosulkulaitteisto. (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2, 1986)

Liukurengasmoottori varustetaan kuvan 7 mukaisesti vastuskäynnistimellä. Roottoripiirin vastuskäynnistimen avulla voidaan käynnistys- eli lähtövirta ja vääntömomentti asettaa halutun suuruiseksi. Vastuskäynnistimen avulla voidaan näin pienentää käynnistysvirtaa ja siirtää huippumomentin paikkaa, joten vääntömomentti saadaan pidettyä suhteellisen suurena. Lisäresistanssi pienentää myös roottoripiirin vaihesiirtokulmaa, jolloin roottoripiirin tehokerroin paranee. Tehokertoimen lisäävä vaikutus vääntömomenttiin on suurempi kuin virran pienenemisen vaikutus. Käynnistyksen jälkeen hiiliharjat nousevat ylös liukurenkailta, joten käynnin aikana eivät hiiliharjat kulu eikä synny turhia hankaushäviöitä. (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2, 1986)

Liian suuri käynnistysvirta ja liian pieni käynnistysmomentti aiheuttavat pitkän käynnistysajan oikosulkumoottorille, jota sen roottori ei kestä. Tällaisissa tapauksissa oikosulkumoottorin tilalla voidaan käyttää liukurengasmoottoria. (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2, 1986)

## 2.2 Epätahtigeneraattorit

Epätahtikonetta voidaan käyttää myös generaattorina. Epätahtikoneessa roottori pyörii epätahdissa pyörivän magneettikentän kanssa. Verkkomagnetoituna generaattorin roottorin nopeus on magneettikentän nopeutta suurempi, eli päinvastoin kuin moottorikäytössä. Epätahtigeneraattorit voidaan jakaa magnetoinnin perusteella kahteen ryhmään, verkkomagnetoituidut epätahtigeneraattorit ja kondensaattorimagnetoituidut epätahtigeneraattorit. (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2, 1986)

Epätahtigeneraattoria käytetään paljon tuulivoimaloissa, koska jättämän ansiosta se tarjoaa hyviä mekaanisia ominaisuuksia. Koska tuuli on yleensä epätasaista, se aiheuttaa vääntömomentin muuttumisen generaattorilla. Generaattorin nopeus tekee myös pieniä muutoksia vääntömomentin muutoksen takia, joka vähentää vaihteiston kulumista. (Löyttynen, 2010)

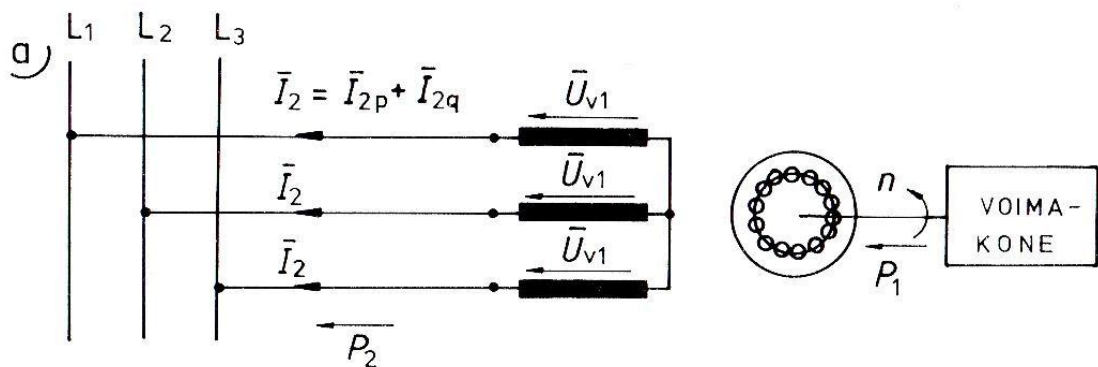
Suoraan verkkoon kytkettyjä epätahtigeneraattoreita käytetään kiinteiden nopeuksien tuuliturbiineissa. Hyvänä puolena on yksinkertainen rakenne, jonka takia myös kustannukset ovat alhaiset. Huonoja puolia ovat loistehon tarve, mekaaniset rasitukset ja tehokertoimen asettelun rajallisuus. Myös tuulen nopeuksien muutokset näkyvät suoraan sähköverkon puolella tehon vaihteluina.

Taajuusmuuttajan kautta verkkoon kytkettyjä epätahtigeneraattoreita käytetään muuttuvanopeuksisissa tuuliturbiineissa. Etuja tässä ovat laajempi täyden tehon toiminta-alue, hyvä tehokerroin, joka on usein aseteltavissa sekä pienemmät mekaaniset rasitukset rakenteissa. Haittoina ovat tehonmuokkaimissa tapahtuvat häviöt sekä näistä laitteista aiheutuvat lisäkustannukset. (Tuulivoimalaitosten generaattori- ja tehoelektroniikkaratkaisut)

### 2.2.1 Verkkomagnetoitu epätahtigeneraattori

Verkkomagnetoituidet epätahtigeneraattorit ottavat magnetoimisvirran sähköverkosta, joten ne pystyvät syöttämään sähkötehoa vain jännitteellisiin verkkoihin. Verkkomagnetoitu epätahtigeneraattori ei siis pysty toimimaan täysin itsenäisesti. Tällaisia koneita käytetään pienitehoisissa vesivoimalaitoksissa, koska ne ovat rakenteeltaan yksinkertaisia, eivät tarvitse tasasähköä ja ovat helposti kauko-ohjattavia. (Aura & Tonteri, Sähkämiehen käsikirja 2, 1986)

Kuva 8 esittää periaatteellisen kytkennän verkkomagnetoituidusta epätahtigeneraattorista. Jos voimakone pyörittää epätahtikoneen roottoria tahtinopeudella, jolloin jättämä  $s=0$ , ottaa epätahtikone sähköverkosta ainoastaan rautahäviöiden verran tyhjäkäyntitehoa. Kun voimakoneen vääntömomenttia suurentamalla nostetaan koneen pyörimisnopeus yli tahtipyörimisnopeuden yhä suuremmalle nopeudelle, muuttuu epätahtikoneen verkosta ottama teho negatiiviseksi, eli kone syöttää pätötehoa verkkoon. Kun epätahtikone toimii tahtinopeutta suuremmalla nopeudella, se ottaa pyörittävästä voimakoneesta mekaanista tehoa muuntaen sen sähkötehoksi, jonka se syöttää verkkoon. Samalla se ottaa magnetoimisvirtansa verkosta eli syöttää verkkoon kapasitiivista loistehoa. (Aura & Tonteri, Sähkämiehen käsikirja 2, 1986)

