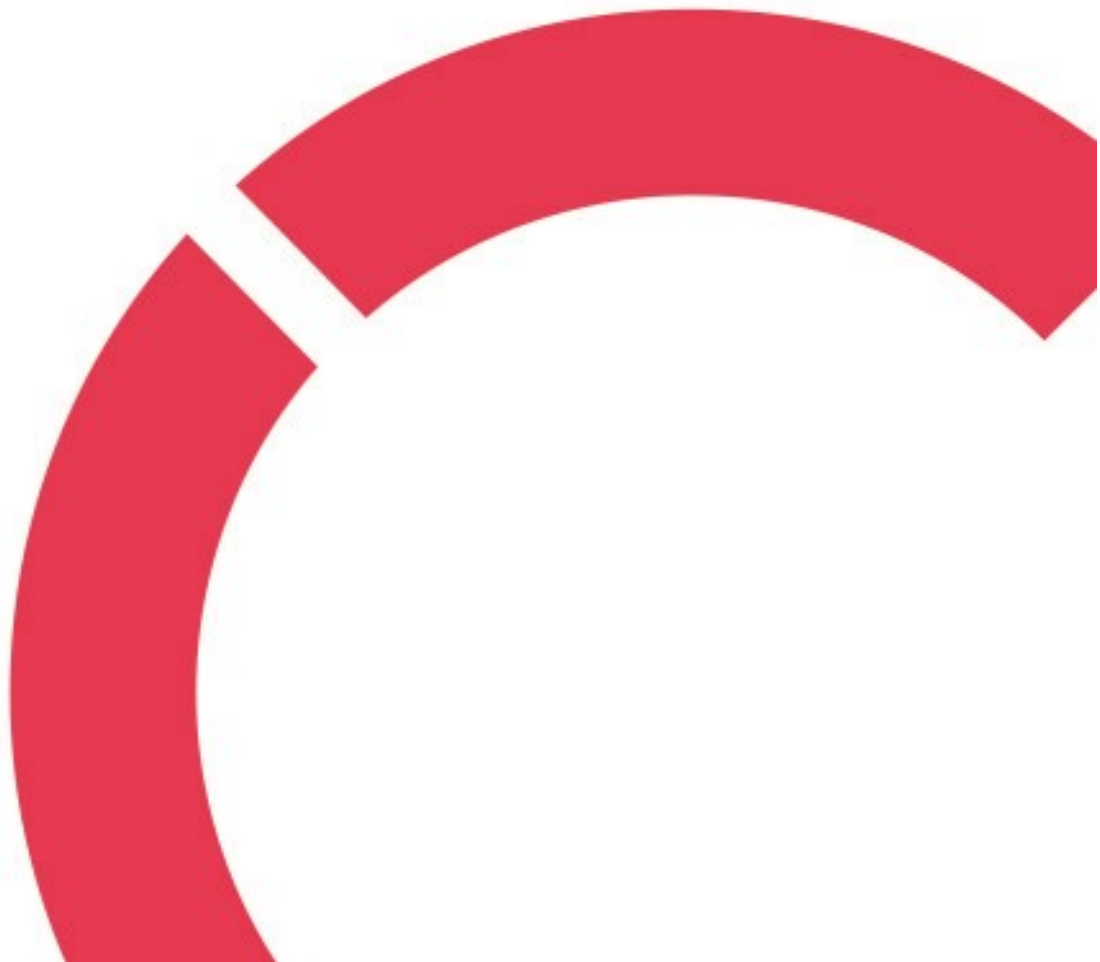


Tommi Härkönen

PIENTUULIVOIMALAN SUOJAUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU

Case Centria-ammattikorkeakoulu

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus
Joulukuu 2024**



Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Marraskuu 2024	Tekijä/tekijät Tommi Härkönen
Koulutus Sähkö- ja automaatiotekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
Työn nimi PIENTUULIVOIMALAN SUOJAUSJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU. Case Centria-ammattikorkeakoulu		
Työn ohjaaja Hannu Puomio		Sivumäärä 28 + 7
Työelämäohjaaja		
<p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli suunnitella pientuulivoimalan suojausjärjestelmä osaksi UUPO-hanketta. Hankkeen päätavoitteena on luoda koulutuspolkuja uusiutuviin energiajärjestelmiin. Opinnäytetyö koostuu kahdesta osasta, joista ensimmäisessä selvitettiin asetuksia ja määräyksiä pientuotantolaitoksiin ja pientuulivoimaloihin liittyen. Tuulivoimala on moniosainen kokonaisuus, joten ensimmäisessä osassa myös käytiin läpi sen rakennetta. Lisäksi perehdyttiin relesuojauksen perusteisiin.</p> <p>Jälkimmäisessä osassa käytiin läpi pientuulivoimalaa koskevat lupa-asiat, suojausjärjestelmän suunnittelua, laskelmia ja niihin liittyviä määräyksiä.</p> <p>Pientuulivoimalan suojausjärjestelmälle on monia vaihtoehtoja, mutta tämän opinnäytetyön tuloksena saatiin laadittua yksi toteutustapa.</p> <p>Opinnäytetyön toimeksiantaja oli Centria-ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan laboratorio.</p>		
Asiasanat Pientuulivoimala, relesuojaus, suojausjärjestelmä.		

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date November 2024	Author Tommi Härkönen
Degree programme Electrical- and automation engineering		
Name of thesis PROTECTION SYSTEM DESIGN OF A SMALL WIND TURBINE. Case Centria University of Applied Sciences		
Centria supervisor Hannu Puomio	Pages 28 + 7	
Instructor representing commissioning institution or company		
<p>The purpose of the thesis was to design a protection system for a small wind turbine as a part of UUPO project. The main objective of the project is to create education paths for renewable energy systems. The thesis consists of two parts. In the first part rules and regulations for small scale production plants and small wind turbines were clarified. Wind turbine is a multi-part entity, so its structure was studied. In addition, the first part included basics of relay protection.</p> <p>In the latter part, permits concerning the small wind turbine, the planning of the protection system and regulations related to calculations are discussed.</p> <p>There are many options for the protection system of a small wind turbine, but because of this thesis, one implementation method was drawn up.</p> <p>The commissioner of the thesis was the electrical power engineering laboratory of Centria University of Applied Sciences.</p>		
Key words Protection system, relay protection, small wind turbine.		

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

kV

Kilovoltti.

MW

Megawatti.

Tasasuuntaaja

Muuntaa vaihtovirran tasavirraksi.

Vaihtosuuntaaja

Muuntaa tasavirran vaihtovirraksi.

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 STANDARDIT JA MÄÄRÄYKSET	2
2.1 Jakeluverkkoyhtiö.....	2
2.2 Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset	2
3 TUULIVOIMALAN RAKENNE	4
3.1 Torni.....	6
3.2 Roottori	7
3.3 Naselli	8
3.4 Sähköiset ominaisuudet	9
3.4.1 Tasasuuntaaja.....	10
3.4.2 Vaihtosuuntaaja	10
4 RELESUOJAUS	12
4.1 Virtareleet	13
4.2 Jännitereleet.....	13
4.3 Taajuusreleet	14
5 HANKKEEN LUPA	15
5.1 Toimenpidelupa.....	15
6 CASE-KOHTEEN SUOJAUSJÄRJESTELMÄ	16
6.1 Kaapeleiden kuormitettavuudet	16
6.2 Syötön automaattinen poiskytkentä, oikosulkusuojaus ja jännitteenalenema.....	20
6.3 Tuulivoimalan toimittaja.....	23
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	25
LÄHTEET	26
LIITTEET	
KUVIOT	
KUVIO 1. Tuulisähköjärjestelmän liittäminen sähköverkkoon	10
KUVIO 2. Tasasuuntaajan yksinkertaistettu toimintaperiaate.....	10
KUVIO 3. Vaihtosuuntaajan yksinkertaistettu toimintaperiaate	11
KUVAT	
KUVA 1. Tuulivoimalan rakenne	4
KUVA 2. Pysty akselisen pientuulivoimalan rakenne.....	5
KUVA 3. Potkurityyppinen pientuulivoimala	5
KUVA 4. Yleisimmät tornityypit.....	6
KUVA 5. Tyypillinen tuulivoimalan konehuone.....	9
KUVA 6. Vihreäwatti vertikaali tuulivoimala.....	24

TAULUKOT

TAULUKKO 1. Tyypiluokat mitoitusasteen mukaan	3
TAULUKKO 2. Järjestelmien virrankulutukset	17
TAULUKKO 3. Testikeskuksen nousukaapelin asennusolosuhteet ja korjauskertoimet.....	18
TAULUKKO 4. Tuulivoimalan syöttökaapelin asennusolosuhteet ja korjauskertoimet	18
TAULUKKO 5. Vetyvaraston syöttökaapelin asennusolosuhteet ja korjauskertoimet.....	19
TAULUKKO 6. Muiden järjestelmien arvot	21

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Centria-ammattikorkeakoulun sähkövoimatekniikan laboratorio. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella pientuulivoimalan suojausjärjestelmä osaksi uusiutuvan energian koulutuspolut -hanketta (UUPO). Hankkeessa luodaan koulutuspolkua vastaamaan tulevaisuuden työvoimatarpeita uusiutuvien energiajärjestelmien parissa.

Pientuulivoimalan hankkimisessa pitää huomioida lukuisia asioita, joten luvussa 2 perehdytään kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:n, Ylivieskan alueella toimivan jakeluverkkoyhtiö Herrfors Oy Ab:n ja Suomen standardoimisliiton pientuontatolaitoksia ja pientuulivoimaloita koskeviin asetuksiin ja määräyksiin.

Seuraavaksi luvussa 3 käsitellään tuulivoimalan rakennetta ja voimalan toimintaa vaihtuvissa tuuliolosuhteissa, käydään läpi muutamia yleisimpiä tuulivoimalatyyppejä ja perehdytään siihen, kuinka tuulivoimalan tuottama sähköenergia muutetaan sähköverkkoon sopivaan muotoon. Relesuojauksen perusteita ja muutamia yleisimpiä suojarelytyyppejä käsitellään luvussa 4. Luvussa 5 käydään läpi, millainen tuulivoimalan lupaprosessi on.

Opinnäytetyön lopuksi luvussa 6 esitetään suojausjärjestelmään liittyvät laskelmat. Laskelmissa on myös huomioitu UUPO-hankkeen muut energiajärjestelmät, joita ovat vetyvarasto ja aurinkovoimala.

2 STANDARDIT JA MÄÄRÄYKSET

Rakennuksen sähköjärjestelmään liitettävän tuulienergiaa hyödyntävän laitteiston tulee noudattaa seuraavia lakeja, standardeja, asetuksia ja määräyksiä: sähköturvallisuuslaki 410/1996, sähköturvallisuusasetus 498/1996; standardit SFS 6000-5-55, SFS-EN 50160, SFS-EN 60204-1, SFS-EN 60439-1, SFS-EN 61400-2, SFS-EN 50438 sekä kauppa- ja teollisuusministeriön päätökset 1193/1999, 516/1996 ja 517/1996 muutoksineen. Suurempien tuulivoimaloiden vaatimuksia käsitellään kansainvälisessä IEC TC 88 -komitean ylläpitämässä standardisarjassa IEC 61400. (Sesko ry; Sähkötieto ry 2016, 1.)

