

Please note! This is a self-archived version of the original article.

Huom! Tämä on rinnakkaistallenne.

To cite this Article / Käytä viittauksessa alkuperäistä lähdettä:

Korpela, A., Gustafsson, F., Kohtala, M. & Virtanen, K. (2019) Demonstraatiolaitteisto vaakakselisten tuulivoimakonseptien havainnollistamiseen. TAMK-konferenssi – TAMK Conference 2019. Tampereen ammattikorkeakoulun julkaisuja, Erillisjulkaisuja, s. 44 - 52.

URL: <http://julkaisut.tamk.fi/PDF-tiedostot-web/Muut/TAMK-konferenssi-2019.pdf>

# 6. DEMONSTRAATIOLAITTEISTO VAAKA-AKSELISTEN TUULIVOIMAKONSEPTIEN HAVAINNOLLISTAMISEEN

*Aki Korpela, yliopettaja, Älykkäät siirtojärjestelmät ja energian tuotanto, Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus, TAMK*

*Frans Gustafsson, laivasähkösuunnittelija, AB-Marinel Oy*

*Matti Kohtala, laboratorioinsinööri, Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus, TAMK*

*Klaus Virtanen, lehtori, Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus, TAMK*

## Tiivistelmä

**T**ÄMÄ JULKAISU LIITTYY Tampereen ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan uusiutuvan energian oppimisympäristön, GreenLabin, kehitystyöhön. Yleisesti ottaen kyse on uusiutuvan sähköenergian osaamisen, ja tarkemmin sanottuna tuulivoimaosaamisen, vahvistamisesta insinööritutkinnossa. Tuulivoima ja aurinkosähkö ovat 2000-luvun voittavia teknologioita uusiutuvan sähköenergian tuotannossa, ja viimeisimmät raportit ilmastonmuutoksen vaatimista toimista tulevat todennäköisesti kasvattamaan niiden suosiota entisestään (IPCC 2018). Tässä julkaisussa esittelemme demonstraatio-laitteiston, jonka avulla pystymme havainnollistamaan eri tuulivoimalakonseptien sähköteknistä toimintaa käytännössä. Kyse on vakionopeuksisen sekä kahden rajoitetusti muuttuvanopeuksisen tuulivoimalakonseptin toiminnan havainnollistamisesta. Demonstraatiolaitteisto rakennettiin osana Frans Gustafssonin opinnäytetyötä.

## Tavoitteet

Koska uusiutuva sähköenergia on kasvavamassa määrin osa tulevaisuuden sähkövoimatekniikan insinöörin osaamisaluetta, sitä on työelämälähtöisyys edellä syytä lisätä myös ammattikorkeakoulun insinööritutkintoon. Tampereen ammattikorkeakoulun (TAMK) sähkövoimatekniikan suuntautumisvaihtoehdossa sähkökoneisiin liittyvällä osaamisella on perinteisesti ollut vahva roolinsa, ja tämän päälle onkin ollut hyvä rakentaa tuulivoimaloiden generaattorityyppeihin liittyvää osaamista.

Tavoitteena oli rakentaa demonstraatiolaitteisto, jolla pystytään havainnollistamaan kolmen eri tuulivoimalakonseptin sähköteknistä käyttäytymistä. Näistä ensimmäinen on vakionopeuksinen tuulivoimala, joka tunnetaan yleisesti myös *tanskalaisena* konseptina. Tämä vakionopeuksinen voimalatyyppe ei enää tänä päivänä ole yleisesti käytössä, mutta silti se on tuulivoimalan toiminnan yleisen ymmärtämisen kannalta keskeisen tärkeä voimalatyyppe. Siksi sillä onkin edelleen vankka paikkansa tuulivoimakoulutuksessa. Toinen demonstraatiolaitteistolla havainnollistettava tuulivoimalakonsepti on rajoitetusti muuttuvanopeuksinen voimala, jossa muuttuva nopeus perustuu generaattorin roottorikäämityksen sähköisen vastuksen kasvattamiseen. Myös tämä voimalatyyppe on pääosin jo poistunut markkinoilta, mutta koulutuksellisesti sekin puolustaa paikkaansa tarjoten tärkeää lisäymmärrystä tuulivoimageraattorin toiminnasta. Kolmas demonstraatiolaitteistolla havainnollistettava tuulivoimalakonsepti kantaa nimeä DFIG (Double-Fed Induction Generator). Kyseessä on nykyhetken suosituin suuren kokoluokan tuulivoimalakonsepti, jonka vapaa suomennos on kaksoissyötetty epätahtigeneraattori. Myös DFIG on rajoitetusti muuttuvanopeuksinen voimalatyyppe, jossa

muuttuva nopeus perustuu generaattorin roottorikäännykseen syötettävään jännitteeseen. Periaatteessa DFIG:n tekniikalla on mahdollista toteuttaa myös aidosti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala, jossa lapojen pyörimisnopeus seuraa lineaarisesti tuulenopeuden muutoksia. Kustannussyistä päädytään kuitenkin rajoitettuun muuttuvanopeuksisuuteen.

