# ETUKOJEEN KÄYTTÖ EPÄTAHTI-KONEEN HYÖTYSUHTEEN PA-RANTAMISEKSI

Joonas Wuorio

Opinnäytetyö
Marraskuu 2013
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

**TIIVISTELMÄ**

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

WUORIO JOONAS:
Etukojeen käyttö epätahtikoneen hyötysuhteen parantamiseksi

Opinnäytetyö 33 sivua
Marraskuu 2013

---

Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Tampereen ammattikorkeakoulu ja työn tarkoituksena oli tutkia miten tutkimuksissa käytetyt kolme eri etukojetta vaikuttivat kolmivaiheisen epätahtikoneen hyötysuhteeseen. Hyötysuhdetta mitattiin osakuormilla ja käytetyt etukojeet olivat tähtikolmiokytkin, pehmokäynnistin ja taajuusmuuttaja. Epätahtikoneen tehostamisella voidaan mm. pidentää moottorin käyttöikää, säästää energiakustannuksissa ja vähentää laitteiston mekaanista rasitusta.

Etukojeilla saatuja mittaustuloksia verrattiin suoraan verkkoon kytketyn oikosulkumoottorin suorituskykyyn. Oikosulkumoottorin kuormitustyyppi oli tutkimuksissa sellainen, missä kuormamomentti ja pyörimisnopeus pysyivät vakioina. Tällaisella kuormitustyypillä opinnäytetyössä käytetyt etukojeet eivät kasvattaneet hyötysuhdetta. Mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että tässä opinnäytetyössä käytetyt etukojeet laskivat hyötysuhdetta, ja suoraan verkkoon kytketyllä moottorilla saavutettiin parhaimmat tulokset.

Tämän työn mittaustuloksista selviää, että työssä käytetyt etukojeet eivät kasvata oikosulkumoottorin hyötysuhdetta, joten energiankulutuksen kannalta tällaisen etukojeen käyttö on epäedullista. Työssä saavutettiin haluttuja tuloksia ainoastaan alentamalla staattorijännitettä. Alentamalla staattorijännitettä saatiin osakuorman tietyillä alueilla hyötysuhde hieman korkeammaksi. Kuormamomentin kasvaessa lähelle nimellisarvoaan ei pienemmällä staattorijännitteellä ollut merkittäviä vaikutuksia. Työssä käytettyjen etukojeiden avulla pystyttiin rajoittamaan oikosulkumoottorin isoa käynnistysvirtaa mutta ei kasvattamaan hyötysuhdetta. Jos oikosulkumoottorin kuormitustyyppi muuttuu, on näillä etukojeilla erilaiset vaikutukset.

---

Asiasanat: epätahtikone, hyötysuhde, etukoje

**ABSTRACT**

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

WUORIO JOONAS:
Use of Motor Controller to Improve the Efficiency of an Asynchronous Motor

Bachelor's thesis 33 pages
November 2013

---

The purpose of this thesis was to examine how the three different motor controllers affect the efficiency of an asynchronous motor. The efficiency of an asynchronous motor was measured on part loads. These three motor controllers were a soft starter, a star-delta starter and a frequency changer.

The results of measurement obtained with motor controllers were compared to the performance of a direct on-line motor. If an asynchronous motor operated on a constant load and speed, the motor controllers used in this thesis only reduced the efficiency of an induction motor. The best results were achieved when the motor was connected directly on line.

The measurement results of this thesis show that in case the asynchronous motor operates on a constant load and speed, the purchase of a motor controller should be considered in order to improve the efficiency. The desired results were only achieved by lowering the stator voltage. Lowering the stator voltage only improved the efficiency on very small loads and with near rated values the improvement was not significant. The results may vary if the load type of the motor changes.

---

Key words: asynchronous, motor, efficiency, controller

**SISÄLLYS**

1 JOHDANTO ..... 5
2 PYÖRIVÄ SÄHKÖKONE ..... 6
2.1 Kolmivaiheinen oikosulkumoottori ..... 6
2.1.1 Kolmivaiheinen epätahtikone ..... 9
2.2 Epätahtikoneen hyötysuhde ..... 10
2.3 Oikosulkumoottorin kuormitustyypit ..... 14
2.4 Oikosulkumoottorin kytkentätavat ..... 15
2.5 Oikosulkumoottorin käynnistäminen ..... 16
3 ETUKOJEET ..... 17
3.1 Tähtikolmiokytkin ..... 18
3.2 Pehmokäynnistin ..... 20
3.3 Taajuusmuuttaja ..... 22
4 MITTAUKSET ..... 24
4.1 Suorakäynnistys (D.O.L) ..... 26
4.2 Tähtikolmiokytkin ..... 27
4.3 Pehmokäynnistin ..... 28
4.4 Taajuusmuuttajakäyttö ..... 30
5 YHTEENVETO ..... 31
LÄHTEET ..... 33

# 1 JOHDANTO

Vaihtovirralla toimivat oikosulkumoottorit ovat teollisuuden suurin yksittäinen sähkönkuluttaja ja oikosulkumoottorien käytön tehostaminen eli hyötysuhteen parantaminen on teollisuuden suurin energiansäästömahdollisuus. Tämän takia on tärkeää valita oikosulkumoottorille sellainen etukoje, joka parantaa hyötysuhdetta ja siten säästetään energiakustannuksissa. Etukojeet vähentävät myös laitteiston mekaanista rasitusta ja sähköistä kuormitusta, pidentävät koneen käyttöikää ja pienemmällä sähkönkulutuksella on positiivisia ekologisia vaikutuksia.

Tämän opinnäytetyön aiheena on tutkia kolmea eri etukojetta ja miten ne vaikuttavat tutkittavan kolmivaiheisen epätahtikoneen hyötysuhteeseen. Tutkittavan epätahtikoneen hyötysuhdetta mitataan osakuormilla ja saatuja tuloksia verrataan suoraan verkkoon kytketyn moottorin suorituskykyyn. Opinnäytetyössä käytetyt etukojeet ovat pehmokäynnistin, tähtikolmiokytkin ja taajuusmuuttaja.

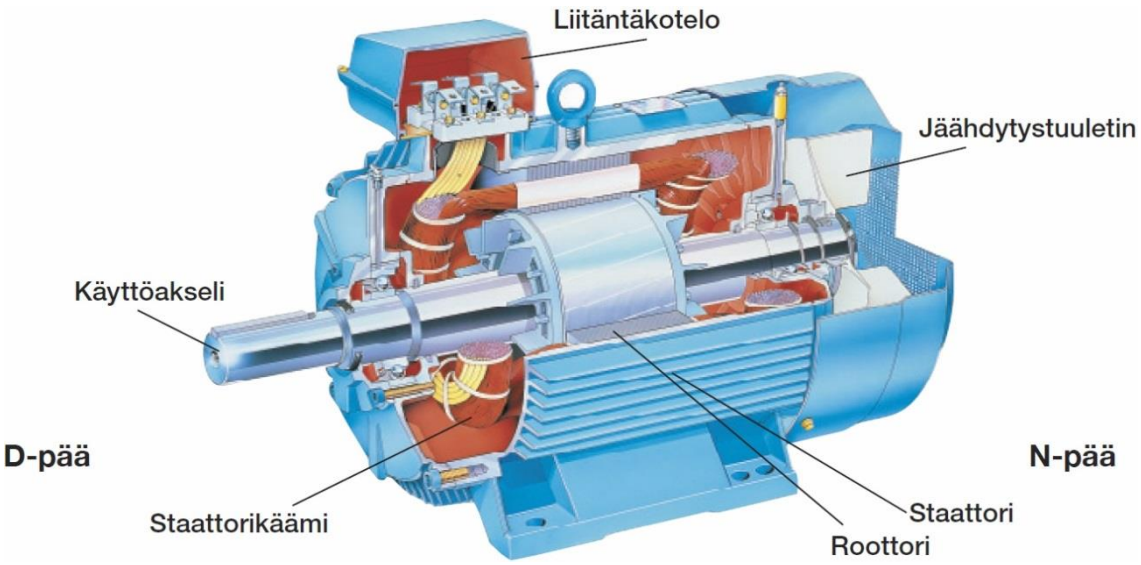
Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Tampereen ammattikorkeakoulu ja mittaukset suoritettiin koulun sähkötekniikan laboratoriossa.

# 2 PYÖRIVÄ SÄHKÖKONE

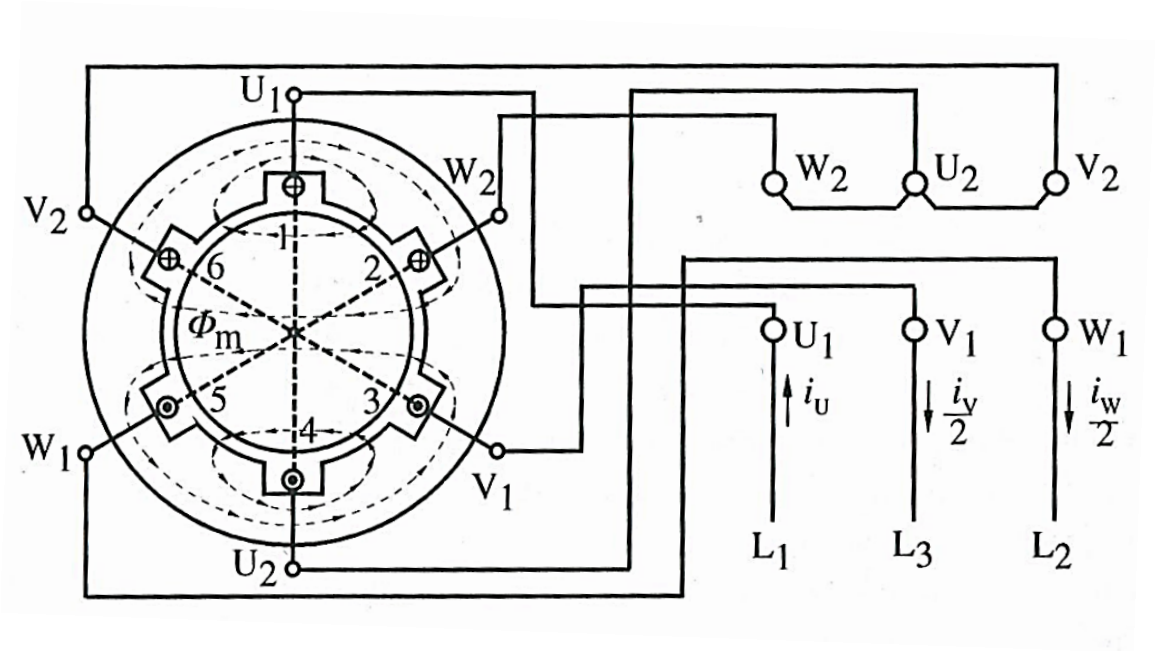
Pyörivät sähkökoneet voidaan jakaa kahteen ryhmään, generaattoreihin ja moottoreihin, riippuen siitä muuntaako moottori mekaanisen energian sähköenergiaksi vai sähköenergian mekaaniseksi energiaksi. Kaikista sähkökoneista eniten käytetty on kolmivaiheinen oikosulkumoottori. Sen rakenne on lähes ihanteellinen, koska siinä on vain yksi liikkuva osa eli roottori. (Aura ja Tonteri 1998, 304-305.)