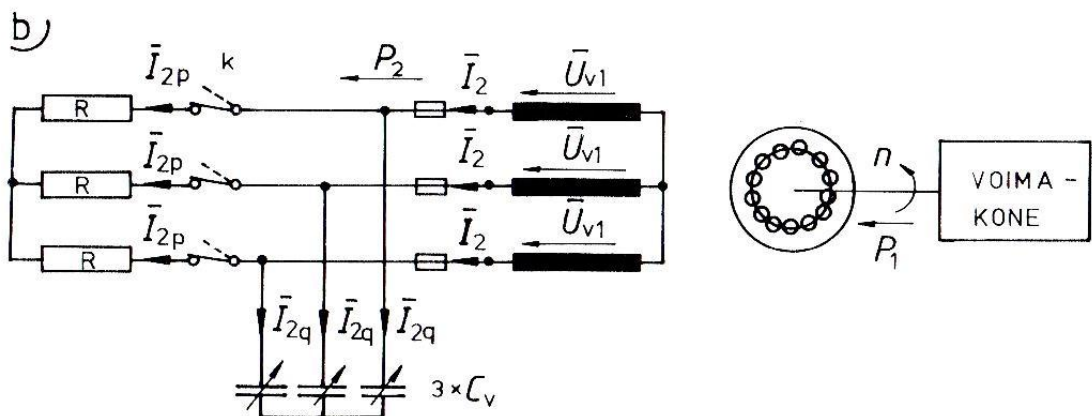


Kuva 8. Verkkomagnetoitu epätahtigeneraattori. (Aura & Tonteri, Sähkämiehen käsikirja 2, 1986)

### 2.2.2 Kondensaattorimagnetoitu epätahtigeneraattori

Kondensaattorimagnetoituidut epätahtigeneraattorit eroavat verkkomagnetoiduista epätahtigeneraattoreista siinä, että ne ottavat koneen magnetoimisvirran liittimiin asennetuista magnetoimiskondensaattoreista (kuva 9). Ne ovat niin sanottuja itsemagnetoituvia, eli ne pystyvät toimimaan täysin itsenäisinä generaattoreina. Itsemagnetoituvien generaattoreiden rautaosien pitää olla magneettisesti kyllästyviä. Generaattorin heräämiseksi kutsutaan sitä, kun itsemagnetoituva generaattori rupeaa kehittämään jännitettä. Heräämisen ehdot ovat, että roottoriraudassa on edellisen käytön jälkeen jäännösvuo, koneella on tarpeeksi suuri pyörimisnopeus ja kone on kuormittamaton. Herääminen tapahtuu siten, että jäännösvuo kehittää staattorin vaihekäämeihin pienen jännitteen, joka aiheuttaa virran kondensaattoriin. Tämä kuormitusvirta alkaa magnetoida konetta tasavirtamagnetoimisvirran tavoin. (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2, 1986)

Kondensaattorimagnetoituja epätahtigeneraattoreita käytetään esimerkiksi varageneraattoreina poltto- tai dieselmoottorin ollessa varavoimakoneena. Kondensaattorimagnetoituja epätahtigeneraattoreita ei juuri saa tehdasvalmisteisina, joten ne täytyy rakentaa itse. (Konttinen, 2008)



Kuva 9. Kondensaattorimagnetoitu epätahtigeneraattori. (Aura & Tonteri, Sähkömiehen käsikirja 2, 1986)

### 2.2.3 Generaattorin mallintaminen

Kun tarkastellaan epätahtikoneen toimintaa generaattorina, on helpointa lähteä liikkeelle moottorin toiminnasta. Epätahtikoneen peruseriaatteena on, että moottorikäytössä staattorikäänitys (kuvan 10 komponentit  $R_I$  ja  $X_{\delta I}$ ) synnyttää tahtinopeudella pyörivän magneettikentän. Generaattorin napapariluku määrää koneen tahtinopeuden. Staattorin vaihekäämejä syötetään kolmesta  $120^\circ$ :n vaihesiirrossa toisistaan olevasta jännitelähteestä. Tästä johtuen staattorin käämeihin syntyy virrat, jotka ovat  $120^\circ$ :n vaihesiirrossa toisistaan. Koska navat sijaitsevat fyysisesti  $120^\circ$ :n paikallisessa vaihesiirrossa, syntyy virtojen vaikutuksesta pyörivä magneettikenttä. (Pitkänen, 2007)

Roottorissa on oikosulkukäänitys, jonka käämisauvoja staattorin pyörivä magneettikenttä leikkaa. Roottorin oikosuljettuihin virtapiireihin syntyy induktiovirta oikosulkukäänityksen vuoksi. Ilmavälivuo syntyy jatkossa staattori- ja roottorivirtojen yhteisvaikutuksesta. Koneen virrallisiin sauvoihin vaikuttaa vääntömomentti Lorentzin voiman perusteella, joka on esitetty kaavassa 1. Jotta induktio säilyy, tulee roottorin pyörimisnopeuden poiketa magneettikentän pyörimisnopeudesta. (Pitkänen, 2007)

$$F = q(E + vxB) \quad (1)$$

,missä

$F$  = voima

$q$  = hiukkasen sähkövaraus

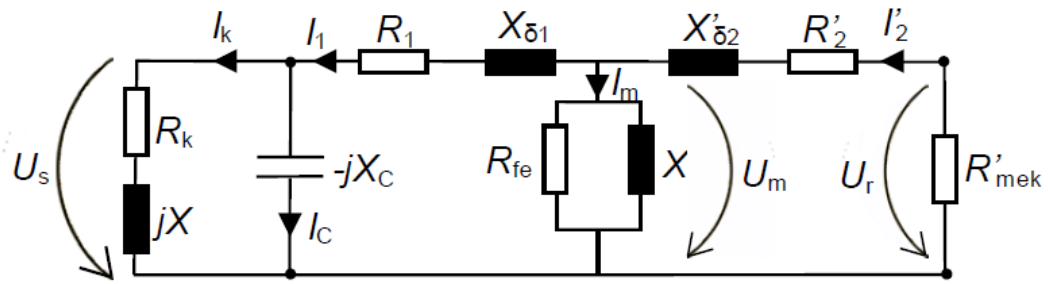
$E$  = sähkökentän voimakkuus

$v$  = hiukkasen hetkellinen nopeus

$x$  = ristitulo

$B$  = magneettikenttä

Epätahtigeneraattorin toimintaa voidaan tarkastella yksivaiheisen sijaiskytkennän avulla (kuva 10). Roottoripuolen suureet on redusoitu staattorista päin katsottuna, jota selvennetään yläpilkulla roottorisuureissa.



Kuva 10. Kuormitetun kondensaattorimagnetoidun epätahtigeneraattorin yksivaiheinen sijaiskytkentä. (Pitkänen, 2007)

Kuvassa 10 pitkittäishaaran komponentit ovat seuraavat:  $R_1$  on staattorin resistanssi ja  $X_{\delta 1}$  on staattorin hajareaktanssi,  $R'_2$  on roottorin reaktanssi ja  $X'_{\delta 2}$  on roottorin hajareaktanssi. Yksivaiheisen sijaiskytkennän poikittaishaaran komponentit ovat seuraavat:  $R_{fe}$  on rautahäviöresistanssi ja  $X_m$  on magnetointireaktanssi. Kuvassa on esitetty myös magnetointikondensaattori  $-jX_C$ , staattoriin kytketty kuormitus  $R_k + jX$  ja koneen akselitehoa mallintava komponentti  $R'_{mek}$ . Jännitteitä kuvaavat suureet ovat staattorin jännite  $U_s$ , roottorin jännite  $U_r$  ja magnetointijännite  $U_m$ . Virtoja kuvaavat suureet ovat roottorin vaihevirta  $I'_2$ , staattorin virta  $I_1$  ja magnetointivirta  $I_m$ , sekä kuorman virta  $I_k$  ja kondensaattorin virta  $I_C$ . (Pitkänen, 2007)

Generaattorin herääminen tapahtuu, kun kondensaattori pystyy syöttämään niin sanotun tyhjäkäyntikäyrän  $U_0 = f(I_m)$  edellyttämän magnetointivirran, missä  $U_0$  on tyhjäkäyntijännite. Tyhjäkäyntikäyrä määritetään yksivaiheisen sijaiskytkennän avulla.