Rakennetun demonstraatiolaitteiston keskeinen tavoite on kasvattaa opiskelijoiden tuulivoimaosaamista sähköinsinöörin tutkinnossa. Vakionopeuksisen konseptin ymmärtäminen edellyttää periaatteessa vain perustietämystä sähkökoneista, mutta DFIG onkin sitten jo oleellisesti mutkikkaampi laitteisto. Hyvin tärkeää kuitenkin on, että rakennetun laitteiston avulla pystymme TAMKissa tarjoamaan tuulivoimalakonseptien toiminnan käytännön havainnollistamista teoriatunneilla esitettyjen periaatteiden tueksi.

## Tarve erilaisille tuulivoimakonsepteille

Miksi erilaisia tuulivoimalakonsepteja on ylipäättään olemassa? Kun lähdetään miettimään vastausta tähän kysymykseen, on muistettava, että suuren kokoluokan tuulivoiman tavoitteena on tuotetun sähköenergian hinnan minimoiminen. Tavoitteena ei siis ole maksimoida tuotettua energiamäärää, vaan tavoitteena on minimoida €/MWh voimalan elinkaaren aikana. Toisin sanoen tavoitteena on maksimoida voimalan rahallinen hyöty. Tämän seurauksena ei ole lainkaan itsestään selvää, mikä tuulivoimalakonsepti on missäkin kohteessa kokonaistaloudellisesti edullisin. Teknisesti hienoin tuulivoimalakonsepti on aidosti muuttuvanopeuksinen suoravetoinen (vaihteeton) tuulivoimala, mutta se ei

läheskään aina ole kustannustehokkain. Vaikka se tuottaakin eniten sähköenergiaa, suurten investointikustannustensa seurauksena tuotetun sähkön hinta voi voimalan elinkaaren aikana hyvinkin jäädä korkeammaksi kuin rajoitetusti muuttuvanopeuksisella DFIG:llä.

Vakionopeuksinen tuulivoimalakonsepti on teknisesti yksinkertaisin ja samalla investointikustannuksiltaan selvästi edullisin. Sana *vakionopeuksinen* viittaa siihen, että voimalan lavat pyörivät likimain vakionopeudella tuulennopeudesta riippumatta. Tämä yksinkertaistaa merkittävästi koko järjestelmän rakennetta, sillä vakionopeus mahdollistaa esimerkiksi sähkön tuottamisen suoraan oikealla taajuudella, jolloin voimalan kytkeminen sähköverkkoon yksinkertaistuu ja kustannukset laskevat. Investointikustannuksiltaan vakionopeuksinen tuulivoimalakonsepti onkin varsin edullinen. Konseptin ongelmat liittyvät kuitenkin energiantuotannon kompromisseihin, sillä vakionopeudella pyörivillä lavoilla ei ole mahdollista saada vaihtelevasta tuulesta optimihyötyä irti. Virtausopillisesti optimaalinen lavan toiminta edellyttää muuttuvan pyörimisnopeuden tuulennopeuden vaihdellessa. Tämän seurauksena vakionopeuksisen tuulivoimalan energiantuotanto jää yleensä niin paljon pienemmäksi kuin muuttuvanopeuksisilla konsepteilla, ettei tuotetun sähköenergian hinta minimoidu alhaisista investointikustannuksista huolimatta. Vaikka vakionopeuksisen tuulivoimalakonseptin nykyrooli uusissa suuren kokoluokan tuulivoimaloissa onkin enää marginaalinen, sillä on ollut keskeinen merkityksensä alan kehittämisessä.

