



Epätahtikoneen ympyrädiagrammi

1. Työn tarkoitus

Työn tarkoituksena on epätahtimoottorin ominaiskäyrien ja ympyrädiagrammin määrittäminen. Tämä tapahtuu suorittamalla koneelle perusmittaukset johon kuuluvat resistanssin mittausta, tyhjäkäyntikoe ja oikosulkukoe. Mittaustulosten perusteella moottorin momenttikäyrä lasketaan PC-tietokone ohjelmalla. Ympyrädiagrammi piirretään mittaus- ja laskentatulosten perusteella.

2. Resistanssin mittaus

Moottorin staattorikämmien tasavirtaresistanssit on mitattava, jotta voitaisiin päätellä, onko kone oikein ja symmetrisesti käämitty. Mittaustuloksia tarvitaan myös ympyrädiagrammin teossa. Jotta mittaustulokset olisivat tarkkoja, on mittaukset suoritettava mittasiltaa käyttäen. Mittaus suoritetaan mittaamalla jokaisen staattorikämmien resistanssi. Mittaustuloksista lasketaan keskimääräinen vaiheresistanssi.

Suoritimme koneelle resistanssin mittaukset. Tulokset taulukossa 1.

Taulukko1. Staattorin vaiheresistanssit

Käämi	$U_1 - U_2$	$V_1 - V_2$	$W_1 - W_2$	Keskiarvo
R / Ω	1.7	1.65	1.65	1.67

Tulosten perusteella voidaan väittää kämmien olevan oikein ja symmetrisesti käämitty, koska mittaustulokset ovat niin yhteneväiset.

3. Moottorin leima-arvot

$$P_n = 1.5kW$$

$$n_n = 1400r/min$$

$$Y: U_n = 380V, I_n = 2.9A$$

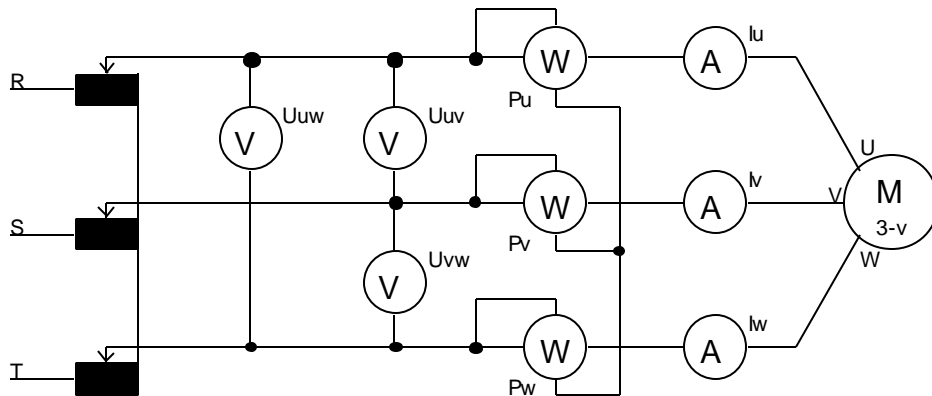
$$D: U_n = 220V, I_n = 5.1A$$

4. Laboratoriotyössä tarvittavat laitteet

3v Säättömuuntaja
 yleismittareita 6 kpl
 W-mittareita 3 kpl
 mittasilta
 mittausjohtimia
 PC-tietokone + ohjelmisto "moottori"

5. Tyhjäkäyntimittaus

Tyhjäkäyntimittaus suoritetaan kuvan 1 kytkentää käyttäen. Mittaustulosten perusteella saadaan tietoja koneen magneettisesta tilasta, kuten sen tarvitsemasta magnetoimisvirrasta sekä rauta- ja hankaushäviöistä. Ennen koetta on moottorin annettava pyöriä tyhjäkäynnillä nimellisjännitteellä, kunnes sen ottama teho ei enää mainittavasti muutu. Tällöin laakerirasvan lämpötila ja hankaushäviöt ovat vakiintuneet. Mittaukset suoritetaan 1.2 ; 1.0 ; 0.9 ; 0.8 ; 0.6 ; 0.4 ; 0.2 kertaisilla nimellisjännitteellä U_n . Mittaukset aloitetaan suurimmasta jännitteestä, jolloin moottorin lämpötila pysyy mittausten aikana kutakuinkin vakiona, joten mittaustulokset ovat vertailukelpoisia.



Kuva 1. Tyhjäkäyntikokeen mittauskytkentä

Suoritimme tyhjäkäyntikokeen moottorin ollessa kytkettynä tähteen. Mittaustulokset taulukossa 2. Koska jännitettä ei voinut säätää $U > U_n$, aloitettiin mittaukset moottorin nimellisjännitteestä.

