

10 SÄHKÖKONEET, osa2

10.3 Tahtikoneet

10.3.1 Rakenne

Toinen merkittävä vaihtovirtakoneiden ryhmä on tahtikoneet. Tahtikoneiden nimitys tulee siitä, että niiden roottorit pyörivät koneen sisäisen magneettikentän, ja siten myös syöttävän verkon kanssa tarkalleen samalla nopeudella eli ns. tahtinopeudella.

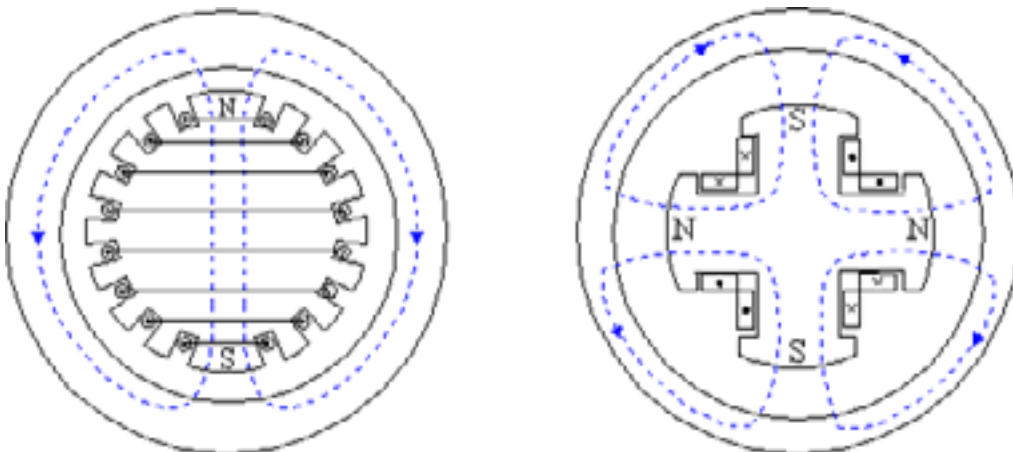
Periaatteessa tahtikoneen staattorin rakenne on samanlainen kuin epätahtikoneessakin, mutta roottorin rakenne on erilainen. Suuret moottorit ovat usein tahtikoneita, sillä ne ovat usein taloudellisin ratkaisu. Tahtikoneiden yleisin käyttösovellus on kuitenkin sähköenergian tuotantoon käytettävä tahtigeneraattori. Suurimmillaan tahtigeneraattoreiden tehot voivat olla 1000 MVA ja jännite 10-30 kV. Voimalaitosten generaattorit ovat poikkeuksetta kolmivaiheisia ja ne kytketään tähteen.

Tahtikoneen pyörimisnopeus on sidoksissa syöttävän verkon taajuuteen f

$$(10.15) \quad n = 60 \frac{f}{p}$$

Tahtikone voi pyöriä vain yhtälön (10.15) mukaisella nopeudella. Jos koneen kuormitus kasvaa liian suureksi, kone ns. putoaa tahdistä, jolloin kone on irroitettava verkosta.

Roottorin, eli napapyörän, rakenteen puolesta tahtikoneet voidaan jakaa kahteen eri ryhmään: avonapaisiin ja umpinapaisiin tahtikoneisiin, joiden napapyörrien eroja on havainnollistettu kuvassa 10.18. Napapyörrien rakenteellisista eroista johtuen niiden matemaattinen käsittelykin on erilaista.



Kuva 10.18 a) 2-napainen lieriö- eli umpinaparoottori ja b) 4-napainen avonaparoottori. /4/

Tahtikoneen staattorissa on kolmivaiheinen vaihtovirtakäämitys kuten epätahtikoneissakin. Ero epätahtikoneisiin on, että roottorin magnetointikäämitys on

johdettava magnetointivirtaa, joka on tasavirtaa. Tämä tasavirta synnyttää roottorin magneettinapaan pysyvän magneettivuon, vaikka roottori pyöriikin. Tätä magnetoimisvirran synnyttämää magneettivuota sanotaan päävuoksi. Tahtikoneissa on siis erikseen työvirta- ja magnetointikämmitykset. Lisäksi tahtikoneissa on myös ns. käynnistys- eli vaimennuskäämitys. Se on oikosulkumoottorin häkkikämmityksen kaltainen.

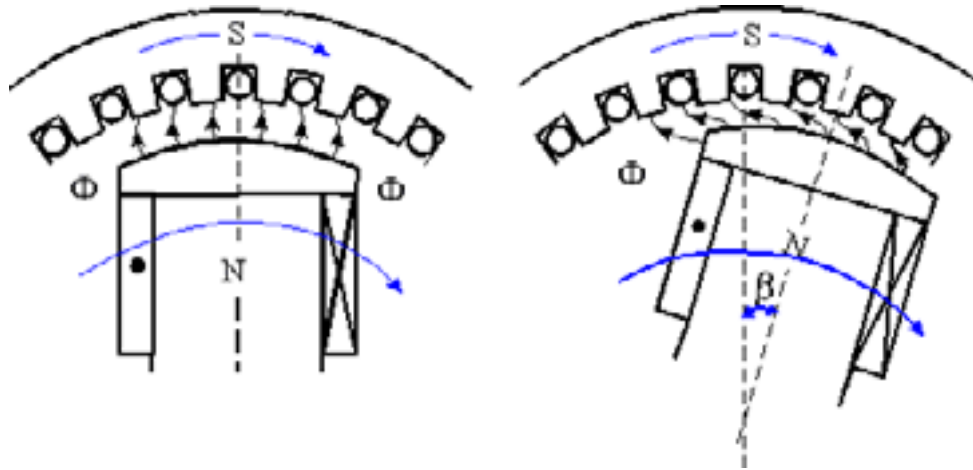
Avonaparoottorissa on akselille sijoitettu koneen napaluvun mukainen määrä magneettinapoja. Staattorikämmitys on aina tehty samalle napaluvulle kuin roottori. Jokaisella navalla on omat magnetointikämminsä, jotka on kytketty sarjaan siten, että navat magnetoituvat vuorotellen S- ja N-navoiksi. Koska napojen vuo ei tasavirralla vaihtelee, ei niissä synny rautahäviöitä, jolloin ne tehdään massiivisesta teräksestä. Navan päässä on napakenkä, joka on muotoiltu siten, että vuon jakautuminen napakengän ja staattorikehän välissä on mahdollisimman sinimäinen. Ilmaväli ei siis ole vakio, vaan suurenee reunoille päin. Avonapaisia koneita käytetään hitaasti pyörivissä koneissa (75-500 rpm), kuten vesivoimalaitosten generaattoreissa. Suurten avonapageneraattoreiden halkaisijat voivat olla useita metrejä.

Umpinaparoottorissa kämmitys on sijoitettu roottorin akselin suuntaisiin uriin. Urija ei ole sijoitettu tasaisesti koko kehälle, vaan niiden välissä on myös urattomia alueita, eli magneettinapoja. Tavoitteena on myös mahdollisimman sinimuotoinen vuontiheys ilmavälissä. Umpinaparakennettä käytetään nopeasti pyörivissä koneissa (3000 rpm), kuten höyryvoimalaitosten generaattoreissa. Isoissa generaattoreissa roottorin pituus voi olla kymmeniä metrejä.

