

Eero Räisänen

SUURITEHOISET TAHTIKONEET JA NIIDEN MERKITYS SIIRTOVERKOSSA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: TkL Juhani Bastman
Huhtikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Eero Räisänen: Suuritehoiset tahtikoneet ja niiden merkitys siirtoverkossa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan TkK-tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2021

Tahtikoneet ovat pyöriviä sähkökoneita, joiden toiminta perustuu sähkövirroilla synnytettyihin magneettikenttiin sekä sähkömagneettiseen induktioon. Tahtikoneiden roottorit pyörivät aina sähkövirran taajuuden määräämällä vakionopeudella, toisin kuin epätahtikoneiden roottorit. Tahtikone voi toimia sekä tahtigeneraattorina että tahtimoottorina.

Tässä työssä tarkastellaan suuremman teholuokan tahtikoneiden toimintaa sekä niiden merkitystä siirtoverkoissa. Työn tarkoituksena on perehtyä tahtikoneiden toimintamekanismeihin, sähköverkkosovelluksiin sekä tahtikoneiden tapoihin tukea siirtoverkkojen toimintaa. Työn lopussa käsitellään tahtikoneiden tulevaisuutta sähköverkossa.

Tahtigeneraattorit ovat yleisin generaattorityyppi sähkön tuotannossa, joita käytetään vesivoimalla, hiilivoimalla, öljyllä, kaasulla, ydinvoimalla ja joissain tapauksissa tuulivoimalla tuotetun sähköenergian tuottamiseen. Tahtimoottoreita käytetään puolestaan epätahtimoottoreita paremman hyötysuhteensa vuoksi suuren tehontarpeen sovelluksissa, esimerkiksi metalliteollisuuden valssaimina. Jos tahtikoneen roottorissa on kestopagneetin sijaan magnetointivirran avulla, voidaan koneen tuottaman pätötehon ja loistehon suhdetta säätää magnetointivirran avulla. Tätä ominaisuutta voidaan hyödyntää loistehoreservinä: suurten tahtikoneiden haltijoita veloitetaan Suomessa pitämään koneiden loistehon anto- ja ottokapasiteettia valmiudessa, jotta niillä voidaan häiriötilanteissa kompensoida verkossa esiintyvää loistehoa ja tukea verkon jännitettä.

Toinen tahtikoneiden siirtoverkkojen kannalta hyödyllinen ominaisuus on sähköverkon inertian ylläpitäminen. Tahtikoneen pyörivään massaansa varastoitunut energia auttaa sähköverkkoa vastustamaan muutoksia verkon taajuudessa. Mitä enemmän verkossa on tahtikoneita, sitä suurempi on verkon inertia ja sitä paremmin sähköverkko kykenee vastustamaan nopeiden kuormitusmuutosten aiheuttamia taajuuden heilahteluita. Tahtigeneraattoreita voidaan tietyin edellytyksin käyttää tahtikompensaattoreina, jolloin ne ylläpitävät sähköverkon inertiaa, vaikka ne eivät tuottaisi sähköenergiaa verkkoon.

Suuritehoisten tahtikoneiden merkitys siirtoverkkoihin kytkettyinä on sähkön tuottamisen ja mekaanisen työn tekemisen lisäksi verkon vakaan toiminnan ylläpitäminen loistehoreservitoiminnan sekä verkon kineettisen energian kasvattamisen avulla. Tulevaisuudessa tahtikoneiden käyttö inertian ylläpitomielessä tulee korostumaan, koska inertiaa kasvattamattomat tuotantomuodot kuten aurinkovoima ja tuulivoima tulevat yleistymään merkittävästi.

Avainsanat: Tahtikone, siirtoverkko, generaattori, sähköverkon inertia, loistehoreservi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. TAHTIKONEIDEN TOIMINTA	2
2.1 Sähkötekniikan peruskäsitteitä	2
2.1.1 Tehosuureet ja tehokerroin	2
2.1.2 Magneettikentät	3
2.2 Tahtikoneet	4
2.2.1 Yleinen rakenne	4
2.2.2 Toimintaperiaate sähkögeneraattorina ja -moottorina	6
2.2.3 Magnetointimenetelmät	8
2.2.4 Tehokertoimen hallinta	9
2.2.5 Tahtikoneen käynnistys verkkoon	11
3. SUURITEHOISTEN TAHTIKONEIDEN HYÖDYNTÄMINEN	13
3.1 Siirtoverkoista	13
3.2 Käytännön tahtikonesovelluksista	14
3.3 Tahtikoneiden merkitys siirtoverkon inertialle	16
3.3.1 Sähköverkon inertia	16
3.3.2 Tahtikompensaattori	18
3.4 Loistehoreservikäyttö	19
4. TAHTIKONEIDEN TULEVAISUUS VERKOSSA	23
5. YHTEENVETO	28
LÄHTEET	29

MERKINNÄT JA LYHENTEET

δ	Tehokulma
Φ_m	Yhden magneettinavan päävuo
φ	Vaiheensiirtokulma
ω_n	Generaattorin nimellinen mekaaninen kulmataajuus
E	Sisäinen jännite
E_{mv}	Päälähdejännite
f	Taajuus
f_n	Järjestelmän nimellinen taajuus
H	Inertiavakio
I	Virran tehollisarvo
J	Hitausmomentti
k_w	Käämityskerroin
N	Vaihekäämin sarjaan kytkettyjen johdinkierrosten määrä
n	Tahtikoneen pyörimisnopeus
P	Päätötehon itseisarvo
P_e	Generaattorin sähköinen teho
P_m	Generaattorin mekaaninen teho
p	Napaluku
Q	Loistehon itseisarvo
S	Näennäistehon itseisarvo
S_n	Generaattorin nimellinen näennäisteho
U	Pääjännitteen tehollisarvo
U_v	Verkon jännite
X_s	Tahtireaktanssi
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity, eurooppalainen kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestö
ERCOT	Electric Reliability Council of Texas, Yhdysvaltain Texasin osavaltion sähköverkon operaattori
HVDC	High-Voltage Direct Current, suurjännitetasavirta
VJV	Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset

1. JOHDANTO

Modernin yhteiskunnan toiminnan ylläpitämiseen tarvitaan jatkuvasti sähköenergiaa, jota tuotetaan erilaisissa voimalaitoksissa. Lähes kaikille näille voimalaitoksille yhteinen piirre on tahtikoneiden käyttö. Tahtikoneet ovat ylivoimaisesti yleisimpiä sähkögeneraattoreita ja niitä käytetään myös mm. raskaan teollisuuden sähkömoottoreina [1], joten keksintönä tahtikonetta voidaan pitää hyvin merkittävänä.

Tahtikoneiden kehitys sai muiden pyörivien sähkökoneiden kanssa ensimmäisiä edellytyksiään vuonna 1820, kun tanskalainen Hans Christian Ørsted havaitsi ensimmäisenä sähkövirtojen synnyttämän magneettikentän. Vuonna 1831 brittiläinen Michael Faraday löysi Ørstedin löydölle vastakkaisen ilmiön, sähkömagneettisen induktion, kun hän havaitsi muuttuvan magneettikentän synnyttämän sähkövirran. Nämä löydöt sähkömagneetiikassa loivat pohjan pyörivien sähkökoneiden kehitykselle. Ensimmäiset merkittävät sähkömoottorit ja generaattorit keksittiin toisistaan riippumattomasti 1830-luvulla, mutta vuonna 1833 julkaistussa artikkelissa todettiin, että sähkömoottori voi mahdollisesti toimia myös generaattorina ja generaattori moottorina. 1880-luvun lopulla keksittiin kolmi-vaiheinen sähköjärjestelmä, joka muodosti perustan modernille sähkönsiirrolle ja suuritehoisten sähkökoneiden toiminnalle. [2]

Tahtikoneilla pystytään tuottamaan sähköä ja mekaanista työtä, mutta niillä on myös sähköverkkojen kannalta hyödyllisiä ominaisuuksia. Tässä työssä tarkastellaan suuritehoisten tahtikoneiden toimintaa sekä niiden merkitystä siirtoverkoissa. Suuritehoisella tahtikoneella tarkoitetaan tässä työssä niitä tahtikoneita, jotka ovat sähköverkon näkökulmasta sen verran merkittäviä, että ne on kytketty verkkoon siirtoverkkotasolla ja niiden teho on karkeasti megawattien suuruusluokkaa. Työssä ei käsitellä tasavirtakoneita, re-luktanssikoneita tai sähkön pientuotantoon osallistuvia tahtikoneita. Myös sähkökoneisiin liittyvä tehoelektroniikka sekä jäähdytysratkaisut rajataan aiheen ulkopuolelle.

Aluksi työssä perehdytään tahtikoneiden teoreettiseen toimintaan sekä rakenteeseen luvussa kaksi, jonka jälkeen kolmannessa luvussa tarkastellaan tahtikoneiden sekä niiden ominaisuuksien hyödyntämistapoja siirtoverkkoihin kytkettyinä. Lopuksi neljännessä luvussa käsitellään tahtikoneiden tulevaisuudennäkymiä sähköverkkojen toiminnassa.

2. TAHTIKONEIDEN TOIMINTA

2.1 Sähkötekniikan peruskäsitteitä

Tahtikoneiden toiminnan hahmottamisen kannalta on oleellista ymmärtää tiettyjä sähkötekniikan peruskäsitteitä. Erilaisia sähköisiä tehosuureita käytetään paljon tahtikoneiden toiminnan kuvaamiseksi ja niiden käyttö korostuu myös tahtikoneiden sovelluksissa. Myös sähkömagneettisilla ilmiöillä on iso rooli tahtikoneiden toiminnassa.

2.1.1 Tehosuureet ja tehokerroin

Vaihtosähköpiireissä esiintyy keskeisesti kolme erilaista tehokäsitettä: näennäisteho, pätöteho sekä loisteho. Kolmivaiheisessa vaihtovirtapiirissä näennäistehon itseisarvo S määritellään pääjännitteen tehollisarvon U ja virran tehollisarvon I avulla seuraavasti:

$$S = \sqrt{3}UI = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (1)$$

Näennäisteho sisältää sekä pätötehon että loistehon, joista pätötehon itseisarvo P määritellään seuraavasti:

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi, \quad (2)$$

missä φ on virran ja jännitteen välinen vaiheensiirtokulma. Loistehon itseisarvo Q puolestaan määritellään seuraavasti:

$$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi. \quad (3)$$

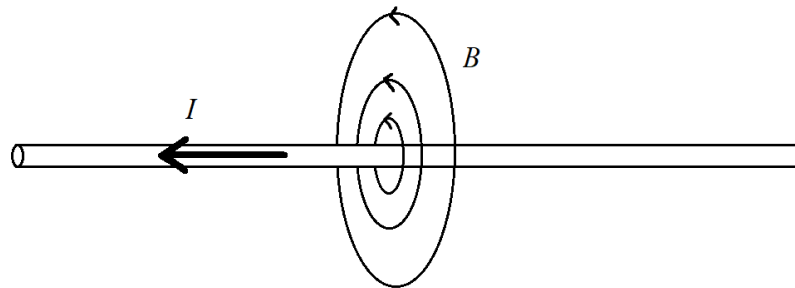
Pätöteho on se osa vaihtosähkötehosta, joka siirtyy pysyvästi tehoa kuluttavaan osaan virtapiirissä, eli se osa, joka tekee työtä kulutuskohteessa. Loisteho on sähkölähteen ja sähkötehoa kuluttavan osan välillä edestakaisin sykkivää tehoa, joka ei puolestaan tee työtä kulutuskohteessa. [3] Loisteho voi olla joko positiivista tai negatiivista. Vastakkaismerkkisiä loistehoja voidaan käyttää toistensa kumoamiseen, esimerkiksi positiivisen loistehon voi kumota negatiivisella loisteholla ja toisinpäin. Positiivista loistehoa kutsutaan induktiiviseksi loistehoksi, ja negatiivista loistehoa kutsutaan kapasitiiviseksi loistehoksi. Näennäistehon yksikkö on voltiampeeri (VA), pätötehon yksikkö on watti (W), ja loistehon yksikkö on vari (var).