Taulukko 2. Tyhjäkäyntikokeen mittaustulokset

U/U_n	U_{uw}/V	U_{uv}/V	U_{vw}/V	I_u/A	I_v/A	I_w/A	P_u/W	P_v/W	P_w/W
1.0	380	383	380	2.75	2.72	2.64	67.5	52.5	60.0
0.9	342	342	340	2.08	2.11	2.07	52.5	45.0	45.0
0.8	304	304	303	1.76	1.74	1.73	45.0	37.5	30.0
0.6	228	229	227	1.27	1.23	1.23	25.0	25.0	20.0
0.4	152	152	151	0.85	0.82	0.83	15.0	15.0	15.0
0.2	76	77	77	0.46	0.47	0.47	8.8	10	7.5

Mittaustuloksista laskettiin:

- I_0 tyhjäkäyntivirta
- P_0 tyhjäkäyntiteho
- U keskimääräinen pääjännite
- $\cos\varphi_0$ tyhjäkäynnin tehokerroin

Lasketut tulokset taulukossa 3.

Taulukko 3. Tyhjäkäyntikokeen lasketut tulokset

U/U_n	I_0/A	P_0/W	U/V	$\cos\varphi_0$
1.0	2.70	180.0	381.0	0.101 ind
0.9	2.09	142.5	341.3	0.115 ind
0.8	1.74	112.5	303.7	0.123 ind
0.6	1.24	70.0	228.0	0.143 ind
0.4	0.83	45.0	151.7	0.206 ind
0.2	0.47	26.3	76.7	0.421 ind

Kaavat ja laskuesimerkit:

$$I_0 = \frac{I_U + I_V + I_W}{3} = \frac{(2.75 + 2.72 + 2.64)A}{3} = 2.70A \quad (1)$$

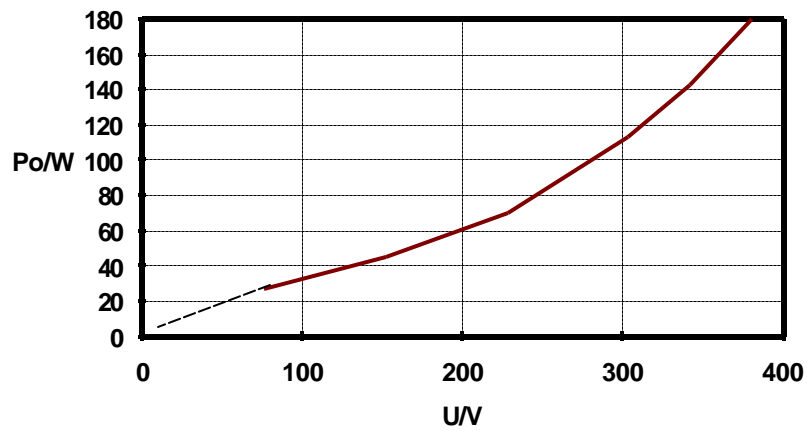
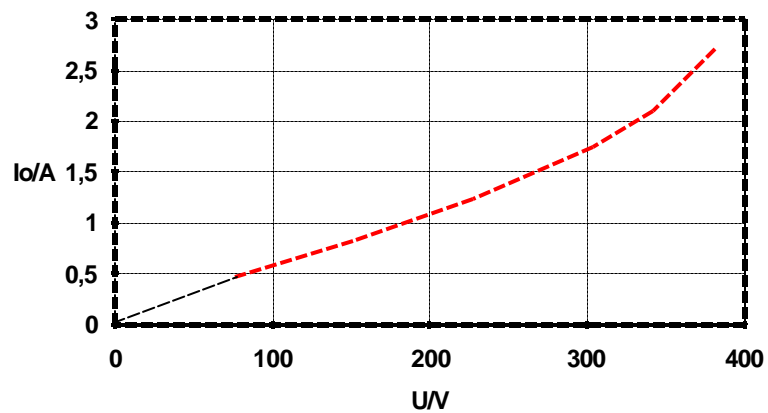
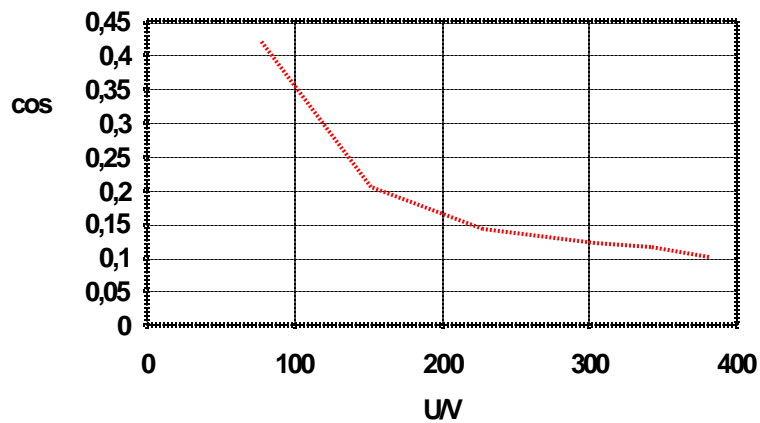
$$P_0 = P_U + P_V + P_W = (67.5 + 52.5 + 60.0)W = 180.0W \quad (2)$$

$$U = \frac{U_{uw} + U_{uv} + U_{vw}}{3} = \frac{(380 + 383 + 380)V}{3} = 381.0V \quad (3)$$