2.1 Jakeluverkkoyhtiö

Ennen laitteiston tilaamista, asentamista ja liittämistä tulee selvittää laitteiston alueella olevan jakeluverkkoyhtiön vaatimukset. Ylivieskan sähköverkkoa ylläpitävä Herrfors Oy Ab velvoittaa, että laitteisto noudattaa ST-käsikirja 53.34:ssa mainittuja standardeja, Energiateollisuus ry:n laatimaa verkostosuositusta YA 9:23 sekä Fingrid Oyj:n asettamia järjestelmätekniisiä vaatimuksia tuotantolaitteistolle. Laitteiston asennukseen tulee valita sähköurakoitsija, joka on listattu Tukesin toiminnanharjoittajarekisteriin. (Herrfors Oy Ab.)

2.2 Voimalaitosten järjestelmätekniiset vaatimukset

Mikäli Suomen sähkövoimajärjestelmään kytkeytyvä voimalaitos on mitoitusteholtaan yli 0,8 kW, tulee sen täyttää voimalaitosten järjestelmätekniiset vaatimukset VJV2018. Lähtökohtana näille vaatimuksille on Euroopan komission asetus 2016/631, johon Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj on lisännyt omat säädöksensä. Järjestelmätekniiset vaatimukset koskevat Fingrid Oyj:n omistaman verkon lisäksi liittymispisteessä toimivan jakeluverkkoyhtiön ja sen verkkoon liitettäviä voimalaitoksia. Voimalaitoksen haltijalla on velvollisuus täyttää ja ylläpitää näitä vaatimuksia ja ne ovat sitovia. (Fingrid Oyj a.)

Voimalaitosten järjestelmätekniiset vaatimukset on jaettu tyyppiluokkiin a, b, c, d, ja ne määräytyvät liitettävän voimalaitoksen mitoitus-tehon ja liittymispisteessä olevan jännitetasen perusteella. Teknisten ja toiminnallisten vaatimusten lisäksi VJV2018:ssa on tarkennettu voimalaitoksista toimitettavat tiedot,

kuten laskentamalli suorituskyvyn todentamiselle ja laitoksille suoritettavat käyttöönottokokeet. Voimalaitoksen ollessa tyyppiluokkaa d ja mitoitustehon ylittäessä 30 MW tulee sen järjestelmätekniset vaatimukset todentaa hankekohtaisella todentamisprosessilla ja erityisjärjestelyin tapahtuvalla ilmoitusmenettelyllä. Tyyppiluokat näkyvät taulukossa 1. (Fingrid Oyj a.)

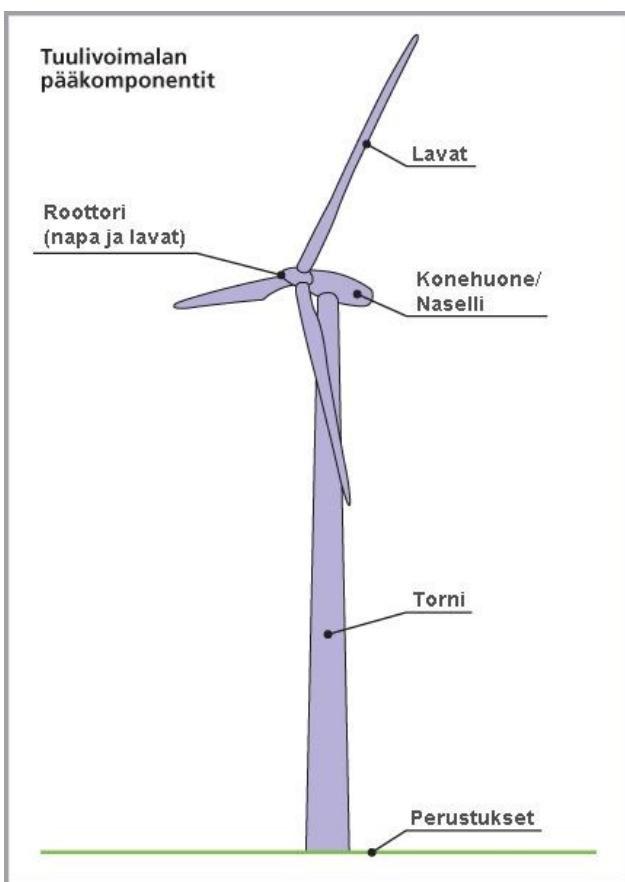
TAULUKKO 1. Tyyppiluokat mitoitustehon mukaan (Fingrid Oyj 2018)

Tyyppi-luokka	Liittymispisteen jännitetaso	Ehto	Voimalaitoksen mitoitusteho P_{max}
Tyyppi A	Liittymispisteen jännitetaso on alle 110 kV ¹	ja (*)	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 0,8 kW mutta alle 1 MW. ($0,8 \text{ kW} \leq P_{max} < 1 \text{ MW}$)
Tyyppi B	Liittymispisteen jännitetaso on alle 110 kV ¹	ja (*)	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 1 MW mutta alle 10 MW. ($1 \text{ MW} \leq P_{max} < 10 \text{ MW}$)
Tyyppi C	Liittymispisteen jännitetaso on alle 110 kV	ja (*)	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 10 MW mutta alle 30 MW. ($10 \text{ MW} \leq P_{max} < 30 \text{ MW}$)
Tyyppi D	Liittymispisteen jännitetaso on vähintään 110 kV	tai (+)	Voimalaitoksen mitoitusteho on vähintään 30 MW. ($P_{max} \geq 30 \text{ MW}$)

Tyyppiluokkien järjestelmäteknisiin vaatimuksiin kuuluu lukuisia vaatimuksia, kuten yleiset vaatimukset, voimalaitosten dokumentointi ja niistä toimitettavat tiedot, reaaliaikaiset mittaukset, tiedonvaihto ja instrumentointi, tahtikonevoimalaitosten pätötehon ja taajuuden säätö, loistehokapasiteetti, jännitteensäätö, käyttöönottokokeet ja mallinnusvaatimukset. Nämä samat vaatimukset koskevat myös suuntaajakytkettyjä voimalaitoksia. (Fingrid Oyj 2018.) UUPO-hankkeen tuulivoimala kuuluu mitoitusteholtaan tyyppiluokkaan A, jonka tarkempia ehtoja ja vaatimuksia käsitellään luvussa 6.

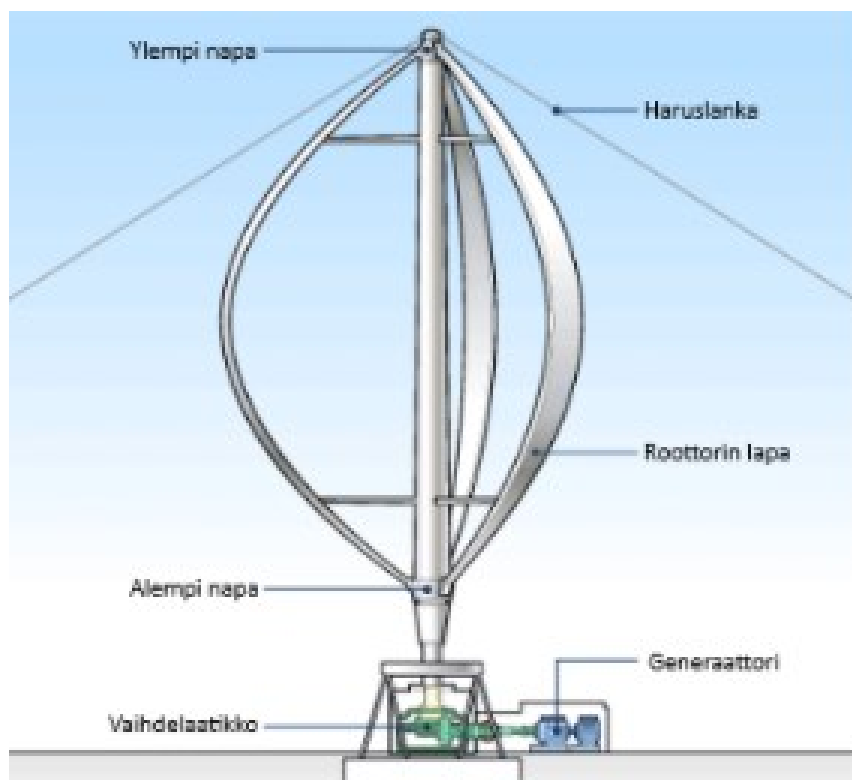
3 TUULIVOIMALAN RAKENNE

Tuulivoimalan rakenne muodostuu perustuksista, tornista, konehuoneesta ja roottorista. Tuulivoimalan roottori koostuu lavoista ja navasta, johon ne kiinnittyvät. Konehuone sisältää tuulivoimalalle oleellisia komponentteja, kuten generaattorin, voimansiirron, jäähdytysjärjestelmän ja tarvittaessa suunnanmuutosmoottorin. Yleisesti ottaen tornin, konehuoneen ja roottorin katsotaan olevan tuulivoimalan pääkomponentteja. Pääkomponentteja tarkastellaan lähemmin luvuissa 3.1–3.3. Kuvassa 1 näkyy tyypillisen tuulivoimalan rakenne. (Motiva Oy 2024 a; Korpela 2016, 49–51.)



KUVA 1. Tuulivoimalan rakenne (Motiva 2024 a)

Pientuulivoimaloita on useita malleja. Kuvissa 2 ja 3 näkyvät yleisimmät tyypit. Pysty akselisessa voimalassa generaattori sijaitsee tornin alaosassa ja lavat kiinnittyvät torniin tukirakenteen avulla (Puomio 2024). Potkurityyppisessä tuulivoimalassa pääkomponentit ovat samat kuin suuremman kokoluokan voimalassa ja se on lisäksi varustettu peräsimellä. (Motiva Oy 2024 b; WINDEXchange.)



KUVA 2. Pysty akselisen pientuulivoimalan rakenne (mukaillen Hussany 2023, 34)



KUVA 3. Potkurityyppinen pientuulivoimala (Motiva Oy 2024 b)

3.1 Torni

Tuulivoimalan torni on yleensä putkimainen rakenne, jonka materiaalina käytetään betonia, terästä tai niiden yhdistelmää. Torni voi muodostua useammasta elementistä sen korkeuden mukaan, ja se voidaan koota paikan päällä tai pienemmät tornit voivat olla valmiiksi kasattuina jo valmistusvaiheessa. Nimellisteholtaan pienemmän tuulivoimalan torni voi olla myös teräksestä valmistettu ristikkomasto. (Metsähallitus 2020; Motiva Oy 2024 b.) Kuvassa 4 näkyvät yleisimmät tornityypit vasemmalta alkaen: terästorni, betoni- ja terästornin yhdistelmä sekä betonitorni.



