



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Juhana Pitkälä

Häkkikäämitty epätahtigeneraattori tuulivoimalassa

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Kandidaatin tutkielma
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO**Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Juhana Pitkälä		
Tutkielman nimi:	Häkkikäämitty epätahtigeneraattori tuulivoimalassa		
Tutkinto:	Tekniikan kandidaatti		
Oppiaine:	Sähkö- ja energiatekniikka		
Työn ohjaaja:	Kimmo Kauhaniemi		
Valmistumisvuosi:	2025	Sivumäärä:	24

TIIVISTELMÄ:

Häkkikäämitty epätahtigeneraattori, englanniksi squirrel cage induction generator (SCIG) on tuulivoimaloissa yleisesti käytetty generaattorityyppi erityisesti yksinkertaisen rakenteensa vuoksi. Tässä kandidaatintutkielmassa käsitellään häkkikäämityn epätahtigeneraattorin toimintaperiaatteita ja sen sovellutuksia tuulivoimaloissa. Tutkielmasta käy ilmi kuinka häkkikäämityn generaattorin yksinkertaisuus tukee sen käyttöä tuulivoimaloissa. Tutkielman tavoitteena on auttaa lukijaa ymmärtämään häkkikäämityn epätahtigeneraattorin toimintaperiaate osana tuulivoimalaa.

Lisäksi tutkielmasta käy ilmi tuulivoimalan yleinen toimintaperiaate, jotta lukija saa kokonaisvaltaisen kuvan, kuinka tuulen liike-energiasta saadaan muutettua sähköä tuulivoimalan avulla. Tutkielmasta saa yleiskuvan tuulivoimalan eri osien perusperiaatteet. Yleiskatsaukseen avulla luodaan perusta häkkikäämityn epätahtigeneraattorin toimintaperiaatteen tarkastelulle ja sen roolin ymmärtämiselle osana koko järjestelmää.

Tutkielmassa myös käydään SCIG:n asemaa ja yleisyyttä tänä päivänä tuulivoimaloissa ja yleisyyttä tulevaisuuden tuulivoimalaitoksissa. Tarkoituksena antaa lukijalle selkeä käsitys häkkikäämityn epätahtigeneraattorin nykyisestä roolista tuulivoimalaitoksissa, sekä arvioida sen potentiaalia tulevaisuudessa osana yhä kasvavaa tuulivoimalaitostuotantoa.

AVAINSANAT: tuulivoimala, tuulivoimalaitos, SCIG, häkkikäämitys, epätahtigeneraattori

Sisällys

1	Johdanto ja tutkielman tausta.	5
2	Tuulivoimalat	6
2.1	Tuulivoimaloiden toimintaperiaate	6
2.2	Tuulivoimalan rakenne	6
2.2.1	Roottori	6
2.2.2	Voimansiirto	7
2.2.3	Generaattori	7
2.2.4	Kääntöjärjestelmät ja konehuone	9
2.2.5	Torni ja perustukset	9
2.2.6	Ohjausjärjestelmät	9
2.2.7	Sähköjärjestelmän muut komponentit	9
3	Häkkikäämityn epätahtigeneraattorin toiminta (SCIG)	10
3.1	Yleistä tietoa	10
3.2	Rakenne	10
3.2.1	Staattori	10
3.2.2	Roottori	12
3.3	Sähkömoottorin yleinen toimintaperiaate	13
3.4	Generaattorina toimiva epätahtikone	17
3.5	Reaktiivisen tehon tarve	18
4	Häkkikäämitty epätahtigeneraattori tuulivoimasovelluksessa	20
4.1	Kiinteänopeuksinen tuulivoimala häkkikäämityllä epätahtigeneraattorilla	20
4.2	Vaihtuvanopeuksinen tuulivoimala häkkikäämityllä epätahtigeneraattorilla	21
4.3	Häkkikäämityn epätahtigeneraattorin yleisyys	21
5	Yhteenvedo	23
	Lähteet	24

Kuvat

Kuva 1. Staattorin kolmivaihekäämityksen synnyttämä pyörivä magneettikenttä (Aura & Tonteri, 1996)	11
Kuva 2. Kolmivaiheisen vaihtosähkökoneen vaihekäämityksen virrat (Aura & Tonteri, 1996)	12
Kuva 3. Yksinkertaistettu rakenne häkkikäämistä roottorista (Attaianese, 2020)	13
Kuva 4. Sähkömoottorin toimintaperiaate. a) Virrallinen johdinsilmukka magneettikentässä b) Staattorin ja silmukan virran magneettikentät c) Magneettikenttien muodostama resultoiva magneettikenttä. d) Silmukan taso vaakasuorana. (Aura & Tonteri, 1986).	14
Kuva 5. Sähkövääntömomentin määrittäminen (Aura&Tonteri, 1986).	15
Kuva 6. Sähkövääntömomentin syntyminen moottoriin (Aura&Tonteri, 1996).	16
Kuva 7. Verkkomagnetoitu epätahtigeneraattori (Aura&Tonteri, 1996).	19
Kuva 8. Kondensaattorimagnetoitu epätahtigeneraattori (Aura&Tonteri, 1986).	19
Kuva 9. Häkkikäämitty epätahtigeneraattori tuulivoimalassa (Beainy, A ja muut, 2016)	20
Kuva 10. Eri generaattorityyppien yleisyys asennetuille energiajärjestelmille 1995-2004 (Beainy, A ja muut, 2016)	22

Lyhenteet

SCIG	Squirrel Cage Induction Generator
WRGI	Wound Rotor Induction Generator
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
WRSG	Wound Rotor Synchronous Generator
OSIG	OptiSlip Induction Generator
FSIG	FlexiSlip Induction Generator
DFIG	Doubly Fed Induction Generator

1 Johdanto ja tutkielman tausta.

Tuulivoiman merkitys uusiutuvana energialähteenä on kasvanut merkittävästi viime vuosikymmeninä, kun maailma on pyrkinyt vähentämään riippuvuutta fossiilisista polttoaineista. Uusiutuvan energian käyttö, kuten tuulivoiman, on tärkeää, sillä sen tuotannosta syntyy huomattavasti vähemmän päästöjä verrattuna perinteisiin energianlähteisiin. Tuulivoimalat hyödyntävät tuulen liike-energiaa ja muuntavat sen sähköksi, mikä tarjoaa puhtaan ja kestävästi energiaratkaisun kasvaviin energiatarpeisiin. Tilastokeskuksen mukaan tuulivoimalla tuotettiin 18 % Suomen sähköstä vuonna 2023 (Tilastokeskus, 2024).