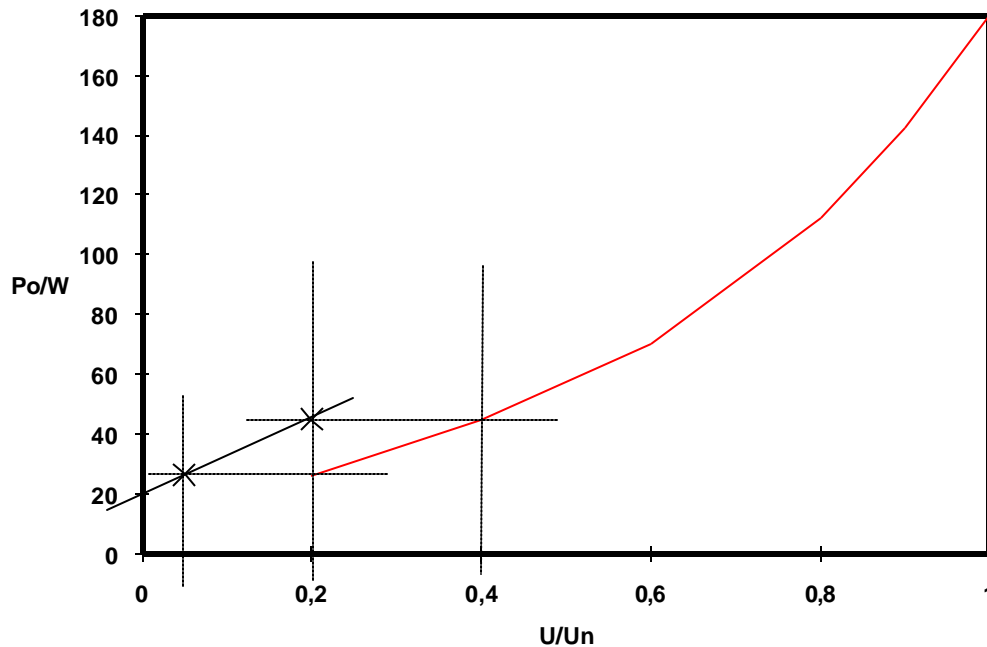
$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} \cdot U \cdot I_0} = \frac{180.0W}{\sqrt{3} \cdot 381.0V \cdot 2.70A} = 0.101ind \quad (4)$$

Tulosten perusteella laaditaan kuvaajat, jossa on esitettyinä käyrät $P_0 = f(U)$, $I_0 = f(U)$, $\cos\varphi_0 = f(U)$

Nämä käyrät on esitettyinä seuraavalla sivulla kaaviossa 1,2 ja 3

Kaavio 1. Tyhjäkäyntiteho $P_0 = f(U)$ Kaavio 2. Tyhjäkäyntivirta $I_0 = f(U)$ Kaavio 3. Tyhjäkäynnin tehokerroin $\cos \phi_0 = f(U)$

Seuraavaksi määritetään koneen hankaushäviöt P_p , jotka ovat yhtä suuret kuin tyhjäkäyntiteho jännitteellä $U=0V$. Tätä jännitettä vastaava teho määritetään kuvaajasta, jossa $P_0 = f(U/U_n)$. Kuvaajassa siirretään tyhjäkäyntihäviön arvo pisteestä $0.4 \cdot U_n$ pisteeseen $0.2 \cdot U_n$. Samoin pisteestä $0.2 \cdot U_n$ pisteeseen $0.05 \cdot U_n$. Saatujen pisteiden kautta piirretään suora, joka leikkaa P_0 -akselin. Leikkauspiste ilmoittaa hankaushäviöiden suuruuden. Menetelmä on esitettyä kaaviossa 4.



Kaavio 4. Moottorin hankaushäviöiden määrittäminen

Kaaviosta 4 lukemalla määritettiin koneelle hankaushäviöiden suuruus

$$P_p = 20W$$

Lisäksi määritellään rautahäviöt P_r . Nämä saadaan vähentämällä tyhjäkäyntitehosta hankaushäviöt ja staattorin tyhjäkäyntikuparihäviöt P_{ko} .