Tahtimoottorit ja useimmat generaattoritkin ovat vaaka-akselikoneita.

Vesivoimalaitosten generaattorit sen sijaan ovat yleensä pystyakselikoneita. Niiden akseli tuetaan ohjaus- ja kannatuslaakereilla. Kannatuslaakerin varassa on kaikkien pyörivien osien paino sekä vesiturbiinin hydraulinen voima. Kannatuslaakeri voi olla joko napapyörän ylä- tai alapuolella.

Tahtikoneessa toimintaideana on, että staattorin ja roottorin magneettinapojen välille luodaan magneettinen kytkentä. Tässä kytkennässä staattorin N-navat ovat "kiinni" roottorin S-navoissa ja päinvastoin. Tämä kytkentä saa staattorin magneettikentän ja roottorin pyörimään täsmälleen samalla nopeudella. Kuormitetun tahtikoneen käyttäytymistä voidaan tarkastella kuvien 10.19 avulla.



Kuva 10.19 Generaattorin staattorin ja roottorin magneettikenttien välinen kytkentä a) tyhjäkäynnissä ja b) kuormitettuna. /8/

Kuvassa 10.19 on esitetty staattorin ja roottorin magneettikenttien välinen kytkentä generaattorikäytössä. Tyhjäkäynnissä kenttien vastakkaismerkkiset navat ovat tarkalleen vastakkain. Kun voimakoneen tehoa lisätään (kuva b), pyrkii roottori kiihtymään verkon taajuudella pyörivän staattorikentän edelle, jolloin napojen välinen kulma β (ns. tehokulma) pyrkii kasvamaan. Tahtikoneen kuormitettavuuteen ja tehokulmaan palataan tarkemmin kappaleessa 10.3.3.

10.3.2 Napapyörän magnetointi

Tahtigeneraattorin magneettinavat on toteutettu muotoilemalla tai käämitysteknisin keinoin siten, että ne magnetoitaessa synnyttävät ilmaväliin sinimuotoisen magneettikentän. Kun napapyörää pyöritetään voimakoneella, leikkaavat roottorin vuoviivat staattorikäämityksiä, jolloin staattoriin indusoituu sinimuotoinen vaihtojännite. Magnetoimismenetelmien perusteella koneet voidaan jakaa harjallisiin ja harjattomiin tahtikoneisiin.

Harjallisessa magnetoinnissa magnetointikäämityksen tarvitsema tasavirta johdetaan pyörivään roottorikäämiin akselille sijoitettujen liukurenkaiden ja niitä laahaavien metalligrafiittiharjojen kautta ulkoisesta tasavirtalähteestä. Generaattorin magnetoimisvirta voidaan tehdä tasasuuntaamalla generaattorin vaihtojännite ja johtamalla se liukurenkaiden avulla takaisin roottoriin. Näin magnetoitua generaattoria kutsutaan itseherätteiseksi generaattoriksi.

Tarvittava tasavirta voidaan myös tuottaa esimerkiksi generaattorin kanssa samalle akselille sijoitetulla ulkonapaisella vaihtosähkögeneraattorilla, jossa magneettinavat ovat staattorissa ja käämitys, johon lähdejännite indusoituu, on roottorissa. Magnetoingtgeneraattorin tuottama vaihtojännite syötetään tasasuuntauksen jälkeen pääkoneen roottorikäämiin, jolloin liukurenkaita ei tarvita.

Napapyörä voidaan myös valmistaa kestmagneetista, jolloin erillistä magnetointivirtaa ei tarvita. Navat magnetoidaan koneen kokoonpanon jälkeen, ja jos kone joudutaan avaamaan esimerkiksi korjausten vuoksi, on navat yleensä magnetoitava uudelleen. Kestomagnetoitujen koneiden tehot ovat toistaiseksi vielä pieniä.

Kun tahtikoneetta käytetään generaattorina, staattorin kolmivaihekäämityksiin indusoituvan sähkömotorisen jännitteen taajuus määräytyy napapyörän pyörimisnopeudesta ja sen tehollisarvo on

$$(10.16) \quad E_m = 4,44 fN\phi$$

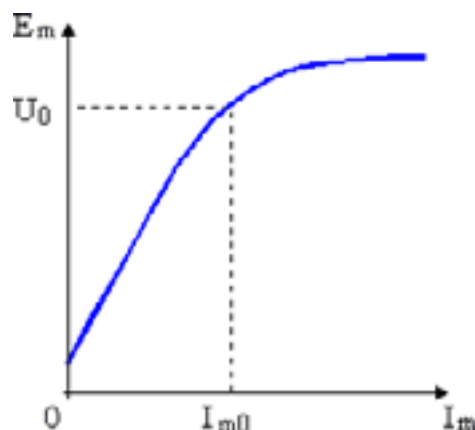
missä

f on taajuus

N on staattorin vaihekäämin kierrosmäärä

ϕ on yhden navan päävuo.

Yhtälössä (10.16) ovat kaikki muut vakioita paitsi vuon suuruus. Vuon suuruus puolestaan riippuu magnetoivien ampeerikierrosten lukumäärästä, jolloin siihen voidaan vaikuttaa magnetointivirtaa säätämällä. Jos magnetointivirta on nolla, ei kone kehittä jännitettä. Kuvasta 10.20 nähdään koneen kehittämän jännitteen muuttuminen kun magnetointivirtaa I_m muutetaan.



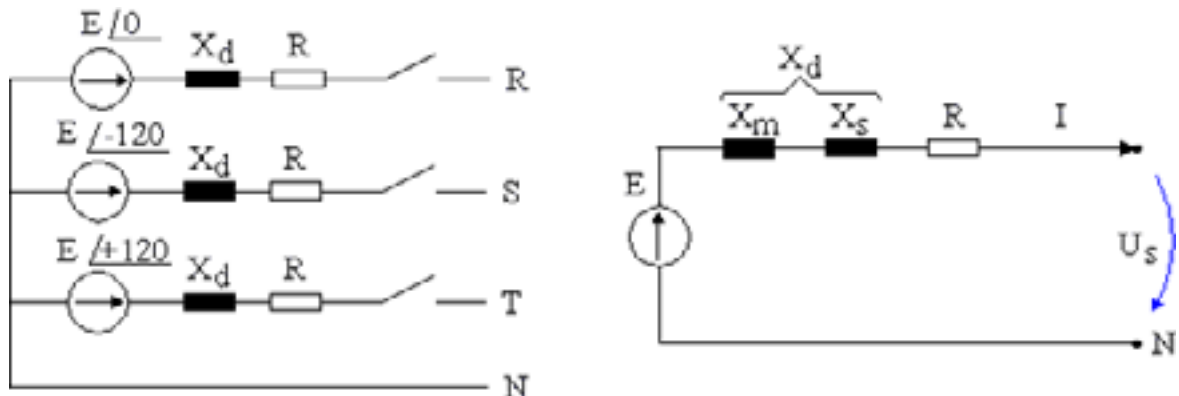
Kuva 10.20 Staattorikäämityksiin indusoituva jännite U magnetoimisvirran I_m funktiona. Alaindeksi 0 viittaa nimellisarvoon.