Käytännön sähköjärjestelmät, kuten sähköverkot, ovat kolmivaiheisia. Kolmivaihejärjestelmissä puhutaan yleisemmin pääjännitteistä, eli kahden vaiheen välisistä jännitteistä, kuin vaihejännitteistä, joissa vaiheen potentiaalia verrataan maapotentiaaliin.

Yhtälössä 2 esiintyvä termi $\cos \varphi$ on nimeltään vaihtosähkön tehokerroin. [3] Tehokerroin on tärkeä termi vaihtovirtapiireissä, koska sen avulla voi helposti kuvata pätötehon ja loistehon välistä suhdetta. Tehokerroin voi saada arvoja nollan ja yhden välillä: mitä suurempi tehokerroimen arvo on, sitä suurempi osa systeemin näennäistehosta on pätötehoa, ja sitä pienempi osa loistehoa. Lähtökohtaisesti sähköjärjestelmissä, joissa halutaan siirtää sähkötehoa tehokkaasti, pyritään pitämään tehokerroin lähellä yhtä, jotta järjestelmässä ei siirretä turhaan loistehoa.

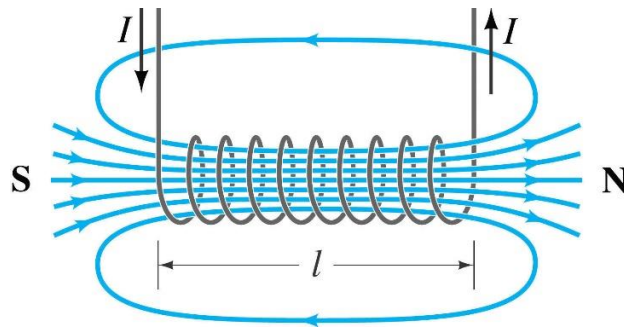
2.1.2 Magneettikentät

Virrallinen johdin tuottaa kuvan 1 mukaisen magneettikentän B ympärilleen johtimen jokaiseen osaan. Näin synnytetyn magneettikentän voimakkuutta ja suuntaa on helppo säätää sähkövirran I suuruudella ja suunnalla, mikä on hyödyllistä monissa sähkötekniikan sovelluksissa.



Kuva 1. Havainnollistava kuva suoraan virtajohtimeen syntyneestä magneettikentästä ja sen suunnasta. Perustuu lähteeseen [3].

Näin syntynyt magneettikenttä noudattaa niin kutsuttua oikean käden sääntöä, eli johtimen virran suunnan ollessa ihmisen oikean käden ojennetun peukalon suuntainen, osoittaa käden muut sormet nyrkissä johtimen magneettikentän suunnan. Magneettikentästä saadaan voimakkaampi ja kohdistetumpi, jos johdin kierretään käämiksi eli kelaksi kuvan 2 tapaan.



Kuva 2. Havainnollistava kuva kelaan syntyneen magneettikentän muodosta ja suunnasta. Kuvassa näkyy magneettikentän N- ja S-navat. [4]

Magneettikentän N-napa on se napa, jossa magneettivuo poistuu käämiin sisältä, ja S-navan kohdalla magneettivuo menee käämiin sisään. Kelan synnyttämä magneettikentän muoto muistuttaa kestopagneetin magneettikentän muotoa. Kela toimii siis käytännössä sähkömagneetin tavoin, kun sen läpi kulkee tasavirta. Kelan toinen hyödyllinen ominaisuus on se, että siihen indusoituu suurempi sähkövirta ulkoisen muuttuvan magneettikentän vaikutuksesta, kuin suoraan johtimeen. Tämä johtuu siitä, että kelarakenteessa tietyn pituinen johdin saadaan pakattua pienempään tilavuuteen.

2.2 Tahtikoneet

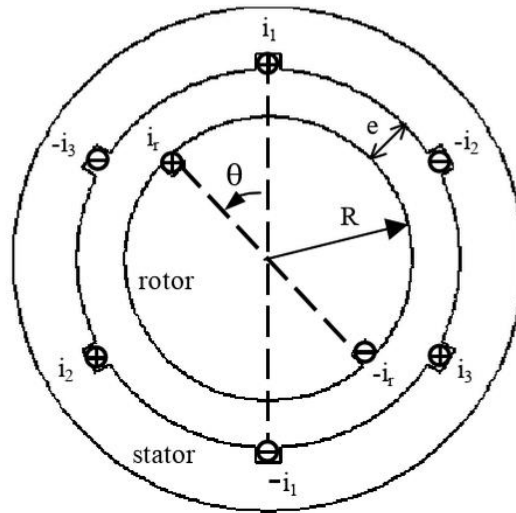
Tahtikone on vaihtosähkökone, joka koostuu staattorista sekä tahtinopeudella pyörivästä osasta eli roottorista. Tahtinopeus pysyy vakiona, kun tahtikoneen tuottaman tai ottaman sähköön taajuus on vakio. Tahtikone voi toimia tahtigeneraattorina, kun ulkoinen voima pyörittää roottoria, tai tahtimoottorina, kun staattorin käämityksiin syötetään kolmivaiheista vaihtosähkövirtaa. [3]

Yleisesti tahtikoneiden nopeus määräytyy staattorin synnyttämän pyörivän magneettikentän pyörimisnopeudesta, eli roottori pyörii aina samassa tahdissa magneettikentän kanssa. Moottorikäytössä tahtikone muuntaa sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi, kun taas generaattorikäytössä se muuntaa mekaanista pyörimisenergiaa sähköenergiaksi. [3]

2.2.1 Yleinen rakenne

Staattori sisältää kolmivaiheisen käämityksen, joka on aseteltu staattorin rungossa sijaitseviin uriin. Käämitys koostuu vyyhdeistä, eli yksinkertaisista johdinsilmukoista. Tahtikoneen rakenteesta riippuen staattoriurien määrä ja niihin asettuvien vyyhtien määrä sekä

asettelutapa vaihtelee. Yksinkertaisimmassa tahtikoneessa käämitys koostuu kolmen eri vaiheen vyyhdistä kuvan 3 tapaan.



Kuva 3. Yksinkertaisen tahtikoneen rakenne. Kuvan staattorissa näkyy kolme vyyhtiä, joiden vastakkaisissa päissä virta kulkee eri suuntaan silmukkarakenteen vuoksi. [5]

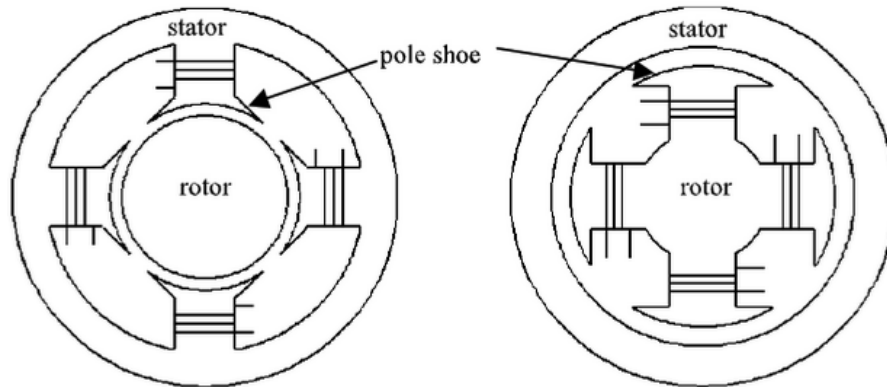
Tahtikoneen roottori sisältää magnetointikäämityksen, jolla tahtikone magnetoidaan. Roottoriin syötetään jatkuvaa tasavirtaa, joka synnyttää roottoriin nähden paikallaan pysyvän magneettivuon. Tätä magneettivuota nimitetään päävuoksi. [3]

Päävuo voidaan synnyttää vaihtoehtoisesti myös kestopagneetin avulla. Suurin osa generaattorikäytössä olevista tahtikoneista ja monet tahtimoottorit käyttävät kuitenkin magnetointikäämistä. Tehoelektronikkaohjattuja kestopagneettitahtikoneita käytetään joskus korkean suorituskyvyn sähkömoottoreina. [1]

Kuvan 3 mukaisen tahtikoneen roottorin synnyttämässä magneettikentässä on yksi N-napa ja yksi S-napa, jolloin sen napaluku on kaksi eli napapariluku $p = 1$. Staattori luo pyörivän magneettikentän, kun sen käämityksissä kulkee kolmivaiheinen vaihtovirta. Kuvan 3 mukaisen staattorin synnyttämän magneettikentän napapariluku on myös yksi. Napoja voi olla tahtikoneessa enemmänkin, mutta roottori ja staattori on rakennettava samalle napapariluvulle. [3]

Tahtikoneet voidaan jakaa rakenteensa puolesta umpinaparakenteisiin ja avonaparakenteisiin tahtikoneisiin. Kuvan 3 mukainen tahtikone on umpinapainen: sen roottori on umpinainen kokonaisuus, jossa magnetointikäämitys on sovitettu sulavasti roottorissa oleviin uriin. Umpinapaisen tahtikoneen ilmvälissä on rakenteensa vuoksi oletettavasti

jatkuvasti roottoriin nähden vakiona pysyvä vuontiheys. [5] Umpinapageneraattorin roottori on yleensä akselin suunnassa pitkä ja halkaisijaltaan pieni, mikä tekee siitä soveltuvan suuremmille pyörimisnopeuksille [3].

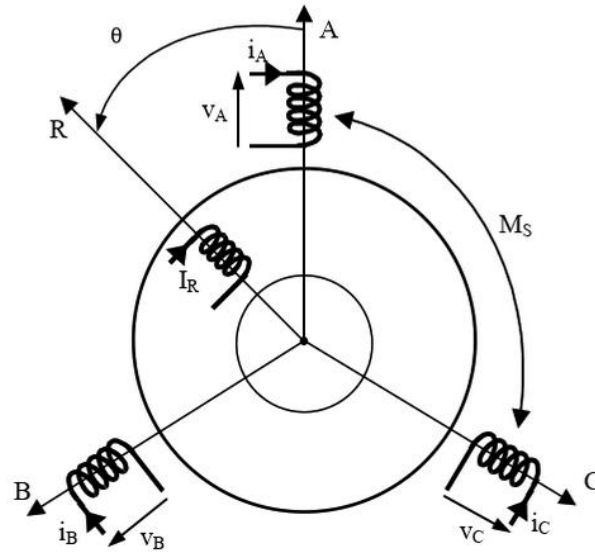


Kuva 4. Kaksi erilaista avonapakoneen rakennetta. Vasemmalla on avonapainen staattori, oikeanpuoleisella avonapainen roottori. [5]

Avonapaisen koneen rakenne on esitelty kuvassa 4. Siinä joko roottorilla tai staattorilla on ulkoneva osa, jonka ympärille käämitys on sijoitettu. Avonapaisen koneen rakenteen johdosta sen ilmavälin vuontiheys ei pysy vakiona. [5] Halkaisijaltaan suuria avonapakoneita käytetään hitaasti pyörivissä laitteistoissa. [3]

2.2.2 Toimintaperiaate sähkögeneraattorina ja -moottorina

Tahtigeneraattorissa staattorikäämitykseen halutaan synnyttää vaihtovirtaa roottorin synnyttämän päävuon avulla. Roottoria pyörittämällä saadaan myös päävuoto pyörimään, jolloin tahtikoneen sisälle saadaan aikaan jatkuvasti muuttuva magneettikenttä. Näin ollen staattorikäämityksen lävistävä magneettivuoto muuttuu jatkuvasti, jolloin käämitykseen indusoituu vaihtovirta. Jokaisen vaiheen käämitys kokee symmetrisen asettelunsa ansiosta muuttuvan magneettikentän huipun ja minimin eri aikaan, jolloin vaiheiden käämitykset tuottavat toisiinsa nähden eri vaiheessa olevaa sinimuotoista vaihtovirtaa. Kolmivaiheinen käämitys tuottaa näin kolmivaiheista vaihtovirtaa. Tällä tavalla staattorikäämiin indusoitunutta sähkömoottorista jännitettä nimitetään päälähdejännitteeksi. [3] Staattorikäämien symmetrinen asettelu korostuu kuvan 5 mukaisessa piirustustavassa, jossa tahtikone esitetään kelojen piirrosmerkkien avulla.