## 2.1 Kolmivaiheinen oikosulkumoottori

Epätahtikone voidaan valmistaa oikosulkumoottoriksi, jossa roottorin häkkikäämityksen molemmat päät ovat oikosuljettu oikosulkurenkailla. Moottorin toiminta perustuu roottoriin kehitettävään pyörivään magneettikenttään. Pyörivä magneettikenttä saadaan kehitettyä ilman lisälaitteita staattorin symmetrisen kolmivaihekäämityksen ja siihen johdetun symmetrisen vaihtovirran avulla (kuvio 3). (Aura ja Tonteri 1998, 305.)

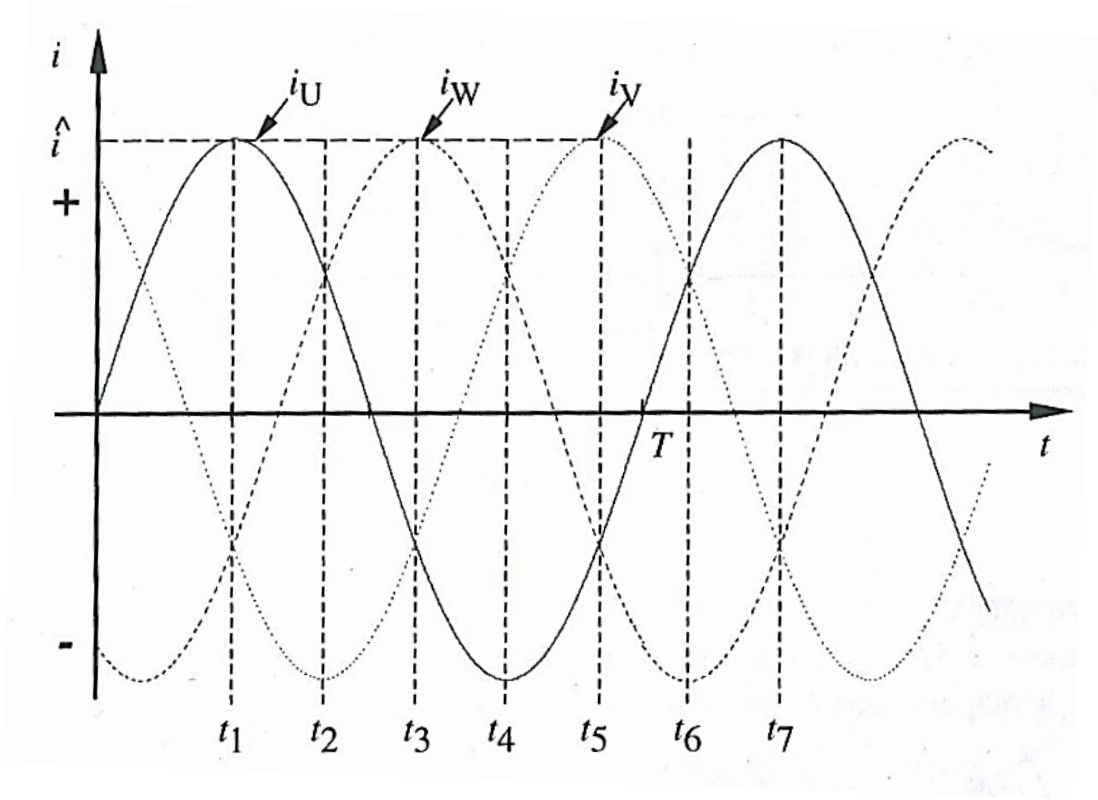



Kuvio 1. Oikosulkumoottorin rakenne (ABB, Pehmokäynnistinopas 2007, 2)



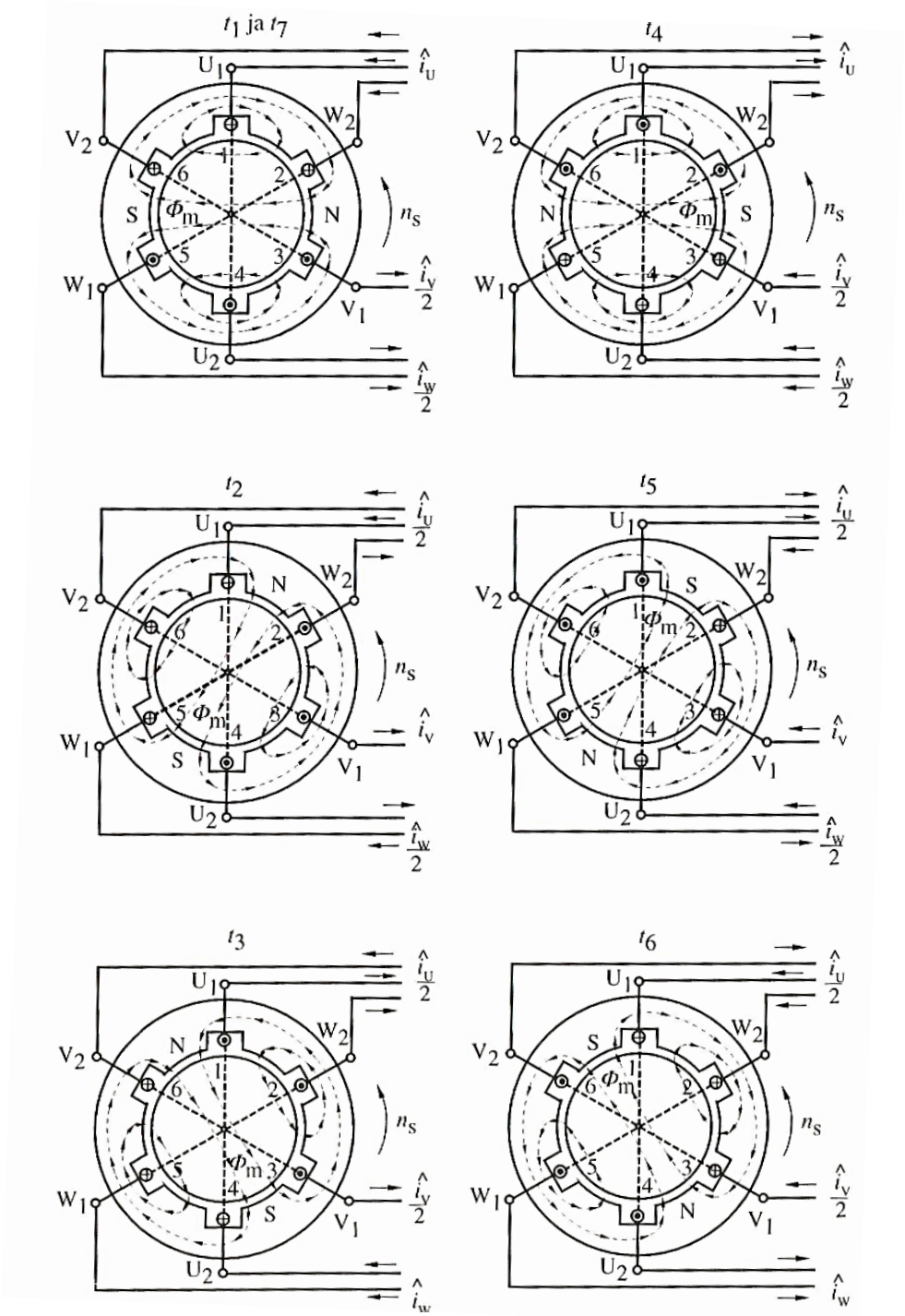

Kuvio 2. Kaaviollinen esitys koneen kolmivaihekäämityksen synnyttämästä pyörivästä magneettikentästä (Aura ja Tonteri 1998, 307)

Kuviossa 2 on esitetty yksinkertaisimman vaihtosähkökoneen kolmivaihekäämitys, jossa on vain kuusi uraa eli kaksi uraa vaihetta kohti. Käämitys on kytketty tähtikytkentään yhdistämällä vaihekäämien loppupäät yhteen. (Aura ja Tonteri 1998, 306.)




Kuvio 3. Koneen vaihekäämeihin johdettu kolmivaiheinen symmetrinen sinimuotoinen virta (Aura ja Tonteri 1998, 307)

Kuvion 4 kuvasarjassa on esitetty resultoivan magneettikentän muodostuminen, kun staattoriin johdetaan kuvion 3 muotoinen symmetrinen sinimuotoinen virta. Kuviosta voidaan todeta, että symmetrinen kolmivaihevirta johdettuna symmetriseen kolmivaihekäämitykseen synnyttää koneeseen vakiona pysyvän pyörivän magneettikentän, joka on aina kohtisuorasti sen vaihekäämin tasoa vastaan, jossa virralla on huippuarvo. (Aura ja Tonteri 1998, 308.)




Kuvio 4. Kolmivaihekäämityksen synnyttämä pyörivä magneettikenttä (Aura ja Tonteri 1998, 309)

### 2.1.1 Kolmivaiheinen epätahtikone

Epätahtikoneen roottori pyörii eri nopeudella eli epätahdissa kuin staattorikäämityksen kehittämä magneettikenttä ja tästä tulee nimitys epätahtikone.

Epätahtikoneen sähköisen toiminnan kannalta aktiiviset osat ovat staattorin käämitys levypaketteineen ja roottorin käämitys levypaketteineen. Muut osat ovat passiivisia, jotka pitävät aktiiviset osat paikoillaan, johtajavat sähkön koneeseen tai pois koneesta ja välittävät pyörivän liikkeen moottorista työkoneeseen tai voimakoneesta generaattoriin. (Aura ja Tonteri 1998, 305.)