Kondensaattoreiden tähtikytkennässä magnetointivirta  $I_m$  on sama kuin tähtikytkentäisen kondensaattorin virta  $I_C$ :

$$I_m = I_C = \frac{U_C}{X_C} = \omega \cdot C_0 U_0 \quad (2)$$

,missä

$U_C$  = kondensaattorin jännite

$X_C$  = kondensaattorin kapasitiivinen reaktanssi

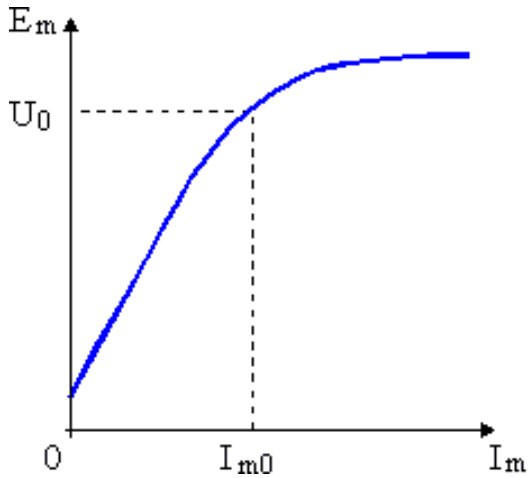
$C_0$  = kondensaattorin kapasitanssi generaattorin tyhjäkäynnissä

$U_0$  = generaattorin tyhjäkäyntijännite

$\omega$  = kulmataajuus



Koneen tyhjäkäynnissä toimintapiste asettuu tyhjäkäyntikäyrän  $U_0 = f(I_m)$  (kuva 11) ja kondensaattorisuoran  $I_m = 2\pi f C_0 U_0$  leikkauspisteeseen.



Kuva 11. Staattorikäämyksiin indusoituva jännite magnetoimisvirran funktiona. (Korpinen)

Näin saadaan magnetointikondensaattorin kapasitanssin arvo seuraavasti. (Pitkänen, 2007)

$$C_0 = \frac{I_m}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_0} \quad (3)$$

Jos magnetointivirtaa  $I_m$  ei ole tiedossa, voi magnetointikondensaattorit mitoittaa yksivaiheisen sijaiskytkennän perusteella, kun tiedetään kondensaattoreiden ja staattoriin resonanssitaajuus  $f_r$ . Tämä taajuus on samalla staattorijännitteen taajuus. (Pitkänen, 2007)

$$f_r = \frac{1}{\sqrt{(L_m + L_{\delta l}) \cdot C_0}} \quad (4)$$

,missä

$L_m$  = magnetointi-induktanssi

$L_{\delta l}$  = staattorin hajainduktanssi

#### **2.2.4 Epätahtigeneraattorin toiminta jakeluverkkoon liitettynä**

Kun epätahtigeneraattori on liitettynä jakeluverkkoon, sen toiminta on varsin yksinkertainen. Suuren oikosulkutehon omaava jäykkä verkko määrää jännitteen ja taajuuden, ja generaattori ottaa magnetointivirtansa verkosta tai osaksi kompensointikondensaattoreilta. (Pitkänen, 2007)

Liitäntä jakeluverkkoon asettaa kuitenkin tietyt vaatimukset generaattorikäytölle. Esimerkiksi generaattorilla pitää olla suojaus- ja mittauslaitteisto, ettei generaattorin käyttö aiheuta haittaa muille kytketyille sähkölaiteille. (Pitkänen, 2007)

Mahdollisia ongelmatilanteita voi syntyä, kun jakeluverkkoon tulee häiriö. Jos kuormitus on pieni, saattaa generaattori rynnätä ja voi syntyä haitallisia ylijännitteitä. Lyhyen sähkökatkon aikana voi tulla tilanne, jossa generaattori käy hetkellisesti saarekekäytössä. Katkon jälkeen takaisin kytkeytyvä verkko voi aiheuttaa kytkentätransientin. (Pitkänen, 2007)

#### **2.2.5 Epätahtigeneraattorin toiminta saarekekäytössä**

Saarekekäyttö -termi tarkoittaa tilannetta, jossa verkon osa on erillään ympäröivästä sähköverkosta ja sitä syöttää jokin ulkopuolisesta verkosta erillään oleva laite. Epätahtigeneraattorin saarekekäytössä täytyy kulutetun ja tuotetun tehon olla yhtä suuri, koska muuten sähkön laadun kannalta saattaa syntyä ongelmia, erityisesti kuormituksen nopeissa muutoksissa. Mikäli tällainen tilanne syntyy, tulisi saarekekäyttötilanne poistaa mahdollisimman nopeasti. Tämä tarkoittaa käytännössä, että suojalaitteiston tulee haavahtua välittömästi ja kytkeä generaattori irti verkosta. Tämä ongelma voidaan välttää, jos käytetään erillistä, tähän tarkoitettua nopeaa generaattorin lähtötaajuuden ja jännitteen säätäjää. (Pitkänen, 2007)

Ongelmatilanteita saarekekäytössä ovat kuormitusten nopeat poiskytketyymiset, joka aiheuttavat generaattorin nopeuden nousua. Tällöin magnetointia tulisi vähentää nopeasti muuttamalla roottorin pyörimisnopeutta, ettei pääse syntymään vaarallisia ylijännitteitä. Myös tilanteissa, joissa pelkkä generaattori syöttää verkkoa, voi jännitteen käyrämuoto vääristyä verkon yliaaltolähteiden vaikutuksesta. (Pitkänen, 2007)

### 3 VARAVOIMAKONEEN LIITTÄMINEN SÄHKÖLAITTEISTOON

#### 3.1 Yleiset ominaisuudet

Varavoimalaitteilla tarkoitetaan yleensä moottorigeneraattoria. Moottorigeneraattori on järjestelmä, jossa generaattoria pyörittää jokin voimanlähde, esimerkiksi turbiini tai polttomoottori. Varavoimasovelluksissa käytetään tavallisesti polttomoottoria. Moottorigeneraattoreita käytetään erilaisissa sovelluksissa, kuten jakeluverkosta erillisen sähköverkon syöttämiseen, jakeluverkkoon liitetyn sähköasennuksen varavoimanlähteenä tai jakeluverkosta syötettävän sähköasennuksen rinnakkaissyöttönä. (Leppäkangas, 2005)

Varavoimakäytössä generaattoria yleensä käytetään saarekekäytössä, jossa jakeluverkon ja generaattorin rinnankäynti on estetty. Generaattorin saarekekäyttöä koskevat vaatimukset esitetään SFS 6000:n kohdassa 551.6, jossa on esitetty sopivia menetelmiä rinnankäytön estoon. Sopiva menetelmä on esimerkiksi kolmiasentoinen vaihtokytkin, joka katkaisee toisen syötön ennen kuin toinen syöttö kytkeytyy. (SFS 6000, 2007)