Kuva 5. Yksinkertainen esitystapa tahtikoneen rakenteelle käämien suhteen. Jokaisen vaiheen käämitys ja roottorin käämitys on esitetty omina kelakomponentteinaan. [5]

Päälähdejännitteen E_{mv} saadaan tehollisarvona seuraavasti:

$$E_{mv} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} k_w f N \Phi_m \approx 4,44 k_w f N \Phi_m, \quad (4)$$

Missä k_w on staattorikäädityksen rakenteesta riippuva käämityskerroin, f on taajuus, N staattorin vaihekäämin sarjaan kytketyt johdinkierrokset ja Φ_m yhden magneettinavan päävuuo, joka on sama kuin staattorivyyhden huippuvuo. [3]

Kun tahtigeneraattoria kuormitetaan, staattorin käämityksistä lähtevä kuormitusvirta synnyttää generaattoriin sisälle toisen pyörivän magneettivuon, ankkurivuon, joka indusoi paikoillaan pysyvään staattorin vaihekäämeihin oman lähdejännitteensä. Ankkurikenttä jarruttaa pääkentän pyörimistä, mistä johtuen enemmän kuormitettua tahtigeneraattoria on raskaampi pyörittää. Tätä ilmiötä nimitetään ankkurireaktioksi. [3]

Tahtigeneraattorin pyörimisnopeus n ja sen kehittämä sähkön taajuus f ovat yhteydessä toisiinsa seuraavan yhtälön osoittamalla tavalla:

$$n = \frac{60f}{p}. \quad (5)$$

Napapariluku p siis vaikuttaa generaattorikäytössä syntyneen sähkön taajuuteen [3] ja moottorikäytössä se vaikuttaa pyörimisnopeuteen. Yhtälö 5 antaa pyörimisnopeuden yksikössä r/min.

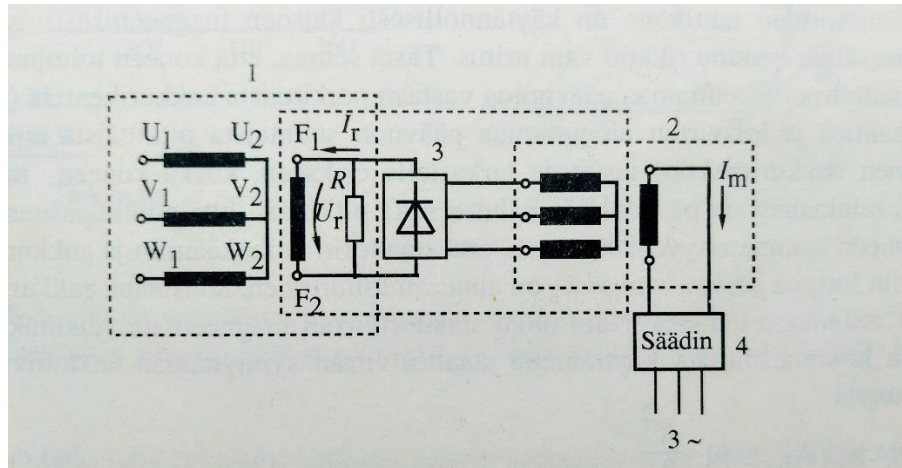
Moottorikäytössä staattorikäimitykseen syötetään kolmivaiheista vaihtovirtaa, jolloin tahtikoneen sisälle syntyy staattorista aiheutuva pyörivä magneettikenttä. Sähkömagneetin lailla käyttäytyvä roottori pyrkii asettumaan ulkoisen magneettikentän suuntaisesti, jolloin roottorin synnyttämän magneettikentän N-navat seuraavat staattorin magneettikentän N-napoja, ja roottorin S-navat seuraavat staattorin S-napoja. Tuloksena roottori pyörii pyörivän magneettivuon määräämällä tahtinopeudella.

Tahtikoneiden lisäksi suuren teholuokan sovelluksissa käytetään usein epätahtikoneita. Tahtikoneet eroavat konkreettisimmin epätahtikoneista siten, että epätahtikoneen roottorin täytyy pyöriä eri tahdissa (eli eri nopeudella) kuin staattorin synnyttämä magneettikenttä, jotta syntyy roottoria pyörittävä vääntömomentti. Lisäksi epätahtikoneissa, kuten oikosulkukoneissa ja liukurengaskoneissa, on erilainen roottorirakenne. Oikosulkukoneissa roottorina toimii oikosuljettu häkkikäimitys. Liukurengaskoneissa roottorissa on käämitys, jonka päät on tuotu liukurenkaiden avulla koneen ulkopuolelle. Tällöin voidaan esimerkiksi säätää roottorin resistanssia. [3]

2.2.3 Magnetointimenetelmät

Magnetointikäimityksen sisältävään tahtikoneeseen on synnyttävä tasavirralla päävuoto, jonka avulla voidaan indusoida päälähdejännite. Tämän vaaditun magnetoinnin voi toteuttaa erilaisilla tavoilla. Tahtikoneet voidaan jakaa magnetointimenetelmien perusteella harjallisiin ja harjattomiin tahtikoneisiin. [3]

Harjallisessa tahtikoneessa magnetoimisvirta tuodaan hiiliharjojen ja messingistä tai teräksestä tehtyjen liukurenkaiden avulla pyörivään roottorikäymiin. Itse magnetoimisvirta tuodaan ulkoisesta tasavirtalähteestä tai vaihtovirtalähteestä. Tasavirtalähteenä voidaan käyttää varsinaisen tahtikoneen kanssa samalle akselille asennettua magnetointigeneraattoria, tai täysin erillistä tasasähkölähdettä. Vaihtovirtalähteenä voidaan taas käyttää joko itse tahtikonetta, tai täysin erillisestä vaihtosähkölähteestä säätäjän kautta, joka säätää ja tasasuuntaa magnetoimisvirran sopivaan arvoon. [3]



Kuva 6. Kuva harjattoman tahtikoneen magnetointiperiaatteesta. 1. Varsinainen tahtikone eli pääkone. 2. Magnetointigeneraattori. 3. Diodisilta. 4. Säädin. [3]

Harjattomassa tahtikoneessa, jonka rakenne esitetään kuvassa 6, käytetään erillistä ulkonapaista vaihtovirtageneraattoria samalla akselilla varsinaisen tahtikoneen eli pääkoneen kanssa. Kyseinen ulkonapakone tuottaa pääkoneen tarvitseman magnetointivirran. Ulkonapakoneessa magneettinavat ovat staattorissa ja käämitys, johon lähdejännite indusoituu, on roottorissa. [3] Kun pääkoneen roottori pyörii, myös magnetointikoneena toimiva ulkonapakoneen roottori pyörii, jolloin ulkonapakoneen roottoriin indusoituu sähkövirta ulkonapakoneen staattorin synnyttämän magneettikentän avulla. Koska pääkoneen ja ulkonapakoneen roottorit ovat samalla akselilla, voidaan ulkonapakoneen roottoriin indusoitunut vaihtovirta tasasuunnata diodisillalla pääkoneen roottorin magnetointivirraksi.

Magnetoinnilla voidaan säätää pääkoneen päälähdejännitettä. Yhtälöstä 4 nähdään, että päälähdejännite on suoraan verrannollinen päävuon voimakkuuteen. Päävuon voimakkuuteen voidaan taas vaikuttaa magnetoimisvirralla. Tästä syystä magnetoimisvirtaa halutaan pystyä säätämään monissa tahtikonesovelluksissa, minkä vuoksi magnetointilaitteistoissa käytetään yleensä säätimiä. Kuvan 6 mukaisen säätimen avulla harjattomassa tahtikoneessa pääkoneen magnetoimisvirtaa voidaan säätää säätämällä magnetointigeneraattoriin menevää magnetointivirtaa [3].

2.2.4 Tehokerroimen hallinta

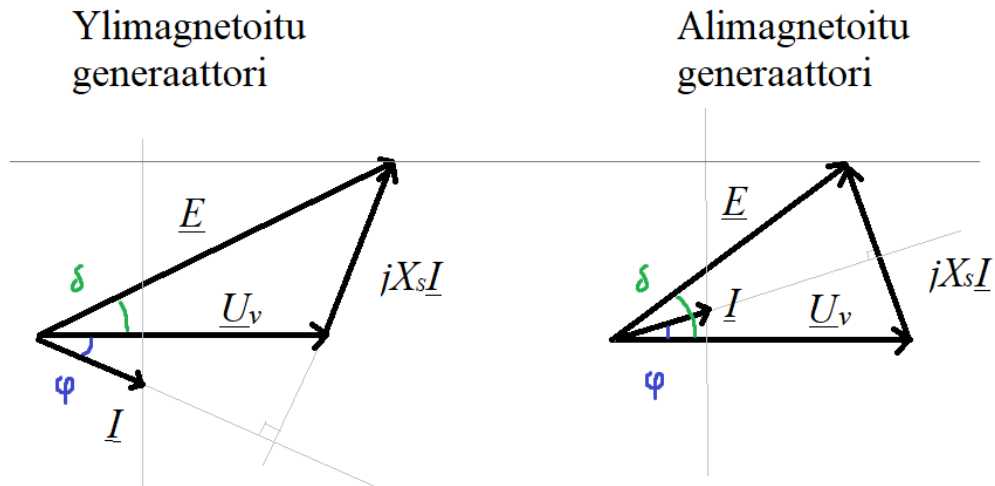
Magnetointikämmityksen sisältävien tahtikoneiden eräs hyödyllinen ominaisuus on, että niiden tehokerrointa voidaan säätää. Ne saadaan tarvittaessa tuottamaan esimerkiksi induktiivista loistehoa, jolla voidaan kumota sähköverkossa esiintyvää kapasitiivista loistehoa.

Sähköverkkoon liitetyn tahtikoneen pätöteho P voidaan esittää seuraavasti:

$$P \approx \frac{E U_v}{X_s} \sin \delta, \quad (6)$$

missä E on tahtikoneen sisäinen jännite, U_v tahtikoneeseen kytketyn sähköverkon jännite, jota kutsutaan nyt liitinjännitteeksi, δ edellä mainittujen jännitteiden välinen kulma eli tehokulma ja X_s tahtikoneen sisällä esiintyvä tahtireaktanssi. [6] Tarkastellaan nyt tilanteita, jossa tahtikone on liitetty verkkoon, jonka taajuus ja jännite U_v eivät muutu. Tahtireaktanssi X_s pysyy myös vakiona.

Tahtikoneen sisäiseen jännitteeseen E voidaan vaikuttaa kasvattamalla tai vähentämällä magnetointia. Kun jännite E on suurempi kuin tahtikoneeseen kytketyn sähköverkon jännite U_v , voidaan sanoa, että tahtikone on ylimagnetoitu. Kun jännite E on sähköverkon jännitettä pienempi, sanotaan että tahtikone on alimagnetoitu. [6]



Kuva 7. Osoitindiagrammit tahtigeneraattorista, jossa pätöteho on pidetty vakiona, mutta magnetointia on muuteltu. Perustuu lähteeseen [1].

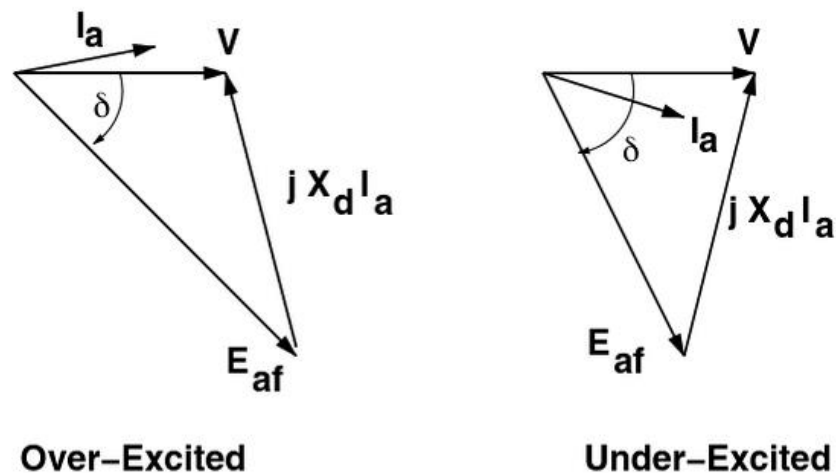
Kuvassa 7 on esitetty tahtigeneraattori yli- ja alimagnetoituna, kun pätöteho on pidetty vakiona. Kuvassa I on virta, φ on vaiheensiirtokulma ja loput suureet ovat samat kuin mitä yhtälössä 6.