Kun tuulivoimalaa lähdetään teknisesti kehittämään, lapojen pyörimisnopeus on saatava muuttumaan tuulennopeuden vaihdellessa. Yksikertaisimmin lapojen muuttuva pyörimisnopeus saadaan toteutettua kasvattamalla vakionopeuksisessa konseptissa käytettävän epätahtigeneraattorin roottorikäämityksen sähköistä vastusta. Tämän seurauksena sähkökoneen *jäykkyys* vähennee, mikä sallii lavoille rajoitetusti muuttuvan pyörimisnopeuden tuulennopeuden vaihdellessa. Sana *rajoitetusti* viittaa siihen, että lapojen pyörimisnopeus vaihtelee jonkin verran, vaikkei se seuraakaan lineaarisesti tuulennopeuden vaihteluita. Tässä teknisessä ratkaisussa ongelmiksi kuitenkin muodostuvat kasvavat lämpöhäviöt roottorikäämityksen sähköisen vastuksen kasvaessa, ja siksi valtaosa saavutetusta virtausopillisesta hyödystä kuluu kasvaviin häviöihin.

Tämä tuulivoimalakonsepti ei yleistynyt merkittävästi missään vaiheessa, mutta opetuskäytössä se on erinomainen lisä generaattorin toiminnan havainnollistamiseen ja ymmärryksen kasvattamiseen.

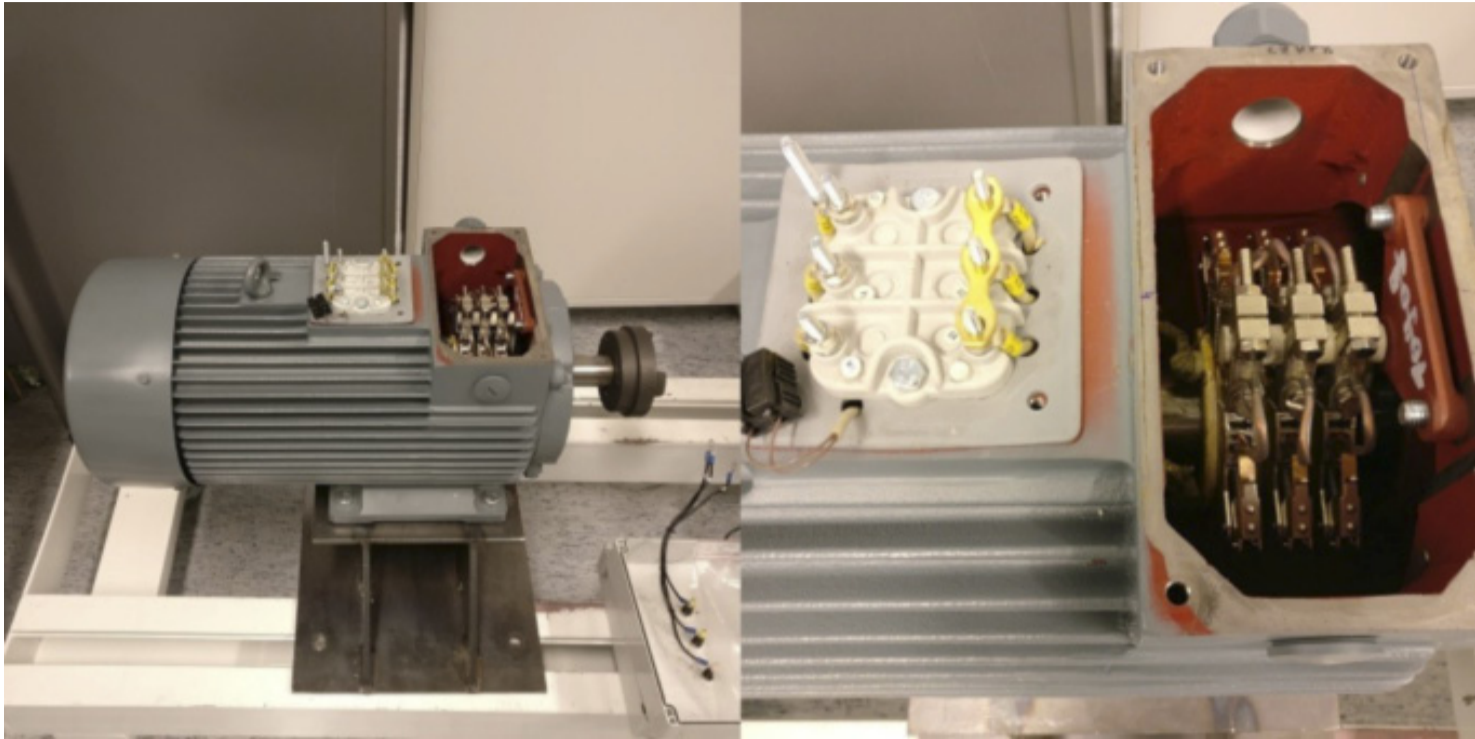
Lapojen muuttuva pyörimisnopeus on mahdollista toteuttaa myös siten, että generaattorin roottorikäämitykseen syötetään jännitettä, jonka taajuus riippuu vallitsevasta tuulennopeudesta. Tällöin kyseessä on DFIG, joka on tällä hetkellä suosituin suuren kokoluokan tuulivoimalakonsepti. DFIG:n toiminnan kunnollinen ymmärtäminen edellyttää ymmärrystä sähkökoneiden toimintaperiaatteista, eikä niitä lähdetä tässä julkaisussa ruotimaan sen tarkemmin. Oleellista on kuitenkin tiedostaa, että DFIG:ssä lämpöhäviöt eivät kasva edellä esitellyn konseptin tavoin, sillä pyörimisnopeuden muutos toteutetaan roottorikäämityksen sähköi-