Generaattori voi olla rakenteeltaan asynkroninen tai synkroninen. Pienet asynkroniset generaattorit ovat yksinkertaisempia rakenteeltaan, eikä niissä ole erillistä jännitteen säätöä. Niitä käytetään lähinnä resistiivisten kuormien syöttöön. Niissä ei välttämättä ole erillistä ylivirtasuojaa, vaan suojaus perustuu generaattorin virransyötön ominaisuuksiin. Magnetointivirtaa pienentämällä jännite laskee voimakkaasti ylikuormitettaessa ja putoaa lähes nolnaan vikatilanteessa. (ST-kortisto, 2012)

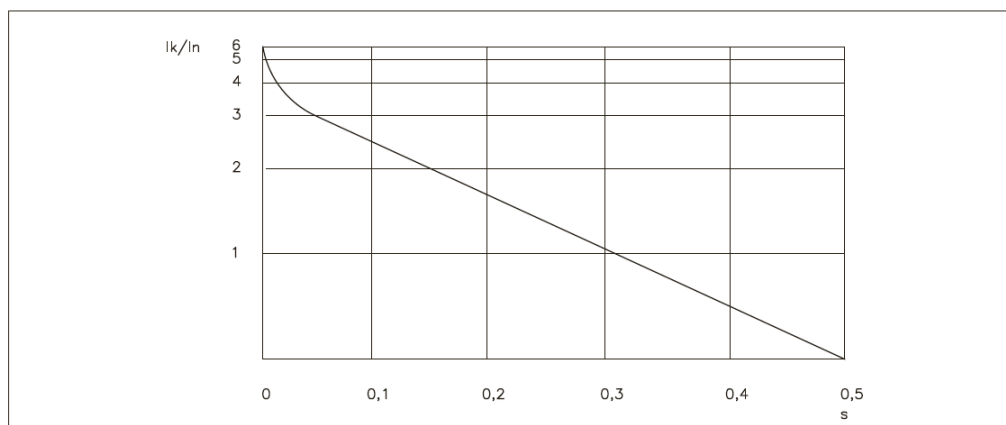
Synkroninen generaattori sopii hyvin yleiskäyttöön. Synkroninen generaattori syöttää jatkuvaa oikosulkuvirtaa vikatapauksessa, jos siinä on lisämagnetointilaite, jolla varmistetaan vikatapauksen magnetointi. (ST-kortisto, 2012)

Generaattoreissa on usein myös jännitteen säätöön säätönappi ja jännitemittari. (ST-kortisto, 2012)

## 3.2 Varavoimalaite oikosulkutilanteessa

### 3.2.1 Generaattori ei syötä jatkuvaa oikosulkuvirtaa

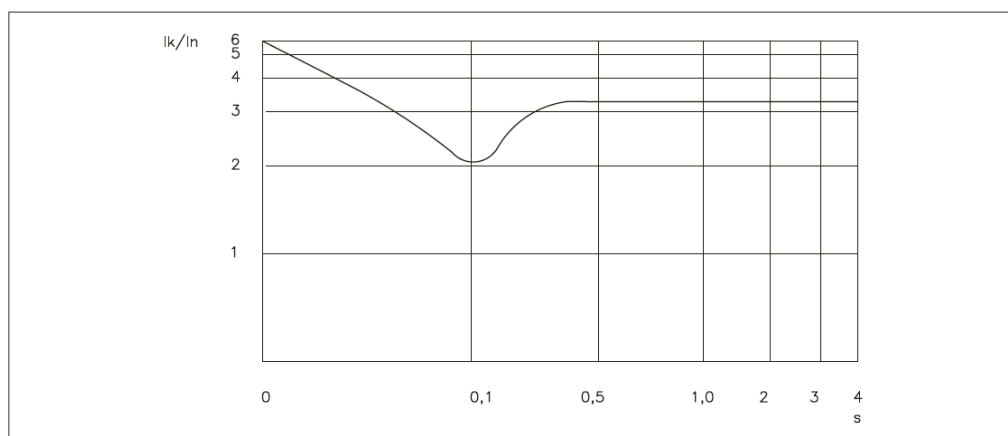
Generaattori joko syöttää tai ei syötä jatkuvaa oikosulkuvirtaa. Kun generaattori ei pysy syöttämään jatkuvaa oikosulkuvirtaa, se syöttää vain nopeasti häviävän virtatransientin oikosulun alussa. Tällaiseen generaattoriin sopiva suojausmuoto on vakioaikaylivirtasuojaus. Se toimii generaattorin oikosulkusuojana. Vikatilanteessa oikosulkuvirran arvo laskee nopeasti alle ylivirtasuojan havahtumisarvon. Silloin voidaan käyttää suoja-laitetta, jossa on myös alijänniteporras. Se ylläpitää ylivirtahavahtumaa asetellun ajan ja katkaisee syötön vakioajan kuluttua, jos jännite ei palaa sallitulle alueelle. Kuvasta 12 selviää oikosulkutilanteen virtakäyrä, kun generaattori ei syötä jatkuvaa oikosulkuvirtaa. (ST-kortisto, 2012)



Kuva 12. Esimerkki generaattorin virtakäyrästä vikatilanteessa, kun generaattori ei syötä jatkuvaa oikosulkuvirtaa. (ST-kortisto, 2012)

### 3.2.2 Generaattori syöttää oikosulkuvirtaa

Tällaiset generaattorit pystyvät syöttämään vikatilanteessa jatkuvaa oikosulkuvirtaa, jonka ansiosta oikosulkusuojien valinta on helpompaa ja selektiivisyys on helpompi saavuttaa. Huonona puolena on jännitteen vaihtelu ehjissä vaiheissa 1- ja 2-vaiheisissa vioissa. Vian alussa generaattorin navoissa syntyy jopa 6-kertainen oikosulkuvirta nimellisvirtaan nähden. Se putoaa kuitenkin kuvan 13 mukaisesti nopeasti vakiintuen sitten vakioarvoon. Generaattorilta edellytetään rakenteesta riippuen 2,2–2,9 -kertaista oikosulkuvirtaa. Pidempikestoisen oikosulkuvirran syöttäminen mahdollistaa kiinteissä asennuksissa myös 5 sekunnissa toimivien suojalaitteiden käytön. (ST-kortisto, 2012)



Kuva 13. Esimerkki generaattorin virtakäyrästä vikatilanteessa, kun generaattori syöttää jatkuvaa oikosulkuvirtaa. (ST-kortisto, 2012)

