

# 10 SÄHKÖKONEET, osa 1

## 10.1 Yleistä

### 10.1.1 Konetyypit ja niiden perusosat

Sähkökoneet muuttavat energiaa muodosta toiseen. Moottorit muuttavat niihin syötettyä sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi ja generaattorit päinvastoin voimakoneen niille antamaa mekaanista energiaa sähköenergiaksi. Useimmat koneet voivat toimia sekä moottorina että generaattorina.

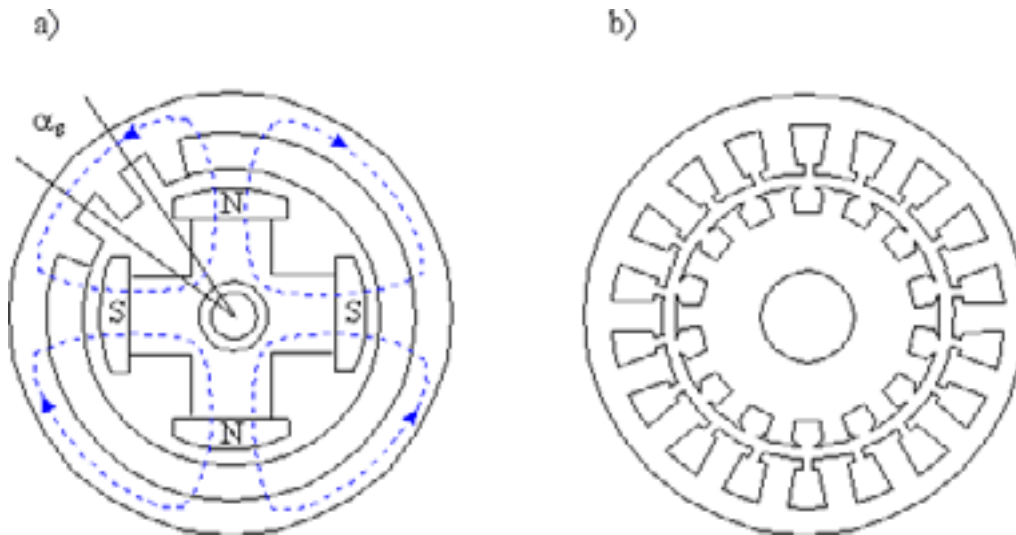
Koneita on useaa eri tyyppiä. Tärkeimmät tyypit ovat epätahti-, tahti- ja tasavirtakoneet. Epätahti- ja tahtikoneet ovat vaihtovirtakoneita, joiden toiminta perustuu pyörivään magneettikenttään koneen sisällä. Jokainen konetyyppi voidaan toteuttaa monella eri tavalla, jolloin niiden ominaisuudet ja rakenne poikkeavat toisistaan. Lisäksi on olemassa lukuisia erikoiskoneita.

Vaikka koneita onkin useaa eri tyyppiä, voidaan kaikista normaalirakenteisista koneista erottaa seuraavat perusosat: pyörivä roottori (pyörijä) akseleineen, staattori (seisoja), laakerikilvet tai laakeripukit (isoilla koneilla) ja laakerit. Roottori on laakereiden varassa staattoriaukossa. Roottorin ja staattorin välissä on ilmarako niin, että roottori voi pyöriä vapaasti. Laakerit, jotka voivat olla rulla-, kuula- tai liukulaakereita, on kiinnitetty laakerikilpiin, jotka kannattavat roottoria. Laakerikilvet ovat kiinni staattorissa, joka muodostaa koneen rungon. Staattoriin ja roottoriin on sijoitettu käämitykset, joiden muoto ja rakenne vaihtelevat konetyypin mukaan. Koneissa on yleensä päällä myös liitinkotelo, johon syöttökaapeli kytketään.

Kaikkien sähkökoneiden, erikoistapauksia lukuun ottamatta, toiminta perustuu magneettikentän ja siinä olevan virrallisen johtimen välisiin voimavaikutuksiin. Koneiden käämityksistä puhuttaessa erotetaan usein toisistaan magnetointikäänitys ja työvirtakääänitys. Magnetointikäänityksellä luodaan koneen toiminnalle välttämätön magneettikenttä. Koneen työvirtakääänityksessä kulkee koneen "varsinainen sähköteho". Koneen ollessa generaattorina kone luovuttaa sähkötehoa eli virta on koneesta pois päin ja koneen ollessa moottorina kone ottaa sähkötehoa eli virta kulkee verkosta koneeseen päin. Työvirtakääänityksestä käytetään myös nimitystä ankkurikäänitys. Ankkurinimityksen kanssa kannattaa olla varovainen, jos ei ole aivan varma mitä sillä tarkoitetaan, sillä esimerkiksi tahtikoneissa ankkurikäänitys on staattorissa ja tasavirtakoneissa se on roottorissa. Siksi kannattaa puhua roottori- ja staattorikäänityksistä.

Sähkökoneessa magneettivuo kulkee staattorista roottoriin ja takaisin staattoriin, kuten kuvassa 10.1a on esitetty. Staattorin ja roottorin välinen ilmarako pyritään tekemään mahdollisimman pieneksi, koska ilman magneettinen johtokyky on paljon huonompi kuin raudan. Yleensä staattorin sisäpinta ja roottorin ulkopinta on uritettu, joihin käämitykset (urakääänitys) sijoitetaan. Kuvassa 10.1b on esitetty koneen rakenne, jossa sekä staattori että roottori on uritettu. Urakääänitys tehdään vyyhdeistä, jotka sijoitetaan

staattorin tai roottorin uriin. Vyyhti sisältää monta johdinkierrosta. Urissa olevia vyyhdensivuja yhdistävät toisiinsa urien päissä olevat vyyhdenpäät. Urat suljetaan joko uratikulla (puolisuljettu ura) tai urakiilalla (avoin ura). Tasavirta- ja tahtikoneissa voi jompikumpi uritus puuttua, jolloin niiden tilalla on magneettinavat (napakäämitys) kuten kuvassa 10.1a. Napakäämitys kierretään napavarren ympärille, jonka päissä on napakenkä.



Kuva 10.1 a) Magneettivuon kulkureitti koneessa, jossa on magneettinavat. b) Sähkökone, jonka staattori ja roottori ovat uritetut. /4/

Sähkökoneen käämityksillä muodostetaan moottorin ilmväliin magneettikenttä, jolla on parillinen napaluku. Yksi pohjois- (N) ja yksi etelänapa (S) muodostavat napaparin. Joskus koneen napaluku (p on napaparien luku) on nähtävissä koneesta helposti, kuten kuvassa 10.1a, jossa kone on varustettu neljällä magneettinavalla. Napapareja on siis tällöin kaksi.

Sähkökoneiden kehän pituutta mitataan sähköasteella, joka määräytyy koneen geometriasta (napapari-luvusta) seuraavasti

$$(10.1) \quad \alpha_s = p\alpha_g$$

missä

$\alpha_s$  on sähköaste

$\alpha_g$  on geometrinen aste.

Esimerkiksi kuvan 10.1a koneen kehän pituus on sähköasteina  $2 \cdot 360^\circ = 720^\circ$ . Tämä tarkoittaa sitä, että kun roottori on pyörähtänyt yhden kierroksen niin magneettikenttä on pyörähtänyt kaksi kierrosta. Eli yksi napapari edustaa 360 sähköistä astetta.