Tässä tutkielmassa tarkastellaan tuulivoimalan perustoimintaperiaatetta, sekä häkkikäämityn epätahtigeneraattorin toimintaperiaatetta ja sen sovellutuksia tuulivoimaloissa. Häkkikäämitty epätahtigeneraattori on yleisesti käytetty generaattorityyppi tuulivoimaloissa sen rakenteellisen yksinkertaisuuden ansiosta. Tutkielman tavoite on avata lukijalle häkkikäämityn epätahtigeneraattorin toimintaperiaate ja peruseriaatteet sen toiminnasta osana tuulivoimalaitosta.

Tutkimus pyrkii vastaamaan kolmeen tutkimuskysymykseen:

1. Mikä on tuulivoimalan toimintaperiaate?
2. Mikä on häkkikäämityn epätahtigeneraattorin toimintaperiaate?
3. Mitkä ovat häkkikäämityn epätahtigeneraattorin erilaiset sovellutukset tuulivoimaloissa?

Tutkielma on jaettu siten, että aluksi käsitellään tuulivoimalan yleistä toimintaperiaatetta, sekä tarkastellaan tuulivoimalan yleiset komponentit. Tämän jälkeen tarkastellaan häkkikäämityn epätahtigeneraattorin toimintaperiaatetta ja erilaisia sovellutuksia tuulivoimaloissa. Lopuksi tarkastellaan tämän generaattorityypin yleisyyttä nykypäivänä tuulivoimalaitoksissa.

2 Tuulivoimalat

2.1 Tuulivoimaloiden toimintaperiaate

Tuulivoimala on laitos, joka muuttaa tuulessa olevaa liike-energiaa sähköenergiaksi.

Manwellin ja muiden mukaan (2002, s.2) tuulivoimaloissa varsinainen muutosprosessi käyttää nostovoimaa, joka tuottaa vääntömomentin akselille ja tämän takia akseli alkaa pyöriä. Tämän johdosta tuulen liike-energia muuttuu aluksi mekaaniseksi energiaksi, joka johdetaan generaattoriin, jossa mekaaninen energia muuttuu sähköenergiaksi. Generaattorin jälkeen tulee tehoelektroniikka, johon voidaan lukea kuuluvaksi esimerkiksi taajuusmuuttaja.

Tuulivoimalan ja sähköverkon välissä on yleensä muuntaja, jonka kautta generaattorissa mekaanisesta energiasta muutettu sähköenergia ohjataan sähköverkkoon.

Tuuliturbiineita on vaaka sekä pystyakselisina, mutta vaaka-akseliset turbiinit ovat suosittu malli sähköntuottoteholtaan suurissa voimalaitoksissa (Breeze 2016, s. 19).

2.2 Tuulivoimalan rakenne

Tuulivoimaloiden rakenne voi poiketa paljonkin tässä kandidaatintutkielmassa esitetystä, mutta käyn perusperiaatteen läpi.

Tuulivoimalaan kuuluu roottori, voimansiirto, generaattori, konehuone ja käännösjärjestelmä, torni ja perustus, ohjausjärjestelmä ja sähköjärjestelmän muut komponentit, johon kuuluu kaapelit, muuntajat, kytkinlaitteet sekä suojaus- ja mittauslaitteet (Manwell ja muut, 2002, s. 5-7).

2.2.1 Roottori

Roottori kerää tuulen liike-energian ja muuttaa sen mekaaniseksi energiaksi (Breeze 2016, s. 29).

Manwell ja muut (2002) kertovat, kuinka roottori käsittää navan ja lavat. Yleisimmin roottoreissa on kolme lapaa. Suurin osa lavoista on tehty komposiitista, lasikuidulla vahvistetusta muovista, mutta joskus on käytetty puu/epoksi laminaattia.

2.2.2 Voimansiirto

Voimansiirto käsittää pyörivät osat tuuliturbiinista. Näihin tyypillisesti sisältyy matalanopeuksinen akseli (roottorin puolella), vaihteisto ja korkeanopeuksinen akseli generaattorin puolella. Voimansiirron komponentteihin luetaan tukilaakerit, kytkin, jarru ja generaattorin pyörivät osat (Manwell ja muut, 2002, s. 5-7).

2.2.3 Generaattori

Tuulivoimaloissa voidaan käyttää erilaisia generaattoreita. SCIG: squirrel cage induction generator; WRIG: wound rotor induction generator; PMSG: permanent magnet synchronous generator; WRSG: wound rotor synchronous generator; OSIG: optislip induction generator; FSIG: flexislip induction generator; DFIG: doubly fed induction generator.

Ackermann (2012, s.90-96) luettelee erilaisia generaattorityyppejä ja niiden pääominaisuuksia:

Epätahtigeneraattorit ovat yleisimmin käytettyjä tuuliturbiineissa. Tämän generaattorityypin hyvät ominaisuudet ovat sen mekaaninen yksinkertaisuus, kestävyys ja halpa hinta. Suurin heikkous on staattorin tarvitsema reaktiivinen magnetoimisvirta. Epätahtigeneraattorissa ei ole kestopagneetteja eikä se ole erillismagnetoitu. Joten se tarvitsee magnetoimisvirtansa toisesta lähteestä ja kuluttaa reaktiivista tehoa. Induktiogeneraattorit voivat olla joko häkkikäämitettyjä generaattoreita (SCIG) tai liukurengasgeneraattoreita (WRGI).