sen ohjauksen avulla. Samalla kuitenkin koko järjestelmästä tulee monimutkaisempi, mikä nostaa väistämättä kustannuksia. Merkittävin kustannuslisäys liittyy roottorikäimitykseltä saatavaan sähköenergiaan, joka on muuttuvan pyörimisnopeuden seurauksena taajuudeltaan vaihtelevaa. Siksi tarvitaan suuntaajalaitteisto, jonka avulla energia saadaan muokattua sähköverkkoon kelpaavaan muotoon. Suuntaajalaitteisto on merkittävä kustannustekijä, ja sen hinta riippuu oleellisesti siitä sähkötehosta, joka suuntaajan tulee kestää. Jos suuntaajalaitteisto mitoitettaisiin tuulivoimalan täydelle teholle, DFIG:n avulla voitaisiin toteuttaa aidosti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala. Mutta koska tavoitteena on minimoida tuotetun sähköenergian hinta, useimmiten päädytään kompromissiin, jossa suuntaajan teho mitoitetaan noin 30 %:iin voimalan kokonaistehosta. Tämän seurauksena myös DFIG on rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimalakonsepti. (Korpela 2016)

## Toteutus

Rakennetun demonstraatiolaitteiston sydämenä toimii liukurengaskone, joka on esitetty kuvassa 1. Liukurengaskone hankittiin TAMKin sähkövoimatekniikan laboratorioon, sillä se mahdollistaa kaikkien edellä mainittujen tuulivoimalakonseptien toteuttamisen. Vakionopeuksinen tuulivoimala syntyy, kun liukurengaskoneen roottorikäimityksen päät oikosuljetaan. Jos oikosulun sijaan roottorikäimitysten päiden välille kytketäänkin sähköistä vastusta, saadaan toteutettua rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala. Ja kun liukurengaskonetta ohjataan syöttämällä sopivantaajuista jännitettä roottorikäimityksiin, pystytään havainnollistamaan DFIG:n toimintaa.



Kuva 1. Liukurengaskone (vas.) ja lähikuva roottorikämmien ulosotoista (oik.) kuvattuna TAMKin sähkövoimatekniikan GreenLabissa.