Yhtälön 6 suureista U_v ja X_s pidetään muuttumattomina. Jotta magnetointia voidaan muuttaa pätötehon pysyessä vakiona, täytyy jännitteen E ja tehokulman δ muuttua siten, että tulo $E \sin \delta$ pysyy vakiona. Kuvan 7 mukaisessa osoitindiagrammissa se tarkoittaa

sitä, että jännitteen osoitin E seuraa suoraa vaakasuuntaista linjaa aina, kun magnetointia muutetaan pätötehon pysyessä vakiona. Magnetointi vaikuttaa silloin myös vektorin $jX_s I$ ja vektorin I kulmaan, eli myös vaiheensiirtokulmaan φ .

Vaiheensiirtokulmaa muutettaessa voidaan taas vaikuttaa tahtikoneen tehokertoimeen. Jos halutaan käytännössä muuttaa koneen tuottaman tai kuluttaman loistehon määrää, voidaan tämä saavuttaa kasvattamalla tai vähentämällä magnetointia. [1] Tahtigeneraattorin tapauksessa voidaan tuottaa induktiivista loistehoa alimagnetoidulla generaattorilla, ja kapasitiivista loistehoa ylimagnetoidulla generaattorilla. Induktiivinen loisteho on positiivista loistehoa, ja sitä voidaan tuottaa positiivisella vaiheensiirtokulmalla φ .

Tahtimoottorin osoitindiagrammi on hyvin samanlainen kuin tahtigeneraattorin, kuten kuvista 7 ja 8 voidaan huomata.



Kuva 8. Osoitindiagrammit yli- ja alimagnetoiduista tahtimoottoreista [1].

Kun vertaillaan kuvia 7 ja 8, voidaan huomata olennaisimpana erona, että tahtimoottorin jännite E on liitinjännitettä U_v (V kuvan 8 tapauksessa) jäljessä, eli tehokulma on negatiivinen, kun tahtigeneraattorilla tehokulma on positiivinen. [1] Tahtimoottoria käyttävä laitos voi tahtimoottorin avulla kompensoida laitoksessa syntynyttä loistehoa. [3]

2.2.5 Tahtikoneen käynnistys verkkoon

Tahtigeneraattori ja tahtimoottori liitetään osaksi sähköverkkoa eri tavalla. Tahtigeneraattorin tapauksessa toimenpidettä kutsutaan tahdistamiseksi. [3]

Generaattori tahdistetaan verkkoon tahdistuskatkaisijan avulla. Tahdistettava generaattori on katkaisijan toisella puolella ja jännitteellinen verkko toisella puolella. Ennen kuin

katkaisija voidaan sulkea, täytyy useita ehtoja ottaa huomioon. Katkaisijan molemmilla puolilla jännitteiden itseisarvojen on oltava lähes yhtä suuret, jolloin kytkentävirta on pieni. Perusedellytyksenä jännitteillä tulee olla myös samat taajuudet, ja lisäksi jännitteiden on oltava ajallisesti samassa vaiheessa. Generaattorilla täytyy olla sama vaihejärjestys kuin verkon muilla generaattoreilla, jotta sen tuottamat vaihejännitteet täyttävät edellä mainitut ehdot verkon vaihejännitteiden kanssa. Mikäli tahtikone tahdistetaan täydellisesti yllä mainittuja ehtoja noudattaen, ei tahtikone ota eikä anna sähköverkkoon virtaa käynnistyshetkellä. [3]

Tahtimoottoria ei tahdisteta verkkoon tahtigeneraattorin tavoin, vaan se käynnistetään verkkoon oikosulkumoottorina. Tätä varten tahtikoneen roottorissa täytyy olla myös oikosulkumoottorin roottorikäänitys. Kun epätahtikäynnillä saadaan roottori pyörimään lähes tahtinopeudella, voidaan tasavirta kytkeä napakäämiin, jolloin roottori vetäytyy tahtiin staattorin pyörivän magneettikentän kanssa. Moottorin käynnistysvirtaa voidaan tarvittaessa rajoittaa esimerkiksi tähtikolmio-, muuntaja- ja kuristinkäynnistyksillä. [3]

3. SUURITEHOISTEN TAHTIKONEIDEN HYÖDYNTÄMINEN

Tahtikoneita ja niiden ominaisuuksia hyödynnetään monilla tavoilla ja monenlaisissa paikoissa. Yleisimmin niitä hyödynnetään suoraan tai välillisesti laajempaan kolmivaiheiseen sähköjärjestelmään kytkettyinä, toimien osana sitä. Suomessa suuritehoiset tahtikoneet on liitetty verkkoon siirtoverkkotasolla, eli joko kantaverkkoon tai suurjännitteeseen jakeluverkkoon.

3.1 Siirtoverkoista

Suurjännitteiset jakeluverkot eli SJ-verkot ovat Suomessa jakeluverkkoyhtiöiden omistamia. Jakeluverkkoyhtiöiden operoimat jakeluverkot toimivat 0,4–110 kilovoltin jännitetasoilla ja tavalliset kotitaloudet ovat yhteydessä sähköverkkoon jakeluverkon kautta. SJ-verkot liittyvät kantaverkkoon ja siirtävät sähköä alueellisesti 110 kilovoltin johdoilla. [7]

Suomessa kantaverkon jännitetasoja ovat puolestaan 110, 220 ja 400 kilovoltia. Kantaverkko toimii sähkönsiirron runkoverkkona, johon suuret voimalaitokset, tehtaat, ja alueelliset jakeluverkot on liitetty. Suomen kantaverkon haltijana toimii Fingrid Oyj, jolle on myös määrätty järjestelmävastaavan tehtävä ja siihen sähkömarkkinalain mukaisesti kuuluvat vastuut. Järjestelmävastuu sisältää tasevastuun sekä vastuut sähköjärjestelmän teknisestä toimivuudesta ja käyttövarmuudesta. [7]

Fingrid on asettanut sille määrätyn järjestelmävastuun perusteella vaatimuksia Suomen sähköjärjestelmään liitettävälle voimalaitoksille, eli myös niihin kuuluville tahtikonelaitteistoille *Voimalaitosten järjestelmäteknisissä vaatimuksissa* (VJV) [8]. Kyseisessä dokumentissa on jaoteltu Suomen sähköjärjestelmään kytketyt, mitoitusteholtaan vähintään 0.8 kW suuruiset voimalaitokset tyypeihin A–D niiden liittymispisteen jännitetason ja voimalaitoksen mitoitustehon perusteella. Näistä suuritehoisimmat, tyypit C ja D, jotka käsittävät mitoitusteholtaan vähintään 10 MW voimalaitokset, ovat olennaisimpia tässä työssä, koska ne sisältävät todennäköisimmin megawattiluokan tahtikoneita. Dokumentin asettamat vaatimukset tahtikonevoimalaitosten osalta koskevat mm. tehon ja taajuuden säätötapoja, voimalaitoksen käynnistysaikaa sekä loistehokapasiteettia sähköverkon häiriötilanteiden korjaamiseksi ja ehkäisemiseksi. Vaatimusten lähtökohtana on eurooppalainen verkkosääntö (Euroopan komission asetus 2016/631), johon on tehty kansalliset täsmennykset ja lisäykset. [8]

Tyyppin B, C ja D-voimalaitoksille on Suomessa asetettu vaatimukset lähivikakestoisuudesta. Tahtikonevoimalaitos omakäyttöineen on suunniteltava siten, että se kestää verkosta irtoamatta ja tahtikäyttöään menettämättä lyhytaikaisen liittymispisteessä tapahtuvan jännitteen vaihtelun. Häiriön jälkeen voimalaitoksen tulee myös kyetä toimimaan jännitehäiriötä seuraavien, mahdollisten laitoskohtaisten tai järjestelmätaajuisten sähkömekaanisten heilahteluiden aiheuttamien lyhytaikaisten jännitevaihteluiden ajan irtoamatta verkosta. Lähivikavaatimus on voimassa symmetrisissä vioissa eli 3-vaiheisissa oikosuluissa, epäsymmetrisissä vioissa eli 2-vaiheisissa oikosuluissa ja maaosulosuissa sekä 1-vaiheisissa maasuluissa. [8] Oikosululla tarkoitetaan tilanteita, joissa kaksi tai kolme vaihejohtinta on keskenään kosketuksissa. Maasulussa vaihejohtin on kosketuksissa maan kanssa ja maaosulosuissa oikosulku ja maasulku tapahtuvat yhtä aikaa, esimerkiksi kaatuneen puun jäädessä nojaamaan useaan vaihejohtimeen.

Eri maissa voi olla erilaiset sähköverkkojärjestelmät ja niiden sähköverkkojen toimintaa voidaan hallita eri tavalla. Niihin kytkettyjen tahtikoneiden toiminta, mahdolliset sovelluskohteet ja merkitys siirtoverkossa ovat kuitenkin kaikkialla hyvin pitkälle samanlaisia.

3.2 Käytännön tahtikonesovelluksista

Käytännössä lähes kaikki voimalaitosten käyttämät generaattorit ovat tahtikoneita [1]. Höyry- ja kaasuturbiinigenaattorit ovat umpinapaisia tahtikoneita, koska niiden rakenne sallii suuret, maksimissaan jopa 3000 r/min pyörimisnopeudet. Umpinapakoneita käytetään myös ydinvoimaloissa, jotka ovat lämpövoimaosaltaan höyryvoimalaitoksen kaltaisia, joissa niitä käytetään noin 1500 r/min pyörimisnopeuksilla. Edellä mainitut pyörimisnopeudet pätevät, kun tuotetaan vaihtovirtaa 50 Hz:n taajuudella. [3] Kuvassa 9 on esimerkki käytössä olevasta höyryturbiinigenaattorista.



Kuva 9. Höryturbiinigeneraattori Schwarze Pumpe -voimalaitoksen turbiinihallissa [9]. Saksan Brandenburgin osavaltiossa sijaitseva Schwarze Pumpe toimii hiilivoimalla ja sillä on kaksi 800 MW yksikköä. [10]

Suomalaisissa vesivoimalaitoksissa tarvittavat pyörimisnopeudet ovat tehoihin nähden pienehköt (75–500 r/min taajuuden ollessa 50 Hz) ja tehon heilahteluiden vaimentamiseksi tarvitaan suuret hitausmomentit. Tästä syystä vesivoimalaitoksiin sopivat akselin suunnassa lyhyemmät, mutta halkaisijaltaan suuret avonapageneraattorit. [3]

Tahtigeneraattoreita käytetään myös osassa tuulivoimalaitoksista. Muuttuvanopeuksiset tuulivoimalat voivat sisältää joko tahti- tai epätahtigeneraattorin. Tahtigeneraattorin sisältävän tuulivoimalaitoksen ja sähköverkon välissä on taajuusmuuttaja, joka sallii tuulivoimalaitoksen generaattorin roottorin pyörimisen eri nopeuksilla. [11]

Tahtimoottoreita halutaan käyttää voimakoneena erityisesti silloin, kun koneiston tehon tarve on suuri ja moottoria syöttävä sähköverkko on riittävän vahvasti mitoitettu. Tahtimoottoreilla on epätahtimoottoreihin verrattuna parempi hyötysuhde [3], josta hyödytään erityisesti suuritehoisissa ja erityisen paljon sähköä kuluttavissa sovelluksissa. Muutoin epätahtimoottorit ovat suositumpia mm. niiden edullisuuden, yksinkertaisemman rakenteen, kestävyys ja vähäisen huoltotarpeen vuoksi [3]. Tyypillisesti tahtimoottoreita käytetään mm. kaasu-, öljy-, kemian-, metalli-, kaivos-, vesi-, sellu- ja paperiteollisuuden pumppuina, valssaimina, kaivosnostureina ja kompressoreina [12].