Sähkökoneen käydessä sen käämityksissä ja rautaosissa syntyy häviöitä, jotka lämmittävät konetta. Häviöt on poistettava koneesta, jotta koneen lämpötila ei nousisi yli suurimman sallitun. Luonnollinen lämmön siirtyminen koneesta ympäristöön ei yleensä riitä, jolloin lämmönsiirtoa on tehostettava. Tämä tehdään yleensä käyttämällä tuuletinta tai puhallinta. Tuuletin voi olla sijoitettu koneen akselille, jolloin koneen pyöriessä

tuuletin kierrättää ilmaa. Koneen jäähditys voidaan hoitaa myös erillisellä apumoottorin pyörittämällä puhaltimella. Esimerkiksi suurissa generaattoreissa on erillisten puhaltimien lisäksi suljettu ilman kierto, jotta käämitykset eivät likaantuisi.

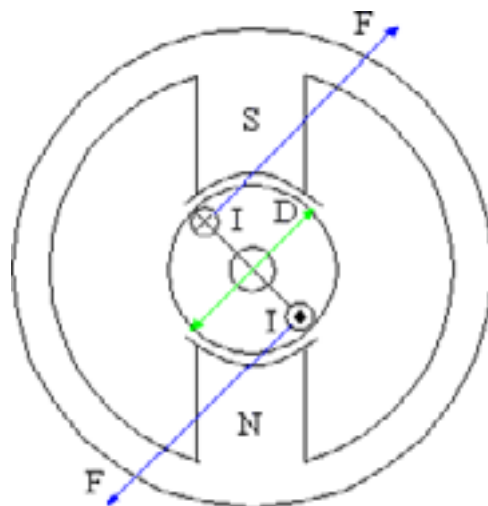
## 10.1.2 Sähkökoneiden toimintaperiaate

### Moottori

Sähkömoottorin toiminta perustuu magneettikentässä olevan virrallisen johtimen (johdinsilmukan) ja kentän väliseen voimavaikutukseen. Kuvassa 10.2 on piirros kaksinapaisesta moottorista, jossa roottorikäännyksenä on yksi vyyhti, jossa on yksi johdinkierros. Kun johtimessa kulkee virta  $I$  ja vyyhden sivun kohdalla vaikuttaa magneettivuontiheys  $B$ , on vyyhden sivun johtimeen kohdistuva voima  $F$

$$(10.2) \quad F = BIL$$

missä  $L$  on johtimen pituus.



Kuva 10.2 Magneettikentässä olevaan virralliseen roottorivyyhteen vaikuttava voima. /6/

Vyyhteen vaikuttava voima on kohtisuorassa magneettikenttää vastaan. Vastaavasti vyyhden vastakkaisella puolella olevaan johtimeen vaikuttaa saman suuruinen voima. Voiman momenttivarsi on kuvan 10.2 mukaisesti  $D/2$ , missä  $D$  on roottorin halkaisija. Koska johtimet on kiinnitetty roottoriin, vaikuttaa roottoriin vääntömomentti  $T$

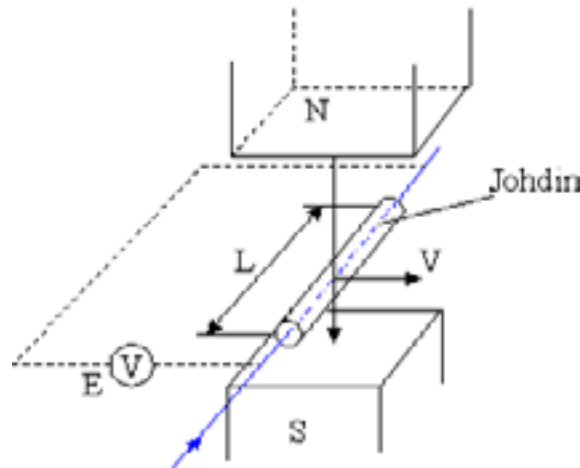
$$(10.3) \quad T = BILD$$

Tämä momentti pyrkii saattamaan roottorin pyörivään liikkeeseen. Vyyhden kehittämä momentti vaihtelee roottorin asennon mukaan ollen vaaka-asennossa  $T$  on 0 koska  $B$  on 0. Moottoreissa on roottorin koko kehä varustettu vyyhdeillä, jolloin roottoriin vaikuttaa jatkuva ja aina saman suuntainen momentti. Roottorin pyörimisnopeus asettuu sellaiseksi, että syntynyt sähköinen vääntömomentti  $T$  on yhtä suuri kuin akselia jarruttava ulkoinen kuormitusmomentti.

# Generaattori

Generaattorin toiminta perustuu magneettikentässä liikkuvaan johtimeen syntyvään sähkömotoriseen voimaan (smv) eli lähdejännitteeseen. Kuvasta 10.3 nähdään, kun johdin (pituus  $L$ ) liikkuu nopeudella  $v$  kohtisuoraan magneettikenttää vastaan syntyy siihen smv  $E$ , joka voidaan laskea kaavalla:

$$(10.4) \quad E = BLv$$



Kuva 10.3 Johtimeen indusoituva sähkömotorinen voima  $E$ . /6/

Sähkömotorisen voiman syntymisen kannalta on samantekevää liikkuuko magneettikenttä vai johtimet. Vaihtovirtageneraattoreissa osien järjestys onkin sellainen, että vyyhdet ovat kiinteästi staattorissa ja magneettinavat voimakoneen pyörittämässä roottorissa. Kun magneettinavat ovat roottorissa, kokevat staattorikäimitykset muuttuvan magneettikentän roottorin pyöriessä. Kun generaattorin käännykset on kytketty ulkoiseen kuormitukseen, saa staattoriin indusoituva smv suljettuun virtapiiriin aikaan virran  $I$ . Tämä virta ja napojen magneettivuo saavat aikaan pyörintää vastustavan vääntömomentin, joka roottoria pyörittävän voimakoneen on voitettava. Häviöttömässä generaattorissa voimakoneen generaattorille antama mekaaninen teho on sama kuin generaattorin syöttämän ulkoisen kuormituksen sähköteho. Todellisuudessa generaattoreissa syntyy kuitenkin aina häviöitä, jotka pienentävät generaattorin antamaa sähkötehoa.

## 10.1.3 Sähkövääntömomentti

Sähkökoneen sähkövääntömomentin  $T_s$  suuruuden määrää koneen ilmvälissä siirtyvä ns. ilmväliteho  $P_i$  (ilmvälitehosta lisää kappaleessa 10.2.) ja roottorin kulmanopeus  $\omega$  ( $\omega=2\pi n$ )

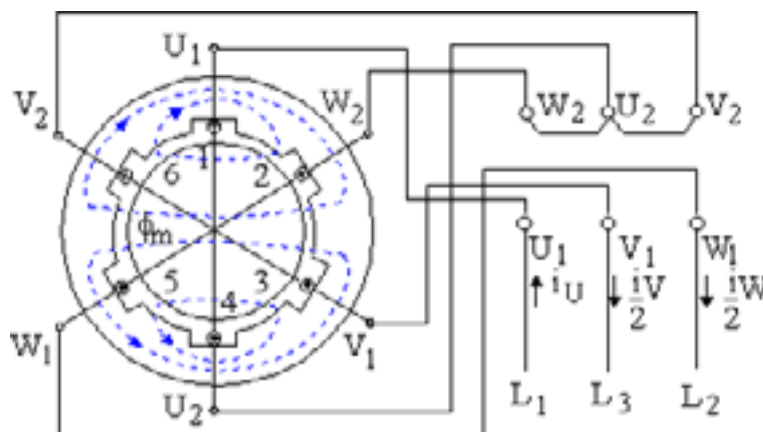
$$(10.5) \quad T_s = \frac{P_i}{\omega}$$

Yhtälö 10.5 on tärkeä moottorin sähköisen mitoituksen kannalta. Yleensä moottorin kuormasta tiedetään sen mekaaninen vääntömomentti ja tarvittava pyörimisnopeus, jolloin tarvittava moottoriteho voidaan likimain määrittää kaavalla 10.5. Häviöiden vuoksi moottorin verkosta ottama teho on aina jonkin verran ilmajäliteho suurempi.

