

**KESTOMAGNEETTI-
GENERAATTORIN KUORMITUS
VAIHTOLEVALLA TEHOLLA JA
NOPEUDELLA**

Antti Hiltunen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2013
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

ANTTI HILTUNEN:

Kestomagneettigeneraattorin kuormitus vaihtelevalla teholla ja nopeudella

Opinnäytetyö 57 sivua, joista liitteitä 2 sivua
Toukokuu 2013

Työn tarkoituksena on tutkia kestopagneettigeneraattorin tehon tuottoa vaihtelevalla nopeudella ja erilaisella kuormituksella.

Kestomagneettigeneraattori muuttaa akselia pyörittävän liike-energian sähköiseksi energiaksi. Roottorin magnetointi tapahtuu kestopagneettien avulla.

Kestomagneettikoneen etu on suuri vääntömomentti alhaisilla nopeuksilla, mikä tarkoittaa generaattorikäytössä hyvää tehontuottoa. Vääntömomentti määrää moottorikäytössä koon ja hinnan.

Generaattori voidaan kytkeä suoraan ilman vaihdetta esimerkiksi tuulimyllyyn, joka hyödyntää jo hitaan pyörimisnopeuden.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Electrical Engineering
Electric Power Engineering

ANTTI HILTUNEN:
Permanent Magnet Generator with Variable Load and Speed

Bachelor's thesis 57 pages, appendices 2 pages
May 2013

The purpose of this thesis is to investigate power production of permanent magnet synchronous generator with variable speed and load.

A permanent magnet generator converts axial rotation kinetic energy into electrical energy. The rotor excitation is caused by permanent magnets. When the magnets rotate around conducting wires, it creates electricity.

The advantage of permanent magnet machine is that, it has a high torque at low speeds, which means a good output power of generator use. The amount of torque determines the size and price of motor.

The PM-generator can be connected directly without transmission to a windmill, which makes energy efficiently at slow speeds.

Key words: permanent magnet generator, PMSG

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	TAVOITTEET	9
2.1	Tutkittavana olevat asiat.....	9
2.2	Erilaiset kuormitustyytit	9
2.2.1	Resistiivinen kuorma	9
2.2.2	Tasasuuntaus	9
2.2.3	Kopensointikapasitanssi.....	10
2.2.4	Induktiivinen kuorma.....	11
2.2.5	Tajuusmuuttaja ohjattu aktiivinen kuorma.....	11
3	KESTOMAGNEETTITAHTIKONE.....	12
3.1	Historia	12
3.1.1	Kestomagneettimateriaalit.....	12
3.2	Kestomagneettitahtikonetyypit	14
3.2.1	Aksiaalivuo rakenne	14
3.2.2	Toimintaperiaate.....	15
3.2.3	Sisäiset arvot.....	16
3.2.4	Radiaalivuo.....	17
4	MITTAUKSET JA MITTAUKSIIN LIITTYVÄ TEORIA.....	19
4.1	Laitteisto	19
4.1.1	Kestomagneettigeneraattori.....	19
4.1.2	Servomoottori.....	22
4.1.3	Vaihde	22
4.2	Mittaukset	23
4.2.1	Staattorikämmiresistanssi	23
4.2.2	Tyhjäkäyntimittaus	24
4.2.3	Kuormitus resistiivisellä kuormalla	27
4.2.4	Kuormitus induktiivisellä kuormalla	33
4.2.5	Kuormitus kapasitiivisellä kuormalla	43
4.2.6	Tasasuunnattu kuormitus	47
5	POHDINTA	53
	LÄHTEET	55
	LIITTEET.....	57
	Liite 1. Tutkittavan kestopagneettigeneraattorin valmistajan ilmoittamat suoritearvot passiivisellä kuormituksella (AXCO Motors).....	57
	Liite 2. Tutkittavan kestopagneettigeneraattorin valmistajan ilmoittamat suoritearvot aktiivisellä kuormituksella (AXCO Motors).....	58

LYHENTEET JA TERMIT

Lyhenteet

$\cos\varphi$	Tehokerroin
NdFeB	Neodyymi-rauta-boori
PMSG	Kestomagneettitahtigeneraattori
THD	Harmoninen kokonaissärö

Roomalaiset kirjaimet

C	kapasitanssi
E	lähdejännite
f	taajuus
I	vaihevirta
L	induktanssi
p	napapariluku
R	resistanssi
T	jakson aika
U	jännite
X	reaktanssi
Z	impedanssi

Kreikkalaiset kirjaimet

η	hyötysuhde
φ	vaihekulma
ω	kulmanopeus
ψ	magneettivuo

Alaindeksit

d	d-akseli
kok	kokonaissumma kaikista vaiheista
n	nimellinen

max	maksimi
pu	yksikkösuhde (per unit)
pm	kestomagneetti (permanent magnet)
q	q-akseli
v, ph	vaihe (phase)

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehtiin Tampereen ammattikorkeakoululle. Työssä tutkittiin kestopagneettigeneraattoria ja sen käyttömahdollisuuksia. Mittaukset suoritettiin koulun sähkölaboratoriossa.

Kestomagneettitahtikoneen periaate on keksitty jo ennen oikosulku- eli induktiokonetta. Kestomagneettikoneiden ongelmana on ollut riittävän voimakkaiden ja magnetisminsa säilyttävien magneettien heikko saatavuus, mikä on hidastanut kehitystä. Harvinaiset maametallit kuten NdFeb ovat erittäin arvokkaita valmistaa. Suuritehoisia kestopagneettitahtikoneita on ollut mahdollista valmistaa 1970-luvulta lähtien. /1/

Kestomagneettitahtikoneen suurimpiin etuihin, verrattuna esimerkiksi epätahtikoneeseen, voidaan lukea korkea vääntömomentti ja tehotehous sekä hyvä hyötysuhde. Kestomagneettitahtikoneella on lineaarinen nopeusmomenttikäyrä alhaisilla nopeuksilla aina nimellisuopeuteen asti. Perinteiset generaattorit tarvitsevat tyypillisesti 1800 kierrosta minuutissa tuottaakseen tehoa kun taas kestopagneettigeneraattorin nimellisuopeus voi olla kuudesosan tästä (~100 - 750 rpm).

Generaattori koostuu staattorista ja roottorista, jotka muuttavat liike-energian sähköksi. Generaattorityypistä riippuu millä magnetointi tapahtuu, ja muodostuuko syöttövirta staattorilla vai roottorilla. Tutkittavan olevassa generaattorissa roottorina on kestopagneetti, jonka ympärillä on staattori. Staattori on rautalevyistä koostuva uritettu levypakka. Levyrakenteeseen estää pyörrevirtoja ja niistä johtuvia energiahäviöitä muodostumasta. Staattorin uriin kierrettyihin silmukoituhiin käämeihin indusoituu sähkövirta pyöritettäessä magneettista roottoria staattorin sisällä. /7/

Liikkuvassa magneettikentässä olevaan käämiin indusoituu jännite. Induktiojännite syntyy aina, kun magneettikenttä muuttuu käämin ympärillä. Seurauksena on jaksollisesti muuttuva vaihtojännite. Suljetussa virtapiirissä jännite aiheuttaa vaihtovirran. Rakenteeltaan generaattori muistuttaa sähkömoottoria ainoastaan sähkötehon suunta on eri.

Nykyään vaihtovirta kestopagneettigeneraattorit ovat enemmän käytettyjä kuin tasavirtageneraattorit. Vaihtovirtakestopagneettigeneraattoreilla on korkeampi vääntömomentti-

tipaino ja tehopainosuhde. Tehoelektronikan kehittyessä vaihtosähkökoneet ovat suurimmalta osalta syrjäyttäneet tasasähkökoneet.

Kestomagneettitahtikoneet ovat tutkimuksen ja kehitystyönkohteena muun muassa tuulienergian, vesivoiman että ajoneuvojen generaattorityypiksi.



KUVIO 1. Tuulivoimakestomagneettigeneraattori (AXCO-Motors)

2 TAVOITTEET

2.1 Tutkittavana olevat asiat

Kestomagneettigeneraattoria tutkittiin pyörittämällä generaattorin akselia vaihtelevalla nopeudella servomoottorin avulla. Generaattorin syöttämän 3-vaiheisen virtapiiriin kuormitusta vaihdeltiin kytkemällä resistiivisen kuorman lisäksi induktiivista ja kapasitiivista kuormaa, jolloin saatiin muokattua generaattorin syöttämää tehoa. Kuormitus pidettiin kuitenkin symmetrisenä kaikissa kolmessa vaiheessa. Eri kuormitustilanteista saatiin verrattavissa olevat tehokuvaajat. Lisäksi tasasuuntausta tutkittiin 6-pulssisella diodisillalla. Tässä tutkittava oli diodisillan hyötysuhde ja mahdolliset verkkovaikutukset.

2.2 Erilaiset kuormitustyypit

2.2.1 Resisttiivinen kuorma

Resistiivinen kuormitus on pelkkää vastuskuormaa, jolloin tehokerroin $\cos\phi \approx 1$. Vastuskuormitus ei aiheuta virran ja jännitteen välille vaihe-eroa. Pieni osuus loistehoa syntyy kestoplaneettigeneraattorin sisäisistä induktansseista. Suhteessa pätötehon määrään osuus on niin pieni, että näennäisteho voidaan laskea pätötehon ($S = P$).

2.2.2 Tasasuuntaus

Tasasuuntaus suoritettiin 6-vaiheisella diodisillalla, mikä on yleisin kolmivaiheisen sähkön tasasuuntausmuoto. Generaattorin staattorijännite määrää tasajännitteen eikä sen suuruutta pystytä säätämään, kuten tyristorisillassa. Diodisillassa kommutoituminen eli virran siirtyminen diodilta toiselle tapahtuu generaattorin jännitteen pakottamana. Diodisilta aiheuttaa säröä ja harmonisia yliaaltoja generaattorin syöttämään vaihtosähköön. Sykkivän tasasähkön suuruuteen vaikuttaa puolijohdekomponenttien määrä, mistä määräytyy pulssiluku. Esimerkiksi 12-pulssisella sillalla ja tarvittavalla muuntajakytkennällä tasasähkö saataisiin tasaisemmaksi, mutta kustannussyistä ja yksinkertaisemmasta rakenteesta johtuen käytetään yleensä kuitenkin 6-pulssista siltaa.

2.2.3 Kopensointikapasitanssi

Magnetointia voidaan kasvattaa kuorman rinnalle kytkettävällä kondensaattorilla, jolloin kompensoidaan staattori-induktanssia. Tällä tavalla saadaan lisää pätötehoa tuotettua, koska generaattorin lähdejännite ja virta kasvaa. Vaarana on mahdollinen ylikompensointi, mikä voi demagnetoida kestopagneetit. Kestomagneettigeneraattorin sisäinen induktanssi ja rinnalle kytketty kapasitanssi muodostavat sarjaresonanssipiirin, jolloin tietyllä värähtelytaajuudella reaktanssit kumoavat toisensa.

$$f_R = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (1)$$

Jossa f_R on resonanssitaajuus [Hz]

L on käämin vaiheinduktanssi [H]

C on kondensaattorin vaihekapasitanssi [F]

”Resonanssitaajuuden tulee olla suurempi kuin generaattorikäytön suurin normaalissa käyttötilanteessa esiintyvä taajuus, jotta kytkentä ei muutu kapasitiiviseksi ja ala demagnetoimaan konetta.” /3/

Kaavalla 1 voidaan laskea, millä kapasitanssiarvolla generaattorin sisäinen induktanssi resonoivat keskenään esimerkiksi 25 Hz:n taajuudella eli 300 rpm:n akselin kierrosnopeudella. Sisäisenä induktanssiarvona käytettiin valmistajan ilmoittamaa arvoa.

$$C = \frac{\left(\frac{1}{2\pi \cdot f_R}\right)^2}{L_s} \quad (1)$$

$$C = \frac{\left(\frac{1}{2\pi \cdot 25 \text{ Hz}}\right)^2}{0,12 \text{ H}} = 338 \text{ } \mu\text{F}$$

Tällä tavalla laskettu 338 μF kapasitanssiarvo vaihetta kohti aiheuttaisi 25 Hz:n taajuudella mahdollisesti voimakkaan kestopagneetteja demagnetoivan kapasitiivisen staattorivirran.

2.2.4 Induktiivinen kuorma

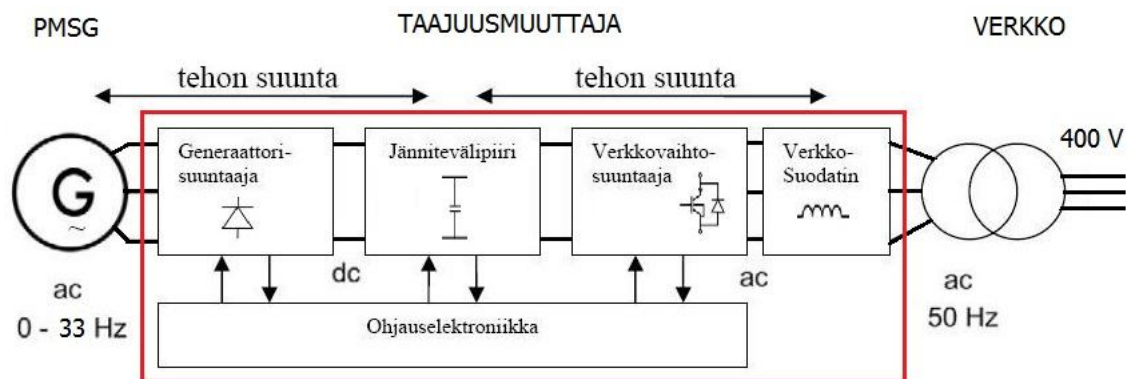
Kuorman rinnalle ja sarjaan kytkettiin induktansseja. Ongelmaksi muodostui induktanssien virtakestoisuus. Tarkoitus oli muuttaa kuormituksen tehokerrointa $\cos\varphi = 0,8 \dots 1,0$ jokaisella kierrosnopeusportaalla, mikä vastaa tyypillistä induktiivista kuormaa. Alhainen taajuus ja suuret virrat vaikeuttivat kuormitustestejä niin että pienillä kierrosnopeuksilla tehokerrointa ei saatu tavoitelukemiin.

2.2.5 Taajuusmuuttaja ohjattu aktiivinen kuorma

Tutkittavaa kestopagneettigeneraattoria ei saa kytkeä suoraan verkkoon.

Taajuusmuuttajan tehtävä on moduloida generaattorin nimellisjännitettä vastaava taajuus verkkotaajuutta vastaavaksi. Tämä mahdollistaa muuttuva tehoisen käytön.

Osalla taajuusmuuttajista voidaan myös ohjata millä tahansa nopeudella pyörivästä generaattorista tuleva teho kiinteätaajuiseen syöttöverkkoon. Generaattorin taajuus vaihtelee välillä 0 - 33 Hz. Tuotettu teho ohjataan kokonaisuudessaan muuttajan välityksellä verkkoon. Loistehon määrä ja turbiinin pyörintänopeus ovat vapaasti ohjattavissa. Muuttaja mitoitetaan koko laitoksen tehotuoton mukaan. Sähköverkkoon liityttäessä sähkön laatua koskevat määräykset löytyvät standardista SFS-EN 50160.

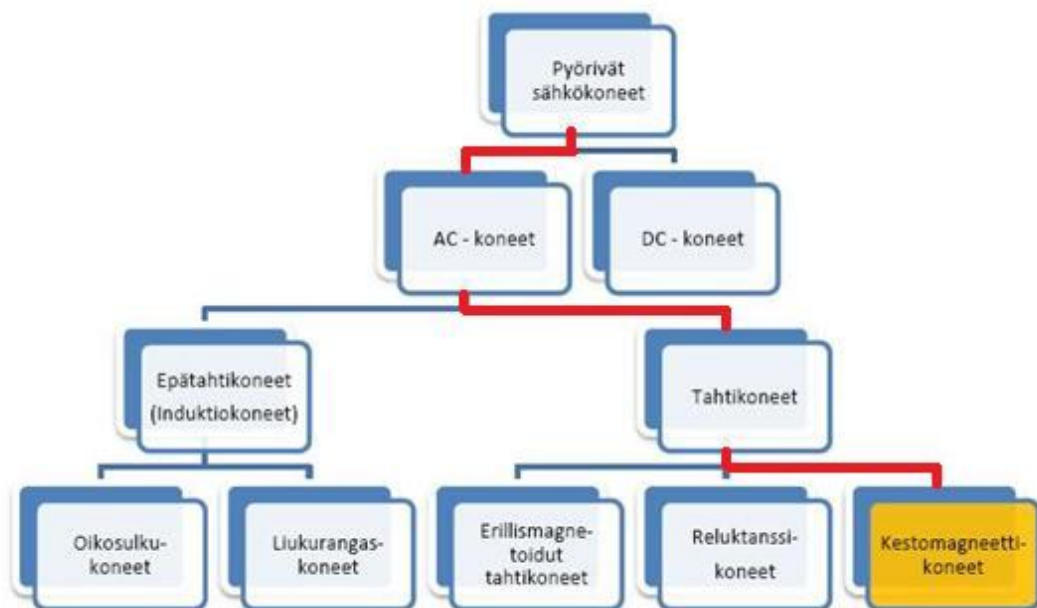


KUVIO 2. Generaattori kytkettynä jakeluverkkoon taajuusmuuttajalla (Andrey 2008)

3 KESTOMAGNEETTITAHTIKONE

3.1 Historia

Ensimmäiset kestopagneettimagnetointikoneet keksittiin 1830-luvulla. Ongelmana oli huonolaatuiset magneettimateriaalit /4/. Viimeisen 40 vuoden aikana kestopagneettimateriaalit ovat kehittyneet huomattavasti ja erityisesti kestopagneettitahtikoneet yleistyneet eri sovelluskohteissa. Kuviossa 3 on esitetty tässä työssä tarkastelun kohteena olevan vaihtosähkökestopagneettitahtikoneen lokerointi.



KUVIO 3. Pyörivien sähkökoneiden jaottelu (Puranen 2007)

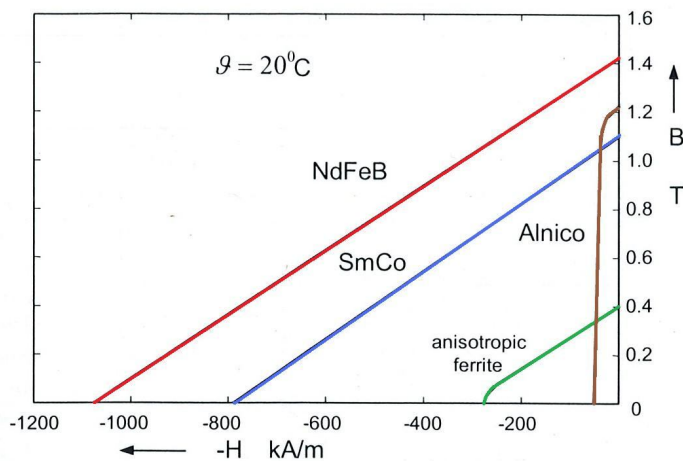
3.1.1 Kestomagneettimateriaalit

Kestomagneetteina käytetään harvinaisia maamateriaaleja, kuten samarium-koboltti (SmCo) ja neodyymi-rauta-boori (NdFeB). Nykyään käytetään eniten NdFeB:a sen parempien magneettisten ominaisuuksien ja korkean energiatulon vuoksi. Neo-magneetit keksittiin 1980-luvulla. Neo-magneetit sisältävät tyypillisesti enimmäkseen rautaa (65 %) ja neodyymiä (33%) sekä hieman yli 1 % booria sekä pieniä määriä alumiinia tai niobia.