Kolmivaiheisen epätahtikoneen sähköverkosta ottama nimellinen sähköteho voidaan laskea seuraavasti.

$$P_n = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n \qquad (1)$$

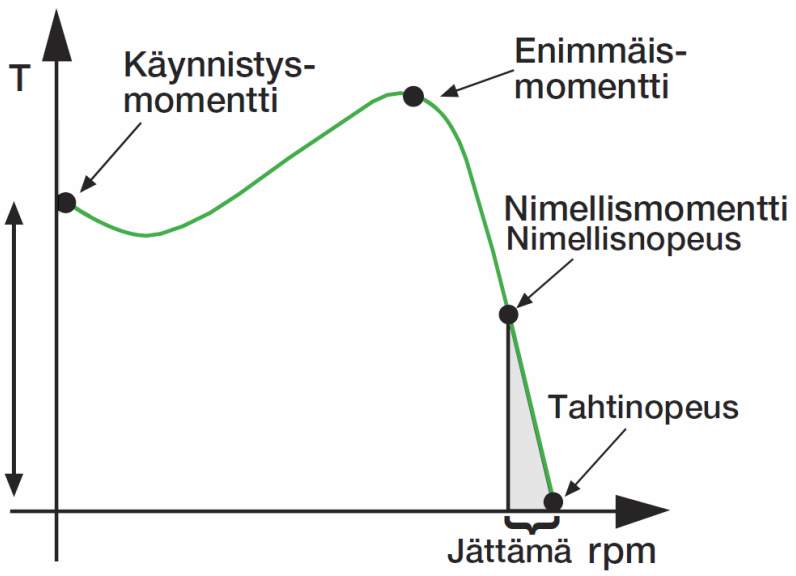
jossa $P_n$= nimellisteho
$U_n$= nimellisjännite
$I_n$= nimellisvirta
$\cos\varphi_n$= nimellistehokerroin

Moottori muuttaa tämän sähköverkosta otetun sähkötehon mekaaniseksi tehoksi ja se saadaan laskettua moottorin pyörimisnopeuden ja kuorman avulla.

$$P_2 = 2\pi \cdot n \cdot T \qquad (2)$$

jossa $P_2$= mekaaninen teho
$n$ = pyörimisnopeus
$T$= työkoneen saama mekaaninen vääntömomentti

Tahtinopeuden ja nimellisnopeuden eroa kutsutaan jättämäksi. Staattorin magneettikentän pyörisminopeus on aina suurempi kuin roottorin ja roottorin pyörimisnopeus riippuu napaluvusta.




Kuvio 5. Tyypillisen oikosulkumoottorin momenttikäyrä pyörimisnopeuden funktiona (ABB, Pehmokäynnistinopas 2007, 6)

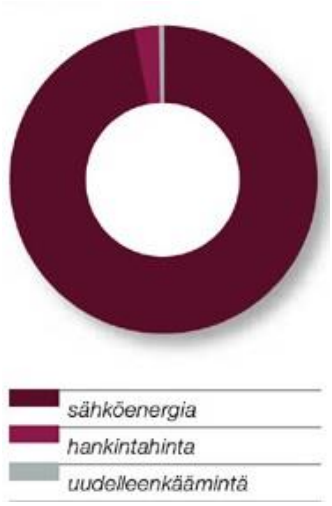
## 2.2 Epätahtikoneen hyötysuhde

Sähkömoottorit kuluttavat maailmanlaajuisesti 40 % kaikesta sähköenergiasta ja teollisuuden käyttämästä energiasta 60–70 %. Esimerkiksi yhdessä paperitehtaassa voi olla useita tuhansia sähkömoottoreita. Suuritehoisilla moottoreilla hyötysuhde saattaa olla jopa 97 %, kun taas pienitehoisimmilla hyötysuhde on 60–70 %. (SLO 2010.)

Paremmalla hyötysuhteella saavutettuja etuja ovat mm.:

- ekologisuus
- pidempi käyttöikä
- pienemmät energiakustannukset

Kuviosta 6 voidaan todeta, että suurin osa moottorin elinkaarikustannuksista syntyy sähkönkulutuksesta. Sähkönkulutuksen ollessa näin merkittävä tekijä, on moottoria hankittaessa hyötysuhteen oltava yksi valintakriteereistä tai hyötysuhdetta tulee pyrkiä parantamaan jollain etukojeella.




Kuvio 6. Moottorin elinkaarikustannusten jakautuminen (ABB 2009)

Moottorin hyötysuhdetta ei yleensä ilmoiteta moottorin kilvessä, mutta nimellishyötysuhde on laskettavissa kilven muista arvoista seuraavasti (Aura ja Tonteri 1998, 330).

$$\eta = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n} \tag{3}$$

jossa $\eta$= hyötysuhde

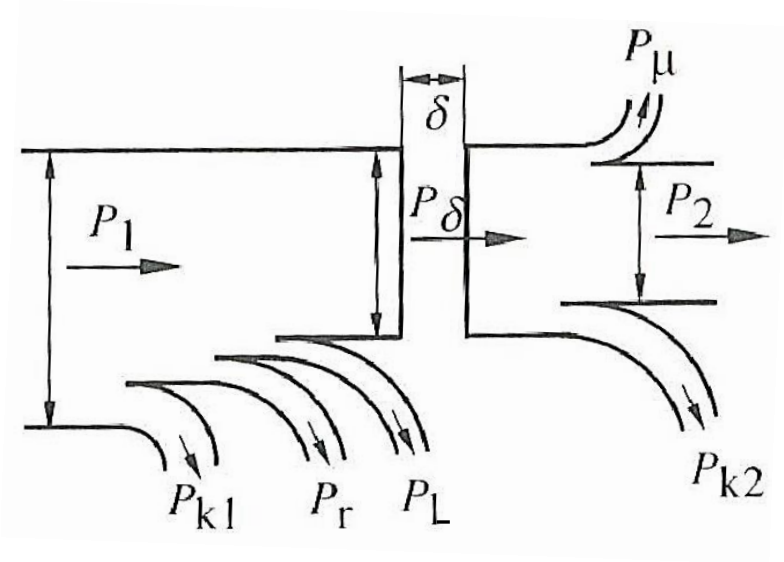
$P_n$= moottorin nimellisteho

$U_n$= nimellisjännite

$I_n$= nimellisvirta

$\cos\varphi_n$= nimellistehokerroin

Staattorissa syntyvät tehohäviöt ovat staattorikäämityksen virtalämpöhäviöt ja staattoriraudassa pyörivän magneettikentän aiheuttamat rautahäviöt. Kuormituslisähäviöt määritetään eri normien mukaisesti prosenttiarvona nimellistehosta. Ilmaväliteho siirtyy staattorista roottoriin ilmavälin kautta ja jakautuu roottoripuolella kahteen osaan, työkoneen ottamaan mekaaniseen tehoon ja roottorihäviöihin. Roottorihäviöt koostuvat roottorin virtalämpö-, ilmahankaus- ja laakerihäviöistä. (Aura ja Tonteri 1998, 328-329.)

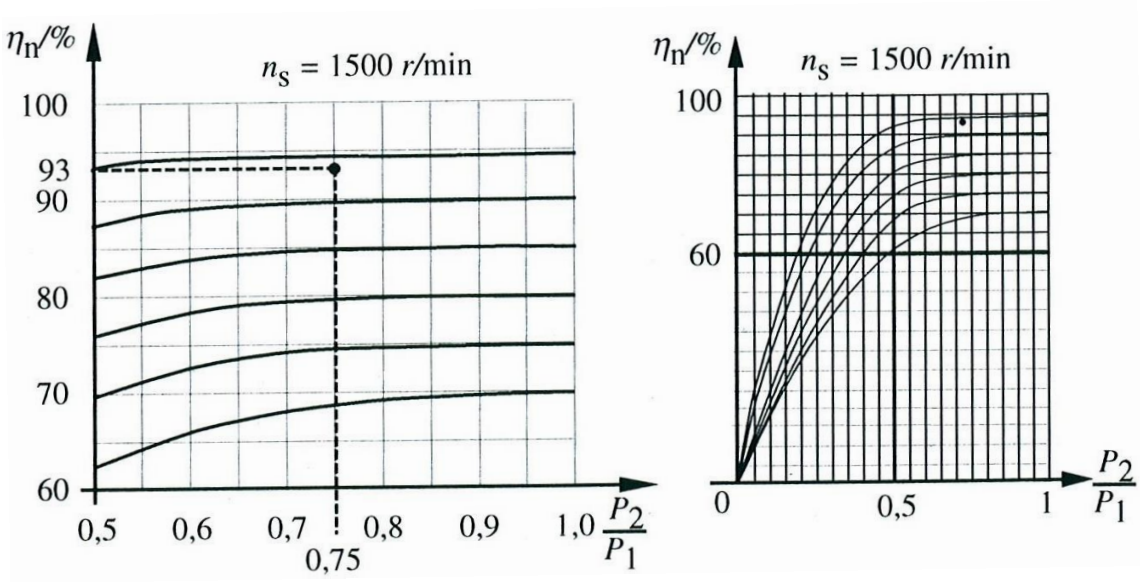



Kuvio 7. Epätahtikoneen tehonjakokaavio (Aura ja Tonteri 1998, 330)

Moottorin hyötysuhde koostuu seuraavista muuttujista:

| | |
|---|---|
| $P_1$ | moottorin ottama sähköteho |
| $P_2$ | moottorin antama mekaaninen hyötyteho |
| $P_\delta$ | ilmaväliteho |
| $P_{k1}$ | staattorin resistiiviset häviöt |
| $P_{k2}$ | roottorin resistiiviset häviöt |
| $P_r$ | rautahäviöt |
| $P_\mu$ | mekaaniset häviöt |
| $P_L$ | lisähäviöt |