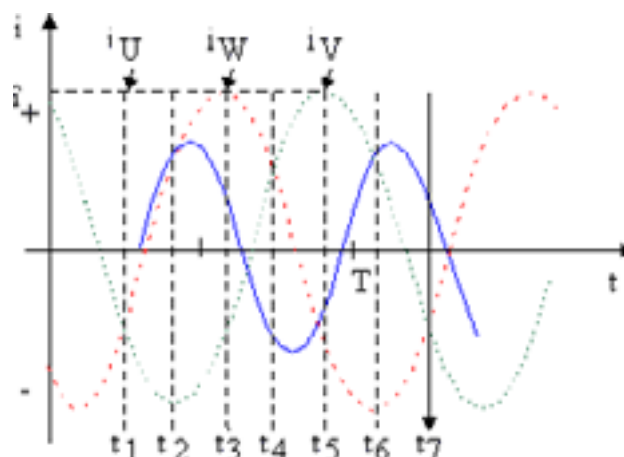
### 10.1.4 Kolmivaihekäämitykset ja kiertokentän syntyminen

Tasavirtakoneet toimivat nimensä mukaan tasavirralla, jota niihin syötetään tasavirtalähteestä. Tahti- ja epätahtikoneet puolestaan vaativat vaihtovirtaa toimiakseen. Yleensä nämä vaihtovirtakoneet ovat kolmivaiheisia kuten sähkön jakelujärjestelmäkin.

Kolmivaiheiseen sähköverkkoon liitettävien vaihtovirtakoneiden toiminta perustuu koneen sisällä pyörivään magneettikenttään eli kiertokenttään. Kiertokenttäkoneiden staattorissa on symmetrinen kolmivaiheinen urakäämitys, joka synnyttää koneen sisälle pyörivän magneettikentän, kun niitä syötetään kolmivaihevirralla. Magneettikentän syntymistä voidaan tarkastella tarkemmin kuvan 10.4 vaihtovirtakoneessa ( $p=1$ ), jossa on vain kuusi uraa eli kaksi uraa vaihetta kohti. Käämit on kytketty tähteen yhdistämällä käämien loppupäät  $U_2, V_2$  ja  $W_2$ . Kun käämien alkupäät  $U_1, V_1$  ja  $W_1$  kytketään kolmivaihesyöttöön, alkaa käämien läpi kulkea kolmivaihevirta, joka on esitetty kuvassa 10.5.

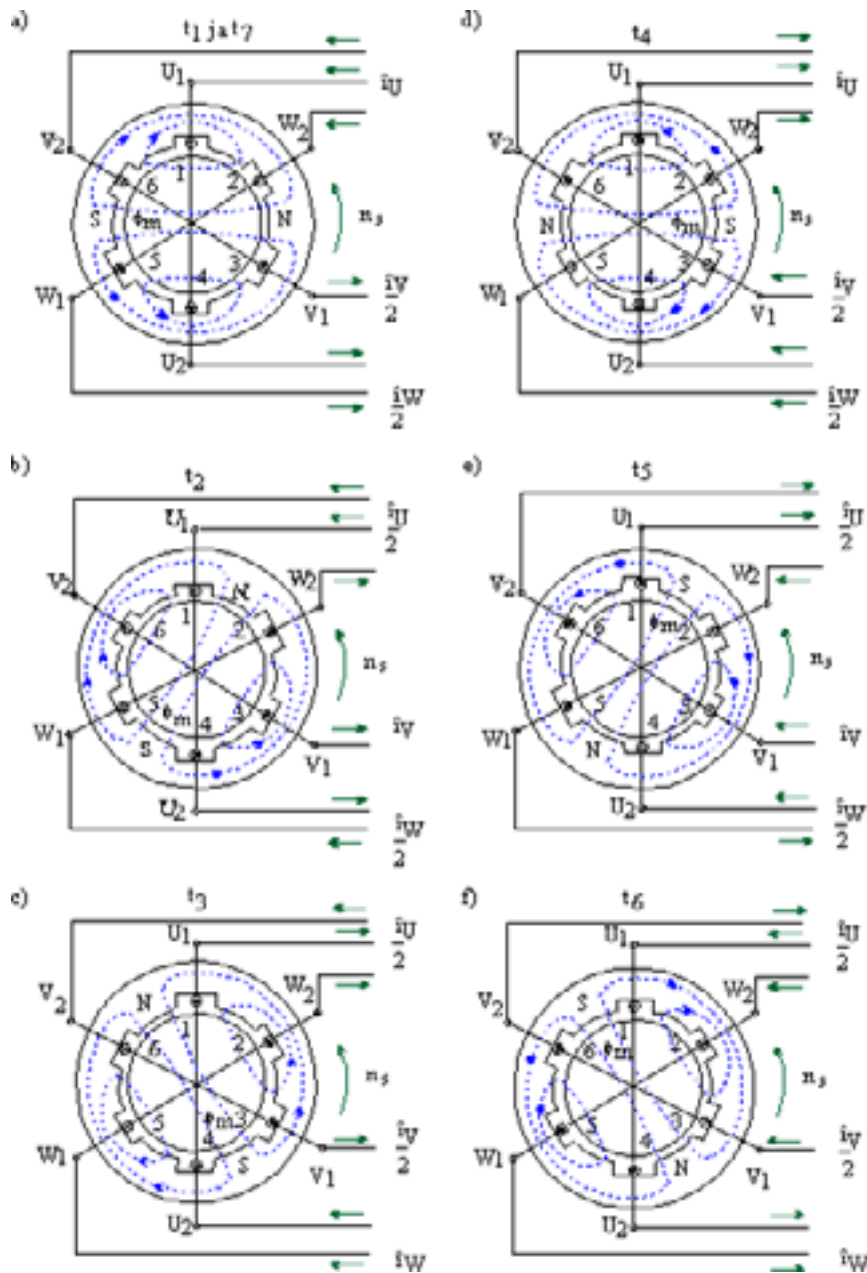


Kuva 10.4 Kolmivaiheisen vaihtosähkökoneen yksinkertaistettu käämitys. /2/



Kuva 10.5 Symmetrisen kolmivaihejärjestelmän vaihevirrät. /2/

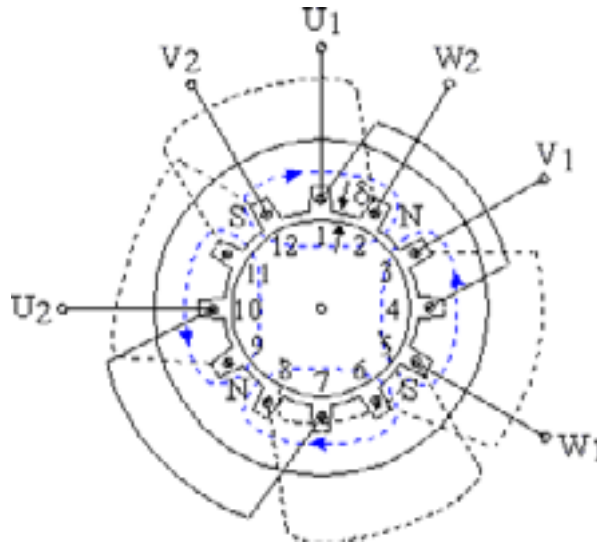
Kuvan 10.6 esittämällä kuvasarjalla on havainnollistettu kolmivaihekäämityksen synnyttämää pyörivää magneettikenttää, kun kuvan 10.4 koneeseen johdetaan kuvan 10.5 mukainen kolmivaihevirta. Kuvan 10.5 ajanhetket  $t_1$ - $t_7$  on valittu siten, että jonkin käämin vaihevirta on huippuarvossaan.