Neo-magneetit ovat herkkiä lämpötilan vaikutuksille, sillä koersiivivoima putoaa lämpötilan kohotessa. Käyttämällä harvinaisia maametalleja magneettien seosaineena voidaan käyttölämpötilaa nostaa. Esimerkiksi NdFeB-kestopagneetin sisäinen maksimi-

lämpötila voi olla 200 °C ja Curie-piste, jossa ferromagneettinen aine muuttuu paramagneetiksi, on 300 °C. Demagnetoimiskäyrät, erityisesti koersiivinen voima, ovat voimakkaasti lämpötilariippuvaisia. NdFeB on myös altis korroosiolle. NdFeB-kestomagneettien kehittyessä on parantunut huomattavasti hintalaaatusuhde magneettivuontiheyden ja lämpökestoisuuden kasvaessa. Korkea energiatulon magneettimateriaaleja käytettäessä saadaan luonnollisesti pienennettyä sekä kestomagneettitahtimoottorin kokoa, että painoa. Suurella remanenssilla eli magneettisella voimakkuudella saadaan suuri ilmavälivuontiheys, millä on parantava vaikutus moottorin suorituskykyyn ja vääntömomenttiin. NdFeB-magneettien remanenssivuontiheys on suurinpiirtein 1,4 Teslaa. ”Vuontiheydeltään 1,4 T magneetin tulee olla pinta-alaltaan noin 10 cm² tuottaakseen niin suuren voiman (~ 780 N), että se pystyy kannattelemaan miehen painoista teräsmassaa.” /30/ Magneettimateriaalit valitaan kestomagneettitahtikoneisiin pitkälti koneen haluttujen ominaisuuksien ja taloudellisista seikkojen mukaan. Kestomagneettikoneen magneetit kestävät tavallisesti yli 20 vuotta käyttöä ilman, että niitä tarvitsee vaihtaa. /2/, /4/

Kuviossa 4 on eri kestomagneettimateriaalien demagnetoitumista kuvaavat permeabiliteettikäyrät, jossa y-akselilla on magneettivuontiheys B (T = Wb/m²) ja x-akselilla magneettikentän voimakkuus H (A/m).



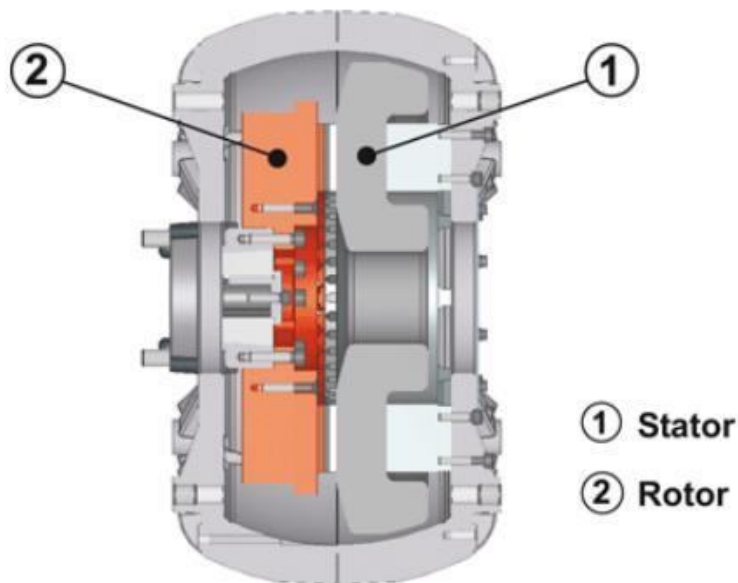
KUVIO 4. Kestomagneettimateriaalien demagnetoimiskäyrät (J.F Gieras)

3.2 Kestomagneettitahtikonetyypit

Yleisimmät kestmagneettitahtikonetyypit ovat aksiaalivuo- ja radiaalivuokoneet.

3.2.1 Aksiaalivuo rakenne

Aksiaalivuokestomagneetikone voidaan rakentaa kapeiksi kiekkoiksi peräkkäin magneettivuon suuntaiseksi. Aksiaalinen voima aiheutuu ilmavälissä vaikuttavasta magneettisesta vetovoimasta, joka pyrkii vetämään rautarakennetta puoleensa. Aksiaalivoima on siis sitä suurempi mitä suurempi on koneen ilmavälin pinta-ala ja yleensä moninkertainen varsinaiseen vääntömomenttia tuottavaan voimaan nähden. Koneen rakenne voi olla tehtynä useasta staattori-roottoriyhdistelmästä, jolloin koneen pituutta kasvattamalla saadaan tuotettua eri suorituskyvyn koneita. Kuviossa 5 on aksiaalivuokoneen epäsymmetrinen yksi staattori ja yksi roottori -rakenne. /21/



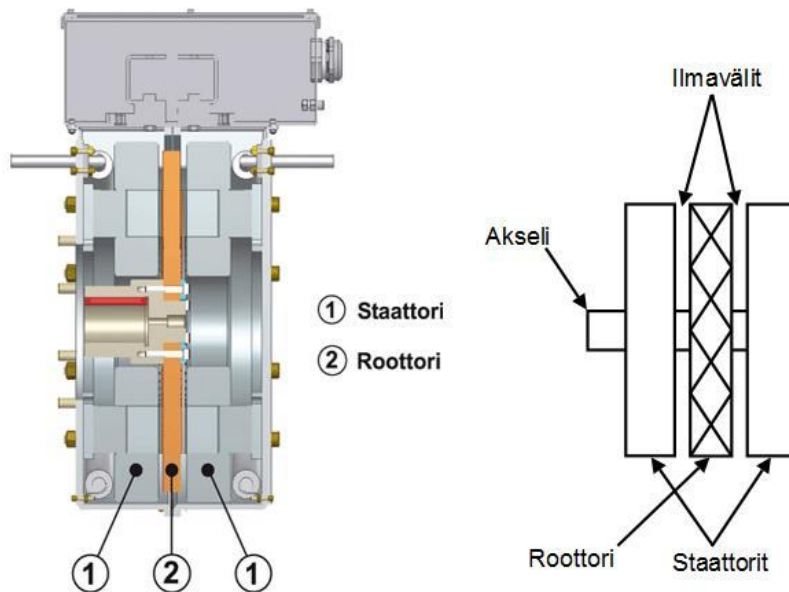
One stator one rotor AXCO-Motors construction.

KUVIO 5. Aksiaalivuokestomagneettigeneraattorin halkileikkauskuva (AXCO-Motors)

Kuvion 5 yksipuoleinen rakenne on edullisin ja sopii käyttökohteisiin, joissa on alhainen alle 100 Nm nimellinen momentti. Tämän tyylisten epäsymmetristen tapausten ongelmana voidaan pitää magneettista aksiaalivoimaa, jonka syystä akselille tarvitaan riittävä aksiaalilaakerointi. Rakenteen ollessa symmetrinen, ja ilmaväli riittävän tarkasti yhtä suuri, kumoavat magneettiset aksiaalivoimat toisensa. /21/

Kaksipuoleisessa rakenteessa etuja ovat korkea tehotiheys ja aksiaalisten voimien kompensointi. Vastaavasti generaattorikäytössä tarvittava vääntömomentti on kaksinkertainen. Alhaisen vääntömomentin käyttökohteissa kahdella ilmvälillä on koneeseen heikentäviä ominaisuuksia verrattuna yksipuoleiseen rakenteeseen. /21/

”Roottoridynamikan kannalta lyhyt aksiaalinen pituus ja roottorin kevyt rakenne muodostavat järjestelmän, jonka resonanssitaajuudet ovat toiminta-alueen yläpuolella, jopa suurilla pyörimisnopeuksilla.” /21/



KUVIO 6. Kaksipuoleinen aksiaalivuokone (AXCO-Motors, V. Haverinen)

3.2.2 Toimintaperiaate

Tyypillisesti sähkömoottoreissa on paikallaan pysyvän staattorin sisällä laakereiden varassa pyörivä roottori. Yleisesti sähkökoneiden kiertokenttästaattorit valmistetaan levyistä, jotka ladotaan staattoripakaksi.

Kestomagneettitahtikoneen staattori koostuu dynamolevystä rakennetuista levypaketista, joka on kiinnitetty teräsrunkoon. Eri tavalla seostetut ja valssatut teräkset eli dynamolevyt ovat tavallisimpia sähkökoneissa käytettyjä magneettimateriaaleja. Staattorin levypaketissa on urat kolmivaiheista staattorikäimitystä varten. Ferromagneettisella dynamolevyllä on suuri permeabiliteetti ja pieni reluktanssi eli magneettinen vastus. Pienellä magnetomotorisella voimalla saadaan tällaiseen pienireluktanssiseen materiaaliin suuri magneettivuontiheys. Permeabiliteetti eli magneettinen käyttäytyminen on kuitenkin riippuvainen magneettivuon tiheyden suuruudesta. Suurin osa kestomagneettitahtikoneen häviöistä syntyy staattorissa, mistä lämpö voidaan johtaa helposti pois. Toi-

saalta kestopagneettitahtikoneen itsensä kehittämä jäähdytys ei välttämättä ole riittävä jatkuvassa käytössä, koska pyörimisnopeus on alhainen 300...600 rpm. Tällöin voidaan liittää koneeseen ulkoinen jäähdytyspuhallin.

Kestomagneettikone toimii korkealla tehokertoimella. Kestomagneettien avulla saadaan staattorin monta napaparia kompaktiin tilaan, mikä pienentää staattorikäätymisen kuparihäviöitä vyyhdin päiden ollessa lyhyemmät. Kestomagneettigeneraattori toimii perinteistä paremmalla momentilla, mikä johtaa korkeaan tehomäärän pienilläkin kierroksilla. Ilmaväliahkaisijaa on mahdollista kasvattaa napojen määrästä johtuen, sillä staattorin selkä tarvitsee vähemmän tilaa.

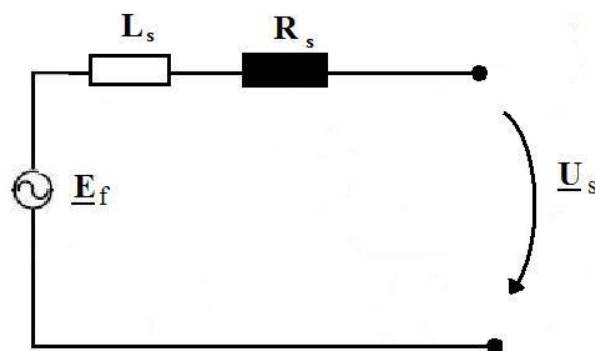
Moninapaisen kestopagneettigeneraattorin fyysinen koko ei ole suoraan verrattavissa moninapaiseen erillismagnetoituun generaattorin tai oikosulkukoneeseen, koska kestopagneettitekniikan ansiosta navat saadaan pienempään tilaan. Samalla ulkohalkaisijalla varustettu kestopagneettimoottorin tuottama vääntömomentti on suurempi johtuen sen suuremmasta ilmaväliahkaisijasta.

/2/, /13/, /14/

Roottorin rakenne vaikuttaa paljon kestopagneettikoneen ominaisuuksiin. Rakenteita luokitellaan muun muassa sen mukaan, mistä suunnassa magneettivuo vaikuttaa suhteessa akselilinjaan ja kuinka kestopagneetit on kiinnitetty roottoriin. Yleisin ja halvin ratkaisu on asentaa kestopagneetit roottorin pinnalle.

3.2.3 Sisäiset arvot

Yksinkertaisimmillaan tahtikoneen rakenne voidaan esittää yksivaiheisella sijaiskytkennällä roottorirakenteen ollessa symmetrinen. Kolmivaiheessa koneessa samainen kytkentä toistuu joka vaiheella. Indusoituva jännite E_f määräytyy kulmapyörimisnopeuden ja vuon suuruuden tulona. /2/



KUVIO 7. Kestomagneettigeneraattorin 1-vaiheinen sijaiskytkentä

Kestomagneetikone on magneettisesti epäsymmetrinen. Koneen toimintaa vektori- ja d-q-koordinaatistossa, jossa d-suunta vastaa pitkittäisakselia ja q-suunta poikittaisakselia

Kestomagneetikoneen sisäiset muuttujat:

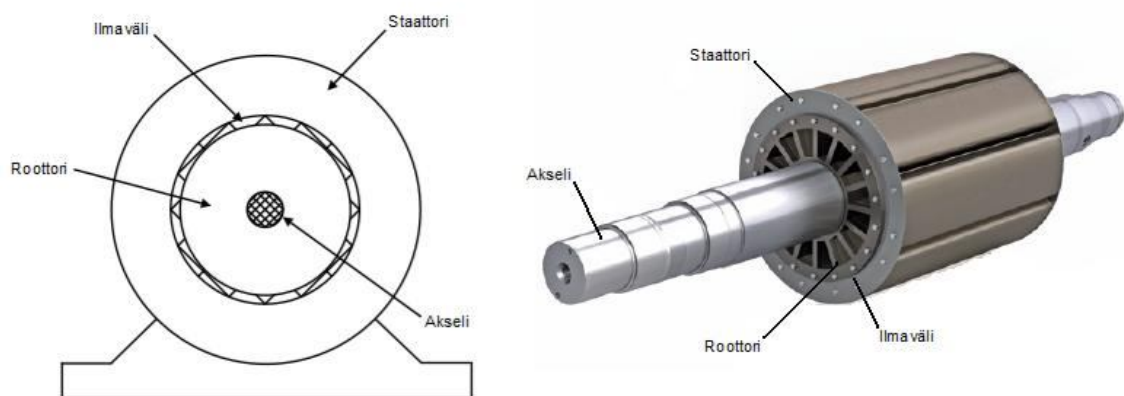
Staattoriresistanssi (R_s)

Tahti-induktanssit: Pitkittäisakseli (L_d) & Poikittaisakseli (L_q)

Kestomagneettivuo (ψ_{pm})

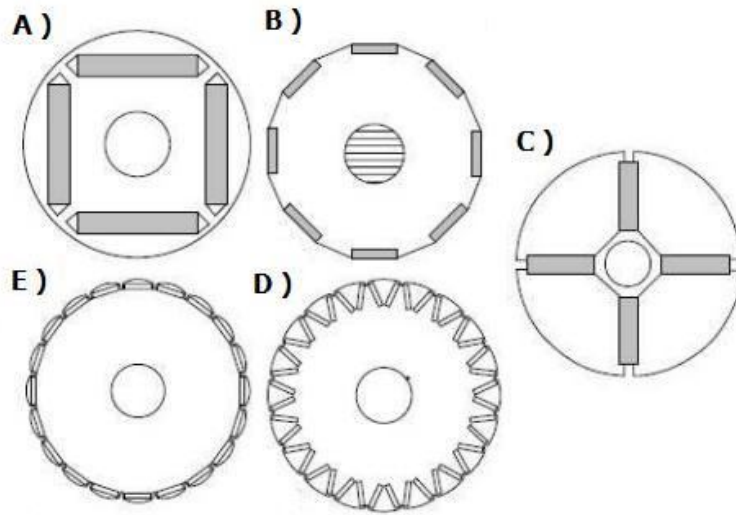
3.2.4 Radiaalivuo

Kestomagneetit voidaan sijoittaa roottorin pinnalle tai upottaa usealla eri tavalla roottorin sisälle. Molemmilla tavoilla on hyvät ja huonot puolensa. Roottorin ollessa epäsymmetrinen tuottaa kone myös ns. reluktanssimomenttia. Roottori voidaan rakentaa massiiviosista, levyrakenteisena tai kokonaan ilman rautaa. Roottorissa ei käytännössä synny kuparihäviöitä kuten epätahtikoneessa, koska magnetoimiseen ei tarvita virtaa eikä roottorissa ole häkkikämmityksen tyyppistä kuormitukseen verrannollista työvirtaa. Kuviossa 8 on radioalivuokoneen periaatteellinen staattorin ja roottorin päällekkäisyysrakennus.



KUVIO 8. Radiaalivuokoneen periaatekuva (V. Haverinen, ABB)

Kuviossa 9 on erilaisia kestomagneettien asennustapoja. Esimerkiksi ABB valmistamien kestomagneettitahtikoneiden roottorirakenteessa on asennettu magneetit roottoriin V-asentoon, siten, että kaksi magneettia magnetoit yhtä napaa (D-kuvio). Koneita valmistetaan nykyisin sekä 10- että 12-napaisena.



KUVIO 9. Kestomagneettien asennustapoja roottoriin

4 MITTAUKSET JA MITTAUKSIIN LIITTYVÄ TEORIA

4.1 Laitteisto

Mittauksissa käytettiin taajuusmuuttajaohjattua servomoottoria pyörittämään kestopagneettigeneraattoria. Välissä on vaihteisto, jotta pyörimisnopeus saadaan tarpeeksi alhaiseksi.

4.1.1 Kestomagneettigeneraattori

Tutkittava generaattori on AXCO Motorsin valmistama 3-vaiheinen aksiaalivuokestopagneettigeneraattori AF-PM-2-D malliltaan PMG 2.0-250-P passiivisen kuormituksen tapauksessa. Generaattorin maksimipyörimisnopeus on tyhjäkäynnillä 500 rpm ja kuormitettuna 300 rpm. Taulukossa 1 on lueteltu generaattorin nimelliset suoritusarvot.

TAULUKKO 1. Valmistajan ilmoittamat PMSG:n arvot passiivisella kuormituksella

P	2,0	kW	$\cos\phi = 1,0$
S	2,0	kVA	
T_n	76	Nm	
n_n	250	rpm	
n_{max}	300	rpm	$f_{max} = 25$ Hz
f	20,8	Hz	
p	5		
E_n	250	V	$E_v = 144,3$ V
U_{kmax}	155	V	$U_v = 89,5$ V
I_v	7,6	A	max 8,0 A

Jossa p on napapariluku

E_n on nimellinen tyhjäkäyntilähdejännite kahden vaiheen välillä [V]

E_v on nimellinen tyhjäkäyntilähdejännite vaihetta kohti [V]

U_{kmax} on nimellinen pääjännite kuormitettuna täydellä teholla [V]

U_v on nimellinen vaihejännite kuormitettuna täydellä teholla [V]

Aktiivisen kuormituksen eli taajuusmuuttajaohjatussa tapauksessa generaattorista saadaan enempi tehoa irti vaihejännitteen ollessa maksimissa, jolloin mallityyppi on 3.0-

250-A. Maksimipyörimisnopeus on tällöin 400 rpm. Taulukossa 2 on vastaavasti lueteltu samat nimelliset suoritusarvot taajuusmuuttajaohjatun kuormituksen tapauksessa.

TAULUKKO 2. Valmistajan ilmoittamat PMSG:n arvot aktiivisella kuormituksella

P	3,0	kW	$\cos\phi = 0,968$
S	3,1	kVA	
T	115	Nm	
n_n	250	rpm	
n_{\max}	400	rpm	$f_{\max} = 33,3 \text{ Hz}$
f	20,8	Hz	
p	5		
E_n	250	V	$E_v = 144,3 \text{ V}$
$U_{k \max}$	250	V	$U_v = 144,3 \text{ V}$
I_v	7,2	A	max 8,0 A

Aksiaalivuogeneraattorin kestopagneetit ovat pinta-asennettuja roottorikielkoon ja ovat materiaaliltaan NdFeB-tyyppisiä. Staattorissa on kaksikerroksinen keskitetty käämitys. Generaattori täyttää standardin IEC 60034 mukaiset olennaiset vaatimukset. Valmistajan mukaan generaattorin vaihevirta tulee rajoittaa 8 A:iin.