SCIG on yleisimmin käytetty generaattori. Tämän generaattorityypin hyviä ominaisuuksia ovat sen yksinkertaisuus, jonka johdosta generaattori on myös edullinen, sekä kestävä. Tätä generaattorityyppiä käytetään lähinnä kiinteänopeuksisissa tuulivoimaloissa.

WRGI (Wound Rotor Induction Generator) generaattorityyppi mahdollistaa roottorin sähköisten ominaisuuksien säätelyn, kuten roottorin jännitteen kasvattamisen. Tämä generaattorityyppi on kalliimpi ja monimutkaisempi, kuin häkkikämmetty, mutta tässä generaattorityypissä on paremmat säätömahdollisuudet.

OSIG/FSIG ovat liukurengasgeneraattoreita (WRGI). Nämä generaattorityypit on varustettu säädettävällä ulkoisella roottorin vastuksella. Jättämää ja generaattorin tehoa pystytään säätämään muuttamalla ulkoista roottorin vastusta.

DFIG (Doubly Fed Induction Generator) suomeksi kaksoissyötetty induktiogeneraattori. Tämän generaattorin toiminta perustuu liukurengasgeneraattoriin (WRGI), jossa on kämmetty roottori. Termillä kaksoissyöttö viitataan siihen, että staattori saa jännitteen suoraan verkosta, kun taas roottorin jännite indusoituu tehomuuntimella. Tämä mahdollistaa joustavan nopeuden ja tehon hallinnan, joka on tärkeää tuuliturbiineissa, koska pyörimisnopeus vaihtelee.

Synkronigeneraattori on kalliimpi ja mekaanisesti monimutkaisempi, kuin vastaavan kokoinen induktiogeneraattori. Sen merkittävä etu induktiogeneraattoriin verrattuna on kuitenkin se, että se ei tarvitse reaktiivista magnetointivirtaa. Tässä mallissa magneettikenttä voidaan luoda joko kestopagneeteilla tai perinteisellä kenttäkämmityksellä. Tuuliturbiineissa käytetään perinteisesti kahdenlaisia synkronigeneraattoreita WRSG:tä ja PMSG:tä.

Generaattoreita kehitetään jatkuvasti ja tulevaisuudessa on mahdollista, että tulemme näkemään hyvin erityyppisiä generaattoreita myös tuulivoimasovelluksissa

2.2.4 Kääntöjärjestelmät ja konehuone

Manwellin ja muiden mukaan (2002, s.6) kääntöjärjestelmät ja konehuone sisältää voimansiirtokomponenttien kiinnitykset, konehuoneen, joka suojaa komponentteja sekä kääntöjärjestelmän. Kääntöjärjestelmää tarvitaan, jotta voidaan pitää roottorin akseli oikeassa linjassa tuulen kanssa. Kääntöjärjestelmä toimii automaattisesti ja tuulensuuntatunnistin on yleensä asennettu konehuoneeseen.

2.2.5 Torni ja perustukset

Manwellin ja muiden mukaan (2002, s.6) torniin ja perustukseen sisältyy tornirakenne ja sen alla oleva perustus. Nykyisin tornit ovat yleensä teräsputkitorneja, jotka on kiinnitetty perustuksiin (Motiva, 2024).

Tuulivoimatyyppin korkeus on n. 1-1,5 kertaa roottorin halkaisija (Manwell ja muut, 2002). Tuulivoimaloiden koko on kasvanut viime aikoina ja niiden koko kasvaa jatkuvasti (Motiva, 2024). Tuulivoimaloiden kokoa kasvattamalla pyritään lisäämään tuulivoimaloiden tehon tuotantoa.

2.2.6 Ohjausjärjestelmät

Manwellin ja muiden mukaan (2002, s.6-7) tähän kategoriaan sisältyy erilaiset anturit, säätimet, tehonvahvistimet ja toimilaitteet. Tuulivoimaloiden ohjausjärjestelmien tehtävänä on hallita voimansiirtolinjan kuormituksia, maksimoida rakenteellisten komponenttien kestävyys ja varmistaa energiantuotannon tehokkuus, huomioiden tuuliolosuhteiden vaihtelut.

2.2.7 Sähköjärjestelmän muut komponentit

Manwellin ja muiden mukaan (2002, s.7) tämä kategoria pitää sisällään generaattorin lisäksi käytettävät muut sähköiset komponentit, kuten muuntajat, kaapelit, kytkinlaitteet, taajuusmuuttajat yms.

3 Häkkikäimityn epätahtigeneraattorin toiminta (SCIG)

3.1 Yleistä tietoa

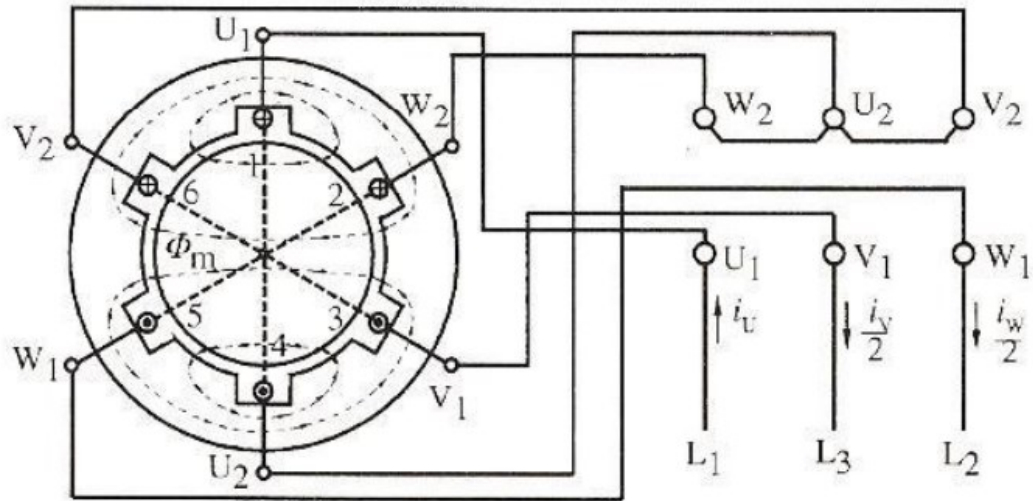
Häkkikäimitys epätahtigeneraattori on yleisesti käytetty generaattorityyppi. Tämä generaattori on samanlainen rakenteeltaan, kuin tavallinen oikosulkumoottori, mutta toimii generaattorina, kun roottori pyörii yli synkronisen nopeuden. Häkkikäimitys epätahtigeneraattorin yksinkertainen rakenne ja kyky toimia ilman monimutkaista ohjausjärjestelmää tekevät siitä suosittu generaattorityypin. Kolmivaiheinen oikosulkumoottori on kaikista yleisin sähkökone (Aura & Tonteri, 1996, s. 305).