Kuva 10.6 a-f Kolmivaihekäämityksen synnyttämä pyörivä magneettikenttä ajanhetkillä  $t_1$ - $t_7$ .  
/2/

Ajanhetkellä  $t_1$  vaiheen U virta on huipussaan, jolloin koneen sisälle syntynyt magneettikenttä on kuvan 10.6a mukainen. Kentän pääsuunta on silloin oikealta vasemmalle (pohjoisnavalta N etelänavalle S). Kun tilannetta tarkastellaan 1/6 jaksoa ( $60^\circ$ ,  $1/(50 \cdot 6) \text{ s} = 3,33 \text{ ms}$ ) myöhemmin, on vaiheen U virta pienentynyt ja vaiheen W virta vaihtanut suuntaa. Tällöin koneen sisällä oleva resultoiva kenttä on kuvan 10.6b mukainen. Huomataan, että kenttä on kääntynyt  $60^\circ$  vastapäivään. Vastaavasti kun tutkitaan ajanhetkiä  $t_3$ - $t_6$  huomataan, että kenttä on pyörähtänyt aina  $60^\circ$  vastapäivään. Verkkajännitteen yhden jakson aikana on kenttä pyörähtänyt koneen sisällä kokonaisen

kierroksen. Kuvan 10.6 tapauksessa, kun  $p$  on 1, kenttä pyörii koneen sisällä verkon taajuudella  $(50 \cdot 60) = 3000$  rpm. Jos napaparien lukumäärä on suurempi, on kentän pyörimisnopeus  $n = (3000 / p)$  rpm. Kahdella napaparilla pyörimisnopeus on siis 1500 rpm. Kuvassa 10.7 on esitetty magneettikentän muodostuminen koneessa, jossa napapareja on kaksi.



Kuva 10.7 Magneettikentän muodostuminen koneessa, jossa  $p = 2$ . /2/

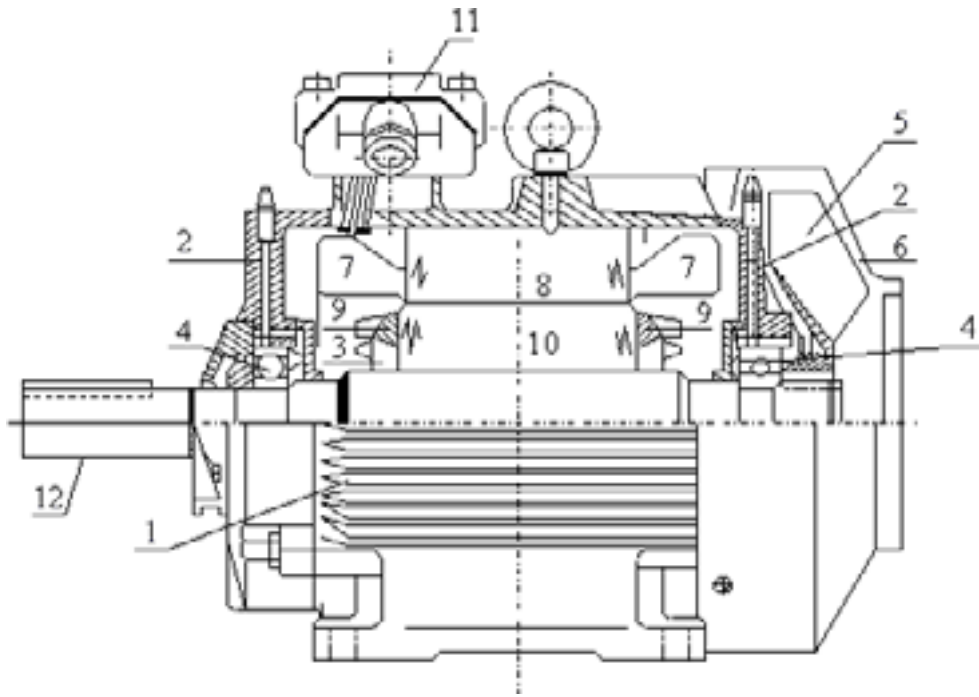
## 10.2 Epätahtikoneet

Epätahtikoneet ovat vaihtosähkökoneita ja niiden toiminta perustuu koneen sisällä pyörivään magneettikenttään. Epätahtinimitys tulee siitä, että koneen roottorin pyörimisnopeus poikkeaa koneen sisällä pyörivän magneettikentän pyörimisnopeudesta eli ns. tahtinopeudesta. Epätahtikoneet jaetaan tavallisesti oikosulku- ja liukurengaskoneisiin, joista oikosulkukone on yleisempi. Tässä kappaleessa käsitellään epätahtikoneista tarkemmin vain moottoreita, koska oikosulkukoneita käytetään enemmän moottoreina.

### 10.2.1 Epätahtimoottorin rakenne

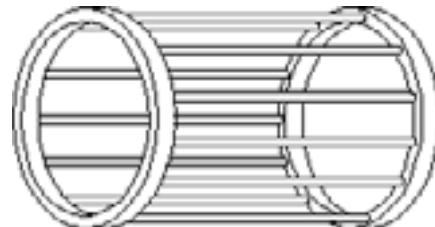
#### Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottori on yksinkertaisen rakenteensa vuoksi erittäin suosittu moottori. Verrattuna muihin yleisimpiin moottorityyppeihin, oikosulkumoottorissa ei ole erillisiä magnetointikämmityksiä, vaan ainoastaan suhteellisen yksinkertaiset staattori- ja roottorikämmitykset. Moottorin rakenteesta on esimerkki kuvassa 10.8. Koneen toiminnan kannalta tärkeimmät osat ovat staattorin kämmitykset levypaketteineen ja roottorin kämmitys levypaketteineen. Käytännössä ainoat moottorin kuluvat osat ovat laakerit.



Kuva 10.8 Oikosulkumoottorin rakenne. 1 staattorin runko, 2 laakerikilvet, 3 roottori, 4 laakerit, 5 tuuletin, 6 tuulettimen suojus, 7 staattorikäämitys, 8 staattorin levypaketti, 9 roottorin käämitys, 10 roottorin levypaketti, 11 liitäntäkotelo, 12 akseli. /1/

Oikosulkumoottorin roottorin käämitys on ns. häkkikäämitys, joka on sijoitettu roottorin uriin ja suljettu molemmista päistä oikosulkurenkaalla. Kuvassa 10.9 on esitetty häkkikäämityksen rakenne.