Tyhjäkäyntikuparihäviöt on laskettu kaavan (5) mukaan. Tyhjäkäyntivirta I_0 on saatu taulukosta 3 lasketuista arvoista moottorin nimellisjännitteellä. R_1 on taulukon 1 mukainen vaiheresistanssien keskiarvo.

$$P_{KO} = 3 \cdot I_0^2 \cdot R_1 = 3 \cdot (2.7A)^2 \cdot 1.67\Omega = 36.5W \quad (5)$$

Tämän jälkeen voidaan laskea rautahäviöt P_r kaavan (6) mukaan:

$$P_r = P_0 - (P_{KO} + P_p) = 180.0W - (36.5W + 20W) = 123.5W \quad (6)$$

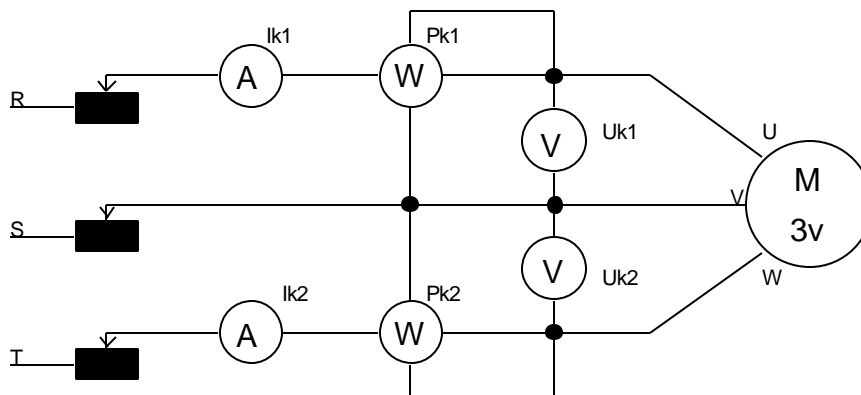
Yhteenvetona mittaus- ja laskutulosten perusteella saadut koneen häviöt nimellisjännitteellä:

- hankaushäviöt $P_p = 20W$
- tyhjäkäyntikuparihäviöt $P_{KO} = 36.5W$
- rautahäviöt $P_r = 123.5W$
- tyhjäkäyntihäviöt
- yhteensä $P_0 = 180W$

6. Oikosulkukoe

Oikosulkukokeessa tutkittavan koneen akseli lukitaan paikoilleen mielivaltaiseen asentoon. Tämän jälkeen moottorin staattoriin syötetään pieni kolmivaihejännite ja roottoria pyöritetään hitaasti käsin. Moottorin ottamaa virtaa seurataan ja roottori pysäytetään asentoon, jossa virralla on keskiarvo. Oikosulkukokeet suoritetaan huomattavasti pienemmällä jännitteellä kuin moottorin nimellisjännite. Mittauksen suoritetaan moottorin nimellisvirran alueella pysyen. Koneen palamisen estämiseksi on koestus valmistettava hyvin ja suoritettava nopeasti.

Laboratoriossa koe suoritetaan kuvan 2 mukaista kytkentää käyttäen. Mittaukset suoritetaan virran arvoilla 1.5; 1.0; 0.8; $0.5 \cdot I_n$ edellisen mukaisessa järjestyksessä.



Kuva 2. Oikosulkukoe

Laboratoriossa suoritimme oikosulkukokeen ajanpuutteen vuoksi vain moottorin nimellisvirralla. Moottori oli kytketty tähteen. Mittaustulokset on esitettyinä taulukossa 4.

Taulukko 4. Oikosulkukokeen mittaustulokset

Mittaus	I_{K1} / A	I_{K2} / A	P_{K1} / W	P_{K2} / W	U_{K1} / V	U_{K2} / V
1	2.90	2.84	132.5	-20	60.5	59.5

Mittaustulosten perusteella lasketaan:

I_K	oikosulkuvirta
U_K	oikosulkujännite
P_K	oikosulkuteho
P_{KN}	todellinen oikosulkuteho nimellisjännitteellä
I_{KN}	oikosulkuvirta nimellisjännitteellä
$\cos\varphi_K$	oikosulkutehokerroin
Z_K	oikosulkuimpedanssi
R_K	oikosulkuresistanssi
X_K	oikosulkureaktanssi

Lasketut tulokset esitettyinä taulukossa 5.