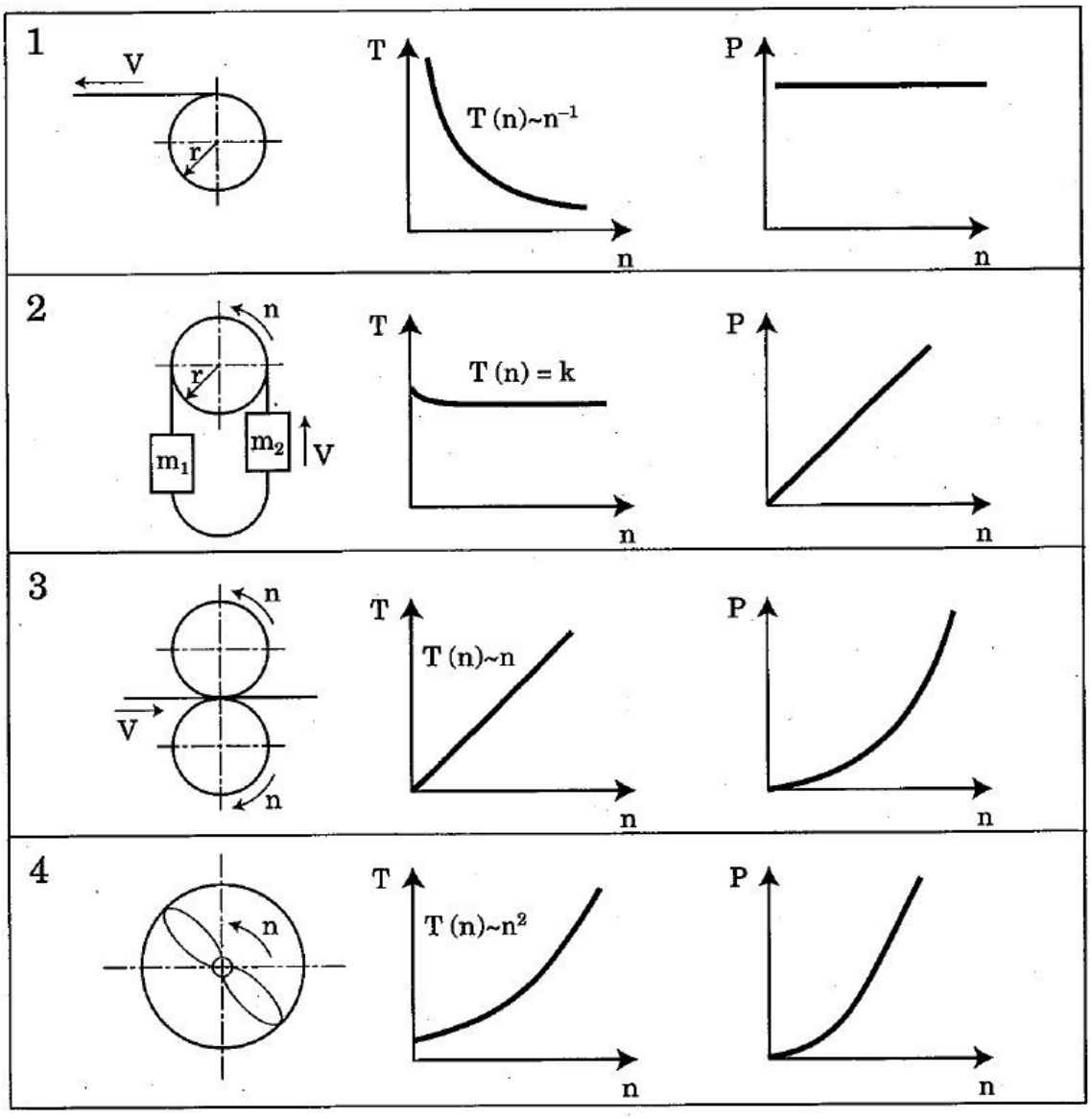
Hyötysuhdekäyrästöstä voidaan todeta, että oikosulkumoottorin hyötysuhde kasvaa nimellispistettä kohden.




Kuvio 8. Hyötysuhdekäyrästö moottoreista, joiden tahtipyörimisnopeus on 1500 1/min ja nimellistehot n. 0,25-800 kW (Aura ja Tonteri 1998, 331)

## 2.3 Oikosulkumoottorin kuormitustyypit

Kun moottorin akselilta saatu vääntömomentti on yhtä suuri kuin kuormitusmomentti, kuormitus on vakio. Näissä tapauksissa vääntömomentti ja nopeus ovat vakioita. Moottorin ja työkoneen ominaisuudet ilmaistaan nopeuden ja vääntömomentin tai tehon suhteena. Työkoneiden ominaisuudet voidaan ryhmitellä neljään ryhmään. (Danfoss Drives A/S 2000, 44.)




Kuvio 9. Neljä tyypillistä kuormitusryhmää (Danfoss Drives A/S 2000, 44)

Esimerkkejä prosesseista, joiden momentin tai tehon käyttäytymisen perusteella voidaan jakaa johonkin näihin neljään ryhmään.

Ryhmä 1: viilusorvit ja eräät muut lastuavat työstökoneet

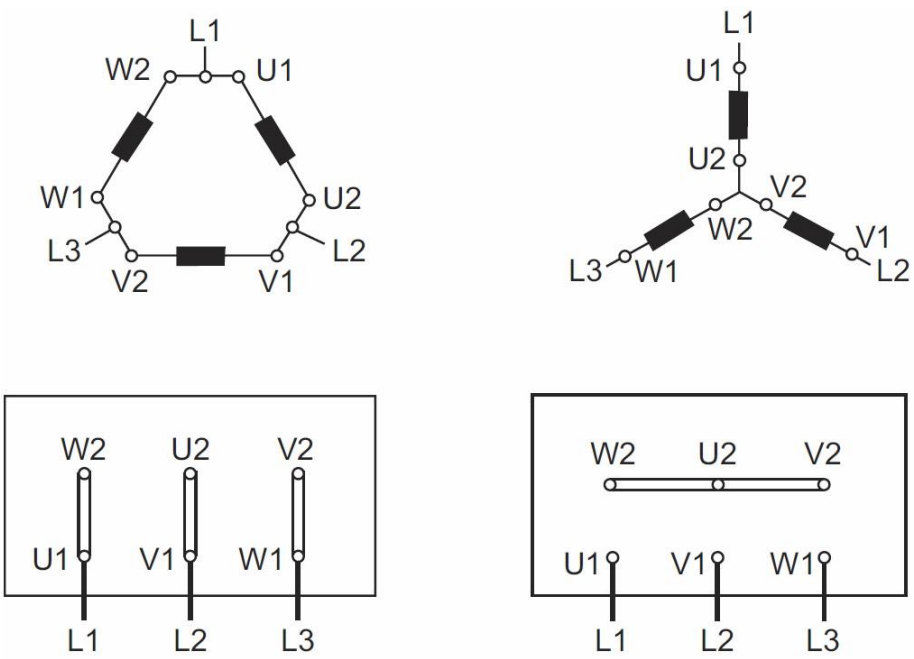
Ryhmä 2: hihnakuljettimet, nosturit, mäntäpumput ja eräät lastuavat työstökoneet

Ryhmä 3: valssaus- ja kiillotuskoneet ja muut materiaalien muokkauksessa käytetyt laitteet

Ryhmä 4: keskipakovoimaa hyödyntävät koneet kuten lingot, keskipakopumput ja -puhaltimet

## 2.4 Oikosulkumoottorin kytkentätavat

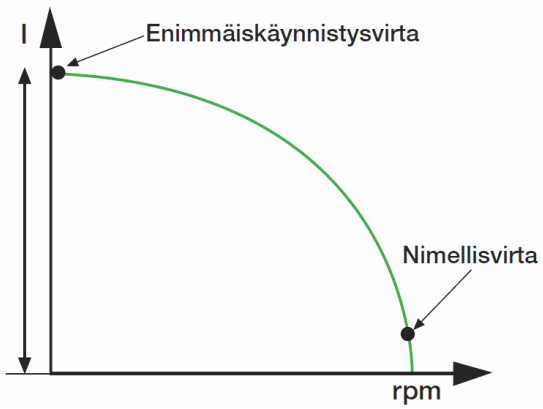
Yksinopeuksiset oikosulkumoottorit voidaan tavallisesti kytkeä kahteen jännitetasoon. Kolme staattorin käämiä voidaan kytkeä tähteen tai kolmioon. Kytkentätapa riippuu käytetystä oikosulkumoottorista ja millaiseen sähköverkkoon se liitetään. (ABB, Pehmokäynnistinopas 2007, 4; Martikainen 2011.)




Kuvio 10. Vasemmalla kolmioon ja oikealla tähteen kytketyt staattorin käämit (ABB, Pehmokäynnistinopas 2007, 4)

## 2.5 Oikosulkumoottorin käynnistäminen

Yleisin käynnistystapa on suora käynnistys eli direct on line (D.O.L). Käynnistyslaitteisto koostuu ainoastaan pääkontaktorista sekä lämpöreleestä tai elektronisesta ylikuormitusreleestä. Tämän käynnistystavan haittana on se, että käynnistysvirta on suurin mahdollinen. Normaali arvo on kuusin- tai seitsenkertainen moottorin nimellisvirtaan verrattuna, mutta arvo voi nousta jopa yhdeksän- tai kymmenkertaiseksi. Käynnistysvirran lisäksi moottori ottaa aivan käynnistyksen ensihetkellä noin 14 kertaa nimellisvirran suuruisen virtapiikin. (ABB, Pehmokäynnistinopas 2007, 9.)




Kuvio 11. Tyypillisen oikosulkumoottorin virran käyttäytyminen pyörimisnopeuden funktiona (ABB, Pehmokäynnistinopas 2007, 3)

# 3 ETUKOJEET

Moottorilähdöt koostuvat erilaisista komponenteista ja jokaisella on oma tehtävänsä tässä piirissä, esimerkiksi suojata käyttäjiä tai moottoreita. Tehoelektroniikan kehittymisen myötä taajuusmuuttajien, tähtikolmiokytkimien ja pehmokäynnistimien käyttö on yleistynyt. Nämä kojeet vaikuttavat oikosulkumoottorin suorituskykyyn, pidentävät käyttöikää ja vähentävät energiankulutusta. Jokaiselle prosessille valitaan kyseiseen käyttöön sopivat etukojeet ja komponentit.

Yleisimmissä moottorilähdöissä käytetyt peruskomponentit:

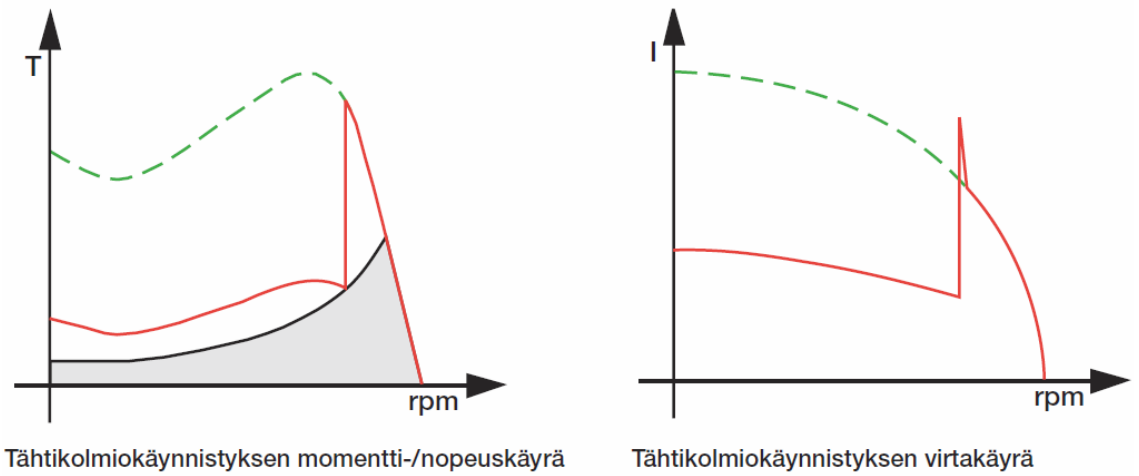
- sulakkeet
- kytkinvarokkeet
- katkaisijat
- kontaktorit
- lämpöreleet
- moottorinsuojakytkimet
- turvakytkimet

### 3.1 Tähtikolmiokytkin

Suuri käynnistysvirta aiheuttaa jännitteen alenemaa verkossa. Suurta käynnistysvirtaa voidaan rajoittaa ja tällaista laitetta kutsutaan tähtikolmiokäynnistimeksi tai -kytkimeksi. Tällöin käynnistyksessä moottori on tähteen kytketty ja kun nimellinen pyörimisnopeus saavutetaan, vaihtuu moottorin kytkentä kolmioon. (ABB 2000, 7.)

