

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Sähkötekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikka

Tutkintotyö

Sami Heikkilä

**VIERASMAGNETOITU GENERAATTORI MUUTTUVAKIERROKSISENA  
KÄYTTÖNÄ**

Työn ohjaaja  
Työn teettäjä  
Tampere 2007

DI Lauri Hietalahti  
TAMK

Heikkilä, Sami	Vieras­magne­toitu generaattori muuttuvakierroksisena käyttönä
Tutkintotyö	80 sivua
Työn ohjaaja	Lauri Hietalahti
Työn teettäjä	TAMK
Toukokuu 2007	
Hakusanat	Tahtigeneraattori, knee point, magnetointi

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoululla tutkittiin tahtikoneen käyttöä muuttuvanopeuksisena käyttönä sekä magne­toinnin säätäjän toimintaa tämänkaltaisissa käyttötilanteissa.

Työ toteutettiin Stamford­in BCA164A tahtikoneella, sen mukana toimitetulla SA465-2, MX321 ja MX342 säätimillä. Rajoitettujen käytössä olevien resurssien ja tekniikan vuoksi varsinaiset muuttuvanopeuksiset testit kyettiin suorittamaan ainoastaan mukana tulleella SA465-2 säätimellä, kun muiden säätimien avulla kyettiin mallintamaan ainoastaan niiden toimintaa yleisesti ja selvittämään niiden toimintaperiaate.

Tehtyisiin kokeisiin perustuen voidaan todeta testatun tahtigeneraattorin tarvitsevan 1400 rpm:n, eli 46 Hz:n taajuudella noin 50 % lisämagne­toinnin, ja 1300 rpm:n, eli 43 Hz taajuudella noin 100 % lisämagne­toinnin. Tahtigeneraattorin nopeuden nousu vaikutti magne­tointiin ainoastaan laskevasti aina mekaaniselle maksimirajalle asti.

Knee Point testauksessa SA465-2 kykeni säätämään magne­tointia vakaasti vielä 1350 rpm:n nopeuteen asti. MX321 ja MX342 säätimillä ei pystytty PMG:n uupumisen vuoksi testejä suorittamaan, eikä säätimille saatu mistään 100 Hz:n tehonsyöttöä. Säätimiä kuitenkin 50 Hz:llä syöttäessä säätimet kykenivät pitämään tahtigeneraattorin tyhjäkäynnillä vakaana aina servon alamitoitusrajalle asti, noin 800 rpm:ään asti.

TAMPERE POLYTECHNICS

Electrical Engineering

Power Electricity

Heikkilä, Sami

Engineering Thesis

Thesis Supervisor

Commissioning Company

May 2007

Keywords

Externally excited generator as variable speed use

80 pages

Lauri Hietalahti

TAMK

Synchronous motor, Synchronous generator, knee point

## ABSTRACT

At Tampere polytechnics a study was made of the using of synchronous generator in variable speeds and to study magnetic excitators at these situations.

Work was made by using a Stamford BCA164A synchronous generator and with 3 regulators: SA465-2, MX321 and MX342. Due to the limited resources and the nature of the regulators, full tests were only possible with the SA465-2 regulator.

Based on the examination made during the thesis, it can be said that the synchronous machine can still operate with 100 rpm drop in their speed at continuous use with their base load with 50 % increase in the need of their excitation current. 200 rpm drop in their speed increases the demand for excitation current by 100 %. When the speed is increased it can be said that the mechanical limits by the synchronous machine are the first to worry when using base load for the machine. Tested SA465-2 were able to handle even the 200 rpm drop in the speed of the generator and also the increased speed all the way to the mechanical limits of the machine.

---

## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SYMBOLILUETTELO

1. TYÖN TAVOITE.....	7
1.1 Työssä käytetty tutkittava tahtigeneraattori.....	7
2 TAHTIGENERAATTORITEORIAA.....	11
2.1 Nimellispopeudella pyörivän tahtikoneen toiminnan laskeminen.....	11
2.2 Napapariluvun vaikutus tahtigeneraattorin pyörimiseen.....	12
2.2 Magnetointisäädön vaikutus tahtikoneen liitinjännitteen suuruuteen .....	13
2.2 Magnetoinnin rakenne tahtikoneessa.....	14
2.3 Magnetoinnin käyttö loistehon kompensointiin .....	18
2.4 Tahtigeneraattorin vaimennuskäämitys.....	20
2.5 D- ja Q-magnetointi akselit .....	21
2.6 Tahtigeneraattorin osoitinpiirros .....	23
2.6.1 Osoitinpiirros.....	23
2.6.2 Osoitinpiirroksen ääritapaukset.....	24
2.6.3 PQ-diagrammin muodostuminen.....	26
3 TYHJÄKÄYNTI JA OIKOSULKUKOKEET .....	28
3.1 Tyhjäkäyntikoe.....	28
3.1.1 Tyhjäkäyntikokeen mittaustulokset.....	30
3.2 Oikosulkukoe.....	33
4 KUORMITUSKOKEEN LASKENTA.....	39
4.1 Kuormituksen laskenta .....	39
4.1.1 Kuormituksen tehon ja virran laskenta.....	39
4.1.2 Kuorman resistanssin ja induktanssin mallinnus.....	40
4.1.3 Kelan ja resistanssin rinnankytkennän mallinnus kuormana.....	41
4.1.4 Kelan reaktanssin laskenta muuttuvassa taajuudessa .....	43
4.2 Kuormituksen mallintamisen kytkentä, välineet ja työtavat .....	45
4.2.1 Kytkennän mallintavat komponentit .....	45
4.2.2 Tahtikonetta pyörittäneen servon tuomat rajoitukset .....	47
4.2.3 Kuormituksen valinta ja ongelmat.....	47
5 SUORITETTU KUORMITUSKOE 440 VOLTIN JÄNNITTEELLÄ.....	49
5.1 Suoritettu kuormituskoe 254 Voltin nimellijännitteellä .....	50
5.2 Nimelliskuormitustilanteesta piirretty magnetoinnin PQ-diagrammi .....	52
6 MAGNETOINNIN SÄÄTÄJÄT.....	57
6.1 Magnetoinnin säätäjään liittyvää termistöä .....	57
6.2 Tutkitut säätäjät .....	59
6.2.1 SA465-2 Automatic Voltage Regulator .....	59

---

6.2.2 MX342 Automatic Voltage Regulator (AVR) .....	61
6.2.3 MX321 Automatic Voltage Regulator .....	64
6.3 Kneepointin testaus SA465-2:lla.....	67
6.3.1 Esityöt magnetoinnin säätäjän kanssa .....	68
6.3.2 SA465-2 säätäjän Kneepointin testauksen mittaustulokset.....	68
6.3.3 SA465-2 säätäjän toiminta .....	71
6.4 Säätäjien MX342 ja MX321 toiminta .....	71
6.4.1 Pohdinta ratkaisuyritykseen PMG-säätimien toimintaan saattamiseksi.....	72
6.4.2 Ratkaisumallin testaus .....	73
6.4.3 Lisäkoestus säätimille.....	74
6.4.4 MX342 ja MX321 säätimien testauksen lopputulos .....	76
7 LOPPUPÄÄTELMÄT .....	77
7.1 Tahtikoneen kuormitettavuus muuttuvanopeuksisena .....	77
7.2 Magnetoinnin säätäjien toiminta muuttuvanopeuksisina .....	78
8 KIITOKSEN SANOJA .....	79
8.1 Kiitokset valvojalle ja koululle.....	79
8.2 Kiitokset tovereilleni sekä perheelleni .....	79
8.3 Kiitokset Kalmar Industriesille.....	79

## LÄHTEET

## SYMBOLILUETTELO

$\delta$ =	tahtigeneraattorin staattorin ja roottorin magneettikenttien välinen napakulma
$f_k$ =	käämityskerroin
$f$ =	taajuus
$N$ =	staattorin vaihekäämin sarjaan kytketyt johdinkierrokset
$\Phi_m$ =	yhden magneettinavan päävuoto, joka on sama kuin staattorivyöhyden maksimi- eli huippuvuoto $\delta_m$
$p$ =	napapariluku
$n$ =	pyörimisnopeus
$I_m$ =	tahtigeneraattorin magnetointivirta
$K$ =	vakiokerroin
$U_s$ =	staattorin liitinjännite
$U_{fv}$ =	staattorin indusoima jännite

Pieni sisko =	Minna Heikkilä
Pieni veli =	Jussi Heikkilä
Pienin sisar =	Emma Heikkilä
Ippe =	Ismo Pitkänen
Hallilan Juhnis =	Juha Simelius
Järvensivun Miksa =	Mikko Korpela
Alberto ”Kalevan Paroni” =	Tuomas Savolainen
Peide =	Ville Peijariniemi
Hanscarle =	Hannu Pietikäinen

## 1. TYÖN TAVOITE

Työn tavoitteena oli selvittää miten muuttuvanopeuksista tahtikonetta voidaan käyttää generaattorina saarekekäytössä ja pyrkiä selvittämään tahtikoneen nimelliskuorman toiminnallisuuden rajat.

Työ suoritettiin Tampereen ammattikorkeakoulun sähkölaboratoriossa olevalla Stamfordin BCA 164A tahtikoneella, sekä magnetoinnin säätäjillä, SA465-2, MX432 sekä MX321.

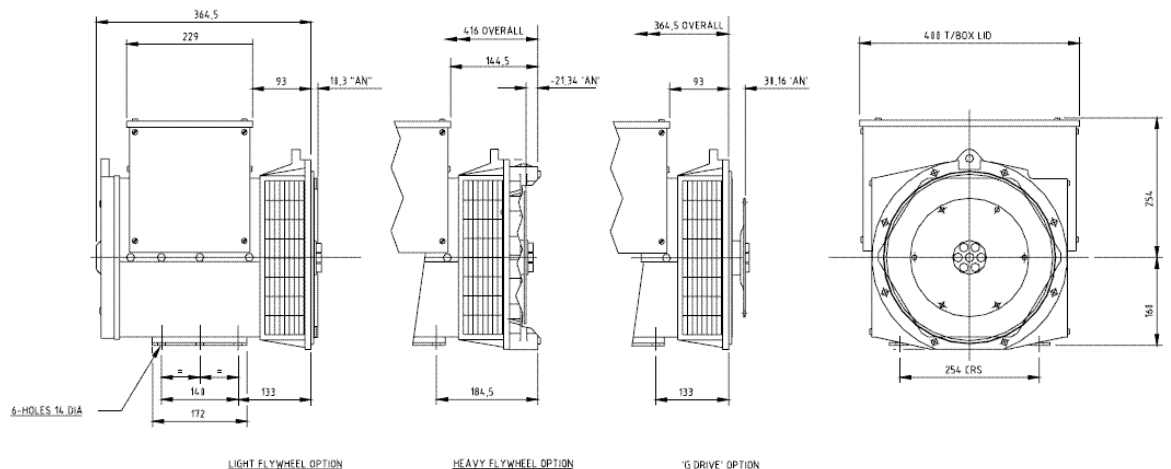
Tahtikoneelle suoritettiin tyhjäkäynti- ja oikosulkukokeet, minkä jälkeen kuorma mallinnettiin laboratorion kalustolla. Kuormitustilanteiden mallintamisen jälkeen työssä tutkittiin magnetoinnin säätäjien toimintaa sekä niiden toiminnallisuuden rajoja. Erinäisten toimintapisteiden teoreettinen laskenta muuttuvanopeuksisena olisi vaatinut hyvin laajaa teoreettista käsittelyä, tahtikoneen mallintamista sekä perehtymistä simulointeihin ja useiden eri reaktansseja mallintavien tilanteiden mittaamista, joihin ei ollut aikaa.

### ***1.1 Työssä käytetty tutkittava tahtigeneraattori***

Työssä käytettiin Stamfordin BCA164A tahtigeneraattoria, jonka tekniset tiedot, fyysiset mitat sekä kuvia laitteesta esitetty alla.

INSULATION SYSTEM	CLASS H		SUSTAINED SHORT CIRCUIT SELF EXCITED MACHINES DO NOT SUSTAIN A SHORT CIRCUIT CURRENT						
PROTECTION	IP23								
RATED POWER FACTOR	0.8								
STATOR WINDING	DOUBLE LAYER CONCENTRIC								
MAXIMUM OVERSPEED	2250 Rev/Min								
STATOR WDG. RESISTANCE	1.62 Ohms PER PHASE								
ROTOR WDG. RESISTANCE	0.44 Ohms at 22°C								
EXCITER STATOR RESISTANCE	19 Ohms at 22°C								
WEIGHT COMP. GENERATOR	88 kg								
WR <sup>2</sup> INERTIA	0.0923 kgm <sup>2</sup>								
<b>BCA164A</b>	50 Hz						Cont. H 125/40°C		
VOLTAGE SERIES STAR	400/231	440/254					Class - Temp Rise		
VOLTAGE PARALLEL STAR	200/115	220/127	Series Star (V)		380 400 415 440				
VOLTAGE SERIES DELTA	230/115	254/127	Parallel Star (V)		190 200 208 220				
KVA BASE RATING FOR REACTANCE VALUES	8.1	6.2	Series Delta (V)		220 230 240 254				
X <sub>d</sub> DIR. AXIS SYNCHRONOUS	1.800	1.940	kVA		8.1 8.1 8.1 6.2				
X' <sub>d</sub> DIR. AXIS TRANSIENT	0.184	0.199	kW		6.5 6.5 6.5 5.0				
X'' <sub>d</sub> DIR. AXIS SUBTRANSIENT	0.115	0.124	Efficiency (%)		76.5 77.2 77.5 78.0				
X <sub>q</sub> QUAD. AXIS REACTANCE	0.895	0.967	kW Input		7.8 7.8 7.7 7.7				
X'' <sub>q</sub> QUAD. AXIS SUBTRANSIENT	0.207	0.223							
X <sub>L</sub> LEAKAGE REACTANCE	0.072	0.078							
X <sub>2</sub> NEGATIVE SEQUENCE	0.172	0.186							
X <sub>0</sub> ZERO SEQUENCE	0.078	0.084							
REACTANCES ARE SATURATED VALUES ARE PER UNIT AT RATING AND VOLTAGE INDICATED									
T' <sub>d</sub> TRANSIENT TIME CONST.	0.012 s	TELEPHONE INTERFERENCE		THF<2%					
T'' <sub>d</sub> SUB-TRANSTIME CONST.	0.003 s	COOLING AIR		0.071 m <sup>3</sup> /sec 150 cfm					
T' <sub>do</sub> O.C. FIELD TIME CONST.	0.2 s	A.V.R.		STD SX460	OPT AS440				
T <sub>a</sub> ARMATURE TIME CONST.	0.004 s	VOLTAGE REGULATION		± 1.0 % ± 1.0 %					
SHORT CIRCUIT RATIO	1/X <sub>d</sub>		<b>STAMFORD BCA164A</b>						

**Kuva 1** Stamford BCA 164A:n tekniset tiedot /4/



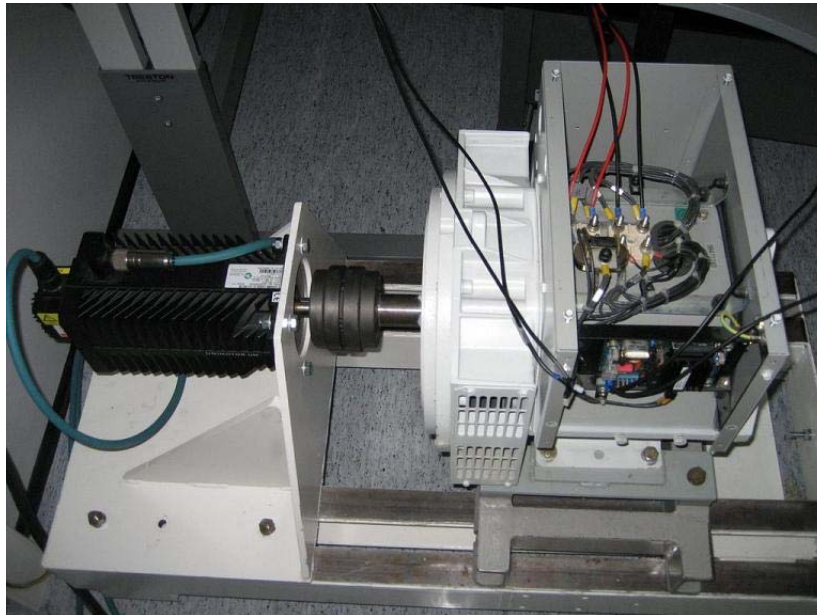
**Kuva 2** Stamfrodin BCA164A:n fyysiset mitat /4/



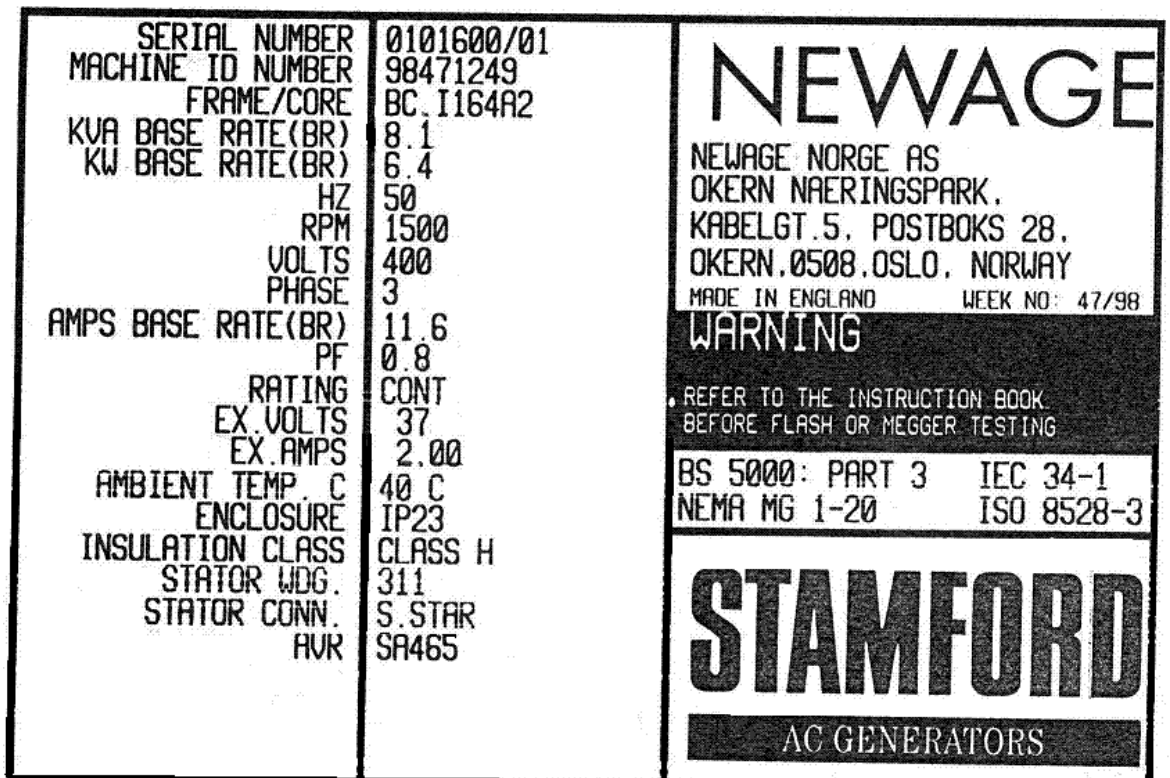
**Kuva 3** Stamfordin BCA164A tahtigeneraattori



**Kuva 4** Stamford BCA164A:n kansi avattuna



Kuva 5 Tahtigeneraattorin kansi avattuna ja sitä pyörittävä servomoottori



Kuva 6 Stamford BCA164A leimauskilpi

## 2 TAHTIGENERAATTORITEORIAA

### 2.1 Nimellisnopeudella pyörivän tahtikoneen toiminnan laskeminen

Mikäli tahtikonetta käytetään sen nimellisnopeudella, voidaan sen päälähdejännite laskea kaavalla 1.

$$E_s = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_k f N \Phi_m \quad (1)$$

jossa  $f_k$  = käämityskerroin

$f$  = taajuus

$N$  = staattorin vaihekäämin sarjaan kytketyt johdinkierrokset

$\Phi_m$  = yhden magneettinavan päävuoto, joka on sama kuin staattorivyöhyden maksimi- eli huippuvuoto  $\delta_m$

Kaavasta yksi on havaittavissa kaikkien muiden jännitteeseen vaikuttavien tekijöiden olevan vakioita, paitsi päävuoto  $\Phi_m$ , joten kaava 1 on yksinkertaistettavissa kaavan 2 muotoon.

$$E_s = k \Phi_m \quad (2)$$

Kaavasta 2 johtuen lähdejännite  $E_s$  on käyrämuodoltaan identtinen  $\Phi_m = f(I_m)$  magnetoimisvirran  $I_m$  muuttuessa. Täten tahtikoneen lähdejännite on ainoastaan verrannollinen magnetointivirtaan  $I_r$ .

Tyhjäkäynnissä tahtigeneraattorin magnetoimisvirta asetellaan yleensä siten, että sen kehittämä päälähdejännite on nimellinen taajuuden ollessa myös nimellinen. Tätä kutsutaan tyhjäkäyntimagnetoinniksi tai tahtikoneen tyhjäkäynnin perusmagnetoinniksi.

Mikäli tahtikonetta pyöritetään tyhjäkäynnillä ilman magnetointia, indusoi roottorin pyörimisliike tahtigeneraattorille remanenssivuon  $\Phi_r$ , jonka vaikutuksesta magnetoimatommankin tahtikoneen liittimissä vaikuttaa jännite. Tutkitun Stamfordin BCA 164A tahtikoneen remanenssivuon suuruus vaihteli noin 10...35 Voltin välillä pyörimisnopeudesta riippuen.

Mikäli koneen pyörimisnopeutta muutetaan nimellisestä, muuttuu myös koneen liitinjännite. Yksinkertaistettuna koneen pyörimisnopeuden suurentuessa liitinjännite kasvaa, kun taas pyörimisnopeuden laskiessa liitinjännite pienenee. Tahtigeneraattorin useat pyörimisnopeudesta riippuvat tekijät, kuten esimerkiksi tahtireaktanssi, hajareaktanssi ja magnetoitivuo, tekevät laskennan muuttuvassa pyörimisnopeuden tilanteissa valmistajan koneesta antamalla tiedoilla mahdottomiksi, ellei konetta varten ole mahdollista tehdä laajoja tutkimuksia sen eri suureiden käyttäytymisestä nopeuden funktiona. /1/

## ***2.2 Napapariluvun vaikutus tahtigeneraattorin pyörimiseen***

Tahtikoneen nimellinen pyörimisnopeus määräytyy sen napapariluvun mukaan. Napapariluku kuvaa tahtikoneessa olevien magneettisten napojen määrää. Tahtikoneen pyörimisnopeus on laskettavissa kaavalla 3.

$$n = \frac{f}{p} \quad (3)$$

Kaavasta 3 on jodettavissa yleisemmin käytössä oleva kaava, jolla kyetään laskemaan pyörimisnopeus käyttäen rpm-arvoja.

$$n = \frac{60 \cdot f / \text{Hz}}{p} \frac{r}{\text{min}} \quad (4)$$

Tahtikoneita rakennettaessa napapariluvun ylittäessä  $p > 15$ , ei enää rakenneta parittoman napapariluvun omaavia koneita, joka johtuu generaattorin rakenteellisista syistä. Eri napapariluvun omaavien tahtikoneiden pyörimisnopeudet ovat esitetty taulukossa 1.