Aktiivisen kuorman taulukkoarvoista voidaan laskea teoriassa induktiivisen ja kapasitiivisen reaktanssin käyttäytyminen taajuuden funktiona. Induktiivinen reaktanssi on laskettu valmistajan ilmoittamasta staattorikäämi-induktanssi arvosta (taulukko 6) ja kapasitiivinen reaktanssi taas tehokertoimen avulla alla olevilla kaavoilla.

$$\cos\phi = \frac{P}{S} = \frac{3 \text{ kW}}{3,1 \text{ kW}} = 0,968 \Rightarrow \phi = \cos^{-1}(0,968) = 14,6^\circ \quad (2)$$

$$\sin\phi = \frac{S}{Q} \Rightarrow Q = \sin(14,6^\circ) \cdot 3,1 \text{ kW} = 781 \text{ VAr} \quad (3)$$

Joissa P on 3-vaiheinen pätöteho [W]
 Q on 3-vaiheinen loisteho [VAr]
 S on 3-vaiheinen näennäisteho [VA]
 ϕ on vaihekulma [°]

$$Q = \sqrt{3} \cdot \frac{U^2}{X_C} \cdot \sin \varphi \Rightarrow X_C = \frac{\sqrt{3} \cdot (250 \text{ V})^2 \cdot \sin(14,6^\circ)}{781 \text{ VAR}} = 34,9 \text{ } \Omega \quad (4)$$

$$C = \frac{1}{X_C \cdot 2\pi \cdot f_{\max}} = \frac{1}{34,9 \text{ } \Omega \cdot 2\pi \cdot 33,3 \text{ Hz}} = 136,9 \text{ } \mu\text{F} \quad (5)$$

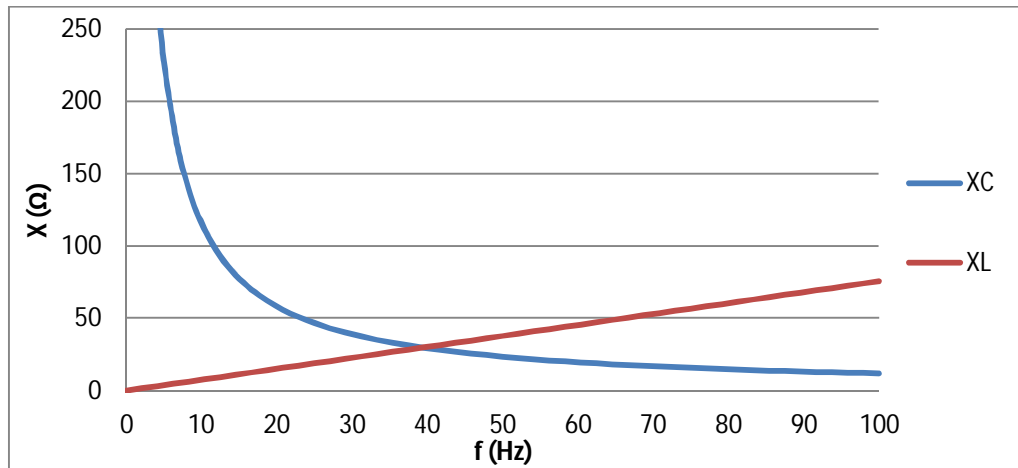
Joissa Q on 3-vaiheinen loisteho [VAR]
 U on pääjännite [V]
 φ on vaihekulma [°]
 X_C on kapasitiivinen vaihereaktanssi [Ω]
 C on kondensaattorin vaihekapasitanssi [F]
 f_{\max} on maksimitaajuus [Hz]

Taajuudesta riippuvaiset kapasitiivinen ja induktiivinen reaktanssi on esitetty graafisesti kuviossa 10. Kapasitiivinen reaktanssin kapasitanssiarvona on käytetty vaihekohtaista laskettua arvoa 137 μF ja induktiivisen reaktanssin induktanssiarvona on 0,12 H. Reaktanssit on laskettu kaavoilla 6 ja 7.

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \quad (6)$$

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L \quad (7)$$

Joissa X_C on kapasitiivinen vaihereaktanssi [Ω]
 C on kondensaattorin kapasitanssiarvo [F]
 X_L on induktiivinen vaihereaktanssi [Ω]
 L on kelan induktanssiarvo [H]
 f on taajuus [Hz]



KUVIO 10. Induktiivisen ja kapasitiivisen reaktanssin käyttäytyminen taajuuden funktiona

Näillä arvoilla taajuuden tarvitsisi olla noin 40 Hz, jotta sarjaan kytketty kapasitanssi ja generaattorin sisäinen induktanssi resonoisivat keskenään (Kuvio 10). Tällöin kestopaineet voisivat demagnetoitua, koska reaktanssit kumoavat toisensa ja virta olisi piirissä suurimmillaan.

4.1.2 Servomoottori

Servomoottori oli kytketty kuormituspulpettiin, josta saatiin kierrosnopeus säädettyä halutuksi. Kuormituspulpetin sisäinen taajuusmuuttaja oli rajoitettu 1800 rpm:n kierrosnopeuteen.

TAULUKKO 3. Servomoottorin tekniset arvot

T_n (Nm)	T_k (Nm)	n_n (rpm)	K_T (Nm/A _{RMS})
18	23,4	3000	2,0

4.1.3 Vaihde

Alennusvaihte muutti servomoottorin akselin kierrosnopeuden 6-osaan. Jolloin esimerkiksi 1800 rpm:n nopeus saatiin 300 rpm:si.

TAULUKKO 4. Vaihteen tekniset arvot

n_1 (rpm)	n_2 (rpm)	$n_1:n_2$	P_e (kW)	T_{2MAX} (Nm)
1400	233	6	4,0	156

4.2 Mittaukset

4.2.1 Staattorikäämiresistanssi

Staattorikäämiresistanssi määritettiin kylmälle ja kuumalle koneelle. Kuuman koneen resistanssimittaus tehtiin usean tunnin kuormitusmittauksien jälkeen.

Yleismittarilla resistanssi mitattiin jokaisen vaiheen väliltä, jolloin saadaan keskiarvo kahden staattorikäämin yli oleva vastuksesta.

TAULUKKO 5. Staattorikäämin resistanssimittauksen tulokset

	T_0 (C)	R_{1-2} (Ω)	R_{2-3} (Ω)	R_{3-1} (Ω)	R_{ka} (Ω)	R_v (Ω)
Kylmä kone	21	3,8	3,8	3,6	3,7	1,87
Kuuma kone	21	5,0	4,9	4,5	4,8	2,4

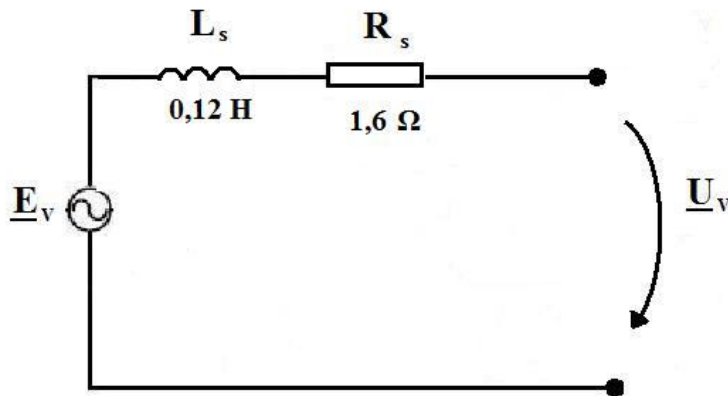
Kylmällä koneella staattorikäämiresistanssi on 1,9 Ω ja kuumalla koneella arvatunkin hieman suurempi 2,4 Ω . Lämmitessä koneen sisäiset häviöt kasvavat. Valmistajan ilmoittama vaiheresistanssi arvo 1,6 Ω on 17 % pienempi kuin kylmän koneen mitattu arvo. Vaikka prosentuaalisesti 0,3 Ω ero on suuri, se ei kuitenkaan aiheuta merkittäviä tehohäviöitä suhteellisen pienellä alle 8 A:n virralla.

TAULUKKO 6. Valmistajan ilmoittamat sisäiset arvot

X_d	15,7	Ω
X_q	15,7	Ω
L_d	0,12	H
L_q	0,12	H
R_v	1,6	Ω

Valmistajan ilmoittamien kestopagneettitahtikoneen parametrien avulla voidaan määrittää yksivaiheinen sijaiskytkentä. Parametrit edustavat koneen erilaisia magneettisia tiloja, joten arvot ovat lähinnä suuntaa antavia. Parametrit voidaan myös määrittää koneen käyttöönnoton yhteydessä taajuusmuuttajan identifiointiajolla. /2/

Alla olevassa kuviossa 11 on esitetty yksivaiheinen sijaiskytkentä valmistajan ilmoittamalla $R_s = 1,6 \Omega$ ja $L_s = 0,12 \text{ H}$ arvoilla.



KUVIO 11. Yksivaiheinen sijaiskytkentä generaattorin sisäisistä arvoista

4.2.2 Tyhjäkäyntimittaus

Kestomagnetoidun tahtikoneen indusoituva jännite E_f määräytyy kulmapyörimisnopeuden ja vuon suuruuden tulona. Toisin sanoen, mitä nopeammin roottori pyörii sitä korkeampi lähdejännite. /2/

$$E_f = \omega \psi \quad (8)$$

Jossa E_f on indusoituva lähdejännite [V]

ω on kulmapyörimisnopeus [rad/s]

ψ on magneettivuo [Wb]

Taulukossa 7 on esitetty kestopagneettigeneraattorin tyhjäkäyntijännitemittaukset, joista on laskettu magneettivuon suuruus.

TAULUKKO 7. Tyhjäkäyntimittauksen tulokset ja niistä lasketut arvot

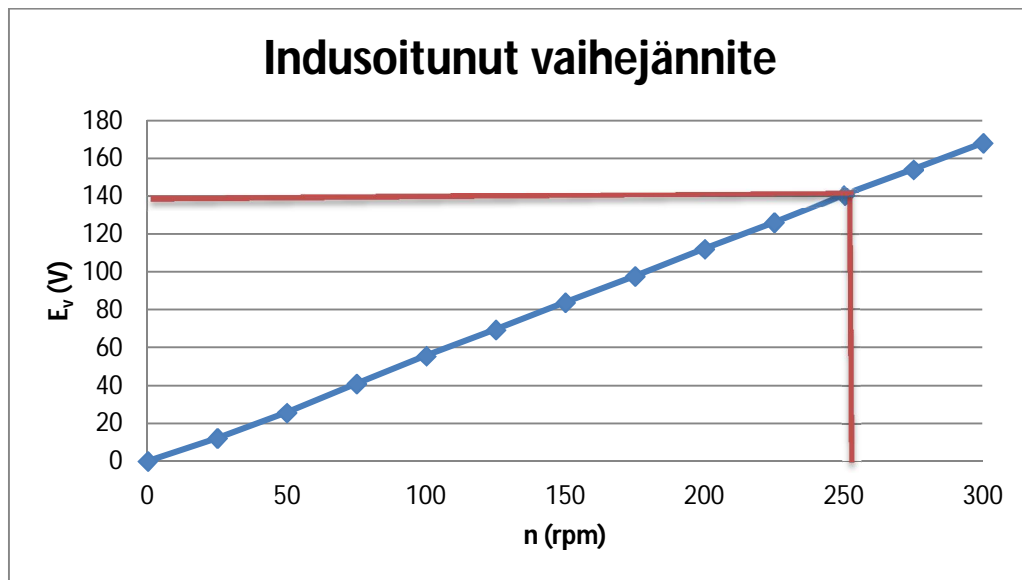
n (rpm)	f (Hz)	U ₁₋₂ (V)	U ₂₋₃ (V)	U ₃₋₁ (V)	U _{ka.} (V)	E _v (V)	\hat{E}_v (V)	ψ_{PM} (Wb)
0	0	0	0	0	0	0	0	...
25	2,1	23	15	25	21	12,1	17,1	1,31
50	4,2	39	43	51	44	25,6	36,2	1,38
75	6,3	72	68	73	71	41,0	58,0	1,48
100	8,3	97	94	98	96	55,6	78,7	1,50
125	10,4	122	118	121	120	69,5	98,3	1,50
150	12,5	146	143	147	145	83,9	118,7	1,51
175	14,6	170	167	171	169	97,8	138,3	1,51
200	16,7	195	192	196	194	112,2	158,7	1,52
225	18,8	219	217	220	219	126,2	178,5	1,52
250	20,8	244	241	246	244	140,7	199,0	1,52
275	22,9	268	264	269	267	154,2	218,0	1,51
300	25,0	292	289	293	291	168,2	237,9	1,51

Nimellisellä taajuudella kestopagneettivuon arvo lasketaan kaavaa 8 soveltaen. Käyttämällä valmistajan ilmoittamaa jännitearvoa saadaan kestopagneettivuon arvoksi 1,56 Wb.

$$\hat{E}_n = \omega_n \cdot \psi_{PM}$$

$$\psi_{PM} = \frac{\hat{E}_n}{2 \cdot \pi \cdot f_n} = \frac{\sqrt{2} \cdot \frac{250 \text{ V}}{\sqrt{3}}}{2 \cdot \pi \cdot 20,8 \text{ Hz}} = 1,56 \text{ Wb} \quad (8)$$

Valmistajan ilmoittamilla jännitearvolla (144,3 V) laskettu kestopagneettivuon arvo on suurempi koska indusoitunut vaihejännite on todellisuudessa hieman pienempi (140,7 V). Indusoitunut vaihejännite kasvaa lineaarisesti kierrosnopeuden funktiona (Kuvio 12).

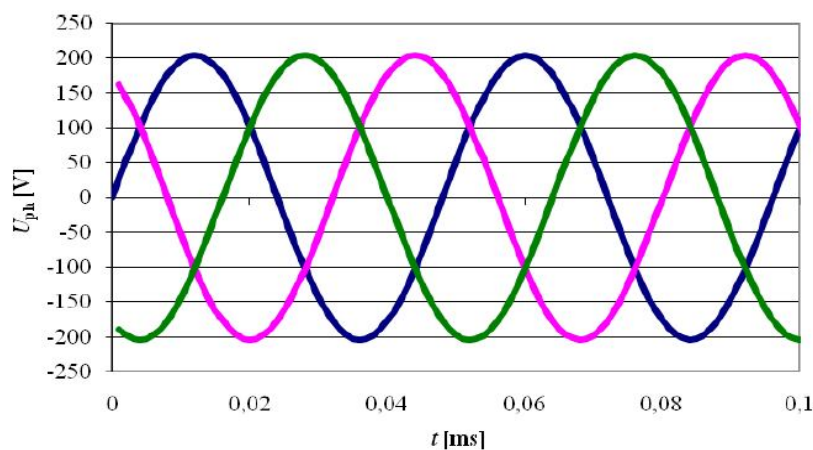


KUVIO 12. Indusoitunut tyhjäkäyntivaihejännite kierrosnopeuden funktiona $E_v = f(n)$

Indusoituneen vaihejännitteen kulmakerroin pyörimisnopeuden suhteen on kuvaajasta määritettynä 0,56. Tyhjäkäyntimaksiminopeudella eli 500 rpm:llä vaihejännite nousisi 280 V kulmakertoimen avulla laskettuna.

Nimellisellä taajuudella vaihejännitteiden huippuarvot (\hat{E}_n) ovat ± 200 V ilman kuormitusta. Jakson aika T on tällöin 48 ms.

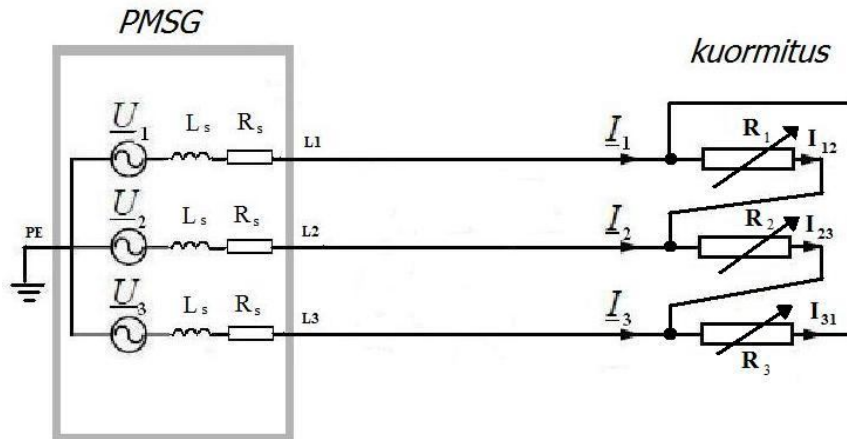
$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{20,8 \text{ Hz}} = 48 \text{ ms} \quad (9)$$



KUVIO 13. Tyhjäkäyntivaihejännitteet nimellisellä 250 rpm:n nopeudella (AXCO-Motors)

4.2.3 Kuormitus resistiivisellä kuormalla

Generaattorin perään kytkettiin 3-vaiheinen säädettävä kuormitusvastus. Vastus kytkettiin kolmioon virtakestoisuuden takia, koska kuormavastuksessa oli 5 A vaihesulakkeet. Alla olevassa kuviossa 14 on esitetty mittauskytkentä.



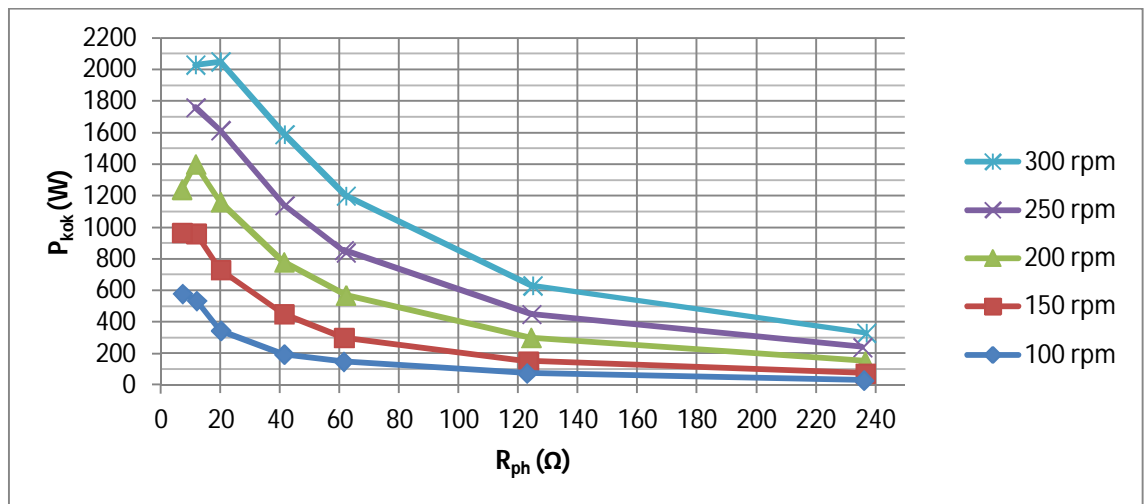
KUVIO 14. Resistiivinen kolmiokytkentä

Taulukossa 8 on esimerkki nimellisellä 250 rpm:n nopeudella eli 20,8 Hz taajuudella mitatuista arvoista. Tehoarvot mitattiin Fluke 43B ja 434 Power Quality Analyzer -mittareilla. Alhainen taajuus alemmilla kierrosnopeuksilla vaikeutti mittarien lukemista sillä lukemat vaihtelivat suhteellisen isolla skaalalla.

TAULUKKO 8. Mitatut suureet nimellisellä 250 rpm:n nopeudella.

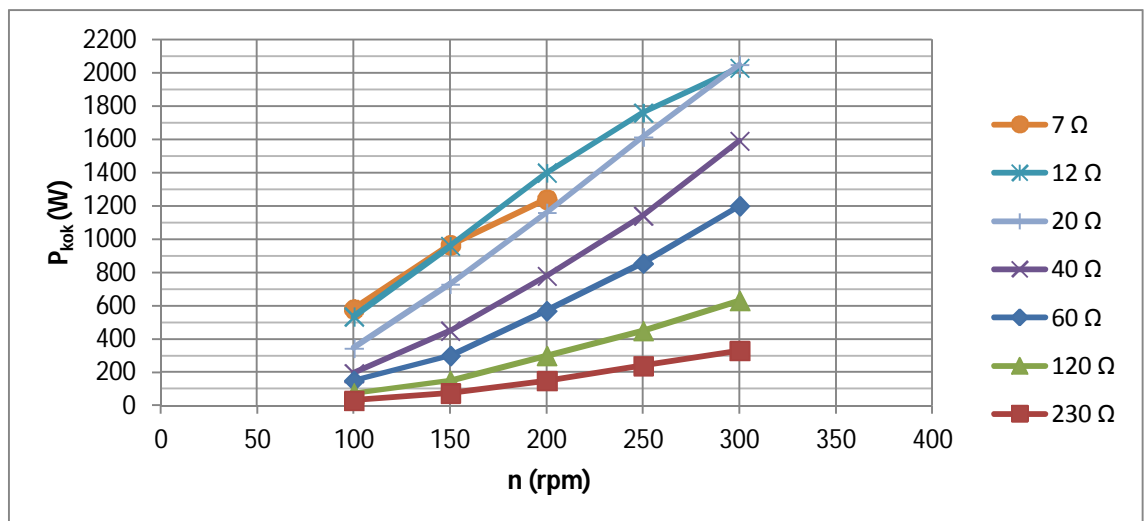
R_v (Ω)	U (V)	U_v (V)	I_v (A)	P_v (W)	P (W)	S (VA)	Q (Var)	$\cos\phi$
240	238	137,4	0,58	80	230	240	30	1,0
120	236,3	136,4	1,1	150	450	450	30	1,0
61	229,7	132,6	2,16	285	855	864	45	1,0
42	218,3	126,1	3,04	380	1140	1197	33	1,0
20	187,0	108,0	5,30	770	1710	1720	150	1,0
12	143	82,6	7,1	585	1755	1760	130	1,0

Kuviossa 15 on esitetty mitattu 3-vaiheinen kokonaispäteho vaiheresistanssin suhteen eri kierrosnopeuksilla. Tulosten mukaan 20 Ω vaiheresistanssilla saavutetaan 1600 W teho nimellisellä 250 rpm:n nopeudella ja vasta 300 rpm:n nopeudella päästään luvattuun 2 kW tehoon.