### 3.3 Varavoimakoneen asennuksen suojausvaatimukset

#### 3.3.1 Varavoimakoneen vikasuojaus

Suurilla varavoimakoneilla kiinteää asennusta syötettäessä suojausmenetelmänä käytetään syötön automaattista poiskytkentää ja pienemmillä varavoimakoneilla sähköistä erotusta. Suojauksen tekee ongelmalliseksi yleensä varavoimakoneen oikosulkuvirran riittämättömyys tai liian lyhyt kesto aika nopeaan syötön poiskytkentään kiinteässä asennuksessa olevilla suojalaitteilla. On huomioitava myös eri johdonsuojakatkaisijoiden laukaisukäyrien vaikutus. B-tyypin johdonsuojakatkaisija laukeaa varmasti enintään 0,1 sekunnissa vähintään 5-kertaisella oikosulkuvirralla nimellisvirtaan verrattuna. Vastaavasti C-tyyppi tarvitsee 10-kertaisen ja D-tyyppi 20-kertaisen oikosulkuvirran laukeamiseen 0,1 sekunnissa. Koska varavoimakoneen syöttämässä laitteistossa ei aina voida toteuttaa syötön automaattista poiskytkentää tavallisilla ylivirtasuojilla, voi suojauksen toteuttaa käyttämällä erilaisia vikavirtasuojakytkeimiä tai maasulku-, vakioaikaylivirta- tai alijännitesuojalaitteen ohjaamaa kompaktikatkaisijaa. (ST-kortisto, 2012)

Lisävaatimuksen sähköasennuksille, joissa generaattorilaitteisto on yleisen jakeluverkon varasyöttönä, määrittää standardi SFS 6000-5-55 kohta 551.4.2. Jos generaattori toimii kytkettävänä vaihtoehtona TN-verkolle, suojaus syötön automaattisen poiskytkennän avulla ei saa riippua liittymisestä yleisen jakeluverkon maadoitukseen. Laitteistolla on oltava sopiva maadoituselektrodi. (SFS 6000, 2007)

Vikavirtasuojakytkin täyttää nopean laukaisun ehdot erinomaisesti. Nimellistoimintavirrallaan 30 mA:n vikavirtasuojakytkin toimii 0,3 sekunnissa jo nimellisellä toimintavirrallaan, ja mikäli vikavirran arvo nousee esimerkiksi 150 mA:iin, suojalaite toimii 0,04 sekunnissa. Enintään 30 mA:n vikavirtasuojakytkintä edellytetään vain tietyn tyyppisissä henkilösuojaukseen liittyvissä asennuksissa, kuten pistorasioiden lisäsuojauksessa. Muussa kuin henkilösuojauksessa, esimerkiksi yli 32 A:n virtapiirien suojauksessa, voidaan käyttää 100, 300 tai 500 mA:n vikavirtasuojakytkimiä (ST-kortisto, 2012)

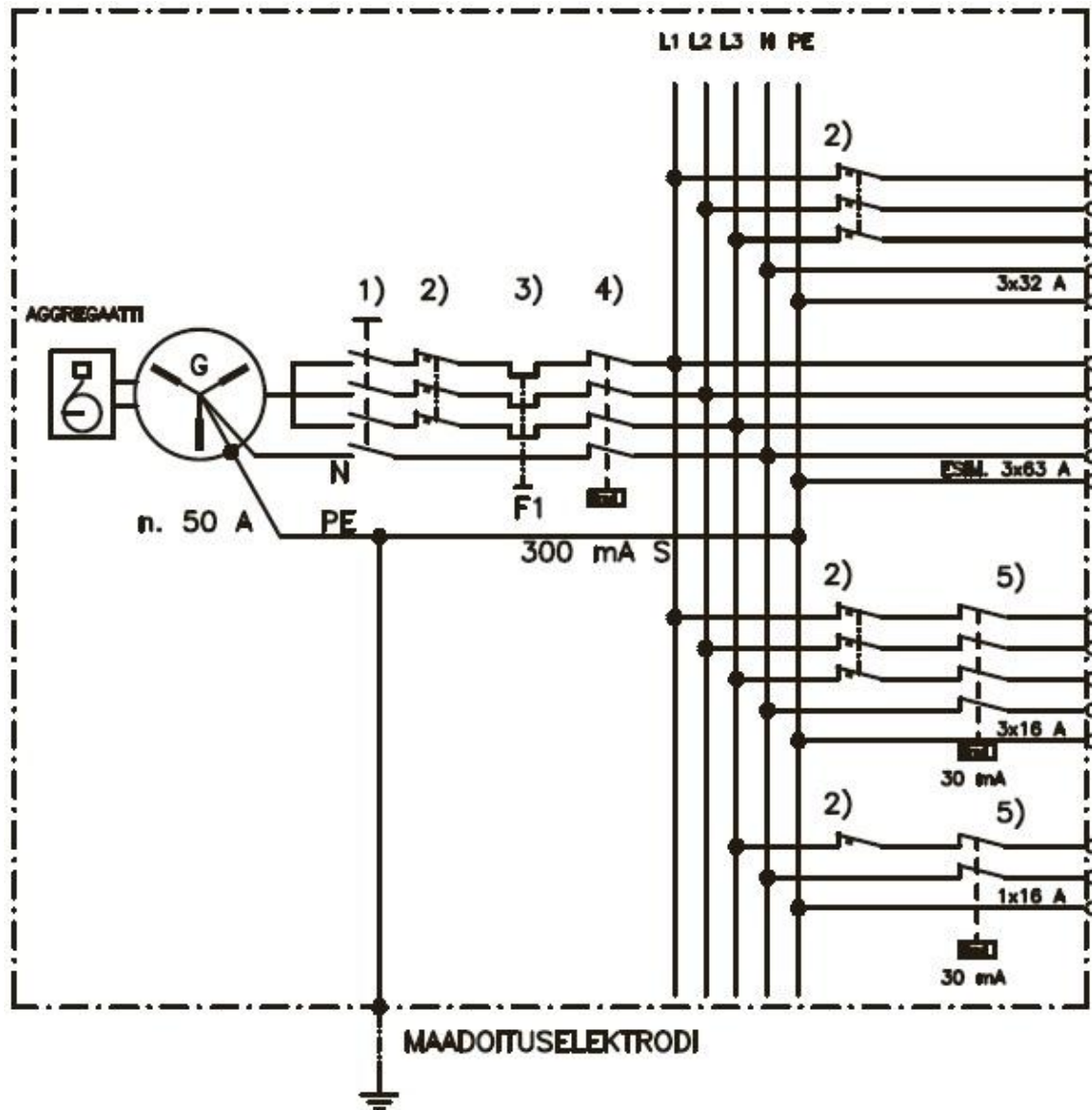
### **3.3.2 Varavoimakoneen ylivirtasuojaus**

Ylikuormitussuojaus tulee toteuttaa niin, että se toimii kaikissa generaattorin käyttötilanteissa ottaen huomioon käynnistystilanteet. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi suurimmat moottorikäytöt. Se toteutetaan ylikuormitussuojalla, esimerkiksi lämpörele tai vastaava terminen suojalaite. Täytyy myös huomioida, että sulakkeet toimivat vasta riittävän suurella ylivirralla, joka on vähintään 1,45 kertaa johdon kuormitettavuus (SFS 6000-4-43, kohta 433.1), kun sulake on valittu taulukosta oikein. (ST-kortisto, 2012)

### **3.4 Varavoimakoneen hankintaan vaikuttavia valintakriteereitä**

Varavoiman valinnassa huomioitavia asioita: (ST-kortisto, 2012)

- Vanhan verkon jakelujärjestelmän selvittäminen
- Eri jakelujärjestelmiin soveltuvia suojauksen toteutustapoja
- Eri varavoimakoneiden vaihtoehdot edelliseen
- Mitä laitteita ja laitteistoja on ehdottomasti liitettävä varavoimaan
- Suurimpien koneiden koko ja käynnistysvirta
- Onko tietokoneiden käyttötarvetta vikatilanteessa