Käyrässä on selvästi kaksi osaa: lineaarinen alku- ja kyllästyvä loppuosaa. Käyrän alkuosalla kuluu koko magnetointikäämin mmv ilmavälin reluktanssissa. Vuontiheys raudassa on vielä niin pieni, ettei sen vaikutus näy, joten jännitteen ja magnetoimisvirran yhteys on suoraviivainen. I_m :n kasvaessa alkaa rauta kyllästyä, jolloin jännitteen kasvu hidastuu ja tyhjäkäyntikäyrä alkaa taipua enemmän oikealle.

10.3.3 Tahtikoneen sijaiskytkentä ja teho

Yksinkertaisuuden vuoksi tässä käsitellään vain umpinapakoneita, koska avonapakoneen ilmaväli ei ole vakio ja siten koneen yhtälöt ovat monimutkaisempia.

Tahtikoneelle voidaan muodostaa kuvan 10.21a mukainen kolmivaiheinen sijaiskytkentä. Tavallisesti sijaiskytkentä esitetään yksivaiheisena, jolloin saadaan kuvan 10.21b mukainen kytkentä. Kuvassa kone on ajateltu generaattoriksi, sillä virta on koneesta pois päin



Kuva 10.21 Tahtikoneen a) kolme- ja b) yksivaiheinen sijaiskytkentä. X_d on tahti-, X_s on haja- ja X_m magneetoimisreaktanssi.

Koneen jänniteyhtälöksi voidaan sijaiskytkennän perusteella kirjoittaa

$$(10.17) \quad U_s = E_m - (R + jX_d)I$$

missä

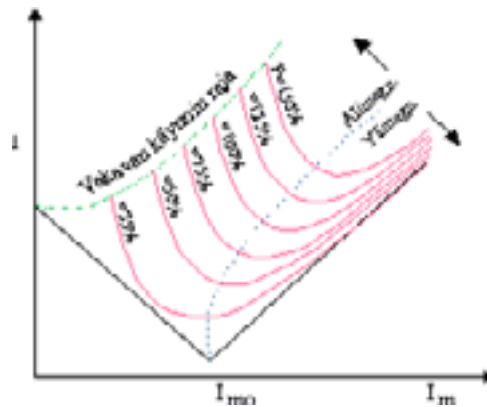
- R on koneen resistanssi
- I on koneen virta
- U_s on koneen liitinjännite.

Suuritehoisissa koneissa resistanssi on yleensä paljon reaktanssia pienempi, jolloin se voidaan jättää huomiotta. Koneen ollessa moottorina, kuva 10.21b, virran suunta muuttuu ja yhtälön 10.17 miinusmerkki vaihdetaan plusmerkiksi.

Yhtälön 10.16 mukaan kasvattamalla koneen magneetointia kasvaa myös koneen kehittämä jännite. Tästä seuraa yhtälön 10.17 mukaan se, että myös koneen liitinjännite kasvaa. Kun kone on kytketty jäykkään verkkoon (jännite vakio), ei koneen magneetoimisvirran kasvattaminen kuitenkaan vaikuta koneen liitinjännitteeseen, vaikka se vaikuttaakin koneen kehittämään sähkömotoriseen jännitteeseen E_m .

Magneetointivirtaa säädettäessä ja koneen ollessa jäykässä verkossa muuttuu staattorin virta siten, että jännitehäviö koneen tahtireaktanssissa ja resistanssissa kumoaa E_m :n muutoksen. Staattorivirran pätökomponentti ei voi muuttua, koska generaattoria pyörittävän voimakoneen teho määrää generaattorin antaman pätötehon suuruuden. Magneetointivirran suuruudella voidaan tällöin vaikuttaa vain virran loiskomponenttiin. Kun magneetointia pienennetään, ottaa kone verkosta tarvitsemansa loisvirran, eli kone kuluttaa tällöin loistehoa. Vastaavasti ylimagneoituna kone tuottaa loistehoa verkkoon. Kuvassa 10.22 on esitetty, kuinka koneen staattorivirta muuttuu magneetoimisvirran funktiona. Käyrien muodon perusteella niitä kutsutaan V-käyriksi. Kuvasta havaitaan, että magneetointia voidaan pienentää vain tiettyyn rajaan asti, mikä määräytyy

kuormituksesta. Jos magnetointia pienennetään tämän rajan yli, ei kone kykene enää kehittämään kuormituksen vaatimaa momenttia ja kone putoaa tahdista.



Kuva 10.22 Tahtikoneen V-käyrät. /7/

Kun tahtikoneetta kuormitetaan, kasvaa ns. tahtikulma β kuten kuvassa 10.19 on esitetty. Tämä kulma β on sama kuin roottorikäänin indusoiman jännitteen E_m ja generaattorin napajännitteen U_v välinen kulma, mistä seuraa tehokulmayhtälön 10.18 mukaisesti, että generaattorin verkkoon syöttämä pätöteho kasvaa.

$$(10.18) \quad P = \frac{3E_m U_s}{X} \sin \beta$$

missä X on koneen reaktanssi.

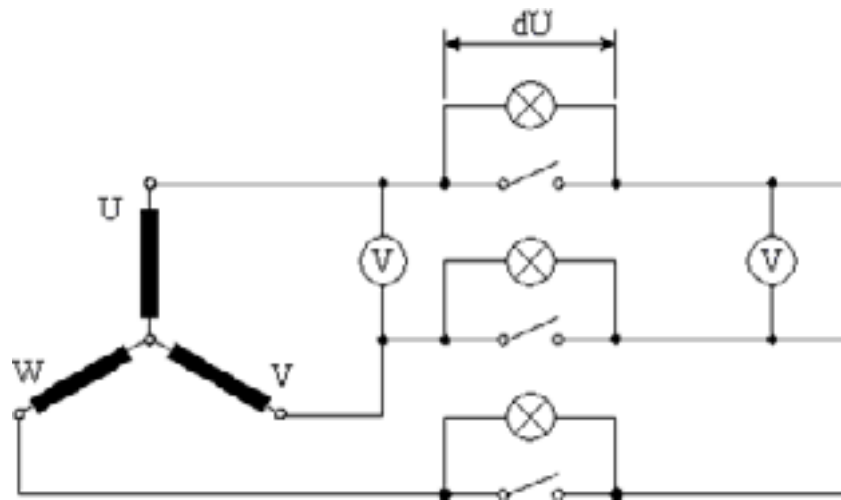
Generaattorin verkkoon syöttämän tehon kasvaessa roottorin vastamomentti kasvaa myös, jolloin roottori jää edelleen pyörimään verkon kanssa samalla taajuudella mutta suuremmalla kulman β arvolla. Jos voimakoneen tehoa kasvatetaan liikaa, kasvaa $\beta > 90^\circ$, jolloin staattorin ja roottorin magneettinapojen välinen yhteys katkeaa ja kone putoaa tahdista.