/ 1 /

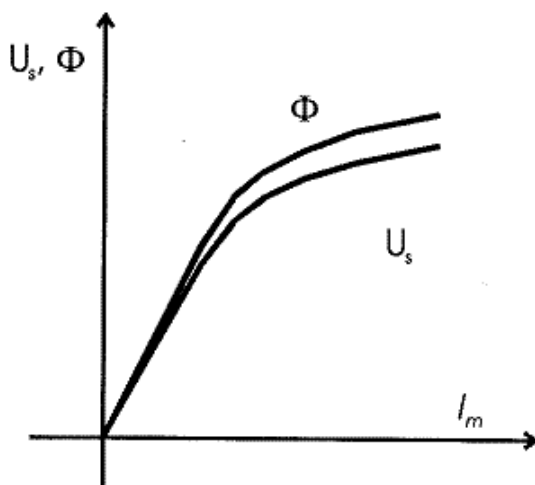
**Taulukko 1** Tahtikoneiden napaluvun vaikutus pyörimisnopeuteen /1/

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

## 2.2 Magnetointisäädön vaikutus tahtikoneen liitinjännitteen suuruuteen

Magnetointia säätämällä voidaan tahtikoneen liitinjännitettä muuttaa lineaarisesti, ennen koneen kyllästysalueen saavuttamista. Kyllästysalueelle saavuttaessa kone tulee magneettisesti kylläiseksi, eikä sen magnetoinnin määrää ole enää mahdollista suuresti lisätä. Mikäli sitä kuitenkin lisätään, vaaditaan huomattavasti suurempia magnetointivirtoja kuin lineaarisessa tilanteessa ja yritys saattaa johtaa tahtikoneen magnetointikäymysten

palamiseen ennen kuin haluttu säätötilanne saadaan aikaiseksi. Tilannetta selventää kuva alla 7. /3/



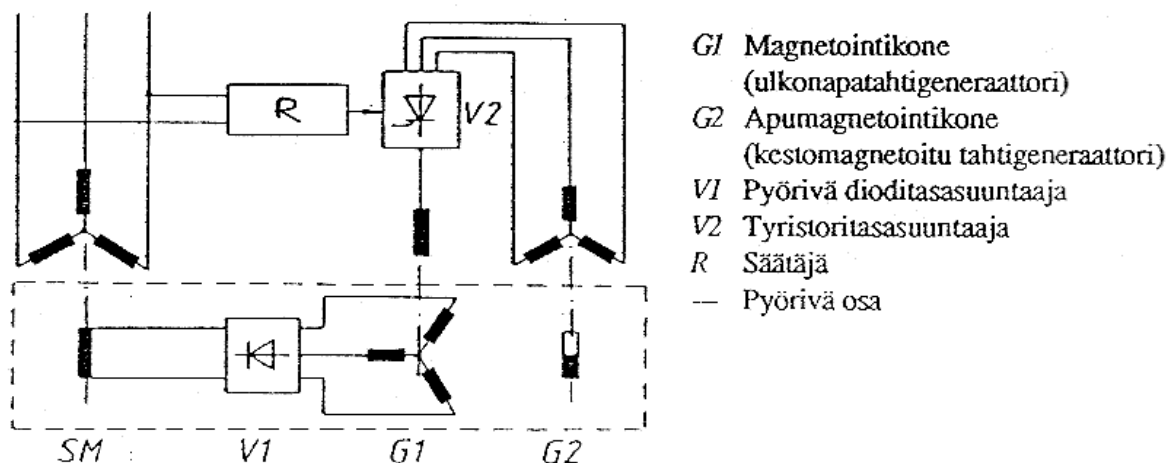
**Kuva 7** Magnetoinnin säädön vaikutus liitinjännitteeseen /2/

## 2.2 Magnetoinnin rakenne tahtikoneessa

Magnetoitinkäämitys on käämitys, joka on valmistettu suuresta kierrosmäärästä magnetoitinkäämiä. Kun magnetoitinkäämiin syötetään tasavirtaa, saadaan aikaiseksi magneettivuo tahtikoneen sisälle. Tahtikoneen magnetoitinkäämitykset sijaitsevat koneen roottorissa, jolloin syöttö tapahtuu useissa tapauksissa kahteen akseliin kiinnitetyillä liukurenkailla ja näitä vasten laahavilla hiiliharjoilla. Tällaisia tahtikonetta kutsutaan *harjalliseksi*.

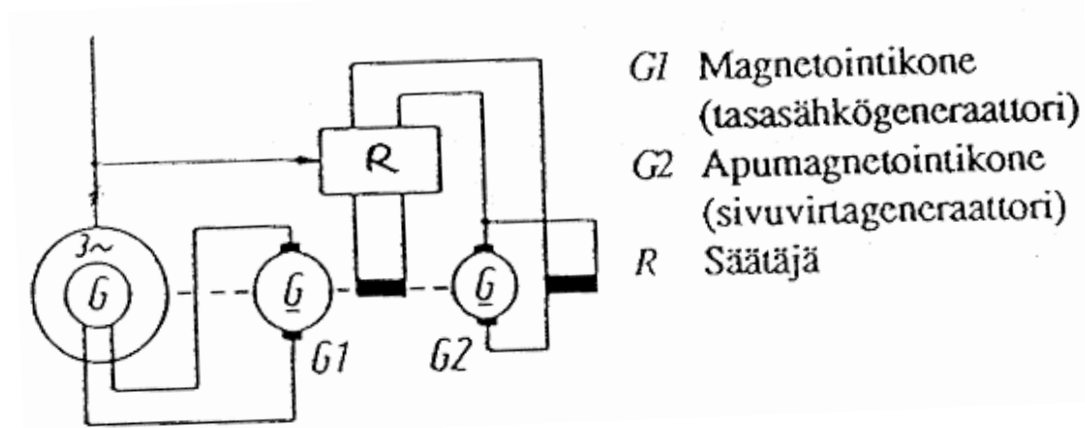
Tahtikoneista on myös olemassa konstruktioita, joissa magnetoitinvirta syötetään ilman hiiliharjoja, tällöin tahtikonetta kutsutaan *harjattomaksi*. Harjattomien tahtikoneiden rakenne poikkeaa huomattavasti harjallisesta koneesta. Tällöin magnetoitinkäämitys onkin staattorissa, jolloin käytetään ns käänteisrakenteista tahtikonetta (ulkonapakonetta). Tällaisessa koneessa roottorissa on kolmivaihekäämitys, jonka tuottama vaihtojännite on roottorissa sijaitsevalla tasasuuntaajalla tasasuunnattu. Tämä tasajännite

syötetään varsinaiseen magnetoitinkäämitykseen, jolloin koneessa ei tarvita liukurenkaita ollenkaan. Tätä konstruktiota ei usein havaitse itse generaattorista, sillä se on usein rakennettu koneen sisälle. Harjattomasta magnetoinnista alla kuva 8.



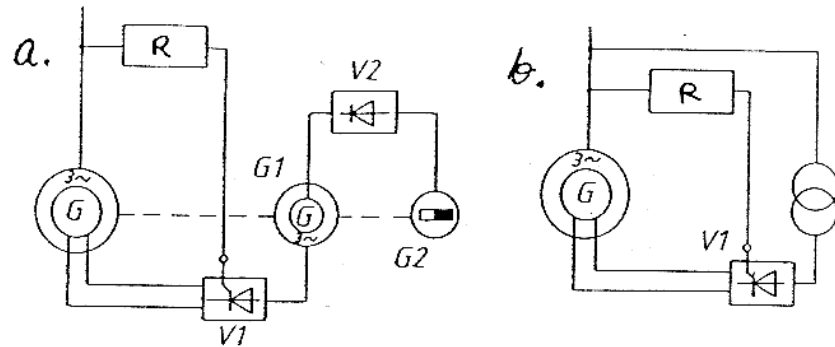
**Kuva 8** Harjaton magnetointi / 3 /

Menneisyydessä magnetoitivirran tuottamiseen käytettiin pääasiassa koneen roottoriakselille kytkettyä magnetoitikonetta (tasasähkögeneraattoria), jota magnetoiti sivuvirtageneraattori. Alla kyseistä magnetointia kuvaava kuva 9.



**Kuva 9** Tasasähkomagnetointi-kone

Nykyisin yleisimpi tapa on syöttää tyristori-ohjatusta tasasuuntaussillasta tarvittava magnetointi magnetointikäämityksille, josta alla kuva 10.

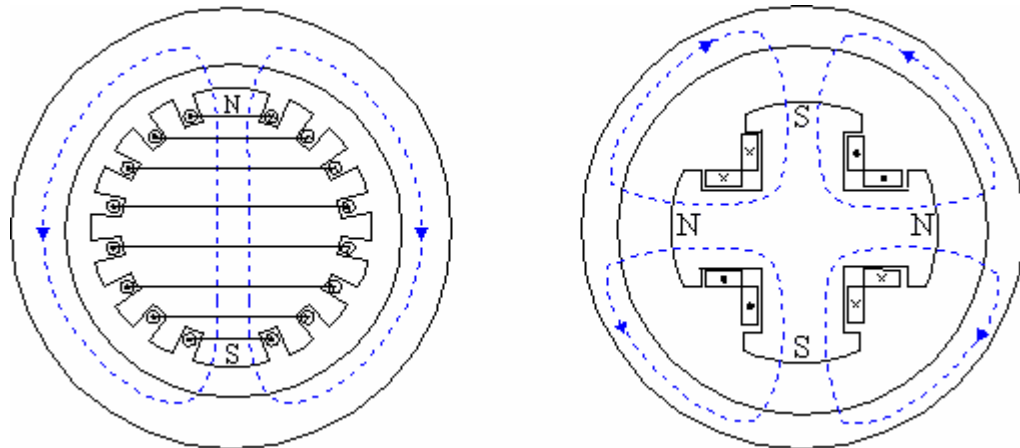


*G1* Magnetointikone  
(tahtigeneraattori)  
*G2* Apumagnetointikone  
(kestomagnetoitu tahtigeneraattori)  
*V1* Tyristoritasasuuntaaja  
*V2* Dioditasasuuntaaja  
*R* Säätäjä

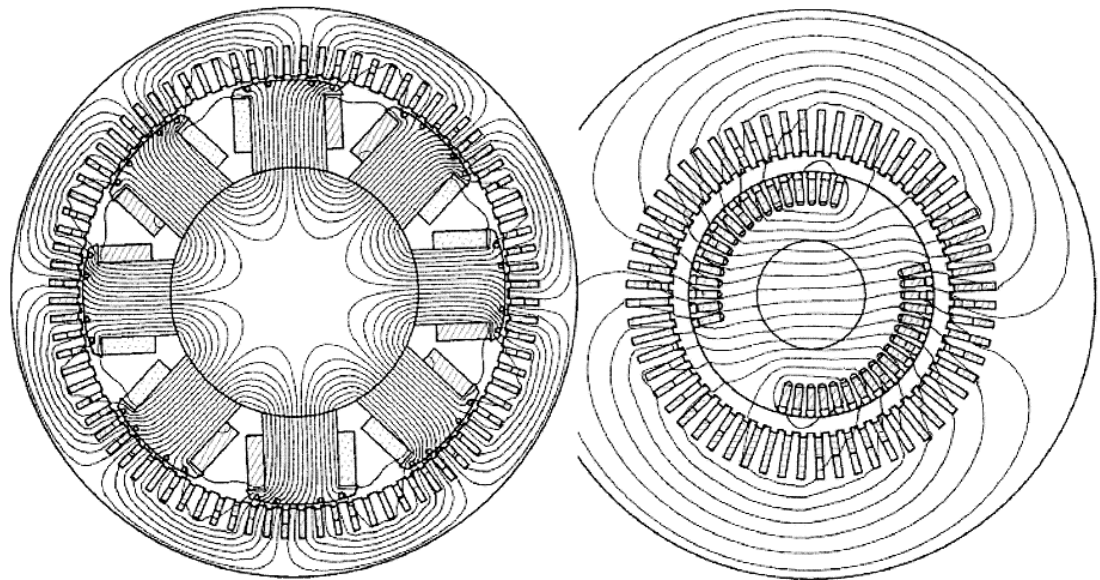
*T* Muuntaja  
*V1* Tasasuuntaaja  
*R* Säätäjä

**Kuva 10** Magnetoinnin syöttö tasasuuntajalta a) magnetointikoneesta b) verkosta / 3 /

Avonapaisissa tahtikoneissa on roottorirunkoon kiinnitetty useita yksittäisiä napoja ja magnetointikäämitys koostuu näiden ympärillä olevista magnetointivyyhdeistä. Umpinapaisissa roottorirungoissa on magnetointikäämitys sijoitettu roottorin pinnassa oleviin uriin.



**Kuva 11** kenttäkuva tahtigeneraattorin magneettikenttien muodostumisesta /  
8 /

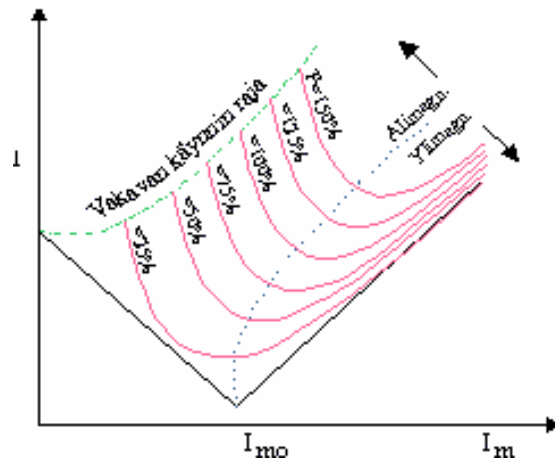


**Kuva 12** Kenttäkuva avo- ja umpinapaisen tahtigeneraattorin  
magneettikenttien muodostumisesta. Kuvan viivat osoittavat  
magneettikentän kulun roottori- ja staattoriraudassa sekä koneen ilmvälissä  
/ 3 /

## **2. 3 Magnetoinnin käyttö loistehon kompensointiin**

Tahtikoneen yksi hyvistä ominaisuuksista on sen kyky kompensoida loistehoa. Loistehon kompensointi on toteutettavissa esimerkiksi tilanteessa, jossa tahtigeneraattori tuottaa jäykkään verkkoon tehoa ja ottaa samalla magnetointinsa verkosta. Tällöin edelleen kone edelleen noudattaa kaavan 2 lainalaisuutta, mutta magnetointivirran lisäys ei pysty lisäämään liitinjännitettä vastassa olevan jäykän verkon vuoksi. Tällöin koneen staattorin virta muuttuu siten, että jännitehäviö koneen reaktansseissa ja resistansseissa kumoaa liitinjännitteen muutoksen. Kyseisessä tilanteessa tahtikonetta pyörittävä voimakone määrää koneen tuottaman pätötehon suuruuden, eli staattorin pätöteho-komponenttiin ei voida vaikuttaa.

Magnetoimisvirran muuttaminen vaikuttaa tällöin ainoastaan staattorivirran loisteho-komponenttiin. Täten mikäli konetta yli-magnetoidaan, alkaa kone tuottamaan induktiivista loistehoa verkkoon, kun taas ali-magnetoituna koneen magnetointiin syntyy vajaus, jonka tahtigeneraattori korjaa ottamalla verkosta induktiivista loistehoa, eli se kompensoi loistehoa verkosta. Magnetointia voidaan tosin pudottaa kuormituksesta vain tiettyyn rajaan asti, muuten kone putoaa tahdistaa. Tätä tilannetta voidaan mallintaa tutkimalla koneen staattorivirran muutosta magnetoimisvirran funktiona, tätä käyrästä kutsutaan V-käyräksi. /8/



**Kuva 13** Tahtikoneen V-käyrästä esimerkki /8/

Kuten edellä mainittiin tahtigeneraattoria kuormitettaessa koneen napakulma  $\delta$  kasvaa.  $\delta$  tarkoittaa myös samaa asiaa kuin roottorin indusoiman jännitteen  $U_r$  ja generaattorin napajännitteen  $U_s$  välinen kulma, josta johtuen generaattorin verkkoon syöttämä pätöteho kasvaa kaavan 3 mukaisesti.

$$P = 3 \cdot \frac{U_r U_s}{X_d} \sin \varphi \quad (3)$$

jossa  $X_d$  on koneen tahtireaktanssi.

Mikäli teho kasvaa liian suureksi kasvaa myös napakulma  $\delta$ . Napakulman arvon kasvaessa yli  $90^\circ$  kone putoaa tahdistasta, jolloin staattorin ja roottorin magneettikenttien välinen yhteys katkeaa.

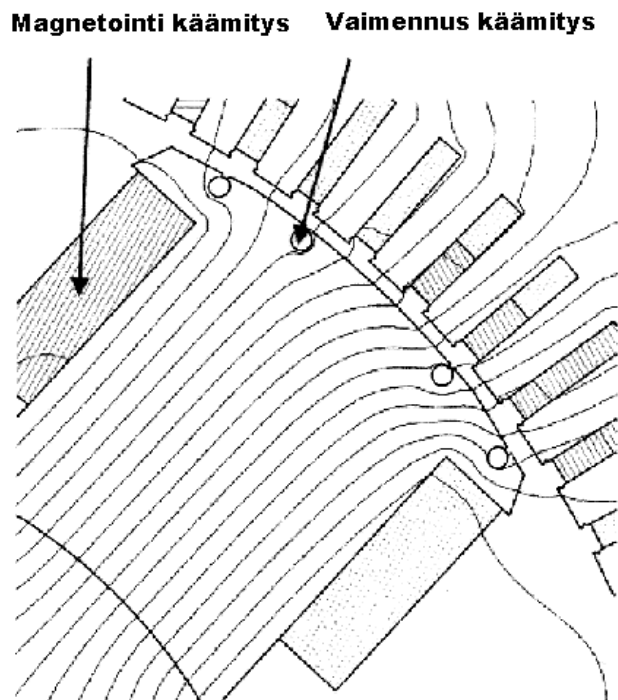
Käytännössä koneen tahdistasta putoaminen johtaa siihen että kone toimii vuorotellen generaattorina ja moottorina riippuen koneen magneettinapojen asennosta. Tällöin verkon kannalta kone nähdään välillä tuottavana - ja välillä kuluttavana yksikkönä. Verkolle tämä aiheuttaa pahimmillaan suuriakin jännite- ja tehoheilahteluita, täten mikäli tahtikone putoaa tahdistasta on se irroitettava verkosta ja tahdistettava siihen uudestaan. Tahtikonetta

voidaan suojata tällaisessa tilanteessa esimerkiksi releellä, joka tahdistaa putoamisen aikana katkaisee magnetoinnin, jolloin Tahtikone alkaa käyttäytymään epätahtimoottorin tavoin häkkikäämityksensä varassa. Tällöin moottori ei aiheuta muuttuvia jännite- eikä tehoheilahteluita ja kuormitusta pienentämällä tai verkosta kone irrottamalla, on se mahdollista tahdistaa ja kytkeä uudelleen verkkoon.

## **2.4 Tahtigeneraattorin vaimennuskäämitys**

Tahtigeneraattorin roottorissa on magnetointikäämityksen lisäksi vaimennuskäämitys. Tämä vaimennuskäämitys on oikosuljettu, ja se sijaitsee avonapakoneessa napakengän pinnalla ja umpinapakoneessa joko magnetointikäämin kanssa samassa urassa tai omassa erillisessä urassaan.

Dynaamisissa muutosilmiöissä, joita ovat esimerkiksi kuormituksen päälle- ja poiskykeytyminen sekä mahdolliset vikatilanteet, on vaimennuskäämityksen tehtävänä ottaa näiden ilmiöiden aiheuttamia muutoksia vastaan. Aikavakio vaimennuskäämityksellä on erittäin lyhyt ja sen käämityksen avulla voidaan tuottaa hetkellisten kuormitusmuutosten tarvitsema dynaaminen oikosulkuteho. Vaimennuskäämityksen sijoittumista avonapakoneen varsiin kuvaa alla kuva 14.



**Kuva 14** Vaimennuskäämityksen sijoitus napakengän pinnalle /3/

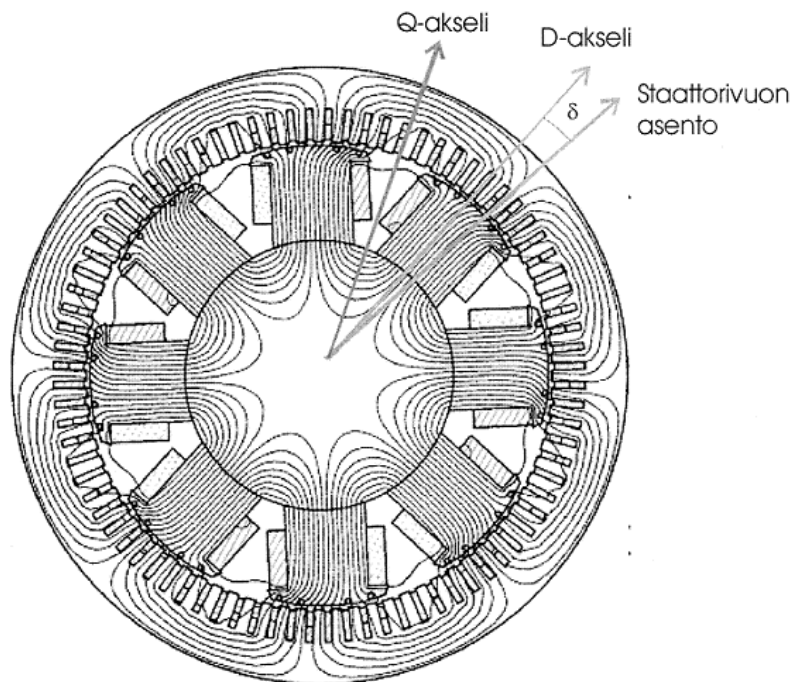
## **2.5 D- ja Q-magnetointi akselit**

Tutkittava tahtigeneraattori oli avonapainen. Tämä tarkoittaa sitä että tahtikoneen roottori ei ole sylinterimäinen, vaan koostuu erillisistä avonavoista, joiden ympärille magnetointikäämitys on käämitty. Käämitys on rakennettu joko lattakuparista tai muotolangasta / 3 /

Mikäli avonapakonetta halutaan magneettisesti mallintaa, on huomioitava sen roottorin magneettikentän epäsymmetrisyys. Magneettikentän ääripääit voidaan jakaa avonapakoneessa raudan kautta hyvin johtuvaan magneettivuon akseliin, ns d-akseliin sekä suuren ilmavälin lävitse johtuvaan magneettivuohon, niin sanottuun q-akseliin. Roottori on täten mahdollista saada pyörivään liikkeeseen rautanavan hakeutuessa magneettikenttään

nähdessä ideaaliseen asentoon, jolloin pyörivä magneettikenttä vetää perässään naparautoja voimavaikutuksen ansiosta. Kuormitettaessa tahtigeneraattoria magneettikenttien pyörimisnopeus pysyy samana, mutta niiden välinen kulma,  $\delta$  kasvaa. Tällä kulmalla voidaan myös kuvata koneen kuormittuneisuutta. Mikäli kulma kasvaa yli  $90^\circ$ , eivät magneettikentät enää kykene pyörimään samalla nopeudella yli-kuorman vuoksi, jolloin generaattori on irroitettava käytöstä. /3/

D- ja Q-magneettiakseleita kuvaa alla oleva kuva 15. Kuvan tilanteessa tahtigeneraattori on kuormitettuna, jolloin D-akselin ja staattorivuon välillä on kulma  $\delta$ , mikäli tahtigeneraattori olisi kuormittamaton, olisi D-akselin ja Staattorivuon välinen kulma 0. Kuva 9 selvittää myös Q-akselin muodostumisen magneettisesti epäsymmetrisen avonaparoottorin ilmaväliin.