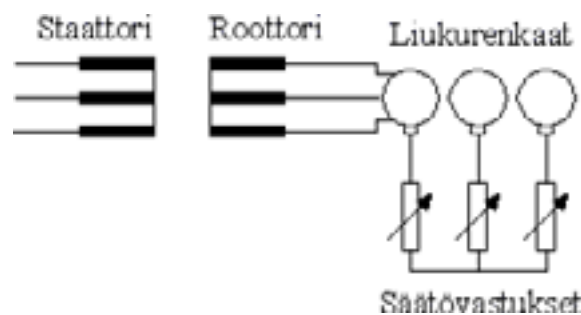
Kuva 10.9 Häkkikäämityksen rakenne. /4/

Yleensä roottorikäämityksessä on yksi sauva yhtä uraa kohti, mutta haluttaessa muuttaa moottorin ominaisuuksia sauvan muoto ja lukumäärä vaihtelevat. Yleensä roottorikäämitys valmistetaan alumiinista painevalamalla. Roottorikäämiä ei ole erikseen eristetty roottoriraudasta. Kuparilangasta valmistettu staattorikäämitys on puolestaan sijoitettu staattorin uriin. Staattorikäämitys on symmetrinen ja se on kytketty joko tähteen tai kolmioon. Oikosulkumoottorin toiminnan edellytyksenä oleva pyörivä magneettikenttä syntyy staattorin kolmivaihekäämityksessä ilman erillisiä lisälaitteita, kuten kappaleessa 10.1.4 kuvattiin.



## Liukurengasmoottori

Liukurengasmoottori eroaa rakenteensa puolesta oikosulkumoottorista siinä, että liukurengas-moottorissa kolmivaiheisen roottorikäänityksen toiset päät on kytketty koneen akselilla oleviin liukurenkaisiin, joita liukuharjat laahaavat. Liukuharjoihin on kytketty ulkoinen, usein säädettävä, vastus. Tällöin voidaan roottoripiirin resistanssia säätämällä vaikuttaa koneen ominaisuuksiin. Liukurengasmoottorin periaatekuva on esitetty kuvassa 10.10. Liukurengasmoottorin roottorikäänit on eristetty roottoriraudasta.



Kuva 10.10 Liukurengasmoottorin periaatekuva.

### 10.2.2 Epätahtimoottorin toimintaperiaate

Kun staattoriin kytketään jännite, syntyy koneen sisään pyörivä magneettikenttä, jonka kenttäviivat leikkaavat roottorikäänin sauvoja. Sauvoihin indusoituu tällöin  $\text{smv } E_r$ , joka saa aikaan roottorivirran  $I_r$ . Virran  $I_r$  ja pyörivän kentän välinen voimavaikutus saa roottorin pyörivään liikkeseen. Moottorin tarvitsema sähköteho syötetään siis staattorikäänityksiin, joista teho siirtyy roottoriin pääasiassa mekaaniseksi tehoksi.

Liukurengasmoottorin roottorikäänitykseen syntyy myös  $\text{smv } E_r$ , mutta koneen ulkopuolelle tuotujen kääninpäiden kytkennästä riippuu, lähteekö roottori pyörimään. Jos päät ovat irti, on virta nolla, eikä moottori kehitä momenttia.

Moottori aloittaa pyörimisen, kun sähköinen vääntömomentti on suurempi kuin roottoria jarruttavan kuorman vääntömomentti. Roottori pyörii aina samaan suuntaan kuin kenttä. Roottorin nopeuden lisääntyessä pienenee roottorisauvojen ja kentän välinen nopeusero, jolloin roottorijännite ja -virta pienenevät ja niiden taajuudet alenevat. Jos roottori pyöriisi samalla nopeudella kuin kenttä, niin tällöin roottorisauvat eivät leikkaisi vuoviivoja ollenkaan, jolloin  $E_r$  ja  $I_r$  olisivat nolla. Tällöin ei syntyisi myöskään pyörintää ylläpitävää momenttia. Roottori pyörii siis aina hitaammin kuin magneettikenttä, jolloin roottorin nopeus on aina pienempi kuin tahtinopeus.

Moottorin teoreettinen tahtinopeus  $n_s$  määräytyy napapariluvusta  $p$  ja syöttävän verkon taajuudesta  $f$  kaavan 10.6 mukaan.

$$(10.6) \quad n_s = 60 \frac{f}{p}$$

Epätahtimoottorien teoreettiset tahtinopeudet ovat Suomessa (verkon taajuus 50 Hz) 3000, 1500, 1000, 750... (rpm). Esimerkiksi USA:ssa (verkon taajuus 60 Hz) vastaavat nopeudet ovat 3600, 1800, 1200, 900... (rpm).

Oikosulkumoottorin todellinen pyörimisnopeus ilmaistaan yleensä  $n_s$  jättämän avulla. Jättämä  $s$  tarkoittaa, kuinka monta prosenttia roottorin nopeus  $n$  on tahtinopeutta  $n_s$  pienempi. Jättämä voidaan laskea kaavalla 10.7. Kuormittamattoman moottorin pyörimisnopeus asettuu tilaan, missä moottorin kehittämä vääntömomentti on yhtä suuri kuin laakerien ja tuulettimen kitkan aiheuttama kuormittava vääntömomentti.

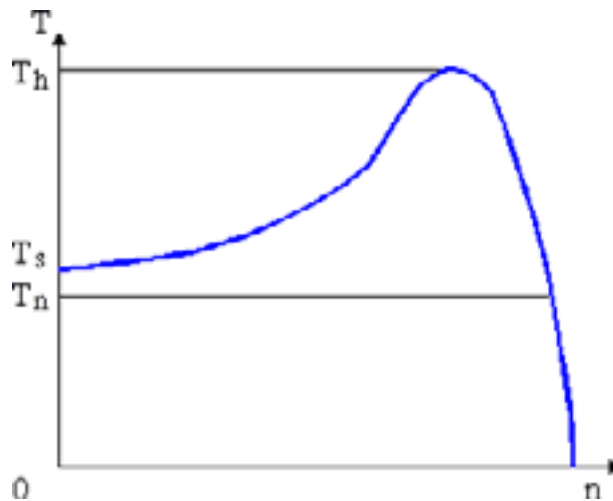
$$(10.7) \quad s = \frac{(n_s - n)}{n_s} 100\%$$

Pienten ja keskisuurten moottorien jättämät ovat kuormituksesta riippuen 5 - 15%, kun taas suurilla moottoreilla jättämä on luokkaa 0,8 - 2%.

### 10.2.3 Vääntömomentti

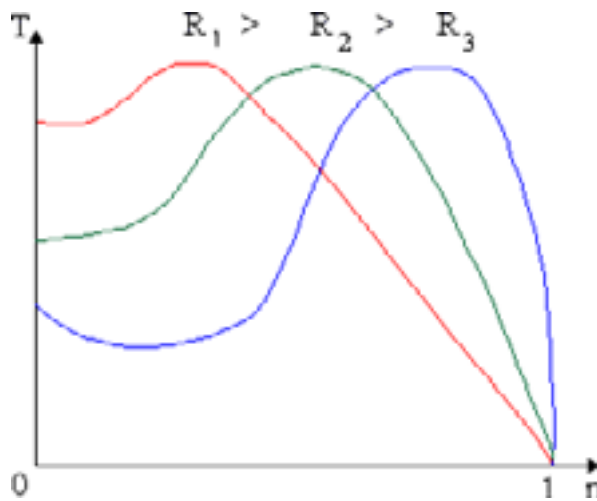
Kuormitettaessa moottoria sen sähköistä vääntömomenttia vastustava mekaaninen vääntömomentti kasvaa, mistä aiheutuu roottorin pyörimisnopeuden pieneneminen. Samalla kasvaa roottorin ja staattorin kentän välinen nopeusero, jolloin myös roottorin virta kasvaa. Samalla kasvaa myös sähköinen vääntömomentti, jolloin roottori jää pyörimään uudella nopeudella, jossa kuormituksen ja moottorin momentit ovat yhtä suuret. Näin ollen oikosulkumoottorin pyörimisnopeus ei ole vakio vaan riippuu kuormituksesta. Kuvassa 10.11 on esitetty tyypillinen oikosulkumoottorin vääntömomenttikäyrä.