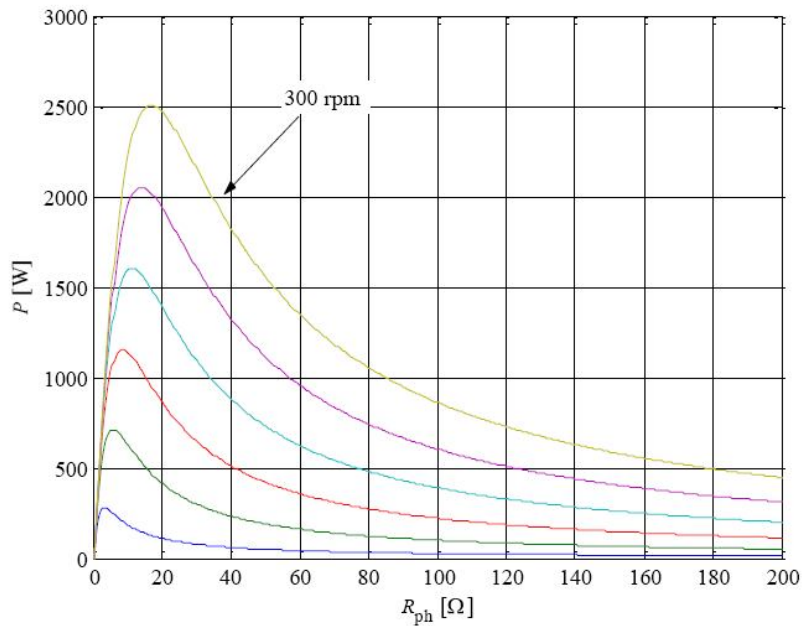
KUVIO 15. 3-vaiheinen kokonaispätehto vaiheresistanssin suhteen eri kierrosnopeuksilla

Kuviossa 16 on esitetty sama asia kuin Kuviossa Y, mutta hieman eri näkökannasta.



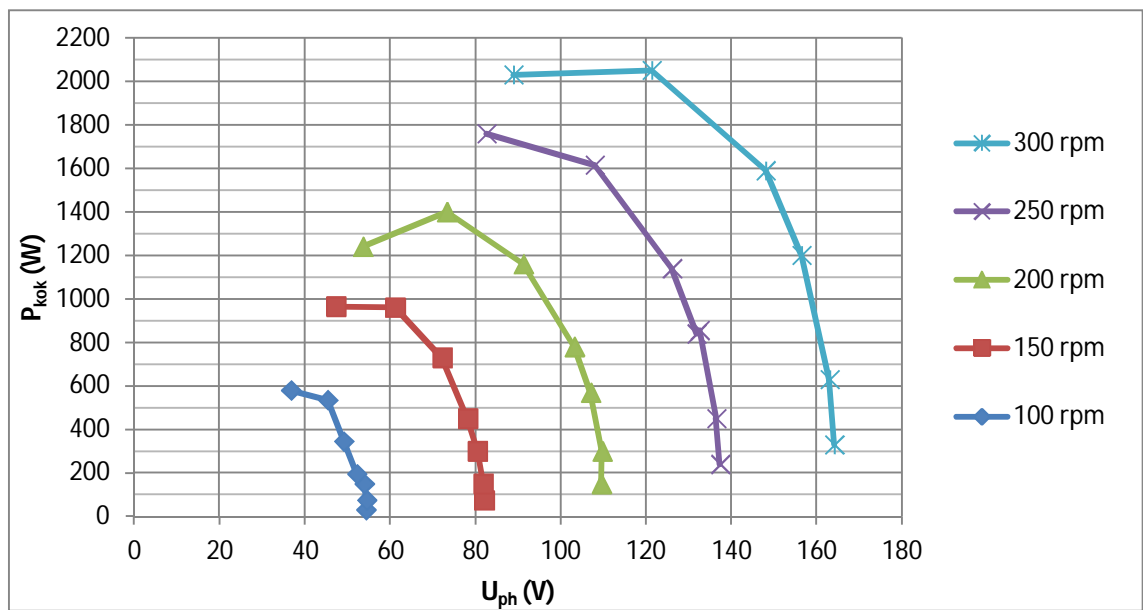
KUVIO 16. Tehot akselinopeuden suhteen $P = f(n)$

AXCO-Motorsin vastaava tehokäyrä lupaa hieman parempia tehoja. Esimerkiksi 300 rpm:n nopeudella ja 20 Ω vastuksella tehon pitäisi olla valmistajan kuvaajan mukaan jopa 2500 W. Valmistajan tehokäyrä on luultavasti simuloitu parametrien avulla, jolloin se ei täysin vastaa todellisia lukemia. Lisäksi on mahdollista, että tutkittava generaattorin kestopäätteen magnetointitehoaan ylikuormituksen seurauksesta. Joka tapauksessa pätehoarvot jäävät jopa 16 % ilmoitettua pienemmiksi.

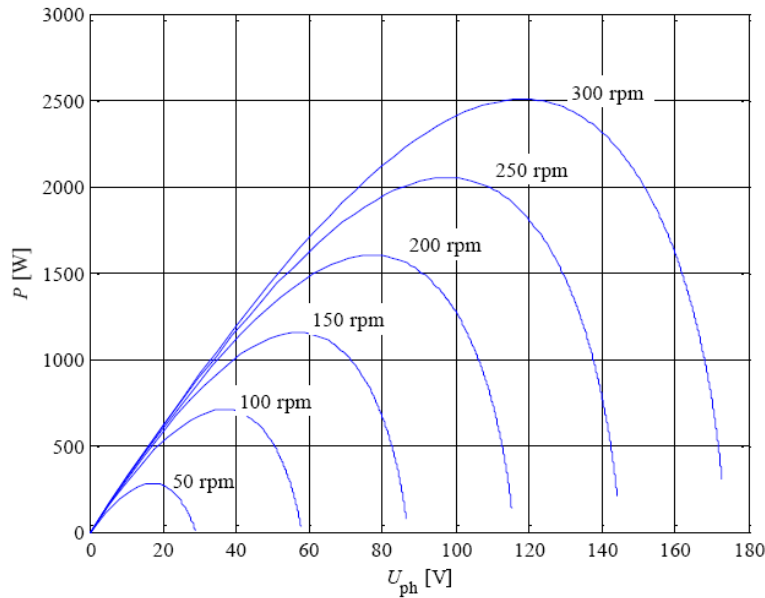


KUVIO 17. Valmistajan ilmoittama tehokäyrä vaihekuorman suhteen (AXCO-Motors)

Kuvioissa 18 ja 19 on esitetty tehot vaihejännitteen funktiona. Kuvioita vertaamalla mitatut vaihejännitteet jäävät noin 5 V ilmoitettuja pienemmiksi.

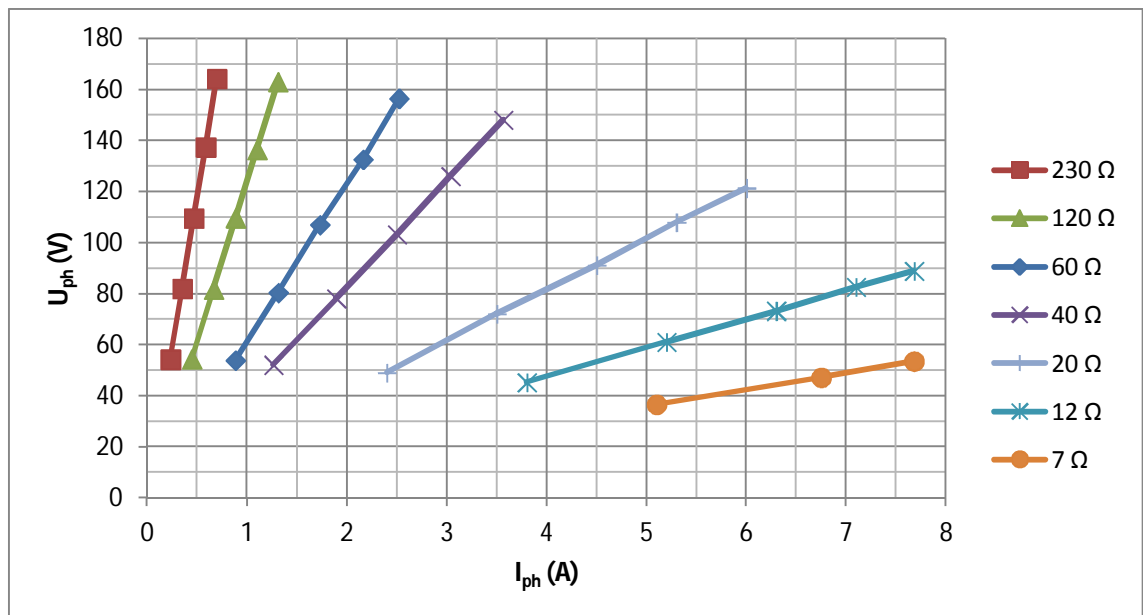


KUVIO 18. 3-vaiheinen teho vaihejännitteen funktiona



KUVIO 19. Teho vaihejännitteen suhteen (AXCO-Motors)

Kuviossa 20 näkee vaiheresistanssin suuruuden vaikutuksen jännitteen ja virran suuruuteen. Optimaalinen vaiheresistanssi on 20Ω paikkeilla. Pienemmällä vaiheresistanssilla virta kasvaa turhan lähelle maksimivirtaa (8 A). Teho ei kuitenkaan merkittävästi enää suurene, koska vaihejännite putoaa samassa suhteessa.



KUVIO 20. Vaiheresistanssin vaikutus jännitteeseen ja virtaan $U_{ph} = f(I_{ph})$

Generaattorin hyötysuhdetta oli vaikea määrittää, koska servomoottorista ei saanut pyörimisnopeuden lisäksi luotettavaa momenttiarvoa. Vaihtoehtoisesti ottotehon laskemiseen olisi tarvittu servomoottorin verkosta ottamaa virtaa ja jännitettä. Servomoottorin ja kestopäätösgeneraattorin välissä olevan alennusvaihteen hyötysuhdetta ei myös-

kään tiedetä, koska valmistajan tuoteluettelosta ei tätä tietoa löytynyt. Vaihde lämpeni useamman tunnin käytön jälkeen vain hieman, jolloin hyötysuhde on lähellä 100 %, esimerkiksi $\eta_{\text{vaihde}} = 0,96$. Tyypilliselle vinohammastusvaihteelle (helical) hyötysuhdevaihteluväli on 94 - 98 %, mikä tukee olettamusta. /26/, /27/

Kuviossa 21 on esitetty ohjauspulpetin ilmoittamasta momenttiarvosta laskettu hyötysuhde (Kaava 10).

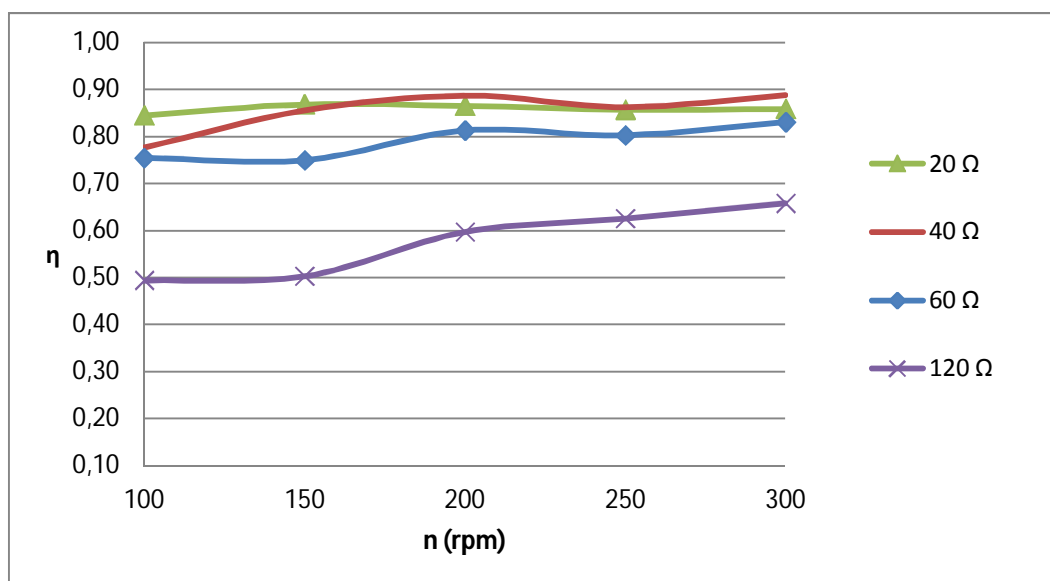
$$P = T \cdot 2\pi \cdot f \quad (10)$$

Jossa P on pätöteho [W]

T on vääntömomentti [Nm]

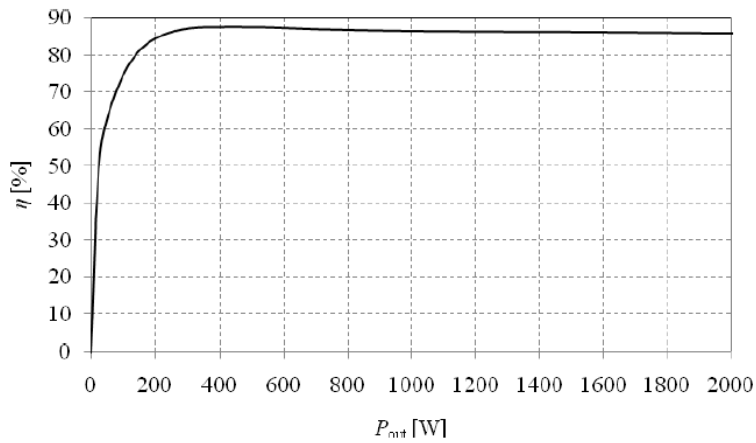
f on taajuus [Hz]

Optimikuormalla (20 Ω) hyötysuhteen likiarvo on kutakuinkin sama kuin kuviossa 22 eli 0,85. Suurella kuormalla (120 Ω) hyötysuhde romahtaa alimmillaan 0,5:teen. Tämä tarkoittaisi sitä, että puolet tehosta menisi hukkaan, mikä ei voi pitää paikkaansa jo pelkästään lämpenemisen takia. Alhaisella taajuudella momenttiarvolla vaihteli suurella skaalalla, jolloin virhemarginaali on suuri. Hyötysuhde on kuitenkin riippuvainen kuormituksesta. Pienellä vaiheresistanssilla 3-vaiheinen teho on suurimmillaan, jolloin häviötehot ovat prosentuaalisesti pienempiä verrattuna kokonaistehoon. Tästä syystä hyötysuhdearvo huonontuu vaiheresistanssin kasvaessa.



KUVIO 21. Hyötysuhdekuvaaja kierrosnopeuden funktiona eri kuormavastusarvoilla

Alla olevassa kuviossa 22 on esitetty valmistajan ilmoittama generaattorin hyötysuhdekuvaaja tehon funktiona nimellisellä nopeudella ja optimikuormalla. Kuvioista karkeasti arvioituna kestopagneettigeneraattorin hyötysuhde η_{PMSG} on 0,85 vaihevastuksen ollessa 20Ω .



KUVIO 22. Generaattorin hyötysuhde passiivisella kuormituksella, jossa on $n_n = 250$ rpm ja $R_v = 20 \Omega$ (AXCO-Motors)

4.2.4 Kuormitus induktiivisella kuormalla

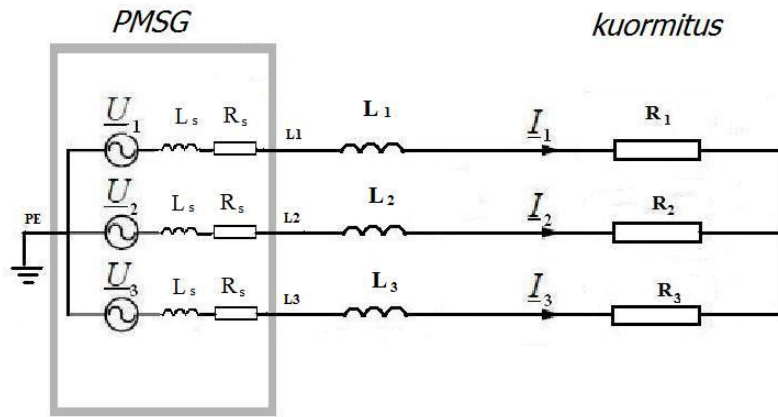
Tarkoitus oli yrittää saada jokaisella taajuusportaalla tehokerroin $\cos\phi$:iin arvo vaihtelevaan välillä 0,8...1,0 kuormitusta muuttamalla. Tehokerrointa laskemalla simuloitiin tyypillistä induktiivista kuormitus generaattorille. Tämä ei kuitenkaan oikein onnistunut alhaisen taajuuden ja suurien virtojen takia. Esimerkiksi kuormainduktanssien nimellinen virta oli suurimmillaan 2,88 A. Virta piti yrittää pitää alhaisena lisäämällä resistiivistä kuormaa, jolloin tehot jäivät alhaisiksi. Nimelliseen 2 kW pätötehon saavuttamiseen vaiheresistanssin suuruus pitäisi olla 20 Ω luokkaa, jolloin virta nousee jopa 7 A.

Kuorman rinnalle tai sarjaan kytkettävän kelan kilpiarvot on esitetty taulukossa 9. Taajuusriippuvaisen induktiivisen reaktanssin kilpiarvot on ilmoitettu 230 V verkkojännitteellä ja 50 Hz taajuudella. Taulukon alimmalle riville on redusoitu induktiivinen reaktanssi generaattorin nimelliselle taajuudelle 20,8 Hz.

TAULUKKO 9. Induktanssin kilpiarvot

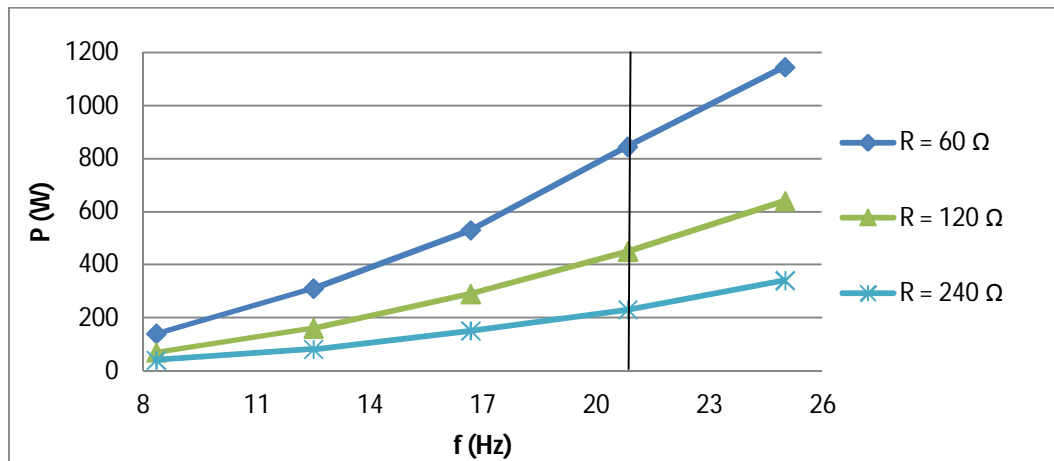
Q_{CN} (Var)	41	83	165	331	661
X_{LN} (Ω)	1280	640	320	160	80
I_N (A)	0,16	0,36	0,72	1,44	2,88
U (V)	230				
f (Hz)	50				
L (H)	4,1	2,0	1,0	0,5	0,3
X_{LN} (Ω)	532	266	133	67	33

Induktiivinen reaktanssivastus haettiin sopivaksi lisäämällä sarjaan ja rinnalle käämejä tai vastavoimana kondensaattori rinnalle. Suuremmalla kuormituksella oli mahdollista kytkeä kuorma tähteen. Kuviossa 23 on esitetty yksinkertaistettu kytkentäkuva kelan sarjakytkennästä.