Kuva 14. Esimerkki hyvän toteutustavan mukaisesta varavoimakoneesta. 1 pääkytkin, 2 ylivirtasuoja, 3 ylivirtasuoja, 4 vikavirtasuojakytkin hidastettu 300 mA, 5 vikavirtasuojakytkin 30 mA. (ST-kortisto, 2012)

Kuvassa 14 on esitetty malliesimerkki varavoimakoneesta, joka soveltuu siirrettävien ja TN-S -järjestelmän mukaisten laitteistojen syöttämiseen. Kosketusjännitesuojaus perustuu vikavirtasuojakytkimen käyttöön. Päävirtapiirissä on S-tyypin 300 mA:n vikavirtasuojakytkin, jolloin se on selektiivinen lisäsuojina toimivien pienempien vikavirtasuojien kanssa. Päävirtapiirin ylikuormitussuoja suojaa myös suoran syötön pistorasiaa, jolloin se ei tarvitse erillistä suojaa. Muissa nimellisvirtaa pienemmissä pistorasioissa on omat johdonsuojakatkaisijat. (ST-kortisto, 2012)

## 4 MITTAUKSET

Mittaukset suoritettiin Tampereen ammattikorkeakoulun sähkötekniikan laboratoriossa. Laboratoriossa mitattiin epätahtikoneen kuormitettavuutta sekä symmetrisellä että epäsymmetrisellä kuormituksella. Kuormituksena käytettiin ainoastaan resistiivistä kuormitusta, koska epätahtikone ei pysty tuottamaan saarekekäytössä loistehoa. Tarvittava loisteho epätahtikoneelle tuotetaan magnetointikondensaattoreilla, jotka mitoitetaan luvussa 4.1. Mittausten kytkennästä on tehty piirikaavio, joka on opinnäytetyön liitteenä 1.

Tarkoituksena oli mitata myös kyseisen epätahtikoneen käyttäytymistä oikosulkutilanteissa, koska suurimmat ongelmat epätahtigeneraattorin käytössä aiheuttaa heikko oikosulkuvirran tuotto. Mittausta ei kuitenkaan voitu suorittaa, koska laboratoriossa ei ollut tarpeeksi kestäviä laitteistoja. Mittauksissa käytetyn epätahtikoneen kilpiarvot näkyvät kuvassa 15, joiden perusteella mitoitettiin magnetointikondensaattorit.



Kuva 15. Moottorin kilpiarvot.



#### 4.1 Magnetointikondensaattoreiden mitoitus

Magnetointikondensaattorien mitoituksessa on ensin laskettava epätahtikoneen ottama sähköinen näennäisteho, joka lasketaan seuraavasti.

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I = \sqrt{3} \cdot 400V \cdot 4,9A = 3395 VA \quad (5)$$

,missä

$U$  = epätahtikoneen pääjännite

$I$  = epätahtikoneen nimellisvirta

Epätahtikoneen näennäistehosta saadaan laskettua loistehon osuus, joka lasketaan seuraavasti.

$$Q = S * \sqrt{1 - \varphi^2} = 3395VA * \sqrt{1 - 0,83^2} = 1894 Var \quad (6)$$

,missä

$\varphi$  = epätahtikoneen tehokerroin

Yhden vaiheen loistehon määrä saadaan jakamalla kokonaisloisteho kolmella.

$$Q_v = \frac{Q}{3} = \frac{1894Var}{3} = 631,33 Var \quad (7)$$

Kapasitiivinen reaktanssi voidaan laskea epätahtikoneen yhden vaiheen loistehosta. Se lasketaan seuraavasti.

$$Q_v = \frac{U^2}{X_c} \rightarrow X_c = \frac{U^2}{Q_v} = \frac{(230V)^2}{631,33Var} = 83,8 \Omega \quad (8)$$

Magnetointikondensaattoreiden suuruus saadaan laskettua kapasitiivisen reaktanssin arvosta seuraavasti.

$$X_C = -\frac{1}{\omega \cdot C} \quad (9)$$

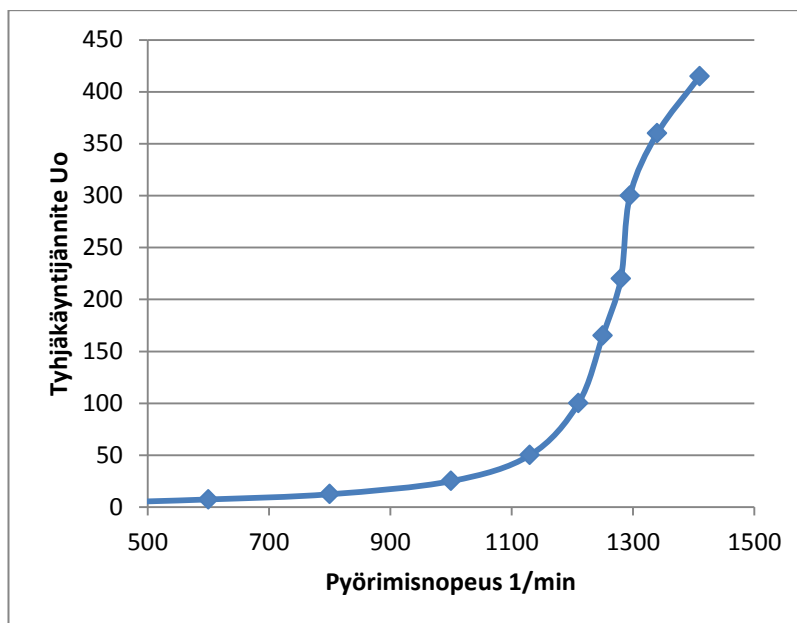
$$\Rightarrow C = -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C} = -\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 83,8 \Omega} = 38 \mu\text{F} \quad (10)$$

,missä

$f$  = taajuus, joka määräytyy roottorin pyörimisnopeudesta

## 4.2 Jännitteen nousu

Epätahtikone käynnistettiin ilman kuormaa. Aluksi epätahtikone ei kehittänyt jännitettä, eli niin sanottua heräämistä ei tapahtunut. Kun kasvatettiin magnetointikondensaattoreita, saatiin synnytettyä epätahtikoneen jäännösvuon avulla tarvittava magnetointivirta kondensaattoreilta, jonka johdosta virta alkoi kulkea magneettipiirissä ja jännite nousi epätahtikoneen navoissa. Kuvaajassa 1 on esitetty tyhjäkäyntijännitteen nousu pyörimisnopeuden funktiona. Kuvasta nähdään, että jännite alkaa nousta vasta noin 1000rpm:n kohdalla.



Kuvaaja 1. Tyhjäkäyntijännite pyörimisnopeuden funktiona.

### 4.3 Kuormitettavuus

Mittauksissa kuormitettiin epätahtikonetta ainoastaan resistiivisellä kuormituksella, koska reaktiivinen kuormitus vaatii loistehoa, jota epätahtigeneraattori ei pysty tuottamaan saarekekäytössä.