**Kuva 15** Avonapakoneen DQ-akselit / 3 /

## **2. 6 Tahtigeneraattorin osoitinpiirros**

Usein tahtikoneita käsiteltäessä kuvataan niiden toimintaa osoitinpiirroksena. Osoitinpiirros on eräänlainen tapa yhdistää edellä kerrottuja teorioita siten että yksinkertaisella osoitinpiirroksella voimme mallintaa tahtikonetta kuormitetussa tilanteessa.

Tilanne nopeasti yksinkertaistettuna voidaan muistaa muodostuvan staattorijännitteestä, magnetointijännitteestä, sekä kuorman aiheuttaneesta vektorista. Tällä yleiskuvalla kyetään jo käsittämään ja tulkitsemaan osoitinpiirroksen muovautumista hyvin pitkälle. Tässä työssä on tarkoituksena käsitellä tahtikonetta resistiivisellä kuormalla, jolloin osoitinpiirrokselta muovautuu yksi sen muutamasta erikoistilanteesta. Kuormitettaessa tahtikonetta mielivaltaisella kuormalla, on osoitinpiirroksen muovautuminen hieman monimutkaisemman näköinen.

Tahtikoneen osoitinpiirroksen yksi johdannainen on PQ-diagrammi, joka on käytännöllinen työkalu tahtikoneen toimintapisteiden mallinnuksessa.

### **2.6.1 Osoitinpiirros**

Tahtikoneen osoitinpiirroksen muovautuminen alkaa napakulman tahtikoneen magneettikenttien käyttäytymisien tuntemisesta. Kuten edellä on mainittu, tahtikonen pyöriessä tyhjäkäynnillä, ei sen roottorin ja staattorin välisillä magneettikentillä ole kulma-eroa, eli napakulmaa tällöin myös magnetoinnin arvo on käytännössä nolla, jolloin staattoriin indusoitunut jännite on identtinen staattorin liitinjännitteen kanssa. Tällöin voimme piirtää osoitinpiirroksen kuva 16 mukaan.



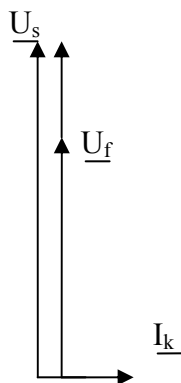
**Kuva 16** Tyhjäkäyvän tahtikoneen staattorijännitteiden osoitin piirros

Tahtikoneen osoitintilanne muuttuu kun lisäämme tilanteeseen kuormitusta. Tällöin saavuttaaksemme yhtä suuren liitinjännitteen on magnetointia lisättävä. Koneen sisäinen indusoitunut jännite siis tippuu. Tämä on kompensoitava magnetoinnin säädöllä, sillä muuta liitinjännitteen arvo putoaa. Tilanteen tarkastelu kolmessa ääritapauksessa, eli, induktiivisella, kapasitiivisella, sekä resistiivisellä kuormalla selvittävät tilannetta parhaiten.

## 2.6.2 Osoitinpiirroksen ääritapaukset

Osoitinpiirroksia yksinkertaistuksen vuoksi, on käsiteltävä tahtikone ajateltu omaavan pelkästään  $X_d$  komponentin, jättäen  $R_s$  komponentti huomioimatta.

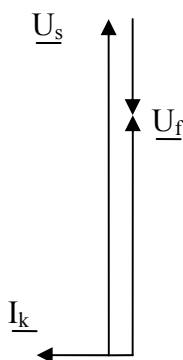
### INDUKTIIVINEN



**Kuva 17** Induktiivisen kuorman kuvaaja

Mikäli tahtikonetta käytetään täysin induktiivisella kuormalla, on sen tuotettava induktiivista loistehoa magnetointinsa avulla. Koneiden mitoitusarvot ovat yleensä ilmoitettu tehokertoimen 0,8 arvolla, joten, tehokertoimen ollessa lähes nolla on magnetointia lisäävä rajusti. Tämä johtuu tilanteesta, jossa oletusarvoisesti magnetointi tuottaa ainoastaan energiaa sähkökentälle, mutta äärimmäisen induktiivisen kuorman voidaan nähdä magnetoinnin silmin siten että koneen magneettikentän määrää on rajusti lisäävä. Magnetointia lisäämällä saamme koneen tuottamaan induktiivista loistehoa, kun staattorin virran ja jännitteen välinen kulma muuttuu.

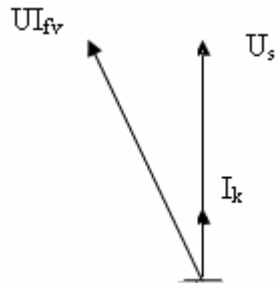
### KAPASITIIVINEN



**Kuva 18** Kapasitiivinen kuormitus

Mikäli tahtikonetta ajetaan täysin kapasitiivisella kuormalla, on koneen nimellisen magnetoinnin tarve huomattavasti pienempi kuin normaalisti. Tämä johtuu tahtikoneen ominaisuudesta, jossa se kompensoi itse verkosta ottamalla loistehoa oman magnetointinsa. Tahtikone siis kuluttaa induktiivista loistehoa, tätä ominaisuutta käytetään hyväksi kun tahtikoneita käytetään kompensoimaan verkon loistehoa.

## RESISTIIVINEN

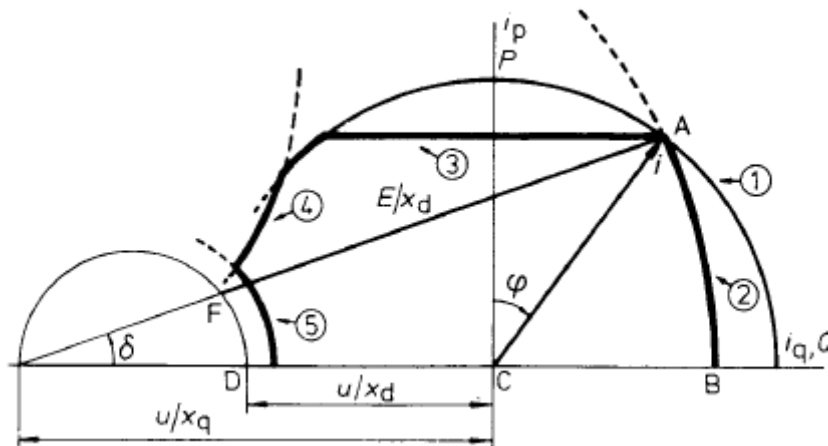


**Kuva 19** Resisttiivinen kuormitus tahtikoneella

Resistiivistä kuormaa käytettäessä, on staattorin liitinjännitteen vaihesiirto kuormitusvirran kanssa 0.

### 2.6.3 PQ-diagrammin muodostuminen

Alla esitetty tahtikoneen PQ-diagrammin muodostumiseen liittyvät tekijät:



**Kuva 20** Tahtikoneen PQ-diagrammin muodostuminen /10/

Samasta käytetystä lähteestä on alle liitetty kuvan 20 merkkien selitykset.

A	= kuormituspiste ( nimellikäyttöpiste ),
B	= tyhjäkäyntipiste nimellismagnetoinilla,
C	= tyhjäkäyntipiste tyhjäkäyntimagnetoinnilla,
D	= tyhjäkäyntipiste ilman magnetointia,
$\overline{CA}$	= staattorivirta ( = $i$ ),
$\overline{FA}$	= nimellismagnetointivirta,
$\overline{DC}$	= tyhjäkäyntimagnetointivirta,
1	= vakiostaattorivirtakäyrä, staattorin lämpenemisen asettama raja,
2	= vakiomagnetointikäyrä, roottorin lämpenemisen asettama raja,
3	= voimakoneen pätötehoraja,
4	= käytännön stabiilisuusraja,
5	= alimagnetointiraja,
$u$	= staattorijännite,
$P$	= pätöteho,
$Q$	= loisteho,
$I$	= staattovirta ( $i_p$ = pätövirta $i_q$ = loisvirta),
$E$	= tyhjäkäyntijännite nimellismagnetoinnilla,
$x_d$	= pitkittäinen tahtireaktanssi,
$x_q$	= poikittainen tahtireaktanssi,
$\delta$	= kuormituskulma ( napakulma ),
$\varphi$	= tehokulma ( $\cos \varphi$ = tehokerroin ),
( tehot, virrat, jännitteet ja reaktanssit suhteellisarvoja ).	

**Kuva 21** Kuvan 20 merkintöjen selvittäminen /10/

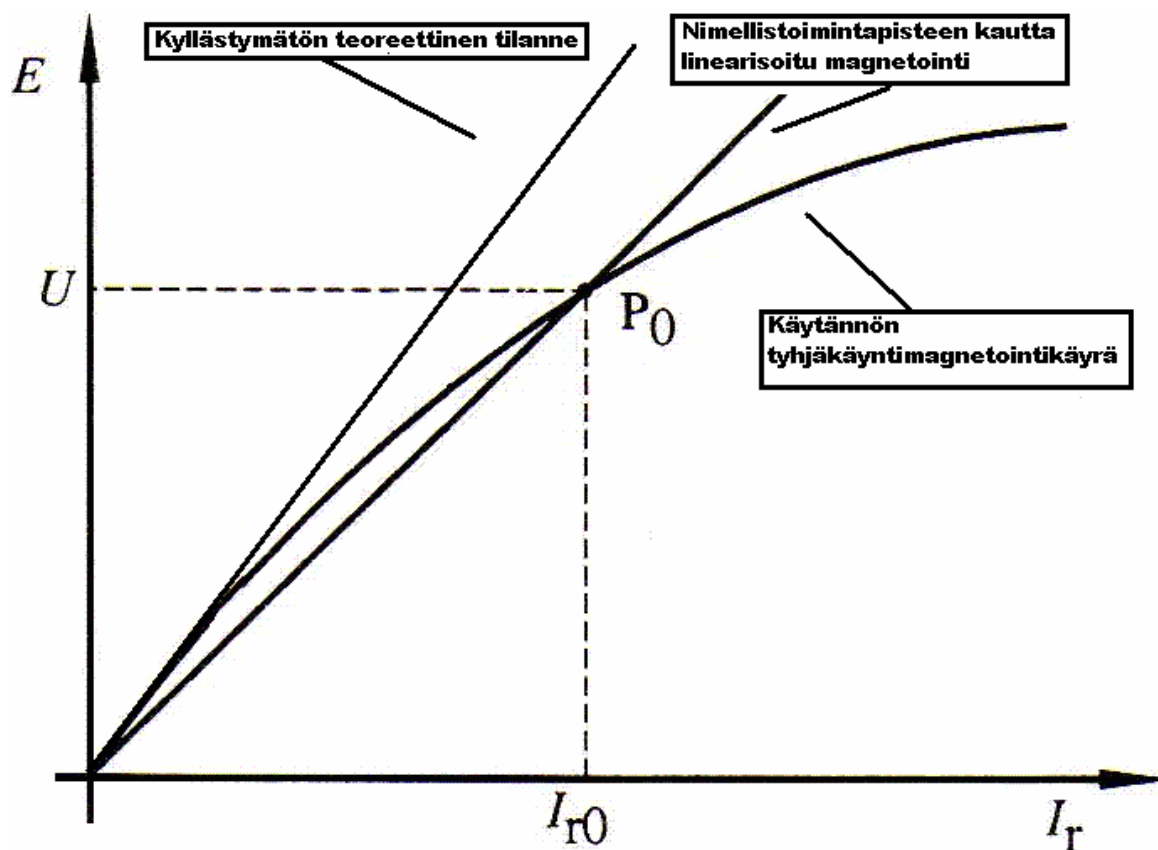
Mikäli PQ-diagrammia karkeasti tarkastellaan tehdyn työn suhteen, nousee merkittävimiksi vektoreiksi vektori DC, joka kuvaa tyhjäkäyntikokeessa aikaansaataavaa tyhjäkäyntimagnetointia, sekä vektori CA, joka muodostaa staattorivirran vektorin. Erilaisesti konetta kuormittamalla CA vektori kääntyy riippuen kuormituksen tehokerroimesta. Täten myös CA-vektori määrää magnetoinnin suuruuden riippuen kuormitettavuudesta. Mikäli kuormitus on kapasitiivista, osoittaa CA-vektori Q-akselin vasemmalle puolelle, jolloin magnetointia kuvaava FA-vektori on huomattavasti lyhyempi. Vastaavasti mikäli CA-vektori osoittaa kuormituksen olevan hyvin induktiivista, muodotuu FA-vektorista huomattavasti pidempi.

### 3 TYHJÄKÄYNTI JA OIKOSULKUKOKEET

Tahtikonetta tutkittaessa ennen suoritettavia kuormituskokeita, sille suoritettiin tyhjäkäynti- ja oikosulkukokeet. Näillä suoritetuilla kokeilla saatiin tuloksiksi tyhjäkäynti- sekä kuormitustilanteen magnetoinnin mallintamista varten arvoja.

#### 3.1 Tyhjäkäyntikoe

Tyhjäkäyntikokeessa luodaan keinotekoinen kuormitustilanne, jossa saavutetaan nimellisjännite tyhjäkäynnin magnetoinnilla. Käyrämuoto on teoreettisesti alkuun lineaarisesti kasvava, jonka jälkeen käyrämuoto alkaa taipumaan lähestyen horisontaalista viiva-tasoa johtuen raudan magneettisesta kyllästymisestä. Mikäli tahtikone ei kyllästyisi magneettisesti, olisi tyhjäkäyntikäyrä täysin lineaarinen, jolloin tahtikonetta olisi teoreettisesti mahdollista pyörittää täysin lineaarisesti tyhjäkäyntimagnetointia säätämällä. Tyhjäkäyntikäyrän magnetointi voidaan myös linearisoida esimerkiksi nimellisen toimintapisteen kautta, jolloin saavutetaan toimintapisteen lähellä toimiessa oikein toimiva magnetoinnin käyrä, mutta siitä erkaannuttaessa virheen suuruus kasvaa. Kuva tapauksista esitetty alla kuvassa 22.



**Kuva 22** Tyhjääyntikäyrän teoreettinen-, linearisoitu, sekä käytännön käyttäytyminen

Eri nopeuksilla pyörivän tahtikoneen tyhjääynti magnetoinneista muodostuvasta käyräparvesta on yksinkertaista pyrkiä arvioimaan myös kuormitetun tahtikoneen käyttäytymistä magnetointinsa suhteen. Koetta ei voinut suorittaa yhtä kattavasti kaikilla mittausalueilla, koska käytettyjen mittavälineiden tarkkuus ja virta-rajat toimivat rajoittavina tekijöinä.

Tyhjääyntikokeella kyetään mallintamaan eri nopeustilanteissa tahtikoneen vaatima tyhjääyntimagnetointi. Tätä magnetointia voidaan käyttää osaltaan suuntaa antavana tekijänä arvioidessa koneen kuormitettavuutta muuttuvanopeuksisena, sekä käyttää PQ-diagrammin muodostamiseen, kun tyhjääyntimagnetointia otetaan siinä huomioon.

### 3.1.1 Tyhjäkäyntikokeen mittaustulokset

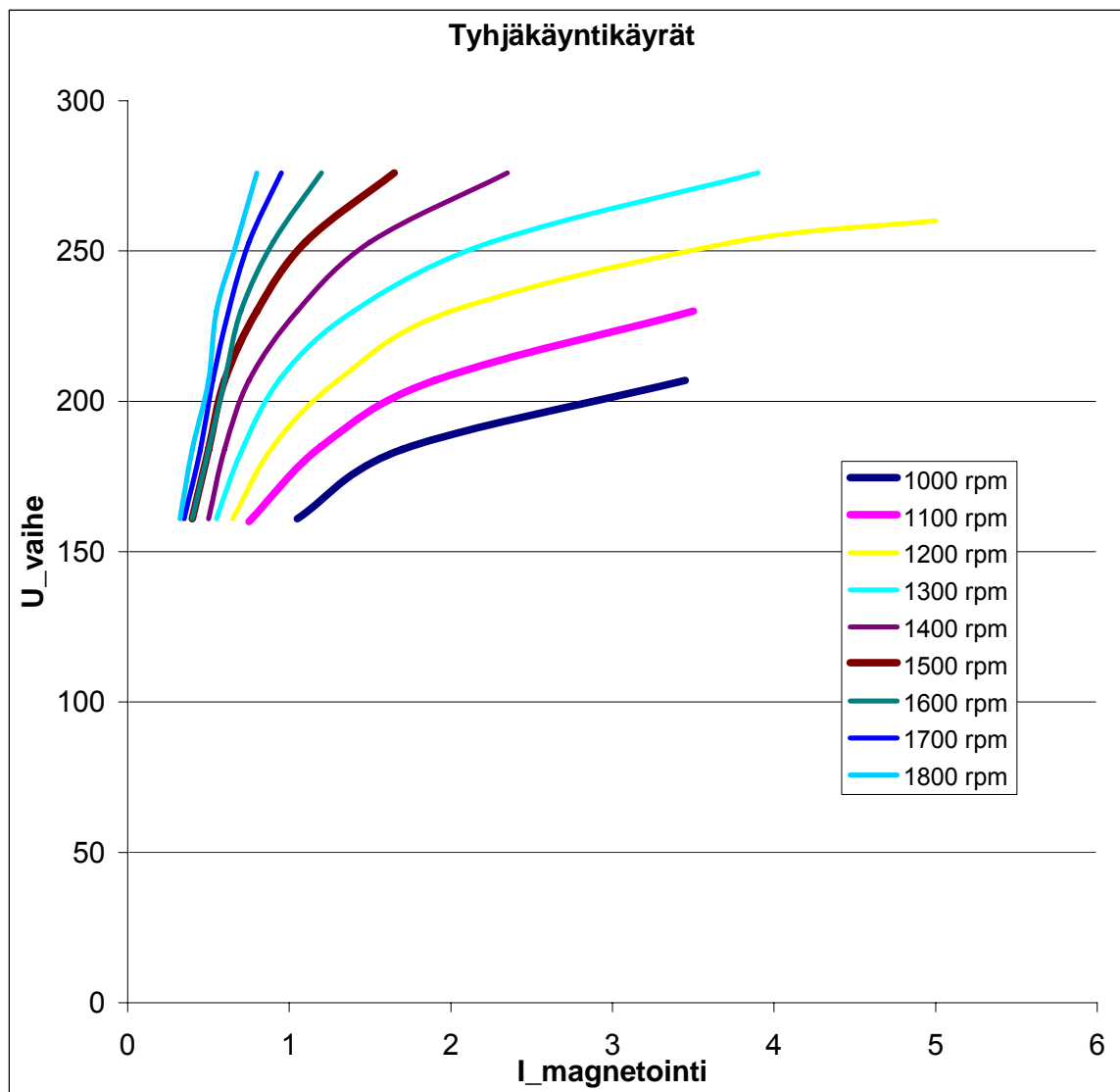
**Taulukko 2** Tyhjäkäynti kokeen mittaustulokset 1000-1400 rpm

magnetointi		Vaihejännitteet [V]			Taajuus ja nopeus	
Virta [I]	Jän.[V]	U	V	W	Hz	rpm
1,1	20,8	161,0	161,0	161,0	33,3	1000,0
1,7	34,3	184,0	184,0	184,0	33,3	1000,0
3,5	70,2	207,0	207,0	207,0	33,3	1000,0
0,8	15,7	160,0	160,0	160,0	36,6	1100,0
1,2	24,0	185,0	185,0	185,0	36,6	1100,0
1,9	39,0	207,0	207,0	207,0	36,6	1100,0
3,5	72,2	230,0	230,0	230,0	36,6	1100,0
0,7	14,6	161,0			40,0	1200,0
0,9	19,0	185,0	185,0	185,0	40,0	1200,0
1,3	27,6	207,0	207,0	207,0	40,0	1200,0
2,0	42,3	230,0	230,0	230,0	40,0	1200,0
3,8	79,6	253,0	253,0	253,0	40,0	1200,0
5,0	110,0	260,0			40,0	1200,0
0,6	12,4	161,0	161,0	161,0	43,3	1300,0
0,7	15,3	183,0	183,0	183,0	43,3	1300,0
1,0	20,5	208,0	208,0	208,0	43,3	1300,0
1,4	29,1	230,0	230,0	230,0	43,3	1300,0
2,3	46,3	253,0	253,0	253,0	43,3	1300,0
3,9	81,9	276,0	276,0	276,0	43,3	1300,0
0,5	10,2	161,0	161,0	161,0	46,6	1400,0
0,6	12,8	184,0	184,0	184,0	46,6	1400,0
0,8	16,2	207,0	207,0	207,0	46,6	1400,0
1,1	21,3	230,0	230,0	230,0	46,6	1400,0
1,5	30,6	253,0	253,0	253,0	46,6	1400,0
2,4	48,0	276,0	276,0	276,0	46,6	1400,0