Suuritehoisia tahtimoottoreita käytetään muuallakin kuin sähköverkkoihin kytkettyinä, nimittäin risteilyaluksissa: esimerkiksi MSC Poesia (kuva 10) on varustettu kahdella tahtimoottorilla, joista molemmat tuottavat 18 megawatin tehon ja pyörivät noin 170 kierrosta minuutissa. [5]



Kuva 10. Risteilyalus MSC Poesia lähdössä Tallinnasta [13].

Tahtimoottoreiden käyttösovelluksissa hyötysuhde on taloudellisesti hyvin merkittävä tekijä. Pienikin parannus hyötysuhteessa voi tuoda isot rahalliset säästöt, sillä suurin osa tahtimoottoreiden kokonaiselinkaarikustannuksista muodostuu kulutetun sähkön hinnasta. Sähkökonevalmistaja ABB:n mukaan 0,25 %:n parannus 44 megawatin tahtimoottorin hyötysuhteessa tuottaa vuodessa 100 000 megawattitunnin säästöt, mikä vastaa 240 eurooppalaisen kodin vuosikulutusta. Rahallisesti tämä vastaa yli 400 000 euroa tahtimoottorin 20-vuotisen elinkaaren aikaisissa sähkökustannuksissa. [12] Tahtikoneiden hyötysuhde on vuosikymmenten saatossa kehitetty hyvin korkeaksi, parhaimmillaan jopa yli 99 prosenttiin. [12][14]

3.3 Tahtikoneiden merkitys siirtoverkon inertialle

Tahtikoneiden ensisijainen käyttötarkoitus on joko tuottaa sähköenergiaa generaattorina tai tehdä mekaanista työtä sähkömoottorina, mutta niitä käytetään samaan aikaan hyödyksi myös muillakin tavoilla. Sähköverkkoon kytketyt tahtikoneet ylläpitävät sähköverkon inertiaa, mikä auttaa sähköverkkoa säilyttämään vakautensa nopeiden kuormitusmuutosten aikana [15].

3.3.1 Sähköverkon inertia

Sähköjärjestelmän inertia on määritelty järjestelmän kykyä vastustaa taajuuden muutosta yksittäisten generaattorien pyöriin massoihin varastoituneen kineettisen energian tuottaman vastuksen avulla. Sähköverkon inertialla lievennetään sähköverkon kuormitusten muutosten vaikutusta verkon taajuuteen. [15]

Toisella tavalla ilmaistuna sähköverkossa samassa tahdissa pyörivät tahtikoneet toimivat vauhtipyörän tavoin, pyörimisenergiaa varastoiden, ja muutokset niitä pyörittävässä

voimassa tai pyörimistä vastustavassa voimassa eivät johda välittömään pyörimisnopeuden muutokseen. Tämä johtuu siitä, että niiden roottoreiden pyörivä massa pyrkii jatkaamaan samanlaista pyörimisliikettä kuin aikaisemmin, vastustaen pyörimisen muutosta. Jos kyseessä olisi tahtigeneraattori ja sen pyörimisnopeus muuttuisi, se vaikuttaisi generaattorin tuottamaan vaihtojännitteen taajuuteen yhtälön 5 mukaisesti, mikä aiheuttaisi taajuusongelmia sähköverkolle.

Yksittäisen generaattorin inertiaavakio H on määritelty seuraavasti:

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_n^2}{S_n}, \quad (7)$$

missä J on generaattorin ja turbiinin yhteinen hitausmomentti, ω_n generaattorin nimellinen mekaaninen kulmataajuus ja S_n generaattorin nimellinäennäisteho. Inertiaavakion yksikkö on sekunti, ja se voidaan tulkita ajaksi, jonka ajan generaattoriin varastoitunut pyörimisenergia pystyy ylläpitämään generaattorin nimellinäennäistehoa. Inertiaavakioiden avulla voidaan laskea sähköjärjestelmän pyörimisliikkeeseen varastoituneen kineettisen energian määrä kertomalla koko järjestelmän inertiaavakioiden summa koko järjestelmän yhteenlasketulla nimellisteholla. [15] Pohjoismaisen sähköverkon, johon kuuluu Suomen lisäksi Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan sähköverkot, kineettinen kokonaispyörimisenergia vaihtelee 125 ja 240 GWs välillä ja kuormitus vaihtelee 25 ja 70 gigawatin välillä. [15]

Sähköverkon taajuus pyrkii muuttumaan, kun tuotetun energian ja kulutetun energian määrät eivät ole yhtä suuret. Jos energiaa kulutetaan verkossa enemmän kuin tuotetaan, verkon taajuus pyrkii laskemaan, koska kaikki verkon yksittäiset tahtigeneraattorit kokevat ankkurireaktion kautta suuremman roottorin pyörimistä vastustavan momentin. Tuotetun ja kulutetun tehon erotus johtaa tahtikoneen sähköisen ja mekaanisen tehon erotukseen. Sähköverkon inertian ja edellä mainitun erotuksen välinen suhde voidaan ilmoittaa seuraavan yhtälön avulla:

$$H_i \frac{df_i}{dt} = \frac{f_n}{2S_{ni}f_i} (P_{mi} - P_{ei}), \quad (8)$$

missä f_i on generaattorin i taajuus, f_n on järjestelmän nimellistaajuus, P_{mi} on generaattorin i mekaaninen teho ja P_{ei} generaattorin i sähköinen teho. Tästä saadaan johdettua seuraava Laplace-tason yhtälö taajuuden muutoksen Δf sekä tehon tuotannon ja kulutuksen välisen epätasapainon ΔP välille:

$$\Delta f = \frac{f_n}{S_n(2H_{sys}s + kf_n)} \Delta P = G(s)\Delta P, \quad (9)$$

missä k on kuormitusten taajuusriippuvuus, H_{sys} on järjestelmän inertiaavakio ja s on Laplace-operaattori. [15]

Sähköverkkoon ei-synkronisesti kytketyt sähkökoneet, esimerkiksi nykyaikaiset tuulivoimalaitokset, on kytketty sähköverkkoon tehoelektroniikkamuuntimien kautta. Muuntimien takana olevien sähkökoneiden pyörimisnopeus on eristetty sähköverkon taajuudesta, joten ne eivät luonnostaan tuota inertiaavastetta eivätkä siten kasvata sähköverkon inertiaa. [15] On kuitenkin olemassa kehittyneempiä kytkentäteknologioita, joilla tuuli- ja aurinkovoima voisivat tuottaa keinotekoisista eli synteettistä inertiaa sähköverkkoon [15][16].

Synteettisellä inertiaavasteella tarkoitetaan tehoelektroniikan avulla jäljiteltä inertiaavastetta, jonka avulla voidaan keinotekoisesti saada ei-synkronisesti verkkoon kytketty generaattori edistämään sähköverkon inertiaa. Synteettisen inertian syöttöä ohjataan verkon taajuuden muutosnopeuden perusteella. Esimerkiksi ei-synkronisesti verkkoon kytketyn tuulivoimalaitoksen roottorin momenttia voidaan tehoelektroniikan avulla kasvattaa mitatun verkon taajuuden muutosnopeuden perusteella, jotta roottorin pyöriminen hidastuu ja sen kineettistä energiaa vapautuu tahdissa käyvän tahtikoneen tavoin. Myös suurjännitteisiä tasavirtayhteyksiä (HVDC) voidaan ohjata siten, että ne siirtävät inertiaavastetta yhdestä synkronisesta verkosta toiseen. [15] Synteettisen inertian teknologiat ovat kuitenkin vielä kehitysvaiheessa [16].

3.3.2 Tahtikompensaattori

Sähköverkon inertiaa pystytään kasvattamaan myös tahtikompensaattoreilla (engl. *synchronous condenser*) [15]. Tahtikompensaattorit ovat käytännössä tahtimoottoreita, joita ei kuormiteta mekaanisesti [5], eli niiden roottoria ei ole kytketty mekaaniseen kuormaan.

Tahtikompensaattorilla voidaan muiden tahtikoneiden tavoin kompensoida sähköjärjestelmän loistehoa ja kasvattaa sähköjärjestelmän inertiaa. Joitakin tahtigeneraattoreita voidaan muuttaa tahtikompensaattoreiksi poistamalla turbiini tai joidenkin muiden muutosten avulla. [15] Näin niitä voitaisiin käyttää loistehon kompensointiin ja inertian kasvattamiseen ilman, että niillä tarvitsisi tuottaa sähköenergiaa.

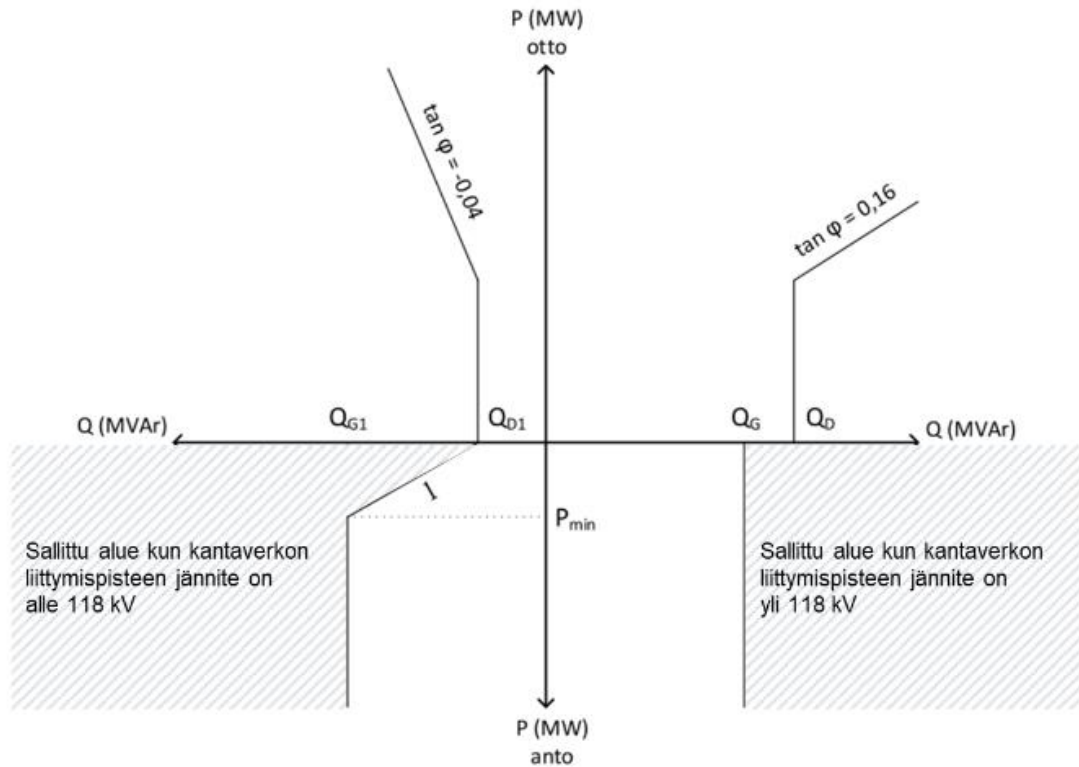
Esimerkiksi pelton-turbiinin sisältäviä vesivoimaloita voisi käyttää pienin muutoksin tahtikompensaattoreina myös turbiini kiinnitettynä: tällä tavoin saatavaan tahtikompensaattoriin saadaan enemmän pyörivää massaa, joka kasvattaa inertiaa. Tahtikompensaattorikäytössä vesivoimala toimisikin tahtimoottorina, jolloin turbiiniin päästettäisiin vain pieni määrä vettä pelkästään jäähdytystarkoituksessa ja annettaisiin roottorin sekä turbiinin pyöriä vapaasti sähköenergian pyörittämänä. Tahtikompensaattorikäytöllä voitaisiin mahdollisesti hyödyntää niitä vesivoimaloita, jotka eivät tietyllä ajanjaksolla tuota energiaa sähkömarkkinoille, esimerkiksi kesäkuukausina. [15]

Suomen sähköverkossa ei ole käytössä yhtäkään tahtikompensaattoria, mutta Suomessa on 15 kaasuturbiiniyksikköä, joita voitaisiin tarvittaessa käyttää minimiteholla sähköverkon inertian lisäämiseksi. Tehoreservikäytössä olevia kaasuturbiinivoimalaitoksia jouduttaisiin kuitenkin korvaamaan jollain toisella kapasiteetilla, jos niitä alettaisiin käyttää inertiamielessä. Vaikka Suomen ja Ruotsin kaasuturbiiniyksiköitä voitaisiin helposti käyttää sähköverkon pyörivän massan lisäämiseen silloin kun sähköverkon inertia olisi matalalla, ei se olisi kuitenkaan taloudellisesti järkevää, eikä sillä saisi tuotettua riittävän tehokasta määrää lisäinertiaa kerralla. [15]

3.4 Loistehoreservikäyttö

Tahtikoneet palvelevat siirtoverkkoa myös olemalla loistehoreservissä, missä ne toimivat potentiaalisina loistehon lähteinä verkon mahdollisten häiriötilanteiden aikana. [17] Tahtikoneiden tuottaman pätötehon ja loistehon suhdetta pystytään säätämään magnetoinnin avulla, kuten kappaleessa 2.2.4 käsiteltiin, minkä ansiosta ne pystyvät tarvittaessa tuottamaan verkkoon induktiivista tai kapasitiivista loistehoa kompensoimaan vastakaismerkkistä loistehoa. Fingridillä on oikeus vaatia voimalaitoksia tietynlaiseen tehonsäätöön, mikäli sähköjärjestelmää ei kyetä häiriön jälkeen palauttamaan normaalitilaan [8].