KUVA 4. Yleisimmät tornityypit (Metsähallitus 2020)

Tuulivoimalan perustuksiin on olemassa erilaisia vaihtoehtoja voimalan korkeudesta, painosta ja maolosuhteista riippuen. Maatuulivoimaloiden yleisin perustamistapa on maavarainen perustus. Maavarainen perustaminen voidaan valita tilanteessa, jossa alkuperäisen maaperän kantama on riittävä tuulivoimalaan kohdistuvat kuormat huomioiden. Mikäli kantamaa ei ole riittävästi, voidaan käyttää perustamiseen niin sanottua massanvaihtoa, missä perustusten pohja täytetään esimerkiksi murskeella, jonka päälle betoni valetaan. Mikäli maaperän kantokyky ei ole riittävä eikä massanvaihtoa katsota enää kustannustehokkaaksi vaihtoehdoksi, perustukset tehdään paalutuksen päälle. Pientuulivoimaloissa perustuksena käytetään sijaintipaikan mukaan haruksia ja vaijereita tai valettua perustusta. (Metsähallitus 2020; Motiva Oy 2024 b.)

3.2 Roottori

Roottori on tuulivoimalan pyörivä ja tuulienergiaa hyödyntävä osa, johon myös lavat kiinnittyvät. Roottorin avulla voidaan säätää tuulivoimalan teho optimaaliseksi tai pysäyttää se kokonaan, jos tuulen nopeus kasvaa liian suureksi. Kovalla tuulella tehon rajoittamisella pyritään välttämään tuulivoimalaan kohdistuvat mekaaniset rasitukset. Yleisimmät tehonsäätömenetelmät ovat passiivinen sakkaussäätö, lapakulman säätö ja aktiivinen sakkaussäätö. (Korpela 2016, 67–68.)

Mikäli tuulivoimala on vakionopeuksinen, eli sen pyörimisnopeus ei ole riippuvainen tuulennopeudesta, voidaan sen roottori suunnitella sakkaamaan tuulennopeuden kasvaessa liian suureksi. Tällaisessa voimalassa lavat on pultattu roottoriin kiinni, joten lapakulmien säätäminen ei ole mahdollista. Sakkaussäätöä kutsutaan passiiviseksi säädöksi, sillä sen toiminta perustuu automaattiseen säätöön tuulen nopeuden kasvaessa. Passiivista sakkaussäätöä voidaan myös hyödyntää tuulivoimalan mekaanisten rasitusten välttämiseksi. Ilmiönä sakkaamisella tarkoitetaan tilannetta, jossa roottorin lavan ja tuulen virtauksen kohtauskulma kasvaa niin suureksi, että virtaus alkaa irrota lavan pinnasta. Samalla roottorin mekaanisen tehon ja vääntömomentin kannalta oleellinen nostovoima heikkenee huomattavasti. (Korpela 2016, 60, 68.)

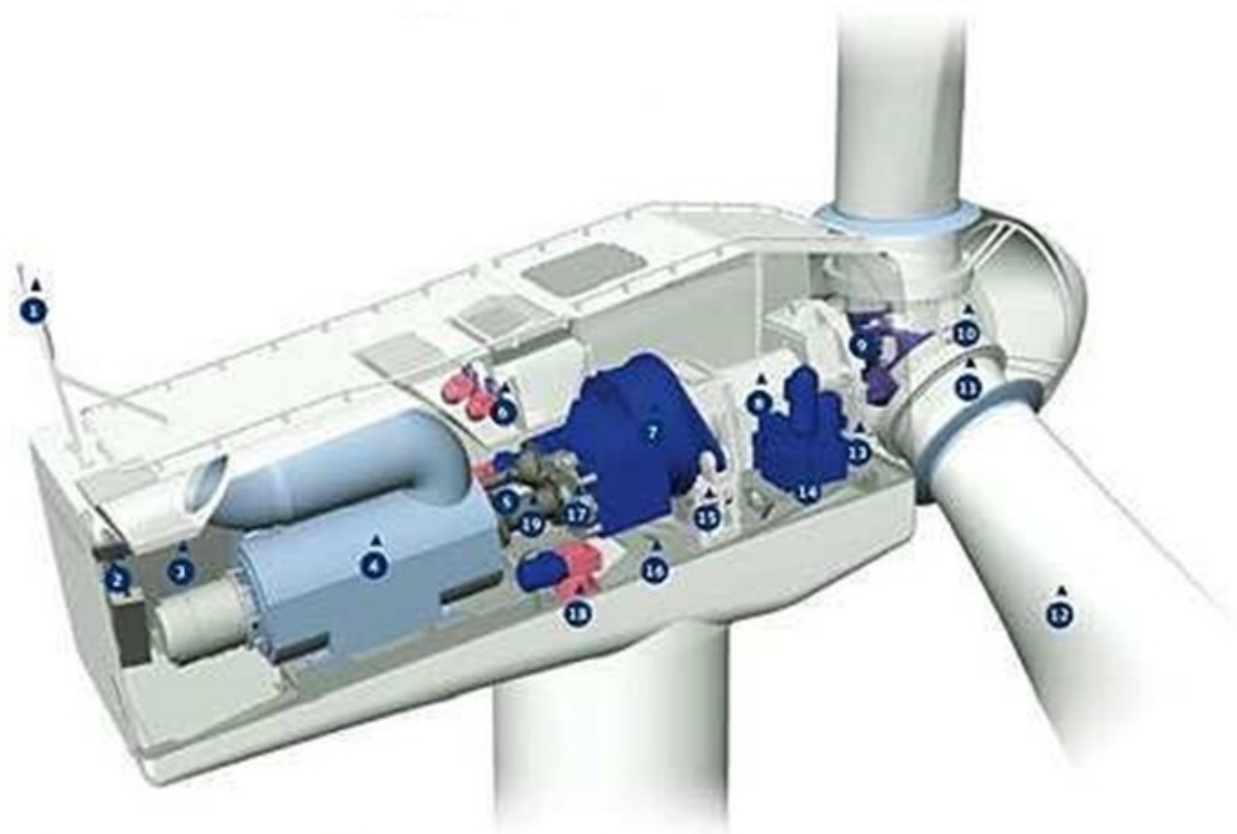
Lapakulman säätöä voidaan käyttää tuulivoimaloissa, joiden nopeus muuttuu tuulennopeuden mukana. Säätö perustuu mittaus- ja instrumentointilaitteiston tietoihin, jolloin se on olosuhteiden mukaista. Tällöin puhutaan aktiivisesta tehonsäätömenetelmästä. Tällä menetelmällä pyritään säätämään lapojen kohtauskulma optimaaliseksi alhaisissa tuulennopeuksissa aina nimellisnopeuteen asti tuulivoimalan tehontuoton kannalta, joka on yleensä 10–15 m/s. Tätä suuremmilla nopeuksilla lavat säädetään siten, että kohtauskulma pienenee, mutta se ei kuitenkaan vähennä tuulivoimalan tehontuottoa. Jos tuulen nopeus yltyy myrskylukemiin (>21 m/s), voimala pysäytetään sen suojelemiseksi. (Ilmatieteenlaitos 2023; Korpela 2016, 68.)

Kolmas tehonsäätömenetelmä, aktiivinen sakkaussäätö, on passiivisen sakkaussäädön ja lapakulmasäädön yhdistelmä. Jos tuulennopeus on alhainen, pyritään kohtauskulma säätämään siten, että tuulivoimala pystyy tuottamaan optimaalisen määrän tehoa. Nimellisnopeuden ylittyessä lapojen sakkaaminen suoritetaan hallitusti. Hallitussa sakkaamisessa lapakulmat säädetään vastakkaiseen suuntaan kuin lapakulman säädössä. Aktiivisella sakkaussäädöllä on katsottu olevan merkittävä käytännön hyöty, sillä tuulivoimalan tehontuotanto pysyy huomattavasti tasaisempuna tuulen nimellisnopeuden yläpuolella lapakulmasäätöön verrattuna. (Korpela 2016, 68–69.)

3.3 Naselli

Tuulivoimalan naselli eli konehuone koostuu useasta yksittäisestä komponentista, jotka muodostavat voimalan kannalta tärkeän kokonaisuuden. Kuvassa 5 näkyy tyypillinen tuulivoimalan rakenne. Roottori, joka muodostuu lapasäädöstä (9), navasta (10), lapojen laakeroinnista (11) ja lavoista (12), kiinnittyy pääakselin (8) ja tukirakenteen (15) avulla tuulivoimalan vaihdelaatikkoon (7). Mikäli tuulivoimala ei sisällä vaihteistoa, toimii tuulivoimalan pääakseli samalla generaattorin (4) akselina. Roottorin lukitusjärjestelmällä (13) ja levyjarrulla (17) estetään nasellin kääntyminen ja lapojen pyöriminen, kun tuulivoimala on pysähdyksissä esimerkiksi tuulen nopeuden ollessa liian suuri tai kun tuulivoimalaa huolletaan. Kytkimen (19) avulla vähennetään vaihdelaatikon ja generaattorin välisiä mekaanisia rasituksia. (Magari, Smith, Schiff, Rohr 2014, 102-104; Drovak 2017; Office of energy efficiency and renewable energy; Korpela 2016, 49–51; Motiva Oy 2024 a.)

Tuulivoimalan ohjausjärjestelmä (3) yhteistyössä nasellin katolla sijaitsevien mittaus- ja instrumentointikojeiden kanssa (1) huolehtivat tuulivoimalan käynnistyksestä ja pysäyttamisestä. Ohjausjärjestelmän yhteydessä on myös lapasäädön sylinteri (5). Jotta tuulivoimala kykenee kääntymään kohtisuoraan tuulen suuntaan, tarvitsee se mittaustietojen lisäksi suunnanmuutosmoottorin ja laakeroinnin (18) nasellin ja tornin (16) välille. Jäähdytysjärjestelmää (6) tarvitaan, sillä mekaanisten komponenttien pyörivät liikkeet tuottavat lämpöä. Hydraulikkajärjestelmän (14) avulla voidellaan tuulivoimalan laakeroiteja. Lisäksi konehuoneesta löytyy myös hissi (2). (Magari ym. 2014, 102-106; Korpela 2016, 51; Motiva Oy 2024 a; Office of energy efficiency and renewable energy.)



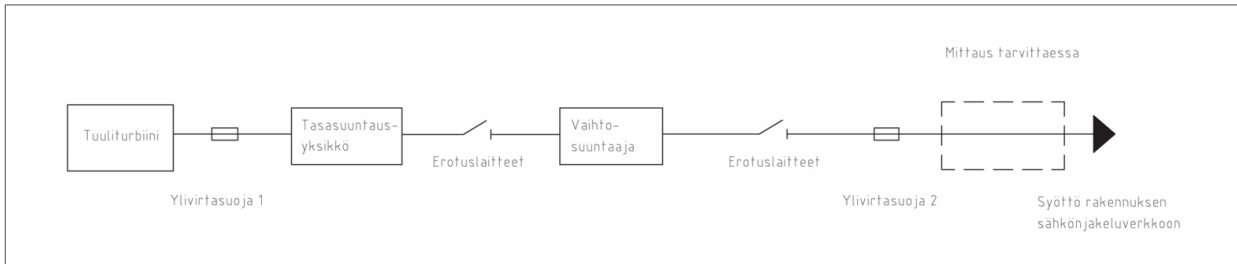
KUVA 5. Tyypillinen tuulivoimalan konehuone (mukaillen Magari ym. 2014, 103)

3.4 Sähköiset ominaisuudet

Standardissa SFS 6000-5-55, Pienjännitesähköasennukset, määritellään kiinteistöihin liitettävän tuulivoimalan syöttökaapelin mitoitusta koskevat vaatimukset. Standardissa myös määritellään, että jakeluverkon toiminta ei saa häiriintyä tuulivoimalan generaattorista ja se tulee varustaa suojalaitteella, joka kytkee generaattorin irti verkosta esimerkiksi vikatilanteen sattuessa tai jos generaattorin tuottaman jännitteen ja taajuuden arvot poikkeavat jakeluverkon arvoista. Vikatilanteiden suojaus käsitellään standardissa SFS-EN 60204-1, Koneiden turvallisuus osa 1: Yleiset vaatimukset. Sähkön laatua ja ominaisuuksia koskevat määräykset ovat standardissa SFS-EN 5160, Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet. (Sähkötieto ry 2016, 3.)