Isot kuormituksen vaihtelut ovat vaarallisia, koska kuormituksen kasvaessa epätahtikoneen pyörimisnopeus pienenee. Pyörimisnopeuden pienentyessä myös jännite pienenee, joten se pitää säätää säätämällä pyörimisnopeutta. Jos taas kuormitus pienenee huomattavasti, niin epätahtikoneen pyörimisnopeus kasvaa. Pyörimisnopeuden kasvaessa myös jännite kasvaa, josta johtuen voi syntyä liian suuria jännitteitä. Ongelman poistamiseksi voidaan kytkennässä käyttää ulkoista jännitteensäätäjää, joka pitää jännitteen halutussa arvossa kuormituksesta huolimatta. Mittauksissa ei käytetty kyseistä jännitteensäätäjää, koska koululla ei ollut tarpeeksi nopeaa säätäjää. Liian hidasa säätäjä aiheuttaa myös vaaratilanteita, koska jotkut kuormalaitteet eivät kestä suuria jännitteenvaihteluita.

### 4.4 Epäsymmetrinen kuormitus

Epätahtikone kytkettiin tähtikytkentään, jotta saataisiin nollapiste kytkentään yksivaiheisia kuormituksia varten. Mittauksissa testattiin erilaisia kuormitustilanteita. Alussa oli täysin symmetrinen kuormitus, jolloin joka vaiheessa kulkee sama virta ja jokaisella vaihekuormituksella on sama jännite. Kun kuormitusta säädettiin epäsymmetriseksi, alkoi vaiheissa kulkea eriarvoiset virrat. Pieni epäsymmetria kuormituksissa ei ole haitallista. Kun kuormitusten epäsymmetriaa suurennettiin, alkoi jännite muuttua liian epäsymmetriseksi. Epäsymmetrinen kuormitus aiheutti myös virtaa nollajohtimeen. Epäsymmetrinen kuormitus voi aiheuttaa myös kolmatta yliaaltoa jota nyt ei todettu. Mittaustulokset ovat liitteessä 2. Suuri virta nollajohtimessa voi aiheuttaa sen lämpenemistä, eristeiden sulamista ja jopa tulipalovaaran. Nämä ongelmat ovat aiheellisia usein, jos nollajohdin on mitoitettu pienemmäksi kuin vaihejohtimet. Epäsymmetria on erittäin haitallista kolmivaiheisille kuormituksille sekä elektronisille laitteille, kuten tietokoneille. (Karonen, 2010)

Jos epätahtigeneraattoria käytettäisiin ainoastaan yksivaiheisien kuormitusten kuormittamiseen, täytyisi kuormitusten olla tasaisesti jaoteltu jokaiselle vaiheelle. Epätahtigeneraattoria ei oikeastaan voi kuormittaa samanaikaisesti yksivaiheisilla sekä kolmivaiheisilla kuormituksilla, koska yksivaiheiset kuormitukset aiheuttavat epäsymmetriaa.

## 5 YHTEENVETO

Tässä työssä perehdyttiin epätahtikoneen käyttäytymiseen varavoimageneraattorikäytössä. Käytiin läpi teoriaa yleisesti epätahtikoneen toiminnasta moottorina ja generaattorina. Selvitettiin epätahtikoneen hyviä ja huonoja puolia generaattorikäytössä. Mittauksissa yritettiin selvittää epätahtigeneraattorin käyttäytymistä erilaisilla kuormitustilanteilla sekä epäsymmetrisellä kuormituksella.

Epätahtikone on yleisin käytetty sähköteline, jonka takia se on myös halvin vaihtoehto. Se on myös yksinkertaisin rakenteeltaan ja tekniikaltaan, eikä se tarvitse mitään ulkoista magnetointipiiriä, jota esimerkiksi tahtikone tarvitsee. Generaattorikäytössä epätahtikone vaatii magnetointikondensaattorit ja on suositeltavaa myös kytkeä jännitteensäädin. Ilman säädintä epätahtigeneraattorin käyttö vaatii kuormituksen kytkennässä ja kuormituksen muuttuessa henkilön säätämään jännite sopivaksi.

Varavoimakoneena epätahtigeneraattori on aika huono vaihtoehto, jos kuormitus vaihtelee. Epätahtigeneraattori ei pysty syöttämään oikosulkutilanteessa muuta, kuin nimellisvirran suuruista oikosulkuvirtaa. Oikosulkuvirran kestoaika on myös lyhyt, koska ei ole ulkoista magnetointipiiriä. Epätahtigeneraattori syöttää vain nopeasti häviävän virtatransientin. Tällöin oikosulkutilanteessa myös magnetointikondensaattorit ovat oikosulussa eivätkä tuota tarvittavaa magnetointivirtaa. Suojauksen voi toteuttaa vakioaikaylivirtasuojalla, joka toimii oikosulkusuojana epätahtigeneraattorille.

Mittauksissa oli aluksi ongelmia saada epätahtigeneraattori heräämään. Generaattoria yritettiin käynnistää monta kertaa ja hienosäätää magnetointikondensaattoreiden arvoa, mutta jännite ei noussut. Lopulta, monien yritysten jälkeen, generaattorin jännite nousi ja saatiin generaattori toimimaan. Luultavasti aluksi kondensaattoreiden arvot olivat mitoitettu liian pieniksi. Tästä johtuen generaattori ei aluksi kehittänyt jännitettä.

Eri kuormitustilanteita mitattaessa huomattiin, että symmetrisellä kuormituksella jännitteet olivat epäsymmetriset. Kun kuormitusta muutettiin epäsymmetrisemmäksi, alkoi epätahtikone tärinä huomattavasti ja tuottaa kovaa meteliä. Tärinän syytä yritettiin selvittää, mutta aiheuttajaa ei löytynyt. Kuormalaitteet ja muut käytössä olleet laitteet oli tarkistettu. Tehtiin mittaus yliaaltojen havaitsemiseksi, mutta niitä ei ollut. Tärinästä

johtuen mittauksissa ei voinut isoa epäsymmetriatilannetta mitata, mutta se ei vaikuttanut lopputulokseen. Mittauksissa selvisi myös jännitteen säätämisen tarpeellisuus, koska jokaisen muutoksen jälkeen oli nopeasti tarkastettava ja säädettävä jännitteen arvo. Kokeiltiin myös yksivaiheista kuormitusta ja sen vaikutus generaattorin käyttäytymiseen ei eronnut mitenkään kolmivaiheisesta kuormituksesta.

Mittausten lopuksi tarkistettiin vielä generaattorin käämien vastusarvot. Vastusarvot näkyvät taulukossa 1 ja siitä voi huomata, että vastusarvoissa on pieniä eroja. On siis mahdollista, että mittauksissa ilmenneet jännite-erot, tärinä ja meteli johtuivat hieman eri kierrosmäärillä käämityistä staattorikäämeistä.

Taulukko 1. Epätahtigeneraattorin käämien vastusarvot.

Käämien vastusarvot	
U	3,85 $\Omega$
V	3,79 $\Omega$
W	3,7 $\Omega$

Tehtyjen tutkimusten ja mittausten perusteella voidaan todeta, että epätahtigeneraattori on hyvä ratkaisu, kun haetaan yksinkertaista ja edullista vaihtoehtoa generaattorikäyttöön. Kuormitusmuutokset ovat hankalia tilanteita ilman lisälaitteita, joten paras ratkaisu on resistiivinen vakiokuormitus.