3.2 Rakenne

Häkkikäimitys epätahtigeneraattori koostuu kahdesta pääkomponentista: staattorista ja roottorista (Aura & Tonteri, 1996, s. 305).

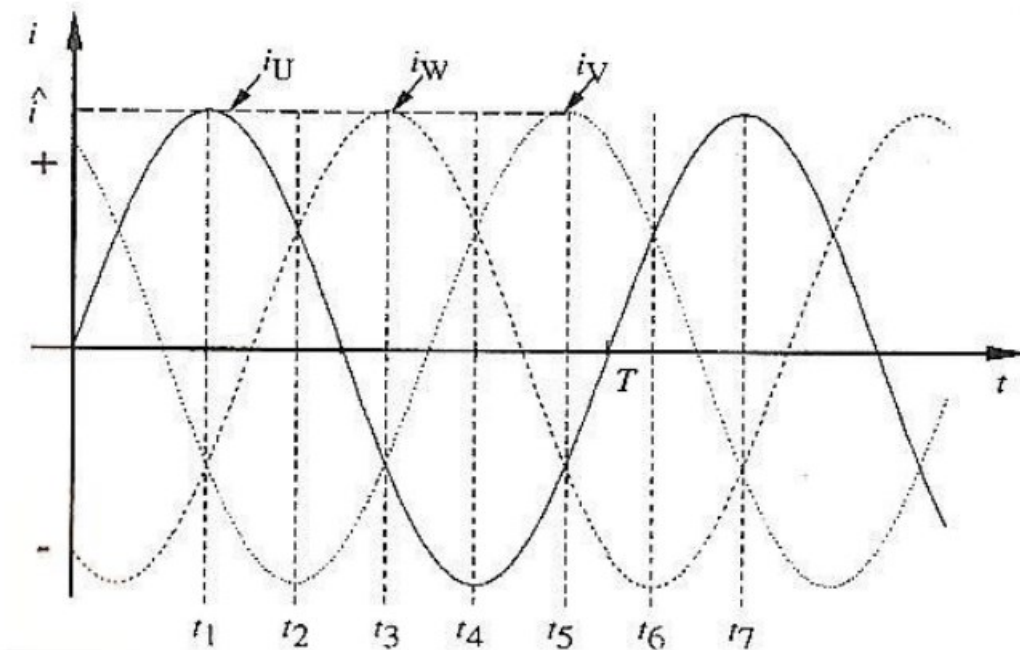
3.2.1 Staattori

Staattori on generaattorissa kiinteä osa ja se sisältää kolmivaiheisen käämityksen levypaketteineen. Staattorin käämit ovat järjestetty symmetrisesti. Tämä johtaa siihen, että kolmivaiheinen vaihtovirta luo pyörivän magneettikentän staattorin sisälle, eli roottoriin (Aura & Tonteri, 1996, s. 305). Pyörivä kenttä toimii generaattorin toiminnan perusteena.



Kuva 1. Staattorin kolmivaihekäämityksen synnyttämä pyörivä magneettikenttä (Aura & Tonteri, 1996)

Kuva 1 esittää kaaviollisesti yksinkertaisinta epätahtigeneraattorin kolmivaihekäämitystä. Kuvassa on kolme vyyhtiä, jotka muodostuvat vaihekäämityksistä. Vaiheisiin L_1, L_2, L_3 kytkettäessä virta, alkaa käämityksen läpi kulkea kolmivaihevirta, joka synnyttää magneettikentän staattorin sisäpuolelle. Kuvassa 2 on esitetty käämityksen läpi kulkeva kolmivaihevirta.

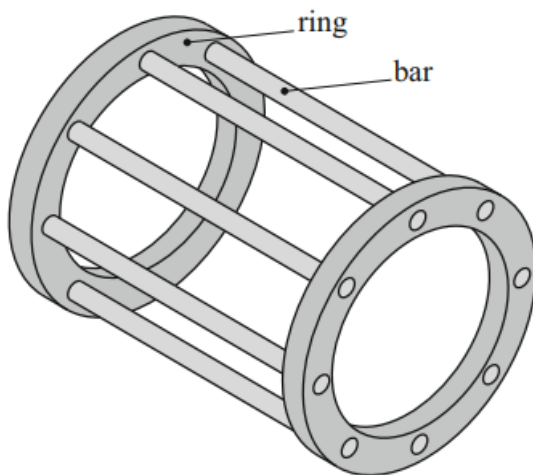


Kuva 2. Kolmivaiheisen vaihtosähkökoneen vaihekäämityksen virrat (Aura & Tonteri, 1996)

3.2.2 Roottori

Roottorissa, eli pyörivässä osassa on häkkikäämitys, joka koostuu metallisista sauvoista, jotka on sijoitettu roottorin kehälle ja yhdistetty oikosulkurenkain kummastakin päästä (Aura & Tonteri, 1996, s. 333).

Häkkikäämitys nimitys johtuu siitä, että nämä metalliset sauvat muodostavat häkin roottorin ympärille. Häkkikäämitys mahdollistaa virran kulkemisen roottorissa ilman liukurenkaita tai hiiliharjoja, mikä tekee rakenteesta yksinkertaisen ja kestävä.