Normaaliolosuhteissa tuulivoimalan vaihtosuuntaaja huolehtii, että jakeluverkon ja tuulivoimalan jännitteen taajuus vastaavat toisiaan. Tällöin puhutaan tuulivoimalan tahdistamisesta. Vaihtosuuntaaja automatiikka huolehtii myös voimalan irti kytkemisestä. Kuviossa 1 on esimerkki tuulisähköjärjestelmän

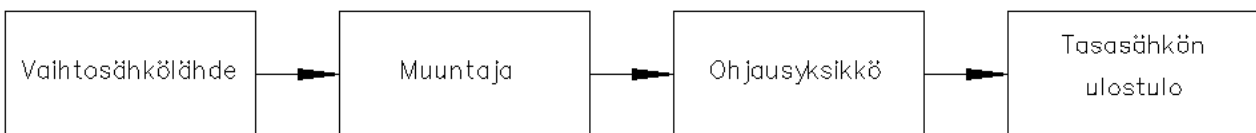
liittämisestä rakennuksen sähköverkkoon. Ylivirtasuojaukset mitoitetaan vaihtosuuntaajan syöttämän virran mukaisesti ja järjestelmässä täytyy olla laite, jolla sen voi erottaa yleisestä sähköverkosta. Erotuslaitteen on oltava jakeluverkon haltijan käytettävissä. (SFS-6000-5-55:2022, 12; Sähkötieto ry 2016, 3.)



KUVIO 1. Tuulisähköjärjestelmän liittäminen sähköverkkoon (Sähkötieto ry 2016, 4)

3.4.1 Tasasuuntaaja

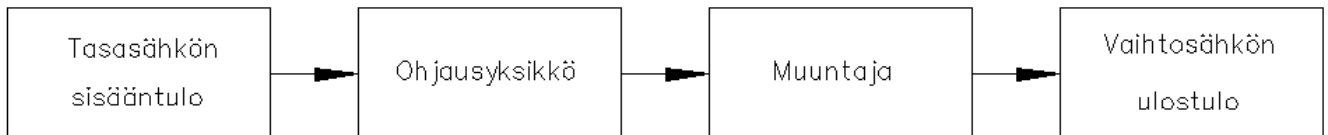
Nyky aikaisten tuulivoimaloiden generaattoreiden pyörimisnopeus vaihtelee tuulennopeuden mukaan, jolloin myös generaattorin tuottaman vaihtosähkön taajuus vaihtelee. Tämä taajuuden vaihtelu voi olla haitallista ja aiheuttaa häiriöitä kulutuskojeille, jolloin se pitää muuttaa tasasuuntaajassa tasasähköksi. Kuviossa 2 esitetään tasasuuntaajan yksinkertaistettu toimintaperiaate. Ennen tasasuuntaajaa generaattorin tuottama vaihtosähkö kulkee muuntajan läpi, missä jännitetaso muutetaan puolijohdekomponenteille tai akustolle sopivaksi, esimerkiksi 24 tai 48 V:a. Tasasuuntaajassa puolijohdekomponenteista muodostuvat piirit muuttavat vaihtosähkön tasasähköksi, minkä jälkeen se ohjataan vaihtosuuntaajalle. (Korpela 2016, 85; Testbook 2023 a, b, c.)



KUVIO 2. Tasasuuntaajan yksinkertaistettu toimintaperiaate (mukaillen Testbook 2024)

3.4.2 Vaihtosuuntaaja

Tasasuuntaajassa tuotettua tasasähköä ei voida sellaisenaan hyödyntää sähköverkossa, jolloin se pitää muuttaa vaihtosuuntaajassa (invertterissä) vaihtosähköksi. Kuviossa 3 on vaihtosuuntaajan yksinkertaistettu toimintaperiaate. Vaihtosuuntaajalle tuleva tasasähkö muutetaan puolijohdekomponenteista muodostuvien piirien avulla vaihtosähköksi ja samalla suodatetaan mahdollisemman häiriöttömäksi, minkä jälkeen se ohjataan muuntajalle, missä jännitetaso nostetaan takaisin jakeluverkkoon sopivaksi, esimerkiksi 400 V:a. (Sähkötieto ry 2016, 3; Testbook 2024.)



KUVIO 3. Vaihtosuuntaajan yksinkertaistettu toimintaperiaate (mukaiillen Testbook 2024)

4 RELESUOJAUS

Sähköverkossa tai sen yksittäisessä osassa saattaa esiintyä sähköisiä vikatilanteita, kuten oiko- ja maa-sulkuja, yli- ja alijännitettä ja ylikuormaa. Tällaisia tilanteita varten esimerkiksi sähköasemissa ja voimalaitoksissa käytetään suojalaitteita vikojen estämiseksi. Suojalaitteiden yksi osa ovat suojareleet, jotka tarkkailevat sähköverkon tilaa ja sen sähköisiä ominaisuuksia ja tarvittaessa tekevät kytkentämuutoksia sähköverkkoon, joilla verkon vioittunut osa saadaan rajattua. (Mörsky 1992, 15–16.)

Relesuojauksen keskeisiä edellytyksiä ovat:

- Suojauksen toiminnan tulee olla selektiivistä, jotta vikatilanteessa vain sähköverkon viallinen osa kytkeytyy irti eikä siitä aiheudu toimintakatkoksia verkon muihin osiin. Selektiivinen suojaus myös nopeuttaa vioittuneen osan paikantamista sekä huoltotoimenpiteitä.
- Kytkentämuutokset tapahtuvat mahdollisemman nopeasti, jotta vaaratilanteet, viasta aiheutuvat vauriot ja häiriöt jäävät mahdollisemman vähäiseksi ja sähköverkon toiminta säilyy sen muissa osissa ennallaan.
- Suojalaitteiston suunnitteluvaiheessa tulee varmistua siitä, että laitteisto kattaa kaikki sähköverkon ja siihen kuuluvien järjestelmien osat, eikä suojaamattomia piirejä jää välille.
- Suojauksen tulee olla käyttövarmuudeltaan luotettava ja käytettävyydeltään riittävän selkeä (Mörsky 1992, 15–16; Guillot 2020.)

Kuten luvun ensimmäisessä kappaleessa mainittiin, releet muodostavat vain yhden osan suojalaitteistosta, sillä ne vaativat muita komponentteja suojauksen toteuttamiseen. Näitä komponentteja ovat esimerkiksi mittamuuntajat, apuenergiälähteet, raportointi- ja hälytyskeskukset sekä tiedonsiirtoyhteydet mittaus- ja laukaisukäskyjä varten. (Mörsky 1992, 16.)

Mittamuuntajia käytetään sekä mittaus että suojaustekniikassa. Yleisimmin käytetyt mittamuuntajat ovat virta- ja jännitemuuntajia. Mittamuuntajat muuntavat primääripiirin jännite- ja virtasuureet mittareille ja toisiokojeille, esimerkiksi suojareleille, sopivaan arvoon. Mittamuuntajat erottavat mittauspiirin suurjännitteisestä päävirtapiiristä, suojaavat mitta- ja suojalaitteita suurilta virroilta sekä ylikuormalta sekä mahdollistavat laitteiden sijoittamisen kauemmas mittauskohteesta. (Mörsky 1992, 16, 85.)

Apuenergiälähde on tärkeä osa apusähköjärjestelmää, jonka tarkoituksena on täydentää relesuojauksen muodostamaa kokonaisuutta. Apuenergiälähteenä voidaan käyttää esimerkiksi tasasuuntaajalla varustettua akustoa. Apuenergiälähteellä varmistetaan suojauksen kannalta kriittisten kojeiden, kuten katkaisijoiden toiminta myös vikatilanteiden aikana. Hälytys- ja raportointikeskukset tiedonsiirtoyhteyksiin ovat tärkeä osa relesuojauksista, sillä niiden avulla vikapaikka voidaan havaita hyvinkin nopeasti. Suojattavia kohteita ja suojarkeitä voi olla lukuisia, joten on tärkeää, että releiltä pystytään keräämään tietoa keskitetysti myös myöhempää käyttöä varten. (Mörsky 1992, 17.)

4.1 Virtareleet

Virtareleiden toiminta perustuu nimensä mukaisesti virran suuruuden mittaamiseen. Virtareleet voidaan jakaa neljään luokkaan, joita ovat: hetkellinen ylivirtarele, vakioaikaylivirtarele, käänteisaikaylivirtarele ja termiseen suojaukseen käytettävä lämpörele. Näistä kahta ensimmäistä, hetkellistä ylivirtarelettä ja vakioaikaylivirtarelettä käytetään pääsääntöisesti virtapiirin oikosulkusuojaukseen. Hetkellinen ylivirtarele katkaisee virtapiirin välittömästi, mikäli se havaitsee piirissä kulkevan virran olevan releen asetusarvoa suurempi. Vakioaikaylivirtarele puolestaan katkaisee virtapiirin, kun ylikuormitustilanteen kesto on releeseen asetetun toiminta-ajan ja virran asetusarvon mukainen. Käänteisaikaylivirtarele poikkeaa vakioaikaylivirtareleesta siten, että se katkaisee virtapiirin sitä nopeammin, mitä suurempi sen läpi kulkeva virta on. Käänteisaikaylivirtareleiden toiminta-alue on laaja ja sitä voidaan helposti muuttaa suojattavan kohteen mukaan. (Mörsky 1992, 35–37.)

Ylivirtareleiden lisäksi varsinaiseen ylikuormitussuojaukseen on suotavaa käyttää lämpörelettä, jotta suojattava kohde tai sitä syöttävät kaapelit eivät vaurioitu. Lämpörelettä käytetään esimerkiksi moottoreiden, generaattoreiden ja muiden tärkeiden kojeiden suojaamiseen. Lämpörele katkaisee virtapiirin, mikäli sen suojattavan kohteen lämpötila ylittää releeseen asetetun toiminta-arvon. Lämpöreleessä on myös huomioon otettava kohdetta ympäröivä lämpötila, jotta se ei vaikuttaisi releen toimintaan. (Mörsky 1992, 37.)