## LÄHTEET

Aura, L.;& Tonteri, A. J. (1986). *Sähkömiehen käsikirja 2*. WSOY.

Aura, L.;& Tonteri, A. J. (2005). *Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet*. WSOY.

Hietalahti, L. (2011). *Muuntajat ja sähkökoneet*. Tammertekniikka.

Karonen, T. (2010). *Epäsymmetrisen kuormituksen ja yliaaltojen mittaukset. Tutkintotyö. Mikkelin ammattikorkeakoulu.*

Konttinen, J. (2008). *Vaihtosähkökoneen huolto ja koestus. Tutkintotyö. Tampereen ammattikorkeakoulu.*

Korpinen, L. Haettu 20. Huhtikuu 2013 osoitteesta  
[http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_2osa.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf)

Kosonen, H. *Mikkelin ammattikorkeakoulu.* Noudettu osoitteesta  
[cna.mikkeliyamk.fi/Public/KosonenH/sahko\\_ja.../Moottorit\\_1.ppt](http://cna.mikkeliyamk.fi/Public/KosonenH/sahko_ja.../Moottorit_1.ppt)

Leppäkangas, J. (2005). *Kosketusjännitesuojaus ups- ja varavoimaverkossa. Tutkintotyö. Tampereen ammattikorkeakoulu.*

Löyttynen, H. (2010). *Suoravetoisen tuuliturbiinin generaattorin testisegmentin testaus. Tutkintotyö. Saimaan ammattikorkeakoulu.*

Pitkänen, I. (2007). *Epätahtigeneraattori osana jätevedenpuhdistamon sähköjärjestelmää. Tutkintotyö. Tampereen ammattikorkeakoulu.*

Salenius, V. (2012). *Sähkökoneiden vikaantumisen havainnointi. Insinööriä. Metropolia ammattikorkeakoulu.*

SFS 6000. (2007). *Pienjännitesähköasennukset ja sähköturvallisuus.*

ST-kortisto. (2012). *ST 52.40 Siirrettävän, pienjännitteisen moottorigeneraattorin liittäminen sähkölaitteistoon*. Sähkötieto ry.

*Sähkömarkkinalaki* 386/1995. Noudettu osoitteesta  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1995/19950386>

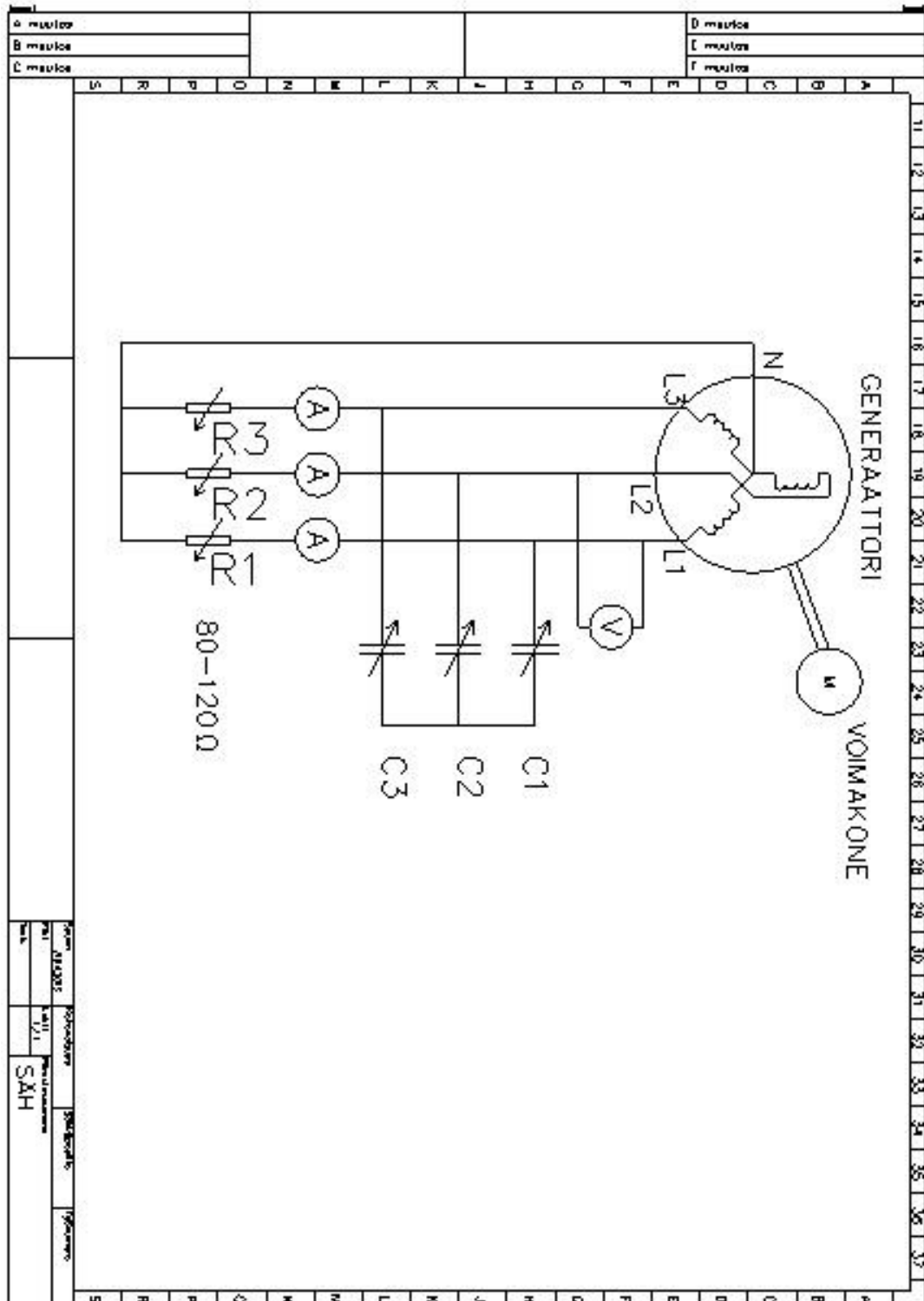
*Tuulivoimalaitosten generaattori- ja tehoelektroniikkaratkaisut*. Haettu 12. 4 2013  
osoitteesta  
<http://webhotel2.tut.fi/units/set/opetus/kurssit/Wind/Seminaarit/luku4.pdf>

Ylä-Outinen, A. (2011). *Hajautettu sähkön pientuotanto pienjännitteisten jakeluverkkojen suojauksen kannalta*. Kandidaatintyö. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.



## LIITTEET

Liite 1. Mittauskytkennän piirikaavio.



## Liite 2. Mittaustulokset

Symmetrinen kuormitus	
U12	400V
I1	3A
I2	2,6A
I3	2,9A
P1	660W
P2	660W
P3	660W

Epäsymmetrinen kuormitus	
U12	400V
I1	2A
I2	2,6A
I3	2,9A
P1	440W
P2	660W
P3	660W

1v kuormitus	
U12	400
U23	390
U31	420
I1	0
I2	0
I3	3,2
P1	0
P2	0
P3	770