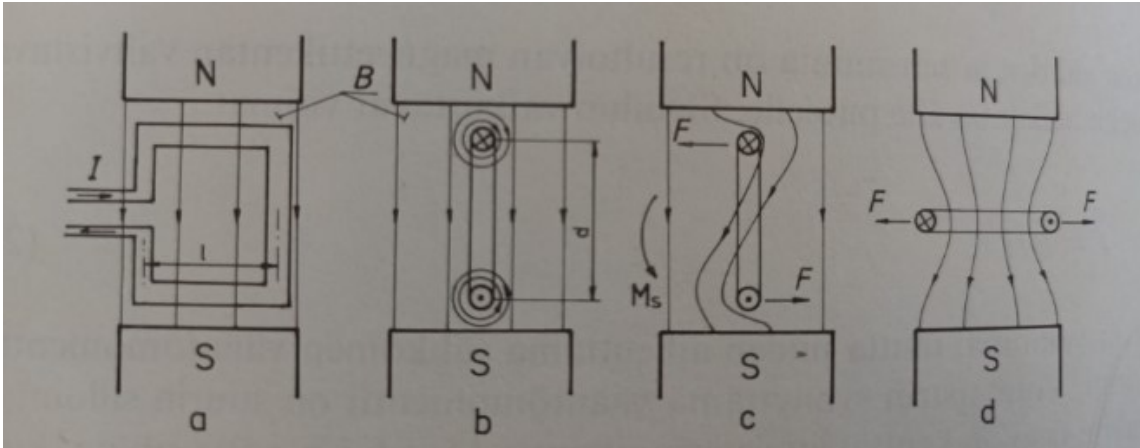


Kuva 3. Yksinkertaistettu rakenne häkkikäymistä roottorista (Attaianesse, 2020)

3.3 Sähkömoottorin yleinen toimintaperiaate

Jotta pystyy ymmärtämään epätahtigeneraattorin toimintaperiaatteen, on hyvä käydä läpi mikä on sähkömoottorin yleinen toimintaperiaate. Tämä, koska niin kuin tiedetään, häkkikäymitty epätahtigeneraattori on rakenteeltaan samanlainen, kuin tavallinen oikosulkumoottori, sitä vain käytetään generaattorina.

Aura ja Tonteri (1986) kuvaavat sähkömoottorin toimintaperiaatetta, joka perustuu sähkövirtaa johtavan silmukan ja ulkoisen magneettikentän väliseen vuorovaikutukseen. Kuvassa 4 on esitetty roottori, jossa on johdinsilmukka. Tämä silmukka on staattorin tuottamassa magneettikentässä. Kun johdinsilmukan läpi kulkee virta I , se synnyttää silmukan ympärille oman magneettikenttensä, kuten kuvan b kenttä osoittaa. Näiden kahden kentän yhdistelmänä syntyy kuvan c mukainen tuloksena oleva magneettikenttä.

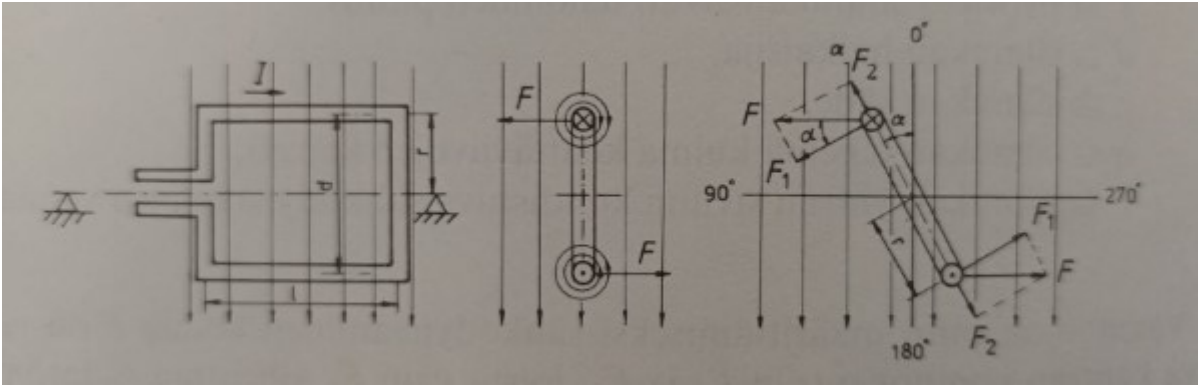


Kuva 4. Sähkömoottorin toimintaperiaate. a) Virrallinen johdinsilmukka magneettikentässä b) Staattorin ja silmukan virran magneettikentät c) Magneettikenttien muodostama resultoiva magneettikenttä. d) Silmukan taso vaakasuorana. (Aura & Tonteri, 1986).

Auran ja Tonterin (1986) mukaan johdinsilmukan pinnat, jotka leikkaavat magneettikenttää, kokevat yhtä suuret, mutta vastakkaisuuntaiset voimat F . Tämä voimapari pyrkii kääntämään silmukan vaakatasoon. Tämän voiman vaikutus on kohtisuora sekä magneettikenttään että virtaa johtavaan silmukan osaan nähden, ja sen suunta on vahvemmassa kenttäalueesta heikompaan. Sivuihin vaikuttavat voimat (kuva 5):

$$F = BIl \quad (1)$$

säilyvät vakioina, mutta niiden aikaansaama sähköinen vääntömomentti M vaihtelee silmukan asennon mukaan. Voimaparin tuottama vääntömomentti saavuttaa huippunsa, kun se vaikuttaa kohtisuorasti siihen nähden.



Kuva 5. Sähkövääntömomentin määrittäminen (Aura&Tonteri, 1986).

Kuva 5 havainnollistaa sähkövääntömomentin laskemista sähkökoneesta. Merkitään kuvassa 5 näkyviä suureita seuraavasti:

B = staattorin käämityksen kehittämä magneettivuon tiheys,

I = roottorin silmukan sähkövirta,

l = Staattorin silmukan sivun tehollinen pituus,

d = silmukan halkaisija

r = silmukan säde,

α = silmukan tekemä kulma kenttäviivojen kanssa,

F = silmukan yhteen sivuun kohdistuva sähködynaaminen voima.