**Taulukko 3** Tyhjäkäyntikokeen mittaustulokset 1500-1800 rpm

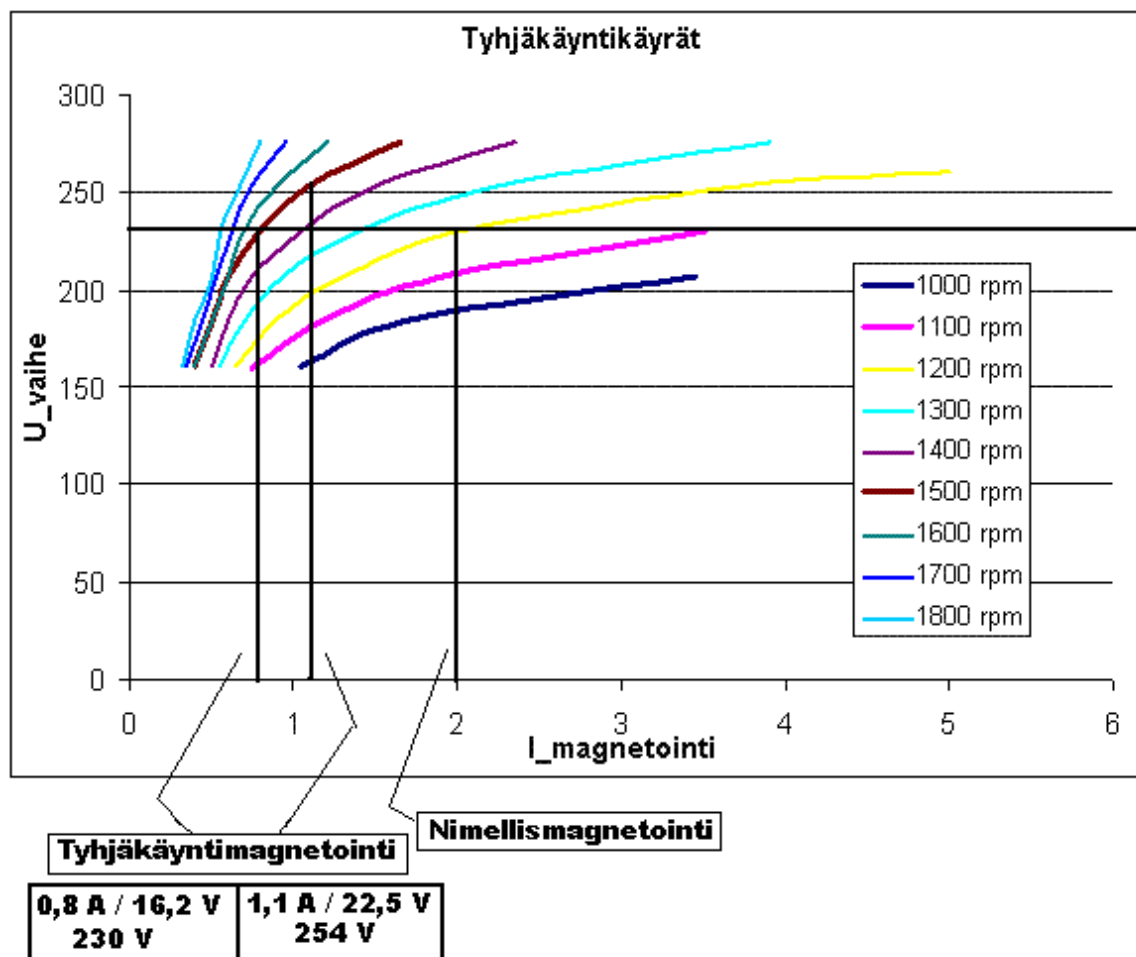
magnetointi		Vaihejännitteet [V]			Taajuus ja nopeus	
Virta [I]	Jän.[V]	U	V	W	Hz	rpm
0,4	9,3	161,0	161,0	161,0	50,0	1500,0
0,5	11,3	184,0	184,0	184,0	50,0	1500,0
0,6	13,4	207,0	207,0	207,0	50,0	1500,0
0,8	16,2	230,0	230,0	230,0	50,0	1500,0
1,1	22,5	253,0	253,0	253,0	50,0	1500,0
1,7	32,8	276,0	276,0	276,0	50,0	1500,0
0,4	8,3	161,0	161,0	161,0	53,4	1600,0
0,5	9,8	184,0	184,0	184,0	53,4	1600,0
0,6	11,6	207,0	207,0	207,0	53,4	1600,0
0,7	13,7	230,0	230,0	230,0	53,4	1600,0
0,9	17,4	253,0	253,0	253,0	53,4	1600,0
1,2	23,5	276,0	276,0	276,0	53,4	1600,0
0,4	7,2	161,0	161,0	161,0	56,6	1700,0
0,5	8,6	184,0	184,0	184,0	56,6	1700,0
0,5	10,3	207,0	207,0	207,0	56,6	1700,0
0,6	12,1	230,0	230,0	230,0	56,6	1700,0
0,8	14,5	253,0	253,0	253,0	56,6	1700,0
1,0	18,5	276,0	276,0	276,0	56,6	1700,0
0,3	6,6	161,0	161,0	161,0	60,0	1800,0
0,4	7,6	184,0	184,0	184,0	60,0	1800,0
0,5	9,3	207,0	207,0	207,0	60,0	1800,0
0,6	10,9	230,0	230,0	230,0	60,0	1800,0
0,7	12,9	253,0	253,0	253,0	60,0	1800,0
0,8	15,6	276,0	276,0	276,0	60,0	1800,0

Mitatuista arvoista on piirrettävissä tyhjäkäynnin magnetointia kuvaava käyräparvi. Kuva esitetty alla kuvassa 23. Taulukosta 3 esiin nostetut tyhjäkäynnin magnetoinnin arvot 230 ja 254 voltilla on käsitelty tarkemmin alla kuvassa 24, jossa ne on myös eritelty tyhjäkäyntikäyräparvesta.



**Kuva 23** Magnetointivirta vaihejännitteen funktiona

Muodostuvasta käyräparvesta on havaittavissa nimelliskojeudella 1500 rpm pyöriessään koneen ottavan noin yhden ampeerin tyhjäkäyntimagnetoinnin. Kyllästymisestä johtuen koneen magnetoinnin tarve kasvaa nopeasti huomattavasti yli oletetun sallitun rajan jo kun kierrosnopeus putoaa 100 rpm, eli taajuuteen tulee noin 3,3 Hz:n pudotus. Koneen kierrosten noustessa toisaalta havaitaan magnetoinnin tarpeen vähentyvän, jolloin oletusarvoisesti koneen pyörimisnopeus ei ole ylinopeudesta magnetointinsa suhteen niin kriittinen kuin alinopeudesta.



**Kuva 24** Tyhjäkäyntikokeen kuvaaja

Mikäli 230 Voltin tuloksia verrataan nimellismagnetointiin, havaitaan tyhjäkäyntimagnetoinnin olevan suurinpiirtein puolet koneen nimellisestä magnetoinnista.

### 3.2 Oikosulkukoe

Oikosulkukokeen koejärjestelyssä asetetaan tahtikone napa-oikosulkuun, jolloin hyvin pienellä oikosulkutilan impedanssilla on koneen nimellisvirta saavutettavissa hyvin pienillä magnetoinnin arvoilla. Täten oikosulkukokeella kyetään mallintamaan kuormitus magnetointia.

**Taulukko 4** Oikosulkukoe 1000-1200 rpm

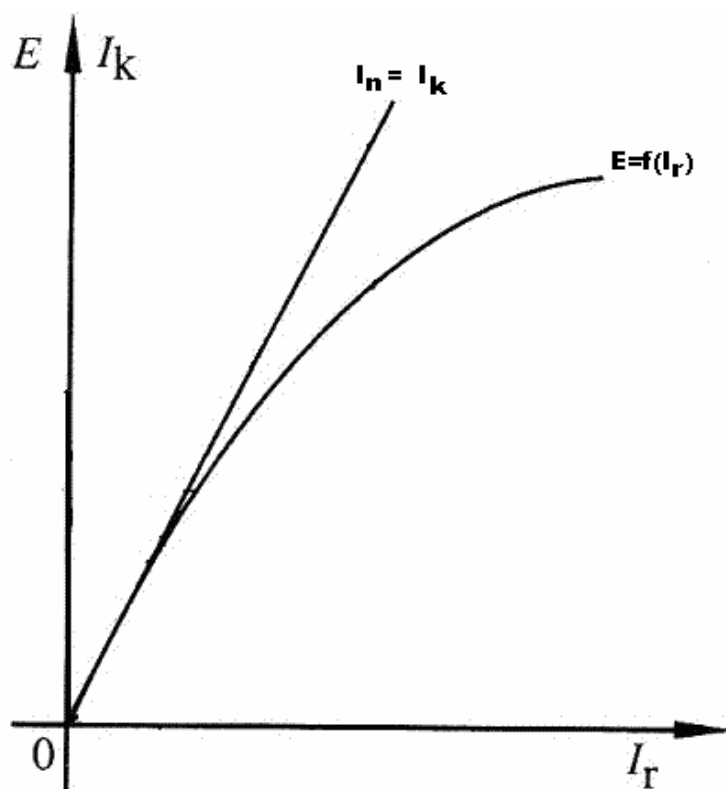
Magnetointi		Vaihevirta	Nopeus
Virta [I]	Jän.[V]	Virta [I]	rpm
	2,6	1,2	1000,0
0,3	5,3	2,3	1000,0
0,4	7,7	3,5	1000,0
0,5	9,9	4,6	1000,0
0,7	12,6	5,8	1000,0
0,8	15,2	7,0	1000,0
0,9	16,9	8,1	1000,0
1,0	19,7	9,3	1000,0
1,1	21,9	10,4	1000,0
1,2	23,9	11,6	1000,0
1,4	26,6	12,8	1000,0
1,5	28,9	13,9	1000,0
0,1	2,0	1,2	1100,0
0,2	4,6	2,3	1100,0
0,4	7,3	3,5	1100,0
0,5	9,8	4,6	1100,0
0,6	12,3	5,8	1100,0
0,8	14,6	7,0	1100,0
0,9	16,8	8,1	1100,0
1,0	19,3	9,3	1100,0
1,1	21,2	10,4	1100,0
1,2	23,8	11,6	1100,0
1,3	26,1	12,8	1100,0
1,5	28,4	13,9	1100,0
0,1	1,8	1,2	1200,0
0,2	4,4	2,3	1200,0
0,4	7,0	3,5	1200,0
0,5	9,5	4,6	1200,0
0,6	11,8	5,8	1200,0
0,7	14,0	7,0	1200,0
0,8	16,3	8,1	1200,0
1,0	18,8	9,3	1200,0
1,1	20,9	10,4	1200,0
1,2	23,2	11,6	1200,0
1,3	25,6	12,8	1200,0
1,4	27,7	13,9	1200,0

**Taulukko 5** Oikosulkukoe 1300-1500 rpm

Magnetointi		Vaihevirta	Nopeus
Virta [A]	Jän.[V]	Virta [A]	rpm
0,1	1,6	1,2	1300,0
0,2	4,0	2,3	1300,0
0,4	6,8	3,5	1300,0
0,5	9,1	4,6	1300,0
0,6	11,5	5,8	1300,0
0,7	14,0	7,0	1300,0
0,8	16,0	8,1	1300,0
1,0	18,5	9,3	1300,0
1,1	20,5	10,4	1300,0
1,2	22,8	11,6	1300,0
1,3	25,4	12,8	1300,0
1,4	27,7	13,9	1300,0
0,1	1,3	1,2	1400,0
0,1	3,7	2,3	1400,0
0,3	6,5	3,5	1400,0
0,5	8,8	4,6	1400,0
0,6	11,3	5,8	1400,0
0,7	13,7	7,0	1400,0
0,8	15,7	8,1	1400,0
0,9	18,2	9,3	1400,0
1,1	20,5	10,4	1400,0
1,1	22,4	11,6	1400,0
1,3	24,9	12,8	1400,0
1,4	27,0	13,9	1400,0
0,1	1,1	1,2	1500,0
0,2	3,7	2,3	1500,0
0,3	6,4	3,5	1500,0
0,5	8,8	4,6	1500,0
0,6	11,3	5,8	1500,0
0,7	13,4	7,0	1500,0
0,8	15,7	8,1	1500,0
0,9	17,9	9,3	1500,0
1,0	20,1	10,4	1500,0
1,1	22,4	11,6	1500,0
1,3	24,6	12,8	1500,0
1,4	26,7	13,9	1500,0

**Taulukko 6** Oikosulkukoe 1600-1800 rpm

Magnetointi		Vaihevirta	Nopeus
Virta [A]	Jän.[V]	Virta [A]	rpm
0,0	0,8	1,2	1600,0
0,2	3,5	2,3	1600,0
0,3	6,3	3,5	1600,0
0,4	8,6	4,6	1600,0
0,6	10,9	5,8	1600,0
0,7	13,5	7,0	1600,0
0,8	15,4	8,1	1600,0
0,9	17,9	9,3	1600,0
1,0	19,9	10,4	1600,0
1,1	22,4	11,6	1600,0
1,3	24,5	12,8	1600,0
1,4	26,5	13,9	1600,0
0,0	0,7	1,2	1700,0
0,2	3,3	2,3	1700,0
0,3	6,0	3,5	1700,0
0,4	8,3	4,6	1700,0
0,6	10,9	5,8	1700,0
0,7	13,2	7,0	1700,0
0,8	15,0	8,1	1700,0
0,9	17,6	9,3	1700,0
1,0	19,7	10,4	1700,0
1,1	21,8	11,6	1700,0
1,2	24,3	12,8	1700,0
1,3	26,1	13,9	1700,0
0,0	0,7	1,2	1800,0
0,2	3,3	2,3	1800,0
0,3	5,9	3,5	1800,0
0,4	8,2	4,6	1800,0
0,6	10,8	5,8	1800,0
0,7	13,0	7,0	1800,0
0,8	14,7	8,1	1800,0
0,9	17,8	9,3	1800,0
1,0	19,3	10,4	1800,0
1,1	21,7	11,6	1800,0
1,2	23,9	12,8	1800,0
1,3	26,0	13,9	1800,0



**Kuva 25** Oikosulkukäyrän teoreettinen malli /1/

Koneen oikosulku on erikoiskuormitustilanne, jolloin kuormitus sekä napajännite on nolla. Tällöin kuormitusvirta  $I = I_k$ . Lisäksi koneen hajareaktanssin ollessa huomattavasti suurempi kuin resistanssi  $R$ , voidaan resistanssin olettaa olevan nolla, täten saadaan kuvan 25 mukainen osoitinpiirros.

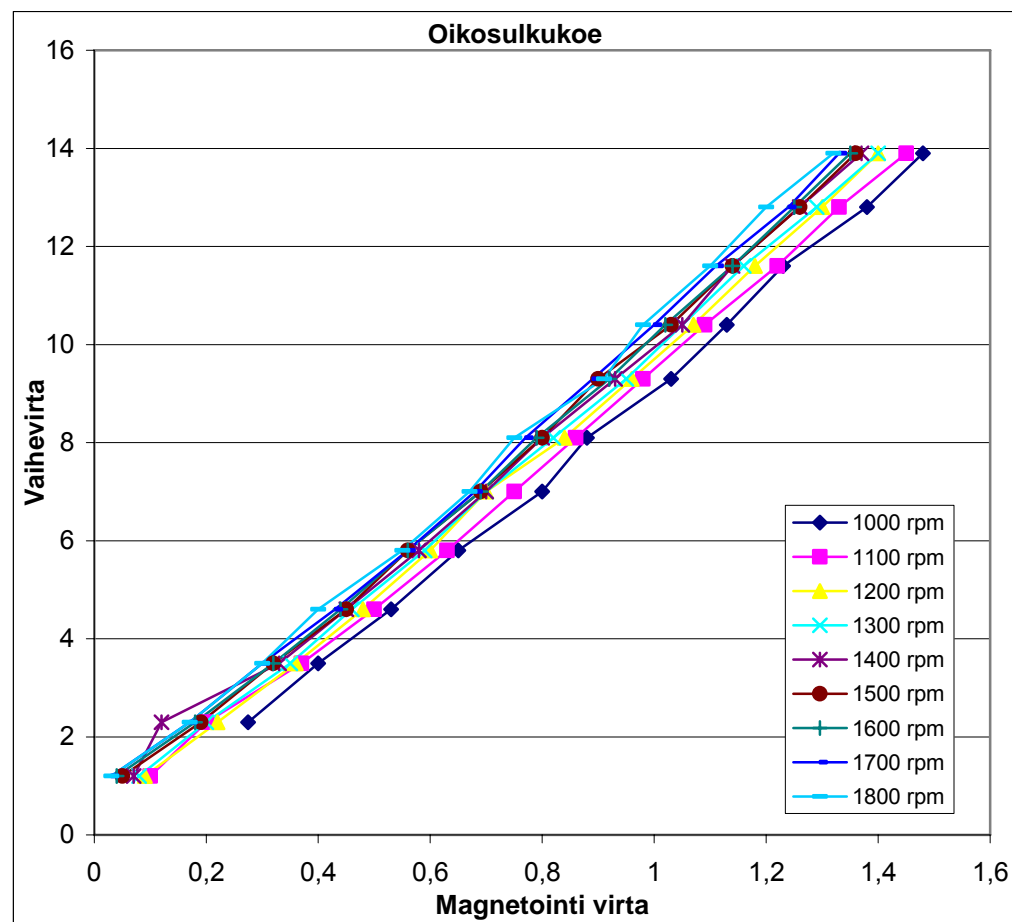
Koska impedanssi oikosulkupiirissä on hyvin pieni, saavutetaan nimellisvirta oikosulkutilassa jo hyvin pienellä magnetointiarvolla. Mikäli oikosulkutilanne linearisoidaan, saadaan kuvan 25 lineaarinen käyrä, mutta todellisuudessa magneettisesta kyllästymisestä johtuen se alkaa kaartumana koneen alkaessa kyllästyään.

Suoritetussa oikosulkukokeessa ei saavutettu tutkitun tahtikoneen kyllästysaluetta, sillä virta rajat tulivat tehdyssä kokeessa vastaan. Koe

kuitenkin selvitti koneen oikosulkutilanteen käyttäytyvän tilanteesta riippumatta lähes identtisenä.

Suoritetun oikosulkukokeen käyrien pienet erot selittyvät osaltaan jo mittaustarkkuudesta sekä mittausarvojen keskiarvoistuksesta, koska ne eivät mittauksen aikana pysyneet täysin vakiona.

Oikosulkukokeella voidaan selvittää koneen nimellismagnetointivirran ja nimellisliitinvirtojen suhdetta eri nopeusalueilla. Kuormituskokeessa oikosulkuvirran arvo korvautuu kuormituksen aiheuttamalla virralla, josta varsinaisen oikean käyttötilanteen PQ-diagrammi muodostuu.



**Kuva 26** Oikosulkukokeen magnetointivirta vaihevirran funktiona.

## 4 KUORMITUSKOKEEN LASKENTA

Kuormituskokeen suorittaminen osoittautui alkuun hankalaksi koulun laitteiston virtarajojen vuoksi.

### 4.1 Kuormituksen laskenta

Jotta kykenimme laboratoriotiloissa mallintamaan tahtigeneraattorille syötettävää kuormitusta, oli tahtigeneraattorin napoihin kytkettävä jokaiseen vaiheeseen vastus ja kela rinnakkain, tahtigeneraattorin syöttämien suurien virtojen vuoksi. Laskenta voidaan suorittaa, kun tiedämme kuorman arvon, sen  $\cos\varphi$  arvon sekä halutun vaihe-jännitteen arvon. Alla esimerkin omaisesti laskettu kuormituksen mallintaminen

#### 4.1.1 Kuormituksen tehon ja virran laskenta

Käyttämämme tahtikoneen nimelliset arvot olivat  $S = 8100 \text{ kVA}$  ja  $\cos\varphi = 0,8$  kun vaihejännite on  $230 \text{ V}$ . Jotta resistiivisen ja induktiivisen kuorman mallinnus olisi mahdollista, on  $kVA$  arvo jaettava  $kW$  ja  $kvar$  osiin. Tätä varten on saatava tietoon myös  $\sin\varphi$  arvo, jotta voidaan mallintaa myös induktiivinen kuorma. Laskenta esitetty alla kaavoissa.

$$\cos\varphi = 0,8$$

$$\Rightarrow \cos^{-1}\varphi = 36,9^\circ$$

$$\Rightarrow \sin\varphi = 0,6$$

Täten voimme mallintaa resistiivisen kuorman  $\cos\varphi$  ja induktiivisen kuorman  $\sin\varphi$  arvoilla kertomalla niillä tehon ilmoitetun arvon.

$$P = S \cdot \cos \varphi = 8100 \text{ VA} \cdot 0,8 = 6480 \text{ W}$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi = 8100 \text{ VA} \cdot 0,6 = 4860 \text{ var}$$

Lasketut arvot ovat kolmivaiheisia, joten tulokset ovat muutettava vastaamaan yhden vaiheen kuormitusta.

$$P_{1\sim} = \frac{P_{3\sim}}{3} = \frac{6480 \text{ W}}{3} = 2160 \text{ W}$$

$$Q_{1\sim} = \frac{Q_{3\sim}}{3} = \frac{4860 \text{ var}}{3} = 1620 \text{ var}$$

Täten saaduista tuloksista saamme laskettua  $S=UI$  kaavan periaatteella resistiivisen ja induktiivisen osuuden läpi kulkevat virrat.

$$I_P = \frac{P}{U} = \frac{2160 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 9,39 \text{ A}$$

$$I_Q = \frac{Q}{U} = \frac{1620 \text{ var}}{230 \text{ V}} = 7,04 \text{ A}$$

Nämä ovat virrat jotka kulkevat rinnankytkennän komponenttien lävitse. Mikäli kytkentää monimutkaistetaan siten että siihen kytketään useampia vastuksia ja keloja rinnan, jakautuu niiden kesken kulkevat virrat virran jaon perusteella komponenttien kesken. Tällöin voimme siis rajoittaa vielä komponenttien läpikulkevan induktiivisen ja resistiivisen virran arvoja laskea kuormitusten sallittujen virta-rajojen sisään.

#### 4.1.2 Kuorman resistanssin ja induktanssin mallinnus

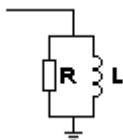
Tietämällä pätö- ja loisteho, voimme laskea resistanssin ja induktanssin suuruuden alla esitetyllä tavalla.

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{230^2}{2160} = 24,5 \ \Omega$$

Vastaavalla tavalla on laskettavissa induktiivisen reaktanssin suuruus:

$$X_L = \frac{U^2}{Q} = \frac{230^2}{1620} = 32,7 \ \Omega$$

#### 4.1.3 Kelan ja resistanssin rinnankytkennän mallinnus kuormana



**Kuva 27** Kelan ja resistanssin rinnankytkentä vaihetta kohti

Kelan ja vastuksen rinnankytkennän lasku on suoritettavissa kun tiedämme, minkä suuruinen on lopputuloksena saatava tarvittava impedanssi.