Jos tahtikone putoaa tahdista, toimii se vuorotellen generaattorina ja moottorina magneettinapojen asemasta riippuen. Kone toimii kuin tehopumppu vuorotellen verkkoon tehoa siirtäen ja tehoa sieltä ottaen. Tämä aiheuttaa verkossa teho- ja jänniteheilahteluja, jotka voivat aiheuttaa verkkoon vakavia häiriöitä. Tahdistasta pudonnut moottori on irroitettava verkosta, ellei sitä ole varustettu laitteilla, jotka estävät kyseisen ilmiön. Tällainen laite on rele, joka tahdistaputoamisen jälkeen katkaisee magnetoinnin, jolloin kone jää pyörimään verkkoon epätahtimoottorina häkkikäänimyksensä varassa. Jos kuormitus voidaan poistaa tai riittävästi alentaa, voidaan moottori tahdistaa uudelleen verkkoon.

10.3.4 Käynnistys ja verkkoon kytkeminen

Konetta käynnistettäessä roottorin pyörimisnopeus ei ole sama kuin verkon taajuus, mistä seuraa, ettei tahtikoneetta voida kytkeä verkkoon samalla tavalla kuin esimerkiksi oikosulkumoottoria.

Kun tahtikonetta käytetään generaattorina, pyritään tahtikoneen pyörimisnopeus saamaan voimakoneen avulla mahdollisimman lähelle verkon taajuutta. Generaattori voidaan kytkeä verkkoon, jos jännite on generaattorikatkaisijan yli nolla, verkon ja generaattorin taajuudet ovat samat ja vaihejärjestys on sama. Tällöin suljettaessa generaattorikatkaisija ei synny virtasysäystä verkkoon, eivätkä verkon muut käyttäjät havaitse muutosta tapahtuneen. Oikean katkaisijan sulkemishetken toteamiseksi käytetään erilaisia apulaitteita. Yksinkertainen laitteisto on kuvassa 10.23, missä lamput on kytketty katkaisijan yli.



Kuva 10.23 Generaattorin tahdistuskytkentä. /7/

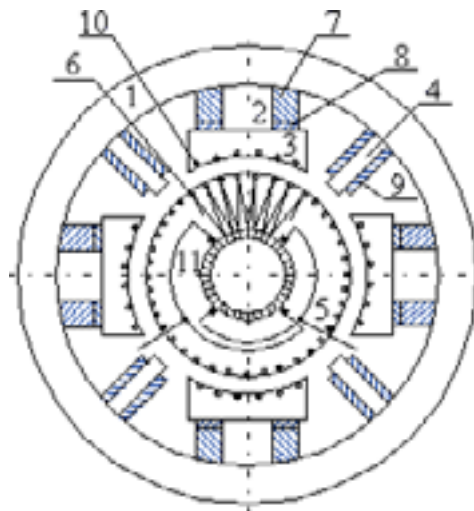
Volttimittareilla voidaan todeta, ovatko jännitteet yhtäsuuret. Jos generaattorin jännitteen taajuus tai suuruus poikkeaa verkon vastaavista arvoista, on lamppujen yli jännite dU ja ne palavat. Jos generaattorin nopeus ja jännitteen suuruus ovat samat kuin verkossa, niin jännite lamppujen yli on 0, jolloin ne ovat pimeinä ja katkaisija voidaan sulkea. Käytännössä tahdistamiseen käytetään automaattisia tahdistimia, jotka suorittavat taajuuden säädön ja sulkevat katkaisijan oikealla hetkellä.

Tahtimoottorin kytkemiseksi verkkoon edellä kuvatulla tavalla tarvittaisiin moottoria pyörittävä apukone. Kustannussyistä apukone usein kuitenkin jätetään pois. Moottori käynnistetään tällöin häkkikämmityksen avulla kuten oikosulkumoottori, jolloin moottori ottaa verkosta käynnistysvirran, joka on 3-5 kertainen koneen nimelliseen virtaan verrattuna. Kun moottori on käynnistynyt ja pyörii tyhjäkäynnissä, on sen nopeus lähellä tahtinopeutta, jolloin koneen napapyörään kytketään magnetointi ja moottori tahdistuu automaattisesti. Magnetoinnin kytkeminen napapyörälle ilman tahdistavia laitteita aiheuttaa verkkoon virtasysäyksen, sillä moottorin kehittämä jännite voi magnetoinnin kytkemishetkellä olla täysin vastakkainen verkkojännitteelle.

10.4 Tasavirtakoneet

10.4.1 Koneen rakenne

Tasavirtakoneiden rakenne poikkeaa huomattavasti tahti- ja epätahtikoneiden rakenteesta, sillä tasavirtakoneet eivät tarvitse kiertokenttää toimiakseen. Kuvasta 10.24 nähdään tasavirtakoneen rakenne. Periaatteessa tasasähkögeneraattorin ja -moottorin rakenteet eivät eroa toisistaan, joten samaa konetta voidaan käyttää sekä moottorina että generaattorina. Nykyisin tasavirran tuottaminen tasasäähkögeneraattorilla uusissa käyttökohteissa on harvinaista, sillä useimmiten tasavirta tuotetaan vaihtovirtaverkosta puolijohdekomponenteista rakennettavilla tasasuuntaajilla.



Kuva 10.24 Tasavirtakoneen osat: 1 staattorin kehä, 2 päänavan sydän, 3 napakenkä, 4 kääntönavan sydän, 5 roottorin eli ankkurin rautasydän, 6 roottori- eli ankkurikäänitys, 7 sivuvirtakäänitys, 8 sarjavirtakäänitys, 9 kääntönavan käänitys, 10 kompensointikäänitys, 11 kommutaattori harjoineen. /2/

Kuten muissakin koneissa, tasasähkökoneissa rautaosat muodostavat koneen magneettikentälle magneetti-piiriin. Koska kentät koneessa ovat tasakenttiä, voidaan koneen kehä ja napojen rautaosat tehdä täysraudasta. Roottorin rautaosat sen sijaan on tehty sähkölevystä, sillä se joutuu pyörimään tasamagneettikentässä. Pyörimisliike aiheuttaa siinä vuon vaihtelun ja rautahäviöitä.

Päänapojen magnetointikäänityksillä synnytetään koneen toiminnalle välttämätön magneettivuo eli ns. pääkenttä. Riippuen magnetointikäänityksen kytkennästä roottorikäänin kanssa puhutaan joko sivu- tai sarjakäänityksestä. Magnetointikäänitys on tehty kuparilangasta ja se on eristetty staattorista. Roottori- eli ankkurikäänitys on valmistettu eristetyistä kuparilangasta tai muotojohtimesta.