Koska sähköverkossa halutaan ehkäistä turhaa kompensoitavaa loistehoa, sähköverkkoon liittyneille asiakkaille on määrätty rajat loistehon tuottamisen ja kuluttamisen suhteen. Suomessa kantaverkkoon liittyneiden asiakkaiden osalta noudatetaan kuvan 11 mukaista loissähköikkunaa, joka kertoo paljonko loissähköä voi antaa tai ottaa verkosta ilman erillisiä korvauksia [17].

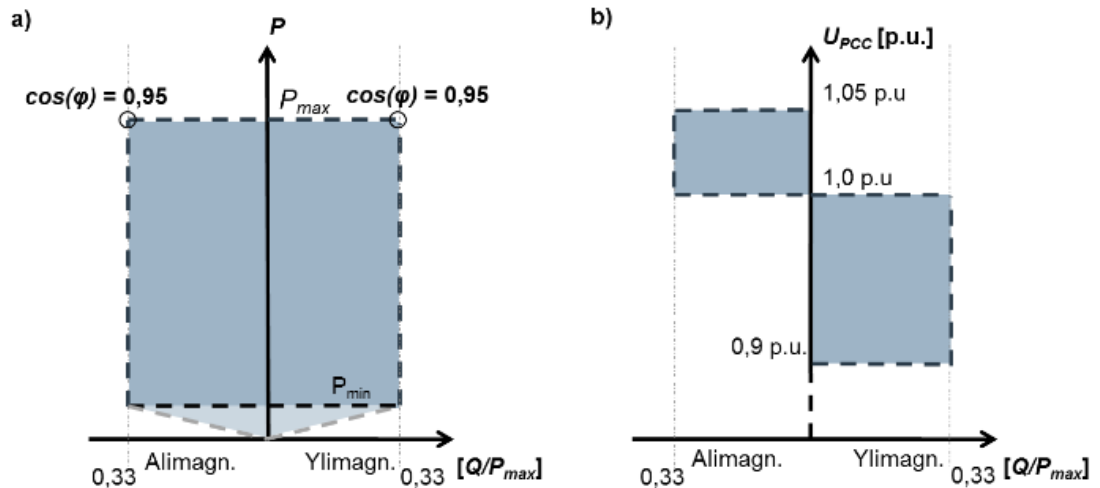


Kuva 11. Loissähköikkuna, joka määrittää liittymäpistekohtaisesti loissähkön määrän, jonka voi Suomessa toimittaa kantaverkkoon tai vastaanottaa kantaverkosta ilman erillistä korvausta. [17]

Loissähköikkunan yläpuolisko koskee pätötehon kulutusta ja alapuolisko pätötehon tuotantoa. Vaaka-akselilla oikealla puoliskolla rajataan loistehon ottoa verkosta, eli induktiivisen loistehon kulutusta, ja vasemmalla rajataan puolestaan kapasitiivisen loistehon antamista verkkoon. Kuvaa on rajattu viivoin alue, jonka sisällä toimiessa annetun tai otetun loistehon määrä ei ole niin suuri, että siitä perittäisiin ylimääräistä maksua asiakkaalta: esimerkiksi pätötehoa kuluttaessa ja loistehoa ottaessa sallittu loistehon määrä on vähintään Q_d -arvon suuruinen tai 16 prosenttia kantaverkosta otetusta pätötehosta, jota osoitetaan kuvassa $\tan \varphi = 0,16$ -viivan avulla. Asiakkaalta ei myöskään peritä loissähkömaksua, jos loissähköikkunan ylitys tapahtuu verkossa tapahtuvan häiriön aikaan. [17]

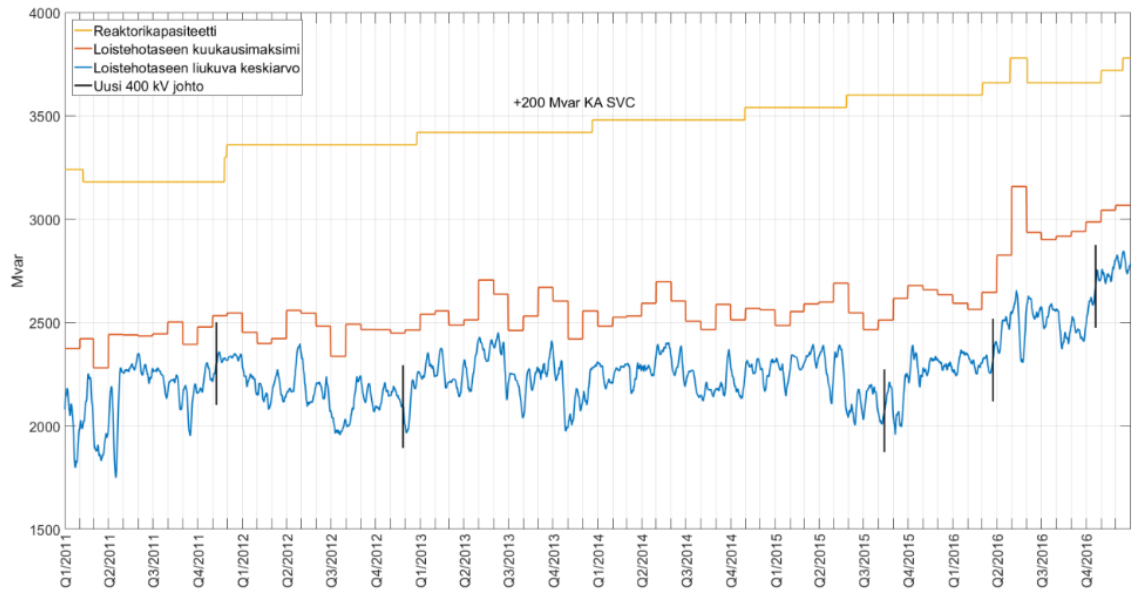
Kuvassa 12 on esitetty tyyppin C ja D (eli nimellisteholtaan vähintään 10 MW) tahtikonevoimalaitoksilta vaadittu loistehokapasiteetti Suomessa. Näiden voimalaitosten tulee kyetä loistehon tuottamisen ja kuluttamisen avulla rajoittamaan liittymispisteen jännitteen muutosta verkonhaltijan määrittämästä normaalista käyttöjännitteestä. Kun liittymispis-

teen jännite on käyttöjännitettä korkeampi, täytyy voimalaitoksen kyetä kuluttamaan loistehoa alimagnetoimalla tahtikoneita kuvan 12b osoittamalla tavalla. Samoin loistehoa täytyy kyetä tuottamaan ylimagnetoinnilla, kun liittymispisteen jännite on käyttöjännitettä alempana. [8]



Kuva 12. Tyypin C ja D tahtikonevoimalaitoksilta vaadittu loistehokapasiteetti pätötehon (a) ja liittymispisteen jännitteen (b) funktiona. [8]

Voimalaitoksen generaattorien tulee voida jatkuvasti toimia mitoitusteholla P_{max} , kun generaattorin liittimistä mitattava tehokerroin on 0,95kap–0,90ind. Voimalaitoksen tulee myös kyetä yli- tai alimagnetoituna kuluttamaan ja tuottamaan loistehoa Q loistehokapasiteetilla, joka vastaa toimintapistettä nimellistehon tehokertoimella 0.95 silloin, kun voimalaitos toimii minimitehonsa P_{min} ja mitoitustehonsa P_{max} rajaamalla toiminta-alueella. Tätä havainnoidaan kuvassa 12a. [8]



Kuva 13. Suomen 400 kV kantaverkon loistehotase ja sen kompensoimiseksi rakennettu reaktorikapasiteetti. [18]

Loistehon kompensoinnin tarve on kasvanut Suomessa. Kuva 13 havainnollistaa kantaverkossa esiintyvän loistehon määrän nousevaa trendiä ja asennetun kompensointikapasiteetin kasvua. Vuonna 2013 voimaan astunut Sähkömarkkinalaki velvoittaa verkko-yhtiöitä huomattavaan sähkön jakelun toimitusvarmuuden parantamiseen [19], minkä seurauksena maakaapeloinnin osuus keskijänniteverkossa on kasvanut merkittävästi. Kasvanut kaapelointiaste on lisännyt kantaverkkoon syötetyn loistehon määrää, mikä on vaikeuttanut kantaverkon jännitteenhallintaa. Lisäksi myös sähkönkulutuksen, mm. valaistuksen, tehokertoimen muuttuminen induktiivisesta kapasitiivisempaan suuntaan on kasvattanut verkkoon syötettyä loistehoa. [20] Loistehon kompensointikapasiteettia on täten jouduttu kasvattamaan jatkuvasti

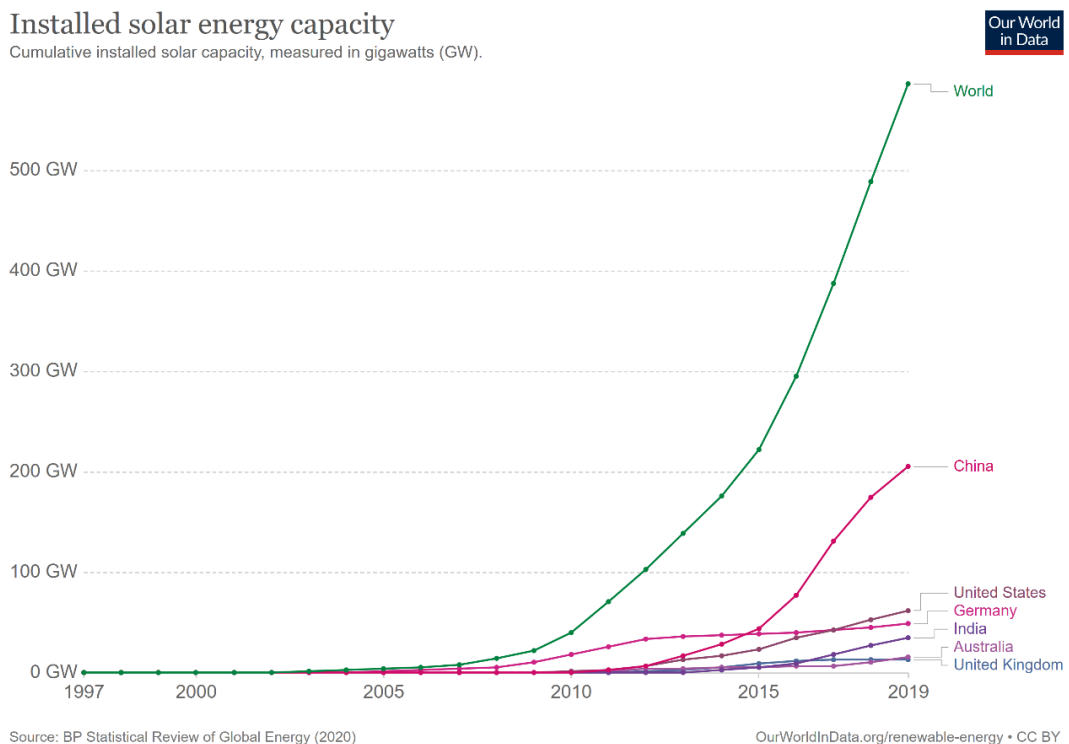
Suomessa on määrätty, että nimellisjännitteeltään 400 kV kantaverkkoon liitetyn sähköntuotantolaitteiston koko loissähkön tuotanto- ja sisäänottokyky tulee laitoksen verkossa ollessa varata loistehoreserviksi. Muissa tuotantolaitteistoissa, joiden mitoitus-teho on yli 10 MW tai liittymispisteen jännitetaso on vähintään 110 kV, tulee loistehoreserviksi varata puolet. [17]

Tahtikoneiden loistehoreservikäytön merkittävimpiä hyötyjä on se, että verkkoon ei tarvitse rakentaa niin paljoa erillisiä kompensointilaitteistoja. Missä tahansa sähköverkossa on jo valmiiksi loistehon antoon ja ottoon kykeneviä tahtigeneraattoreita, joiden loistehokapasiteetin käyttö loistehoreservinä tulee halvemmaksi, kuin uusien kompensointilaitteistojen rakentaminen.