Taulukko 5. Oikosulkukokeen lasketut tulokset

Mittaus	I_K / A	U_K / V	P_K / W	P_{KN} / W	I_{KN} / A	$\cos\varphi_K$	Z_K / Ω	R_K / Ω	X_K / Ω
1	2.87	60.0	112.5	4512.5	18.2	0.377ind	12.07	4.55	11.18

Kaavat ja laskuesimerkit:

$$I_K = \frac{I_{K1} + I_{K2}}{2} = \frac{(2.90 + 2.84)A}{2} = 2.87A \quad (7)$$

$$U_K = \frac{U_{K1} + U_{K2}}{2} = \frac{(60.5 + 59.5)V}{2} = 60.0V \quad (8)$$

$$P_K = P_{K1} + P_{K2} = (132.5 - 20)W = 112.5W \quad (9)$$

$$P_{KN} = P_N \left(\frac{U_N}{U_K} \right)^2 = 112.5W \left(\frac{380V}{60.0V} \right)^2 = 4512.5W \quad (10)$$

$$I_{KN} = \frac{U_N}{U_K} I_K = \frac{380V}{60.0V} \cdot 2.87A = 18.2A \quad (11)$$

$$\cos \mathbf{j}_K = \frac{P_K}{\sqrt{3} \cdot U_K \cdot I_K} = \frac{112.5W}{\sqrt{3} \cdot 60.0V \cdot 2.87A} = 0.377 \text{ ind} \quad (12)$$

$$Z_K = \frac{U_K}{\sqrt{3} \cdot I_K} = \frac{60.0V}{\sqrt{3} \cdot 2.87A} = 12.07\Omega \quad (13)$$

$$R_K = Z_K \cdot \cos \mathbf{j}_K = 12.07\Omega \cdot 0.377 = 4.55\Omega \quad (14)$$

$$X_K = Z_K \cdot \sin \mathbf{j}_K = 12.07\Omega \cdot 0.926 = 11.18\Omega \quad (15)$$

7. Ympyrädiagrammi

Kun moottorin ottamat virrat ja vaihesiirtokulmat tiedetään sen tyhjäkäynti- ja oikosulkutilassa, voidaan moottorille piirtää ympyrädiagrammi. Ympyräpiirros piirretään vaihearvoille olettaen kytkennäksi tähdeksi, vaikka moottorin todellinen kytkentä olisikin kolmiokytkentä. Tutkittavan moottorin Ympyrädiagrammi on esitettyinä liitteessä 1. Siinä vaihejännite \underline{U}_{V1} on piirretty pystysuoraan. Virtojen \underline{I}_0 ja \underline{I}_{KN} suunta ja suuruus on saatu edellisten mittausten pohjalta selville. \underline{I}_0 on tyhjäkäyntivirta nimellisjännitteellä (Kaava 1) ja \underline{I}_{KN} on oikosulkuvirta moottorin nimellisvirralla

reduoituna nimellisjännitteeseen (Kaava 11). Ympyrän keskipiste on saatu seuraavasti:

Pisteestä P_0 on vedetty pystysuora viiva ylöspäin, kunnes se leikkaa vektorin I_{KN} . Pisteestä P_0 ja leikkauskohdan puolivälistä on vedetty jana oikealle. Ympyrän keskipiste sijaitsee tällä janalla. Sitten on vedetty viiva pisteestä P_0 pisteeseen P_K . Ympyrän keskipiste sijaitsee tämän viivan keskinormaalilla ja edellä vedetyn janan leikkauskohdassa.

Seuraavaksi on määritetty piste P_∞ . Se saadaan laskemalla $\cos\varphi_\infty$ kaavasta (16).

$$\cos\varphi_\infty = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X_K^2}} = \frac{1.67\Omega}{\sqrt{(1.67\Omega)^2 + (11.18\Omega)^2}} = 0.148 \text{ind} \quad (16)$$

missä R staattorin vaiheresistanssi (Taulukko 1)
 X_K oikosulkureaktanssi (Kaava 15)

Tästä saadaan: $\varphi_\infty = \arccos 0.148 = 81.49^\circ$

Sitten on piirretty vektori I_∞ suunnassa φ_∞ , kunnes vektori leikkaa ympyrän kehän pisteessä P_∞ . I_∞ :n suuruudella ei ole tulosten kanssa mitään merkitystä vaan ainoastaan suunta merkitsee. Seuraavaksi on merkitty ympyrän kehälle mielivaltaiseen paikkaan piste C jättämäasteikkosuoran piirtämiseksi. Pisteestä C on vedetty viiva pisteeseen P_∞ . Jättämäasteikkosuora on samansuuntainen tämän suoran kanssa. Jättämäasteikkosuoran asteikot on paikannettu piirtämällä suora pisteestä C pisteeseen P_0 . Se paikka missä tämä suora leikkaa jättämäasteikkosuoran on asteikon kohta $s=0$; $n=n_s$. Asteikkosuoran piste $s=1$; $n=0$ määrää pisteestä C pisteen P_K kautta vedetty suora. Jättämäasteikkosuoran asteikko on jaettu tasavälein yhdestä nollaan. Pisteet $p_2, p_5 \dots p_{100}$ ympyrän kehällä on määritelty pisteestä C asteikkosuoran kautta niin että esimerkiksi piste p_{20} vastaa moottorin 20%:n jättämää.

