



11.2.2022 /

**Webinaari
Tuulivoimavaltaisen
järjestelmän haasteet,
pe 11.2.2022**

FINGRID

Webinaarin aiheet

- **Stabiiliushaasteet tuulivoimavaltaisessa verkossa, 45 min**
 - Johdanto aiheeseen / Antti Harjula
 - suuntaajakytketty tuotanto muuttaa verkon toimintaa - nykytila ja tulevaisuuden näkymät
 - toimenpiteet käyttövarmuuden varmistamiseksi
 - Ilmiöiden tekninen tausta / Olli-Pekka Janhunen
 - oikosulkuteho ja stabiilius – mistä on kyse?
 - Case Jylkkä – alueellinen stabiiliustarkastelu
 - Asiakasvaikutukset ja prosessi / Lasse Linnamaa
- **Alisynkroniseen vuorovaikutukseen (SSO) liittyvien erityistarkasteluvaatimusten päivitys, 15 min**
 - Uudet vaatimukset ja niiden tausta / Olli-Pekka Janhunen
 - Asiakasvaikutukset ja prosessi / Lasse Linnamaa



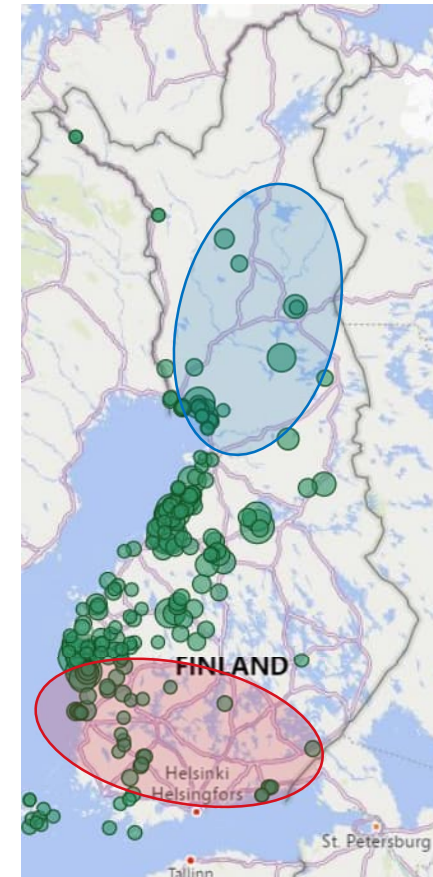
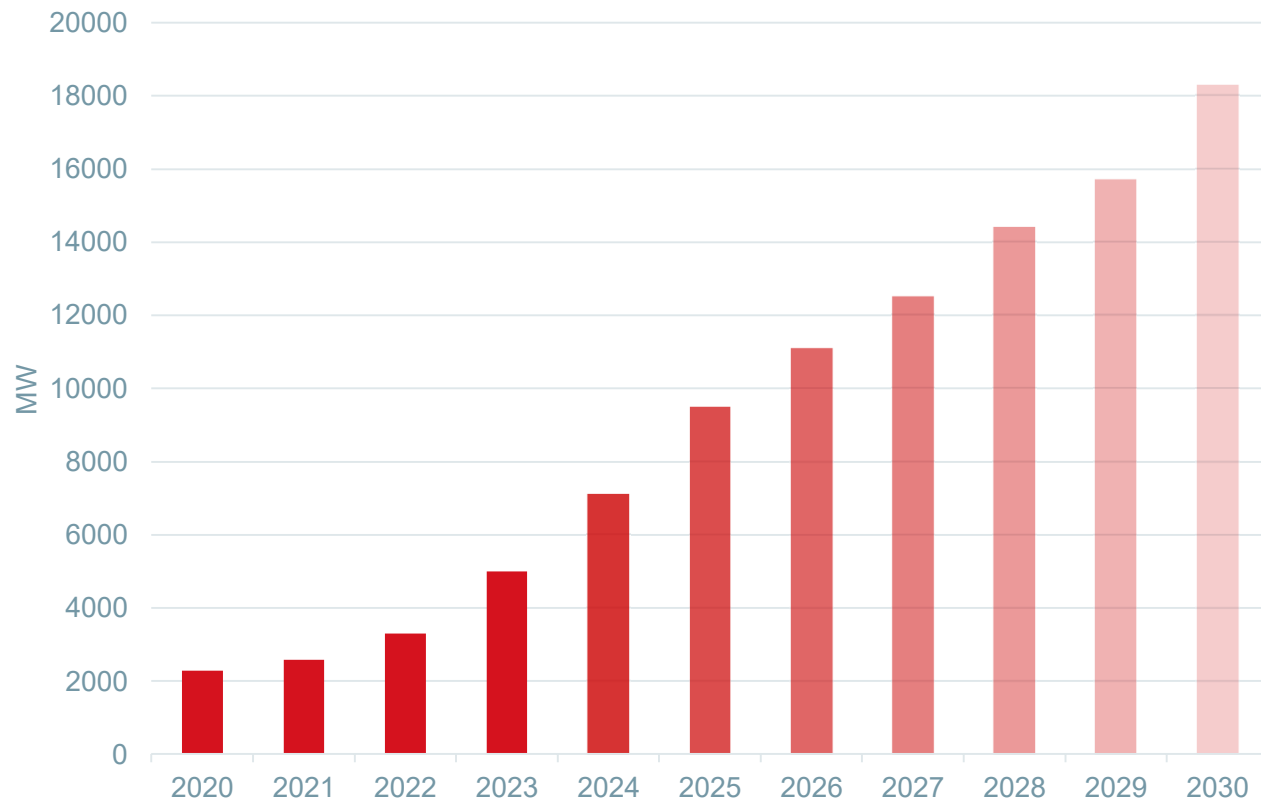
11.2.2022