Roottorikäimitykseen indusoituu vaihtosähkömotorinen jännite sen pyöriessä magnetointikäimitysten muodostamassa magneettikentässä. Generaattorissa tämä jännite on luonteeltaan lähdejännite ja moottoreissa vastajännite moottoriin vaikuttavalle liitinjännitteelle. Koska roottoriin indusoitunut jännite on vaihtojännitettä, on se generaattoreissa tasasuunnattava ja moottoreissa syöttävä tasajännite vaihtosuunnattava. Tätä toimenpidettä kutsutaan kommutoinniksi ja sen suorittaa kommutaattori yhdessä liukuharjojen kanssa. Kuvassa 10.25 on esitetty tasavirtakoneen kommutaattori. Etualalla näkyvät kommutaattoriliuskat, joita liukuharjat laahaavat. Kommutaattori muodostaa periaatteessa mekaanisen tasavaihtosuuntaajan. Kommutointi on selvitetty lähemmin kappaleessa 10.4.2.

Kuva puuttuu

Kuva 10.25 Tasavirtakoneen kommutaattori. /2/

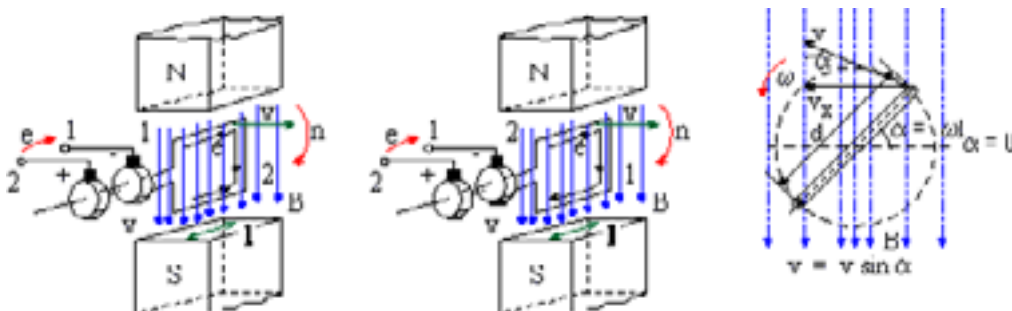
Kääntönapakäämityksen tehtävänä on saada kommutaattori harjoineen kommutoimaan ilman kipinöitä, mikä vähentää kommutaattorin huoltotarvetta. Kääntönapakäämityksellä pienennetään myös ankkurikäimityksen muodostamaa kenttää eli ankkurikenttää. Kääntönapakäämitys kytketään ankkurikäimityksen kanssa sarjaan.

Kompensointikäimitys sijoitetaan magnetointinapojen uriin ja sen tehtävänä on kumota ankkurivirran ankkurikenttä. Jotta tämä onnistuisi mahdollisimman hyvin, on sekin kytkettävä ankkurin kanssa sarjaan.

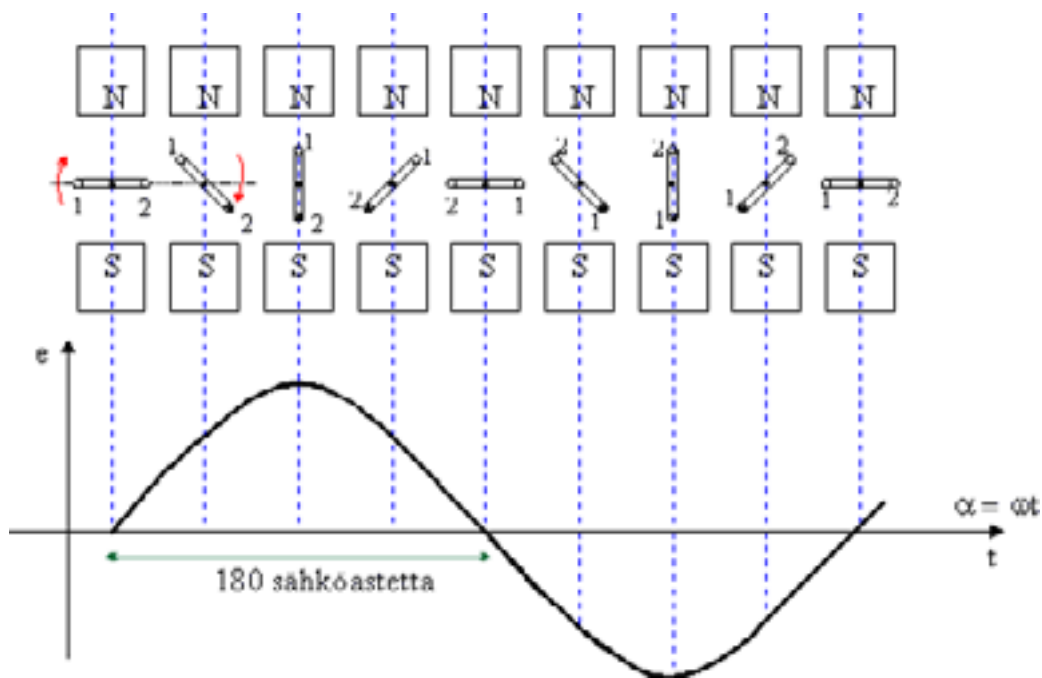
10.4.2 Kommutointi

Aikaisemmin mainittiin, että roottoriin muodostuva smv on vaihtosähköä, joka tasasuunnataan kommutaattorilla. Selvyyden vuoksi tarkastellaan kuvien 10.26 ja 10.27 tapausta. Siinä voimakone pyörittää yhtä johdinsilmukkaa homogeenisessa magneettikentässä. Tällöin johdinsilmukkaan indusoituu kuvan 10.27 mukainen sinimuotoinen jännite, jonka suuruus voidaan laskea kaavalla

$$(10.19) \quad E = 2BLv_x = \omega BdL \sin \omega t$$



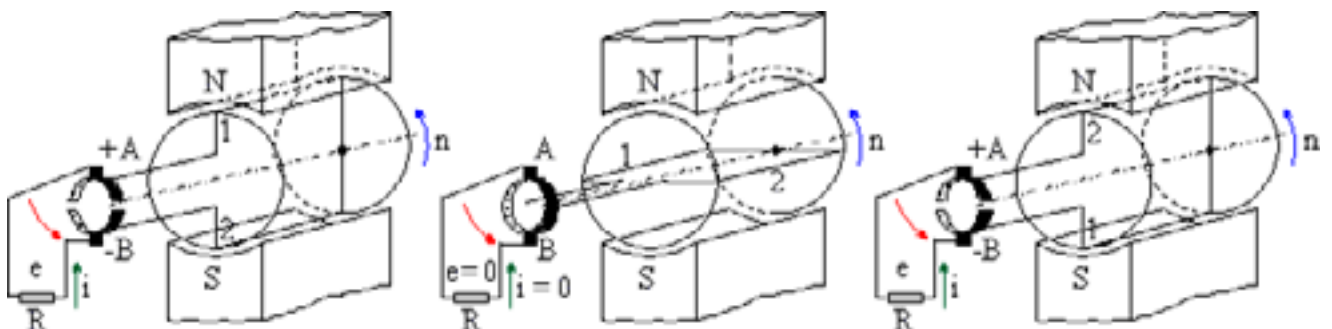
Kuva 10.26 Vaihtojännitteen indusoituminen ankkurin silmukkaan. /1/



Kuva 10.27 Jännitteen hetkellisarvo. /1/

Tämä vaihtojännite E on tasasuunnattava kommutaattorilla. Kommutaattorissa liukurengas on jaettu lamelleiksi, joihin silmukoiden päät on yhdistetty. Kuvissa 10.28 on esitetty kommutoinnin periaate. Nähdään, että harjojen välinen jännite tulee tasasuunnattua, koska harja A on aina yhdistetty sauvaan, joka liikkuu N-navan alla ja harja B sauvaan, joka liikkuu S-navan alla. Kun ankkuriin sijoitetaan useampia silmukoita, saadaan jännitteen sykkeisyys pieneksi.