4. TAHTIKONEIDEN TULEVAISUUS VERKOSSA

Tahtikoneita on käytetty pitkään luotettavina mekaanisen työn tekijöinä sekä vakaan sähköenergian tuottajina fossiilisten polttoaineiden avulla, mutta niiden toimintaympäristö on kuitenkin muuttumassa: uusiutuvien energianlähteiden osuuden kasvu on muuttamassa sähköverkon rakennetta ja tahtikoneiden tarvetta siirtoverkossa.

Maailmalla investoidaan nyt merkittävästi uusiutuviin energianlähteisiin ilmaston lämpenemisen ehkäisemiseksi. 195 maata allekirjoitti Pariisin ilmastopimuksen vuonna 2015, jossa sovittiin toimista rajoittaa globaalin lämpötilan nousu esiteollisesta ajasta 1,5 celsiusasteeseen. [21] Lisäksi EU on asettanut tavoitteekseen saavuttaa ilmastoneutraaliuden vuoteen 2050 mennessä [22]. Ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi uusiutuviin ja hiilineutraaleihin energianlähteisiin investoidaan maailmalla huomattavasti, mikä on johtanut nopeaan kehitykseen uusiutuvien energianlähteiden tekniikassa sekä käyttöönotossa. Aurinkosähköteknologian kehittyminen ja aurinkopaneelien kustannusten aleneminen on johtanut kuvan 14 mukaiseen jyrkän nousun trendiin. Myös tuulivoiman kehitys seuraa samanlaista trendiä, hieman loivempuna [23][24].

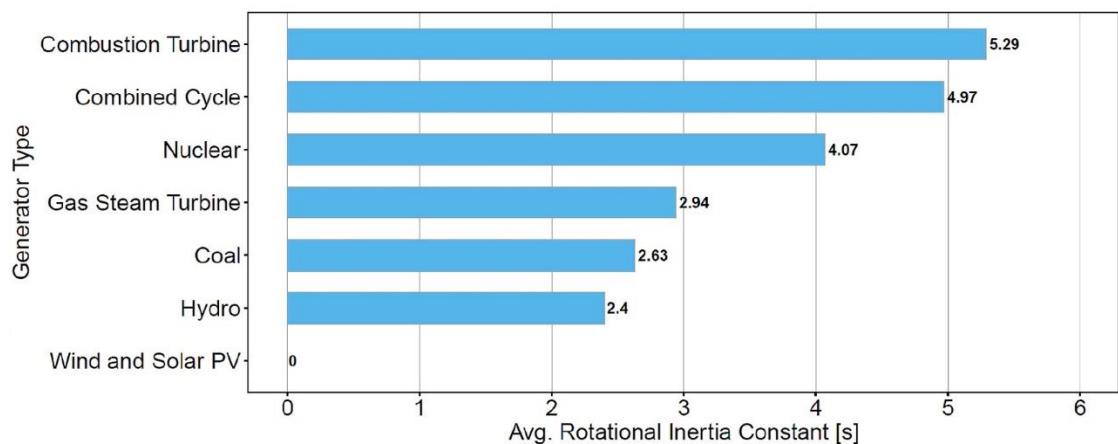


Kuva 14. Maailmalla asennettu aurinkosähkökapasiteetti. [23] Kuvaajan raakadatan lähde [24].

Kuvasta 14 nähdään, että ennen vuotta 2005 aurinkoenergian kapasiteetti oli koko maailmassa lähes olematon, mutta muutamassa vuodessa kapasiteetin määrä on lähtenyt eksponentiaaliseen nousuun. Aurinko- ja tuulivoima tulee kasvavissa määrin kilpailemaan ja syrjäyttämään perinteisiä fossiilisia polttoaineita sähkön tuotannossa [21], mikä tulee vaikuttamaan tahtikoneiden energiasovelluksiin.

Kun perinteiset voimalaitokset tekevät tilaa uusiutuville energianlähteille, vähenee myös tahtigeneraattoreiden ja sitä kautta pyörivän massan määrä sähköverkossa. Hiilellä, öljyllä, kaasulla, ydinvoimalla ja vedellä tuotettua sähköenergiaa tuotetaan turbiinien sekä tahtigeneraattorien avulla, jotka kasvattavat sähköverkon inertiaa. Aurinkoenergian tuottamiseen ei puolestaan tarvita tahtikoneita, joten aurinkosähkökapasiteetin kasvattaminen ei kasvata sähköverkon inertiaa. Myöskään tuulivoimalaitokset eivät kasvata sähköverkon inertiaa, koska niiden pyörimisliike on eristetty sähköverkon taajuudesta tehoelektroniikkasuuntaajien avulla. [15].

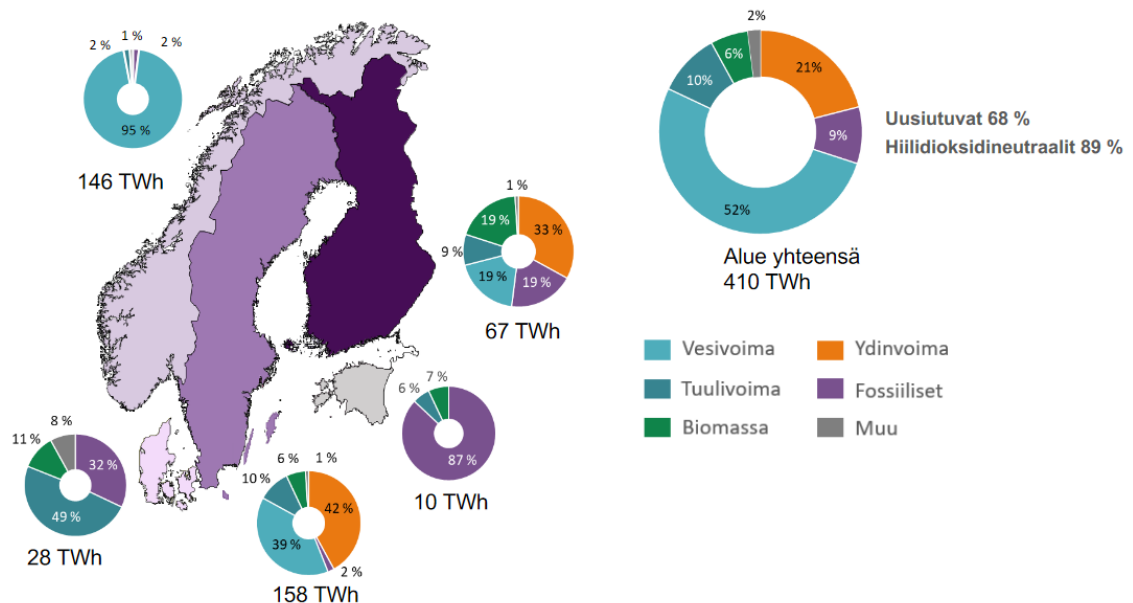
On kuitenkin mahdollista käyttää kytkentäteknologioita, joilla tuuli- ja aurinkovoima voisivat tuottaa synteettistä inertiaa sähköverkkoon [15][16], mutta ne ovat vielä kehitysvaiheessa [16], joten ne jätetään nyt huomioimatta. Kuvassa 15 havainnoidaan eri sähkön tuotantomuotojen vaikutusta inertiaan erilaisten generaattoreiden inertivakioiden avulla. Kuvan inertivakiot on laskettu ERCOTin (Electric Reliability Council of Texas) eli Yhdysvaltain Texasin osavaltion sähköverkossa esiintyville generaattorityypeille [16].



Kuva 15. Erilaisten generaattorityyppien ja sähkötuoantomuotojen keskimääräinen inertivakio Texasin osavaltion sähköverkossa. [16]

Kuva havainnollistaa sähköverkon inertiaa kasvattavia tuotantomuotoja ja miten erilaisilla tuotantomuodoilla on erilainen painoarvo sähköverkon inertiaan.

Eurooppalainen kantaverkkoyhtiöiden yhteistyöjärjestö ENTSO-E (engl. European Network of Transmission System Operators for Electricity) selvitti Future System Inertia 2 -projektissa tulevaisuuden matalan inertiatason uhkia pohjoismaisessa sähköverkossa. Projektissa kerättiin tietoa muilta maailman sähköverkoilta, tehtiin lyhyen aikavälin ennuste pohjoismaisen sähköverkon inertialle ja selvitettiin ratkaisukeinoja potentiaalisille matalan inertiatason aiheuttamille ongelmille. Tietoja muiden sähköverkkojen kokemuksista saatiin kyselyillä, joihin saatiin vastauksia 10 muulta sähköverkkoja ylläpitävältä organisaatiolta ympäri maailmaa: Yhdysvaltojen Texasin ERCOTilta, Ison-Britannian National Gridiltä, Irlannin Eirgridiltä, Tanskan Färsaarilta, Australialta (mantereen itäisten osavaltioiden osalta), Australian Tasmanialta, Etelä-Afrikan ESKOMilta, Kreikan Rhodokselta, Kanadan Hydro-Quebec TransEnergieltä sekä Uuden-Seelannin Transpowerilta, jonka verkko on jakautunut kahteen synkronisesti erilliseen osaan. Yhteensä kahdestatoista synkronisesta verkosta kahdeksan ilmoitti sähköverkon inertian alenemisen olevan haaste, minkä pääsyyinä nousi esiin muutokset eri tuotantomuotojen osuuksissa. [15] Toisin sanottuna haasteellisuus johtui tahtigeneraattoripainotteisen tuotannon osuuden laskusta sähköntuotannossa.



Kuva 16. Sähköntuotanto pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla vuonna 2018. [25] Kuvan tietojen lähde [26].

Projektissa kehitettiin simulaatiomalli pohjoismaisen sähköverkon inertian arvioimiseksi vuosina 2020 ja 2025, jonka vertailukohtana käytettiin tietoja vuodelta 2015. Kuvan 16 ympyrädiagrammit antavat taustatietoa pohjoismaisen sähköntuotannon rakenteesta.

Simulointia varten otettiin huomioon neljän ruotsalaisen ydinvoimalan ennenaikainen alasajo, suomalaisen ydinvoimakapasiteetin kasvu (Olkiluoto 3 odotettiin valmistuvan vuonna 2018), tuulivoiman kapasiteetin n. 70 prosentin kasvu pohjoismaissa vuoteen 2025 mennessä sekä tasavirtayhteyskapasiteetin (muihin Euroopan sähköverkkoihin) kasvaminen 50 prosentilla vuoteen 2025 mennessä. Tulevaisuuden ennustetta varten piti huomioida myös sähkömarkkinoiden käyttäytyminen, joten ENTSO-E määritteli simulointia varten sähkömarkkinaskenaariot vuosille 2020 ja 2025. [15]

Simuloinnin lopputulokset olivat yllättäviä: pohjoismaisen sähköverkon inertia ei vielä lähde laskuun vuonna 2025, vaan se jopa kasvaa vuoden 2020 ennusteeseen verrattuna. Pohjoismaisen sähköverkon kineettinen energia on vuonna 2025 keskimäärin suurempi ja siinä on vähemmän vaihtelua kuin vuonna 2020. Tulokset selittyvät sillä, että vuonna 2025 odotetaan olevan 2 500 MW enemmän kuormitusta, ja tuota ylimääräistä kuormitusta ei voida kattaa pelkästään inertiaa kasvattamattomilla tuotantomuodoilla. Lisäksi Olkiluoto 3:n käyttöajan odotettiin olevan suurempi vuonna 2025 kuin vuonna 2020. Simulaatiotulokset kuitenkin osoittavat, että verkossa tulisi esiintymään matalia inertia-tasoja hetkittäin vuosina 2020 ja 2025. [15]

Tahtigeneraattoreita tullaan siis lähitulevaisuudessakin käyttämään pohjoismaissa samassa mittakaavassa kuin aiemminkin, vaikka niiden osuus kokonaistuotannossa laskeekin. Uusiutuvien energianlähteiden kehitys viittaa kuitenkin siihen, että asia voi muuttua pidemmällä aikajänteellä.