4.2 Jännitereleet

Jännitereleistä tyypillisimpiä ovat ali- ja ylijännitereleet. Alijänniterele katkaisee virtapiirin, mikäli sen havaitsema jännitteen muutos alittaa siihen asetetun toiminta-arvon. Alijänniterelettä käytetään tyypillisesti moottoreiden suojaukseen, jotta moottori ei vaurioidu, mikäli syöttävän sähköverkon jännitetaso alenee äkillisesti. Alijännitereleen tulee olla toiminnaltaan sellainen, että se ei katkaise piiriä hyvin nopean ja lyhytkestoisen jännitteenaleneman seurauksena. Tämän tarkoituksena on välttää aiheettomia käyttökatkoksia. Ylijänniterele puolestaan katkaisee virtapiirin silloin, kun sen havaitsema jännitteen muutos ylittää releeseen asetetun toiminta-arvon. Ylijännitereleitä käytetään esimerkiksi maasulkujen havaitsemiseen ja tahtigeneraattoreiden irti kytkemiseen. Moottorilähdöissä käytettävät ylijännitereleet seuraavat oikeaa vaihejärjestystä sekä mahdollisia vaihekatkoksia. (Mörsky 1992, 38–39.)

4.3 Taajuusreleet

Ali- ja ylitaajuusreleet seuraavat sähköverkon taajuuden muutoksia ja tarvittaessa suorittavat suojattavan kohteen kytkentämuutokset, mikäli taajuus alittaa tai ylittää releeseen asetetun toiminta-arvon. Taajuusreleitä käytetään yleensä moottori- ja generaattorilähtöjen suojaukseen, jotta ne eivät vaurioidu äkillisen taajuuden muutoksesta. Taajuusreleet ovat myös tärkeitä sähköverkon tehotasapainon seurantaan. Tuotannon ja kulutuksen tulee olla jatkuvasti yhtä suuria, jotta taajuuden arvo pysyy sallituissa rajoissa. Suomessa taajuuden sallittu vaihteluväli on 49,9–50,1 Hz. (ABB 2002, 3; Fingrid Oyj b; Mörsky 1992, 40.)

5 HANKKEEN LUPA

Luvitukset hoidetaan aina tuulivoimalan sijaintipaikkakunnan rakennusvalvontaviranomaisen kanssa, sillä käytännöt vaihtelevat paikkakunnittain. Jos tuulivoimala sijoitetaan kaava-alueelle, vaaditaan siihen rakennus- tai toimenpidelupa. Kaavoittamattomalla alueella riittää pelkkä toimenpidelupa. (Motiva 2024 c.) UUPO-hankkeen pientuulivoimalan lupaprosessi on ollut osa toista opinnäytetyötä ja se on hoidettu yhteistyössä Ylivieskan rakennusvalvonnan kanssa. Tuulivoimalaa varten riitti pelkkä toimenpidelupa.

Tuulivoimalan asennukselle edellytetään asialliset luvat, sillä se on sähkötyötä. Jos tuulivoimala liitetään paikalliseen jakeluverkkoon, tulee siitä laatia paikallisen verkkoyhtiön kanssa tuotannon verkko- palvelusopimus. Erillinen tuotannon liittymissopimus voi olla tarpeellinen riippuen voimalaitoksen mitoitustehosta sekä sijainnista. Mikäli tuulivoimala liitetään kohteeseen, jossa on jo olemassa oleva liittymissopimus, erillinen tuotantosopimus ei välttämättä ole tarpeellinen. (Motiva 2024 c.) Tällaisessa tapauksessa verkkoyhtiölle voidaan toimittaa pelkkä pientuotantolaitoksen yleistietolomake (Saaranen 2024 a).

5.1 Toimenpidelupa

Toimenpidelupaa voidaan hakea rakennusluvan sijaan sellaiseen rakennelmaan, joka ei muutoin täytä rakennusluvan mukaisia ehtoja, kuten piippu tai tuulivoimalan masto. Toimenpidelupaa tulee hakea myös silloin, jos rakennelma vaikuttaa luonnonoloihin, kaupunki- tai maisemakuvaan tai ympäröivän alueen maankäyttöön. Lisäksi Ylivieskan kaupungin rakennusjärjestyksen 5 §:n mukaan toimenpidelupaa on haettava, mikäli kyseessä on kokonaiskorkeudeltaan 10–40 metriä oleva tuulivoimala. Toimenpidelupaa haettaessa siitä on myös ilmoitettava naapurille. Naapurina pidetään vastapäisen tai viereisen kiinteistön tai alueen omistajaa tai haltijaa. Tarvittaessa rakennuspaikalta tulee toimittaa katselmus, jolla voidaan esimerkiksi selvittää naapurin mielipide rakennushankkeesta. (Maankäyttö- ja rakennuslaki 5.2.1999/132, 126 §, 133 §; Ylivieskan kaupunki.)

6 CASE-KOHTTEEN SUOJAUSJÄRJESTELMÄ

Centria-ammattikorkeakoulun Ylivieskan yksikön tontille tulevan pientuulivoimalan suojausjärjestelmän suunnittelu alkoi taustaselvityksellä. Siinä vaiheessa voimalasta ei ollut muuta tietoa kuin toimenpideluvassa ilmoitettu voimalan korkeus (10 m), nimellisteho (10 kW) ja asemapiirustukseen määritetty voimalan sijainti. Alustavaa kaapelointireittiä suunniteltiin kampuksella. Kaapelointireitti kulkee Ouluntien ja Katajaojan välisellä nurmialueella osittain maahan kaivettuna ja osittain putkitettuna. Kaapelointireittiin kaivetaan myös vetyvaraston syöttökaapeli ja ethernetkaapelit tiedonsiirtoyhteyksiä varten. Putkituksen tarkoituksena on paikata roudan aiheuttamaa painauma. Asemapiirustus näkyy liitteessä 1.

Tulevan laboratorion testikeskuksen suunnittelussa huomioitiin UUPO-hankkeen muut järjestelmät, joita pientuulivoimalan lisäksi ovat vetyvarasto ja aurinkovoimala. Keskuksessa on myös varaus kahdelle akkujärjestelmälle. Moniviivaisen piirikaavion piirtäminen auttoi hahmottamaan keskuksen kokonaisuuden. Piirikaaviot näkyvät liitteessä 2. Keskuksessa on järjestelmien energiamittareiden ja suojalaitteiden lisäksi kaksi erillistä virtakiskoa, joilla järjestelmät voidaan liittää verkonvaihtokytkimellä joko sähkövoimatekniikan laboratorion verkkoon tai simuloituun testiverkkoon. Testiverkkoon hankittavilla sähköverkkosimulaattoreilla järjestelmistä voidaan tutkia sähköisiä ominaisuuksia ja aiheuttaa niille erilaisia simuloituja vikatilanteita. Simulaattoreiden syöttö voidaan vaihtaa nokkakytkimen avulla joko naparuuveihin tai voimavirtapistorasiaan. Lisäksi keskuksessa on naparuuvit vastusvau-nulle. Keskuksen kannessa oleva teippaus havainnollistaa järjestelmien liitännät. Keskuskaaviot ja tilauslomake näkyvät liitteessä 3 ja keskuksen malli liitteessä 4.

6.1 Kaapeleiden kuormitettavuudet

Testikeskuksen ja järjestelmien syöttökaapeleiden mitoitus- ja kuormitettavuuslaskelmissa noudatetaan standardia SFS 6000-5-52, Pienjännitesähköasennukset. Kaapelointien mitoituksessa huomioidaan asennusolosuhteet ja järjestelmien kuluttamat virrat. Virrat näkyvät taulukossa 2. Kolmivaiheisen kulutuskojeen teho lasketaan kaavalla 1:

$$P = \sqrt{3} * U * I * \cos\varphi \quad (1)$$

jossa P on kojeen kuluttama teho, I on kojeen kuluttama virta, U on verkon pääjännite ja $\cos\varphi$ laitteen tehokerroin.

Kaavasta 1 johdettuna tuulivoimalan kuluttamaksi virraksi saadaan:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 1} = 14,4 \text{ A}$$

TAULUKKO 2. Järjestelmien virrankulutukset

Järjestelmä	P (kW)	U (V)	I (A)
Tuulivoimala	10	400	14,4
Aurinkovoimala	5,5	400	7,9
Vetyvarasto	2,4	400	3,5
Akkujärjestelmä 1 (varaus)	15	400	21,6
Akkujärjestelmä 2 (varaus)	15	400	21,6
Simulaattori 1	15	400	21,6
Simulaattori 2 (varaus)	15	400	21,6

Simulaattoreiden käyttö on suunniteltu siten, että simulaattori 1 syöttää verkkoa ja simulaattori 2 kuormittaa verkkoa, jolloin niiden kulutukset kumoavat toisensa. Akkujärjestelmään voidaan ohjelmoida suurin verkosta otettava virta (Saaranen 2024 a). Nämä tilanteet huomioiden saadaan keskuksen kuluttamaksi virraksi 25,8 A. Ylikuormitussuojaksi valitaan (SFS 6000-5-52:2022, 71) taulukosta 35 A gG-sulakkeet, jotta keskuksessa on laajentamisvaraa. Tällöin kaapelin kuormitettavuuden on oltava vähintään 39 A. Johdonsuojakatkaisijaa käyttäessä kaapelin kuormitettavuus on katkaisijan nimellisvirran mukainen (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry, 133).

Kaapelin poikkipintavaatimus lasketaan kaavalla 2:

$$\text{Kaapelin kuormitettavuus} / (\text{asennusolosuhteiden korjauskertoimet}) \quad (2)$$

Esimerkiksi taulukossa 3 syöttökaapelin kuormitettavuusvaatimus 1. tikashyllyllä kaavalla 2 laskettuna on:

$$39 \text{ A} / (1,06 \cdot 0,78) = 47,2 \text{ A} \text{ ja tätä arvoa vastaava kaapelin poikkipinta-ala taulukon (SFS-6000-5-52:2022, 44) sarakkeesta 3} = 10 \text{ mm}^2.$$

Taulukoissa 3–5 on testikeskuksen nousukaapelin, tuulivoimalan ja vetyvaraston syöttökaapeleiden kuormitettavuusvaatimukset. Kaapelin poikkipinta-ala valitaan epädullisimman olosuhteen mukaan.