Kun moottori on kytketty verkkoon, muodostuu sen virrallisen roottorin ja magnetointinapojen välille voimia. Kommutaattorilla saadaan aikaan se, että kaikissa N-navan alla olevissa johtimissa kulkee virta samaan suuntaan ja vastaavasti samoin S-navan alla olevissa johtimissa. Näin kaikki voimat vaikuttavat samaan suuntaan.



Kuva 10.28 Kommutaattorin ja kommutoinnin periaate. /1/

10.4.3 Tasasähkökoneen sähkömotorinen jännite

Kun tasavirtakoneen roottoria pyöritetään magneettikentässä, syntyy siihen sähkömotorinen jännite (smj), jonka suuruus E on

$$(10.20) \quad E = \frac{p}{a} s \frac{n}{60} \phi$$

missä

E on sähkömotorinen jännite

n on pyörimisnopeus

s on ankkurisauvojen lukumäärä

ϕ on yhden navan magneettivuo

a on ankkurikäänin rinnakkaishaaraparien lukumäärä

p on napaparien lukumäärä

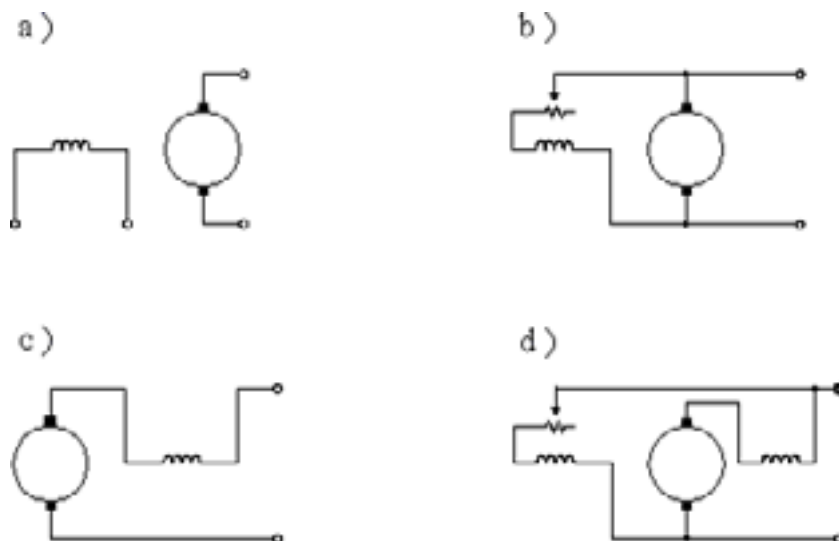
$$k = \frac{ps}{a60}$$

Jos yhtälöön (10.20) sijoitetaan k , saadaan

$$(10.21) \quad E = kn\phi$$

eli sähkömotorinen jännite riippuu vain pyörimisnopeudesta, vuosta ja konekohtaisesta vakioista.

Magnetointikäimityksen tarvitsema tasavirta voidaan ottaa joko koneen navoista (itsemagnetointi) tai ulkoisesta tasavirtalähteestä (vierasmagnetointi). Itsemagnetoivan koneen magnetointikäimityksen kytkennän perusteella koneet jaetaan sivu-, sarjavirta- ja komppoundikoneisiin. Kuvassa 10.29 on esitetty eri koneiden käämien kytkentäperiaatteet.



Kuva 10.29 a) vierasmagnetointi, b) sivuvirta-, c) sarjavirta-, d) komppoundikone.

10.4.4 Ankkurireaktio

Kun tasavirtamoottoria tai -generaattoria kuormitetaan, sen roottorikäymyksessä kulkee roottorivirta I_a , joka muodostaa koneeseen päänapojen pääkentälle ϕ poikittaisen magneettikentän ϕ_a , jonka suuruus riippuu ankkurivirrasta I_a . Ankkurikentän vaikutusta päänapojen muodostamaan pääkenttään kutsutaan ankkurireaktioksi. Ankkurivirta vahvistaa magnetointikäymyksen synnyttämää pääkenttää magnetointinavan toisella reunalla ja heikentää sitä toisella reunalla. Tästä syystä koneen päävuo pienenee, mikä pienentää koneen sähkömotorista voimaa. Ankkurikentän vaikutuksia pääkenttään voidaan pienentää päänapojen uriin sijoitetulla kompensatiokäymyksellä. Kompensatiokäymitys magnetoi vastakkaiseen suuntaan kuin ankkurikäymitys ja kumoaa näin ankkurikentän päänapojen kohdalla.

Ankkurireaktiolla on toinenkin haitallinen vaikutus. Kommutaattorin harjat ovat napojen puolivälissä, jossa koneen ollessa tyhjäkäynnissä (ankkurivirta on pieni) on magneettivuon tiheys nolla. Kuormitettuna ankkurivirta luo ankkurikentän, jonka seurauksena rezultoivan magneettikentän nollassa siirtyy. Tällöin kommutoiva vyyhti on magneettikentässä, jonka seurauksena siihen indusoituu jännite. Tämä jännite pyrkii estämään virran muutoksen, josta on seurauksena kommutaattorin kipinäintiä. Tämä kipinäinti kuluttaa kommutaattoria ja liukuharjoja.

Ankkurikentän kumoamiseksi päänapojen väliin sijoitetaan kääntönavat, jotka ovat ankkuripiirin kanssa sarjassa, jolloin niissä kulkee sama virta. Kääntönapojen käämikierrokset valitaan sopivasti siten, että niiden muodostama mmv kumoaa ankkurikentän kääntönavan kohdalla.

10.4.5 Tasavirtamoottori

Sivuvirtamoottori

Sivuvirtamoottori voi olla joko erillismagnetoitu tai itsemagnetoitu. Erillismagnetoidussa moottorissa magnetointivirta syötetään erillisestä tasavirtalähteestä eikä se ole sähköisesti yhteydessä työvirtapiirin kanssa. Itsemagnetoidussa moottorissa magnetointivirta saadaan moottorin liittimistä. Sivuvirtamoottorissa magnetointikäymitys on kytketty rinnan roottorikäymityksen kanssa.