Vääntömomentin laskemiseksi sähködynaaminen voima F jaetaan komponentteihin F_1 ja F_2 , joista vain F_1 aiheuttaa vääntömomentin. F_1 on kohtisuorassa silmukkaan nähden, ja sen suuruus on:

$$F_1 = F \cos \alpha \quad (2)$$

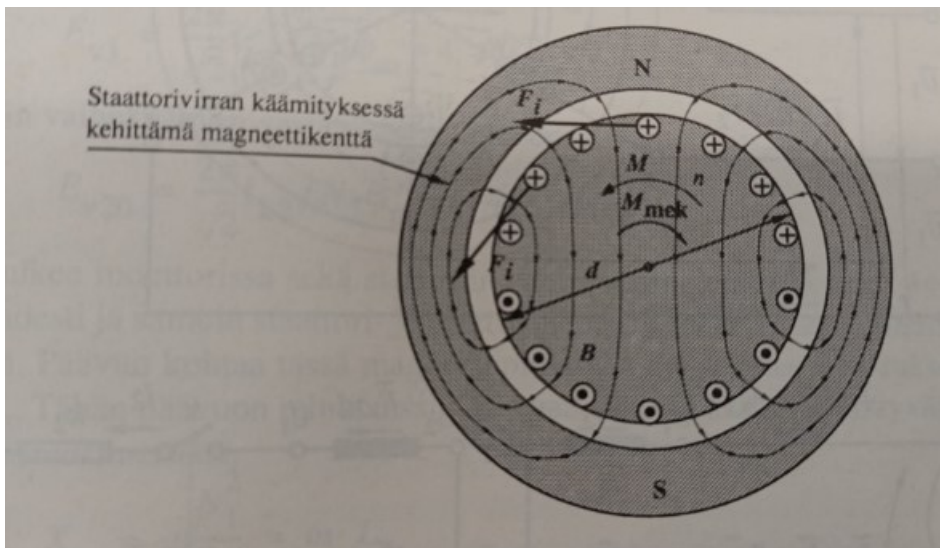
Tämän voiman vääntömomentti akselin suhteen on:

$$M = 2rF_1 = dF_1 = dF \cos \alpha = dlBI \cos \alpha = kBI \cos \alpha = M_{max} \cos \alpha, \quad (3)$$

jossa k on silmukan rakenteesta riippuva vakio. Tämä vääntömomentin suuruus vaihtelee siis silmukan asennon mukaan.

Auran ja Tonterin (1986) mukaan kuvassa 4 esitettyä yksinkertaista moottorirakennetta ei käytetä, sillä siitä puuttuu rautalevypaketti roottorista, mikä johtaisi liian suureen ilmväliin riittävän magneettikentän aikaansaamiseksi.

Käytännön sovelluksissa roottori on varustettu useilla käämikiirroilla, jotka on sijoitettu rautalevyistä tehtyyn roottoripakettiin, kuten kuvassa 6. Näin magneettikentän voimaviivat ovat kohtisuorassa roottorin pintaa vasten. Sähködynaaminen voima F , joka on kohtisuorassa magneettikenttää vasten, kohdistuu ilmvälin kehän tangentin suuntaan.



Kuva 6. Sähkövääntömomentin syntyminen moottoriin (Aura&Tonteri, 1996).

Käämin kaikkien kierrosten sähköiset vääntömomentit vaikuttavat samaan suuntaan, joten roottorin vääntömomentti on:

$$M = \sum_{i=1}^n d \cdot F_i, \quad (4)$$

jossa

F_i = vyyhden sivuun vaikuttava voima,

d = ilmaväliahkaisija,

n = vyyhtien lukumäärä,

i = mielivaltainen vyyhden sivu.

Auran ja Tonterin (1986) mukaan roottori alkaa pyöriä sähköisen vääntömomentin suuntaan ja saavuttaa pyörimisnopeuden n , jossa akselilla vaikuttava mekaaninen vastamomentti M_{mek} on yhtä suuri kuin sähköinen vääntömomentti M , eli $M=M_{mek}$.

3.4 Generaattorina toimiva epätahtikone

Generaattorikäytössä roottorin on pyörittävä synkroninopeutta nopeammin, eli päinvastoin, kuin moottorikäytössä (Doeuff ja muut, 2013, s.189). Tuulivoimaloissa tämä roottorin pyörimisnopeus saadaan tuulen avulla aikaan.

Seuraavaksi määrittelemme jättämän käsitteen, joka kuvaa roottorin pyörimisnopeuden ja staattorin käämityksen aiheuttaman magneettikentän pyörimisnopeuden eroa. Negatiivinen jättämä kertoo, että sähkökone toimii generaattorina (Aura&Tonteri, 1986, s.216).

Suhteellinen jättämä voidaan määritellä seuraavasti (Doeuff ja muut, 2013, s.189):

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}, \quad (5)$$

missä

s = suhteellinen jättämä,

n_s = synkroninopeus,

n = roottorin pyörimisnopeus.

Kaavasta (5) seuraa, että pyörimisnopeudelle voidaan määrittää kaava:

$$n = n_s(1 - s) \quad (6)$$

Ja edelleen pystymme määrittämään magneettikentän pyörimisnopeuden roottoriin nähden:

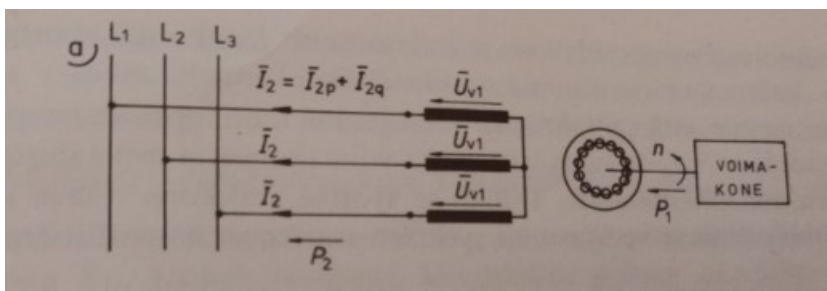
$$\Delta n = s \cdot n_s, \quad (7)$$

missä Δn on kentän ja roottorin pyörimisnopeusero.