TAULUKKO 3. Testikeskuksen nousukaapelin asennusolosuhteet ja korjauskertoimet

Asennustapa	Lämpötila	Viereiset virtapiirit	Eriste	Poikkipinta-vaatimus (A)	Kaapelin poikkipinta-ala (mm ²)
Tikashylly 1 (E)	1,06	0,78		47,2	10
Läpivienti (C)	1,06		0,81	45,4	10
Tikashylly 2 (E)	1,06	0,78		47,2	10
Umpihylly (C)	1,06	0,72		51,1	10
Tikashylly 3 (E)	1,06	0,80		46	10

TAULUKKO 4. Tuulivoimalan syöttökaapelin asennusolosuhteet ja korjauskertoimet

Asennustapa	Lämpötila	Lämpöresistivisyys + maahan asennus	Lämpöresistivisyys + putkeen asennus	Viereiset virtapiirit	Eriste	Poikkipinta-vaatimus (A)	Kaapelin poikkipinta-ala (mm ²)
Maahan asennettuna (D2)	1,05	1,5		0,75		13,5	1,5
Maahan asennettuna putkessa (D1)	1,05		1,18	0,85		15,2	1,5
Läpivienti (C)	1,06			0,57	0,81	32,7	6
Seinällä (C)	1,06			0,72		21	2,5
Umpihylly (C)	1,06			0,72		21	2,5

Ti- kashylly (E)	1,06			0,79		19,1	2,5
------------------------	------	--	--	------	--	------	-----

TAULUKKO 5. Vetyvaraston syöttökaapelin asennusolosuhteet ja korjauskertoimet

Asennus- tapa	Lämpötila	Läm- pöresistii- visyys + maahan asennus	Läm- pöresistii- visyys + putkeen asennus	Viereiset virtapiirit	Eriste	Poikkipin- tavaati- mus (A)	Kaapelin poikki- pinta-ala (mm ²)
Maahan asennet- tuna (D2)	1,05	1,5		0,75		13,5	1,5
Maahan asennet- tuna put- kessa (D1)	1,05		1,18	0,85		15,2	1,5
Läpivienti (C)	1,06			0,57	0,81	32,7	6
Seinällä (C)	1,06			0,72		21	2,5
Umpi- hylly (C)	1,06			0,72		21	2,5
Ti- kashylly (E)	1,06			0,79		19,1	2,5

Vetyvaraston laskelmissa on käytetty kuormitettavuusvaatimuksena 16 A, vaikka sen nimellistahoa vastaavalle virrälle riittäisi vähempikin. Varaston käynnistysvirta voi kuitenkin olla suurempi ja varastossa lisälaitteet tarvitsevat suuremman ylikuormitussuojauksen. Aurinkovoimalan kuormitettavuuslaskelma on jätetty pois, sillä sille on jo olemassa syöttökaapeli, mutta syötön automaattinen poiskytkentä on laskettu luvussa 6.2.

6.2 Syötön automaattinen poiskytkentä, oikosulkusuojaus ja jännitteenalenema

Syötön automaattisen poiskytkennän ja oikosulkusuojauksen laskelmia varten piti selvittää laboratorion testikeskuksen, sitä syöttävän ryhmäkeskuksen, tuulivoimalan, vetyvaraston ja aurinkovoimalan oikosulkuvirta ja impedanssi. Laskelmissa tarvitaan myös kaapeleiden likimääräiset impedanssit, jotka ovat 6 mm²:n kaapelille 3,660 Ω/km ja 10 mm²:n kaapelille 2,246 Ω/km (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry, 91). Koska laboratorion testikeskusta syöttävä kaapeli on pääjohto, vaaditaan sille 5 sekunnin poiskytkentäaika nimellisjännitteen ollessa ≤ 230 V vaihejohtimen ja maan välillä. Ryhmäjohtoille puolestaan riittää 0,4 sekunnin poiskytkentäaika. (SFS 6000-4-41, 9.)

Ryhmäkeskuksesta mitatut arvot ovat: $I_{KRK} = 1400 \text{ A}$ ja $Z_{VRK} = 0,17 \text{ } \Omega$. Oikosulkuvirrasta voidaan vähentää 25 %, sillä se on mitattu lähempänä oikosulussa olevan kaapelin lämpötilaa (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry, 88). Tällöin oikosulkuvirran arvoksi saadaan $1400 \text{ A} * 0,75 = 1050 \text{ A}$. Oikosulkuvirta lasketaan kaavalla 4:

$$I_K = \frac{c * U}{\sqrt{3} * Z_v} \quad (4)$$

jossa c on jännitteenalenemakerroin (yleensä 0,95), U on sähköverkon pääjännite ja Z_v on kokonaisimpedanssi ennen keskusta.

Kaavasta 4 johtamalla ryhmäkeskuksen oikosulkuimpedanssiksi saadaan:

$$Z_{VRK} = \frac{c * U}{\sqrt{3} * I_{KRK}} = \frac{0,95 * 400 \text{ V}}{\sqrt{3} * 1050 \text{ A}} = 0,21 \text{ } \Omega$$

Laboratorion testikeskuksen oikosulkuimpedanssi lasketaan kaavalla 5:

$$Z_{VLTk} = Z_{VRK} + 2 * z * l \quad (5)$$

jossa z on kaapelin yksittäisen johtimen impedanssi ja l on syöttökaapelin pituus metreinä.

Kaavalla 5 laskettuna testikeskuksen oikosulkuimpedanssiksi saadaan:

$$Z_{VLTK} = Z_{VRK} + 2 * 0,002246 \Omega/m * 25 \text{ m} = 0,32 \Omega$$

Kaavalla 4 laskettuna testikeskuksen oikosulkuvirraksi saadaan:

$$I_{KLTk} = \frac{c*U}{\sqrt{3}*Z_{VRK}} = \frac{0,95*400 \text{ v}}{\sqrt{3}*0,32 \Omega} = 685,6 \text{ A}$$

35 A gG-sulakkeen edellyttämä pienin oikosulkuvirta 5 sekunnin poiskytkentäajalla on 175 A (Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry, 89).

Suurin sallittu johtopituus lasketaan kaavalla 6:

$$L_{\max} = \frac{c*U}{\frac{\sqrt{3}*I_K}{2*z}} - Z_V \quad (6)$$

jossa L_{\max} on suurin sallittu johtopituus, c on jännitteenalenemakerroin (yleensä 0,95), I_K on suojalaitteelta vaadittu oikosulkuvirta, z on kaapelin yksittäisen johtimen impedanssi, Z_V on edeltävän verkon impedanssi.

Kaavalla 6 laskettuna laboratorion testikeskuksen suurin sallittu johtopituus on:

$$LTK_{\max} = \frac{c*U}{\frac{\sqrt{3}*I_K}{2*z}} - Z_{VRK} = \frac{0,95*400 \text{ V}}{\frac{\sqrt{3}*175 \text{ A}}{2*0,002246 \Omega/m}} - 0,21 \Omega = 232,3 \text{ m}$$

Taulukkoon 6 on laskettu muiden järjestelmien arvot kaavoilla 5 ja 6.

TAULUKKO 6. Muiden järjestelmien arvot

Lasketut arvot	Oikosulkuvirta (A)	Oikosulkuimpedanssi (Ω)	Ylikuormitussuojan nimellisarvo (A)	Vaadittu oikosulkuvirta 0,4 s poiskytkentäajalla	Syöttökaapelin pituus (m)	Suurin sallittu johtopituus (m)
Tuulivoimala	165	1,33	16	160	135	143,6
Vetyvarasto	209	1,05	16	160	100	143,6

Aurinko-voimala	353,9	0,62	16	160	17	60
-----------------	-------	------	----	-----	----	----

Pitkissä kaapelivedoissa jännitteenalenema on syytä tarkistaa laskemalla. Pienjännitesähköasennusta, jota syötetään yleisestä sähköverkosta, syöttävän keskuksen ja asennuskohteen välinen jännitteenalenema ei saisi ylittää yli 5 %:a. (SFS-6000-5-52:2022, 62).

Jännitteenalenema lasketaan kaavalla 7:

$$u = b(\rho \frac{1}{S} L \cos \varphi + \lambda L \sin \varphi) I_B \quad (7)$$

jossa u on jännitteenalenema voltteina, b kerroin, joka on kolmivaiheiselle piirille 1, ρ on johtimen resistiivisyys normaalikäytössä (standardin mukainen arvo kuparille on $0,0225 \Omega \text{mm}^2 / \text{m}$), L on johtojärjestelmän pituus metreinä, S on johtimien poikkipinta-ala neliömillimetreinä, $\cos \varphi$ on tehokerroin, jonka arvona voidaan laskennassa käyttää 0,8 (tästä johdettuna $\sin \varphi = 0,6$), λ on johtimen reaktanssi johtimen pituusyksikköä kohden (laskentakaavassa voidaan käyttää standardin mukaista arvoa $0,08 \text{ m}\Omega/\text{m}$), I_B on suunniteltu virta ampeereina. (SFS-6000-5-52:2022, 62–63.)

Kaavalla 6 laskettuna tuulivoimalan syöttökaapelin jännitteenalenemaksi saadaan:

$$u = 1 * (0,0225 * 138 \text{ m}/6 * 0,8 + 0,00008 * 138 \text{ m} * 0,6) * 16 \text{ A} = 6,7 \text{ V}$$

Kaavalla 6 laskettuna vetykontin syöttökaapelin jännitteenalenemaksi saadaan:

$$u = 1 * (0,0225 * 100 \text{ m}/6 * 0,8 + 0,00008 * 100 \text{ m} * 0,6) * 16 \text{ A} = 5,85 \text{ V}$$

Suhteellinen jännitteenalenema lasketaan kaavalla 8:

$$\Delta u = 100\% * \frac{u}{U_0} \quad (8)$$

jossa U_0 on jännite vaiheen ja nollan välillä voltteina.

Kaavalla 7 laskettuna tuulivoimalan suhteelliseksi jännitteenalenemaksi saadaan:

$$\Delta u = 100\% * \frac{6,3 V}{230 V} = 2,9 \%$$

Kaavalla 7 laskettuna vetykontin suhteelliseksi jännitteenalenemäksi saadaan:

$$\Delta u = 100\% * \frac{5,85 V}{230 V} = 2,5 \%$$

Laskelmissa on käytetty standardin (SFS 6000-5-5:2022, 31, 39, 44, 48, 49, 50, 51, 53, 71) taulukoita.

6.3 Tuulivoimalan toimittaja

Hankkeen edetessä pientuulivoimalan toimittajaksi päätettiin Vihreä Watti Oy. Kyseessä on kuvan 6 mukainen invertterikäyttöinen, nimellisteholtaan 10 kW ja korkeudeltaan 12 m oleva pysty akselinen tuulivoimala. Luvussa 2.2 mainittujen tyyppiluokkien mukaan tuulivoimala kuuluu luokkaan a, ja sitä koskevat muun muassa seuraavat voimalaitoksen järjestelmätekniilliset vaatimukset:

- Tuulivoimalasta toimitetaan liittymispisteen verkonhaltijalle asennusdokumentti, jossa on oltava fyysisen liittytapaikan, liittymispäivämäärän, laitteiston mitoitustehon, energialähteen tyyppin tiedot, liittyjän ja asentajan yhteistiedot.
- Reaaliaikaista pätö- ja loistehon mittausta ei vaadita, mutta verkonhaltija määrää tiedonvaihdon menettelyn ennen laitoksen verkkoon kytkemistä.
- Tuulivoimalan on normaalitilanteessa toimittava jakeluverkon ilmoittamalla jännitealueella ja kantaverkon haltijan Fingrid Oyj:n ilmoittamalla 49,0–51,0 Hz:n taajuusalueella, sekä 30 minuutin ajan taajuuksilla 49,0–47,5 Hz tai 51,0–51,5 Hz.
- Tuulivoimalassa on oltava etäohjausvalmius, jotta vikatilanteen ilmetessä tuotanto voidaan lopettaa viiden sekunnin kuluessa käskyn lähetyksestä. (Fingrid Oyj 2018, 16, 31, 33, 35.)