Moottorin pyöriessä magneettikentässä indusoituu sen roottoriin smv E , joka on virralle vastakkaisuuntainen. Napajännitteen U , ankkurivirran I_a ja ankkuripiirin kokonaisresistanssin R_a välille voidaan kirjoittaa yhtälö

$$(10.22) \quad U = E + I_a R_a$$

Itsemagnetoidun sivuvirtamoottorin verkosta ottama kokonaisvirta on $I = I_m + I_a$. Yhtälöstä 10.22 voidaan ratkaista koneen verkosta ottama kuormitusvirta:

$$(10.23) \quad I_a = \frac{U - E}{R_a} = \frac{U - kn\phi}{R_a}$$

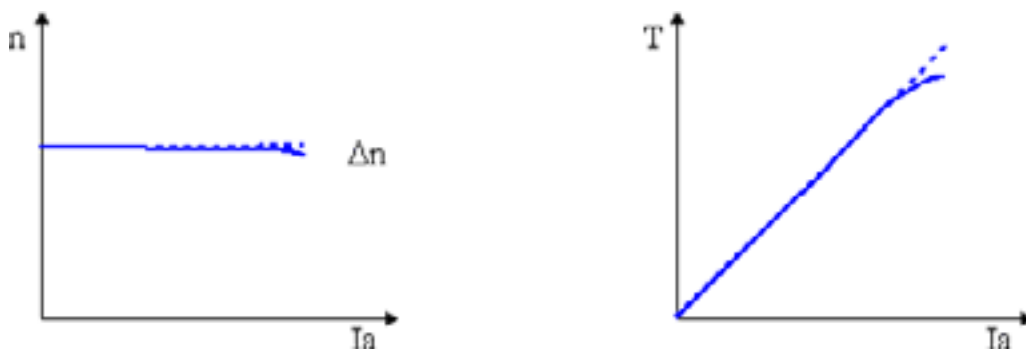
Yhtälöstä voidaan todeta, että moottorin ottama virta riippuu pyörimisnopeudesta. Koneen magnetointivirta riippuu magnetointijännitteestä ja vastuksesta. Magnetointia voidaan siten säätää magnetointipiiriin kytkettävällä erillisellä säätövastuksella.

Käynnistettäessä moottoria n on nolla, jolloin myös vastasähkömotorinen voima on nolla. Tästä huomataan, että käynnistettäessä moottorin ottama virta on erittäin suuri, sillä ankkuripiirin resistanssi on hyvin pieni, yleensä alle 1Ω häviöiden minimoimiseksi. Tästä syystä tasavirtamoottoria ei voi kytkeä suoraan täyteen jännitteeseen. Käynnistyksessä käytetään esimerkiksi käynnistysvastusta, jota pienennetään pyörimisnopeuden kasvaessa.

Koneen pyörimisnopeudelle voidaan johtaa matemaattinen esitys, kun yhtälöstä 10.23 ratkaistaan pyörimisnopeus n

$$(10.24) \quad n = \frac{U - I_a R_a}{k\phi}$$

Moottorin magnetointivirta $I_m = U_m / R_m$ on lähes kuormituksesta riippumaton, jolloin myös vuo on lähes vakio. Koneen napajännite pienenee vain tulon $I_a R_a$ verran, joka täydellään kuormalla on suhteellisen pieni. Täten sarjamoottorin pyörimisnopeus laskee vain hitaasti kuormituksen kasvaessa. Lasku on niin pieni, että käytännössä voidaan sanoa, että nopeus on kuormituksesta riippumaton. Tätä on havainnollistettu kuvassa 10.30a. Koska useat käytöt vaativat vakionopeutta kuormituksesta riippumatta, on sivuvirtamoottori saavuttanut laajemman käytön kuin mikään muu tasavirtamoottori.



Kuva 10.30 a) Sivuvirtamoottorin pyörimisnopeus kuormituksen funktiona, b) momentin riippuvuus roottorivirrasta.

Roottorikäänityksen ja magneettikentän välinen voimavaikutus antaa moottorille vääntömomentin T , jonka suuruus on

$$(10.25) \quad T = c I_a \phi$$

missä

c on konekohtainen vakio

I_a on ankkurivirta

Moottorin akselilta saatava todellinen momentti on todellisuudessa hieman pienempi mm. ankkurireaktion ja tuuletushäviöiden vuoksi.

Koska sivuvirtamoottorin vuo on lähes riippumaton kuormituksesta, kasvaa moottorin momentti teoriassa suoraan verrannollisesti roottorivirtaan nähden, kuten katkoviivalla on merkitty kuvaan 10.30b. Todellisuudessa vuo ja siten momentti pienenevät hieman ankkurireaktion vaikutuksesta.

Sivuvirtamoottorin pyörimisnopeutta voidaan säätää vaikuttamalla moottorin napajännitteeseen U , jännitehäviöön $I_a R_a$ tai magneettivuohon ϕ . Napajännitettä on helppo muuttaa, jos moottoria syötetään tasasuuntaajalla vaihtosähköverkosta. Jännitehäviöön voidaan vaikuttaa kytkemällä roottoripiirin kanssa sarjaan ylimääräinen vastus. Tämä tapa kuitenkin aiheuttaa suuret häviöt. Vuohon voidaan vaikuttaa, jos magnetointipiiriin on kytketty säätövastus.

Moottorin pyörimissuunnan vaihto voidaan toteuttaa muuttamalla virran suuntaa joko magnetointi- tai roottorikäymyksessä. Jos molempia muutetaan, pysyvät voimien suunnat muuttumattomina ja moottori pyörii samaan suuntaan.

Sarjamoottori

Sarjamoottorissa magnetointikäämi on roottorikäämin kanssa sarjassa, jolloin myös koko kuormitusvirta menee sen läpi. Tästä syystä sarjamoottorin magnetointikäämitys tehdään paksummasta johtimesta kuin sivuvirtamoottorissa. Sarjamoottorin magnetointikäämityksissä on yleensä myös vähemmän kierroksia. Kuormituksen kasvaessa kasvaa myös ϕ . Sarjamoottorin verkosta ottama kokonaisvirta on $I = I_m = I_a$. Moottorin sijaiskytkennälle voidaan johtaa matemaattinen esitys

$$(10.26) \quad U = E + I(R_a + R_m)$$

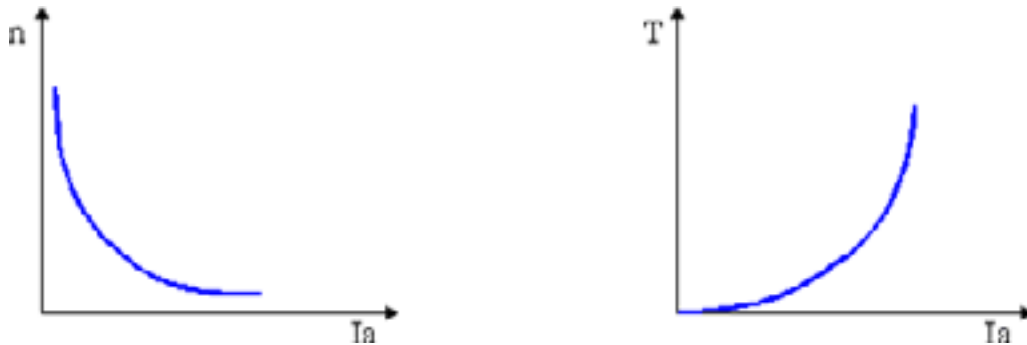
Sarjamoottorin pyörimisnopeudelle voidaan johtaa samalla periaatteella yhtälö kuin sivuvirtamoottorillekin

$$(10.27) \quad n = \frac{U - I_a(R_a + R_m)}{k\phi}$$

Yhtälössä 10.27 sekä osoittaja että nimittäjä riippuvat voimakkaasti I_a :sta, josta seuraa, että pyörimisnopeus on suuresti riippuvainen kuormitusvirrasta. Pienellä kuormalla (tyhjäkäynti) vuo ja roottorivirta ovat hyvin pieniä, mistä seuraa pyörimisnopeuden voimakas kasvu, eli moottori ns. ryntää. Tätä moottorin pyörivät osat eivät kestä.