Antti Harjula

Stabiiliushaasteet tuulivoimavaltaisessa järjestelmässä

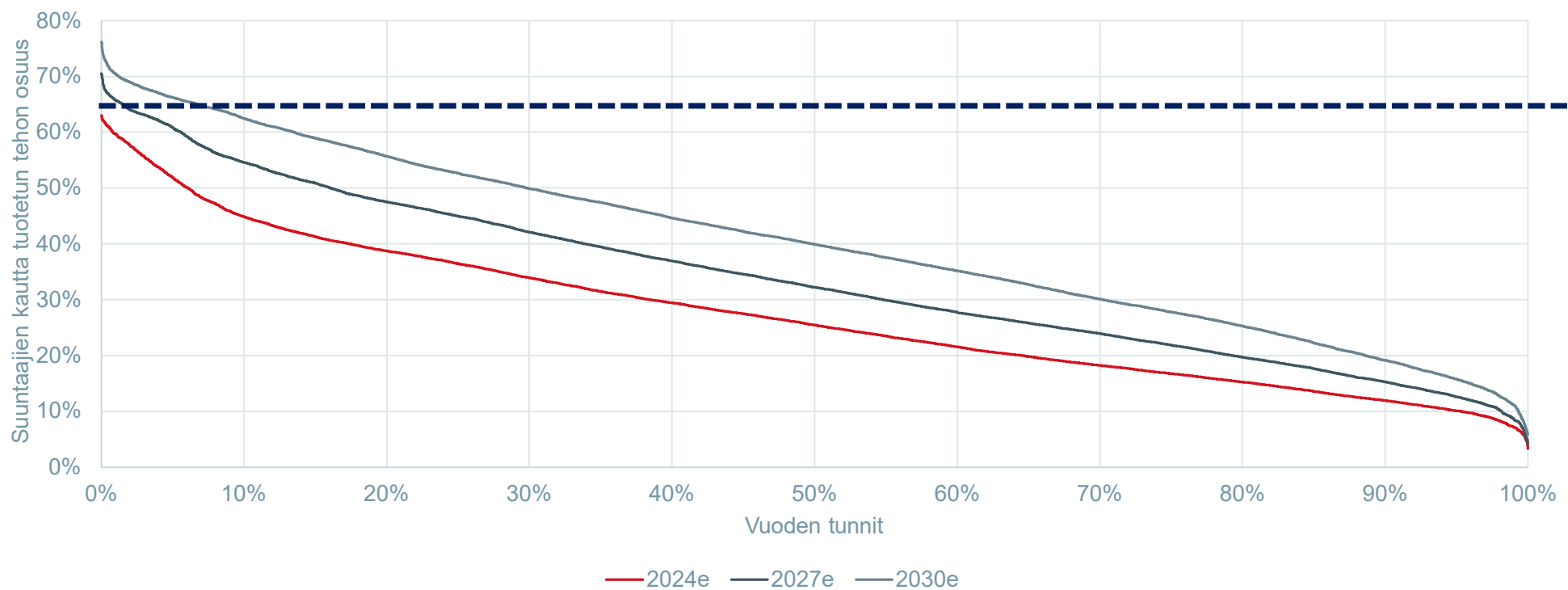
FINGRID

Tuulivoiman ennakoidaan kasvavan voimakkaasti



FINGRID

Ennustettu suuntaajakytketyn sähköntuotannon osuuden kehitys Pohjoismaissa



Muutos suuntaajavaltaiseen järjestelmään



Source: <http://electrical-engineering-portal.com>

Tahtikoneista suuntaajavaltaiseen järjestelmään



Inertia ja oikosulkuteho vähenee



Järjestelmästä tulee herkempi häiriöille



Source: <http://media.treehugger.com>



Source: www.offshorewind.biz

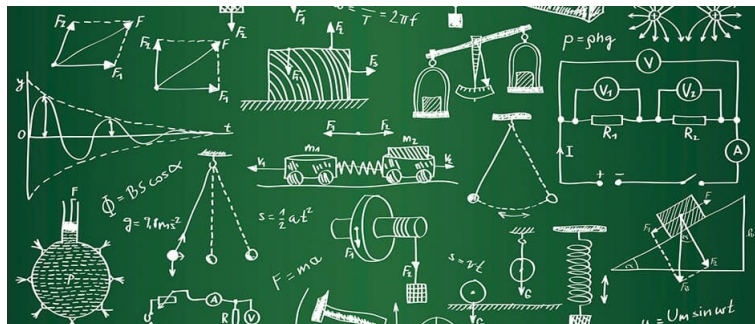
Fysiikan yhtälöistä ohjelmoituu vasteeseen



Järjestelmästä tulee monimutkaisempi ja epälineaarinen



Uusia ilmiöitä & mallinnuksesta ja analysoinnista tulee haastavampaa

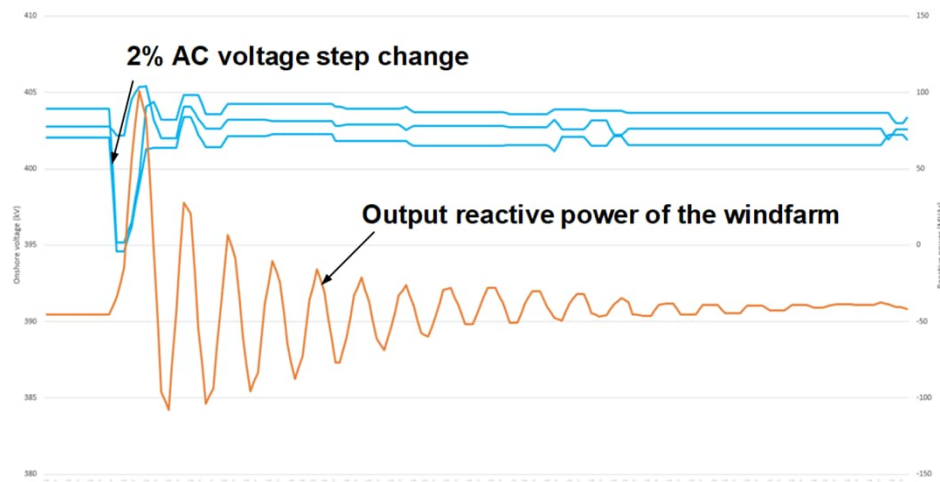


Source: <http://www.bbc.com>

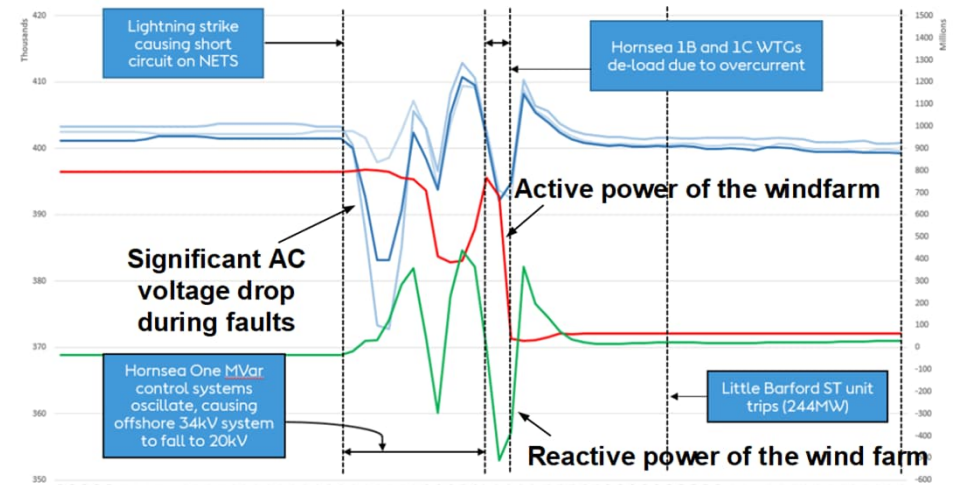
FINGRID

UK - 2019

Vuonna 2019, Hornsea merituulivoimalan epästabiilitoiminta vian jälkeen johti sähkökatkoon Lontoossa [1]-[2]



Stabiili pienen muutoksen jälkeen^[2]



Epästabiili viassa^[2]

[1] National Grid, "Technical Report on the events of 9 August 2019," UK, Sep. 2019, [Online]. Available: <https://www.nationalgrideso.com/document/152346/download>

[2] National Grid, "Appendices to the Technical Report on the events of 9 August 2019." UK, Sep. 2019, [Online]. Available: https://www.ofgem.gov.uk/system/files/docs/2019/09/eso_technical_report_-_appendices_-_final.pdf