Edellisessä kappaleessa lasketut induktiivisen reaktanssin ja resistanssin arvot muutetaan käsittelyn helpottamisen vuoksi muotoon:

$$(24,5 + 32,7j) \ \Omega .$$

Rinnankytkennän laskenta-kaava on kaavan 4 mukainen niin DC- kuin AC-tilanteissakin.

$$\underline{Z} = \left( \frac{1}{R} + \frac{1}{jX_L} \right)^{-1} \quad (4)$$

Jotta rinnankytkentä olisi mahdollista laskea, on käytettävä tiedettyä matemaattista yhtälönratkaisun teoreemaa, jonka mukaisesti:

$aX+bY = cX+dY$  , jossa  $a = c$  sekä  $b = d$ . Rinnan kytkennän tiedetty kava 4 muokataan ratkaisua varten kaavan 5 muotoon.

$$Z = (R^{-1} + jX_L^{-1})^{-1} \quad (5)$$

Tällä tavalla muodostettuun kaavaan sijoitetaan ratkaistavana olevan Z:n arvo.

$$\underline{Z} = (R^{-1} + jX_L^{-1})^{-1} = (24,5 + 32,7j)$$

Tiedetyn Z:n reaali-osa vastaa nyt rinnankytkennän R-arvoa ja imaginääriosa rinnankytkennän  $X_L$  arvoa. Täten yhtälö on ratkaistavissa matemaattisesti kun alkuun korotamme yhtälön molemmat puolet potenssiin  $( )^{-1}$ .

$$(24,5 + 32,7j) = (R^{-1} + jX_L^{-1})^{-1} \quad || \quad ( )^{-1}$$
$$(0,14699 + 0,19599j) = (R^{-1} + jX_L^{-1})$$

Täten kyetään käyttämään tiedettyä yhtälönratkaisun teoreemaa erittelemällä yhtälöstä impedanssin reaali- ja imaginääriosa aivan kuten käsiteltäisiin kahden muuttujan yhtälöä.

$$R^{-1} = 0,14699$$

$$X_L^{-1} = 0,19599$$

Täten eriteltyjen reaali- ja imaginääriosien käänteisluvuista saadaan laskettua rinnankytkennässä esiintyvät arvot.

$$R = 68,03 \ \Omega$$

$$X_L = 51,02 \ \Omega$$

Laskettaessa tilannetta 50 Hz:n tapaukselle on kelan suuruus täten kaavan 6 mukainen.

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (6)$$

Kaavan 6 mukaisesti laskettuna kelan arvo on:

$$L = \frac{51,02}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,162 \text{ H} = 162 \text{ mH}$$

Kyseinen laskentamalli on yleispätevä kaikkien resistiivisten ja induktiivisten komponenttien rinnankytkentä laskuun, mikäli on tarve mallintaa komponenttien suuruudet.

#### 4.1.4 Kelan reaktanssin laskenta muuttuvassa taajuudessa

Kuormituskokeessa käytetyt kelojen arvot olivat ilmoitettu reaktansseilla 50 Hz:n taajuutta käyttäen. Muuttuva taajuuden käytön vuoksi tämä reaktanssi oli laskettava eri käyttötilanteita varten uudestaan. Kelan reaktanssi on laskettavissa kaavalla 7, joka on johdettavissa kaavasta 6.

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

Vastaavasti on laskettavissa reaktanssista induktanssi kaavan 6 mukaisesti.

Laskiessamme uuden reaktanssin suuruutta on vanha 50 Hz:n tilanne muutettava uuden taajuuden tilanteeseen. Ilmoitettu reaktanssi muunnetaan ensiksi induktanssiksi, jonka jälkeen tämä induktanssi muutetaan uudestaan reaktanssiksi käytetyn taajuuden mukaiseksi. Laskutoimitus esitetty alla.

$$X_{\text{muuttunut}} = \left( \frac{X_{\text{mitoitus}}}{2\pi \cdot 50\text{Hz}} \right) \cdot 2\pi \cdot f$$

$$X_{\text{uusi}} = \frac{2\pi \cdot X_{\text{mitoitus}} \cdot f}{2\pi \cdot 50\text{Hz}}$$

$$X_{\text{uusi}} = \frac{f}{50\text{Hz}} \cdot X_{\text{mitoitus}}$$

Muuttuvissa taajuustilanteissa reaktanssiarvo on täten verrannollinen uuden taajuuden suhteeseen 50 Hz:n taajuuteen.

Kuormituskokeita suoritettiin välillä 1200-2300 rpm, alla taulukkoon 7 taulukoitu käytetyt reaktanssin arvot ja muuttuneiden tilanteiden reaktanssit.

**Taulukko 7** Reaktanssin muutosilmiö muuttuvassa taajuudessa

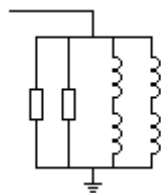
Nopeus rpm	Taajuus Hz	Käytetyt reaktanssiarvot		% ero 50 Hz tilanteeseen
		88 Ω	133 Ω	
1200	40,0	70,4	187,3	20,0
1250	41,7	73,3	195,1	16,7
1300	43,3	76,3	202,9	13,3
1350	45,0	79,2	210,7	10,0
1400	46,7	82,1	218,5	6,7
1500	50,0	88,0	133,0	0,0
1600	53,3	93,9	249,7	6,7
1700	56,7	99,7	265,3	13,3
1800	60,0	105,6	280,9	20,0
1900	63,3	111,5	296,5	26,7
2000	66,7	117,3	312,1	33,3
2100	70,0	123,2	327,7	40,0
2200	73,3	129,1	343,3	46,7
2300	76,7	134,9	358,9	53,3

Koska ainoat käyttökelpoiset reaktanssit olivat suuruudeltaan 88 ja 133 ohmia toimi säätö muutaman 10 Ω:n sisällä laskennallisista arvoista. Mikäli pykälää säätämällä kyettiin vaikuttamaan uuden tilanteen reaktanssiin saavuttamalla tarkempi kuormatilanne tämä tehtiin.

## 4.2 Kuormituksen mallintamisen kytkentä, välineet ja työtavat

### 4.2.1 Kytkennän mallintavat komponentit

Kuormituksen mallinnuksen suurin ongelma oli käytettyjen komponenttien virtakestoisuus. Keloissa  $88 \Omega$ :n alueella oli 3 A:n sulake ja  $133 \Omega$ :n alueella 2 A:n sulake, lisäksi vastuksien vaihekohtaiset sulakkeet olivat 5 A:n suuruisia. Tehdyissä kokeissa sulakkeiden nimelliset virrat ylitettiin, mutta sulakkeiden hitauden vuoksi oli kokeet mahdollista tehdä. Mikäli mallinnettavan kuorman tarkoitus olisi toimia pitkäaikaisemmin kuin vain mittauksen ajan, tulisi mittausjärjestelyssä vaihtaa käytettyjä komponentteja. Koulun kaikki säädettävät ja suurimmat kelat tarvittiin kuormituksen mallintamiseen kuten myös suurimmat vastukset, jotka koulun sähkölaboratoriosta löytyivät.



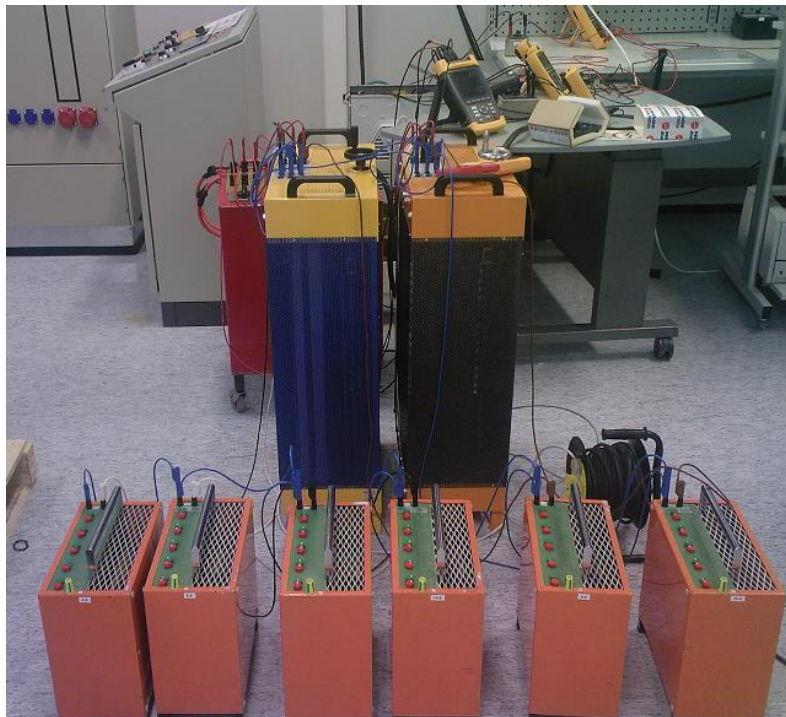
**Kuva 28** Kuormituksen mallintamiseen käytetyt komponentit vaihetta kohden

Tekemällä kuvassa 28 kuvattu rinnankytkentä, kyettiin haarojen virrat saamaan tarpeeksi pieniksi, jotta sulakkeet eivät aivan heti palaneet.

Alla esitetty käytännössä tehdyistä komponenteista kuvaukset:



**Kuva 29** Kuormituksen mallintamiseen käytetyt induktanssit



**Kuva 30** Kuormituksen mallintamisessa käytetyt resistanssit sekä osa induktansseista

Tahtikoneelta tehonsyötössä käytettiin tuplajohdotuksia, sillä koulun johdot olivat maksimissaan mitoitettu 10 A:n virroille, ja täten pyrittiin varmistamaan johdotuksien riittävä virtakestoisuus.

#### 4.2.2 Tahtikonetta pyörittäneen servon tuomat rajoitukset

Koulun laboratorion servomootorit ja niiden ohjaukset ovat mitoitettu 5,5  $kW$ :n suuruisille koneille suurimmillaan, eikä servolla ole ylikuormitus varaa, vaan suojat laukaisevat servon pois pelistä tämän rajan ylityttyä hyvinkin nopeasti. Nyrkkisääntönä servon kanssa käytettiin noin 5  $kW$ :n kuormaa ja maksimissaan 30  $Nm$ :n momenttia, sillä jo muutaman  $Nm$ :n ylitys 30  $Nm$ :n momentista, aiheutti noin minuutin sisällä pyöryksestä servon suojiin toimimisen ja servon syötön poiskytkennän.

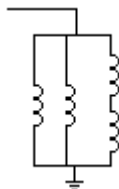
#### 4.2.3 Kuormituksen valinta ja ongelmat

Käyttämämme tahtikone oli 400 V:n pääjännitteellä leimattu 8 100 kVA:n kuormalle  $\cos \varphi$  arvolla 0,8. Tällöin tarvittu pätötehon määrä on edellä esitetyn esimerkkilaskun mukaisesti noin 6,5 kW. Servo ei kuitenkaan kyennyt tuottamaan näin suurta tehoa.

Ongelma pyrittiin aluksi ratkaisemaan muuttamalla  $\cos \varphi$ :n arvoa siten että pätöteho kuorma jäisi alle 5,5  $kW$ :n, jolloin servo kykenisi pyörittämään konetta pätöteho kuorman osalta ja loisteho syötettäisiin magneetoinnin kautta.

Laskennallisesti  $\cos \varphi$  in arvolla 0,67 saavutamme pätötehon osalta 5,4  $kW$ :n kuorman ja loisteho kuorman 6  $kvar$ . Tällöin vaihekohtainen kelan ottama virta on suuruudeltaan 11,8 A ja kelan suuruus 32 ohmia.

Kelojen suurin sulake on  $88 \Omega$ :n alueella, joka on 3 A. Mikäli käytämme seuraavan portaan 133 ohmin aluetta, muodostuu 2 A:n sulake ongelmalliseksi. Jotta tämä kytkentä olisi mahdollinen on käytettävä 88 ohmin aluetta ja tehdä kytkentä kuvan 30 mukaisesti:



**Kuva 31** Kelojen kytkentä 8100 kVA,  $\cos\varphi = 0,67$  vaihetta kohden

Tällöin yksittäisen kela haaran lävitse kulkisi 4,7 A:n virta ja sarjaan kytkettyjen kelojen lävitse 2,36 A:n virta ja saavutettaisiin 35,2  $\Omega$ :n reaktanssi. Hetkellisesti kuormitettuna olisi todennäköisesti mahdollista käyttää keloja ylivirralla, mutta 1,7 A:n ylitys luo jo riskejä sulakkeen palamisesta useaan otteeseen koejärjestelyn aikana. Lisäksi kytkentä on hankala ja vaikeasti säädettävä. Käytännössä kuormituskokeen tekeminen tällä tavalla ei ollut mahdollista kun koulun kelojen lukumäärä jäi liian pieneksi.

## 5 SUORITETTU KUORMITUSKOE 440 VOLTIN JÄNNITTEELLÄ

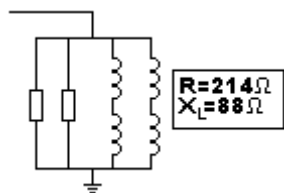
Tahtikoneen datasheeteissä on leimausarvona mainittu 440 V:n tilanne ja tällöin nimelliskuormaksi annetaan 6.2 kVA:ta  $\cos\varphi$ :n arvolla 0,8. Tällöin pätötehokuorma jää hieman alle 5 kW:n ja loiskuorma 3,7 kvariin. Kaikkien käytettyjen kuormien leimausarvolliset vaihejännitteet ovat 220 tai 230 voltia, ja käyttämällä 440 Voltin pääjännitettä nousee vaihejännite 253 volttiin. Leimausarvot ylittyvät täten koetta tehdessä välillä niin jännitteen kuin virrankin osalta, mutta tämä ei tuntunut laitteistoja vielä rikkovan.

Edellä esitetyn esimerkkilaskennan mukaisesti kyetään mallintamaan tilanne myös tässä tapauksessa. Laskennan tulokset esitetty alla taulukossa 8.

**Taulukko 8** 6,2 kVA:n kuorman komponentit

Vastus arvo	107,5 $\Omega$
Vastuksien läpi kulkeva virta	6,5 A
Kelan reaktanssi	80,6 $\Omega$
Kelan läpi kulkeva virta	4,9 A

6,2 kVA:n kuormalla esintyy sama virta-ongelma kuin 8,1 kVA:n kuormalla, mutta huomattavasti lievempänä. Tämä kompensoitiin käyttämällä myös tällä kuormituksella rinnan kytkettyjä komponentteja, joiden avulla komponentti kohtaista virtaa saatiin laskettua. Käytetty kytkentä kuormituksen mallintamiseen on kuvattu alla kuvassa 31.



**Kuva 32** Kuormituskokeessa käytetty kuormaa mallintava yksi vaiheinen kytkentä.

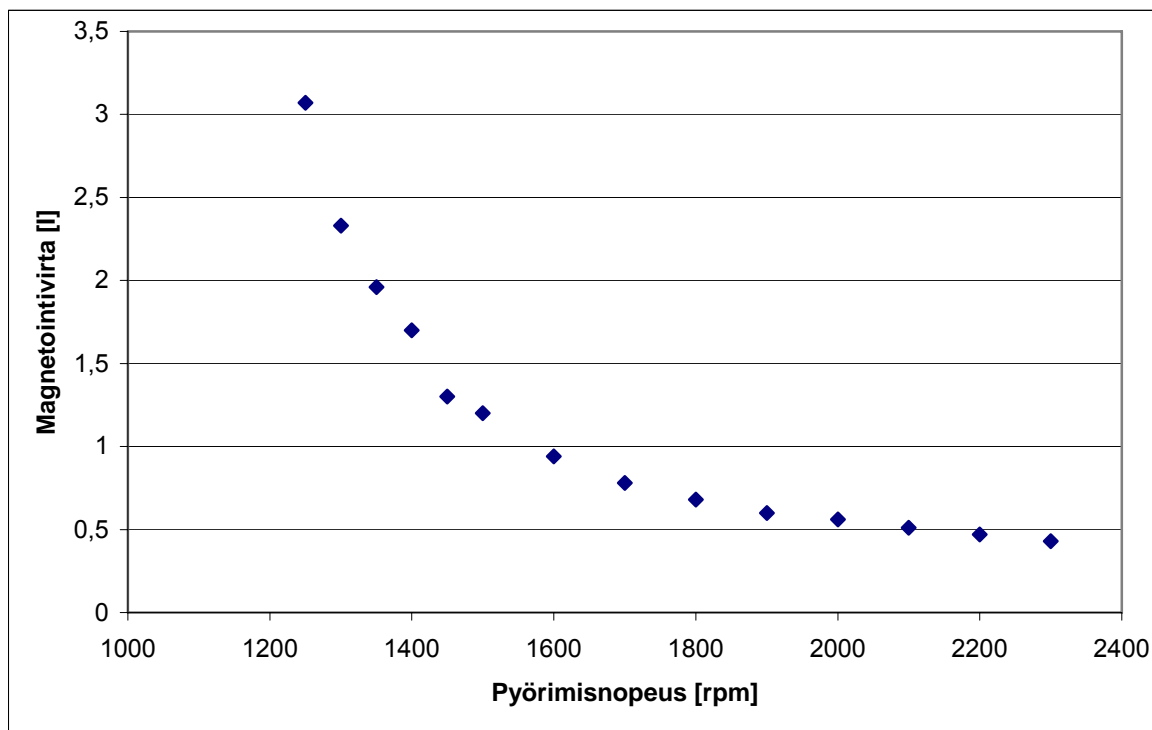
Kuvassa 32 olevalla rinnankytkennällä saavutetaan 107 ohmin resistiivinen komponentti, sekä 88 ohmin induktiivinen reaktanssi. Tämä poikkeaa ideaalisesta 80,7 ohmin reaktanssista vain hieman.

## 5.1 Suoritettu kuormituskoe 254 Voltin nimellisjännitteellä

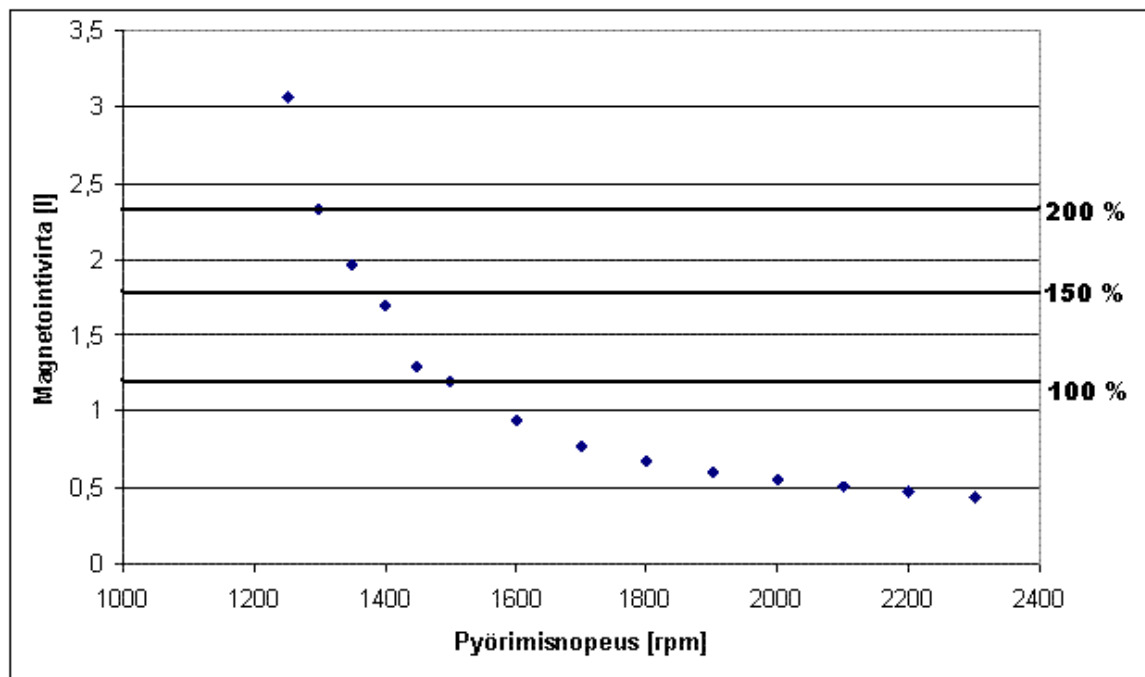
**Taulukko 9** Nimelliskuormainen kuormituskoe 254 voltin jännitteellä

Pyörimisnopeus rpm	Magnetointi	
	I [A]	U [V]
1250	3,1	62,3
1300	2,3	46,9
1350	2,0	39,1
1400	1,7	33,8
1450	1,3	26,3
1500	1,2	24,5
1600	0,9	18,7
1700	0,8	15,6
1800	0,7	13,6
1900	0,6	12,1
2000	0,6	11,1
2100	0,5	10,2
2200	0,5	9,4
2300	0,4	8,5

254 Voltin käyttöjännitteellä havaitsemme nimelliskuormitusvirran olevan 1,2 A ja 24,5 V. Taulukon 9 tuloksista on esitetty alla kuva 33 ja 34



**Kuva 33** 254 voltin kuormituskoe nimelliskuormalla



**Kuva 34** 254 voltin kuormituskoe nimelliskuormalla

Kuvasta 33 ja 34 voidaan havaita magnetoinnin tarpeen kasvavan reilusti kierrosnopeuden pudotessa vain sadallakin rpm:llä, mutta nopeuden noustessa magnetoitivirran tarve putoaa aina koneen maksimi mekaanisen mitoituksen rajalle, 2250 rpm:ään.

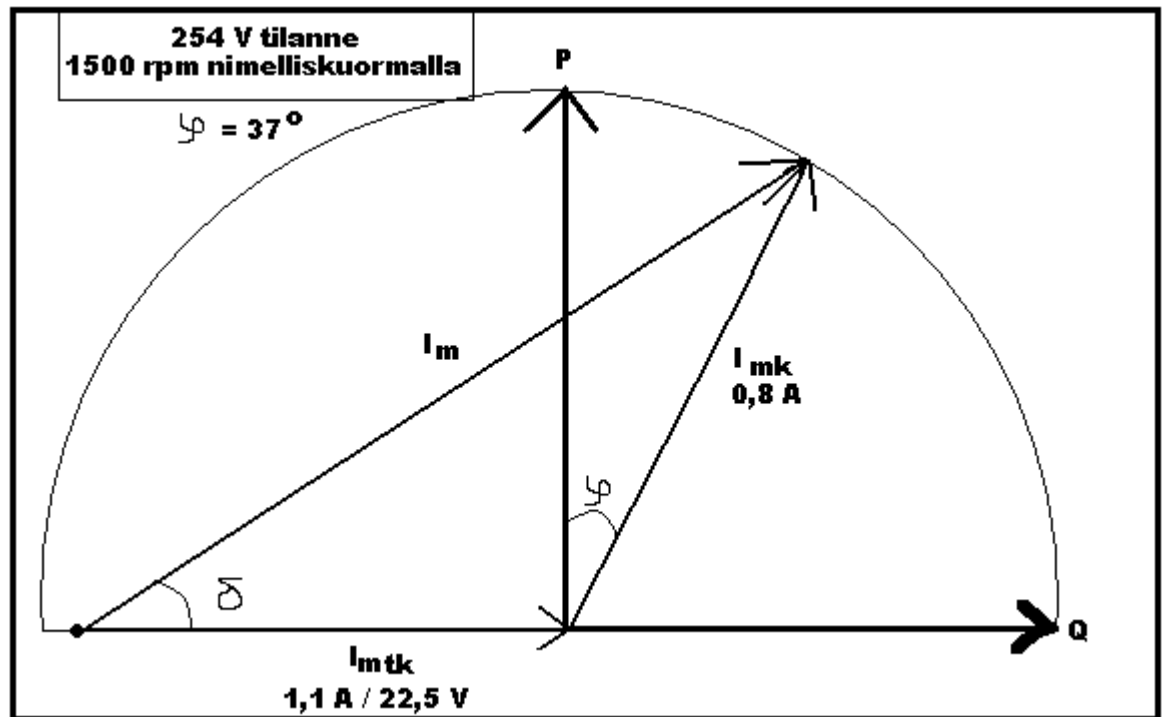
Kuvaajasta on pääteltävissä tahtikoneen olevan hyvin kriittinen nopeuden pudotukselle, sillä noin 200 rpm:n pudotus nopeudessa nostaa magnetoinnin tarpeen kaksinkertaiseksi nimellisestä. Mikäli tahtikonetta nopeutta taas nostetaan, muodostuu ongelmaksi enää lähinnä koneen mekaaninen kestävyys mitatulla alueella.