Alle 50 kW:n tuotantolaitoksissa suojausjärjestelmät voidaan integroida niiden inverttereihin (Energiateollisuus ry 2023, 9). Perusvaatimukset suojuuksille määritellään standardissa SFS-EN 50549-1:2019. Kampukselle toimitettavan tuulivoimalan invertterissä on luvussa 4 käsiteltyjen suojuuksien lisäksi seuraavat:

- Eristevian ja impedanssin seuranta
- Maasulkusuojaus. Maasulku voi tapahtua esimerkiksi kaapelin eristysvian takia jännitteisen osan ja maan välillä tai jännitteisen osan ja maadoitetun osan välillä (ABB 2024, 3).

- Oikosulkusuojaus. Oikosulkusuojauksen on katkaistava virtapiirissä esiintyvä suurin mahdollinen oikosulkuvirta ennen kuin laitteet, kaapelit tai piirit vaurioituvat (Saaranen 2024 b, 2).
- Invertteristä löytyvät myös: Saarekesuojaus, ukkossuojaus, verkon sähkökatkosuoja, reaaliaikainen sähköverkon monitorointi ja vikavirtasuojaus. (Vihreä Watti Oy.)



KUVA 6. Vihreäwatti vertikaali tuulivoimala (Vihreä Watti Oy)

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella sellainen suojausjärjestelmä, jolla pientuulivoimala voidaan turvallisesti liittää sähköverkkoon. Käytännössä suunnitelman pientuulivoimalan osuudeksi jäi vain keskuksen suunnittelu, ylikuormitussuojien ja kaapelin mitoitus, sillä invertteri sisältää vaaditut suojaukset pientuulivoimalan ja sähköverkon vikatilanteiden varalle. Syöttökaapelin ja keskuksen suojaaminen on kuitenkin yhtä tärkeää. Mitoitus- ja kuormitettavuuslaskemia varten piti tutustua moneen standardiin ja laskelmia tehdessä olla erityisen tarkka, että syöttökaapelit ja ylikuormitussuojat täyttävät määräykset. Opinnäytetyössä esitettyjä laskelmia voidaan soveltaa tulevaisuudessa, mutta nimellisteho täytyy huomioida.

Kirjallisuuden löytäminen nykyaikaiseen relesuojaustekniikkaan osoittautui haastavaksi, joten teoriaosuuden lähdemateriaalina joutui käyttämään aikaisempaa kirjallisuutta. Nykyisten suojaruleiden toimintaperiaatteet ovat todennäköisesti työssä käytetyn lähdemateriaalin mukaisia, mutta tekniikka on kehittynyt. Epäselväksi jäi myös, miten pientuulivoimaloiden tehonsäätö tapahtuu tuulennopeuden noustessa riittävän kovaksi. Todennäköisesti niissä sovelletaan vastaavaa tekniikkaa kuin suuremman kokoluokan tuulivoimaloissa.

LÄHTEET

- ABB. 2002. *SPAF 140 C taajuusreleen käyttöohje ja tekninen selostus*. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/cf143f65aed5a609c2256c7e0045be72/FM_SPAF140C_FI_BBA.pdf. Viitattu 13.10.2024.
- ABB. 2024. *Seuraavan sukupolven maasulkusuojaus-toiminnot*. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/6bd86acb147f4105837353edbf7d2e8e/Next_gen_earth_fault_protection_2NGA001960%20FIa.pdf. Viitattu 15.11.2024.
- Dvorak, P. 2017. *What is the job of a coupling in a wind-turbine drivetrain?*. Saatavissa: <https://www.windpowerengineering.com/job-coupling-wind-turbine-drivetrain/>. Viitattu 14.10.2024.
- Energiateollisuus ry. 2023. *Verkostosuositus YA 9:23 Pientuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon*. Saatavissa: <https://energia.fi/wp-content/uploads/2023/12/YA-9-23-pientuotannon-liittaminen-sahkonjakeluverkkoon-2023-11-29-final.pdf>. Viitattu 12.11.2024.
- Fingrid Oyj. a. *Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset*. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/liitynta-kantaverkkoon/tekniset-vaatimukset/voimalaitosten-jarjestelmatekniset-vaatimukset/>. Viitattu 30.9.2024.
- Fingrid Oyj. b. *Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito*. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kulutuksen-ja-tuotannon-tasapainon-yllapito/>. Viitattu 13.10.2024.
- Fingrid Oyj. 2018. *Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset VJV2018*. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarma-sahkonsiirto/vjv2018.pdf>. Viitattu 30.9.2024.
- Guillot, M. 2020. *Circuit breaker selectivity for power availability*. Saatavissa: <https://blog.se.com/infrastructure-and-grid/power-management-metering-monitoring-power-quality/2020/04/15/circuit-breaker-selectivity-for-power-availability/>. Viitattu 6.10.2024.
- Herrfors Oy Ab. *Mikrotuotanto – Aurinkosähköjärjestelmän liittäminen verkkoon*. Saatavissa: <https://www.herrforsnat.fi/fi/mikrotuotanto-aurinkosaehkoejaerjestelmaen-liittaaminen-verkkoon/>. Viitattu 16.10.2024.
- Hussany, F.L. 2023. *European Journal of Engineering and Technology Research. Darrieus' Turbine Design on the International Road Basra-Al-Amarah*. Viitattu 15.12.2024. Saatavissa: <https://doi.org/10.24018/ejeng.2023.8.1.2936>.
- Ilmatieteenlaitos. 2023. *Tuulet ja myrskyt*. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tuulet>. Viitattu 22.10.2024.
- Korpela, A. 2016. *Tuulivoiman perusteet*. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy, Tammertekniikka.
- Maankäyttö- ja rakennuslaki (Alueidenkäyttölaki)*. 5.2.1999/132. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132#L18-2P126>. Viitattu 04.11.2024.

Metsähallitus. 2020. *Piiparinmäen-Lammaslamminkankaan tuulipuistohankkeen tekninen kuvaus*. Saatavissa: <https://www.metsa.fi/wp-content/uploads/2020/06/Liite-10-Piiparinmaeki-hankkeen-tekninen-kuvaus.pdf>. Viitattu 30.9.2024.

Motiva Oy. 2024. a. *Tuulivoimateknologia*. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa/tuulivoimateknologia. Viitattu 30.9.2024.

Motiva Oy. 2024. b. *Pientuulivoima*. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/pientuulivoima. Viitattu 30.9.2024.

Motiva Oy. 2024. c. *Luvitus*. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/pientuulivoima/luvitus. Viitattu 04.11.2024.

Mörsky, J. 1992. *Relesuojaustekniikka*. 2. korjattu painos. Hämeenlinna: Karisto Oy.

Office of energy efficiency and renewable energy. *How a wind turbine works*. Saatavissa: <https://www.energy.gov/eere/wind/how-wind-turbine-works-text-version>. Viitattu 30.9.2024.

Puomio, H. 2024. Centria-ammattikorkeakoulun sähkö- ja automaatiotekniikan lehtorin henkilökohtainen tiedonanto, keskustelu. 1.11.2024.

Saaranen, K. a. 2024. Centria-ammattikorkeakoulun sähkö- ja automaatiotekniikan lehtorin henkilökohtainen tiedonanto, keskustelu. 10.10.2024.

Saaranen, K. b. 2024. Centria-ammattikorkeakoulu. Sähköturvallisuustutkinto 1:n luentomateriaali.

Sesko ry. *SK 88 tuulivoimajärjestelmät*. Saatavissa: <https://sesko.fi/komiteaesittelyt/sr-88-tuulivoimajarjestelmat/>. Viitattu 16.10.2024.

SFS 6000-4-41:2022. 2022. *Pienjännitesähköasennukset. Osa 4–41: Suojausmenetelmät. Suojaus sähköiskulta*. 5. painos. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/SFS/ID2/6/1141200.html.stx>. Viitattu 10.11.2024.

SFS 6000-5-52:2022. 2022. *Pienjännitesähköasennukset. Osa 5–52: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Johtojärjestelmät*. 6. painos. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/SFS/ID2/6/1141214.html.stx>. Viitattu 02.11.2024.

SFS 6000-5-55:2022. 2022. *Pienjännitesähköasennukset. Osa 5–55: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Muut sähkölaitteet*. 5. painos. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS. Saatavissa: <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSsahko/SFS/ID2/6/1141224.html.stx>. Viitattu 10.11.2024.

Shannon, M. Annette, R. Martin, S. Clinton, S. 2014. *Evaluation of community response to wind turbine-related noise in Western New York state*. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/264056940_Evaluation_of_community_response_to_wind_turbine-related_noise_in_Western_New_York_State. Viitattu 11.10.2024.

Sähkötieto ry. 2016. ST-käsikirja 53.34. *Tuulienergiaa hyödyntävät laitteet ja niiden liittäminen rakennuksen sähköjärjestelmään*. Saatavissa: <https://severi-sahkoinfo-fi.ezproxy.centria.fi/item/3636>. Viitattu 16.10.2024.

Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2022. *D1-2022. Käsikirja rakennusten sähköasennuksista*. 29. painos. Espoo: Sähköinfo Oy.

Testbook. 2024. *Inverter circuit (DC to AC converter)*. Saatavissa: <https://testbook.com/electrical-engineering/inverter-circuit>. Viitattu 02.11.2024.

Testbook. 2023. a. *Rectifiers*. Saatavissa: <https://testbook.com/physics/rectifier>. Viitattu 02.11.2024.

Testbook. 2023. b. *Full-wave rectifier*. Saatavissa: <https://testbook.com/physics/full-wave-rectifier>. Viitattu 02.11.2024.

Testbook. 2023. c. *Half-wave rectifier*. Saatavissa: <https://testbook.com/physics/half-wave-rectifier>. Viitattu 02.11.2024.

Vihreä Watti Oy. *Vihreäwatti 10 kW vertikaalivoimalan tuotekortti*. Saatavissa: <https://www.vihreawatti.fi/images/tuotekortit/tuulivoimalat/vihreawatti-10kw-tuulivoimala.pdf>. Viitattu 12.11.2024.

Ylivieskan kaupunki. *Rakennusvalvonnan toimenpidelupa*. Saatavissa: <https://www.ylivieska.fi/asuminen-ja-ymparisto/rakentaminen/rakennusvalvonta/toimenpidelupa/>. Viitattu 04.11.2024.