Kuvan 10.11 käyrästä nähdään, että moottorin huippumomentti voi olla huomattavasti suurempi moottorin nimellismomenttiin verrattuna (normaalisti yli kaksinkertainen). Moottoria voidaan kuormittaa lyhytaikaisesti yli nimellismomentin, mutta silloin on huolehdittava, ettei moottorin lämpötila nouse yli suurimman sallitun lämpötilan. Kuormitettaessa moottoria nimellismomentillaan moottori ei ylitä suurinta sallittua lämpötilaansa. Suurin momentti, millä moottoria voi kuormittaa, on sen huippumomentti. Jos moottoria kuormitetaan vielä suuremmalla momentilla, roottori pysähtyy eli moottori kippaa.



Kuva 10.11 Oikosulkumoottorin tyypillinen vääntömomenttikäyrä.  $T_n$  on nimellismomentti,  $T_h$  on huippumomentti,  $T_s$  on käynnistysmomentti ja  $n$  on pyörimisnopeus.

Vääntömomenttikäyrän muoto riippuu koneen roottorin rakenteesta. Erityisesti käyrän muotoon vaikuttaa roottoripiirin resistanssi. Resistanssin kasvaessa kasvaa myös jättämä ja käynnistysmomentti. Moottori saavuttaa myös huippumomentin pienemmällä pyörimisnopeudella. Huippumomentin suuruuteen roottoriresistanssi ei vaikuta. Kuvassa 10.12 on havainnollistettu roottoriresistanssin vaikutusta momenttikäyrän muotoon.



Kuva 10.12 Roottoriresistanssin ( $R_1, R_2, R_3$ ) vaikutus momenttikäyrän muotoon.

Moottorin napajännite vaikuttaa moottorin huippumomenttiin neliöllisesti. Jos jännite moottorin navoissa laskee 10%, pienenee momentti 19%. Tämä tulee ottaa huomioon erityisesti käynnistettäessä moottoria kuormitettuna, koska suuren käynnistysvirran vuoksi jännite moottorin navoissa saattaa laskea niin paljon, ettei moottori lähde käyntiin.

## 10.2.4 Moottorin käynnistäminen

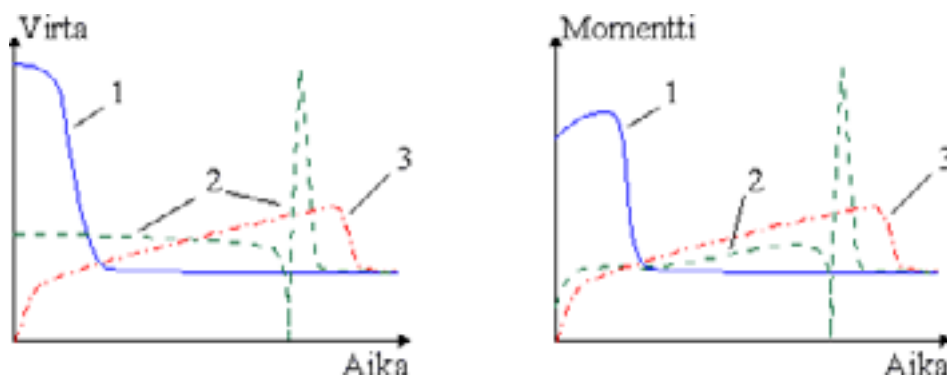
Epätahtimoottorin käynnistysvirta on normaalisti 5-10ertainen nimellisvirtaan verrattuna, ellei sitä jotenkin rajoiteta. Suuresta virrasta huolimatta moottorin kehittämä

käynnistysmomentti jää yleensä alle nimellismomentin. Riippuen verkosta, johon moottori on kytketty, voidaan joutua käyttämään virtaa rajoittavia käynnistinlaitteita, jotta vältytään liiallisilta häiriöiltä. Näin on varsinkin suurilla moottoreilla.

Liukurengasmootorit varustetaan tavallisesti roottoriin kytkettävällä säätövastuksella. Lisävastuksen avulla voidaan säätää käynnistysvirran lisäksi myös vääntömomenttia halutun suuruiseksi. Moottorin käynnistyttyä vastusta pienennetään, kunnes nimellinopeudella se oikosuljetaan ja moottori jää pyörimään tavallisena oikosulkumoottorina.

Kuten aikaisemmin tuli jo todettua, niin moottori voidaan varustaa erillisellä käynnistysvirtaa pienentävällä laitteella. Eräs tällainen yleisesti käytetty laite on ns. tähti - kolmio -käynnistin (Y/D-käynnistin). Normaalisti kolmioon kytketty moottori kytketään käynnistykseen ajaksi tähteen. Tällöin moottorin käämityksen jännite on  $1/\sqrt{3}$  nimelliseen verrattuna, jolloin käämivirta alenee samassa suhteessa. Tähtikytkennästä ja alemmasta jännitteestä johtuen moottori ottaa verkosta virran, joka on vain kolmasosa suoran (kolmio)käynnistykseen virrasta. On syytä myös huomata, että käynnistysmomentti pienenee samalla ja on vain yksi kolmasosa nimellisestä. Kyseinen käynnistystapa on yleisesti käytössä pienissä ja keskisuurissa moottoreissa, koska Y/D-käynnistin on suhteellisen halpa.

Moottori voidaan käynnistää myös elektronisella ns. pehmokäynnistimellä. Pehmokäynnistimessä on jokaiseen vaiheeseen kytketty vastarinnan tyristoripari. Tyristoreja sopivasti ohjaamalla voidaan säätää moottorin verkosta ottamaa virtaa. Kuvassa 10.13 on vertailtu eri käynnistystapojen vaikutuksia moottorin virtaan ja momenttiin.



Kuva 10.13 Käynnistystavan vaikutus moottorin virtaan ja momenttiin. 1 suoraikäynnistys, 2 tähti - kolmio -käynnistys, 3 käynnistys pehmokäynnistimellä. /5/

Moottori voidaan varustaa myös käynnistysmuuntajalla, jolla moottorin napajännitettä pienennetään käynnistykseen ajaksi. Käynnistysvirta pienenee samassa suhteessa ja momentti pienenee neliöön verrannollisesti kaavan 10.8 mukaisesti. Tämä tapa soveltuu parhaiten suurten moottorien kevyeseen käynnistämiseen.

$$(10.8) \quad T = \left(\frac{U}{U_n}\right)^2 T_n$$

Jos moottorin pyörimisnopeutta ohjataan taajuusmuuttajalla, ei moottori tarvitse erillisiä käynnistyslaitteita, sillä taajuusmuuttajalla käynnistysvirta voidaan pitää pienenä.

### 10.2.5 Nopeudensäätö

Epätahtimoottorin pyörimisnopeus  $n$  riippuu siis syöttävän verkon taajuudesta, napapariluvusta ja jättämästä kaavan 10.9 mukaisesti.

$$(10.9) \quad n = 60 \frac{f(1-s)}{p}$$

Nopeutta voidaan siten säätää muuttamalla taajuutta  $f$ , napaparilukua  $p$  tai säätämällä jättämää  $s$ . Taajuudensäätö vaatii erillisen taajuusmuuttajan, jolla moottorille syötettävän virran taajuutta muutetaan. Taajuusmuuttajista kerrotaan tarkemmin luvussa 11.