Kuvasta 34 havaitaan magnetoinnin tarpeen olevan noin 50 % suurempi 100 rpm:n nopeuden pudotuksella, kun taas 200 rpm:n nopeuden pudotuksella tarve kasvaa jo 100 % suuremmaksi.

Tehtyjä kokeita käsisäätöisellä magnetoinnilla voidaan käyttää vertailevina tuloksina magnetoinnin säätäjien kanssa tehtyyn kokeeseen koneen magnetoinnista.

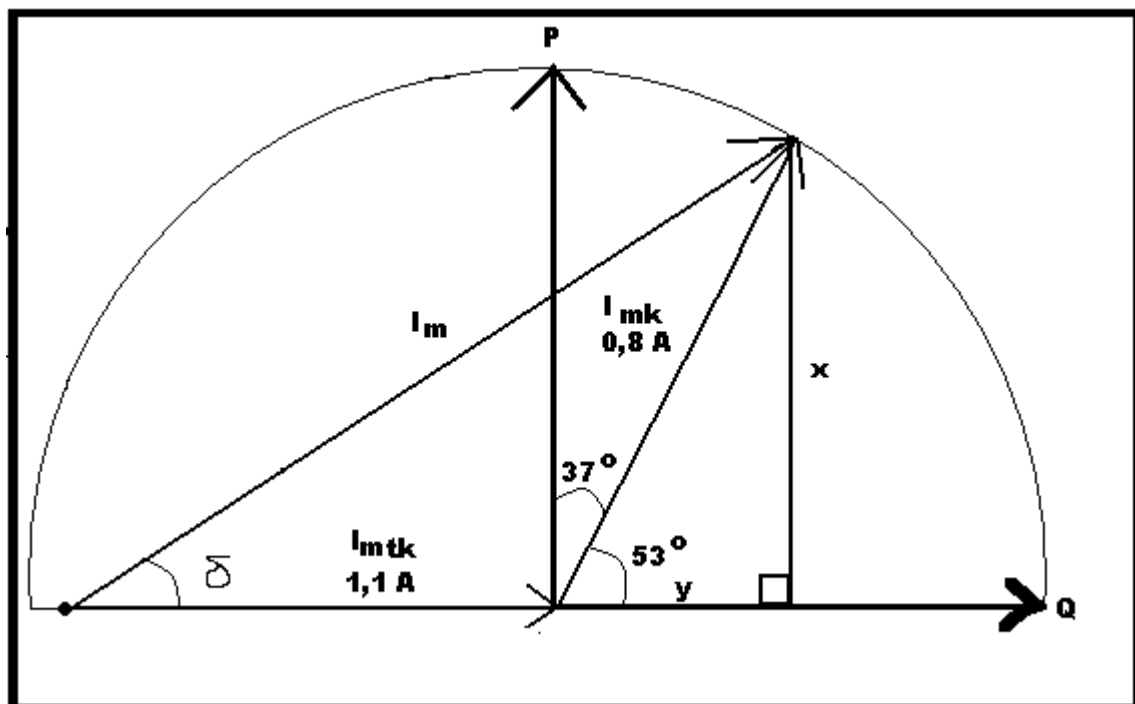
## ***5.2 Nimelliskuormitustilanteesta piirretty magnetoinnin PQ-diagrammi***

Kohdan 2.6.3 mukaisesti on piirretty PQ-diagrammi nimellisyörimisnopeuden tilanteesta. Mitatun tyhjäkäynti- sekä oikosulkumagnetoinnin avulla voidaan mallintaa kuormitusmagnetointi. Tilanteen tarkkuuteen vaikuttaa suuresti mittaustulokset ja täten laskennallinen tulos täten mitatuista arvoista voidaankin olettaa vain toimivan noin tarkkuudella 0,1 A. Lisäksi alla olevasta kuvasta on laskettu napakulma  $\delta$ .



**Kuva 35** Esimerkillinen kuva osoitinkuvien muodostumisperiaatteesta

Tyhjäkäyntimagnetoinnista  $I_{mtk}$  sekä oikosulkumagnetoinnista  $I_{mk}$  ovat P-akseliin nähden tehokertoimen sanelemassa kulmassa nimelliskuormitusilanteessa, jolloin niiden vektorisumma muodostaa tarvittavan magnetointivirran  $I_m$ . Kyseisestä tilanteesta on laskettavissa trigonometrisilla funktioilla napakulma  $\delta$ , sekä tarvittava magnetointivirta  $I_m$ .



**Kuva 36** Trigonometrinen funktioiden käyttö laskennassa

Laskenta magnetointivirran ja napakulmaa varten esitetty alla.

Nimellismagnetointivirta kulkee ympyrän kaaresta alkaen suuremman ympyrän kaarelle vektorina. Kuvasta 36 on pääteltävissä evan Q-akselin mukaisesti  $U/X_q$ :n suhde  $U/X_d$ :hen. Kuvan 1 datasheetin mukaisesti suhde on laskennallisesti 254 voltilla.

$$X_d = 1,94$$

$$X_q = 0,967$$

$$\frac{254 \text{ V}}{1,94} = 130,9$$

$$\frac{254 \text{ V}}{0,967} = 262,7$$

$$\frac{130,9}{262,7} = \underline{0,5}$$

Laskemalla ensin suurimman muodostuvan kolmion hypotenuusan sekä napakulman  $\delta$  arvo, saadaan tulokseksi:

$$\sin 53^\circ = \frac{x}{0,8}$$

$$x = 0,8 \cdot \sin 53^\circ$$

$$x = 0,64$$

$$\cos 53^\circ = \frac{y}{0,8}$$

$$y = 0,8 \cdot \cos 53^\circ$$

$$y = 0,48$$

$$\tan \delta = \frac{x}{I_{mtk} + y} = \frac{0,64}{1,1 + 0,48}$$

$$\delta = 22,0^\circ$$

$$\sin \delta = \frac{x}{I_m + I_{apu}}$$

$$I_m + I_{apu} = \frac{x}{\sin \delta} = \frac{0,64}{\sin 22,0^\circ}$$

$$I_m + I_{apu} = 1,7 \text{ A}$$

Täten siis napakulman suuruus nimelliskuormitustilanteessa on  $\delta = 21,8^\circ$  ja magnetoinnin suuruudeksi  $I_m = 1,7 \text{ A}$ . Mikäli konetta oletusarvoisesti käytetään PMG-magnetoinnin säätimellä, vaikuttaa siihen myös koneen hyötysuhde. Täten hyötysuhde huomioon ottaen saadaan magnetoinnin arvoksi:

$$I_m = 1,7 \text{ A} \cdot 0,78 = 1,3 \text{ A}$$

Täten laskennallinen tulos on liki kuormituksessa mitattu 1,2 A. Erot saattavat johtua jo mittareissa sekä laskennassa tapahtuneissa pyöristyksissä. Napakulman  $\delta$  pieni arvo on selitettävissä koneen datasheetistä löytyvillä tiedoilla. Laskennallinen 1,7 A:n arvo perustuu todennäköisesti

olettamukseen että konetta syöttää PMG-säädin, joka tarvitsee 1,7 A syöttääkseen koneen ilmoitetulla hyötysuhteella mitatun magne-toinnin suuruista magne-tointivirtaa koneelle. Mikäli laskenta suoritetaan tällä olettamuksella, täsmäävät mitattu tieto laskennallisten arvojen kanssa.

<b>60 Hz</b>	Series Star (V)	416	440	460	480
	Parallel Star (V)	208	220	230	240
	Series Delta (V)	240	254	266	277
kVA		9.6	10.2	10.2	10.2
kW		13.0	13.8	13.8	13.8
Efficiency (%)		76.7	76.9	77.4	77.9
kW Input		9.3	9.8	9.7	9.7

**Kuva 37** 60 Hz:n käytön datasheet /4/

60 Hz:n käytössä on havaittavissa koneen pätötehon olevan jopa kolminkertainen verrattuna kuormituskokeessa käytettyyn 254 voltin ilmoitettuun 6,2 kVA:n ja 5 kW:n tehoihin. Täten koneella on huomattavasti enemmän tehopotentialia kuin 50 Hz:n kokeissa kyetään konetta käyttämään, täten napakulma jää koneella huomattavasti pienemmäksi 50 Hz:n testatulla alueella.

## 6 MAGNETOINNIN SÄÄTÄJÄT

Magnetoinnin säätäjä on tahtikoneesta erillään oleva laite, joka säätää magnetointia sille asetettujen parametrin mukaisesti. Magnetointiyksikön perusparametrointia on esitetty alla, jonka jälkeen on esitetty tutkitut magnetoinnin säätimet.

### ***6.1 Magnetoinnin säätäjään liittyvää termistöä***

#### **DROOP**

Asetusarvo on asetettavissa magnetoinnin säätäjässä olevalla potentiometrillä. Droop vaikuttaa lähinnä jännitejäykkyyteen, jolla kyetään asettelemaan sallittu jännitteenalenema kuormitustilanteessa.

#### **STABILITY**

Magnetointisäätäjälle asetettu vakavuus. Kyetään lähinnä käyttämään loistehon kompensointiin, kun säätäjän magnetoinnin syöttöä heikennetään, ottaa kone induktiivisen loistehonsa verkosta, joka poistaa verkossa olevaa induktiivista loistehoa. Valmistajan ohjeistuksen mukaisesti stability tulee asettaa lähelle hälytysrajaa käyttöönotossa. Potentiometrin arvo säädetään juuri ja juuri kohdalle, jossa varoitusvalo ei syty, tällöin säädin on toiminnassaan optimaalinen.

## **STABILITY SELECTION**

Stability Selection liittyy säätimen liitetyn tahtikoneen tehoalueeseen. Valitsimella kyettiin valitsemaan eri teholuokissa olevat tahtikoneet ja täten tuoda oikea tieto säätimellä käytetystä tahtikoneesta.

## **UFRO**

UFRO on lyhenne sanoista Under Frequency Roll Of Knee Point. Tämä parametointi vaikuttaa magnetoinnin säätäjän käyttötilannetta, jossa tahtikoneen taajuus on tippunut asetellulle Knee Point tasolle. Tämä taso merkitsee pistettä, jossa magnetoinnin säätäjä aloittaa staattorin liitinjännitteen pudottamisen magnetointia pienentämällä, jotta koneen käämitys ei ajautuisi liian suureen ylikuormaan. UFRO:n asettelu on tehtävissä siten että koneen pyörimisnopeus asetetaan haluttuun Knee-Point pisteeseen tyhjäkäynnillä, jonka jälkeen potentiometriä säädetään hieman kuten Stability säätö. Potentiometriä siis käännetään kunnes säätimen varoitusvalo syttyy, jonka jälkeen asentoa korjataan hivenen myötöpäivän suuntaan jolloin valo sammuu.

## **VOLTS**

Volts potentimetrillä voidaan hienosäätää koneen normaalisti toimiessa ulos antamaa liitinjännitettä. Säätö suoritetaan kortilla olevalla potentiometrillä, jota kääntämällä jännitteen arvo joko nousee tai laskee.

## **DIP**

Asettelee jyrkkyyden, jolla jännitteen arvo pienenee kun Knee-Pointin raja-arvo on alitettu.

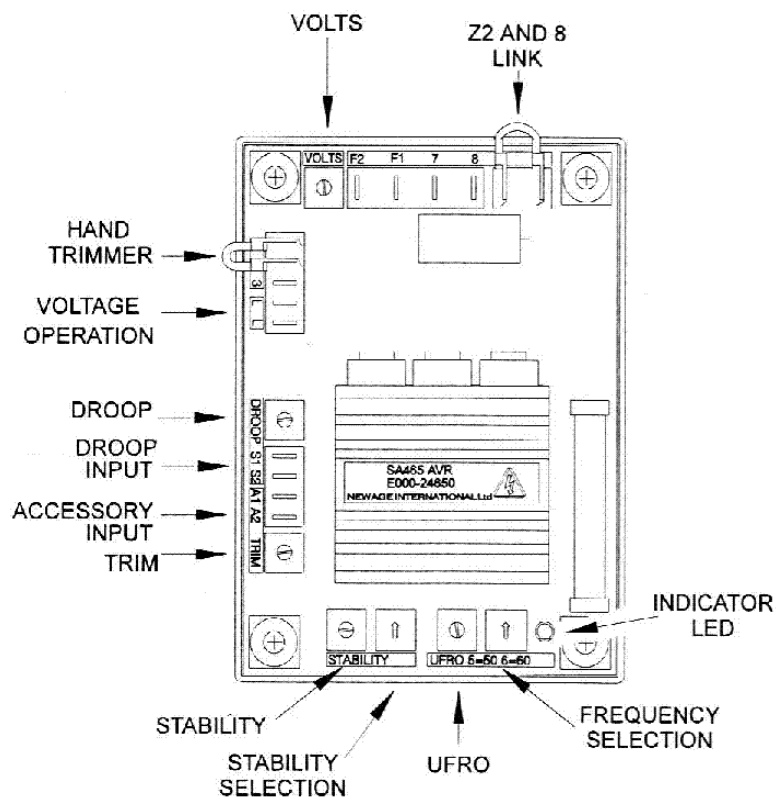
## 6.2 Tutkitut säätäjät

### 6.2.1 SA465-2 Automatic Voltage Regulator

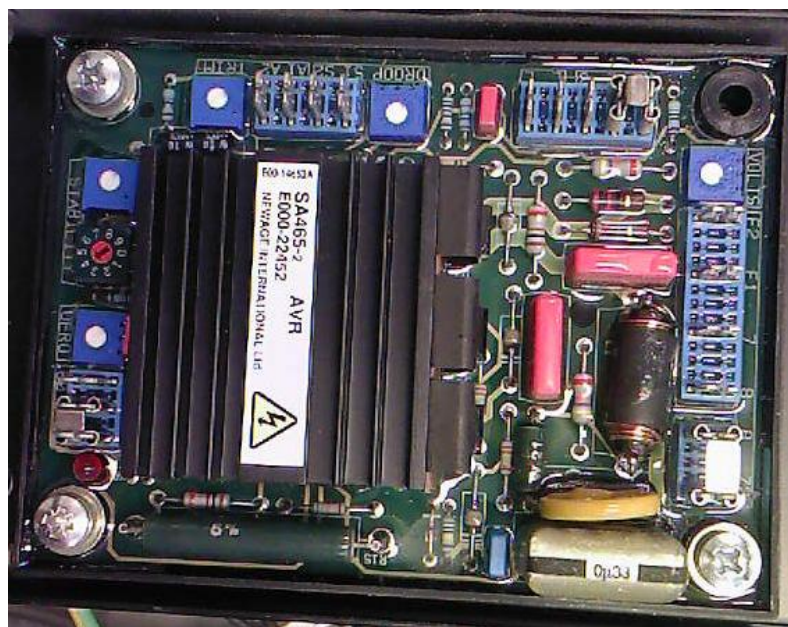
SA465-2 AVR säädin oli käytetyn tahtikoneen mukana toimitettu magneetonin säätäjä. Säätäjän toiminta perustu tyristori ohjattuun puoliaaltotasa-suuntaukseen, jonka vuoksi myös mitattu säätäjän jännite oli pulssikasta. Säätäjän asetustietojen mukaisesti sen käyttöalue on hyvin rajallinen, mutta käytännön tehdyt kokeet osoittivat säätäjän kykenevät toimimaan huomattavasti laaja-alaisemmalla skaalalla. Säätimen toimintaan saattaminen on yksinkertaista. Se tarvitsee mittatietonaan yhden vaiheen jännitteen, sekä virtamuuntajien kautta otetun virran mitä kone syöttää. Näiden mittausten sekä säätäjälle asetettujen paramterointien perusteella säädin suorittaa magneetonin säädön tarvittuun arvoon. Säätimen tehonsyöttö tapahtui jännitemittauksen kautta, josta säädin jo remanenssivuosta otti tarvitsemansa alkutehon. Alla kuvassa 38 kuvattu SA465-2 säätimen tekniset tiedot.

TECHNICAL SPECIFICATION	
<b>SENSING INPUT</b>	<b>TYPICAL SYSTEM RESPONSE</b>
Voltage 100 - 130 } Jumper 170 - 250 } Selectable	Field current to 90% 80ms Machine Volts to 97% 300ms
Frequency 50 - 60Hz nominal	<b>EXTERNAL VOLTAGE ADJUSTMENT</b>
Phase 2	+/- 10% with 1 K $\Omega$ trimmer
Wire 2	<b>UNDER FREQUENCY PROTECTION</b>
<b>POWER INPUT</b>	Set Point (See Note 2) 95% Hz Slope 170% down to 30 Hz
Voltage 100 - 250 Vac	<b>UNIT POWER DISSIPATION</b>
Frequency 50 - 60Hz	12 watts maximum
Phase 1	<b>BUILD UP VOLTAGE</b>
Wire 2	3.5 V ac (@ AVR terminals)
<b>OUTPUT</b>	<b>ACCESSORY INPUT</b>
Voltage 75dc @ 170 Vac input 105 dc @ 240 Vac input	+/- 1V input = +/- 10% change in output volts @ 415V nominal
Current Continuous 4A dc Transient 7.5A for 10 seconds	<b>QUADRATURE DROOP</b>
Field resistance 10 $\Omega$ minimum up to 170Vac input 15 $\Omega$ minimum up to 250Vac input	Maximum sensitivity (10 $\Omega$ Burden ) 0.07 A for 5% droop @ 0p.f.
<b>REGULATION</b> (See Note 1) +/- 1.0% Average	<b>ENVIRONMENTAL</b>
<b>THERMAL DRIFT</b> 0.05% per $^{\circ}$ C	Vibration 20-100 Hz 50 mm/sec 100 Hz-2 kHz 3.3g Relative Humidity 0-60 $^{\circ}$ C 95% RH Operating Temperature -40 to +70 $^{\circ}$ C Storage Temperature -55 to +80 $^{\circ}$ C Weight 360 grams
	<b>NOTES</b>
	1. With 4% engine governing. 2. Factory set, semi sealed, selectable.

Kuva 38 SA465-2 säätimen tekniset tiedot / 5 /



**Kuva 39** Säätimen SA465-2 toimintokuva / 5 /



**Kuva 40** SA465-2 säätimen kuva

**SA465-2 SÄÄTÄJÄN LIITÄNNÄT****Taulukko 10** SA465-2 säätäjän liittimien toiminta

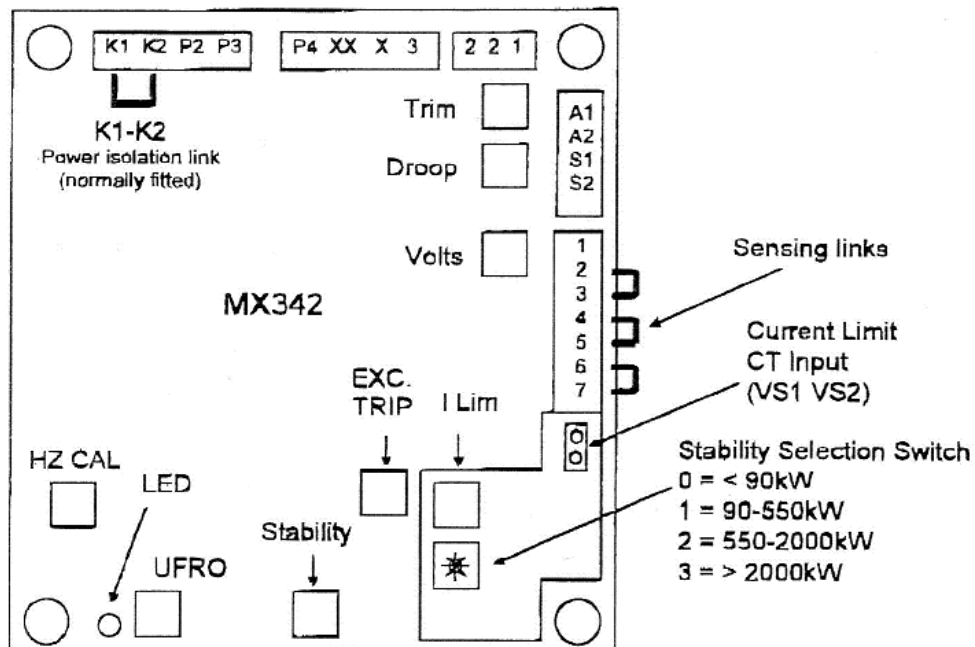
Liitin	Liitintoiminto	Kytkeätilanne
S1	1-vaiheinen virtamuuntajan ensiönapa	Kytkeä
S2	1-vaiheisen virtamuuntajan toisionapa	Kytkeä
A1	Erilisen Stamfordin ulkoisen ohjauskortin signaaliliitin	Ei kytkeä
A2	Erilisen Stamfordin ulkoisen ohjauskortin signaaliliitin	Ei kytkeä
F1	Magnetoinnin syöttö	Kytkeä
F2	Magnetoinnin syöttö	Kytkeä
7	Jännimittaustieto ja tehonsyöttö	Kytkeä
8	Jännitemittaustieto ja tehonsyöttö	Kytkeä
L	Voltage Operation - toiminta epäselvää	Ei kytkeä
L	Voltage Operation - toiminta epäselvää	Ei kytkeä

**6.2.2 MX342 Automatic Voltage Regulator (AVR)**

Säätäjä poikkeaa toiminnaltaan tahtikoneen mukana toimitettuun SA465-2 tehonsyöttöltään siten että se on PMG-säädin. Tämä ilmeni ongelmana tehdyissä kokeissa sen vaatimana 100-120 Hz:n syöttöjännitteenä, jota koulun laboratorio välineillä ei kyetty syöttämään. PMG-säätimien toiminnan ongelmista sekä selvitys niiden ratkaisuyrityksistä on esitetty edellä kappaleessa 6.4.