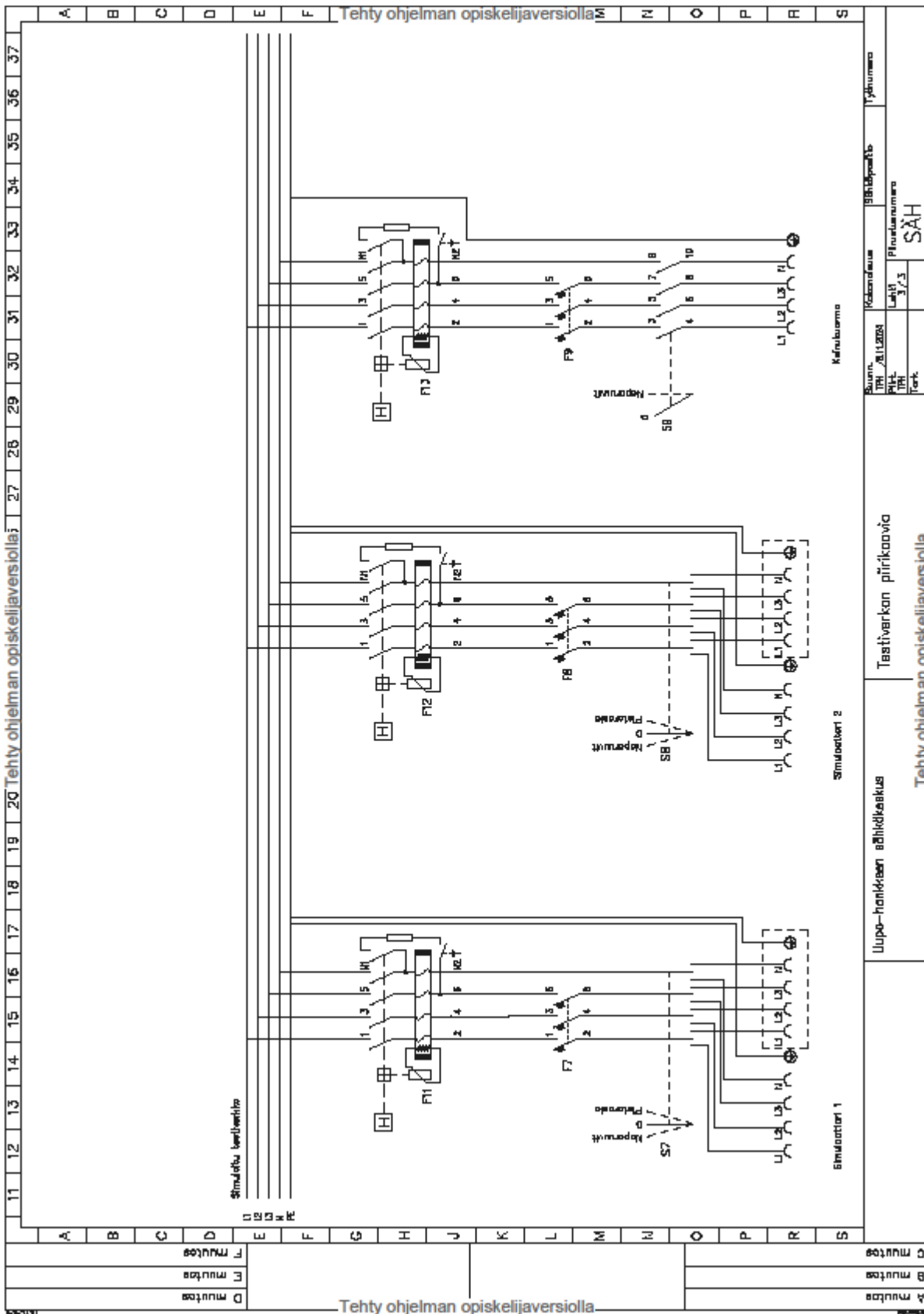
WINDEXchange. *Small wind guidebook*. Saatavissa: <https://windexchange.energy.gov/small-wind-guidebook>. Viitattu 11.10.2024.

Kampuksen asemapiirustus

Tehty ohjelman opiskelijaversiolla



Tehty ohjelman opiskelijaversiolla



Keskuksen tilauslomake

A SÄHKÖTEKNILLISET TIEDOT											Tehty ohjelman opiskelijaversiolla																					
KESKUS 1. Ilmellijännite U ₀ 400 V 2. Jännittävä kääntösuhteisuus U ₁ 3% 3. Taajuuus f 50 Hz 4. Ilmellivirta I ₀ 63 A 5. Ohjauksuasteisuus termiinen h ₀ kVA dynamiinen k ₀ kVA standardin mukaan standardi kVA B. Kääntösuhteisuus B ₀ kVA C. Kätköt tai johtimet AC L1 L2 L3 PE PERI D. Kätköt tai johtimet DC L+ L- M PE E. Ohjauksuasteisuus U V Hz I A J. Apujännite 1 kVA K. Apujännite 2 kVA LITETTÄVÄT KUORITUKSET 12. Jokaalijärjestelmä käyttömaailmalla 4J, T1-C-S käyttömaailmalla 5J, T1-S käyttömaailmalla 6J, T1-S 13. Tapa S kVA tapattu S kVA 14. Tehokerroin cos φ 15. Lämmitteisen osuus kW B RAKENNETIEDOT 1. Keskuslaaji kanna kotelo kehikko 2. Kotelotilavuus m ³ IP 21											C TUNNUSMERKINNÄT 1. Tunnuksimerkinnät valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 2. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 3. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 4. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 5. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 6. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 7. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 8. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 9. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 10. Pintakäsitely valmistajan normadi erillinen ohje mukaan 11. Asemuuskäsitely leveys m korkeus, normadi m muu m syvyys, normadi m muu m 12. Ympäristön lämpötila normadi 20...25 C min C max C 13. Kääntösuhteisuus kääntösuhteisuus 1 kVA/2 kVA 1 kVA/2 kVA valmistajan normadi leveys m 14. Laittalo osien kääntösuhteisuus ohjeella olevat lipiivannit onan poltankestävä											D KÄÄPÄLÖINTITIEDOT 1. Syöttö kaapeli kaapeli laji pakkipinta pituus jännitealueen lastenmassalla m 2. Syöttölin latusuunta ohjeita yhteisiä 3. Syöttölin sijainti väkivallalla ohjeita 4. Pääkääpälöintien lähtösuunta ohje 5. Pääkääpälöintien lähtösuunta ohje 6. Ohjauksuasteisuus lähtösuunta ohje 7. Ohjauksuasteisuus lähtösuunta ohje Huom.: Yhteisluokitus teknologiat, jennettönlaitteista alijänniteohje, ohje kääntösuhteisuus muustalla tapilla										
A SÄHKÖTEKNILLISET TIEDOT											Tehty ohjelman opiskelijaversiolla																					
KESKUS 1. Ilmellijännite U ₀ 400 V 2. Jännittävä kääntösuhteisuus U ₁ 3% 3. Taajuuus f 50 Hz 4. Ilmellivirta I ₀ 63 A 5. Ohjauksuasteisuus termiinen h ₀ kVA dynamiinen k ₀ kVA standardin mukaan standardi kVA B. Kääntösuhteisuus B ₀ kVA C. Kätköt tai johtimet AC L1 L2 L3 PE PERI D. Kätköt tai johtimet DC L+ L- M PE E. Ohjauksuasteisuus U V Hz I A J. Apujännite 1 kVA K. Apujännite 2 kVA LITETTÄVÄT KUORITUKSET 12. Jokaalijärjestelmä käyttömaailmalla 4J, T1-C-S käyttömaailmalla 5J, T1-S käyttömaailmalla 6J, T1-S 13. Tapa S kVA tapattu S kVA 14. Tehokerroin cos φ 15. Lämmitteisen osuus kW B RAKENNETIEDOT 1. Keskuslaaji kanna kotelo kehikko 2. Kotelotilavuus m ³ IP 21											C TUNNUSMERKINNÄT 1. Tunnuksimerkinnät valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 2. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 3. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 4. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 5. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 6. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 7. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 8. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 9. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 10. Pintakäsitely valmistajan normadi erillinen ohje mukaan 11. Asemuuskäsitely leveys m korkeus, normadi m muu m syvyys, normadi m muu m 12. Ympäristön lämpötila normadi 20...25 C min C max C 13. Kääntösuhteisuus kääntösuhteisuus 1 kVA/2 kVA 1 kVA/2 kVA valmistajan normadi leveys m 14. Laittalo osien kääntösuhteisuus ohjeella olevat lipiivannit onan poltankestävä											D KÄÄPÄLÖINTITIEDOT 1. Syöttö kaapeli kaapeli laji pakkipinta pituus jännitealueen lastenmassalla m 2. Syöttölin latusuunta ohjeita yhteisiä 3. Syöttölin sijainti väkivallalla ohjeita 4. Pääkääpälöintien lähtösuunta ohje 5. Pääkääpälöintien lähtösuunta ohje 6. Ohjauksuasteisuus lähtösuunta ohje 7. Ohjauksuasteisuus lähtösuunta ohje Huom.: Yhteisluokitus teknologiat, jennettönlaitteista alijänniteohje, ohje kääntösuhteisuus muustalla tapilla										
A SÄHKÖTEKNILLISET TIEDOT											Tehty ohjelman opiskelijaversiolla																					
KESKUS 1. Ilmellijännite U ₀ 400 V 2. Jännittävä kääntösuhteisuus U ₁ 3% 3. Taajuuus f 50 Hz 4. Ilmellivirta I ₀ 63 A 5. Ohjauksuasteisuus termiinen h ₀ kVA dynamiinen k ₀ kVA standardin mukaan standardi kVA B. Kääntösuhteisuus B ₀ kVA C. Kätköt tai johtimet AC L1 L2 L3 PE PERI D. Kätköt tai johtimet DC L+ L- M PE E. Ohjauksuasteisuus U V Hz I A J. Apujännite 1 kVA K. Apujännite 2 kVA LITETTÄVÄT KUORITUKSET 12. Jokaalijärjestelmä käyttömaailmalla 4J, T1-C-S käyttömaailmalla 5J, T1-S käyttömaailmalla 6J, T1-S 13. Tapa S kVA tapattu S kVA 14. Tehokerroin cos φ 15. Lämmitteisen osuus kW B RAKENNETIEDOT 1. Keskuslaaji kanna kotelo kehikko 2. Kotelotilavuus m ³ IP 21											C TUNNUSMERKINNÄT 1. Tunnuksimerkinnät valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 2. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 3. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 4. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 5. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 6. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 7. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 8. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 9. Kääntösuhteisuus tunnuksilinjat valmistajan normadi erillinen ohje (sähköteknisy) 10. Pintakäsitely valmistajan normadi erillinen ohje mukaan 11. Asemuuskäsitely leveys m korkeus, normadi m muu m syvyys, normadi m muu m 12. Ympäristön lämpötila normadi 20...25 C min C max C 13. Kääntösuhteisuus kääntösuhteisuus 1 kVA/2 kVA 1 kVA/2 kVA valmistajan normadi leveys m 14. Laittalo osien kääntösuhteisuus ohjeella olevat lipiivannit onan poltankestävä											D KÄÄPÄLÖINTITIEDOT 1. Syöttö kaapeli kaapeli laji pakkipinta pituus jännitealueen lastenmassalla m 2. Syöttölin latusuunta ohjeita yhteisiä 3. Syöttölin sijainti väkivallalla ohjeita 4. Pääkääpälöintien lähtösuunta ohje 5. Pääkääpälöintien lähtösuunta ohje 6. Ohjauksuasteisuus lähtösuunta ohje 7. Ohjauksuasteisuus lähtösuunta ohje Huom.: Yhteisluokitus teknologiat, jennettönlaitteista alijänniteohje, ohje kääntösuhteisuus muustalla tapilla										

C muutos
B muutos
A muutos

Uupo-hankkeen sähkökaucus
Tehty ohjelman opiskelijaversiolla

Kokousluokitus
Sähkösuojatila
Yhtymänumero
Laji
Pöytäkirjan numero
SÄH

Keskuskaavio