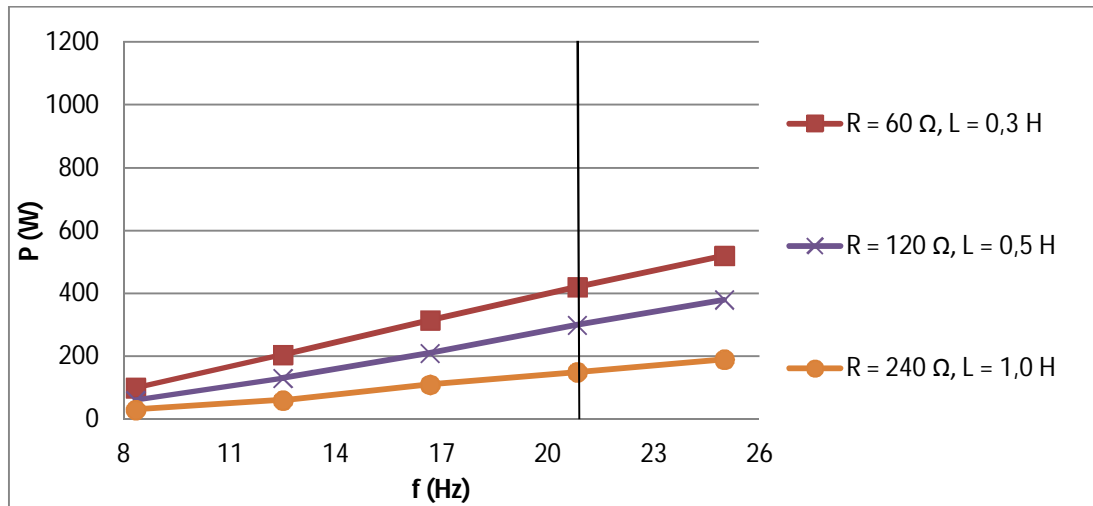
KUVIO 23. Induktiivinen kuorma sarjassa resistiivisen kuormituksen kanssa

Kuviossa 24 ja 25 on esitetty pätötehokäyrät taajuuden suhteen: Ensimmäinen on ilman kelakuormaa ja jälkimmäinen sen kanssa.



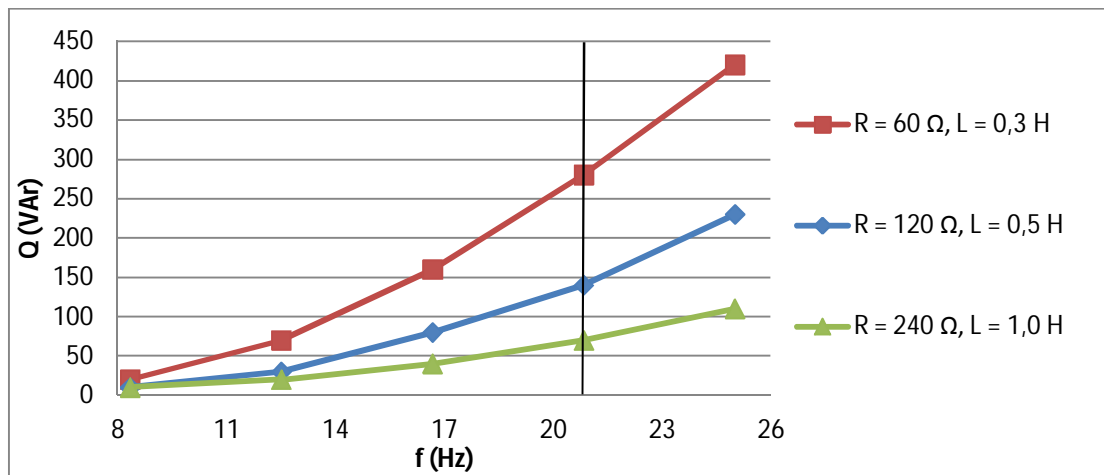
KUVIO 24. Pätötehot resistiivisellä vaihekuormituksella

Teho puolittuvat, kun sarjaa kytketään virtakestoisuudeltaan suurin mahdollinen kela.



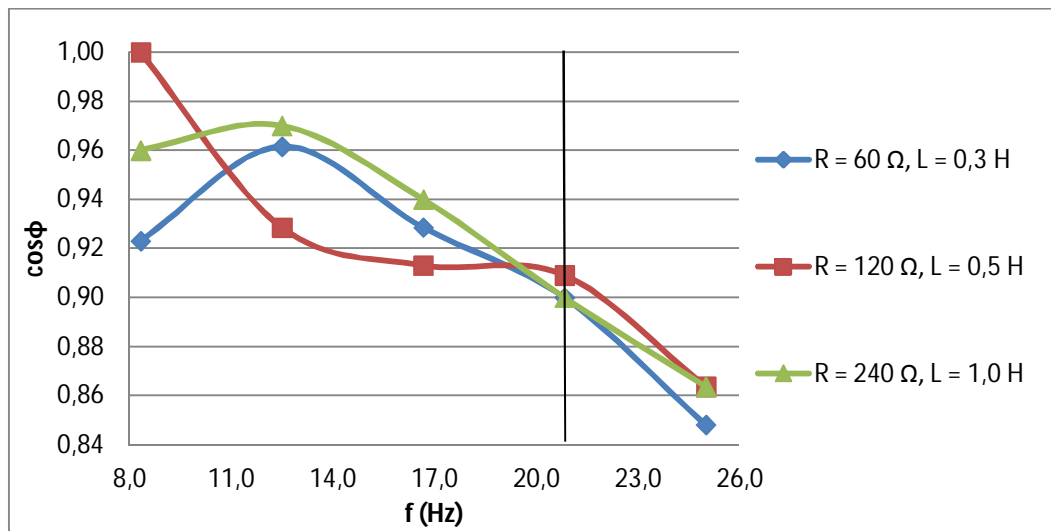
KUVIO 25. Pätötehot RL-sarjakytkennässä

Loisteho on suurimmillaan pienimmällä vaihevastuksella (60 Ω), koska myös pätöteho on suurimmillaan suuremman virran ansiosta (Kuvio 26).



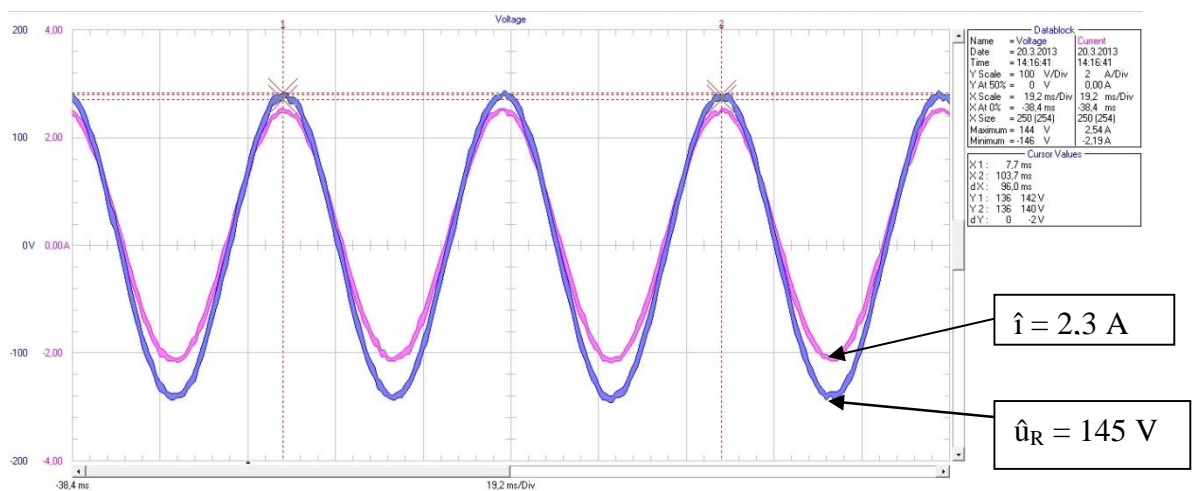
KUVIO 26. Loistehot RL-sarjakytkennässä

Jokaisessa tilanteessa on tuplattu vaihekohtainen kuormavastus ja sarjainduktanssi. Tehokertoimen eli $\cos\phi$ arvon pitäisi pysyä kutakuinkin samana. Kuormavastuksen ja sarjainduktanssin tuplaantuessa pätöteho ja loisteho puolittuvat. Tehokertoimen arvon pitäisi laskea lineaarisesti induktiivisen reaktanssin kasvaessa taajuuden funktiona. Kuvioon 27 on määritetty tehokerroin taajuuden funktiona.



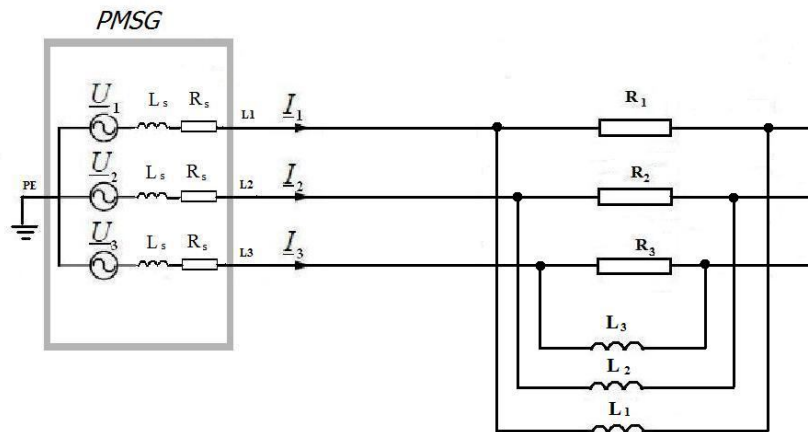
KUVIO 27. Tehokerroin RL-sarjakytkennässä

RL-sarjakytkennässä virta ja vaihejännite ovat samenvaiheiset, koska oskilloskooppikuvaaja on otettu vastuksen yli (Kuvio 28). Nimellistajuudella induktiivinen reaktanssi X_L on 33Ω . Kuvioon on merkitty virran ja jännitteen huippuarvot.



KUVIO 28. RL-sarjakytkentä arvoilla: $R = 60 \Omega$, $L = 0,3 \text{ H}$ ja $f = 20,8 \text{ Hz}$

KytKentä muutettiin rinnankytkennäksi kuvion 29 mukaiseksi ja tehtiin taulukon 10 mukainen mittaussarja.



KUVIO 29. Induktiivinen kuorma resistiivisen kuormituksen kanssa rinnalla

TAULUKKO 10. RL-rinnankytkentä

f (Hz)	R_v (Ω)	Z_v (Ω)	X_L (Ω)	L_v (H)	U (V)	U_v (V)	I_v (A)	P (W)	S (VA)	Q (Var)	$\cos\phi$	ϕ (deg)
8,3	235	235			93,8	54,2	0,23	30	40	10	0,95	18,2
8,3	235	100	27	0,51	90,2	52,1	0,52	70	80	40	0,88	29
12,5	235	235			142,5	82,3	0,35	80	80	20	1,00	0
12,5	235	129	40	0,51	136,4	78,8	0,61	120	140	70	0,86	31
16,7	235	234			190,4	109,9	0,47	140	150	20	0,93	21
16,7	235	153	53	0,51	182,5	105,4	0,69	180	210	110	0,86	31
20,8	235	232			237,3	137,0	0,59	230	230	30	1,00	0
20,8	235	168	67	0,51	227,5	131,3	0,78	260	290	140	0,90	26,3
25	235	235			284,7	164,4	0,7	330	330	30	1,00	0
25	235	182	80	0,51	273,6	158,0	0,87	360	390	170	0,92	22,6

Kuorman rinnalle lisätty induktanssi lisää pätötehon määrää, koska impedanssi on tällöin kytkennässä pienempi vaihetta kohti. Impedanssi Z on laskettu taulukossa 10 vaihejännitteestä ja -virrasta.

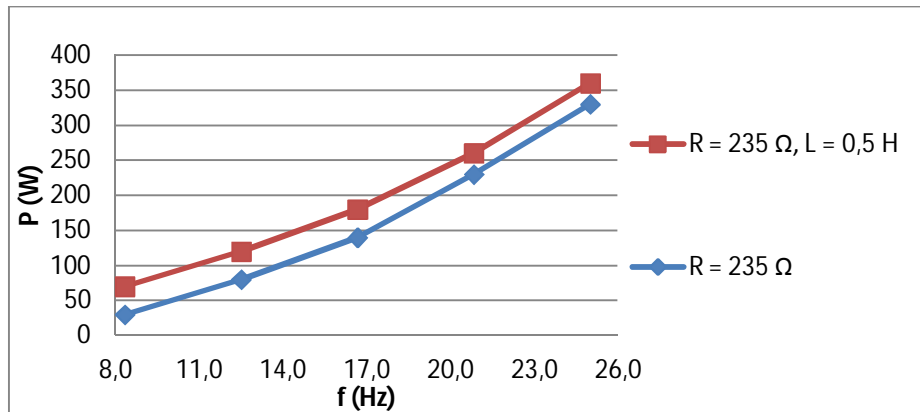
Teoriassa rinnankytkennän kokonaisimpedanssi lasketaan nimellistaajuudella alla olevan kaavan mukaisesti:

$$\underline{Z} = \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} \right)^{-1} = \left(\frac{1}{235 \Omega} + \frac{1}{j \cdot 2\pi \cdot 20,8 \text{ Hz} \cdot 0,51 \text{ H}} \right)^{-1} = 64 \angle -74^\circ \Omega \quad (11)$$

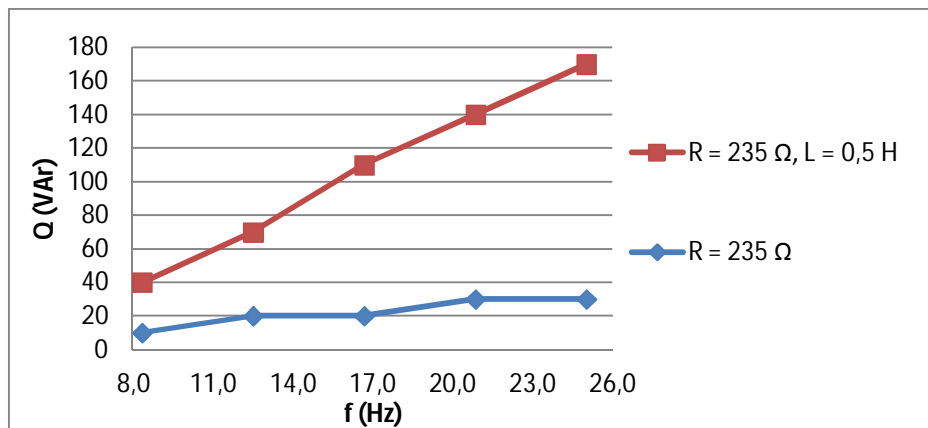
Tässä tapauksessa vaihevirran arvo:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1} = \frac{131,3 \angle 0^\circ \text{ V}}{64 \angle -74^\circ \Omega} = 2,0 \angle -74^\circ \quad (12)$$

Kuviossa 30 on pätöteho ja kuviossa 31 vastaavasti loisteho taajuuden suhteen. Kuvioi-
den kuormitukset ovat vaihekohtaisia arvoja.

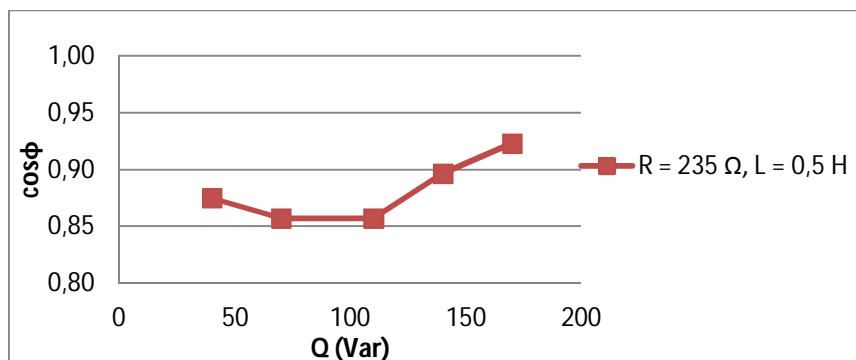


KUVIO 30. RL-rinnankytkennän 3-vaiheinen pätöteho



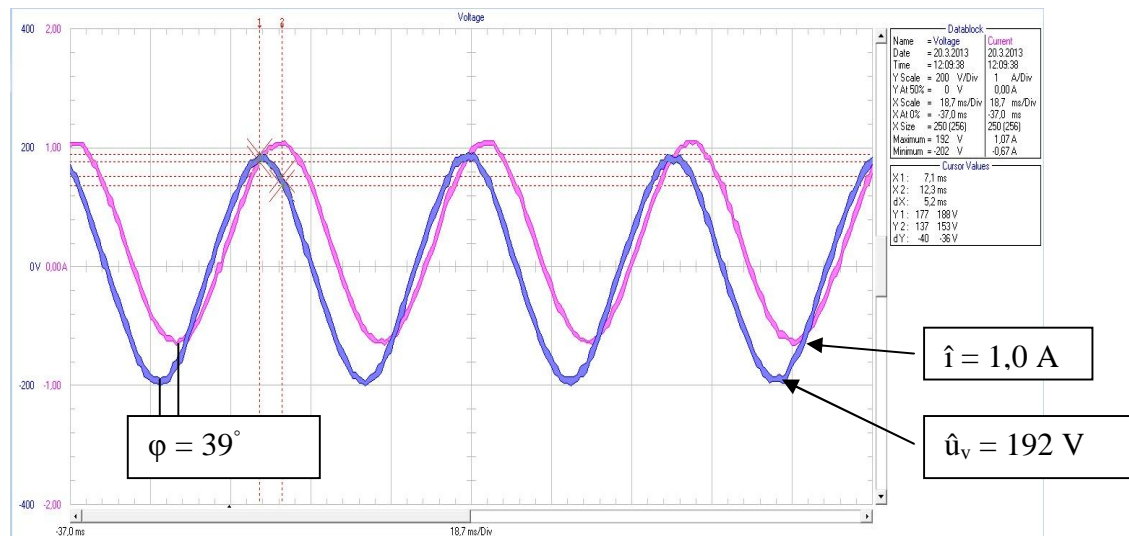
KUVIO 31. RL-rinnankytkennän 3-vaiheinen loisteho

Rinnankytkennän tehokerroin näyttää suurenevan taajuuden kasvaessa, mutta keskiarvo
voidaan arvioida olevan 0,88 (Kuvio 32).



KUVIO 32. Rinnankytkennän tehokerroin

Induktiivisessa kuormituksessa jännite (sininen) on virran (violetti) edellä. Vaihe-ero on 5,2 ms nimellisellä nopeudella (Kuvio 33). Kuvaajan virta on epäsymmetrinen x-akselin suhteen, koska negatiivisen puolijakson huippuarvo on hieman pienempi kuin positiivisen puolijakson.



KUVIO 33. Induktiivinen RL-rinnankytkentä, jossa $R_v = 235 \Omega$, $L_v = 0,5 \text{ H}$ ja $f = 20,8 \text{ Hz}$

Vaihe-ero φ asteina saadaan laskettua jakson ajasta.

$$T = \frac{1}{f_n} = \frac{1}{20,8 \text{ Hz}} = 48 \text{ ms} \quad (9)$$

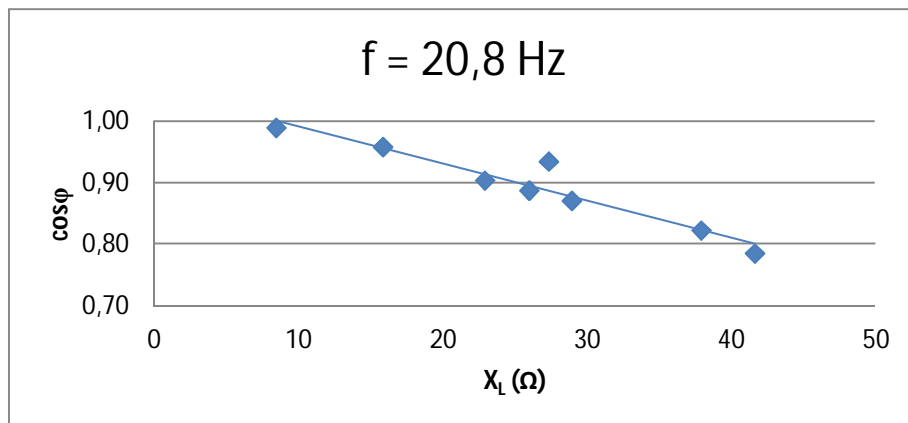
$$\varphi = \frac{(t_i - t_u)}{T} \cdot 360^\circ = \frac{5,2 \text{ ms}}{48 \text{ ms}} \cdot 360^\circ = 38,9^\circ \quad (13)$$

Alla oleva taulukossa 11 on pidetty taajuus nimellisenä ja vaihdeltu kuormitusta. Kuorma oli tässä tilanteessa kytketty kolmioon, jotta oli mahdollista käyttää säädettävää kuormaa. Tehokerrointa on muutettu lisäämällä induktanssia kytkemällä sarjaan ja rinnalle käämejä. Tehokerrointa on kompensoitu myös kytkemällä kondensaattoreita rinnalle. Tällöin saatiin mittaustuloksia tehokerroimen ($\cos\varphi$) ollessa väliltä $= 0,8 \dots 1,0$.