Kun tiedetään että 1mm piirroksessa vastaa 0.1A virtaa ($k=0.1A/mm$), voidaan piirroksesta määrittää esimerkiksi seuraavaa:

Origosta Pisteeseen p_{20} vedetty suora (m) ilmoittaa moottorin ottaman virran arvon jättämällä $s=0.2$. ($I_1 = I_1 \angle \varphi_1$)

Ympyrädiagrammista voidaan määrittää myös moottorin tehot sekä vääntömomentti eri jättämien arvoilla. Viiva pisteestä P_0 pisteeseen P_K on n_s tehosuora. Piirrokseseen vedetään halutun jättämäärvon kohdalle vaakasuorat apuviivat (piirroksessa esimerkki p_{20})

Piirroksen mittaa h_1 (x-akselilta apuviivalle) tarvitaan määrittäessä moottorin verkosta ottamaa tehoa P_1 . Mittaa h_2 (tehosuoralta apuviivalle) käytetään määrittäessä moottorin akselitehoja. Lisäksi piirrokseen on merkitty viiva välille $P_0 - P_\infty$. Tämä on ns. momenttisuora. Mittaa h_p (momenttisuoralta apuviivalle) käytetään moottorin momentin määrittämiseksi.

Moottorin virta kullakin jättämän arvolla selviää mittaamalla matka (m) origosta ympyrän kehällä oleviin jättämäpisteisiin. Piirroksen esimerkissä I_1

Taulukossa 6 on piirroksesta mitattu pituudet h_1 , h_2 , m , h_p jättämän arvoilla 0; 0.02; 0.05; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9 ja 1.0 pisteistä p_2 ... p_{100} .

Taulukko 6. Pituuksien määrittäminen ympyrädiagrammista

s	h_1 / mm	h_2 / mm	m / mm	h_p / mm
0	2.7	0.0	27.0	0.0
0.02	18.0	15.0	32.5	15.0
0.05	31.0	27.0	43.5	28.0
0.1	54.5	45.5	69.0	50.0
0.2	82.0	58.5	109.5	72.0
0.3	91.0	55.5	130.5	76.0
0.4	91.0	45.5	152.0	72.5
0.5	87.7	34.5	163.0	67.5
0.6	83.0	24.5	170.0	60.5
0.7	79.0	17.0	175.0	55.0
0.8	75.0	10.0	178.0	50.0
0.9	72.0	4.5	181.0	46.0
1.0	69.0	0.0	182.0	42.5

Lisäksi mitattiin h_{pmax} , eli suurin mahdollinen h_p :n arvo. Tulokseksi saatiin:

$$h_{pmax} = 76.0\text{mm, kun } s=0.27\dots 0.3$$

Taulukossa 7 on taulukon 6 pituusmittauksien perusteella laskettu moottorille seuraavanlaisia suureita eri jättämän arvoilla:

- P_1 moottorin verkosta ottama teho
- P_2 moottorin akseliteho
- η moottorin hyötysuhde
- I moottorin verkosta ottama virta
- $\cos\varphi$ moottorin tehokerroin
- M moottorin momentti

Taulukko 7. Ympyrädiagrammin avulla lasketut suureet

s	P_1 / W	P_2 / W	η	I / A	$\cos\varphi$ (ind)	M / Nm
0	178.2	0	0	2.70	0.10	0
0.02	1188	990	0.83	3.25	0.55	6.30
0.05	2046	1782	0.87	4.35	0.71	11.76
0.1	3097	3003	0.83	6.90	0.79	21.01
0.2	5412	3861	0.71	10.95	0.75	30.25
0.3	6006	3630	0.60	13.05	0.70	31.93
0.4	6006	2970	0.49	15.20	0.60	30.46
0.5	5742	2244	0.39	16.30	0.54	28.16
0.6	5478	1617	0.30	17.00	0.49	25.42
0.7	5214	1122	0.22	17.50	0.45	23.11
0.8	4950	660	0.13	17.80	0.42	21.01
0.9	4752	297	0.06	18.10	0.40	19.33
1.0	4554	0	0	18.20	0.38	17.86

Kaavat ja laskuesimerkit:

$$P_1 = 3U_{v1} \cdot k \cdot h_1 = 3 \cdot 220V \cdot 0.1 \frac{A}{mm} \cdot 31.0mm = 2046W \quad (17)$$

$$P_2 = 3U_{v2} \cdot k \cdot h_2 = 3 \cdot 220V \cdot 0.1 \frac{A}{mm} \cdot 27.0mm = 1782W \quad (18)$$

$$h = \frac{P_2}{P_1} = \frac{1782W}{2046W} = 0.87 \quad (19)$$

$$I = m \cdot k = 43.5mm \cdot 0.1 \frac{A}{mm} = 4.35A \quad (20)$$

$$\cos j = \frac{P_1}{\sqrt{3}UI} = \frac{2046W}{\sqrt{3} \cdot 380V \cdot 4.35A} = 0.71 \text{ind} \quad (21)$$