Paikallisista haasteista alueellisiin ja järjestelmätason haasteisiin

2020→

Paikallisia ilmiöitä poikkeuksellisessa keskeytystilanteessa

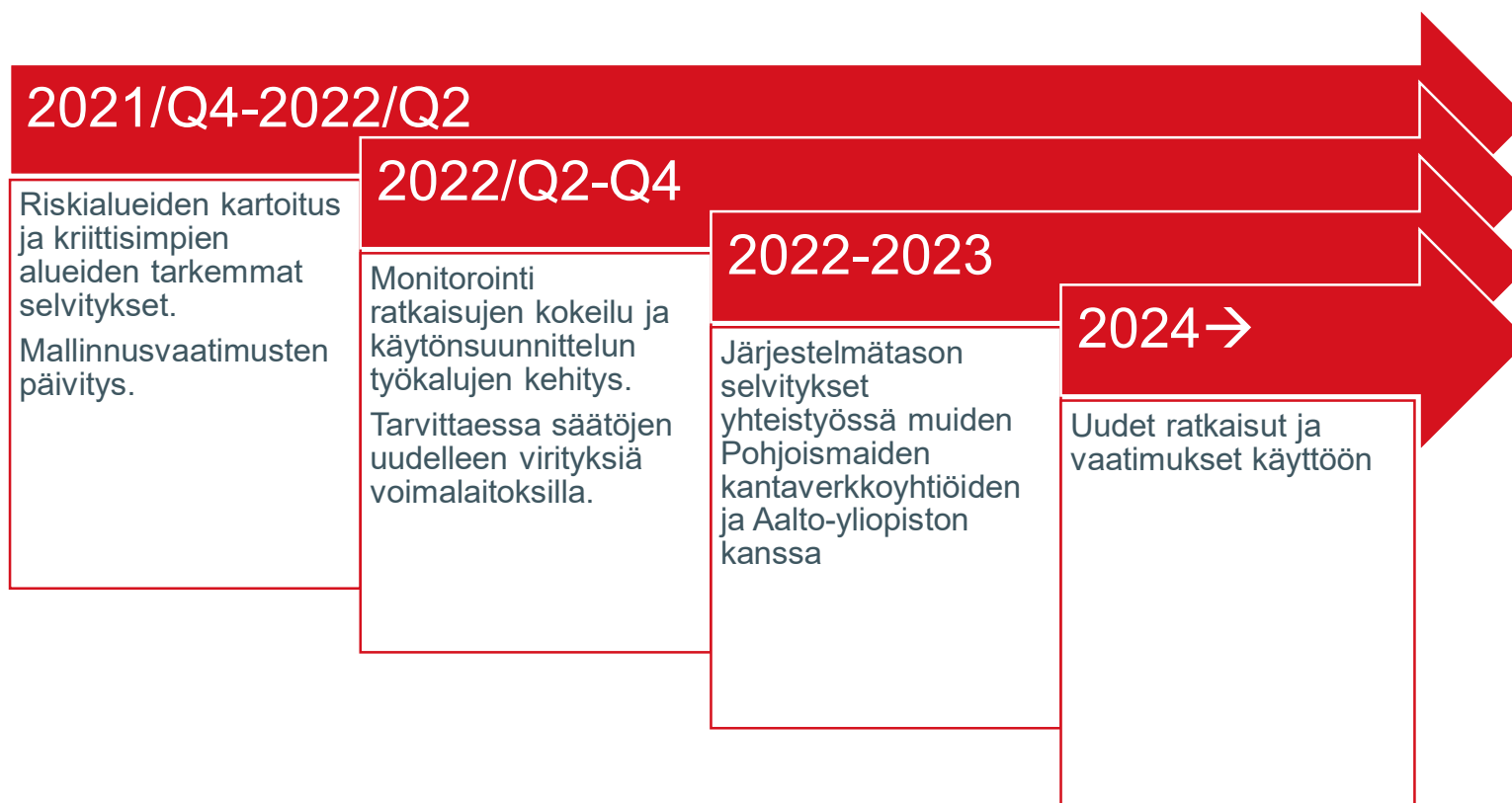
2023→

Alueellisia ilmiöitä normaaleissa keskeytystilanteissa

2026?→

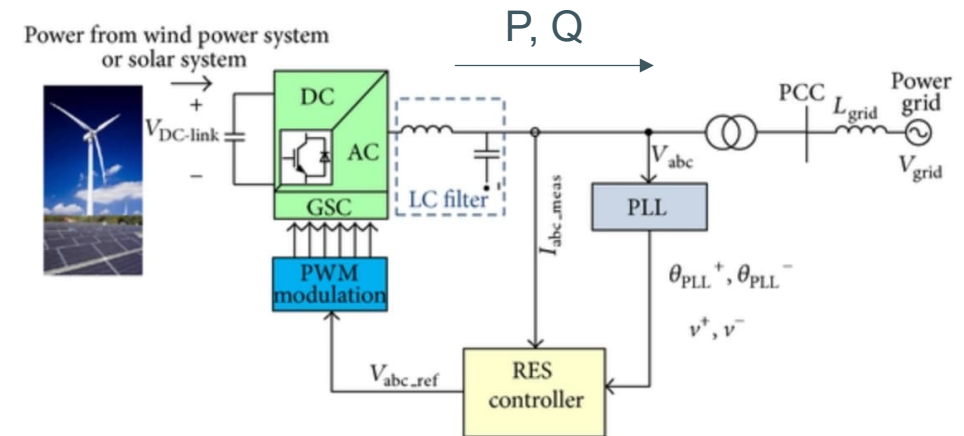
Järjestelmätason ilmiöitä suuren suuntaajakytketyn tuotannon tilanteissa

Miten mahdollistamme suuntaajakytketuotannon lisäämisen myös jatkossa?



Suuntaajakytketty tuotanto tuo uusia haasteita

- Tahtikoneiden luontaiset ominaisuudet puuttuvat
 - Taajuusmuutoksen vastustaminen
 - Jännitemuutoksen vastustaminen
- Synkronointihaasteet ja säätäjien stabiilius
- Säätäjien vuorovaikutusilmiöt
- Suojaus ja sähkönlaatu

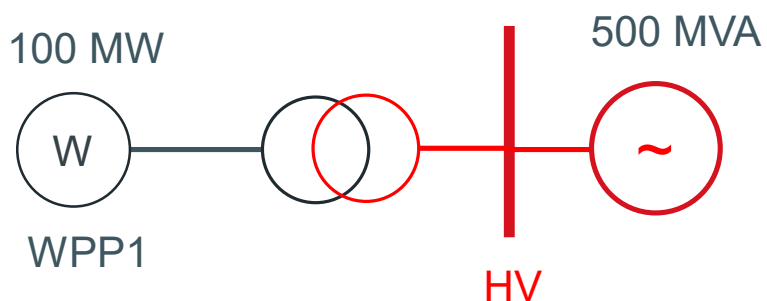


Suuntaajakytketty voimalaitos seuraa verkon taajuutta toimien virtalähteenä – ei tahtikoneen tavoin jännitelähteenä.

Kyky taajuuden säätöön perustuu ohjelmoituun pätövirran syöttöön ja kyky jännitteensäätöön perustuu ohjelmoituun loisvirran syöttöön.

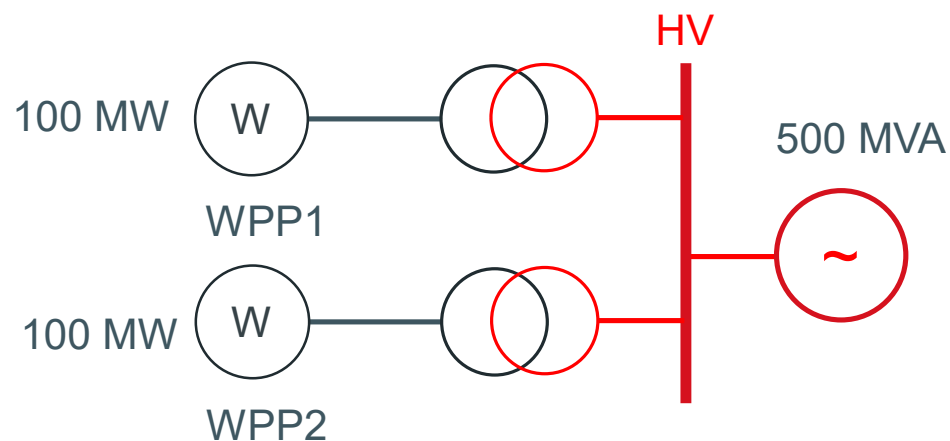
SCR ja ESCR

Case 1:



$$SCR_{HV} = \frac{S}{P_{WPP1}} = \frac{500 \text{ MVA}}{100 \text{ MW}} = 5$$

Case 2:



$$SCR_{HV} = \frac{S}{P_{WPP1}} = \frac{500 \text{ MVA}}{100 \text{ MW}} = 5$$

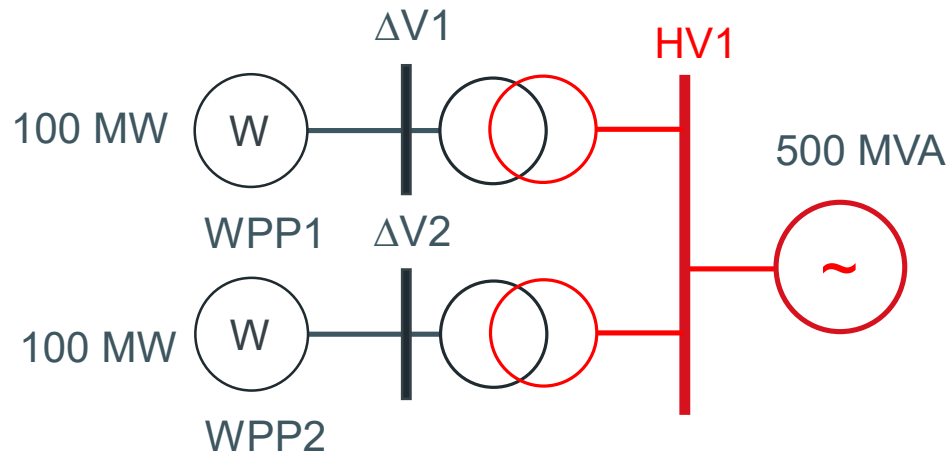
$$ESCR = ?$$

SCR = **Short-circuit Ratio** eli "oikosulkusuhde"

ESCR = **Equivalent Short-circuit Ratio** eli ekvivalenttinen oikosulkusuhde

ESCR = Equivalent Short-circuit Ratio

ESCR – Ekvivalenttinen oikosulkusuhte



Jännitemuutos kiskoon 1:

$$WPIF_{12} = \frac{\Delta V_2}{\Delta V_1} \quad 0 < WPIF_{12} < 1$$

$$ESCR_{WPP1} = \frac{S}{P_{WPP1} + WPIF_{12} * P_{WPP2}} = \frac{500 \text{ MVA}}{100 \text{ MW} + \frac{\Delta V_2}{\Delta V_1} * 100 \text{ MW}}$$

$$= 2.5 \dots 5.0$$

Tuulivoimalaitokset jakavat tahtikoneiden alueelle tuottaman oikosulkutehon

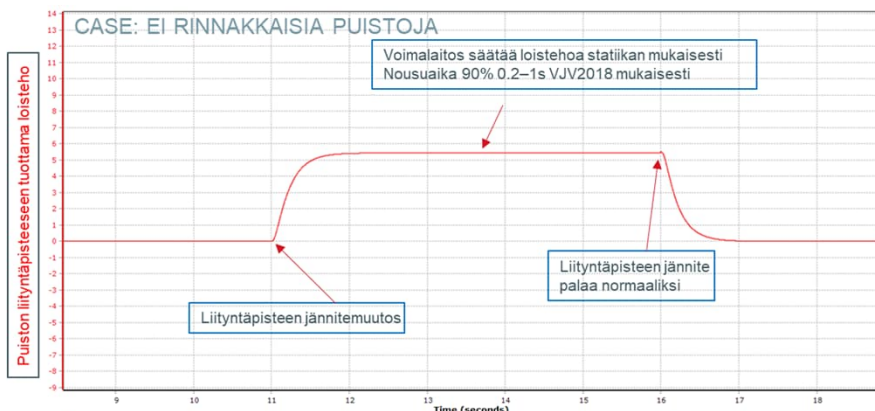
→ **ESCR** huomioi alueelle kytketyvät rinnakkaiset tuulipuistot toisinkuin perinteisesti käytetty **SCR**

Liityntäpisteen SCR saattaa olla korkea, mutta ESCR erittäin matala!