TAULUKKO 11. Kuormitusmittaukset induktiivisella kuormalla nimellisellä 20,8 Hz taajuudella.

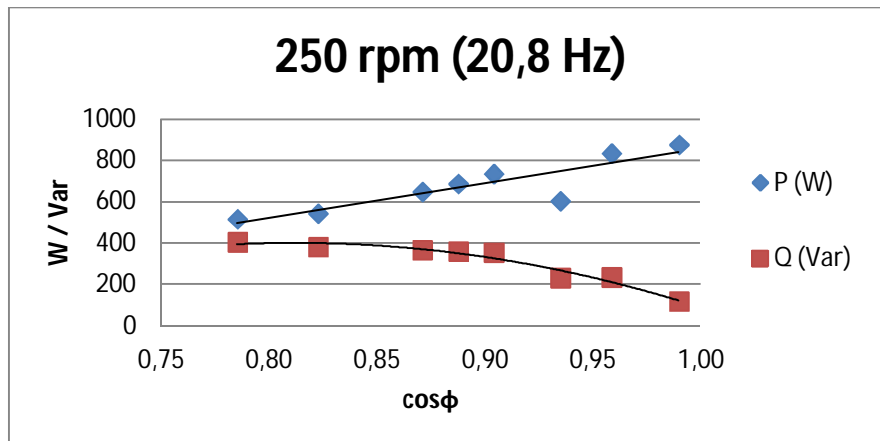
R_v (Ω)	Z_v (Ω)	X_L (Ω)	L (H)	U (V)	U_v (V)	I_v (A)	P_v (W)	P (W)	S (VA)	Q (Var)	$\cos\phi$	ϕ (deg)
55	67	38	0,29	209	121	1,8	181	543	660	381	0,82	34,6
53	67	42	0,32	207	120	1,8	172	516	657	405	0,79	38,2
48	54	23	0,18	206	119	2,2	245	735	813	354	0,90	25,3
51	59	29	0,22	207	120	2,0	216	648	744	366	0,87	29,4
50	56	26	0,20	207	120	2,1	229	687	774	360	0,89	27,4
59	59	8	0,06	225	130	2,2	292	876	885	117	0,99	8,2
53	56	16	0,12	217	125	2,3	278	834	870	234	0,96	16,5
72	77	27	0,21	220	127	1,7	201	603	645	231	0,93	20,8

Kuviossa 34 on induktiivisen reaktanssin suuruus tehokerroimen suhteen. Kaikki mittapisteet eivät ole lineaarisesti laskevalla suoralla. Mitatut tehokerroin-arvot ovat alttiita häiriöille, jolloin esimerkiksi vähänkin säröytynyt jännite ja virta vääristävät tehokerroimen lukemaa.



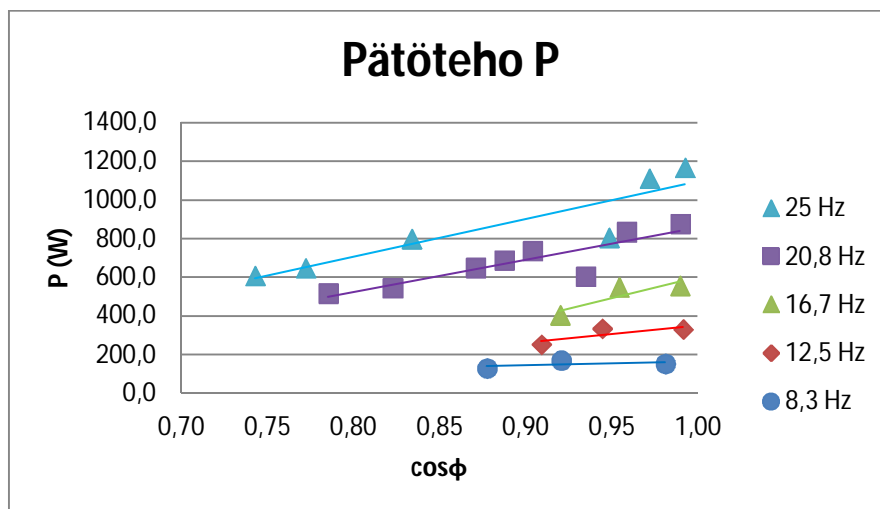
KUVIO 34. Tehokerroin induktiivisen vaihereaktanssin funktiona $\cos\phi = f(X_L)$

Kuviossa 35 on esitetty 3-vaiheinen pätö- ja loisteho tehokertoimen funktiona.

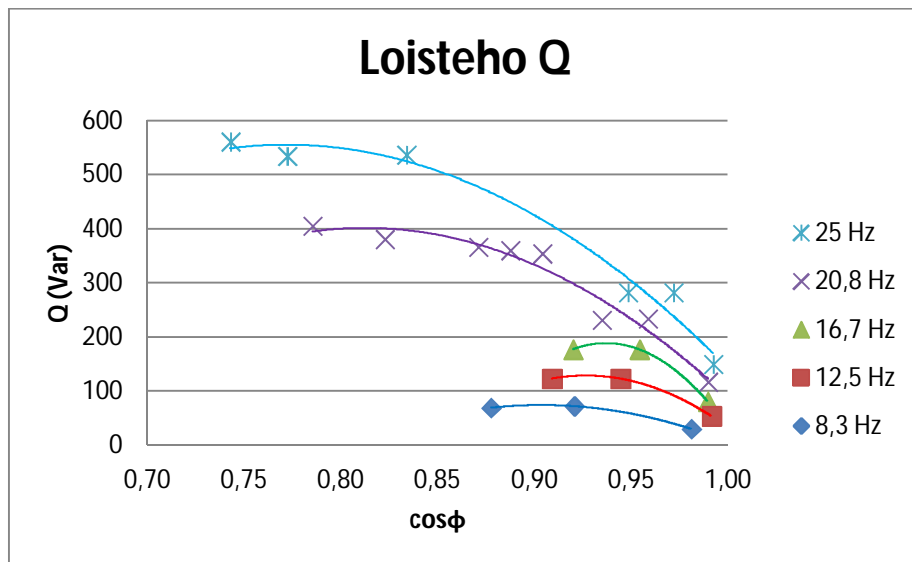


KUVIO 35. Tehokertoimen vaikutus pätötehon ja loistehon määrään

Kuviossa 36 ja 37 näkyy pätö- ja loistehokuvaajan asettuminen tehokertoimen funktiona eri taajuusportailta.



KUVIO 36. Yhteenlaskettu pätöteho vaihtelevalla taajuudella $P = f(\cos\phi)$

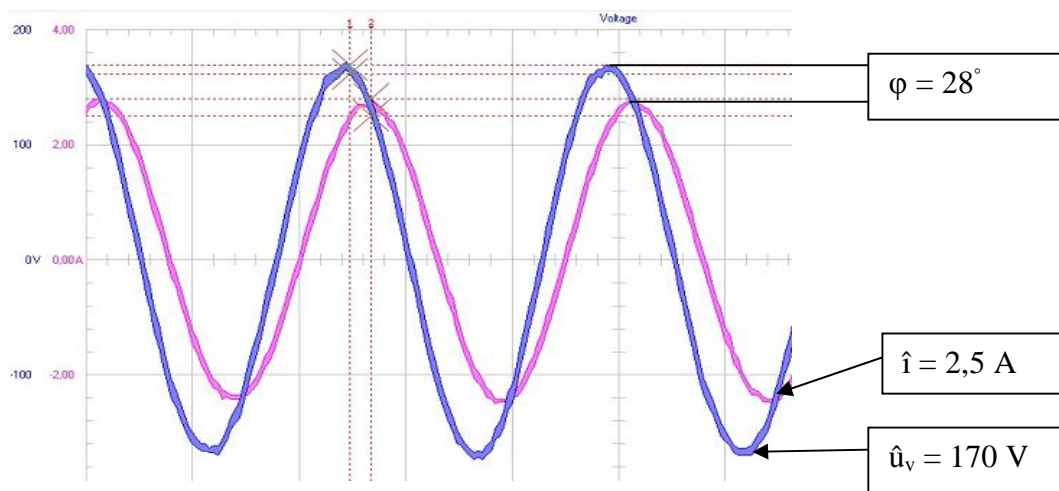


KUVIO 37. Yhteenlaskettu loisteho vaihtelevalla taajuudella $Q = f(\cos\phi)$

Alla olevassa induktiivisella kuormituksella jännite on virtaa edellä 3,8 ms (Kuvio 38).

Kuvaaja on otettu tilanteesta, jossa $f = 20,8 \text{ Hz}$, $R_v = 55 \Omega$, $L_v = 0,3 \text{ H}$ ja $\cos\phi = 0,82$.

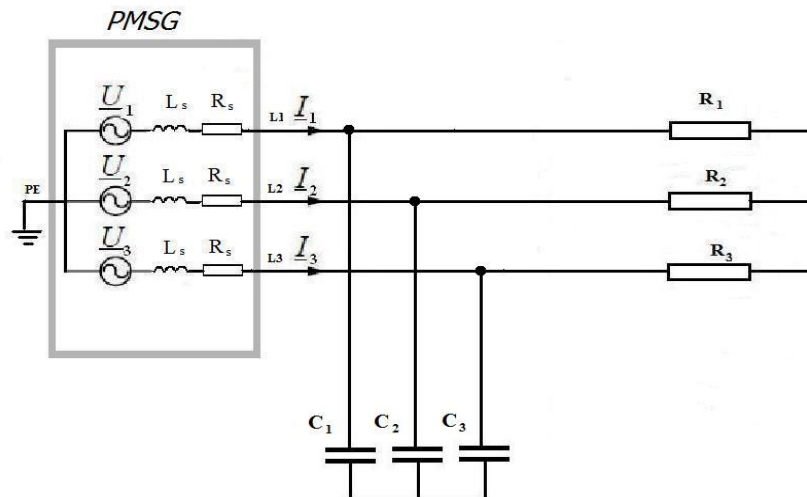
Vaihe-erosta laskettu tehokerroin on hieman suurempi 0,88.



KUVIO 38. Induktiivisella kuorman 1-vaiheinen virta- ja jännitekuvaaja

4.2.5 Kuormitus kapasitiivisellä kuormalla

Kestomagneettigeneraattorista saadaan lisää tehoa, jos kuorman rinnalle kytketään kondensaattori. Kondensaattori kompensoi generaattorin sisäistä induktanssia, jolloin saadaan nostettua vaihejännitettä ja vaihevirtaa.



KUVIO 39. Periaatteellinen kytkentäkuva, kun kuorman rinnalle on kytketty kondensaattoreita

Käytettävissä olevien kondensaattorien nimelliset kilpiarvot olivat ilmoitettu 50 Hz taajuudella, joten alla olevassa taulukossa alimmalla rivillä on kapasitiivinen reaktanssi redusoitu 20,8 Hz:n taajuudelle.

TAULUKKO 12. Kondensaattorien kilpiarvot

Q_{CN} (Var)	41	83	165	331	661
X_{CN} (Ω)	1280	640	320	160	80
I_N (A)	0,16	0,36	0,72	1,44	2,88
U (V)	230				
f (Hz)	50				
C (μ F)	2,5	5,0	9,9	19,9	39,8
X_{CN} (Ω)	3077	1538	769	385	192

Alla olevassa taulukossa on mittaustulokset siitä, miten kuorman rinnalla oleva kondensaattori vaikuttaa pätötehon määrään. Taulukkoon on lisäksi kerätty vertailun vuoksi vastaava kuorma ilman kondensaattoria.

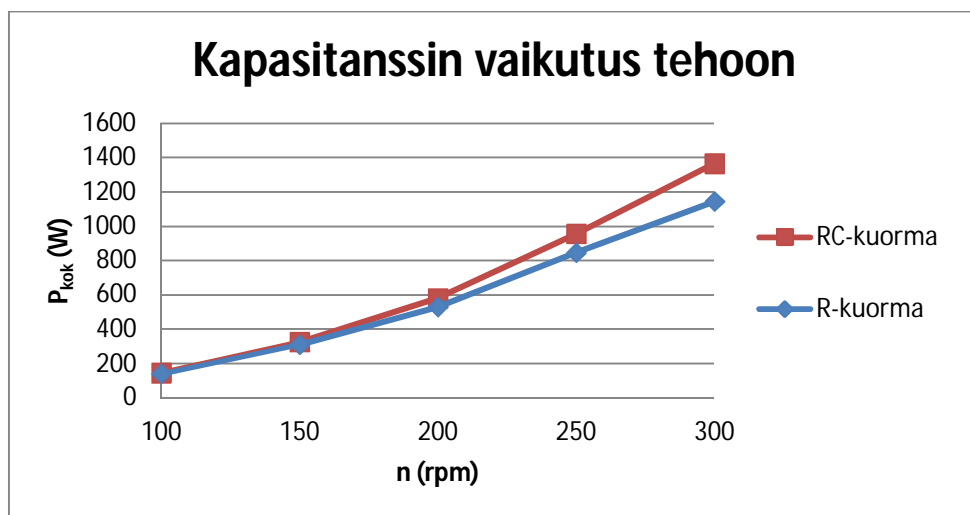
TAULUKKO 13. Mittaustulokset vaihtelevalla taajuudella kondensaattorin kanssa ja ilman kondensaattoria

f (Hz)	R_v (Ω)	X_C (Ω)	C (μF)	U (V)	U_v (V)	I_v (A)	P (W)	S (VA)	Q (Var)	$\cos\phi$	ϕ (deg)
8,3	60			92,0	53,1	0,9	140	140	20	0,99	8,1
8,3	60	480	40	93	53,7	0,91	140	150	40	0,96	16,3
12,5	60			133	76,8	1,33	310	320	30	0,99	8,1
12,5	60	320	40	141	81,4	1,38	320	340	100	0,96	16,3
16,7	60			183,7	106,1	1,76	550	550	40	1,00	0
16,7	60	240	40	191	110,3	1,89	590	620	200	0,95	18,2
20,8	60			230,5	133,1	2,2	880	880	50	1,00	0
20,8	60	192	40	246,1	142,1	2,46	970	1050	380	0,93	21,6
25,0	60			270,8	156,3	2,59	1200	1200	60	1,00	0
25,0	60	160	40	295,6	170,7	3,02	1410	1540	620	0,92	23,1

Tuloksista päätellen kondensaattori nostaa selvästi virtaa ja jännitettä, mitä korkeampi on taajuus. Vaiheresistanssit ovat samoja (60 Ω), jolloin ne ovat vertailukelpoisia.

Kondensaattorilla on selvästi tehoa nostattavaa vaikutusta varsinkin mitä suurempi on taajuus. Parhaimmillaan 25 Hz taajuudella eli 300 rpm:n akselinopeudella kokonaispätötehon lisäys on 200 W kondensaattorin kanssa, mikä on noin 17 % lisää tehoa.

Kuviossa 40 on havainnollistettu rinnan kytketyn 40 μF vaihekohtaisen kompensointikondensaattorin pätötehoa nostattavaa vaikutusta.



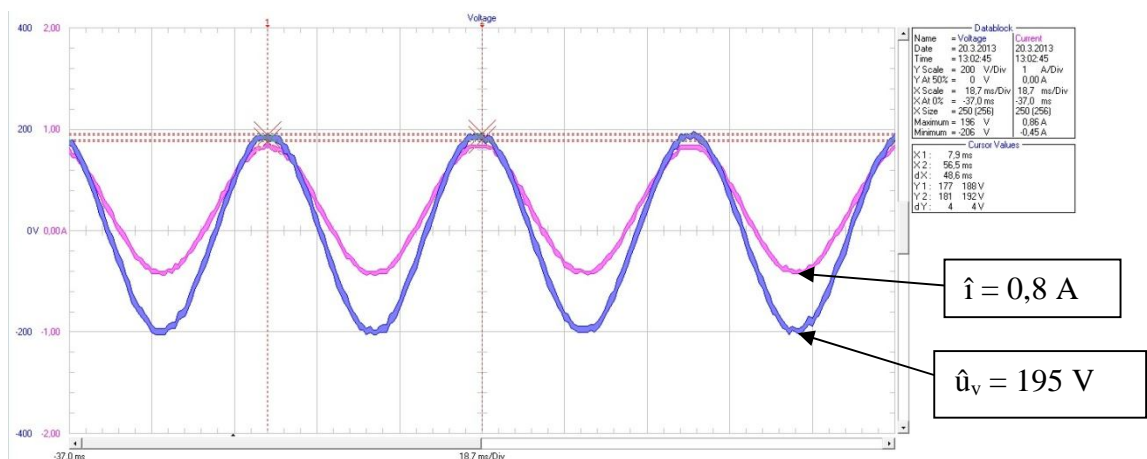
KUVIO 40. Kondensaattorin vaikutus tehon määrään

Taulukkoon 14 on kerätty kahdella eri kondensaattorikuormalla sekä ilman kondensaattoria mittaustulokset nimellisellä taajuudella.

TAULUKKO 14. Tulokset vaiheresistanssin ollessa 240Ω ja rinnankytketyn kondensaattori kuorman vaihdellessa $0 - 60 \mu\text{F}$

f (Hz)	R_v (Ω)	X_C (Ω)	C (μF)	U (V)	U_v (V)	I_v (A)	P_{kok} (W)	S_{kok} (VA)	Q_{kok} (Var)	$\cos\phi$	ϕ (deg)
20,8	240			239	138	0,6	230	230	30	1,00	0
20,8	240	192	40	255	147	1,0	240	430	350	0,57	55,2
20,8	240	128	60	265	153	1,3	260	620	560	0,42	65,2

Taulukon 14 mittauksista on otettu oskilloskooppikuvaajat. Ensimmäisenä on resistiivinen kuormitus ilman rinnalle kytkettyä kondensaattoria (Kuvio 41). Kuviossa vaihevirta on epäsymmetrinen x-akselin suhteen, mutta kuitenkin samanvaiheinen vaihejännitteen kanssa. Virran epäsymmetrisyys johtuu mahdollisesti nollajohtimen puuttumisesta ja siitä, että generaattorin tuottama jännite sisältää yliaaltoja. Teoriassa tähtipisteestä lähtevästä nollajohtimessa ei kulje virtaa silloin, jos kuormitus on symmetrinen jokaisen vaiheen suhteen. Kuormaresistansseilla on kuitenkin hieman toleranssia nimellisarvojen suhteen, jolloin vaiheiden vastuksien suuruudessa saattaa olla pientä eroa.