Jos nimellisjännitteellä moottori on kytketty kolmioon, tähteen kytkettynä moottorin käämeissä vaikuttava jännite on $U_n/\sqrt{3}$. Tähteen kytketyn moottorin käynnistysvirta pienenee 1/3-osaan ja momentit myös 1/3-osaan nimellisjännitettä vastaavasta arvosta. (Hietalahti 2012, 130.)

Tähtikolmiokäynnistystä käytettäessä pitää varmistua, että moottorin kytkentä on sopiva ja pienentynyt vääntömomentti riittää kuorman käynnistämiseen. Kun kuormitetun moottorin kytkentä muuttuu tähdestä kolmioon ja verkkojännitteen ja moottorin käämien jännite ovat vastakkaisvaiheisia, voi suuri kytkentävirtapiikki esiintyä jakson parin aikana. (ABB 2000, 7; Hietalahti 2012, 130.)

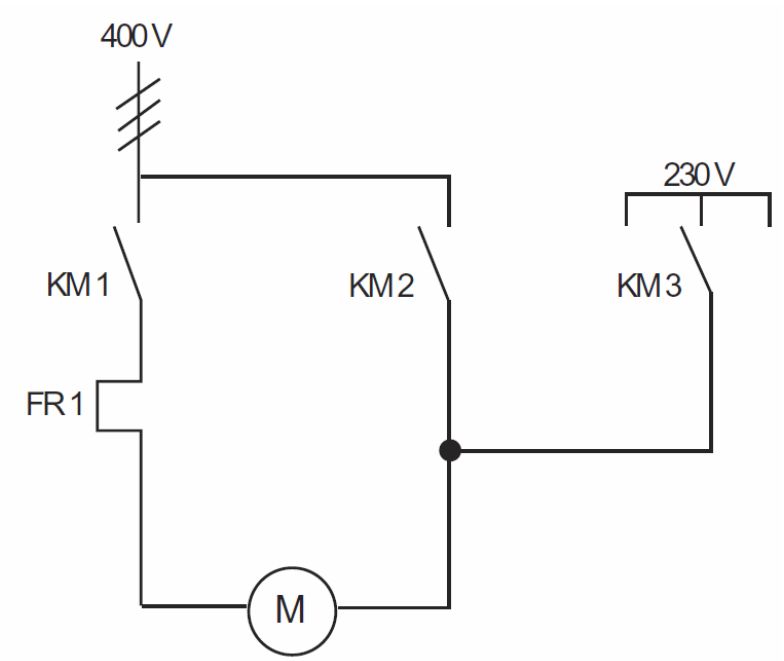



Kuvio 12. Tähtikolmiokytkimen vaikutus momenttiin ja virtaan (ABB, Pehmokäynnistinopas 2007, 11)

Tähtikontaktori sulkee ja avaa tähtipisteen. Moottorin käynnistyshetkellä pää- ja tähtikontaktori ovat suljettuna ja kolmiokontaktori on auki. Kun saavutetaan käyntinopeus, tähtikontaktori avautuu ja kolmiokontaktori sulkeutuu ja näin moottori on kytketty kolmioon.

Kuvion 12 komponentit:

| | |
|---|---|
| KM1 | pääkontaktori |
| KM2 | kolmiokontaktori |
| KM3 | tähtikontaktori |
| FR1 | ylikuormitusrele |

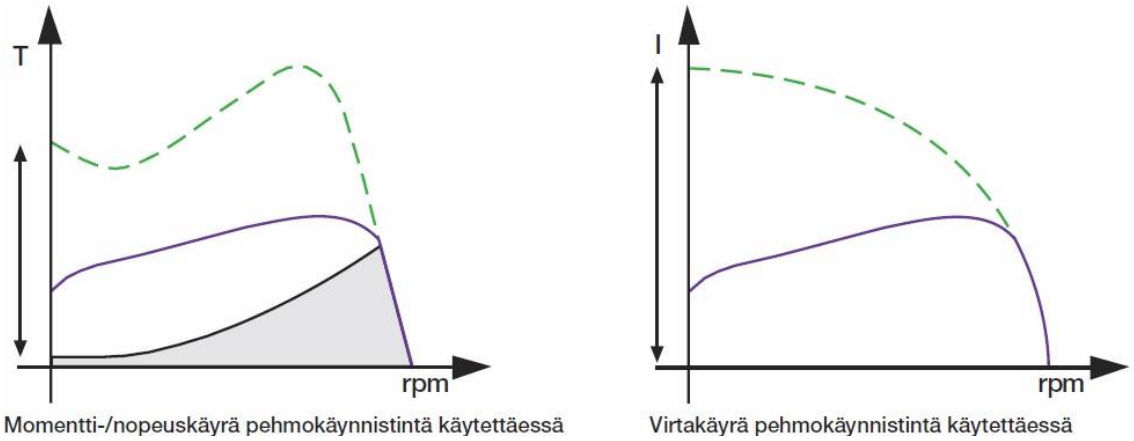



Kuvio 13. Tähtikolmiokäynnistimen viivakaavio (ABB, Pehmokäynnistinopas 2007, 11)

## 3.2 Pehmokäynnistin

Pehmokäynnistin poikkeaa ominaisuuksiltaan muista käynnistystavoista. Sen päävirtapiiri koostuu tyristoreista ja moottorin jännitettä säädetään piirilevyn elektroniikalla. Pehmokäynnistimen toimintaperiaate perustuu pieneen käynnistysjännitteeseen. Jännitteen ollessa käynnistyksen aikana pieni myös käynnistysvirta ja -momentti ovat pieniä. (ABB, Pehmokäynnistinopas 2007, 13.)

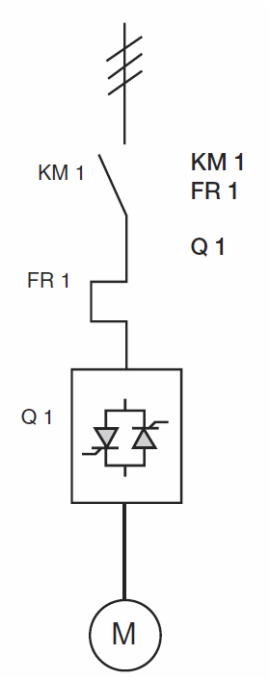
Käynnistyksessä moottorin jännite pidetään siinä tasossa, missä vaihteiston rattaat tai vetohihnat tai -ketjut kiristyvät. Näin käynnistyksessä ei esiinny tarpeettomia nytkähdyksiä. Käynnistyksen jälkeen jännitettä nostetaan, jolloin momenttikin kasvaa ja koneisto alkaa kiihtyä. (ABB, Pehmokäynnistinopas 2007, 13.)




Kuvio 14. Pehmokäynnistimen vaikutus momenttiin ja virtaan useimmissa kuormitustyypeissä (ABB, Pehmokäynnistinopas 2007)

Kuvion 14 komponentit:

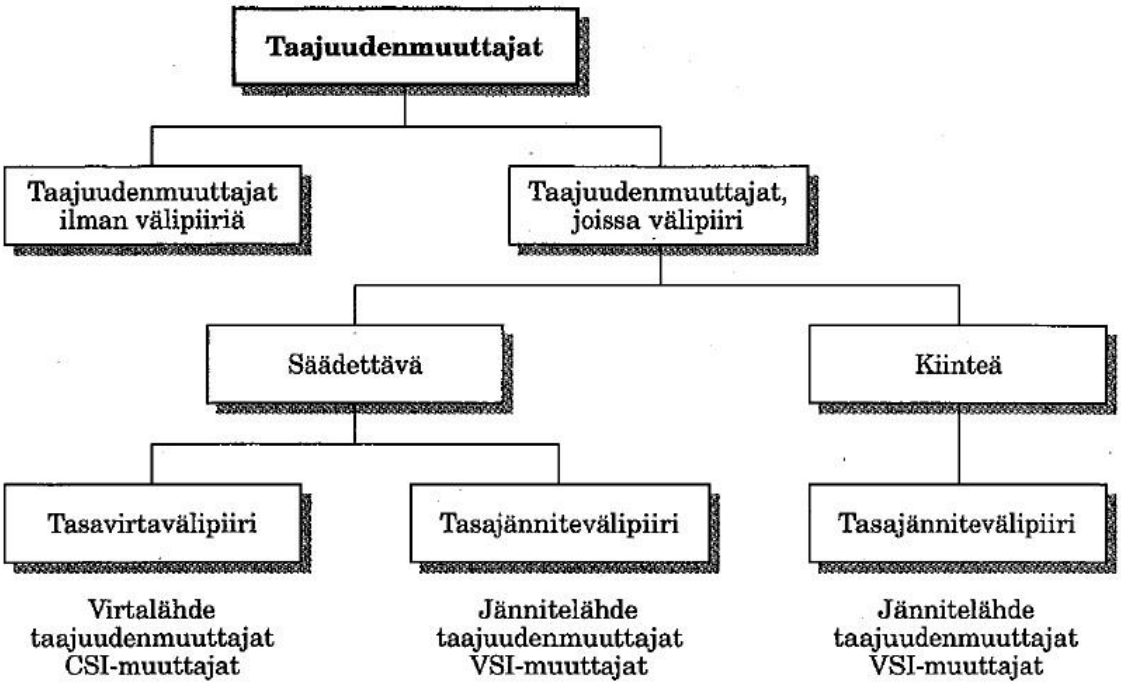
| | |
|---|---|
| KM1 | pääkontaktori |
| FR1 | ylikuomitusrele |
| Q1 | pehmokäynnistin |




Kuvio 15. Pehmokäynnistimen viivakaavio (ABB, Pehmokäynnistinopas 2007, 13)

## 3.3 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja on laite, jolla voidaan portaattomasti säätää kolmivaiheisen vaihtovirtamoottorin pyörimisnopeutta ja vääntömomenttia. Taajuusmuuttaja muuttaa syöttöverkon kiinteää jännitettä ja taajuutta. Taajuusmuuttajat voidaan jakaa kahteen ryhmään: välipiirillisiin ja välipiirittömiin. Useimmiten taajuusmuuttajissa on välipiiri. (Danfoss Drives A/S 2000, 7-8.)