<b>SENSING INPUT</b>		<b>UNDER FREQUENCY PROTECTION</b>	
Voltage	190-264 Vac max, 1 phase, 2 wire	Set point	59.5 Hz (see note 4)
Frequency	50-60 Hz nominal	Slope	linear down to 18 Hz
<b>POWER INPUT (PMG)</b>		<b>UNIT POWER DISSIPATION</b>	
Voltage	140-220 Vac max, 3 phase, 3 wire	12 watts maximum	
Current	3A/phase	<b>ANALOGUE INPUT</b>	
Frequency	100-120 Hz nominal	Maximum input +/- 5 Vdc (see note 5)	
<b>OUTPUT</b>		Sensitivity 1v for 5% Generator Volts (adjustable)	
Voltage	max 120V dc	Input resistance 1k ohm	
Current	continuous 2.7 A Intermittent 8A for 10 secs.	<b>QUADRATURE DROOP INPUT</b>	
Resistance	15 ohms minimum	10 ohms burden	
<b>REGULATION</b>		Max. sensitivity: 0.07 A for 5% droop 0PF	
+/- 1% (see note 1)		Max. input: 0.33 A	
<b>THERMAL DRIFT</b>		<b>CURRENT LIMIT INPUT</b>	
0.03% per deg. C change in AVR ambient (note 2)		27 ohms burden	
<b>SOFT START RAMP TIME</b>		Max. sensitivity: 0.28 A (see note 6)	
3 seconds		Max. input: 0.33 A	
<b>TYPICAL SYSTEM RESPONSE</b>		<b>OVER EXCITATION PROTECTION</b>	
AVR Response	10mS	Set point 75 V dc	
Filed current to 90%	80 mS	Time delay 10 seconds (fixed)	
Machine Volts to 97%	300mS	<b>ENVIRONMENTAL</b>	
<b>EXTERNAL VOLTAGE ADJUSTMENT</b>		Vibration 20-100 Hz 50mm/sec	
+/-10% with 1 k ohm 1 watt trimmer (see note 3)		100Hz - 2kHz 3.3g	
		Operating temperature -40 to +70c	
		Relative Humidity 0-70c 95% (see note 7)	
		Storage temperature -55 to +80c	
<b>NOTES</b>			
1. With 4% engine governing.			
2. After 10 minutes.			
3. Generator de-rate may apply. Check with factory.			
4. User adjustable.			
5. Any device connected to the analogue input must be fully floating (galvanically isolated from ground), with an insulation strength of 500V ac.			
6. The CT position should be the same as the droop CT.			
7. Non condensing.			

Kuva 41 Magnetointisäätimen MX342 tekniset tiedot / 6 /



Kuva 42 Magnetontinsäätimen MX342 toimintokuva / 6 /



**Kuva 43** MX342 säädin

## MX342 SÄÄTÄJÄN LIITTIMET

**Taulukko 11** Säätäjän MX342 liittimien merkitykset ja kytkentätilanne kokeessa

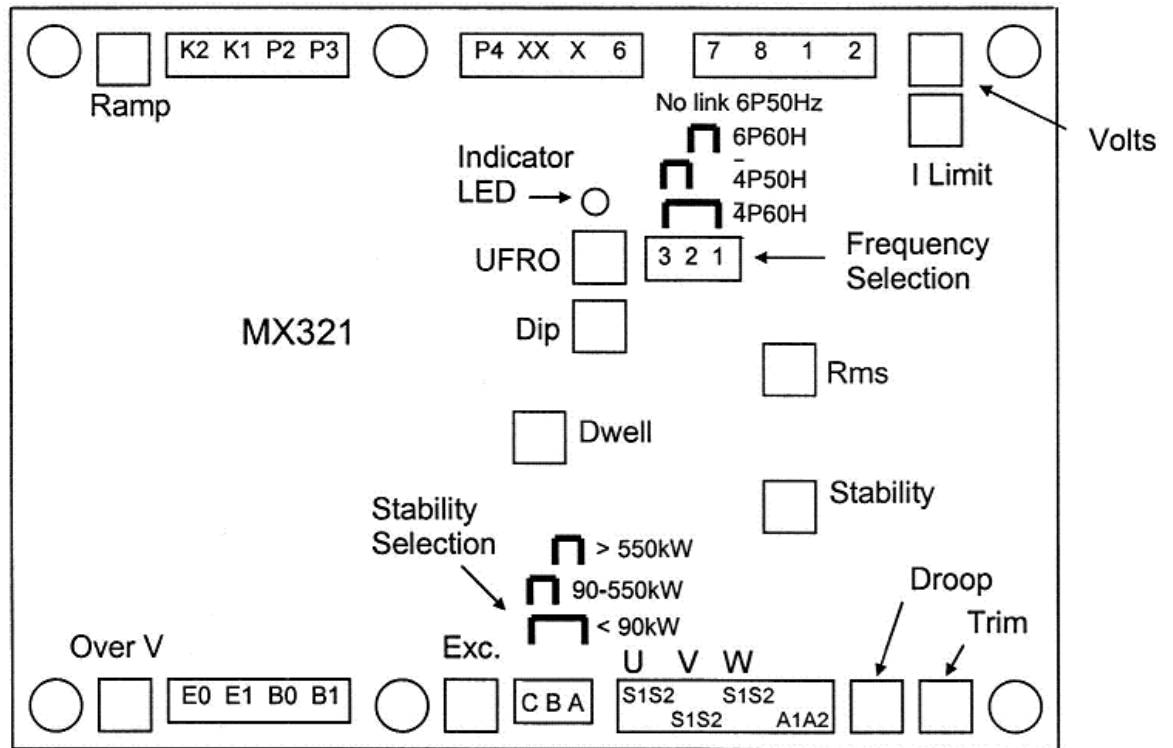
Liitin	Liitintoiminto	Kytkentätilanne
S1	1-vaiheinen virtamuuntajan ensiönapa	Kytkettynä
S2	1-vaiheisen virtamuuntajan toisionapa	Kytkettynä
P2	Tehon syöttö, L1	Kytkettynä
P3	Tehon syöttö, L2	Kytkettynä
P4	Tehon syöttö, L3	Kytkettynä
A1	Erilisen Stamfordin ulkoisen ohjauk kortin signaaliliitin	Ei kytketty
A2	Erilisen Stamfordin ulkoisen ohjauk kortin signaaliliitin	Ei kytketty
X ( F1 )	Magnetoinnin syöttö	Kytkettynä
XX ( F2 )	Magnetoinnin syöttö	Kytkettynä
2	Jännimittaustieto ja tehonsyöttö	Kytkettynä
3	Jännitemittaustieto ja tehonsyöttö	Kytkettynä

### 6.2.3 MX321 Automatic Voltage Regulator

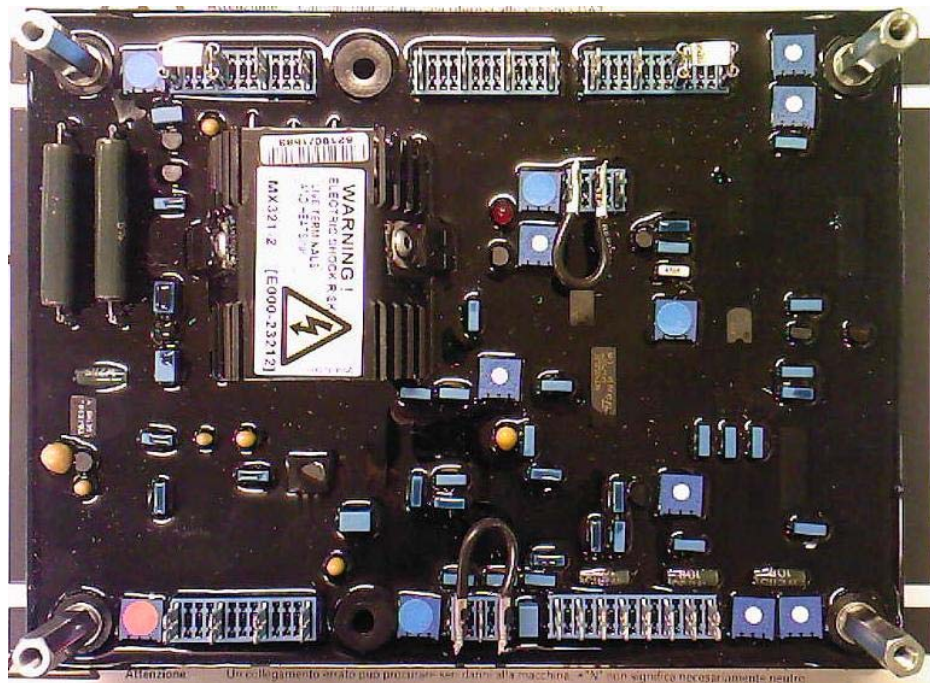
Säädin MX321 oli kolmas tutkittava säädin. Säädin on tehoalueeltaan laaja-  
alaisempi edellä mainittuihin SA465-2 sekä MX342 säätimiin verrattuna,  
sekä myös hieman kookkaampi kuin edellä esitetyt säätäjät fyysisesti.  
Säätimen tekniset tiedot sekä kuva esitetty alla.

<b>SENSING INPUT</b>		<b>ANALOGUE INPUT</b>	
Voltage	190-264V ac max, 2 or 3 phase	Maximum input	+/- 5 Vdc (see note 6)
Frequency	50-60 Hz nominal	Sensitivity	1v for 5% Generator Volts (adjustable)
<b>POWER INPUT (PMG)</b>		Input resistance	1k ohm
Voltage	170-220V ac max, 3 phase, 3 wire	<b>QUADRATURE DROOP INPUT</b>	
Current	3A/phase	10 ohms burden	
Frequency	100-120 Hz nominal	Max. sensitivity: 0.22 A for 5% droop 0PF	
<b>OUTPUT</b>		Max. input: 0.33 A	
Voltage	max 120V dc	<b>CURRENT LIMIT INPUT</b>	
Current	continuous 3.7 A (see note 1) Intermittent 6A for 10 secs.	10 ohms burden	
Resistance	15 ohms minimum	Sensitivity range: 0.5 – 1A	
<b>REGULATION</b>		<b>OVER VOLTAGE DETECTOR INPUT</b>	
	+/- 0.5% RMS with 4% engine governing (see note 2)	Set point: 300v. Time delay: 1 Sec (fixed)	
<b>THERMAL DRIFT</b>		CB trip coil volts: 10-30 vdc	
	0.02% per deg. C change in AVR ambient (note 3)	CB trip coil resistance: 20-60 ohms	
<b>SOFT START RAMP TIME</b>		<b>OVER EXCITATION PROTECTION</b>	
	0.4 - 4 seconds	Set point 75 V dc	
<b>TYPICAL SYSTEM RESPONSE</b>		Time delay 8-15 seconds (fixed)	
AVR response	10 ms	<b>ENVIRONMENTAL</b>	
Filed current to 90%	80 ms	Vibration	20-100 Hz 50mm/sec
Machine Volts to 97%	300 ms		100Hz – 2kHz 3.3g
<b>EXTERNAL VOLTAGE ADJUSTMENT</b>		Operating temperature	-40 to +70°C
	+/-10% with 5 k ohm 1 watt trimmer (see note 4)	Relative Humidity 0-70°C	95% (see note 7)
<b>UNDER FREQUENCY PROTECTION</b>		Storage temperature	-55 to +80°C
Set point	95% Hz (see note 5)		
Slope	100-300% down to 30 Hz		
Max. Dwell	20% volts/S recovery		
<b>UNIT POWER DISSIPATION</b>			
	18 watts maximum		

**Kuva 44** Säätimen MX321 tekniset tiedot / 7 /



Kuva 45 Säätimen MX321 toimintokuva / 7 /



Kuva 46 Säädin MX321 avattuna suojakotelostaan



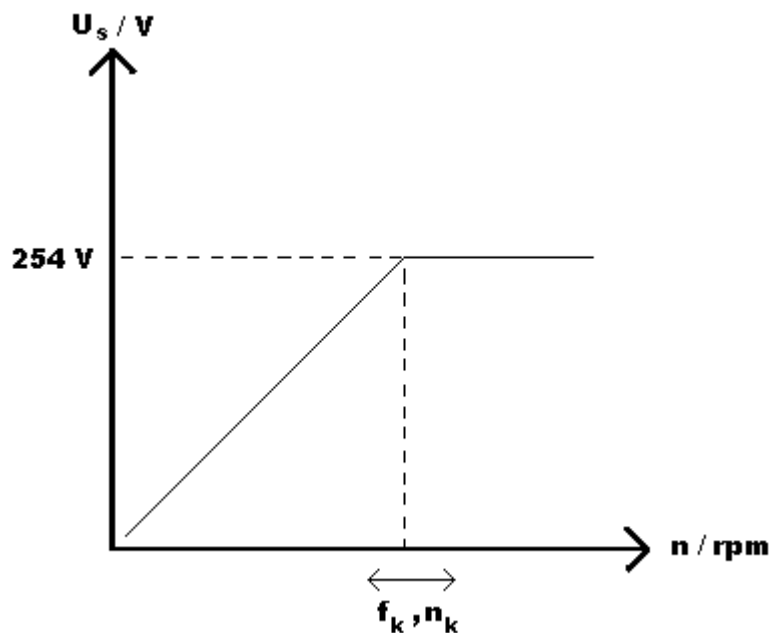
**Kuva 47** Säädin MX321 koteloituna

## MX321 SÄÄTIMEN LIITTIMET JA NIIDEN TOIMINTA

**Taulukko 12** Säätimen MX321 liittimien merkitykset ja niiden toiminta

Liitin	Liitintoiminto	Kytkentätilanne
U -S1	virtamuuntajan ensiönapa - L1	Ei kytketty
U- S2	virtamuuntajan toisionapa - L1	Ei kytketty
V -S1	virtamuuntajan ensiönapa - L2	Ei kytketty
V- S2	virtamuuntajan toisionapa - L2	Ei kytketty
W -S1	virtamuuntajan ensiönapa - L3	Ei kytketty
W- S2	virtamuuntajan toisionapa - L3	Ei kytketty
P2	Tehon syöttö, L1	Kytkettynä
P3	Tehon syöttö, L2	Kytkettynä
P4	Tehon syöttö, L3	Kytkettynä
A1	Erilisen Stamfordin ulkoisen ohjauk kortin signaaliliitin	Ei kytketty
A2	Erilisen Stamfordin ulkoisen ohjauk kortin signaaliliitin	Ei kytketty
X ( F1 )	Magnetoinnin syöttö	Kytkettynä
XX ( F2 )	Magnetoinnin syöttö	Kytkettynä
6	Jännimittaustieto, L1	Kytkettynä
7	Jännimittaustieto, L2	Kytkettynä
8	Jännimittaustieto, L3	Kytkettynä

### 6.3 Knee-pointin testaus SA465-2:lla



**Kuva 48** Teoreettinen magnetointisäätäjän toiminta Knee Pointtia testatessa

Teoreettisesti magnetoinnin säätäjän tulisi käyttäytyä kuvan 48 mukaisesti. Kneepointin ollessa aseteltuna johonkin tiettyyn nopeuteen,  $n_k$ , tulisi säätäjän pitää magnetointi vakiona tämän nopeuden yläpuolella siten että liitinjännite pysyy asetellussa 254 Voltissa. Mikäli taas tahtikoneen nopeus jää alle tämän asetteluarvon alapuolelle, lähtee liitinjännitteen arvo putoamaan lineaarisesti, riippuen täysin suoran kulmakertoimen arvosta.

Koe suoritettiin siten että Knee Point asetettiin välillä 1300 rpm – 1500 rpm aina 50 rpm:n välein eri asetusarvoihin ja tämän jälkeen otettiin eri nopeuksilla mitatut arvot ylös nimelliskuormituksen kanssa sekä ilman kuormitusta.

### 6.3.1 Esityöt magnetoinnin säätäjän kanssa

Valmisteltaessa koetta magnetoinnin säätäjien koestamiseen kuorma kytkettiin kytkimen taakse. Tämän jälkeen koe suoritettiin nopeus välillä 1200-1600 rpm 50 rpm:n välein ja käyttäen knee-pointtia välillä 1350 – 1450 rpm. 1300 rpm:n ei SA465-2 säätäjällä päästy, koska tahtikone meni ebästabiliiniin tilaan eli alkoi resonoimaan jo tyhjäkäynnillä.

### 6.3.2 SA465-2 säätäjän Kneepointin testauksen mittaustulokset

**Taulukko 11** Säätäjän SA465-2 Kneepoint asetettu 1350 rpm.

ILMAN KUORMAA				KNEEPOINT	NIMELLISKUORMA 6,2 kVA $\cos \varphi = 0,8$			
Magnetointi		Staattori	nopeus		Magnetointi		Staattori	nopeus
I / A	U / V	U / V	n / rpm		I / A	U / V	U / V	n / rpm
0,16	61,1	203	1200		0,21	73,7	201	1200
0,19	71,1	220	1250		0,25	89,6	225	1250
0,24	88	243	1300		0,28	110	240	1300
0,23	91,1	254	1350		0,27	110	255	1350
0,2	81,1	255	1400		0,27	100	256	1400
0,16	72,8	255	1450		0,22	91	255	1450
0,13	63,1	255	1500		0,2	81,8	257	1500
0,12	58,1	256	1550		0,17	75,3	257	1550
0,1	54	256	1600		0,16	70	257	1600

**Taulukko 12** Säätäjän SA465-2 Kneepoint asetettu 1400 rpm

ILMAN KUORMAA				KNEEPOINT	NIMELLISKUORMA 6,2 kVA $\cos \varphi = 0,8$			
Magnetointi		Staattori	nopeus		Magnetointi		Staattori	nopeus
I / A	U / V	U / V	n / rpm		I / A	U / V	U / V	n / rpm
0,12	47,5	185	1200		0,16	58,5	185	1200
0,12	51,6	199	1250		0,17	62,8	200,8	1250
0,15	59,8	218	1300		0,2	74	219	1300
0,18	71,7	240	1350		0,23	87,2	240	1350
0,19	78,8	254	1400		0,25	95,8	254	1400
0,17	71,3	255	1450		0,22	88,7	256	1450
0,14	64,5	255	1500		0,2	80,3	256	1500
0,12	58,8	255,1	1550		0,17	74,3	257	1550
0,1	54,1	255,7	1600		0,16	70,5	257,6	1600

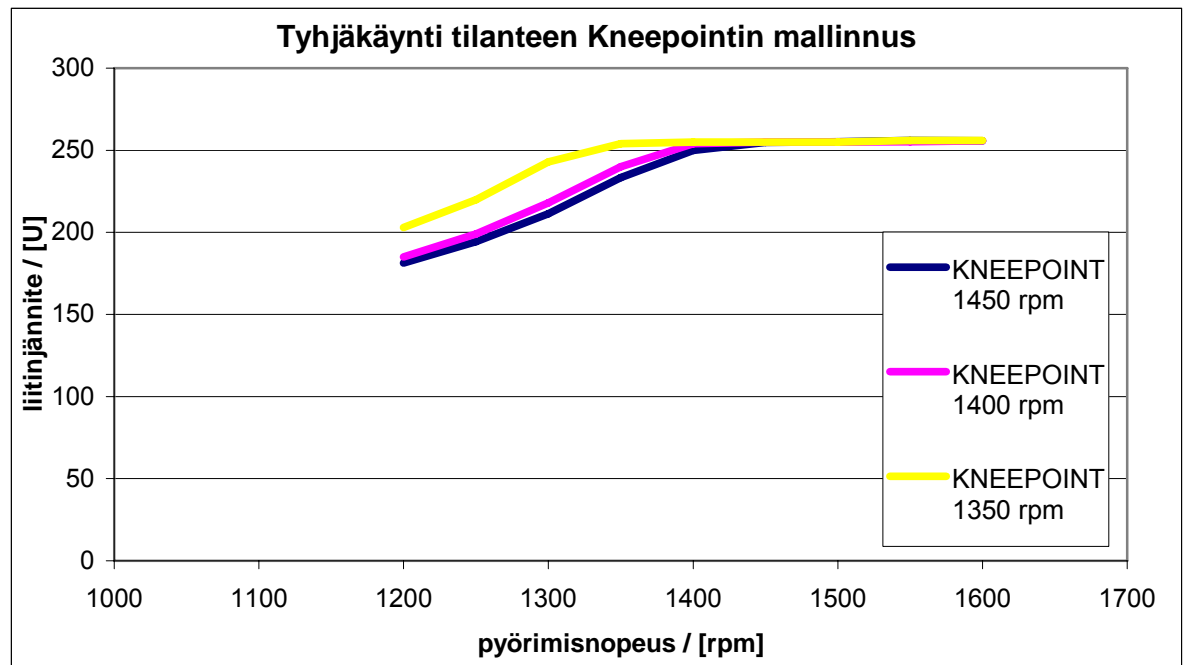
**Taulukko 13** SA465-2 säätäjän Kneepoint asetettuna 1450 rpm

ILMAN KUORMAA				KNEEPOINT	NIMELLISKUORMA 6,2 kVA $\cos \varphi = 0,8$			
Magnetointi		Staattori	nopeus		Magnetointi		Staattori	nopeus
I / A	U / V	U / V	n / rpm		I / A	U / V	U / V	n / rpm
0,11	44,9	181,4	1200		0,15	56,3	183	1200
0,11	48,4	194,4	1250		0,16	60,6	190	1250
0,12	53,5	211,4	1300		0,18	67,9	215	1300
0,15	63,9	233,4	1350		0,2	80,7	231	1350
0,17	73,6	249,9	1400		0,22	90,8	252	1400
0,17	70,3	254,9	1450		0,22	88,4	256	1450
0,14	63,9	255,2	1500		0,19	80,3	256	1500
0,13	58,1	256	1550		0,17	73,7	254	1550
0,11	53,4	255,7	1600		0,16	68,6	257	1600

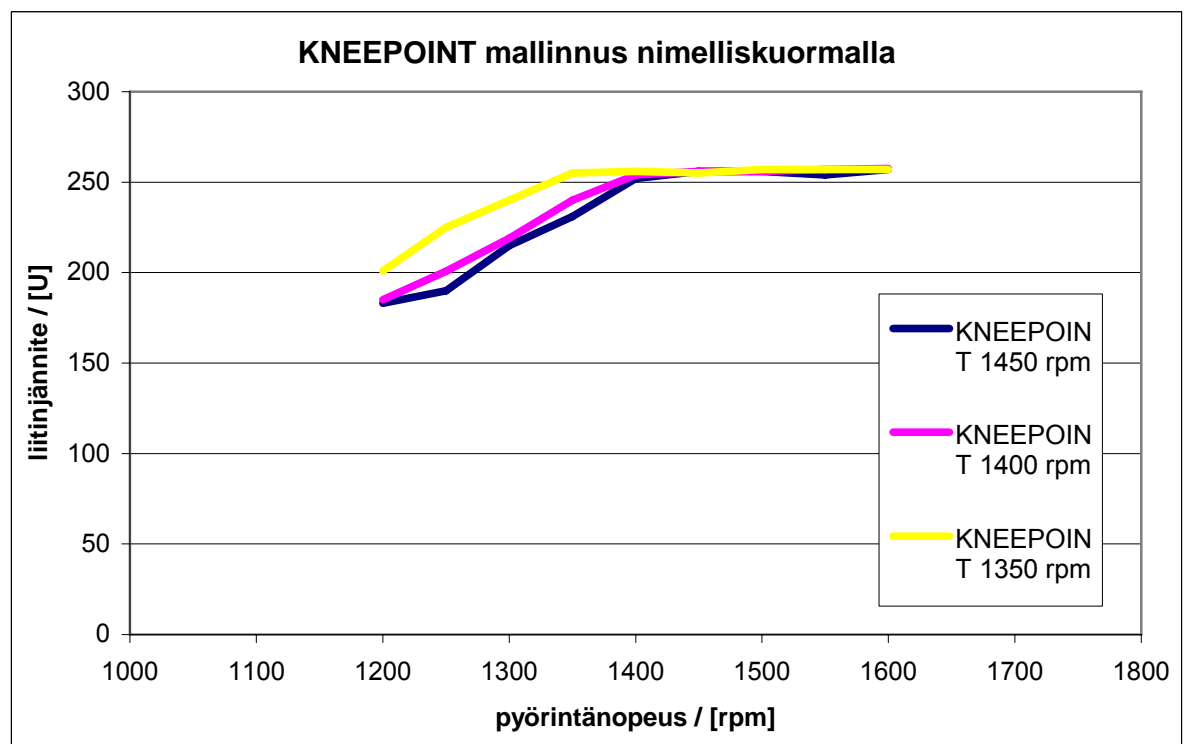
Mittaustuloksista havaitaan virran mittauksen olevan virheellinen.