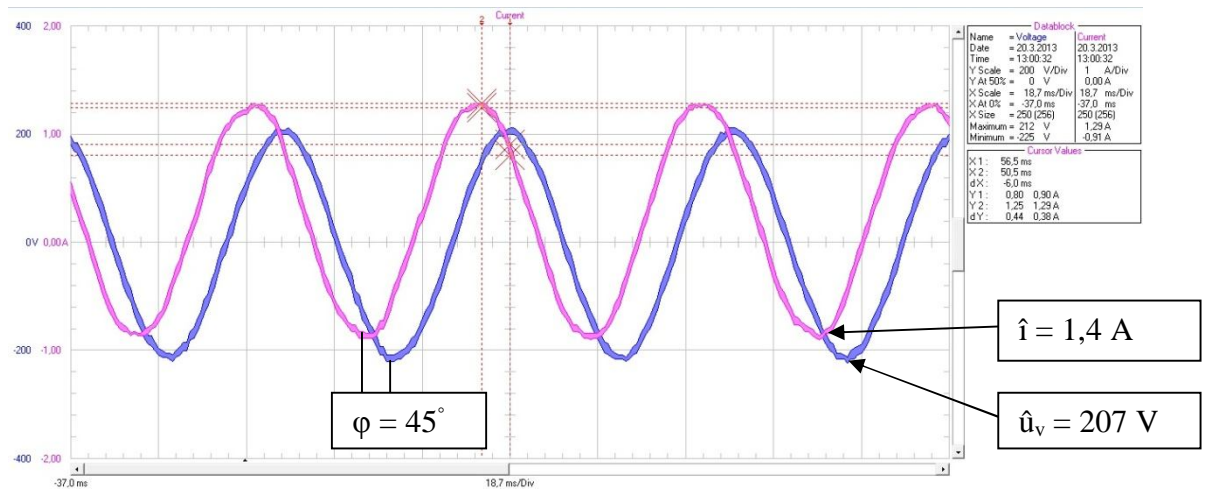
KUVIO 41. Resisttiivisen 240Ω vaihekuormituksen virta ja jännite -kuvaaja

Seuraavaksi kuorman rinnalle kytkettiin $40 \mu\text{F}$ kondensaattori. Kuvaajassa virran ja jännitteen vaihe-ero on -6 ms , jolloin virta on edellä jännitettä (Kuvio 42).

$$T = \frac{1}{f_n} = \frac{1}{20,8 \text{ Hz}} = 48 \text{ ms} \quad (9)$$

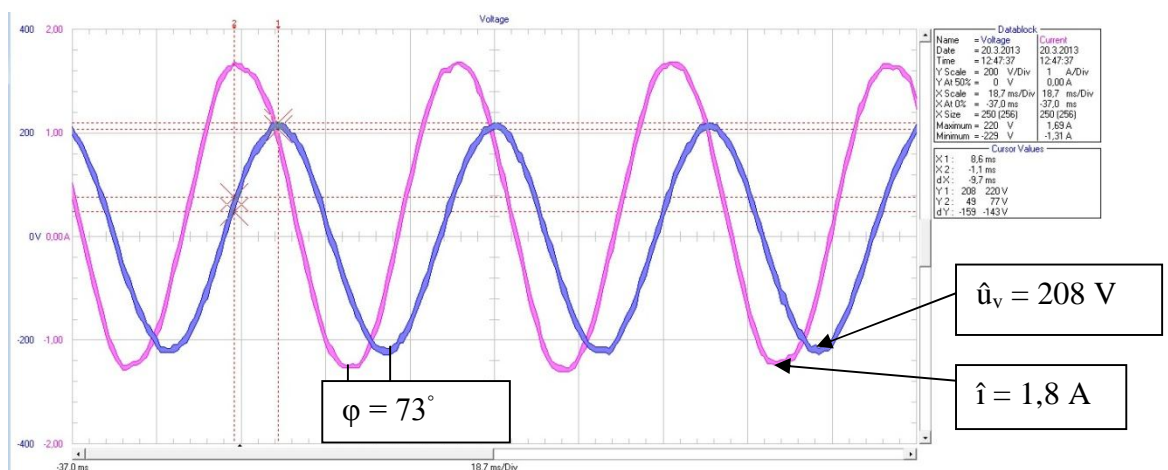
$$\varphi = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360^\circ = \frac{6 \text{ ms}}{48 \text{ ms}} \cdot 360^\circ = 45^\circ \quad (13)$$

Virta on siis 45 astetta edellä jännitettä.



KUVIO 42. Kapasitiivinen kuormitus, jossa $R = 240 \Omega$, $C = 40 \mu\text{F}$ ja $f = 20,8 \text{ Hz}$

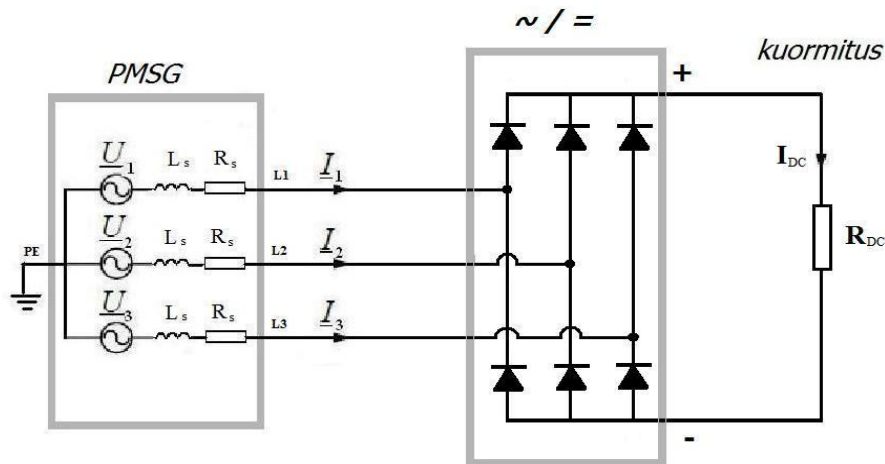
Seuraavaksi kytkettiin vielä toinen ($20 \mu\text{F}$) kondensaattori rinnalle, jolloin kapasitanssit lasketaan yhteen. Yhteenlaskettu kapasitanssi on tällöin $60 \mu\text{F}$. Virta on nyt jännitettä edellä $9,7 \text{ ms}$ eli $72,8$ astetta (Kuvio 43).



KUVIO 43. Kapasitiivinen virta- ja jännitekuvaaja, jossa $R = 240 \Omega$, $C = 60 \mu\text{F}$ ja $f = 20,8 \text{ Hz}$

4.2.6 Tasasuunnattu kuormitus

Perinteiset sähkökäytöt käyttävät tasasuuntaajina diodisiltoja ja tyristorisiltoja. Laboratorioympäristössä testattiin 6-vaiheista diodisiltaa tasasuuntaamaan 3-vaiheinen vaihtosähkö. Generaattorin syöttämä vaihevirta piti rajoittaa 8 A. Kuviossa 44 on esitetty kytkentäkuva tasasuuntaussillasta.



KUVIO 44. Tasasuuntauskytkentä

Taulukkoon 15 on kerätty tasasuuntaussillan mittaustulokset nimellistaajuudella.

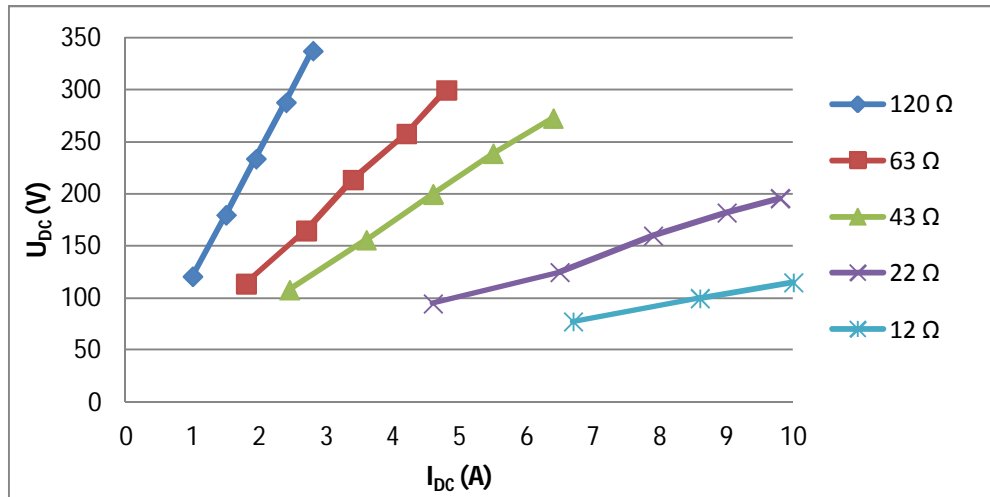
TAULUKKO 15. Tasasuuntaus nimellisellä taajuudella 20,8 Hz

f (Hz)	U (V)	U _v (V)	I _v (A)	P ₃₋ (W)	R _{DC} (Ω)	U _{DC} (V)	I _{DC} (A)	P _{DC} (W)	ΔP (W)	η _{silta} (%)
20,8	228	131,6	1,94	710	120	288	2,4	691	18,8	0,97
20,8	210	148,5	3,2	1085	63	258	4,2	1084	1,4	1,00
20,8	197	139,3	4,3	1360	43	239	5,5	1315	45,5	0,97
20,8	152,5	107,8	6,7	1680	22	182	9	1638	42	0,98

Tasasuunnatun jännitteen keskiarvo saadaan myös pääjännitteestä laskettua kaavalla:

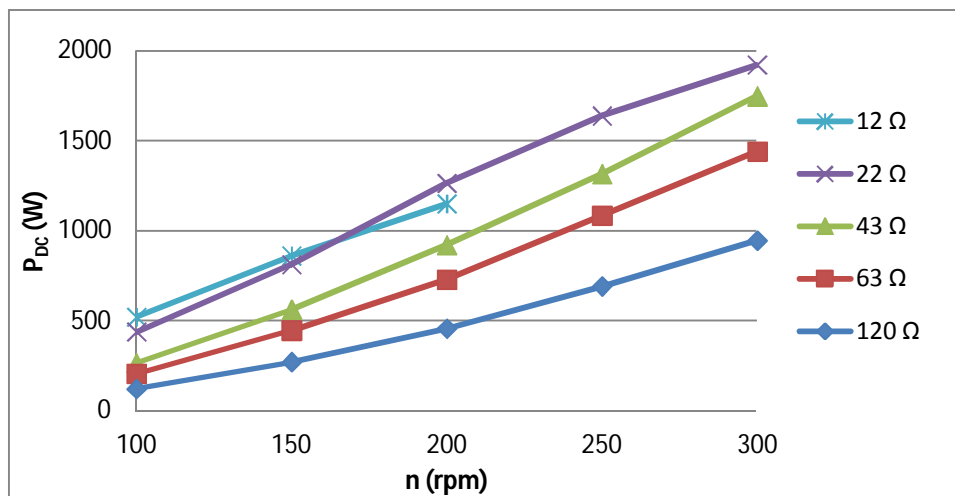
$$U_{DC} \approx 1,35 \cdot U \quad (14)$$

Kuviossa 45 on tasasuunnatut jännitteet virran funktiona, kun kuormaa on vaihdeltu 12 - 120 Ω. Virrat ja jännitteet nousevat kertoimen (~1,35) mukaan tasasähköpuolella pykälää suuremmiksi, mutta muuten kuvaaja noudattaa vaihtosähköpuolen vastaavaa kuvaajaa.



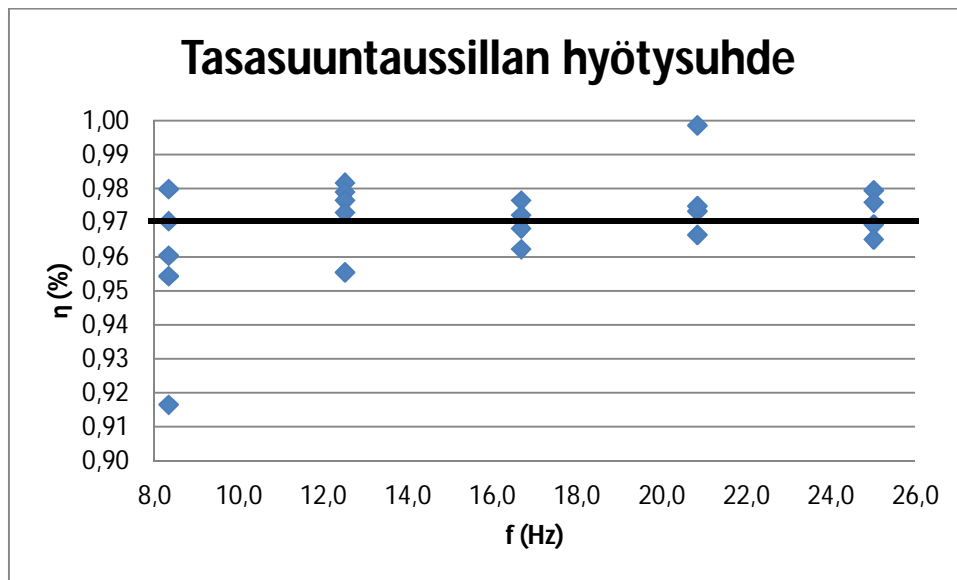
KUVIO 45. Tasasuunnatut jännitteet ja virrat vaihtelevalla kuormaresistanssilla

Alla olevassa kuviossa 46 on esitetty DC-puolen tehot vaihtelevalla kuormalla ja kierrosnopeudella. Parhaimman tehon saa 22 Ω kuormalla, mutta silloinkin jäädään alle 2 kW tehon.



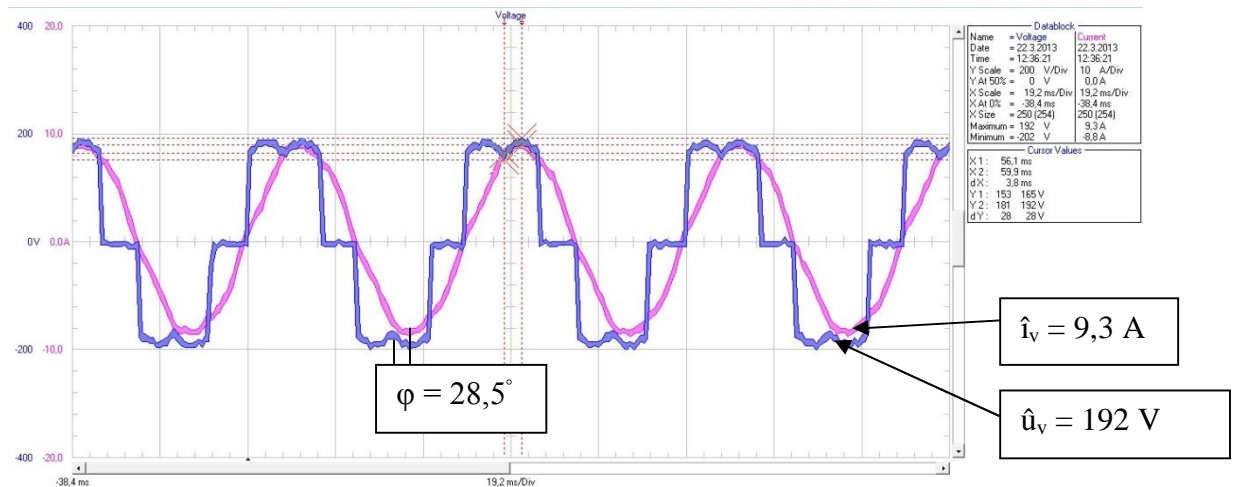
KUVIO 46. Tasasuunnatun kuorman tehot kierrosnopeuden suhteen

Tasasuuntaussillalla on keskiarvoltaan hyvä 0,97 hyötysuhde. Hyötysuhteen arvolla on enemmän hajontaa, mitä alhaisempi taajuus. Tämä on järkevää, koska mittarit eivät pysty mittaamaan tarkasti alhaisella taajuudella, jolloin tulee pientä virhettä lopputuloksiin. Tasasuuntaussillan hyötysuhdekuvaaja on kuviossa 47.



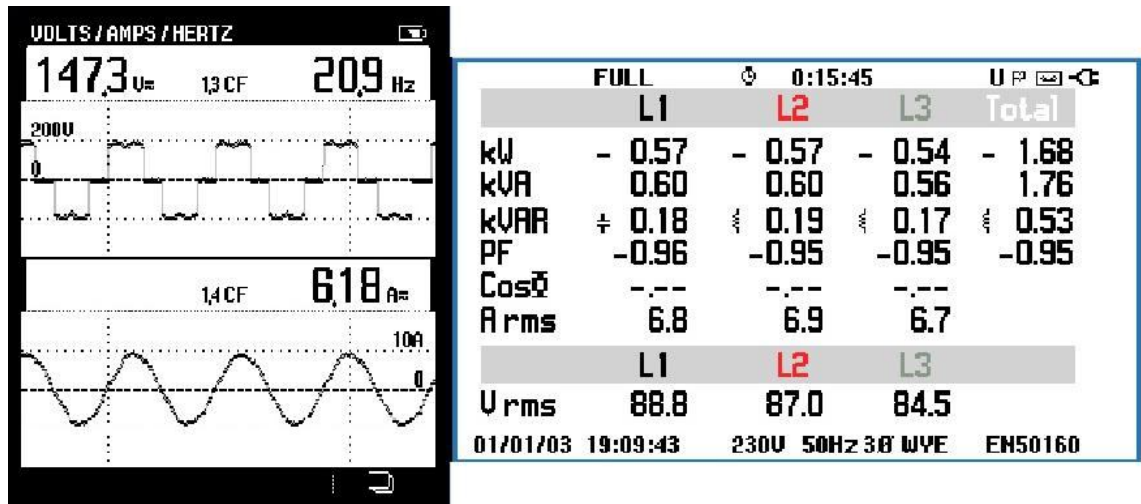
KUVIO 47. Tasasuunnatun sillan hyötysuhde taajuuden funktiona

Tasasuuntaajat tuottavat harmonisia yliaaltoja, jotka säröyttävät generaattorin syöttöjännitettä. Alla olevissa kuvioissa 48 ja 49 on DC-kuormana $20\ \Omega$. Virta on 7,2 ms jäljessä. Taajuus on nimellinen eli 20,8 Hz.



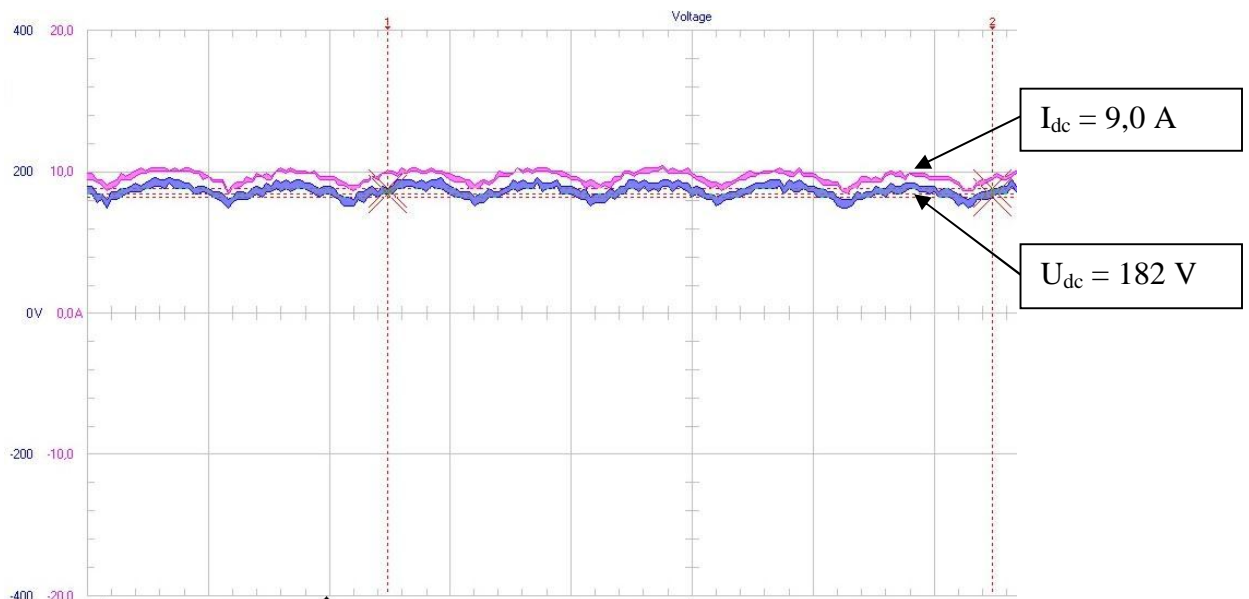
KUVIO 48. Generaattorin virta ja jännite, kun kuorma on tasasuunnattu diodisillalla

Vaihe-ero on 3,8 ms, joka vastaa $28,5^\circ$ vaihe-eroa.



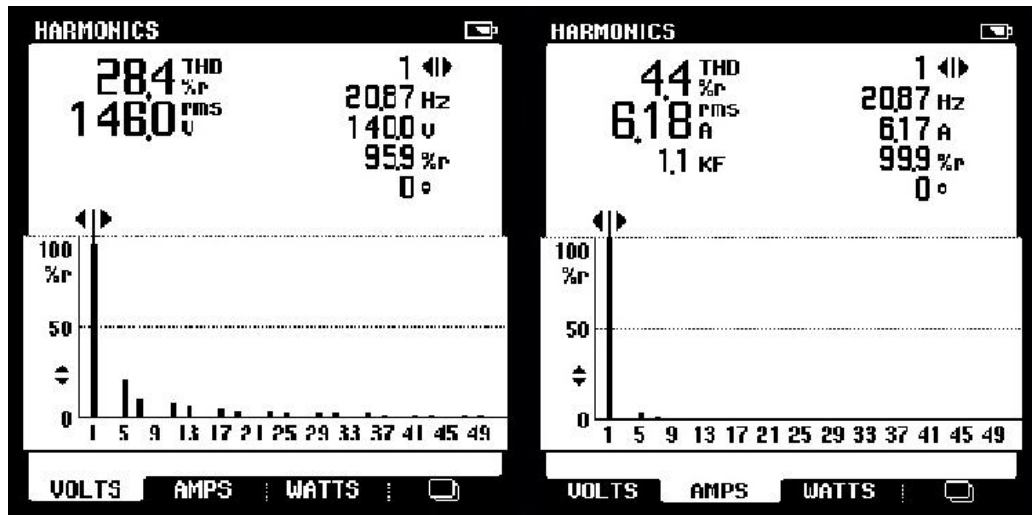
KUVIO 49. AC-puolen tehot sekä virta ja jännite

Seuraavassa kuviossa 50 on saman kuormitusilanteen jännitteet ja virta kuvattu DC-puolelta. Jännite on noin 200 V ja virta 10 A.