ESCR soveltuu hyvin mahdollisten ongelmapaikkojen etsimiseen sekä jännitteensäätäjien virittämiseen, varsinaiset stabiiliustarkastelut vaativat EMT-laskentaa tarkoilla tuulivoimamalleilla.

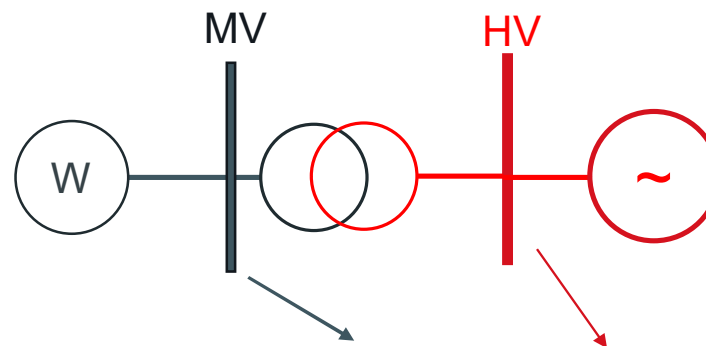
Säätäjien epästabiiliusilmiöt

Puistotason jännitesäätäjä



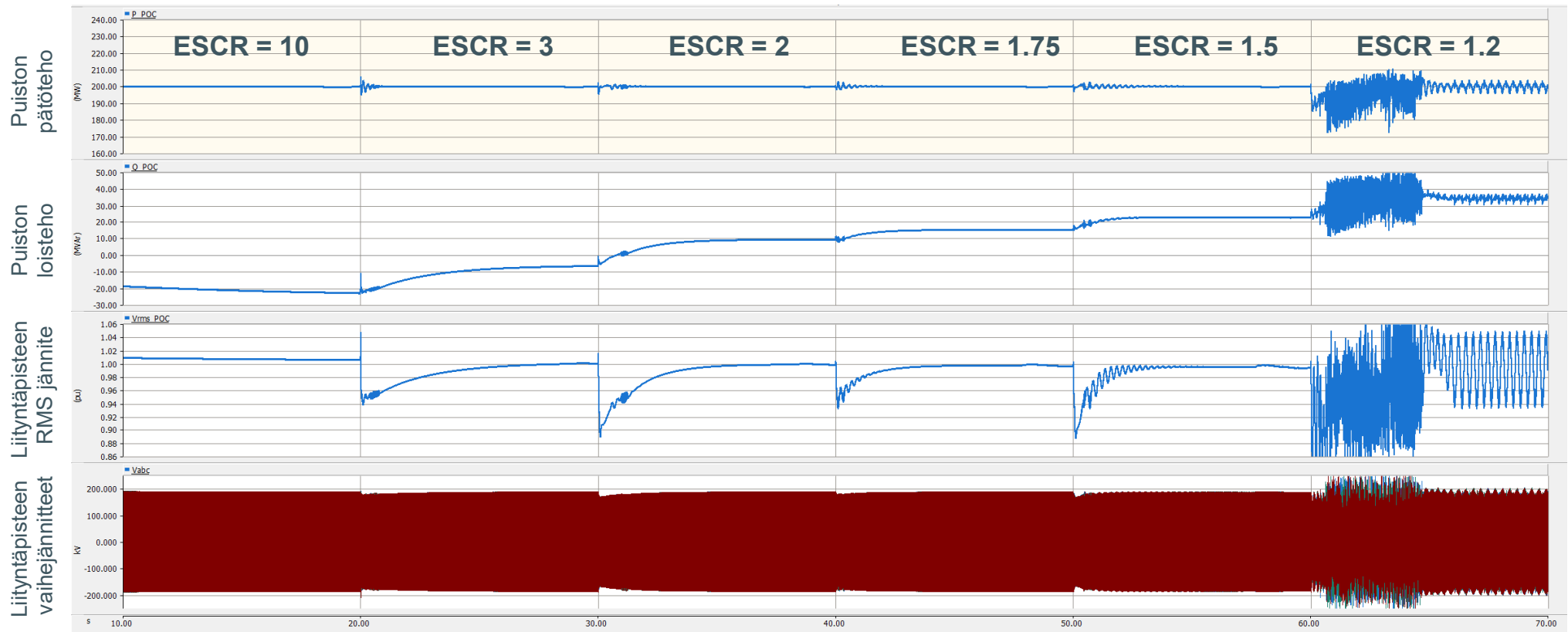
Turbiinitason alemman tason säätäjät

Phase Locked Loop (PLL), tehonpalautuminen, turbiinien jänniteensäätö,...



Tilanne	MV	HV
Ei haasteita	>4	>5
Haastava	2-4	3-5
Erittäin haastava	<2	<3

Turbiinitason säätäjien stabiilius

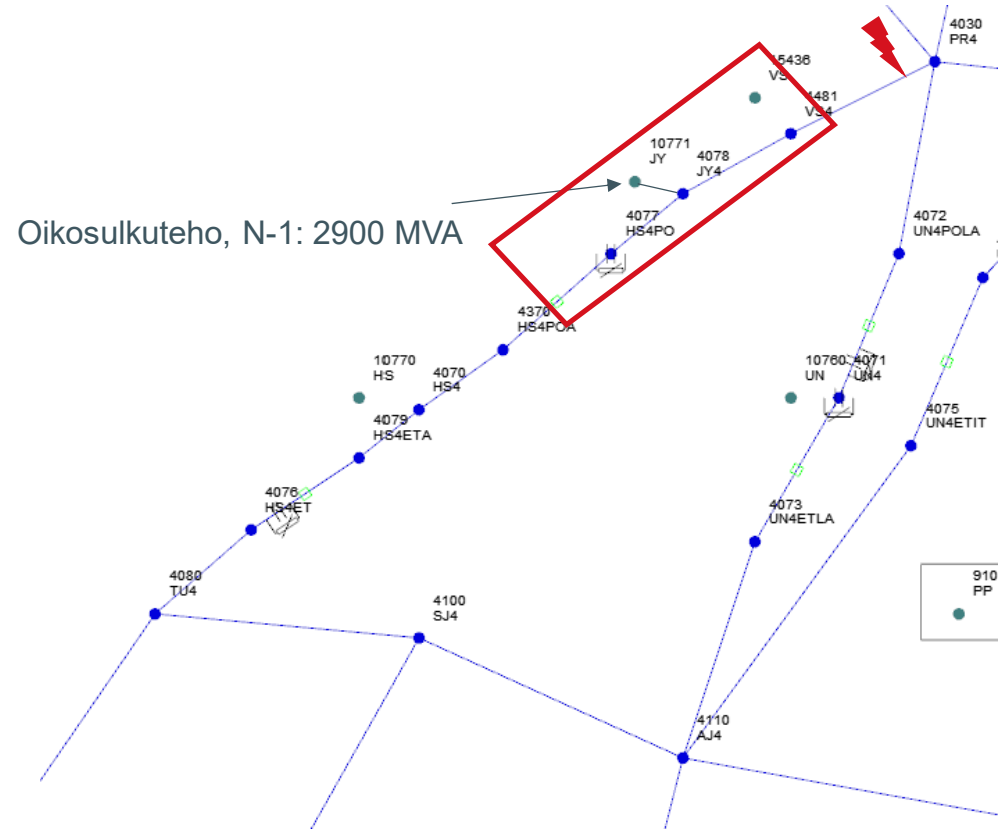
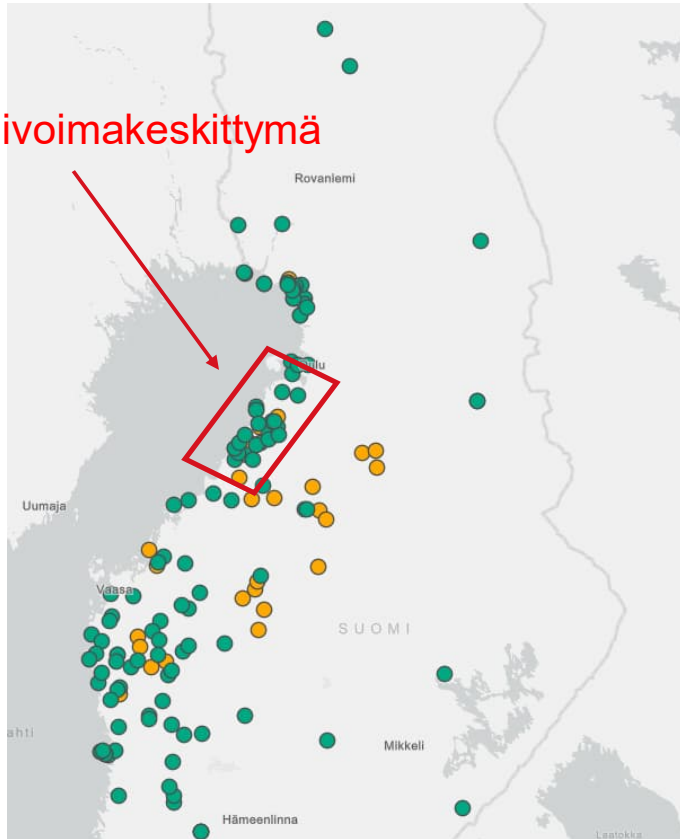