Sarjamoottoria ei siksi saa koskaan päästää tyhjäkäyntiin. Moottorin käynnistäminen tapahtuu kuten sivuvirtamoottorillakin, eli sitä ei saa kytkeä suoraan täyteen jännitteeseen.

Myös sarjamoottorille pätee vääntömomentin yhtälö 10.25. Koska sarjamoottorilla ϕ riippuu I_a :sta, riippuu momentti kuormituksesta erittäin voimakkaasti. Kuvassa 10.31 on esitetty sarjamoottorin pyörimisnopeuden ja momentin riippuvuudet kuormitusvirrasta.



Kuva 10.31 Sarjamoottorin a) pyörimisnopeuden ja b) momentin riippuvuus kuormitusvirrasta

Sarjamoottorin pyörimisnopeutta voidaan säätää ankkurin kanssa piiriin kytketyllä säätövastuksella, jolloin haittana on vastuksessa syntyvät ylimääräiset häviöt.

Sarjamoottorin ominaisuuksien vuoksi koneen verkosta ottama teho vaihtelee vähemmän kuin momentin vaihtelu. Tästä syystä moottori sopii käyttämään vaihtelevia kuormia, mikäli ne eivät vaadi vakionopeutta ja mikäli kone ei joudu käymään tyhjänä. Tähän perustuu sarjamoottorin laaja käyttö raskaissa liikennesovelluksissa. Sen sopivuutta lisää vielä, että moottorilla on suuri lähtömomentti, koska momentti kasvaa voimakkaasti ankkurivirran kasvaessa.

Muutettaessa moottorin pyörimissuuntaa on virran suuntaa muutettava joko ankkurissa tai magnetointikäämyksessä. Liitinjohtimien vaihtaminen ei vaikuta, sillä sekä ankkurivirta että vuo vaihtavat suuntaansa samalla.

Kompoundimoottori

Kompoundimoottorissa magnetointikäämitys on jaettu sekä sarja- että rinnakkaiskäämiin. Riippuen siitä, kumpi käämi on hallitseva, ovat moottorilla joko sivu- tai sarjavirtamoottorin ominaisuudet hallitsevia. Kone voi olla myötä- tai vastakompoundoitu riippuen siitä, miten käämien mmv:t vahvistavat tai heikentävät toisiaan. Ylesimmin käytetty compoundimoottori on vierasmagnetoitu myötäkompoundoitu moottori.

Vahvistavassa compoundoinnissa kuormituksen kasvaessa kasvaa myös ϕ . Kun pyörimisnopeus noudattaa yhtälöä 10.27 huomataan, että pyörimisnopeus pienenee kuorman kasvaessa, mutta vähemmän kuin sarjamoottorin tapauksessa.

Kompoundimoottori, jossa on vahvistava käämitys sopii korvaamaan sarjamoottorin käytöissä, joissa moottori joutuu pyörimään tyhjänä.

Heikentävässä käämityksessä ϕ pienenee kuorman kasvaessa. Riippuen heikentävän käämityksen voimakkuudesta pyörimisnopeus voi joko kasvaa, pysyä vakiona tai laskea.

10.4.6 Tasavirtageneraattorit

Koska tasavirtageneraattoreiden käyttö on nykyään kohtalaisen harvinaista, käsitellään niitä vain hyvin lyhyesti. Tasavirtamoottori voi kuitenkin toimia generaattorina silloin, kun jarruttavan tasavirtamoottorin jarrutusenergia halutaan syöttää takaisin verkkoon. Magnetointi- ja roottorikäymysten keskinäisen kytkennän perusteella generaattorit jaetaan vastaaviin ryhmiin kuin moottoritkin.

Vierasmagnetoidussa generaattorissa magnetointi tapahtuu nimensäkin mukaisesti erillisestä tasavirtalähteestä. Magneettiopiiri on ankkurista erillään ja magnetointia voidaan säätää mm. säätövastuksella. Koneen magnetointivirta riippuu magnetointijännitteestä ja vastuksesta.

Itsemagnetoidussa sivuvirtageneraattorissa tapahtuu magnetointi päänapojen sivuvirtakäämityksellä, joka kytketään ankkuripiirin kanssa rinnakkain. Magnetoimisjännitteenä toimii koneen oma liitinjännite ja magnetoimisvirtaa voidaan säätää vastuksella. Erillismagnetoidussa koneessa saadaan vuo heti kun magnetointi on kytketty päälle, mutta itsemagnetoitu kone on saatava heräämään.

Koneessa on edellisen käytön jäljiltä pieni remanenssivuo. Kun ankkuria pyöritetään tässä heikossa remanenssivuossa, syntyy ankkurikäymykseen pieni smj, joka alkaa syöttää magnetointivirtaa koneen magnetointipiiriin. Tämä virta vahvistaa edelleen kenttää ja kone kehittää edelleen isomman smv:n ja virran. Jos koneen tämä vuo vaikuttaa toiseen suuntaan kuin remanenssivuo, ei kone herää, eikä siten lähde pyörimään. Tällöin koneen magnetointikäymys on kytketty väärin päin tai koneessa ei ole remanenssivuota. Mikäli remanenssi on hävinnyt, on konetta magnetoitava erillisellä tasavirralla.

Sarjavirtageneraattorissa magnetointikäymi on ankkurikäymien kanssa sarjassa, jolloin myös koko kuormitusvirta menee sen läpi. Ominaisuuksiensa vuoksi sarjageneraattoria käytetään vain harvoissa tapauksissa.

LÄHTEET

/1/ Aura L., Tonteri A.; Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet.; WSOY 1996, 544 s.

/2/ Aura L., Tonteri A.; Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet.; WSOY 1994, 446 s.

/3/ Chapman S.; Electric Machinery Fundamentals.; McGraw-Hill Series in Electrical Engineering 1991, 716 s.

/4/ Match L., Morgan J.; Electromagnetic and Electromechanical Machines.; John Wiley & Sons 1987, 574 s.

/5/ Partanen J.; Sähkömoottorikäytöt.; luentomoniste TTKK 1994

/6/ Paavola M., Lehtinen P.; Sähkötekniikan oppikirja.; WSOY 1982, 427 s.

/7/ Toim. Pöyhönen O.; Sähkötekniikan käsikirja 1.; Tammi 1975, 673 s.

/8/ Nousiainen K.; Sähköenergiatekniikka; luentomoniste TTKK 1994

Seuraava luku...