## Tulokset ja pohdintaa

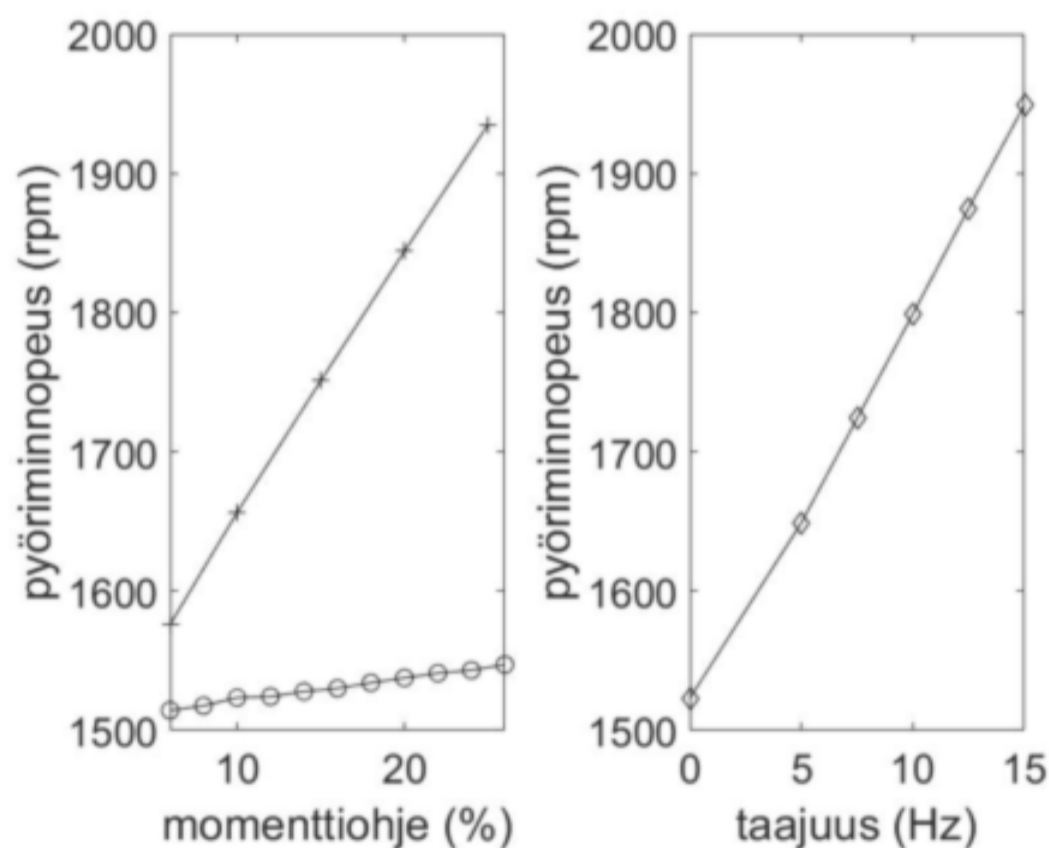
Demonstraatiolaitteistolla mitatut tulokset on esitetty kuvassa 2. Havaitaan, että vakionopeuksisen tuulivoimalakonseptin (o) pyörimisnopeus kasvaa vain muutaman prosentin, vaikka kasvavan tuulenopeuden aiheuttama vääntömomentti kasvaa 25 %. Tilanne muuttuu oleellisesti, kun koneen jäykkyyttä heikennetään roottorikämmityksen sähköistä vastusta kasvattamalla. Kuvassa 2 on havainnollistettu, kuinka jo sähköisen vastuksen kasvattaminen 1.7  $\Omega$ :lla nostaa pyörimisnopeutta parhaimmillaan noin 30 % (+). Tässä teknisessä ratkaisussa ongelmana on kuitenkin lämpöhäviöiden kasvaminen, mikä syökin suuren osan saavutetusta virtausopillisesta hyödystä.

Kuvan 2 oikeanpuoleinen kuvaaja esittää DFIG:n toimintaa, kun roottorikämmitykseen syötetyn jännitteen taajuus muuttuu. Huomataan, että pyörimisnopeuden kasvussa päästään helposti sa-



moihin lukemiin kuin sähköisen vastuksen kasvattamiseen perustuvassa konseptissa. Nyt oleellinen hyöty on kuitenkin siinä, etteivät häviöt kasva, vaan valtaosa virtausopillisesta tehonlisäyksestä saadaan suoraan hyödynnettyä kasvavana sähkötehona.

DFIG on hyvä esimerkki siitä, kuinka voittavat teknologiat ovat usein teknis-taloudellisia kompromisseja. Kyseessä on nykymarkkinoiden suosituin suuren kokoluokan tuulivoimalakonsepti, vaikka se ei ole teknisesti edistynein. Se on kuitenkin teknisesti riittävän hyvä, jotta energiantuotanto nousee riittävän korkeaksi. Ja toisaalta se on investointikustannuksiltaan oleellisesti halvempi kuin teknisesti edistynein konsepti, jossa käytetään räätälöityjä suoravetoisia kestromagneettigeneraattoriratkaisuja.



Kuva 2. Vääntömomentin vaikutus roottorin pyörimisnopeuteen vakionopeuksisessa (o) ja roottorin sähköisen vastuksen kasvattamiseen (+) perustuvassa tuulivoimakonseptissa. Oikeanpuoleisessa kuvassa on esitetty DFIG:n roottorikäätymykseen syötetyn jännitteen taajuuden vaikutus pyörimisnopeuteen. (Gustafsson 2017)

## Lähteet

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, Global Warming of 1.5 oC, 6 October, 2018.

Gustafsson, F. 2017. Liukurengasgeneraattorin käyttö tuulivoimalassa, opinnäytetyö, Sähkötekniikka, Tampereen ammattikorkeakoulu.

Korpela, A. 2016. Tuulivoiman perusteet. Tampere: Tammertekniikka.