Kuvio 16. Taajuusmuuttajien jaottelu (Danfoss Drives A/S 2000, 8)

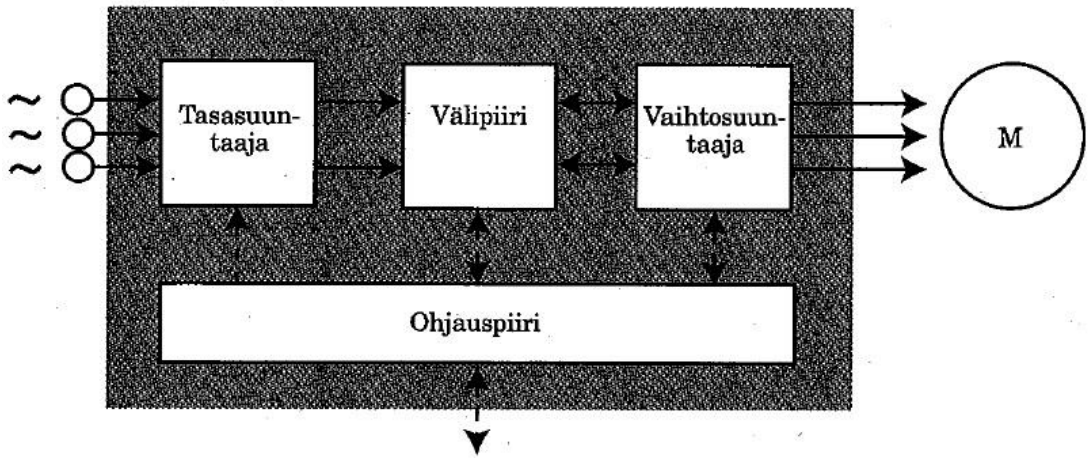
Taajuusmuuttajassa on neljä pääosaa: tasasuuntaaja, välipiiri, vaihtosuuntaaja ja ohjauspiiri (Danfoss Drives A/S 2000, 52).

Tasasuuntaaja muuttaa yksi- tai kolmivaiheisen verkkojännitteen sykkiväksi tasajännitteeksi. Tasasuuntaajat ovat joko ohjattuja tai ohjaamattomia. (Danfoss Drives A/S 2000, 52.)

Välipiiriä voidaan pitää energiavarastona, josta moottori saa energiansa vaihtosuuntaajan välityksellä. Välipiiri voidaan toteuttaa kolmella eri tavalla; muuttuva tasavirtavälipiiri ja vakio- tai muuttuvajännitteinen välipiiri. (Danfoss Drives A/S 2000, 59-60.)

Vaihtosuuntaaja määrää staattorijännitteen taajuuden. Jotkut vaihtosuuntaajat muuttavat tasasuuntaajan vakiotasajännitteen muuttuvaksi vaihtojännitteeksi. (Danfoss Drives A/S 2000, 52.)

Ohjauspiirin elektroniikka voi lähettää ja vastaanottaa viestejä tasasuuntaajasta, välipiiristä, ja vaihtosuuntaajasta. Säädettävät osat ovat riippuvaisia taajuusmuuttajan rakenteesta. Yhteistä kaikilla taajuusmuuttajien ohjauspiireillä on se, että ne lähettävät viestejä vaihtosuuntaajan puolijohteille, jotka ohjaavat nämä johtamis- tai katkaisutilaan. (Danfoss Drives A/S 2000, 53.)




Kuvio 17. Taajuusmuuttajan periaatekuva (Danfoss Drives A/S 2000, 52)

# 4 MITTAUKSET

Tässä opinnäytetyössä käytetyt mittaukset suoritettiin Tampereen ammattikorkeakoulun sähkötekniikan laboratoriossa. Koulu antoi käyttööni tarvittavat komponentit, etukojeet ja moottorin.

Opinnäyteyön tarkoituksena oli tutkia oikosulkumoottorin hyötysuhdetta eli verkosta otetun pätötehon ja moottorin antaman mekaanisen tehon suhdetta osakuormilla kolmen eri etukojeen ollessa kytkettynä ja verrata saatuja tuloksia suorakäynnisteisen moottorin suorituskykyyn. Osakuormalla tarkoitetaan kuormamomentin ja nimellismomentin suhdetta. Tutkittavat etukojeet olivat tähtikolmiokytkin, pehmokäynnistin ja taajusmuuttaja.

Mittaussarja alkoi siten, että moottorille asetettiin sen nimellismomentti, jonka jälkeen moottorille syötettiin nimellisjännite ja luettiin mittareiden lukemat. Mittauksen jälkeen kuormamomenttia pienennettiin osakuorman kymmenesosan verran ja luettiin mittareiden lukemat uudestaan. Tämä toistettiin aina kuormamomentin ollessa nolla ja mittauksia tuli yhteensä 11. Mittaussarjan ajan moottorin kuormamomentti ja pyörimisnopeus pysyivät vakioina. Mittauksissa käytetty moottori (kuvio 18) oli mahdollista kytkeä tähteen tai kolmioon, mutta syöttöjännitteen ja taajuuden takia se oli kytketty kolmioon.

Mittauskalusto:

- analogiset pätötehomittarit
- digitaaliset virta- ja jännitemittarit
- takometri
- tähtikolmiokytkin
- pehmokäynnistin
- taajuusmuuttaja (ABB ACS 600)
- kolmivaiheinen oikosulkumoottori
- kuormamomentin portaaton säätövaunu

Mitatut suureet:

- pääjännitteet
- vaihevirrat
- verkosta otettu kolmivaiheinen pätöteho
- oikosulkumoottorin ottama kolmivaiheinen pätöteho
- etukojeiden ottama pätöteho
- oikosulkumoottorin pyörimisnopeus
- oikosulkumoottorin kuormamomentti

Kaavalla 2 lasketaan mittaustuloksista oikosulkumoottorin antama mekaaninen teho. Kun pätöteho tiedetään mittaamalla, voidaan määrittää kuvaaja hyötysuhteesta osakuorman funktiona.

Koska moottorin kilvessä ei ilmoiteta moottorin nimellismomenttia, lasketaan se seuraavasti nimellistehon avulla.

$$T_n = \frac{P_n}{2\pi \cdot n} = \frac{1500\ \mathrm{W}}{2\pi \cdot \frac{1420 \frac{1}{\mathrm{min}}}{60}} = 10{,}09\ \mathrm{Nm} \tag{4}$$

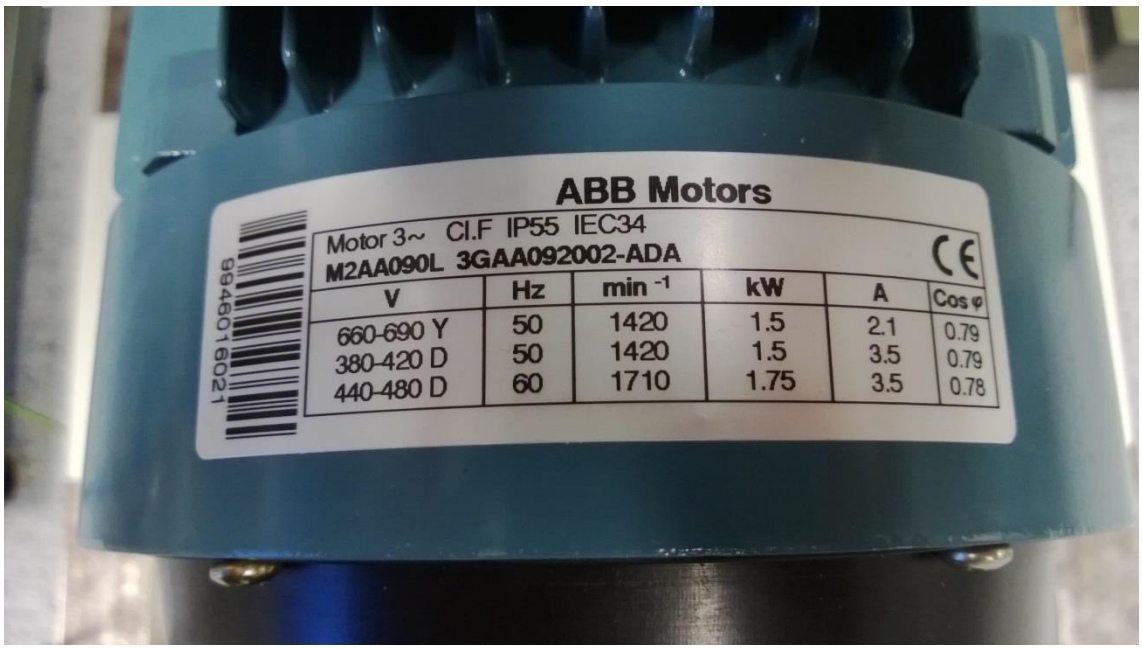
jossa $T_n$= moottorin nimellismomentti

$P_n$= moottorin nimellisteho

$n$= moottorin nimellispyörimisnopeus

Kaavalla 3 on laskettu työssä käytetyn oikosulkumoottorin nimellishyötysuhde seuraavasti.

$$\eta = \frac{1500\ \mathrm{W}}{\sqrt{3} \cdot 400\ \mathrm{V} \cdot 3{,}50\ \mathrm{A} \cdot 0{,}79} = 0{,}78 \cdot 100\ \% = 78\ \%$$