Pohjois-Pohjanmaan alue

Year 2022-2023

Yli 1600 MW tuulivoimaprojekteja, joista 1600 MW liittymässä Jylkän 110 kV asemalle

Tuulivoimakeskittymä

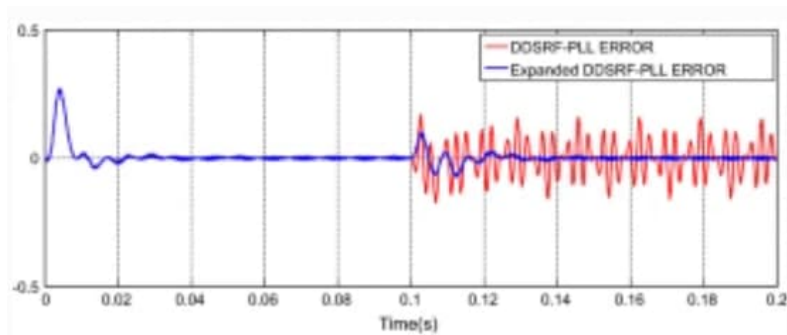


- ESCR alle 1.0 useammalle tulevaisuuden tuulipuistolle

Keinoja stabiiliuden varmistamiseksi

1) Tuulivoimalan viritys matalalle ekvivalenttiselle oikosulkusuhteelle

- 1) Puistonsäätäjän viritys ESCR:n mukaan
 - Jännitesäätäjät hitaammiksi
- 2) Turbiinien säätöjen viritys PSCAD simulointitulosten perusteella



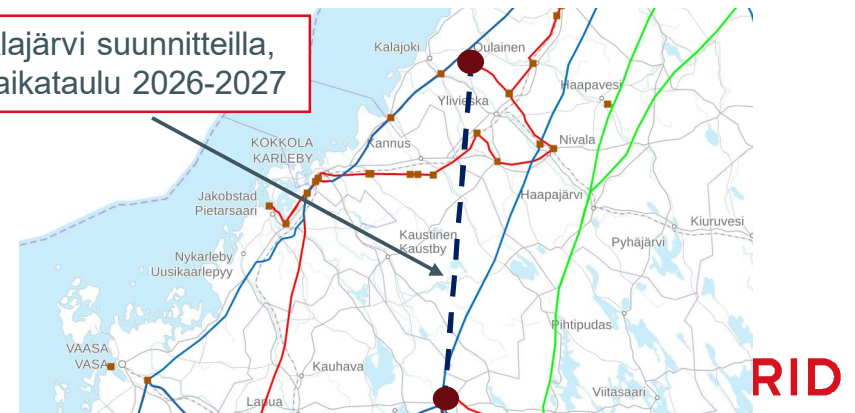
2) Synkronikompensoattorit kasvattavat liityntäpisteen oikosulkutehoa

Fingrid selvittää tarvetta ja varautuu synkronikompensoattorin hankintaan Jylkän alueelle.



3) Voimajohdot tuovat liityntäpistettä sähköisesti lähemmäs tahtikoneita

Jylkkä-Alajärvi suunnitteilla, arvioitu aikataulu 2026-2027



Miten toimitaan jännitteensäädön epästabiliustilanteessa?

- Voimalaitoksen jännite alkaa värähdellä **suoritetun kytkentätilanteen muutoksen** seurauksena → palautetaan mahdollisuuksien mukaan aiempi kytkentä
- Voimalaitoksen jännite alkaa värähdellä **ilman selvää syy-yhteyttä**
 - Syy: pätöteho noussut? Kytkentätilanne muuttunut? Ohimenevä vika verkossa?
 - Tunnistetaan suurin voimalaitos tai säteittäisellä johdolla kauimmas kytketty laitos
 1. Otetaan yhteys tuulivoimalaitosta operoivaan valvomoon
 2. Pyydetään jännitteensäädön toimintatilan vaihtoa jännitteensäädöltä tehokerroin- (tai loistehosäädölle)
 3. Ei auta? → Pyydetään pätötehon laskemista selvästi (>50 % tai pätötehon nopea alassäätö 100→20%)
 4. Ei auta? → Pyydetään voimalaitoksen irrottamista verkosta
 5. Ei auta? → Otetaan yhteyttä seuraavaan laitokseen (koko & etäisyys –kriteeri)

Epästabiiliuden tunnistaminen

- Epästabiiliuden havaitseminen voi olla hankalaa nopeiden ja tarkkojen mittausten puuttuessa
- Heilunta voi kestää tunteja – tai kasvaa suureksi nopeasti (tehoriippuvuus)
- Suojauksen rooli?

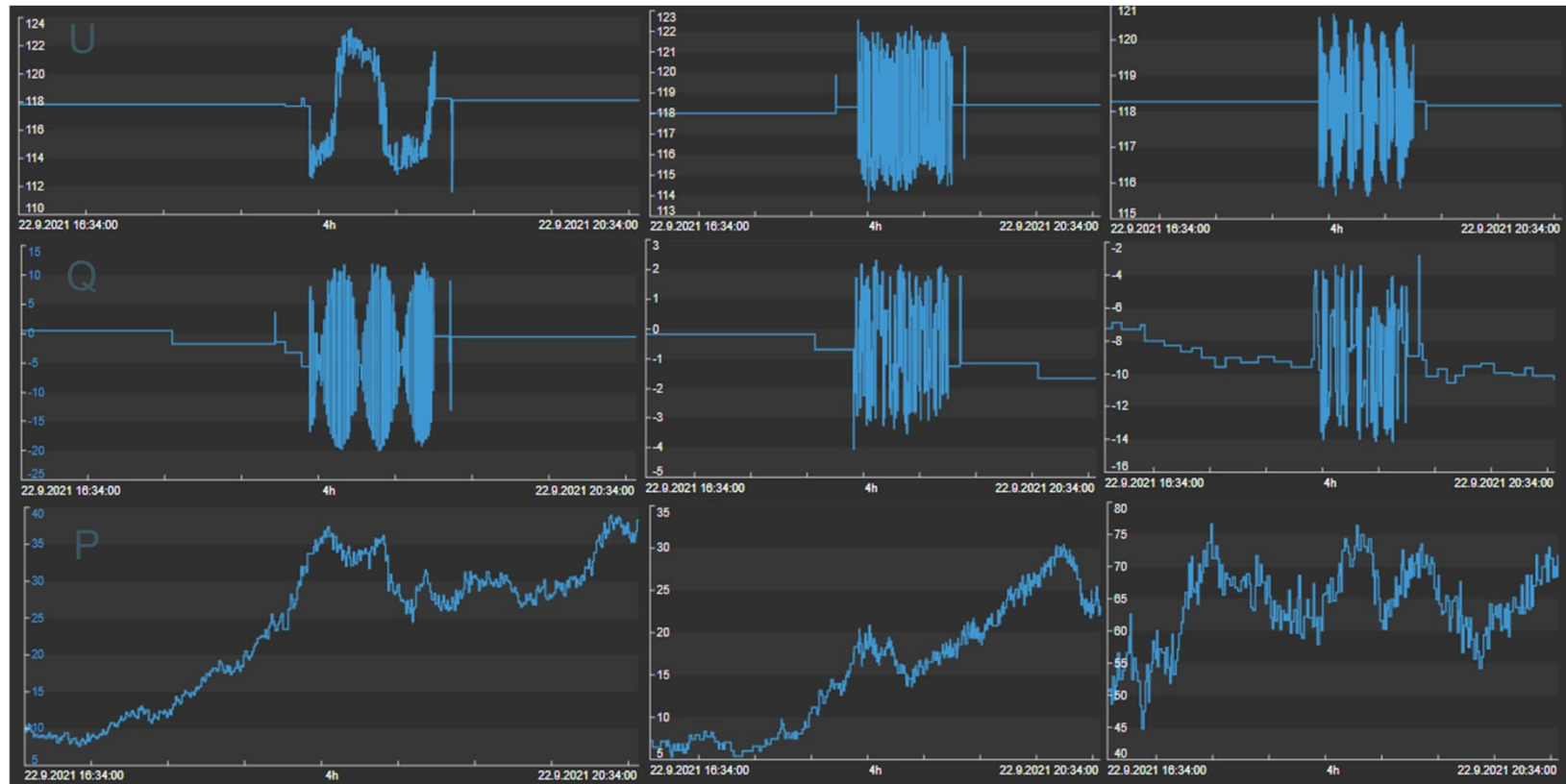
Haaste: miten valvomo havaitsee jänniteheilunnan?