3.5 Reaktiivisen tehon tarve

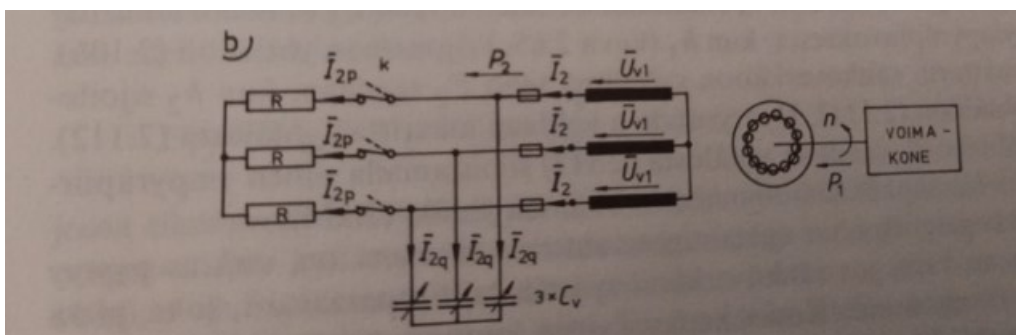
Epätahtigeneraattori tarvitsee sähköverkosta reaktiivista tehoa staattorin magneettikentän ylläpitämiseksi. Tämä tarkoittaa sitä, että vaikka generaattori tuottaa aktiivista tehoa, tarvitsee se ulkopuolista reaktiivista tehoa, jota se voi saada sekä sähköverkosta että generaattoriin kytketyistä kondensaattoreista.

Aura ja Tonteri (1986) kuvaavat, kuinka epätahtigeneraattorit luokitellaan kahteen ryhmään niiden magnetointitavan perusteella: verkkomagnetoituihin ja kondensaattorimagnetoituihin generaattoreihin. Verkkomagnetoituidut ottavat magnetoimisvirtansa sähköverkosta, mikä johtaa siihen, että ne voivat tuottaa sähköä vain, kun ne on kytketty jännitteellisiin verkkoihin.



Kuva 7. Verkkomagnetoitu epätahtigeneraattori (Aura&Tonteri, 1996).

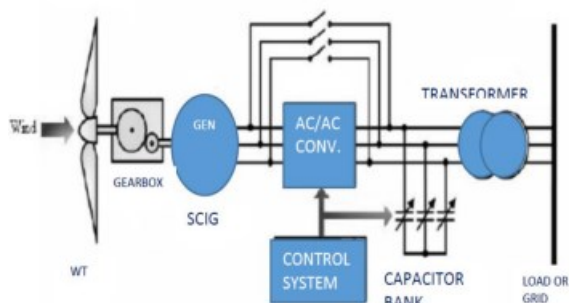
Kondensaattorimagnetoidut generaattorit puolestaan ottavat magnetoimisvirran niihin kytketyistä kondensaattoreista, mikä johtaa siihen, että niitä voidaan käyttää täysin itsenäisinä generaattoreina, ilman ulkopuolista jännitteellistä verkkoa (Aura&Tonteri, 1986, s.216). Tällaisessa tilanteessa generaattoria siis kuormitetaan kapasitiivisesti kondensaattoreiden avulla.



Kuva 8. Kondensaattorimagnetoitu epätahtigeneraattori (Aura&Tonteri, 1986).

4 Häkkikäämitty epätahtigeneraattori tuulivoimasovelluksessa

Kuvassa 9 on esitetty häkkikäämityn epätahtigeneraattorin kytkentä tuulivoimalassa.



Kuva 9. Häkkikäämitty epätahtigeneraattori tuulivoimalassa (Beainy, A ja muut, 2016)

4.1 Kiinteänopeuksinen tuulivoimala häkkikäämityllä epätahtigeneraattorilla

Beainy ja muut kertovat, kuinka häkkikäämitty epätahtigeneraattori pystyy toimimaan hyvin pienillä tuulen vaihteluväleillä vaihdelaatikon kautta (ilman taajuusmuuttajaa). Häkkikäämityssä epätahtigeneraattorissa roottorin nopeus ei pysty paljon vaihdella, koska se vaikuttaa jättämään. Nämä faktat huomioon ottaen aluksi häkkikäämittyä epätahtigeneraattoria pidettiin yleisesti generaattorivaihtoehtona kiinteänopeuksiselle tuulivoimalalle, eikä tuolloin vielä nähty vaihtoehtona että häkkikäämittyä epätahtigeneraattoria tullaan myös käyttämään vaihtuanopeuksisissa tuulivoimaloissa generaattorina. Maailman ensimmäisen tuulivoimasuunnitelman generaattoriratkaisuna käytettiin häkkikäämittyä epätahtigeneraattoria. Vuoteen 1998 asti useimmat tuuliturbiinien valmistajat rakensivat kiinteänopeuksisia tuuliturbiineita, joissa generaattorina oli epätahtigeneraattori (Carriveau, 2012).

4.2 Vaihtuvanopeuksinen tuulivoimala häkkikäimityllä epätahtigeneraattorilla

Häkkikäimityä epätahtigeneraattoria pystytään myös käyttämään vaihtuvanopeuksissa tuulivoimaloissa. Tällöin generaattorin ja verkon väliin kytketään taajuusmuuttaja (Beainy ja muut, 2016). SCIG on kuitenkin yleisempi tyyppi kiinteänopeuksisessa tuulivoimalassa ja yleensä vaihtuvanopeuksisessa tuulivoimalassa, jossa käytetään epätahtigeneraattoria, on generaattorin tyyppi kaksoissyötetty liukurengasgeneraattori (Carriveau, 2012).