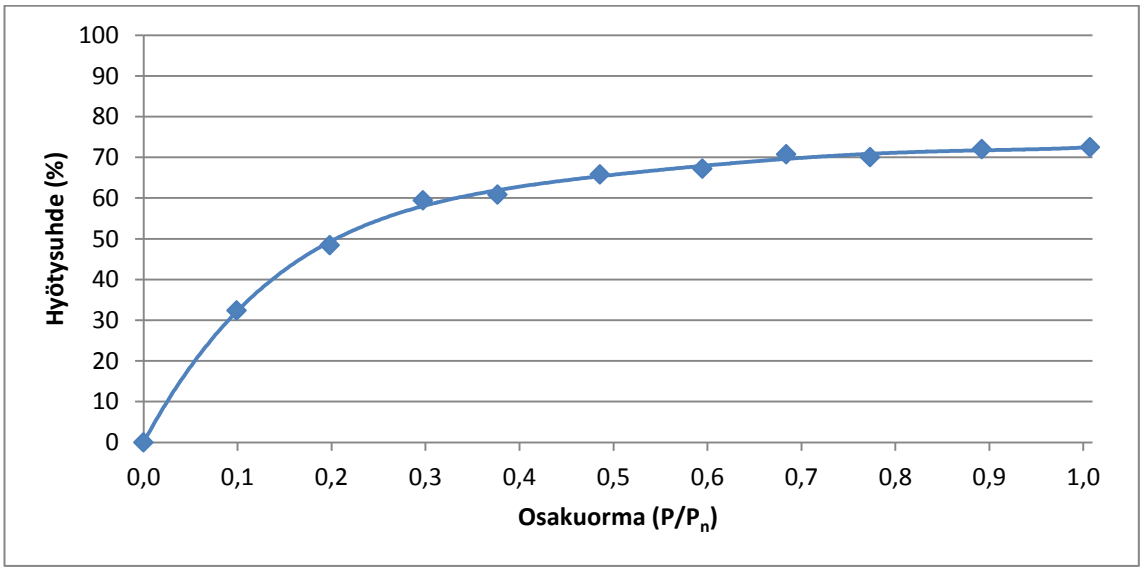

Kuvio 18. Tutkimuksissa käytetty kolmivaiheinen epätahtimoottori

## 4.1 Suorakäynnistys (D.O.L)

Suorakäynnistys oli ensimmäinen mittaussarja mihin etukojeilla saatuja mittaustuloksia tässä opinnäytetyössä verrataan. Sähköverkon ja moottorin välissä oli vain sähköisten suureiden mittalaitteet.

Moottori oli tehokkaimmillaan kuormamomentin ollessa noin nimellispisteessään, mutta ei koskaan saavuttanut teoriassa laskettua arvoa. Tämä johtuu siitä, että mittalaitteissa esiintyy virheitä ja käytännössä teoreettisia arvoja ei aina voida saavuttaa.

Mittaustuloksista saatiin määritettyä tyypillinen kuvaaja tämän kokoiselle moottorille.



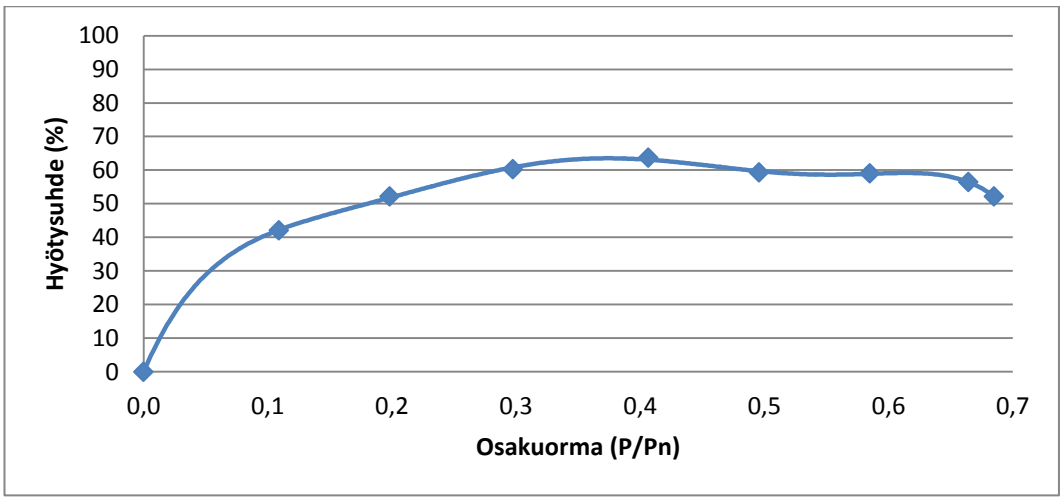

Kuvio 19. Suorakäynnisteisen moottorin hyötysuhde osakuormilla

Taulukko 1. Suorakäynnisteisen moottorin mittaustulokset

| $T$ (Nm) | $U$ (V) | $I$ (A) | $P_1$ (W) | $n$ (1/min) | $P_2$ (W) | $\eta$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10,16 | 400 | 3,77 | 2100 | 1430 | 1521 | 72,5 |
| 9,00 | 399 | 3,48 | 1880 | 1436 | 1353 | 72,0 |
| 7,80 | 399 | 3,23 | 1680 | 1440 | 1176 | 70,0 |
| 6,90 | 399 | 3,01 | 1480 | 1449 | 1047 | 70,7 |
| 6,00 | 399 | 2,86 | 1360 | 1455 | 914 | 67,2 |
| 4,90 | 400 | 2,67 | 1140 | 1462 | 750 | 65,8 |
| 3,80 | 399 | 2,50 | 960 | 1468 | 584 | 60,9 |
| 3,00 | 399 | 2,39 | 780 | 1475 | 463 | 59,4 |
| 2,00 | 399 | 2,30 | 640 | 1481 | 310 | 48,5 |
| 1,00 | 399 | 2,25 | 480 | 1486 | 156 | 32,4 |
| 0,00 | 399 | 2,21 | 260 | 1495 | 0 | 0 |

## 4.2 Tähtikolmiokytkin

Tähteen kytketyn moottorin vaihejännite on 230 V eli noin 58 % jännitteestä, jos moottori olisi kolmioon kytketty. Tämä aiheuttaa ongelmia kuormamomentin kasvaessa, koska jännite ei ole riittävän suuri ja moottori ei jaksanut tähteen kytkettynä kiihdyttää käyntinopeuteen, jolloin kytkin vaihtaisi kytkennän kolmioon. Ja kuten kuvaajasta nähdään miten kuormamomentin ollessa noin 41 % nimellismomentistaan, alkaa hyötysuhde laskea ja kuormamomentin ollessa noin 70 % on virta kasvanut jo niin isoksi, että moottori saattaisi kipata tämän yli mentäessä.




Kuvio 20. Moottorin hyötysuhde osakuormilla tähtikolmiokytkimen ollessa liitettynä

Taulukko 2. Tähtikolmiokytkimen mittaustulokset

| $T$ (Nm) | $U$ (V) | $I$ (A) | $P_1$ (W) | $n$ (1/min) | $P_2$ (W) | $\eta$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 6,91 | 395 | 2,97 | 1720 | 1241 | 898 | 52,2 |
| 6,70 | 400 | 2,63 | 1600 | 1319 | 903 | 56,4 |
| 5,90 | 395 | 2,30 | 1380 | 1359 | 815 | 59,1 |
| 5,00 | 399 | 2,00 | 1200 | 1394 | 712 | 59,3 |
| 4,10 | 399 | 1,59 | 940 | 1421 | 599 | 63,7 |
| 3,00 | 399 | 1,29 | 740 | 1444 | 446 | 60,3 |
| 2,00 | 399 | 1,04 | 580 | 1462 | 302 | 52,1 |
| 1,10 | 399 | 0,86 | 400 | 1287 | 168 | 42,1 |
| 0,00 | 400 | 0,66 | 140 | 1487 | 0 | 0 |

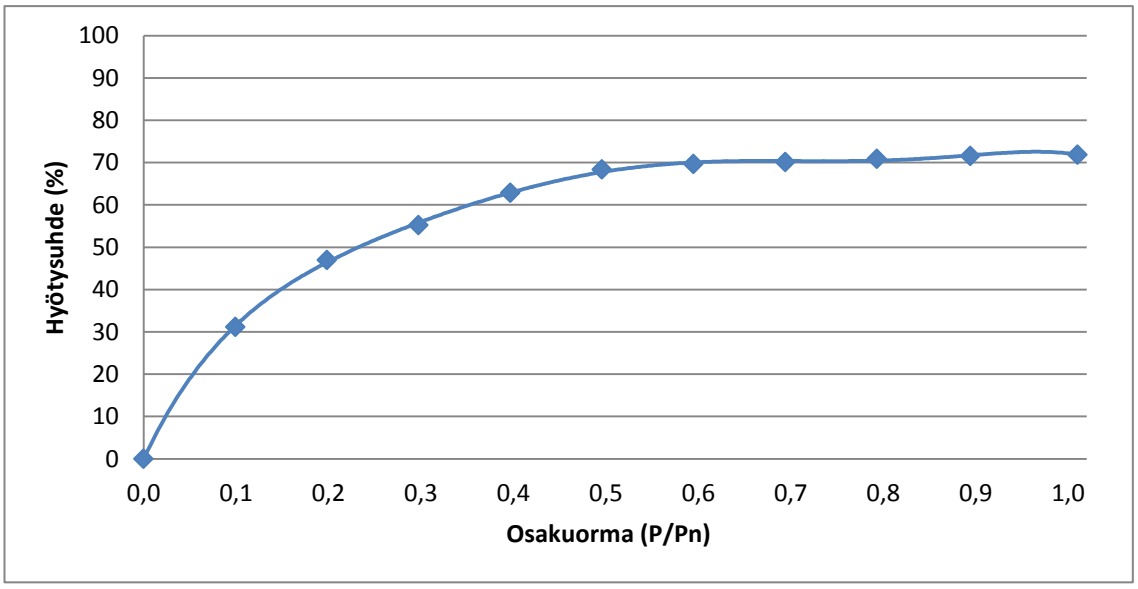
## 4.3 Pehmokäynnistin

Pehmokäynnistimen ollessa etukojeena moottorin käynnistyshetkellä jännite on 30 % nimellisjännitteestä ja kasvaa lineaarisesti nimellisarvoonsa kymmenen sekunnin kuluessa.

Pehmokäynnistimeen asetetut parametrit:

- käynnistysramppi 10 s
- jännite 30 %
- pysäytysramppi 0 s

Mittaustuloksista ilmenee, että pehmokäynnistin ei kasvattanut moottorin hyötysuhdetta vaan sen sijaan hieman laski sitä johtuen laboratoriossa olevasta mallista, joka rajoitti vain käynnistysvirtaa.