- SCADAn mittauksesta?
- Muu mittaus?
- Suojarehälytyksestä?
- Puhelinsoitto?
- Valot vilkkuu?

Tuulivoimalaitos A

Tuulivoimalaitos B

Tuulivoimalaitos C



Häiriötallenteet ovat tärkeitä

- VJV2018 vaatii häiriö- ja heilahtelutallentimet kaikilta yli 10 MW voimalaitoksilta
- Liipaisee, kun
 - suojauksen laukaisusta
 - jännitteen alittaessa 0,95 tai ylittäessä 1,05 p.u.
 - taajuus alittaa 49,8 Hz tai ylittää 50,2 Hz (vain heilahtelutallennin)
- Ongelma: tallennuskapasiteetti usein varsin rajallinen → tallenteet kannattaa pyytää heti, jos niitä arvellaan tarvittavan. Jo voimalaitoksen palauttaminen verkkoon saattaa tuottaa uusia tallenteita, jotka ylikirjoittavat aiemmat ja tieto häiriöstä menetetään
- Tuulivoimavalvomoa pyydetään toimittamaan viipymättä häiriötallenteet, mikäli häiriöön liittyy
 - Epäily säädön epästabiiliudesta
 - Voimalaitoksen irtoaminen verkosta ohi menevässä lähiviassa (ei pysyviä vikoja tai johdonvarsiliityntöjen eroonkytkennästä aiheuvia laukaisuja)



Toimenpiteet

Vastuunjaon periaate:
Jokainen vastaa omaan verkko-omaisuuteensa kohdistuvista muutoksista.

Rakenteilla olevat voimalaitokset* (FON ei myönnetty)

Säädöt viritetään ESCR-arvoon perustuen.

Fingrid antaa lähtötietona ESCR-arvon – Liittyjä selvittää muutostarpeet ja toteuttaa tarvittavat muutokset.

Case: Jylkkä
Fingrid lähestyy Liittyjiä toimenpide-ehdotuksella Q1/2022

Muu verkko:
Fingrid kriittisyysluokittelee kohteet Q1-Q2/2022 ja lähestyy Liittyjiä

Tuotannossa olevat voimalaitokset (FON myönnetty)

Säätöjen uudelleenviritys ESCR-arvoon perustuen tarpeen mukaan.

Tarve toimenpiteille tarkastellaan alueellisesti – mikäli rakenteilla olevien voimalaitosten viritys ei riitä, tulee jo käytössä olevien laitteistojen säädöt virittää laitosten merkittävyys (sijainti, koko) huomioiden.

Takaa stabiilin toiminnan ja käytettävyyden.

Uudet hankkeet

Säädöt viritetään ESCR-arvoon perustuen.
vikavirrat@fingrid.fi
toimittaa arvoja jo nyt.

Asetetaan tarvittaessa erityistarkasteluvaatimusten nojalla (VJV2018/luku 5) täydentäviä vaatimuksia.

PSCAD-malli vaaditaan jatkossa kaikilta D-tyypin voimalaitoksilta.

Toimenpiteet kantaverkossa ja jakeluverkoissa (>2 a)

Fingrid selvittää, suunnittelee ja toteuttaa verkossaan muutokset, joilla varmistetaan stabiili toiminta.

Esim. käyttötavat, laiteinvestoinnit muuntajiin, johtoihin ja synkronikompensointoreihin.

Vaikutukset jakeluverkkoyhtiöihin selvitettävä.

*) Koskee kaikkia suuntaajakytkettyjä voimalaitoksia sekä sähkövarastoja

Kiitos!

Kysymyksiä?

Vaatimuspohja

- Vaatimuksena **stabiili toiminta**
 - Säättötoimintojen vasteen sähköjärjestelmän jännitteen askelmaisiiin muutoksiin ja jatkuvaan vaihteluun tulee olla stabiili (VJV2018/18.2.1, VJV2013/18.2.1)
 - Liittyjän vastuulla on ylläpitää vaatimustenmukainen toiminta koko laitoksen käyttöiän (VJV2018/6.1.1, VJV2013/5.1.1)
- Tarvittaessa voidaan **edellyttää säättötoimenpiteitä, rajoittaa tehoa** tai ääritilanteessa **irrottaa voimalaitos** (YLE2017, luku 3.8 / YLE2021, luku 3.9)
 - Käyttövarmuuden ylläpito
 - Kaikkien osapuolien omaisuuden suojeleminen



11.2.2022

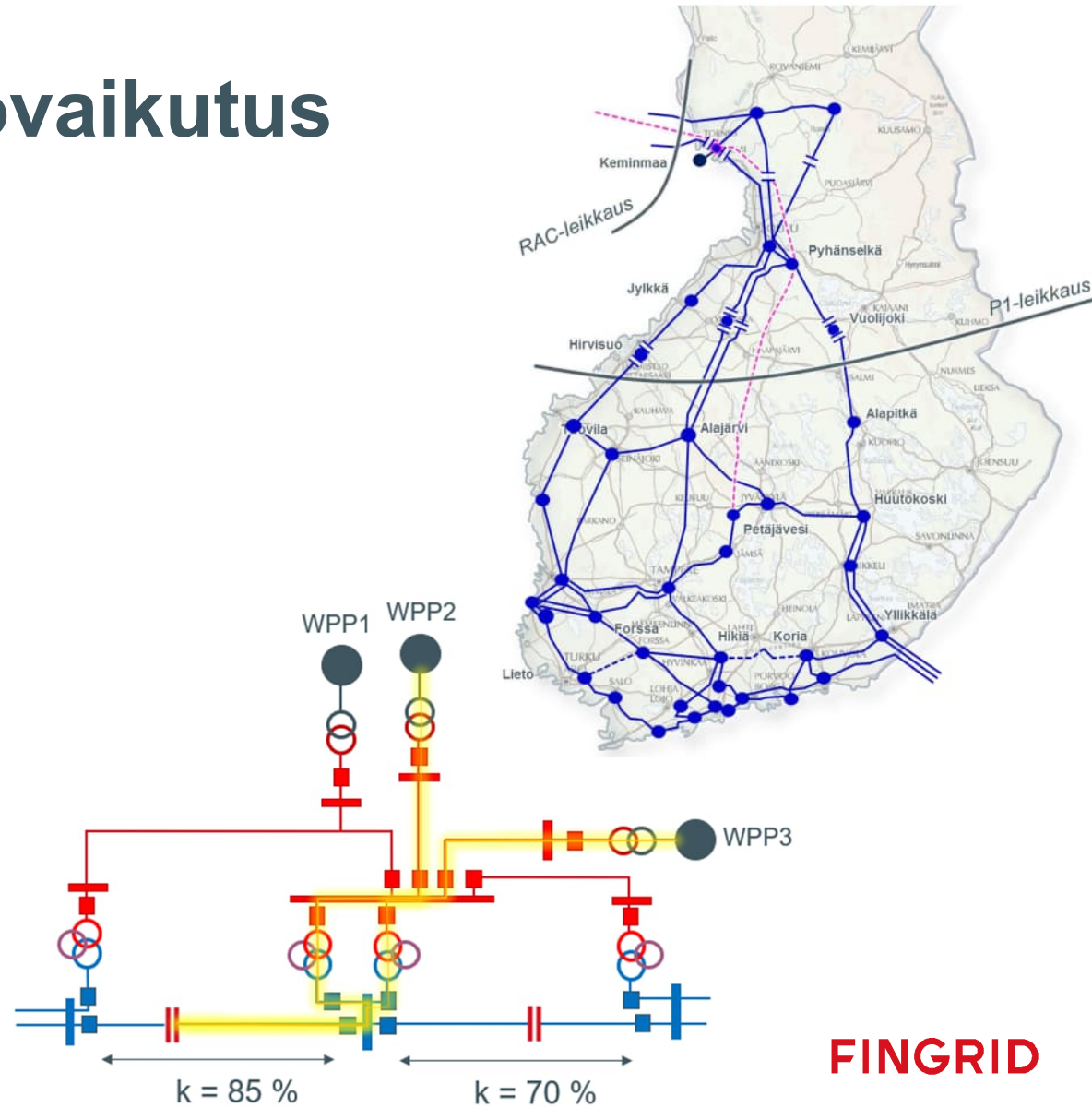
**Alisynkroniseen
vuorovaikutukseen (SSO) liittyvien
erityistarkasteluvaatimusten
päivitys**