Myös ERCOTin hallinnoiman Texasin sähköverkon inertiaasta on vuonna 2019 julkaistu tutkimus, jonka taustalla oli huoli huomattavan aurinkosähkökapasiteetin kasvun ja maakaasuvoimalaitosten sulkemisten vaikutuksesta inertiaan. Tutkimuksessa simuloitiin läpi erilaisia skenaarioita ja todettiin ERCOTin verkon olevan yleisesti vastustuskykyinen verkon matalille inertia-tasaille. Simulaatiot kuitenkin osoittivat, että erityisesti tilanteissa, jossa uusiutuvien energianlähteiden osuus tuotetusta sähköstä on korkea (40 %) ja joissa ydinvoimalaitoksia on ajettu alas, voivat inertia-tasot pudota tasolle, jossa voimalaitosreservit eivät pysty ylläpitämään vakaita inertia-tasoja. [16]

Uusiutuvien energianlähteiden nopea yleistyminen on siis hyvin huomioitu erityisesti länsimaissa sähköverkon inertian kontekstissa, mikä on tuonut tahtikoneita ja niiden pyöri-vän massan myönteistä vaikutusta sähköverkon inertiaan nousevissa määrin suurempaan arvostukseen. Tahtikoneiden merkitys siirtyy hitaasti pääasiallisesta sähköenergian tuottamisesta kohti sähköverkkojen inertia-tasojen ylläpitämistä, sillä monet ratkaisu-keinot matalaan inertia-tasoon ja sen aiheuttamiin ongelmiin löytyvät myös tahtiko-

neista: tahtikonevoimalaitosten ajaminen minimiteholla, tahtikompensaattoreiden käyttäminen, tuotantoyksiköiden käyttäminen tahtikompensaattoreina sekä ei-synkronisten tuotantomuotojen mahdollinen käytön (hetkellinen) rajoittaminen ovat keinoja kasvattaa verkon inertiaa tahtikoneiden avulla [15]. Tahtikoneisiin nojaamaton tapa lisätä sähköverkon inertiaa tulevaisuudessa olisi käyttää ei-synkronisilla sähköntuotantomuodoilla synteettistä inertiaa tuottavia kytkentäteknologioita, kunhan niitä on kehitetty riittävän pitkälle. [15][16]

5. YHTEENVETO

Tahtikoneiden toiminta perustuu sähkövirroilla synnytettyihin magneettikenttiin sekä sähkömagneettiseen induktioon. Kolmivaiheinen vaihtovirta synnyttää tahtimoottorin symmetrisiin käämityksiin pyörivän magneettikentän, jonka kanssa tahtikoneen roottori pyörii samassa tahdissa, tai vaihtoehtoisesti roottoria pyörittämällä käämityksiin indusoidaan kolmivaiheinen vaihtovirta sähköntuottamistarkoituksessa. Jos tahtikoneen roottorissa on magnetointikäänitys, voidaan koneen tuottaman pätötehon ja loistehon suhdetta säätää magnetointivirran avulla. Tätä ominaisuutta hyödynnetään Suomessa kantaverkon loistehoreservinä, velvoittamalla suurten tahtikoneiden haltijoita pitämään koneiden loistehon anto- ja ottokapasiteettia valmiudessa, jotta niillä voidaan häiriötilanteessa tukea verkon jännitteitä.

Tahtikoneet ovat hallitsevia sähkökoneita sähkön tuotannossa, sekä tärkeitä teollisuuden sähkömoottoreita erityisesti suuren tehotarpeen sovelluksissa niiden korkean hyötysuhteen vuoksi. Sähkömoottoreiden elinkaarikustannuksista suurin osa koostuu kulutetun sähkön hinnasta, joten minimaalinenkin muutos hyötysuhteessa voi vaikuttaa satoja tuhansia euroja moottorin elinaikaisiin kustannuksiin. Tahtikoneille toinen erityinen ominaisuus on sähköverkon inertian kasvattaminen niiden sisältämän pyörivän massan avulla, mikä auttaa sähköverkkoa vastustamaan taajuuden heilahteluita. Mitä enemmän synkronisia tahtikoneita toimii sähköverkossa, sitä suurempi on sähköverkon inertia ja sitä vähemmän nopeat muutokset kuormituksessa vaikuttavat verkon taajuuteen. Tahtigeneraattoreita voitaisiin tietyin edellytyksin käyttää tahtikompensaattoreina, jolloin ne ylläpitävät sähköverkon inertiaa, vaikka ne eivät tuottaisi sähköenergiaa verkkoon.

Suuritehoisten tahtikoneiden merkitys siirtoverkkoihin kytkettyinä ei siis ole pelkästään toimia sähköntuotantovälineinä tai mekaanisen työn tekijöinä, vaan ne lisäksi auttavat siirtoverkkoa ylläpitämään vakaata toimintaa loistehoreservitoiminnan sekä verkon kiineettisen energian kasvattamisen kautta. Erityisesti jälkimmäinen merkitys tulee korostumaan tulevaisuudessa, koska uusiutuvat energianlähteet, jotka eivät kasvata sähköverkon inertiaa, tulevat kasvattamaan osuuttaan sähkön tuotannosta merkittävästi. Työssä tarkasteltujen tutkimusten mukaan uusiutuvien energianlähteiden yleistyminen ei aiheuta vielä lähitulevaisuudessa merkittävää uhkaa ainakaan pohjoismaisen sähköverkon ja Texasin osavaltion sähköverkkojen inertiatasolle, mutta kahdeksan yhdestätoista kyselyyn vastanneesta länsimaisen kantaverkon haltijasta pitää sähköverkon inertiaa tulevaisuudessa haasteena.

LÄHTEET

- [1] J. L. Kirtley, *Electric Power Principles: Sources, Conversion, Distribution and Use*, John Wiley & Sons, Incorporated, 2010, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=555068>.
- [2] M. Doppelbauer, *The invention of the electric motor 1800-1854*, www-sivu, <https://www.eti.kit.edu/english/1376.php>, viitattu 14.4.2021.
- [3] L. Aura, A.J. Tonteri, *Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet*, (2. uud. p.), WSOY, 1996.
- [4] Mini Physics, www-sivut, <https://www.miniphysics.com/ss-magnetic-field-due-to-current-in-a-solenoid.html>, viitattu 11.3.2021.
- [5] R. Le Doeuff, M. El Hadi Zaïm, *Rotating electrical machines : From matrix modeling to implementation*, Somerset, John Wiley & Sons, Incorporated, 2010, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=1143627>.
- [6] B. Ferreira, W. der Merwe, *The principles of Electronic and Electromechanic Power Conversion: A Systems Approach*, John Wiley & Sons, Incorporated, 2010, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=1584995>.
- [7] Fingrid, Suomen sähköjärjestelmä, www-sivu, <https://www.fingrid.fi/kanta-verkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/>, viitattu 18.3.2021.
- [8] Fingrid, Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset VJV2018. 2018, <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarma-sahkonsiirto/vjv2018.pdf>, viitattu 18.3.2021.
- [9] De Benutzer Dergenaue, valokuva, 2007, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Turbinenhalle_KSP.jpg, viitattu 17.3.2021.
- [10] EP Power Europe, Scwharze pumpe, www-sivu, <https://www.eppowereurope.cz/en/companies/schwarze-pumpe/>, viitattu 17.3.2021.
- [11] O. Apata, D. T. O. Oyedokun, *Wind turbine generators: Conventional and emerging technologies*, 2017 *IEEE PES PowerAfrica*, Accra, Ghana, 2017, pp. 606-611, <https://ieeexplore.ieee.org/document/7991295/references#references>, viitattu 17.3.2021.
- [12] ABB, ABB:n moottori tekee energiatehokkuuden maailmanennätyksen – säästö puoli miljoonaa dollaria, uutinen, 2017, <https://new.abb.com/news/fi/detail/20191/abbn-moottori-tekee-energiatehokkuuden-maailmanennatysen-saasto-puoli-miljoonaa-dollar>, viitattu 17.3.2021.
- [13] P. Mahhonin, valokuva, 2012, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MSC_Poesia_departing_Tallinn_11_July_2012.JPG, viitattu 17.3.2021.

- [14] P. Breeze, Why generators are the unsung heroes of power plant efficiency, Power Engineering International, artikkeli, 2015, <https://www.powerengineer-ingint.com/coal-fired/the-unsung-hero-of-plant-efficiency/>, viitattu 25.4.2021.
- [15] ENTSO-E, Nordic report Future system inertia V2, 2018, <https://docs.entsoe.eu/dataset/nordic-report-future-system-inertia>, viitattu 20.3.2021.
- [16] T.A. Deetjen, S.C. Johnson, D.S. Mallapragada, D.J. Papageorgiou, J.D. Rhodes, M.E. Webber, Evaluating rotational inertia as a component of grid reliability with high penetrations of variable renewable energy, Energy, 180 (2019), pp. 258-271, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219308564>.
- [17] Fingrid, Loissähkön toimitus ja loistehoreservin ylläpito, 2021, saatavilla https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiA5sPRhZ7wAhVv-ioKHb-XAI4QFjAAegQIBBAD&url=https%3A%2F%2Fwww.fingrid.fi%2Fglobalassets%2Fdokumentit%2Ffi%2Fpalvelut%2Fkayttovarma-sahkonsiirto%2Flois-sahkon-toimituksen-ja-loistehoreservin-yllapito-2021-id-244241.pdf&usq=AOv-Vaw06K9B_tlvoepwrbwPH4mj4, viitattu 23.3.2021.
- [18] M. Laatikainen, Sähkövoimajärjestelmän muutosten vaikutus kantaverkon loistehon hallintaan, diplomityö, 2017, saatavilla <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tt-201708291851>, viitattu 15.4.2021.
- [19] Sähkömarkkinalaki 588/2013, annettu Helsingissä 9.8.2013, saatavilla <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588#Oidp446619520>.
- [20] Fingrid, Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2019-2030, kalvoesitys, saatavilla https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/kantaverkon_kehittamissuunnitelma-2019-2030.pdf, viitattu 13.4.2021.
- [21] S. Teske, Achieving the Paris Climate Agreement Goals Global and Regional 100% Renewable Energy Scenarios with Non-energy GHG Pathways for +1.5°C and +2°C, Springer International Publishing, 2019, <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/22899>.
- [22] Euroopan komissio, In focus: Renewable energy in Europe, www-sivu, https://ec.europa.eu/info/news/focus-renewable-energy-europe-2020-mar-18_en, viitattu 24.3.2021.
- [23] Our world in data, Renewable Energy, www-sivu, <https://ourworldindata.org/renewable-energy>, viitattu 24.3.2021.
- [24] BP, Statistical Review of Global Energy, tilastosivu, 2020, saatavilla, <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>, viitattu 24.3.2021.
- [25] R. Merikoski, Pohjoismainen energiantuotanto 2020-30, kalvoesitys, 2020, saatavilla <http://www.paikallisvoima.fi/tiedostot/Pohjoismainenenergiantuotanto202030.pdf>, viitattu 10.4.2021.
- [26] ENTSO-E, ENTSO-E Statistical Factsheet 2018, 2018, saatavilla https://www.entsoe.eu/Documents/Publications/Statistics/Factsheet/entsoe_sfs2018_web.pdf, viitattu 10.4.2021.