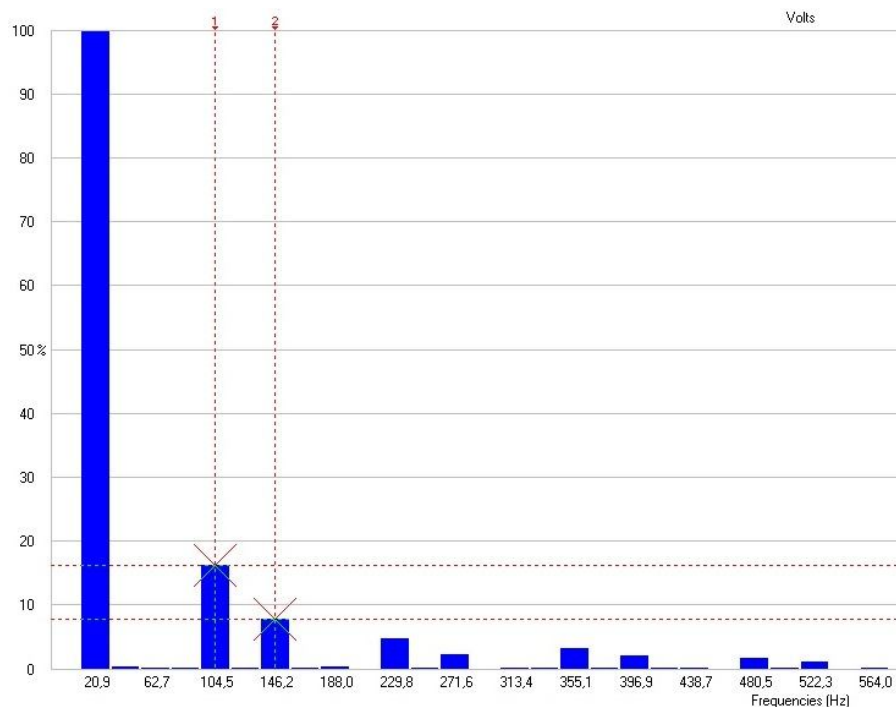
KUVIO 50. Tasasuunnattu jännite ja virta

Generaattorin jännite ja virta sisältävät harmonisia yliaaltoja tasasuuntaussillasta johtuen. Alla olevassa analyysissä jännitekuvaaja sisältää erityisesti 5. (104 Hz) ja 7. (146 Hz) yliaaltoa. Virta sisältää huomattavasti vähemmän yliaaltoja, koska virtakäyrä noudatti selvää siniaaltoja verrattuna jännitteen porrasmaiseen rakenteeseen. 6-vaihesella diodisillalla tehty tasasuuntaus tarvitsee yliaaltosuodatusta. Jännitekäyrässä esimerkiksi 5. yliaallon osuus on jopa 21,6 % ja 7. (10,9 %) 11. (8,7 %) 13. (6,2 %). Jännitteen THD-arvo eli harmoninen kokonaissärö ilmaistuna perusaallon prosenttiosuutena on Fluke 43B mittarin mukaan 28,4 %.



KUVIO 51. Jännitteen ja virran harmoniset arvot

Tässäkin asiassa tuntui saavan eri tuloksia riippuen siitä, millä mittarilla tulokset on mitattu. Mitatessa mittareiden arvot eivät myöskään tahdo asettua aloilleen vaan elävät koko ajan, jolloin eri hetkillä luetut mittariarvot saattavat erota huomattavasti toisistaan. Tästä syystä mittaustuloksia on turhaa alkaa analysoida tarkasti jokaista yksityiskohtaa myöten. Esimerkiksi Fluken 434 mittari ei pystynyt ollenkaan määrittämään alle 50 Hz perustaajuuden kerrannaisaaltoja. Alla olevassa kuviossa 52 on kuitenkin 20,8 Hz vaihtojännitteen yliaallot, mitkä diodisilta aiheuttaa. Kuvioista voidaan päätellä, että suodatus on tarpeen.



KUVIO 52. Jännitteen harmoniset yliaallot tarkemmat prosentiosuudet määritettynä

Sama ilmiö tapahtuu, jos tasasuunnattu virta suodatuksen jälkeen vielä vaihtosuunnataan, kuten taajuusmuuttaja käytössä tapahtuu. Esimerkiksi näin yliaaltopitoista sähköä ei voi syöttää verkkoon tai sähkölaitteille.

Yliaallot ja loisvirta aiheuttavat häviöitä kaapeleissa ja muuntajissa. Ohjattu tyristorisilta tuottaa enemmän loistehoa kuin diodisilta. Osa generaattorin kapasiteetista kuluu loistehon ja yliaaltojen siirtoon, ja näistä syntyvät häviöt on otettava huomioon ainakin suuremman mittakaavan generaattorikäytössä. Yliaaltoja voidaan suodattaa passiivisilla ja aktiivisilla suotimilla. /28/, /29/

Generaattoreita voidaan myös pitää yliaaltojännitelähteinä. Generaattorien kehittämä jännite poikkeaa sinimuodosta, sillä generaattorin navan ilmaväli ei ole aivan tarkkaan sinimuotoinen. Generaattorin yliaaltovirtojen suuruus määräytyy kuormien yliaaltoimpedansseista. /28/, /29/

Vaikka suuntaajalaitteet ovatkin pahimpia yliaaltojen lähteitä, vaativat ne kuitenkin itse hyvän sinimuotoisen verkkojännitteen toimiakseen oikein. Standardin SFS-EN 50160 mukaan syöttöjännitteen särö ei saa olla yli 5%. Yliaaltojen aiheuttama häviöiden kasvu on tahtikoneissa suurempaa kuin epätahtikoneissa. Yliaaltojen päävaikutus kohdistuu tahtikoneissakin roottoriin. /28/

Resonanssi syntyy, kun jonkin yliaallon taajuus on lähellä verkon resonanssitaajuutta. Tällöin yliaaltovirrat tai jännitteet usein moninkertaistuvat normaaliin tilanteeseen verrattuna. Resonanssi syntyy jonkin verkon osan kapasitanssien ja induktanssien välille.

5 POHDINTA

Roottorin rakenne, kestopagneettien sijainti ja materiaali vaikuttavat kestopagneetti-tahtikoneen ominaisuuksiin. Kestomagneetoinnilla koneen lähdejännite muodostuu kierrosnopeudesta riippuvaisesti ja tehokerroin määräytyy kuorman perusteella. Kestomagneetit säilyttävät magnetoitumansa laitteen eliniän ajan, mikäli niitä ei rasiteta liikaa. Kestomagneetit saattavat menettää osan magnetoitumisestaan altistuessaan liian korkealle lämpötilalle tai ylikuormitettaessa, jolloin koneen suorituskyky laskee. /16/

Mittauksissa paljastui, että testattavana ollut kestopagneettigeneraattori ei kyennyt enää tuottamaan tuotetietojen edellyttämää tehoa optimikuormituksella. On mahdollista, että kyseistä generaattoria on ylikuormitettu, jolloin kestopagneetit ovat menettäneet hieman tehoaan haitallisesta lämpövaikutuksesta. Generaattori voi olla myös hieman rakenteeltaan muuteltu kuin tuotetietojen malli, jolloin parametrit eroavat hieman toisistaan. Esimerkiksi koneen magneettikentän ilmvälin kasvattamisella pystytään muuttamaan koneen ominaisuuksia.

Tehokertoimen mittaaminen tuotti ongelmia, koska varsinkin Fluken 434 mittari on tarkoitettu verkkotaajuisten (50 ja 60 Hz) tehojen analysoimiseen. Eri tavoin laskettu ja mitattu tehokerroin erosivat usein toisistaan.

Kestomagneetikoneen pyöriessä nimellistä nopeutta suuremmilla nopeuksilla liitinjännite ja mahdollisesti virta kasvavat liian suuriksi. Tutkittavana olevan kestopagneettigeneraattorin virta ei saa ylittää 8 A lämpenemisen takia. Tästä syystä generaattorin akselia ei ole viisasta pyörittää paljoa nimellistä nopeutta korkeammilla nopeuksilla.

Taulukossa 16 on tehty vertailu samaan käyttötarkoitukseen kestopagneetti-tahtikone ja epätahtikone vaihteella 6:1. Molemmista konetyypeistä löytyy kaksi vaihtoehtoa. Ensimmäinen PMS-kone on tarkoitettu jatkuvan maksimimomentin tuottamiseen millä tahansa kierrosnopeudella nimelliseen nopeuteen asti, ja kone tarvitsee siksi erillisen jäähdytyksen tai nestejäähdytyksen. Toinen PMS-kone toimii omalla jäähdytyksellään. Kahdesta induktikoneesta ensimmäinen oikosulkukone on ABB:n valmistama ja jälkimmäinen SCI-kone on Siemensin valmistama. Oikosulkukoneet ovat käytännössä identtisiä pieniä eroja huomioon ottamatta.

TAULUKKO 16. Kestomagneettitahtikoneen ja epätahtikoneen vertailutaulukko (ABB, Siemens)

	U_n (V)	P_n (kW)	n_n (rpm)	I_n (A)	$\cos\varphi$	T_n (Nm)	T_{\max} (Nm)	η (%)	m (kg)	IEC-size
PMSM 1	370	87	248	154	0,94	3331	3997	93,1	1430	31
PMSM 2	370	87	248	152	0,95	3327	4658	94,2	1590	31
SCIM 1	400	90	1483	160	0,86	579	1563	94,4	575	28
SCIM 2	400	90	1480	160	0,86	581	1569	94,9	660	28

Tehokerroin on kestopagneettikoneella kymmenyksen suurempi kuin epätahti-induktiokoneella. Kestomagneettitahtikoneella saavutetaan jopa 5,7-kertainen nimellinen vääntömomentti teholtaan sekä runkokooltaan vastaavaan 1500 rpm:n oikosulkukoneeseen verrattuna. Epätahtikone tosin pystyy hetkelliseen 2,7-kertaiseen maksimimomenttiin nimelliseen nähden, kun taas kestopagneettitahtikone parhaimmillaan vain 1,4-kertaiseen. Kestomagneettikoneet ovat runkokooltaan pykälää hieman suurempia mutta jopa 2,5-kertaa raskaampia massaltaan. Epätahtikoneiden IE2 luokan hyötysuhdetta laskee lisäksi alennusvaihe, jolloin kokonaishyötysuhde on mahdollisesti 90 % luokkaa. Muuten koneiden taulukkoarvot ovat suurin piirtein samaa tasoa. Epätahtikone saa noin 90 kW nimellistehon aikaiseksi korkealla pyörimisnopeudella ja kestopagneettikone vastaavasti suurella vääntömomentilla kaavan 10 mukaisesti.

$$P = T \cdot 2\pi \cdot \frac{n}{60} \quad (10)$$

Kestomagneettikoneilla on suhteellisen alhainen hinta, koska ne ovat pienempiä kooltaan kuin useimmat tahtigeneraattorit sekä niissä on korkeampi hyötysuhde kuin perinteisissä vaihtojännitegeneraattoreissa. Kestomagneettikoneilla on yksinkertainen rakenne ja vähän kuluvia osia verrattuna esimerkiksi liukurengasgeneraattoriin. Vähäisistä huoltokuluista johtuen kyseessä on luotettava tehonlähde alhaisilla kierrosnopeuksilla.

Kestomagneettikoneen vaatima pieni tila tekee siitä käyttökelpoisen erityisesti juuri tuulivoimasovelluksissa. Monet tuulivoimalat käyttävät generaattoreissaan kestopagneettiteknologiaa. Kasvua jarruttaa ainoastaan kestopagneettien hinta. Magneettimateriaali NdFeB sisältää harvinaista maametallia neodymiumia. Nopeasti kasvavan tuotannon ja valmistusteknologian kehityksen myötä hinnan odotetaan alenevan.

LÄHTEET

- /1/ Hietalahti L. Säädetyt sähkömoottorikäytöt, Tammertekniikka, 2012
- /2/ Hietalahti L. Muuntajat ja sähkökoneet, Tammertekniikka, 2010
- /3/ Toijala H. Aaltovoimalaitteiston PM-generaattorin ja tasasuuntauksen mallintaminen ja testaus, opinnäytetyö, 2011
- /4/ Gieras J.F. Permanent magnet motor technology: design and applications, 2010
- /5/ Lampola P. Directly Driven, Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications
- /6/ Parviainen A. Design of axial-flux permanent-magnet low-speed machines and performance comparison between radial-flux and axial-flux machines
- /7/ Käyhkö T. Paperiteollisuuden kestopagneettitahtikonekäytöt
- /8/ Aura L. & Tonteri A. Sähkökoneet ja tehoelektronikan perusteet, WSOY, 1996
- /9/ Chen Z. & Spooner E. & Norris W.T. & Williamson A.C. Capacitor assisted excitation of permanent-magnet generators (IEEE Xplore)
- /10/ Hämäläinen M. Tuuliturbiineissa käytettävän kestopagneettigeneraattorin asiakas- tuotespesifikaation kehittäminen, opinnäytetyö, 2012
- /11/ Haverinen V. Tuulivoimakäytön simulointityökalun käyttöliittymän kehittäminen, diplomityö, 2008
- /12/ Kinnunen J. Reluktanssiverkkomalli kestopagneettitahtikoneen staattisen ilmaväli- vuontiheyden mallinukseen, diplomityö, 2004
- /13/ Kinnunen J. Direct-on-line axial flux permanent magnet synchronous generator static and dynamic performance, väitöskirja, 2007
- /14/ Rätty M. Finlaysonin vesivoimalaitoksen generaattoriuusinnat, opinnäytetyö, 2010
- /15/ Löyttynen H. Suoravetoisen tuuliturbiinin generaattorin testisegmentin testaus, opinnäytetyö, 2010

- /16/ Ruoho S. NdFeB-kestomagneettien demagnetoitumisen mallintaminen suurissa sähkökoneissa, väitöskirja, 2011
- /17/ Siemens oikosulkumoottorit 1LA 1999 -tuoteluettelo
- /18/ Comsol, Kestomagneettigeneraattorit, Luettu 12.3.2013
<http://www.comsol.com/blogs/simulating-permanent-magnet-generators/>
- /19/ PM Generators, Tuuligeneraattorit, Luettu 12.3.2013
<http://www.pmgenerators.com/products/wind>
- /20/ ABB, MS PMSG, Luettu 12.3.2013
<http://www.abb.com/product/ap/seitp322/28c80f150d543486c2256df1002f64bd.aspx>
- /21/ AXCO Motors, Aksiaalivuotekniikka, Luettu 22.3.2013
<http://www.axcomotors.com/aksiaalivuotemoottori/aksiaalivuotekniikka.html>
- /22/ ABB, Verkon loistehoa ja yliaaltoja kompensoiva sähkökäyttö, Luettu 31.3.2013
<http://www.abb.fi/cawp/seitp202/354d704744cf1ea1c12578a200261dac.aspx>
- /23/ Northern Power Systems, Tuuligeneraattorit, Luettu 5.4.2013
<http://www.northernpower.com/technology/permanent-magnet.php>
- /24/ ABB, PM-moottorit, Luettu 9.4.2013
[http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/b126d92180c4791dc125784f0037f9cb/\\$file/Permanent%20magnet%20motors%20GB%2005-2004.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/b126d92180c4791dc125784f0037f9cb/$file/Permanent%20magnet%20motors%20GB%2005-2004.pdf)
- /25/ ABB, IE2 vakiomoottorit, Luettu 9.4.2013
[http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/5d822f08189c6589c1257aee003f7404/\\$file/General%20performance%20IE2%20motors%20EU%20MEPS%209AKK105789%20EN%2001_2013.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot234.nsf/veritydisplay/5d822f08189c6589c1257aee003f7404/$file/General%20performance%20IE2%20motors%20EU%20MEPS%209AKK105789%20EN%2001_2013.pdf)
- /26/ MEADinfo, Vaihteiden hyötysuhteita, Luettu 16.4.2013
<http://www.meadinfo.org/2008/11/gear-efficiency-spur-helical-bevel-worm.html>
- /27/ SEW-Eurodrive, Vaihdeyksiköitä, Luettu 16.4.2013
<http://pdf.directindustry.com/pdf/sew-eurodrive/gear-units/283-256307-45.html>
- /28/ Korpinen L. Yliaalto-opus (pdf-tiedosto), Luettu 5.4.2013
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>
- /29/ ABB Tekninen opas nro 6, Luettu 5.4.2013
[http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/\\$file/Tekninen_opas_nro_6.pdf](http://www05.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/$file/Tekninen_opas_nro_6.pdf)
- /30/ Pyrhönen J. Sähkökäyttökniikan professori LTY, Nettivastaus, Luettu 4.4.2013
<http://www.aka.fi/fi/T/Kysytyt-kysymykset/Paasenko-elakkeelle-ennen-kuin-magneettien-etaisyys-muuttuu/>

LIITTEET

Liite 1. Tutkittavan kestopagneettigeneraattorin valmistajan ilmoittamat suoritearvot passiivisella kuormituksella (AXCO Motors)

Electrical performance specification – PMG 2.0-250-P – parameters under passive loading

The parameters of the generator.

Parameter	Explanation	Value	Dimension
P	Electric power	2.0	kW
S	Apparent power	2.0	kVA
T	Shaft torque	76	Nm
n	Rotation speed	250	min ⁻¹
n_{max}	Maximum allowed rotation speed under full loading	300	min ⁻¹
n_{max}	Maximum allowed rotation speed under no-load condition	500	min ⁻¹
$2p$	Number of pole-pairs	5	pcs.
f	Line frequency on rotation speed of 250 min ⁻¹	20.8	Hz
E_{pm}	PM excited no-load line-to-line voltage at speed 250 min ⁻¹	250	V
U	Line-to-line voltage (full load – passive loading)	155 ¹⁾	V
I_{ph}	Line current	7.6	A

1) Variation interval 0.95- U ... 1.05- U at rated point due to the variation of temperature.

Generator lumped parameters.

Parameter	Value	Dimension
X_d	15.7	Ohm
X_q	15.7	Ohm
L_d	0.12	H
L_q	0.12	H
R_{ph}	1.6	Ohm

REMARKS:

- The line current of the PMG must be limited to a value of 8.0 A.
- In the case of direct heating, current limit of 8.0 A requires load of which phase resistance R_{ph} is at least 15 Ohm or above.
- **It is denied to connect the generator directly to a grid!**

Liite 2. Tutkittavan kestopagneettigeneraattorin valmistajan ilmoittamat suoritearvot aktiivisella kuormituksella (AXCO Motors)

Electrical performance specification – PMG 3.0-250-A – parameters under active loading

The parameters of the generator.

Parameter	Explanation	Value	Dimension
P	Electric power	3.0	kW
S	Apparent power	3.1	kVA
T	Shaft torque	115	Nm
n	Rotation speed	250	min ⁻¹
n_{max}	Maximum allowed rotation speed under full loading	400 ¹⁾	min ⁻¹
n_{max}	Maximum allowed rotation speed under no-load condition	400 ¹⁾	min ⁻¹
$2p$	Number of pole-pairs	5	pcs.
f	Line frequency on rotation speed of 250 min ⁻¹	20.8	Hz
E_{pm}	PM excited no-load line-to-line voltage at speed 250 min ⁻¹	250	V
U	Line-to-line voltage (full load – active load)	250 ²⁾	V
I_{ph}	Line current	7.2	A

1) Converter protection due to the over voltage is required if rotation speed of 400 min⁻¹ is exceeded.

2) Variation interval 0.95- U ... 1.05- U at rated point due to the variation of temperature.

Generator lumped parameters.

Parameter	Value	Dimension
X_d	15.7	Ohm
X_q	15.7	Ohm
L_d	0.12	H
L_q	0.12	H
R_{ph}	1.6	Ohm
X_d	0.61	p.u.
X_q	0.61	p.u.
R_{ph}	0.07	p.u.

Generator may be loaded with a suitable frequency converter (active load for generator). Under this loading situation generator may produce continuous powers up to 3 kW. With the active load the shaft torque limitation is 120 Nm, up to speed of 400 min⁻¹. If operation speed is over 400 min⁻¹, the torque must be reduced by a factor $250/n$.

REMARKS:

- Continuous value for the line current of the PMG must be limited to a value of 8.0 A
- **It is denied to connect the generator directly to a grid!**