FINGRID

SSO = Subsynchronous oscillations

Alisynkroninen vuorovaikutus

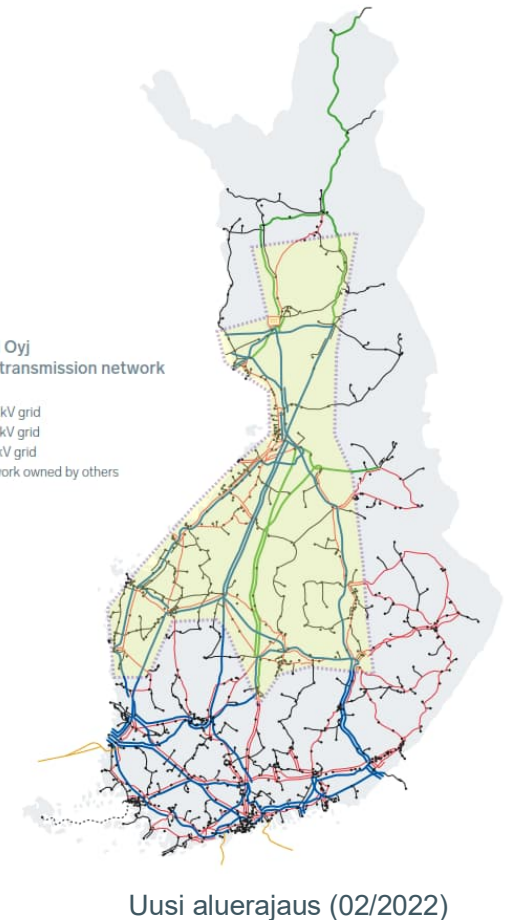
- Suomessa 400 kV siirtoverkko on sarjakompensoitu pohjois-eteläsuuntaisilla (P1-leikkaus) sekä Suomen ja Ruotsin välisillä siirtoyhteyksillä (RAC-leikkaus).
- Sarjakompensoidussa verkossa esiintyy resonanssipisteitä alisynkronisilla taajuuksilla (n. 5-45 Hz)
 - Kun tuulivoimalaitos liittyy sarjakompensoidun verkon läheisyyteen, riski resonanssiin on olemassa.
 - Alisynkroninen resonanssi (SSO) on sähköinen vuorovaikutusilmiö, jossa energiaa siirtyy verkkokomponenttien välillä, tässä tapauksessa tuulivoimalaitoksen ja sarjakompensoidun verkon välillä
 - Tuulivoimalaitoksen mahdollinen negatiivinen vaimennus ylittää resonanssitaajuudella verkon positiivisen vaimennuksen



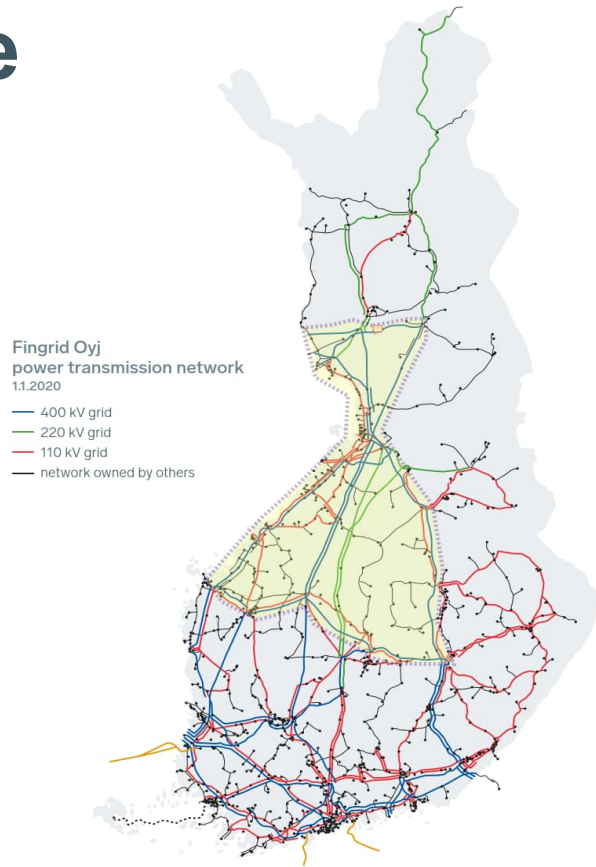
FINGRID

Alisynkroniseen vuorovaikutukseen (SSO) liittyvät erityistarkasteluvaatimukset on päivitetty

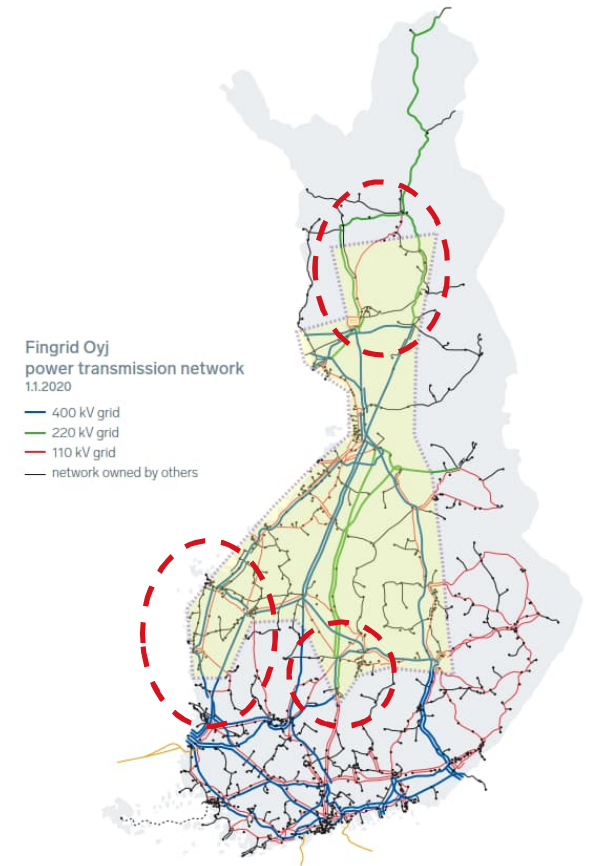
- Fingrid julkaisi 7.1.2021 ohjeen ”Erityistarkasteluvaatimukset Fingridin sarjakompensoidun verkon läheisyyteen liittyville suuntaajakytketyille voimalaitoksille”
- Ohje on nyt päivitetty vuonna 2021 tehtyjen jatkoselvitysten ja tuulivoimahankkeista saatujen kokemusten perusteella versioon 11.2.2022. Nimeä tarkennettu: **”Erityistarkasteluvaatimukset suuntaajakytketyille voimalaitoksille liittyen alisynkroniseen vuorovaikutusriskiin”**
- Vaatimuksia on täydennetty mm. seuraavin osin:
 - Riskialuetta kasvatettu
 - Suojausvaatimuksia on tarkennettu (suojauksen voi toteuttaa myös päämuuntajatasolla, annettu suositus suojauksen teknisestä toteutustavasta)
 - PSCAD-malli vaaditaan nyt kaikilta D-tyypin voimalaitoksilta (myös alle 60 MW)
 - Vaimennusvaatimukset voimaan myös alle 60 MW **DFIG**-voimalaitoksille
 - Fingrid julkaisee myös erillisen mallinnusohjeen PSCAD- ja PSS/E-malleja varten



Riskialue kasvaa



Alkuperäinen aluerajaus (01/2021)



Uusi aluerajaus (02/2022)

Uusien vaatimusten soveltaminen

Vaatimukset koskevat riskialueella olevia D-tyyppin voimalaitoksia (liittymispisteen $U \geq 110$ kV ja/tai yli 30 MW)

Teho (Pmax)	Tyyppi	Vaatimukset			
		Suojaus	Mallinnus	Vaimennus	Instrumentointi
≥ 60 MW	DFIG	X	X	X	X
	FC	(X)	X	X	X
< 60 MW	DFIG	X	X	X	
	FC	(X)	X		

DFIG = "Type-3", Kaksoissyötetty epätahtigeneraattori (tuulivoimalaitos)

FC = "Type-4", Täyskonvertteri (tuulivoimalaitos, muu suuntaajakytketty voimalaitos tai sähkövarasto)

Muutokset aiempiin vaatimuksiin korostettu **punaisella**.