Kuvio 21. Moottorin hyötysuhde osakuormilla pehmokäynnistimen ollessa liitettynä

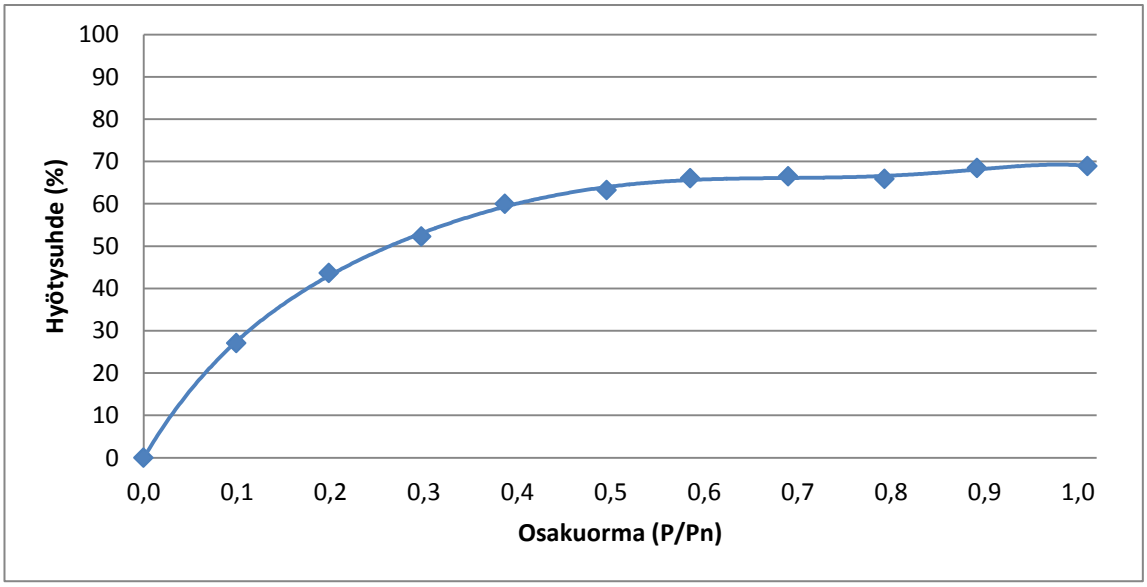
Taulukko 3. Pehmokäynnistimen mittaustulokset

| $T$ (Nm) | $U$ (V) | $I$ (A) | $P_1$ (W) | $n$ (1/min) | $P_2$ (W) | $\eta$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10,19 | 399 | 3,81 | 2180 | 1428 | 1524 | 71,9 |
| 9,02 | 400 | 3,56 | 1960 | 1439 | 1359 | 71,5 |
| 8,00 | 399 | 3,38 | 1800 | 1455 | 1219 | 70,9 |
| 7,00 | 400 | 3,09 | 1580 | 1454 | 1066 | 70,1 |
| 6,00 | 401 | 2,90 | 1380 | 1463 | 919 | 69,6 |
| 5,00 | 401 | 2,71 | 1180 | 1463 | 766 | 68,4 |
| 4,00 | 401 | 2,56 | 1040 | 1470 | 616 | 62,8 |
| 3,00 | 401 | 2,44 | 880 | 1476 | 464 | 55,2 |
| 2,00 | 401 | 2,36 | 700 | 1481 | 310 | 47,0 |
| 1,00 | 400 | 2,29 | 580 | 1489 | 156 | 31,2 |
| 0,00 | 401 | 2,26 | 280 | 1497 | 0 | 0 |

## 4.4 Taajuusmuuttajakäyttö

Taajuusmuuttajaan asetettiin parametreiksi työssä käytetyn moottorin nimellisarvot.

Taajuusmuuttaja pitää moottorin pyörimisnopeuden asetetussa arvossaan ja siksi moottorin antama mekaaninen teho on huipussaan taajuusmuuttajakäytöllä, mutta verkosta otettu pätöteho kasvaa ja hyötysuhde laskee.




Kuvio 22. Moottorin hyötysuhde osakuormilla taajuusmuuttajan ollessa liitettynä

Taulukko 4. Taajuusmuuttajan mittaustulokset

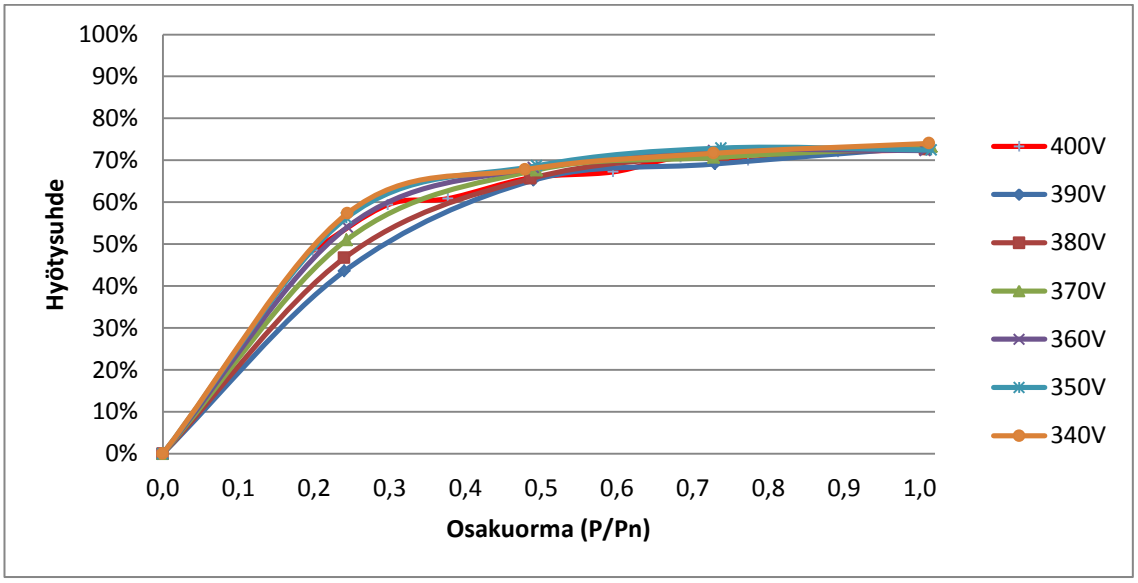
| $T$ (Nm) | $U$ (V) | $I$ (A) | $P_1$ (W) | $n$ (1/min) | $P_2$ (W) | $\eta$ (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 10,19 | 401 | 3,60 | 2320 | 1498 | 1599 | 68,9 |
| 9,00 | 401 | 3,26 | 2060 | 1496 | 1410 | 68,4 |
| 8,00 | 401 | 2,95 | 1900 | 1495 | 1252 | 65,9 |
| 6,96 | 402 | 2,61 | 1640 | 1496 | 1090 | 66,5 |
| 5,90 | 402 | 2,25 | 1400 | 1496 | 924 | 66,0 |
| 5,00 | 400 | 2,04 | 1240 | 1497 | 784 | 63,2 |
| 3,90 | 401 | 1,73 | 1020 | 1498 | 612 | 60,0 |
| 3,00 | 401 | 1,54 | 900 | 1498 | 471 | 52,3 |
| 2,00 | 402 | 1,26 | 720 | 1500 | 314 | 43,6 |
| 1,00 | 401 | 1,00 | 580 | 1501 | 157 | 27,1 |
| 0,00 | 400 | 0,65 | 340 | 1501 | 0 | 0 |

# 5 YHTEENVETO

Mittausten perusteella tutkimuksessa käytettyjen etukojeiden käyttö kuormitustyypissä, jossa oikosulkumoottorin kuormamomentti ja pyörimisnopeus pysyvät vakioina, huonontaa oikosulkumoottorin hyötysuhdetta, koska tällaisella kuormitustyypillä oikosulkumoottorin antama mekaaninen teho ei kasva ja verkosta otettu pätöteho kasvaa. Siten etukojeen liittäminen moottorilähdön piiriin tarkoittaa ainoastaan energiankulutuksen lisääntymistä.

Suoritin lisäksi mittauksen, jonka tarkoituksena oli selvittää vaikuttaako syöttö- eli staattorijännitteen alentaminen hyötysuhteeseen osakuormilla. Mittaussarja suoritettiin alentamalla staattorijännitettä ja pitämällä tämä kiinteänä mittaussarjan ajan.

Näiden mittaustulosten perusteella hyötysuhteeseen voidaan vaikuttaa energiansäästön kannalta positiivisesti alentamalla syöttöjännitettä. Kuormamomentin kasvaessa lähelle nimellisarvoaan ei hyötysuhteessa ollut merkittäviä eroja. Kuormituksen ollessa pieni, jännitettä alentamalla voidaan hyötysuhdetta hieman parantaa. Mentäessä alle 85 % nimellisjännitteestä virta kasvoi niin isoksi, että sen enempää ei ollut kannattavaa alentaa jännitettä.




Kuvio 23. Staattorijännitteen alentamisen vaikutus hyötysuhteeseen

Tässä työssä ei oteta kantaa siihen, miten edellä esitetyt kolme etukojetta vaikuttavat muunlaisissa kuormitustyypeissä. Erilaiset kuormitustyypit moottorilähtöineen on mahdollista mallintaa ja simuloida ja siten tutkia miten etukojeet vaikuttavat erilaisissa kuormitustyypeissä. Simulointi ja mallintaminen on mahdollista yksinkertaistettujen sijaiskytkentöjen avulla.

Tämän tutkimuksen perusteella kuormitustyyppi, jossa moottorin kuormamomentti ja pyörimisnopeus pysyvät vakioina, tulisi näiden etukojeiden hankintaa harkita energiansäästön kannalta kriittisesti. Kyseiseen kuormitustyyppiin tulisi valita sellainen oikosulkumoottori, joka toimisi nimellispisteessään. Moottorin ottamaa suurta käynnistysvirtaa voidaan rajoittaa mittauksissa käytetyillä etukojeilla.

**LÄHTEET**

ABB Oy. 2000. ABB TTT-käsikirja 2000-7. Sähkömoottorikäytöt.

ABB Oy. 2007. Pehmokäynnistinopas.

ABB Oy. 2009. Sähkömoottorin hyötysuhteella on väliä. Kuva. Luettu 16.9.2013. http://www.abb.fi/cawp/seitp202/9324577570fc2313c125765e002bfcd2.aspx

Aura, L. & Tonteri, A. 1998. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Helsinki: WSOY pro Oy.

Danfoss Drives A/S. 2000. Tietämisen arvoista asiaa taajuudenmuuttajista.

Hielahti, L. 2012. Teollisuuden sähkökäytöt. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammer-tekniikka.

Martikainen, J. 2011. Opetuskäyttöön tulevan teollisuuskeskuksen loppusuunnittelu ja käyttöönotto. Automaatiotekniikan koulutusohjelma. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.

SLO Oy. 2010. Sähkömoottoreiden EFF-hyötysuhdeluokat historiaan! Luettu 9.9.2013. http://www.slo.fi/www/fi/Ajankohtaista/tuoteuutisarkisto/Sivut/SahkomoottoreidenEFF-hyotysuhdeluokathistoriaan.aspx