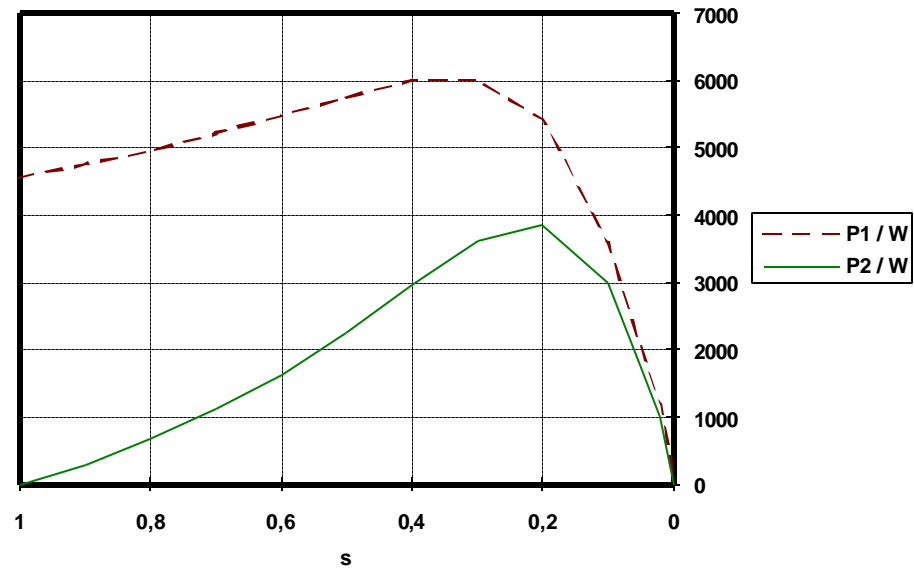
$$M = \frac{3U_{v1} \cdot k \cdot h_r}{2p \cdot n_s} = \frac{3 \cdot 220V \cdot 0.1 \frac{A}{mm} \cdot 28.0mm}{\frac{2p \cdot 1500}{60} \cdot \frac{1}{s}} = 11.76Nm \quad (22)$$

Taulukon 7 tulokset on esitettyinä graafisessa muodossa:

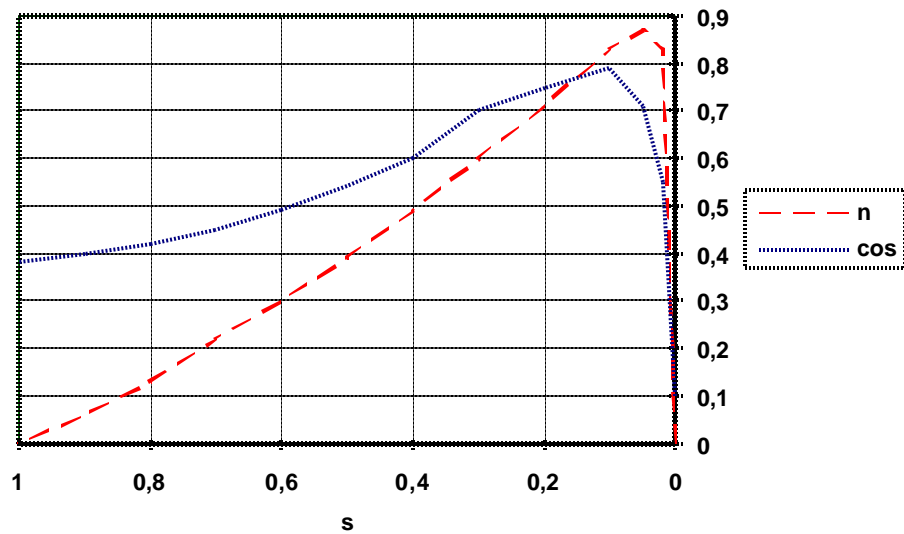
Kaavio 5: $P_1 = f(s)$, $P_2 = f(s)$

Kaavio 6: $\eta = f(s)$, $\cos\varphi = f(s)$

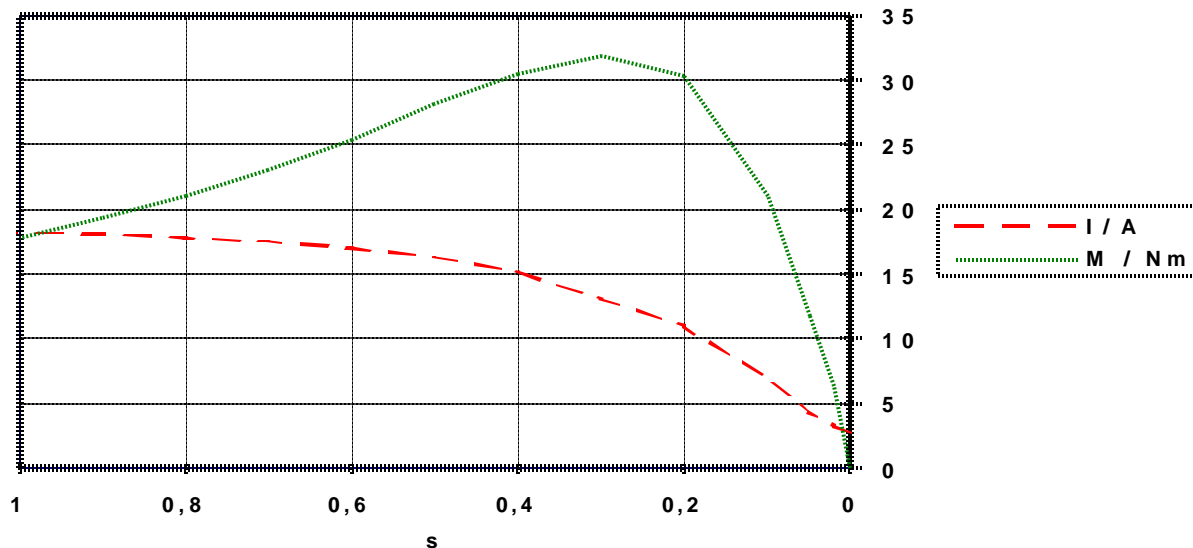
Kaavio 7: $I = f(s)$, $M = f(s)$



Kaavio 5. Moottorin otto- ja antoteho jättämän funktiona



Kaavio 6. Moottorin hyötysuhde ja tehokerroin jättämän funktiona



Kaavio 7. Moottorin virta ja momentti jättämän funktiona

Moottorin maksimimomentti ja ylikuormituskyky saadaan selville edellä määritetyn h_{pmax} arvon avulla. Koska maksimimomentti sijoittuu jättämän arvolle $s \approx 0.3$ (Kaavio 7), saadaan taulukon 7 tuloksista maksimimomentti:

$$M_{max} = 31.9 \text{ Nm}$$

Moottorin ylikuormituskyky saadaan laskemalla kaavan (23) mukaan jakamalla maksimimomentti moottorin nimellismomentilla:

$$Y_M = \frac{M_{MAX}}{P_n} = \frac{31.9 \text{ Nm}}{1500 \text{ W}} = \frac{31.9}{10.2} \text{ Nm} = 3.1 \quad (23)$$

$$\frac{2pn_n}{2p \frac{1400}{60} \cdot \frac{1}{s}}$$

Moottorin käynnistysmomentti saadaan myös taulukon 7 tuloksista kohdasta $s=1$ eli $n=0$. Käynnistysmomentti on:

$$M_k = 17.9 \text{ Nm}$$

8. Loppupäätelmät

Epätahtimoottorin ympyrädiagrammi antaa monipuolista ja tarkkaa tietoa moottorin sähköisestä toiminnasta. Koska ympyrädiagrammin tekoon tarvitaan vain kolme mittausta, on mittaukset tehtävä todella huolellisesti. Itse diagrammin piirtämisessä on oltava myös tarkkana, etenkin pituuksia mitattaessa. Kun tutkii edellä esitettyjä kaaviota, joissa on esitetty ympyrädiagrammin perusteella piirrettyjä moottorin sähköisiä suurearvoja jättämän funktiona, voidaan todeta epätahtikoneen tehokertoimen hyötysuhteen olevan suuresti riippuvainen jättämän ja sitä kautta pyörimisnopeuden arvosta. Kaavioista voidaan myös havaita tyypillinen epätahtikoneen momenttikäyrä. Jos kaaviota 7 (moottorin virta ja momentti jättämän suhteen) ajateltaisiin moottorin käynnistystapahtumana, nähdään kuinka suuren virran moottori ottaa käynnistyksen aikana. Lisäksi on havaittavissa: Jos moottorin pyörimisnopeus tippuu kuorman suuruuden vaikutuksesta, $s > 0.3$ ($n < 1050 \text{ r/min}$), moottorin momentti ohittaa maksimimomenttipisteen ja moottori pysähtyy. Liitteissä 2 ja 3 ovat momentti-, virta- ja tehokäyrät on tehty tietokoneohjelmalla. Niiden käyrämuodot eivät vastaa aivan todellista moottoria. Kun taulukossa 8 verrataan tuloksia tietokoneohjelmalla ja ympyrädiagrammilla saatuihin tuloksiin voidaan todeta tulosten olevan varsin lähellä toisiaan.

Taulukko 8. Tulosten vertailu

Laskentatapa	$P_{1\max} / \text{W}$	I_{\max} / A	M_{\max} / Nm
PC-laskenta	6303	17.1	33.0
Ympyrädiagrammi	6006	18.2	31.9

9. Lähteet

Sähkömiehen käsikirja 2 s. 182-213
 Lauri Aura
 Antti J. Tonteri