Puoliaaltotasasuuntauksen aiheuttaman virran pulssikkuuden aiheuttama väärä mittatulos huomattiin vasta kokeiden jälkeen, jolloin kokeita ei enää ehditty uusimaan. Fluke 43 analysaattori, jolla mittaus tehtiin, oli ilmeisimmin suunniteltu käytettäväksi vain sinimuotoisen jännitteen sekä virran mallintamiseen, eikä se osannut laskea oikein virran tehollisarvoa, vaan ilmeisesti laski sen ainoastaan virran mitatusta huippu-arvosta, olettaen virran olevan sinin muotoista. Virran suuruuksien käyttäytyminen on kuitenkin nähtävissä mittaustuloksista, jolloin niistä oli mahdollista piirtää suuntaa antavat kuvaajat Knee Pointin käyttäytymisestä.

Mittaustuloksista on piirretty Kneepointin mallinnus tyhjäkäyntitilanteessa sekä tilanteessa, jossa konetta kuormitetaan sen nimelliskuormalla alla kuvissa 49 ja 50.



Kuva 49 SA 465-2 tyhjäkäyntitilanteen Kneepointtien mallinnus



Kuva 50 SA 456-2 Kneepointin mallinnus nimelliskuormalla

Kuvista 47 ja 48 huomaamme Kneepointin toimivan kuten teoreettisesti oli oletettu. Käytetyillä mittalaitteilla oli tehtävä tiettyjä keskiarvoistuksia, joista osittain johtuen jännitteen lasku ei välttämättä näytä täysin lineaariselta. SA465-2 säätimellä päästiin käytetyllä nimelliskuormalla 1350 rpm:ään asti, jonka jälkeen tahtikoneen epästabiilisuus ei enää mahdollistanut koneen kuormittamista.

### **6.3.3 SA465-2 säätäjän toiminta**

SA465-2 säätäjä toimi karkeasti siten että kierrosten noustessa säädin nostaa magnetoinnin jännitettä, kunnes saavutetaan kneepointin nimellinen piste, jonka jälkeen magnetoinnin jännite alkaa laskea. Säädin salli magnetoinnille jopa 110 voltin jännitteen sen pitäessä liitinjännitettä nimellisenä. Tämä todentaa tehtyjen kuormituskokeiden tilannetta, jossa pyörimisnopeuden pudotus lisää magnetoinnin tarvetta huomattavasti.

Karkea toteaminen SA465-2 toimintakyvystä voidaan tiivistää sen toimivan ainakin vielä 1350 rpm:n nopeudella. Käytetyt välineet mittauksessa asettivat tehdyille kokeille hieman rajoja, mutta 1300 rpm:llä tahtikone oli epästabiili käyttää.

### **6.4 Säätäjien MX342 ja MX321 toiminta**

Koejärjestelyiden alkaessa MX342 ja MX321 säätimiä ei kyetty saamaan toimimaan täydellisesti, mutta joitan testejä niiden toiminnallisuudesta kyettiin tekemään.

Ongelmat liittyivät säätimien vaatimaan tehosyöttöön, joka oli niiden speksien mukaisesti 50-60 Hz 140-220 voltin jännitealueella. Asiaa koitettiin ratkaista muutamilla perusoletuksilla.

#### 6.4.1 Pohdinta ratkaisuyritykseen PMG-säätimien toimintaan saattamiseksi

Säätimien ollessa PMG-tyyppisiä, ne tarvitsivat erillisen laitteiston tahtikoneen akselin perään, joka toimisi säätimelle tehoa syöttävänä elementtinä. Koska säätimien tehosyöttö oli 100-120 Hz, oli se suoraan kaksinkertainen verkon nimelliseen taajuuteen nähden.

Oletuksena ensimmäisessä ratkaisumallissa oli että säädin saa tietonsa koneen pyörimisnopeudesta PMG:n tehonsyötöstä, joka toimii kaksinkertaisella taajuudella verkkoon nähden. Täten säädin luulisi saadessaan jänniteensäätövaunulta 50 Hz:n tehonsyötön pyörivänsä ainoastaan puolella nopeudella.

Täten oletusarvoisesti pyrittiin laskemaan keinotekoinen tilanne, jossa oletettiin säätäjän luulevan tahtikoneen toimivan 25 Hz:n taajuudella. Säätäjien Knee-Pointin toiminta on valmistajan antamien speksien mukaan 18 Hz:iin asti lineaarinen, joten Knee-Pointin jännitteenpudotus suoran mallinnus pyrittiin tekemään seuraavalla tavalla.

Toinen oletus liittyi säätäjän syöttö-jännitteeseen, joka oli alueella 140-220 Volttia pääjännitteenä. Tahtikoneen pyörimisnopeuden oletettiin vaikuttavan jännitteeseen joka indusoituu säädintä syöttävälle PMG:lle. Tämän jännitteen oletettiin muuttuvan lineaarisesti koneen nopeuden pudotessa. Täten 25 Hz:n tilanteessa syötettiin säätäjälle 220 Volttia ja 20 Hz:n tapauksessa 176 Volttia.

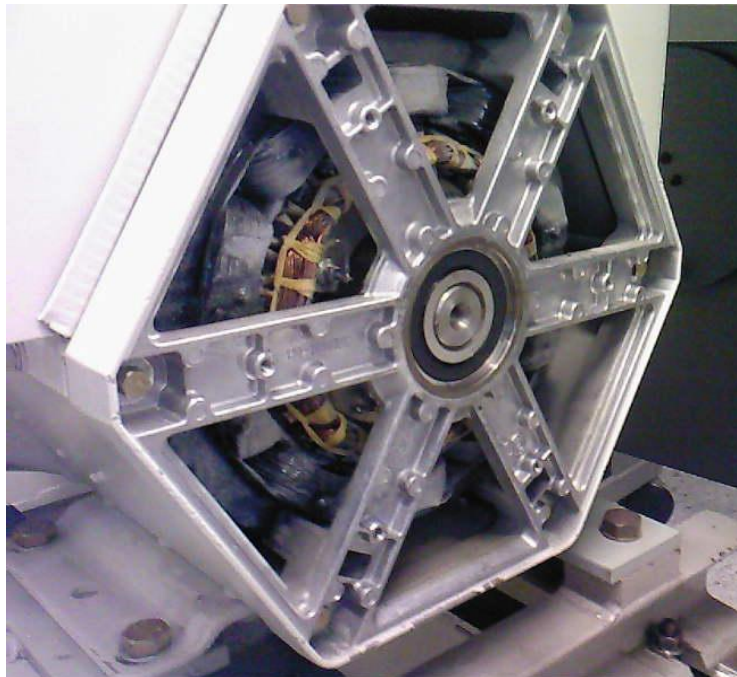
Mikäli säätäjä toimisi edellä kuvatulla tavalla ja sen knee-point olisi aseteltu 1500 rpm:ään, jolloin sen vaihejännite on 230 V. Mikäli koneen taajuus putoaa 25 Hz:n ja jännite myös lineaarisesti, tippuu jännite puoleen, eli 127

V. Koejärjestelyssä siis 25 Hz vastasi 1500 rpm ja 127 V teoreettisesti. Täten 20 Hz:n tapauksessa olisi vastannut 1200 rpm ja 101,6 V liitinjännitteinä.

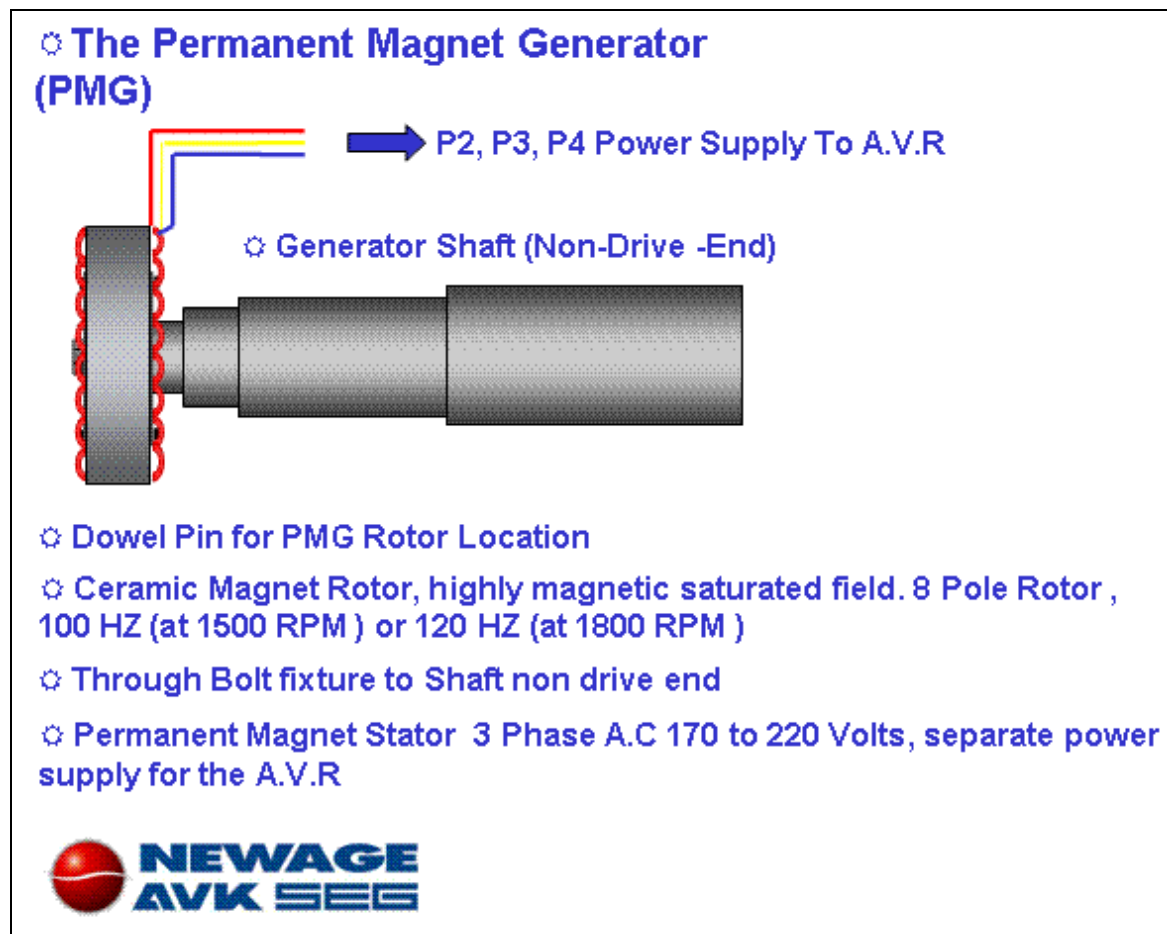
Jännitteen säätö tehtiin 25 Hz:iin Volts-potentiometrillä.

#### 6.4.2 Ratkaisumallin testaus

Säätimien toiminta yllätti täysin. Säätimien magnetoinnin syöttö pysyi 33 voltissa, mutta virran syöttö kasvoi 0,1 A:sta 0,2 A:iin nopeuden laskiessa, mutta jännite pysyi asetellussa 130 Voltissa, eikä jännitteen alenema ilmennyt. Lisäksi jänniteensäätö ei vaikuttanut säätimen syöttämään magneointiin, joten oletuksena tästä PMG:n indusoima jännite ei vaikutanutkaan kuten oletettiin, vaan säädin toimii koko speksien ilmoittamalla alueella jännitteen syöttönsä puolesta, jolloin syötön säätämiseksi ei ilmeisesti olekaan tarvetta. Tosin tilanne saattaa olla eri kun säätäjä saa 100-120 Hz:n syötön.



**Kuva 51** Tahtikoneen päädyn PMG:n paikka avattuna



**Kuva 51** Stamfordin toimittaman PMG:n rakenne

Testattuun Stamfordin tahtikoneeseen on mahdollista saada PMG-kiinnitettyä, mutta tällaista ei sovituskappaleinkaan saatu työtä varten.

### 6.4.3 Lisäkoestus säätimille

Tehdyn testin perusteella päätettiin testata säädintä edelleen tyhjäkäynnillä, testaten kuinka suurella nopeusalueella säädin kykenee pitämään liitinjännitteen vakiona. Jännite säädettiin 1500 rpm:llä 210 Volttiin, jota ylemmäs ei päästy, tämän jälkeen testattiin molemmilla säätimillä kuinka suurella säätöalueella ne kykenivät pitämään jännitteen 210 Voltissa.

### **MX342 säätimen toiminta-alue**

Koe suoritettiin alkuun nostamalla servolla tahtikoneen nopeutta. Jännite pysy vakiona aina 2300 rpm:ään asti, 210 Voltilla sekä 110 voltilla. Tämän jälkeen jännite laskettiin 110 voltilla 800 rpm:ään asti, kunnes tahtikone muuttui epästabiiliksi, 210 voltin jännitteellä päästiin 1100 rpm:ään asti tahtikoneen pysyessä edelleen stabiilina, magnetointivirta oli jo 0,6 A ja magnetoinnin jännite 120 V.

Säätimien ollessa aivan ala-rajalla ei kyetä päättelemään onko ala-raja säätimestä tai jo servosta johtuva. Nopeuden pudotessa ja magnetointitehon noustessa servon tehonsyöttö alkoi olla jo tyhjäkäynnillä sen maksimirajoilla. Servolla ei olisi enää kyetty ajamaan nopeutta alemmas sen suojalaitteiden katkastessa sen pyöryksestä pois.

### **MX321 säätimen testaus**

Säätimelle suoritettiin koe samoilla alueilla kuin MX342:lla jännitteen ollessa 110 Volttia. MX321 säätimellä päästiin myös 2300 rpm:ään, mutta vauhdin pudotessa jo 1100 rpm:ään oli koe keskeytettävä kun tahtikonetta pyörittävä servo ei enää jaksanut pyörittää tahtikonetta, tällöin säädin syötti magnetoinnille 110 V ja 0,8 A.

Suorittaessa testi vielä uusiksi päästiin hetkellisesti 1000 rpm:ään, jolloin säädin syötti 180 V ja 1,0 A, tosin servon suojalaitteet katkaisivat sen jälleen pois pelistä, hyvin nopeasti tällä nopeudella.

#### 6.4.4 MX342 ja MX321 säätimien testauksen lopputulos

Vaikkakin Knee-Pointin mallinnus epäonnistui, säätimien varsinainen kytkeä käytännössä selvisi ja niiden toiminnan ymmärtäminen lisääntyi. Säätimillä oli molemmilla kyky pitää jännite yllä testatulla 1100-2300 rpm kierrosalueella käyttäessä 50 Hz:n syöttöä, mutta varsinaista jänniteen laskua ei tällä alueella havaittu, jolloin säätimen Knee-Point asettele oli käytännössä olematon tehdyssä mittauksessa.

Säätäjien vaatima 100-120 Hertzin syötön korvautuessa 50 Hz:n syötöllä saattaakin aiheuttaa myös tilanteen, jossa säädin luulee tahtikoneen pyörivän kaksinkertaisella nopeudella, jolloin nopeuden pudotuksella ei saavutettu knee-pointtia ollenkaan. Tilanne saattaisi olla mallinnettavissa järeämmällä servolla, joka kykenisi pyörittämään testattua tahtikonetta alle puolella sen nimellisestä nopeudesta, 750 rpm, jonka lähelle knee-point kyettäisiin asettamaan, tosin servosta loppui tyhjäkäynti tilanteissakin jo potku noin 1000 rpm:n paikkeilla. / 11 /

## 7 LOPPUPÄÄTELMÄT

Työtä koskeva loppupohdinta on jaettavissa lyhyeen osuuteen itse tahtikoneesta ja magnetoinnin säätäjistä.

### ***7.1 Tahtikoneen kuormitettavuus muuttuvanopeuksisena***

Testatun 1500 rpm:n tahtikoneen voidaan olettaa kykenevän toimimaan vähintäänkin 100 rpm:n nopeuden pudotuksella vielä nimellisellä kuormallaan, eli noin 46 Hz:n taajuudella, tällöin magnetoinnin nousu on jo noin 40 %.

Mikäli nopeus edelleen putoaa 100 rpm:ää 1300 rpm:ään, on magnetoinnin määrä jo kaksinkertainen. Kone kuitenkin pystyy vielä noin 43 Hz:n taajuudellakin pyörittämään nimelliskuormaa ilman että sille aiheutuu ongelmia epästabiilisuuden kanssa. Tämänkaltaisen nopeuden pudotuksen voi jo tosin olettaa laskevan koneen elinikää, mikäli se on jatkuvassa käytössä magnetointinsa suhteen huomattavalla ylivirralla, sillä tämä aiheuttaa myös jo merkittävästi suuremman lämpenemän.

Mikäli taas taajuus nousee ei tahtikoneen kanssa tule sähköiseltä kannalta ongelmia. Ensimmäiseksi ongelmaksi nopeuden noustessa tulee sen mekaaninen ilmoitettu maksiminopeus, 2250 rpm. Magnetoinnin tarve ainoastaan laskee nopeuden noustessa.

Tahtikoneelle voidaan tehtyjen kokeiden perusteella kertoa sen tarvitsevan noin 50 % suuremman magnetoinnin jo 46 Hz:n taajuudella pyöriessä, ja 100 % suurempi 43 Hz:n taajuudella pyöriessä.

## **7.2 Magnetoinnin säätäjien toiminta muuttuvanopeuksisina**

Käytännössä toimivat ja oikeat testit kyettiin ainoastaan suorittamaan tahtikoneen mukana tulleella SA465-2 säätimellä. Tällä säätäjällä kyettiin myös ongelmitta säätämään magnetointia ongelmitta 100 rpm:n nopeuden pudotuksella. Nopeuden pudotessa 1350 rpm:ään kykeni säätäjä vielä toimimaan myös nimelliskuormallaan, mutta pudotus 1300 rpm:ään nimelliskuormalla ei enään onnistunut.

MX342 ja MX321 säätimillä ei kyetty testiä suorittamaan Knee-Pointin osalta PMG:n puuttumisen vuoksi. Säätimillä kyettiin kuitenkin ajamaan 50 Hz:n tehonsyötöllä siten että ne ilmeisimmin olettivat koneen pyörivän kaksinkertaisella nopeudella, eikä täten ikinä saavutettu Knee-Point aluetta tahtikoneetta pyörittävän servon tehorojojen tullessa vastaan. Säätimet kykenivät kuitenkin pitämään magnetoinnin yllä 1100-2300 rpm:n tyhjäkäyntialueella, sekä myös nimelliskuormalla tahtikoneen toimintarajoissa vaikka Knee-Pointin toiminnan mallinnus ei toiminutkaan.

## **8 KIITOKSEN SANOJA**

### ***8.1 Kiitokset valvojalle ja koululle***

Haluan kiittää valvojaani Lauri Hietalahtea mielenkiintoisesta aiheesta sekä joustavuudessa aikataulujen suhteen. Itsenäinen työskentely työn parissa on ollut erittäin mielenkiintoista ja on opettanut minulle paljon. Lisäksi kiitän koulua monimuotoisesta ja riittävästä välineistöstä, jolla tämä työ saatiin aikaiseksi.

### ***8.2 Kiitokset tovereilleni sekä perheelleni***

Haluan erityisesti kiittää isääni ja äitiäni, joita ilman en tässä maailmassa olisi, heidän panostuksensa lapsuuteni kehittäviin monimuotoisiin toimintoihin on muovannut minusta henkilön joka olen tänään. Lisäksi kannustavia sisaruksiani, joiden kannustavat ja iloiset kommentit minulle kautta elämäni ovat olleet suuri apu tämän työn tekemisessä. Kiitokset pieni sisko, pieni veli, sekä pienin sisko.

Haluan kiittää tovereitani, jotka ovat olleet auttamassa minua työn tekemisessä koulun laboratoriossa. Kiitokset Ippe, Hallilan Juhnis, Järvensivun Miksa, Alberto ”Kalevan Paroni”, Peide sekä Hanscarle. Myös muille tovereille kiitokset toveruuden olemassa olostaan.

### ***8.3 Kiitokset Kalmar Industriesille***

Haluan kiittää Kalmar Industriesia, joka tarjosi koulun kautta minulle mielenkiintoisen lopputyön aiheen sekä heidän edustajansa opasti minua työn teossa magnetoinnin säätäjiä koskien, sekä toimittivat niitä koululle.

## LÄHDELUETTELO

### **Painetut lähteet**

- 1 Aura, Lauri – Tonteri, Antti J., Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet WSOY 1996
- 2 Sähkömekaniikan opintojakson S-17.100 luentomonisteet - Otaniemi 1995
- 3 Hietalahti Lauri, Tahtikone TAMK 2007
- 4 Stamford BCA164A Datasheet - Stamford
- 5 Stamford SA465-2 AVR datasheet - Stamford
- 6 Stamford MX342 AVR Datasheet - Stamford
- 7 Stamford MX321 AVR Datasheet - Stamford

### **Sähköiset lähteet**

- 8 SVT Opus - <http://www.e-leeh.org/svtopus/>
- 9 Hietalahti Lauri – tekstiviesti 14.22.56 - 30.3.2007
- 10 ABB:n Tekninen Opas – luku 17
- 11 Puhelinkeskustelu Mikko Nurmelan kanssa 5.4.2007
- 12 Stamford PMG-säätimiin liittyvä Powerpoint esitys