X = Vaatimus voimassa, (X) = Vapautus mahdollinen, Tyhjä = Vaatimus ei voimassa

Suojausvaatimukset

- Voimalaitos tulee suojata voimalaitoksen ja sarjakompensoidun verkon välille mahdollisesti syntyvältä alisynkroniselta vuorovaikutukselta, jotta laiterikoilta vältytään.
 - **Suojauksen on** oltava selektiivinen muun suojauksen kanssa ja **kyettävä havaitsemaan luotettavasti** jännitteessä ja virrassa esiintyvät **alisynkroniset taajuuskomponentit**.
- Suojaus voidaan toteuttaa suuntaajatasolla (turbiinitasolla) **tai päämuuntajatasolla (puistotasolla)**
 - **Liittyjä määrittelee asettelut** laitteiden sietokyvyn perusteella
- Suojaus suositellaan toteutettavan seuraavasti:
 - **kaistanpäästösuodattimeen perustuva alisynkronisten komponenttien suodatus**
 - **laukaisu amplitudiin perustuen**; toiminta käänteisaikaisen toimintakäyrän mukaan tai vähintään kolmella suojausportaalla – Suojausportaiden toiminta-aika on aseteltavissa välillä 500 ms – 60 s.
- **Suojauksen asetteluiden** – kuten toiminta-aikojen ja suodattimien rajataajuuksien – **tulee olla muutettavissa jälkikäteen** – Fingrid suosittelee, että asettelut ovat muutettavissa etäyhteydellä.
- Suojauksen toiminta tulee todennus tehdaskokeissa - tyyppitestistä laaditaan ohje, joka hyväksytetään Fingridillä ennen koetta - **Suojaustesti toistetaan projektikohtaisella PSCAD-mallilla.**

Mallinnusvaatimukset

- Liittyjän tulee **toimittaa simulointimalli ja laskentatulokset Fingridille väh. 6 kk ennen voimalaitoksen suunniteltua käyttöönottoa** (ensimmäinen suuntaajakytketty yksikkö kytketään verkkoon).
- **Fingrid toimittaa** mallinnusta varten liittymispisteen oikosulkuvirrat ja -impedanssit, **ekvivalenttisen oikosukusuhteen (ESCR) sekä passiivisen impedanssiprofiilin alisykronisella taajuuskaistalla.**
- Voimalaitoksen PSCAD-mallilla tulee suorittaa
 - 1) **voimalaitosmallin vaatimustenmukaisuutta** kuvaavat VJV2018:n, taulukossa 20.1 mainitut **simuloinnit** (jännitteensäädön askelvaste, lähivikakoe, loistehokapasiteetti ja mahdolliset laitoskohtaiset lisäsäädöt),
 - 2) **SSO-suojaukselle suoritettujen laitetestin toistaminen** vastaavan toiminnan osoittamiseksi,
 - 3) dynaaminen impedanssiskannaus PQ-diagrammin viidessä eri toimintapisteessä, joka kuvaa voimalaitoksen taajuusvastetta alisykronisella taajuuskaistalla, jännitteensäätö päällä. **Ei vaadita <60 MW täyssuuntaajakytketyiltä voimalaitoksilta!**
- **Fingrid julkaisee erillisen mallinnusohjeen jossa tarkemmat vaatimukset malleille!**

Vaimennusvaatimukset

- Vaimennusvaatimukset asetetaan kaikille Fingridin sarjakompensoidun verkon läheisyyteen liittyville tyypin D suuntaajakytketyille voimalaitoksille, joiden mitoitusteho on yli 60 MW.
- **Lisäksi kaikki tyypin D kaksoissyötetyillä epätahtigeneraattoreilla (DFIG) toteutetut tuulivoimalaitokset tulee varustaa** alisykronista vuorovaikutusta **vaimentavalla vaimennussäädöllä** – viritys Fingridin toimittaman liittymispisteen impedanssiprofiilin perusteella.
- Fingrid arvioi voimalaitoksen ja verkkokomponenttien välistä alisykronista vuorovaikutusta liittyjän toimittaman PSCAD-mallin ja impedanssiskannauksen avulla
 - Tarvittaessa voimalaitoksen säädön uudelleenviritys niin, että vuorovaikutus saadaan minimoitua.
 - Uudelleenvirityksen jälkeen liittyjän tulee toimittaa päivitetty impedanssiprofiilit sekä päivitetty PSCAD-malli Fingridille. Toimitettujen tietojen perusteella Fingrid arvioi uudelleen voimalaitoksen alisykronista vuorovaikutusta.

Asiakasvaikutukset: vaatimusten soveltaminen

Rakenteilla olevat hankkeet

- Eli hankkeet, joissa FON:ia ei vielä myönnetty
- Suunnittelu ja toteutus voidaan viedä loppuun aiemman ohjeversion mukaisesti
- Fingrid kuitenkin suosittelee uuden ohjeversion käyttämistä pohjana suunnittelussa
- Aikatauluhaasteet mallinnuksen kanssa tunnistettu

Uudet hankkeet

- Eli hankkeet, joissa erityistarkasteluvaatimusten arviointia ei ole vielä pyydetty & annettu
- Suunnittelu ja toteutus uuden ohjeversion mukaan

Käytössä olevat laitokset

- Eli hankkeet, joissa FON myönnetty tai VJV2013-prosessi saatettu loppuun
- Ei välittömiä vaikutuksia
- Mikäli myöhemmin havaitaan voimalaitoksen aiheuttavan häiriötä (stabiiliusongelmia), voivat toimenpiteet olla välttämättömiä järjestelmän käyttövarmuuden turvaamiseksi, omaisuuden suojaamiseksi ja käytettävyyden takaamiseksi

Päivitetty ohje löytyy verkkosivuilta!

- Englanninkielinen versio julkaistaan 03/2022
- Mallinnusohjeen julkaisun tavoiteaikataulu 03/2022

The screenshot shows the Fingrid website's navigation and content. At the top, the FINGRID logo is on the left, and navigation links for 'Asiakkaalle', 'Sähkömarkkinat', and 'Kantaverkko' are on the right. Below the navigation, a breadcrumb trail reads: 'Etusivu / Kantaverkko / Liittyminen kantaverkkoon / Järjestelmätekniset vaatimukset / Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset'. The main content area is titled 'Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset'. On the left, a sidebar menu lists various topics, with 'Järjestelmätekniset vaatimukset' highlighted in red. The main text explains that power plants connecting to the Finnish power system must meet technical requirements (VJV) based on European Commission Regulation (EU) 2016/631. It notes that Fingrid has adopted national additions and clarifications to these requirements. A list of attachments ('LIITTEET') is on the right, with 'Erityistarkasteluvaatimukset suuntaajakytketyille voimalaitoksille - SSO' circled in red. Other attachments include 'Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset VJV2018', 'Taulukot VJV2018', 'Voimalaitosten loistehokapasiteetti-vaatimus ja lisäkompensointi', 'Voimalaitoksen pitkän liittymisjohdon loistehonhallinta', and 'Subsynchronous'.

Osallistu, vaikuta, voita!

Arvomme kaikkien osallistujien kesken mukavat palkinnot!

Uudistamme Fingridin internet-sivuja. Nyt haastamme sinut testaamaan ja kommentoimaan suunnitelmia.

Ilmoita osallistumisestasi Onni Härmälle tai Fingridin viestinnälle:

viestinta@fingrid.fi.

Fingrid.fi:n proton testaus vie aikaasi max 15 min. Testaus tehdään omalla koneella, itselle sopivana ajankohtana ja viimeistään 20.2. Käytämme testauksessa Maze työkalua ja testauksen järjestää Solita Oy.