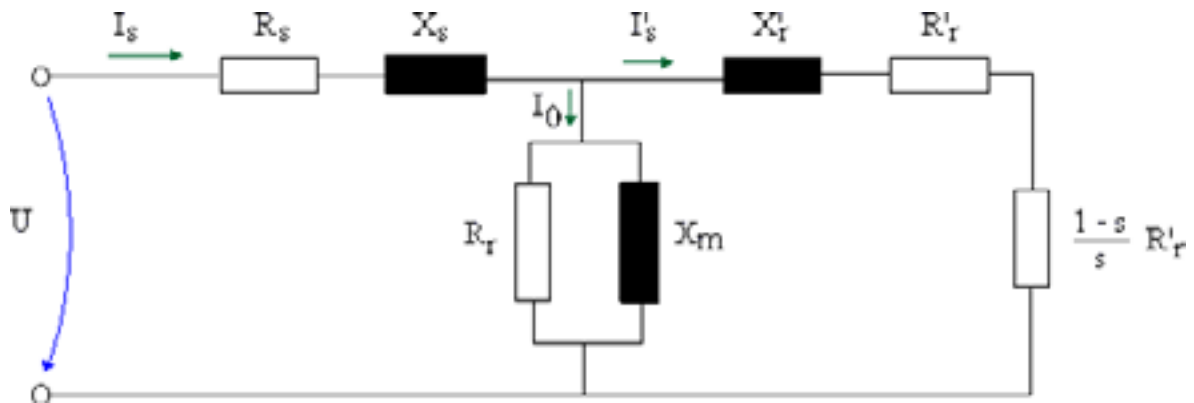
Staattorikäämityksen napaparilukua voidaan muuttaa varustamalla staattori kahdella eri napaparilla varustetuilla käämityksillä, joista jompikumpi toimii vuorollaan. Napaluvut voivat olla esimerkiksi  $p$  on 2 ja  $p$  on 3, jolloin vastaavat moottorin nopeudet ovat 1500 ja 1000 rpm.

Nopeuden muuttaminen jättämää säätämällä onnistuu vain liukurengasmoottorilla sen roottoriresistanssia säätämällä. Resistanssia lisäämällä loivenee moottorin momenttikäyrän muoto, jolloin uusi toimintapiste saavutetaan uudella jättämällä. Jättämän kasvaessa entistä suurempi osa ilmavälitehosta muuttuu roottorin resistanssissa lämmöksi, joten moottorin hyötysuhde heikkenee nopeuden alentuessa.

Pyörimissuunnan vaihtaminen epätahtimoottorilla on yksinkertaista. Vaihdettaessa minkä tahansa vaiheen paikkoja pyörii magneettikenttä koneen sisällä toiseen suuntaan ja samoin siis myös roottori. Asiaa voi kokeilla kappaleesta 10.1.4.

### 10.2.6 Sijaiskytkentä, tehon jakautuminen ja hyötysuhde

Sen tarkemmin sijaiskytkentää tässä johtamatta todetaan, että epätahtimoottorille voidaan muodostaa kuvan 10.14 mukainen sijaiskytkentä. Sijaiskytkennän arvot voidaan määrittää samaan tapaan kuin muuntajillakin tyhjäkäynti- ja oikosulkukokeella.

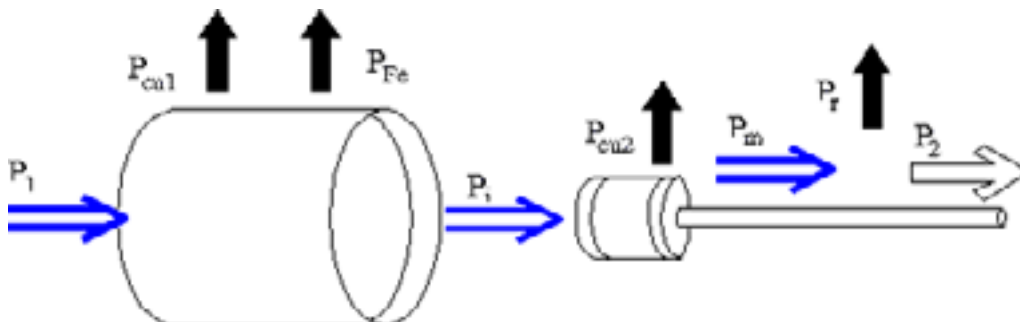


Kuva 10.14 Epätahtimoottorin sijaiskytkentä. Pilkulla merkityt suureet on redusoitu roottorista.

Tyhjäkäyntikokeessa roottori pyörii tahtinopeudella ( $s=0$ ), jolloin roottorissa ei kulje virtaa ja epätahtikone vastaa tyhjäkäyvästä muuntajasta. Kone ottaa verkosta vain magnetointivirtaa, jolloin voidaan selvittää magnetointihaaran komponentit. Mikäli roottoria ei pyöritetä apumoottorilla, pyörii moottori pienellä jättämällä ja kone ottaa verkosta rautahäviöidensä lisäksi tehoa tuuletus- ja hankaushäviöihin.

Oikosulkukokeessa roottori lukitaan paikalleen ( $s=1$ ), jolloin kokeen tuloksista voidaan laskea sijaiskytkennän käämien resistanssit ja hajareaktanssit.

Epätahtimoottori ottaa verkosta tehoa, josta suurin osa kuluu mekaaniseen työhön (ts. roottorin pyörittämiseen). Tehon jakautumista moottorissa on havainnollistettu kuvassa 10.15.



Kuva 10.15 Verkosta otetun tehon jakautuminen moottorissa. /8/

Osa verkosta otetusta tehosta  $P_1$  muuttuu häviöiksi staattorissa ja roottorissa. Staattorissa tehoa kuluu rauta-  $P_{Fe}$  ja kuparihäviöihin  $P_{Cu1}$ . Magneettikentän välityksellä roottoriin siirtyy ilmväliteho  $P_i$ . Roottorissa syntyy resistiivisiä häviöitä  $P_{Cu2}$  sekä kitka- ja tuuletushäviöitä  $P_r$ . Pienellä jättämällä roottorin rautahäviöt ovat pienet vuon pienen taajuuden vuoksi. Moottori kehittää mekaanisen tehon  $P_m$  johon sisältyvät häviöt  $P_r$ . Moottorin akselilta antama teho on siis  $P_2 = P_m - P_r$ . Moottorin antama mekaaninen teho  $P_m$  voidaan laskea kaavalla 10.10.

$$(10.10) \quad P_m = \omega_r T$$

missä  $\omega_r$  on roottorin kulmanopeus.

Ilmaväliteho eli pyörivän kentän teho on

$$(10.11) \quad P_i = \omega_s T$$

missä  $\omega_s$  on kentän kulmanopeus

Moottorin antama mekaaninen teho on

$$(10.12) \quad P_m = (1-s)P_i$$

Roottorissa syntyvät resistiiviset häviöt

$$(10.13) \quad P_{Cu2} = sP_i$$

Toisin sanoen, roottorissa syntyvät häviöt ovat suoraan verrannollisia jättämään. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, ettei epätahtimoottoria kannata käyttää pitkiä aikoja suurella jättämällä (liukurengasmoottori).

Jättämän ollessa 1 ei roottori pyöri, jolloin koko ilmaväliteho muuttuu roottorissa lämmöksi. Jättämän ollessa 0 (ideaalinen tyhjäkäynti) roottorissa ei synny häviöitä. Roottori on tällöin virraton, eikä myöskään kehitä momenttia.

Moottorin nimellishyötysuhde saadaan laskettua moottorin arvokilpeen merkityistä tiedoista.