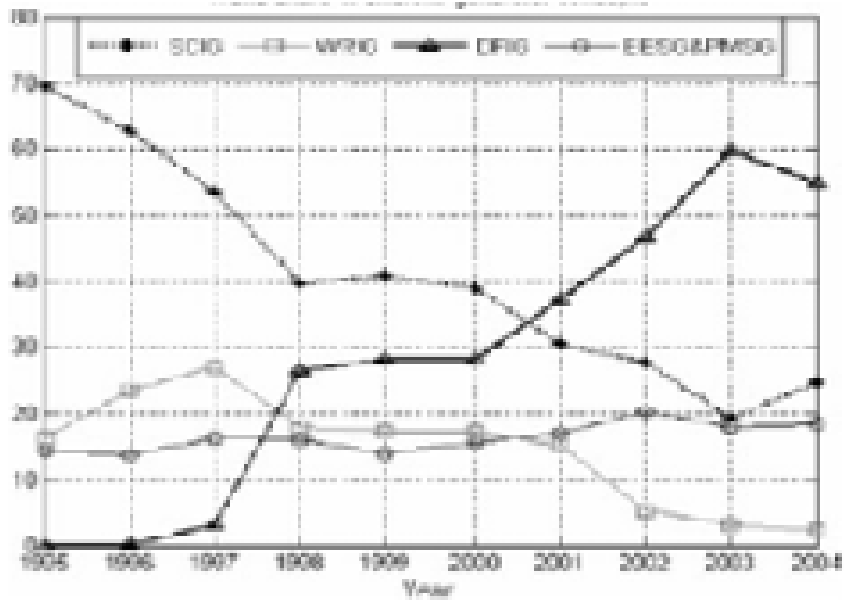
4.3 Häkkikäimityn epätahtigeneraattorin yleisyys

Häkkikäimity epätahtigeneraattori oli varsin yleinen tuulivoimaloiden alkuaikoina ja sitä käytettiin paljon vakionopeuksisissa tuulivoimaloissa. Vakionopeuksinen tuulivoimala pystyttiin kytkemään suoraan verkkoon ja väliin ei täten tarvittu muuntajaa.

Nykyään kun yleisimmin rakennetaan aidosti muuttuvanopeuksisia tuulivoimaloita, käytetään näiden generaattorityyppinä yleisimmin tahtigeneraattoria (Korpela, 2016, s.82).

Aidosti muuttuvanopeuksisen ja vakionopeuksisen tuulivoimaloiden välistä löytyy rajoitettu muuttuvanopeuksinen tuulivoimala tyyppi. Näiden generaattorityyppinä käytetään yleisimmin DFIG -generaattoria (Korpela, 2016, s.82).

Voidaan sanoa, että aiemmin hyvin yleisesti käytetty SCIG generaattori on menettämässä suosiotaan tuulivoimaloiden generaattorityyppinä ja sitä käytetään nykyään huomattavasti harvemmin, kuin aikaisemmin. Alla olevassa kuvassa näkyy erilaisten generaattorityyppien kehitys vuodesta 1996 vuoteen 2004 ja siitä näkyy selkeästi kuinka SCIG:n yleisyys on lähtenyt laskuun.



Kuva 10. Eri generaattorityyppien yleisyys asennetuille energiajärjestelmille 1995-2004 (Beainy, A ja muut, 2016)

5 Yhteenveto

Tässä tutkielmassa käsiteltiin häkkikäämityn epätahtigeneraattorin (SCIG) toimintaperiaatteita ja roolia tuulivoimaloissa. Tutkielma tarjoaa yleiskuvan tuulivoimalan rakenteesta ja toimintaperiaatteista.

Tutkielmassa tarkastellaan tuulivoimalan keskeisiä komponentteja ja käydään yksitellen eri tuulivoimalan komponentit läpi. Tämä tarjoaa lukijalle yleiskuvan tuulivoimalan toimintaperiaatteesta, joka auttaa hahmottamaan häkkikäämityn epätahtigeneraattorin roolia osana tuulivoimalaa.

Häkkikäämityn epätahtigeneraattorin etuja ovat sen yksinkertaisuus ja luotettavuus, mikä on tehnyt siitä todella yleisesti käytetyn generaattorityypin tuulivoimaloiden alkuaikoina.

Häkkikäämityn epätahtigeneraattorin käyttö tuulivoimaloissa on kuitenkin ollut vähenemään päin, tuulivoimaloiden muututtua vakionopeuksista tuulivoimaloista vaihtuvanopeuksiseksi tuulivoimaloiksi. Häkkikäämittyä epätahtigeneraattoria voidaan käyttää näissä taajuusmuuttajan kautta kytkettynä, mutta yleensä näissä sovelluksissa käytetään toista epätahtigeneraattorityyppiä (DFIG).

Lähteet

- Ackermann, T. (2012). *Wind power in power systems* (Second edition.). Wiley.
- Attaianese, C. (2020). How to prove that the number of poles in a squirrel-cage induction motor is the same as that of the stator? *Electrical engineering*, 102(3), 1083-1089.
<https://doi.org/10.1007/s00202-020-00937-4>
- Aura, L., Tonteri, A. J., & Werner Söderström osakeyhtiö. (1996). *Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet* (2. uud. p.). WSOY.
- Aura, L., Tonteri, A. J., Tonteri, A., & Werner Söderström osakeyhtiö. (1986). *Sähkömiehen käsikirja: 2, Sähkökoneet*. WSOY.
- Beainy, A., Maatouk, C., Moubayed, N., & Kaddah, F. (2016). *Comparison of different types of generator for wind energy conversion system topologies*.
<https://doi.org/10.1109/REDEC.2016.7577535>
- Breeze, P. (2016). *Wind power generation*. Academic Press.
- Rupp Carriveau. (2012). *Advances in Wind Power*. IntechOpen.
- Le Doeuff, R., & El Hadi Zaïm, M. (2013). *Rotating electrical machines*.
<https://doi.org/10.1002/9781118620649>
- Korpela, A. (2016). *Tuulivoiman perusteet* (1. painos.). AMK-Kustannus Oy Tammertekniikka.
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2002). *Wind energy explained: Theory, design and application*. John Wiley & Sons.
- Motiva. (2024). Tuulivoimateknologia. Noudettu 7.1.2024 osoitteesta
https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/tuulivoimateknologia
- Tilastokeskus. (2024). sähkön ja lämmön tuotanto. Noudettu 31.1.2025 osoitteesta
<https://stat.fi/julkaisu/cln1mjvxa5ml00bw1vf1pzcvo>