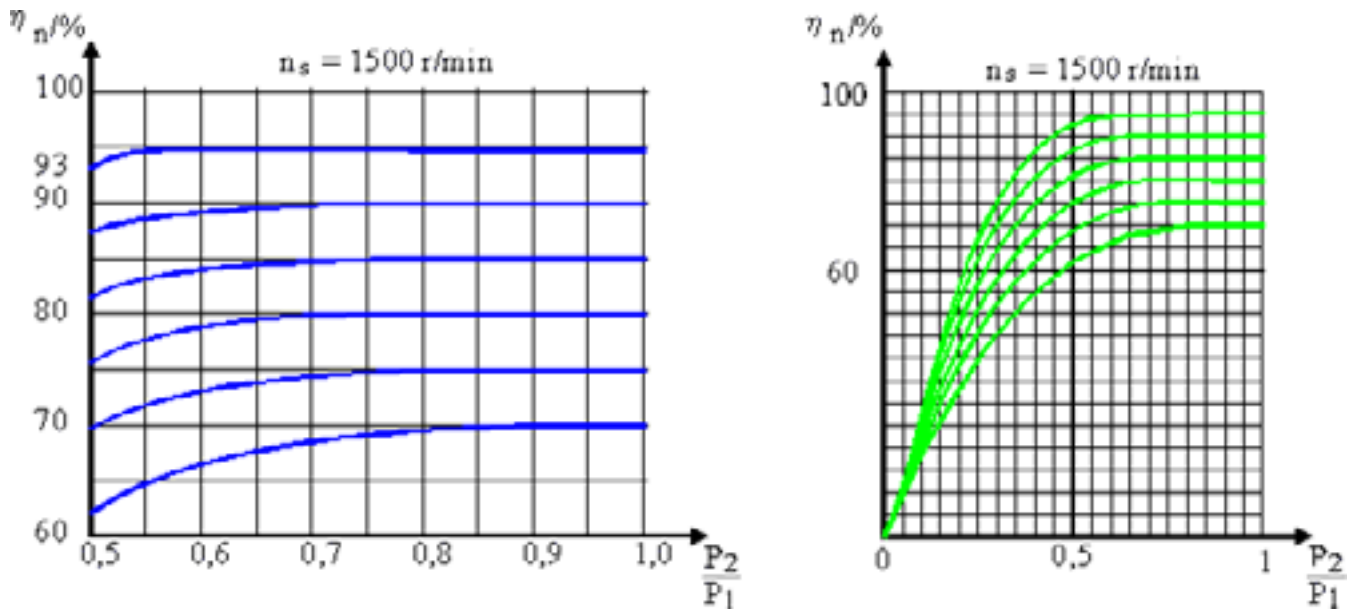
$$(10.14) \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{\sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi_n}$$

missä

$P_2$  on moottorin antama teho

$P_1$  on moottorin arvokilven tiedoista laskettu teho

Hyötysuhteen likiarvot osakuormituksella saadaan mm. valmistajan antamista käyristä. Kuvassa 10.16 on esitetty 4-napaisen kolmivaiheisen oikosulkumoottorin hyötysuhde.



Kuva 10.16 0,25 - 800 kW oikosulkumoottoreiden hyötysuhteita osakuormilla. /2/

## 10.2.7 Epätahtikone generaattorina

Epätahtikonetta voidaan käyttää myös generaattorina. Generaattorikäytössä roottori pyörii epätahdissa magneettikentän kanssa, kuten moottorinakin, mutta nopeammin kuin magneettikenttä. Epätahtigeneraattorit voidaan magnetoinnin perusteella jakaa kahteen ryhmään, verkko- ja kondensaattorimagnetoituihin (itse magnetoituva) epätahtigeneraattoreihin.

Verkkomagnetoituidut epätahtigeneraattorit ottavat magnetoituvirran sähköverkosta, joten ne eivät pysty syöttämään sähkötehoa muuhun kuin jännitteelliseen verkkoon. Tällaisia verkkomagnetoituja epätahtigeneraattoreita on käytetty esimerkiksi pienitehoisissa vesivoimalaitoksissa ja tuulivoimalaitoksissa. Sen sijaan kondensaattorimagnetoitu epätahtigeneraattori ottaa tarvitsemansa magnetoimisvirran koneen liittimiin kytketyistä magnetoimiskondensaattoreista, joten ne pystyvät toimimaan täysin itsenäisinä generaattoreina. Näitä generaattoreita käytetäänkin usein poltto- tai dieselmoottorin ollessa voimakoneena. Itsemagnetoituvan generaattorin rautaosien pitää olla magneettisesti kyllästyviä, jotta generaattorin heräämiselle välttämätön remanenssivuo olisi olemassa.

## 10.2.8 Yksivaiheinen oikosulkumoottori

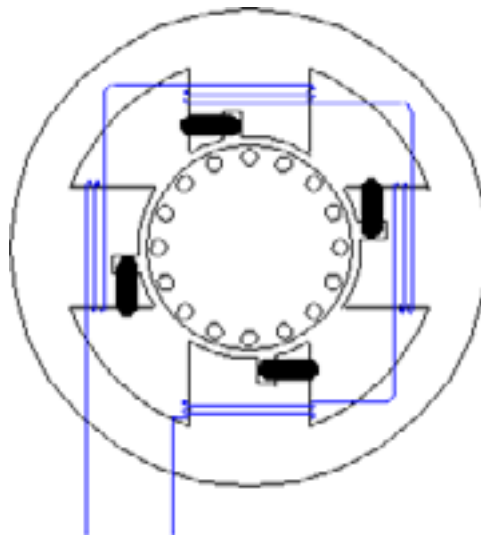
Yksivaiheisen oikosulkumoottorin staattorissa on yksivaiheinen urakäämitys. Tämä käämitys ei synnytä koneen sisälle pyörivää magneettikenttää vaan sykkivän magneettikentän. Tämä sykkivä magneettikenttä, jonka voidaan ajatella muodostuvan kahdesta vastakkaiseen suuntaan pyörivästä magneettikentästä, ei pysty käynnistämään



moottoria ilman apua, eli moottori ei kehittä paikalla ollessaan momenttia. Jos moottorille annetaan alkunopeus, se lähtee pyörimään. Yksivaiheinen moottori siis voi pyöriä kumpaankin suuntaan tahansa.

Jotta moottorille saadaan tarvittava alkumomentti, varustetaan moottori sitä varten apukäämillä, eli käynnistyskäämillä, joka sijoitetaan  $90^\circ$  (sähköasteen) päähän pääkäämistä. Tähän käämiin johdetaan verkosta virta kondensaattorin kautta. Tällöin pääkäämin ja käynnistyskäämin virrat ovat lähes  $90^\circ$  vaihesiirrossa ja kone toimii kuin kaksivaiheinen moottori, jolloin koneen ilmapäliin syntyy kiertoa vastainen kenttä ja roottori lähtee pyörimään. Käämi voidaan kytkeä käynnistyskondensaattorin jälkeen irti, jolloin sitä kutsutaan käynnistyskondensaattorimoottoriksi.

Pieniä yksivaiheoikosulkumoottoreita valmistetaan myös ns. sulkunapamoottoreina, jonka periaate on esitetty kuvassa 10.17. Staattorissa on yksivaiheiset avonapakäämitykset. Napoihin on tehty noin kolmanneksen etäisyydelle sen reunasta ura, johon on sijoitettu oikosulkurenkaat. Renkaihin syntyvät virrat saavat aikaan renkaan lävistävän magneettivuon viivästymisen, jolloin ilmapäliin syntyy siirtyvä kenttä. Syntyvä lähtömomentti on pieni, mutta se riittää saamaan vähän kuormitetun moottorin käyntiin.



Kuva 10.17 Sulkunapamoottorin poikkileikkaus. /4/

Jatkuu...