

9.10.2026

Erityistarkasteluvaatimukset suuntaajavaltaisille alueille liittyville suuntaajakytketyille voimalaitoksille

1 Johdanto

Tässä asiakirjassa asetetaan erityistarkasteluvaatimukset tyyppin D suuntaajakytketyille voimalaitoksille, jotka liittyvät Suomen sähköjärjestelmän suuntaajavaltaisille alueille. Vaatimukset asetetaan Voimalaitosten järjestelmätekniikan vaatimusten erityistarkasteluvaatimusten nojalla (ks. VJV2024 luku 5).

Fingrid on selvittänyt yhdessä laitevalmistajien kanssa vuosien 2022–2026 aikana suuntaajakytkettyjen voimalaitosten kyvykkyyttä toimia sähköjärjestelmän suuntaajavaltaisilla alueilla. Tässä asiakirjassa liittymispisteen suuntaajavaltaisuutta arvioidaan perustuen ekvivalenttiseen oikosulkusuhteeseen (engl. Equivalent Short Circuit Ratio, lyh. ESCR). ESCR-arvo kuvaa verkon suuntaajavaltaisuutta voimalaitoksen liittymispisteestä katsottuna eli tahtikoneiden ja muiden verkkoa luovien laitteistojen (engl. grid forming, lyh. GFM) tuottamaa jännite- ja kulmajäykkyyttä suhteessa verkkoa seuraavien (engl. grid following, lyh. GFL) voimalaitosten pätootehoon huomioiden näiden väliset sähköiset etäisyydet.

Fingridin selvitysten ja alan tutkimuksessa esitettyjen analyysien perusteella verkkoa seuraavat suuntaajakytketyt voimalaitokset saattavat aiheuttaa suuntaajavaltaisilla alueilla vaimentumattomia tai heikosti vaimenevia suuntaajalähtöisiä jänniteheilahteluita (engl. converter-driven oscillations). Lisäksi suuntaajakytkettyjen voimalaitosten lähivikakestoisuuden (engl. fault ride-through capability) on havaittu olevan heikko suuntaajavaltaisilla alueilla. Suuntaajakytkettyjen voimalaitosten on havaittu aiheuttavan suuntaajavaltaisissa verkon osissa tapahtuvissa kolmivaiheisissa oikosuluissa merkittäviä ylijännitteitä verkkoon ja voimalaitosten suuntaajien DC-välipiiriin. Ylijännitteet aiheutuvat voimalaitosten säätöpiirien epästabiliista käyttäytymisestä ja aiheuttavat tietyissä tilanteissa riskin voimalaitosten laajamittaisille irtoamisille.

Yhteistyössä laitevalmistajien kanssa toteutetulla säätöparametrien optimoinnilla on pystytty merkittävästi vähentämään suuntaajalähtöisten jänniteheilahtelujen riskiä ja parantamaan voimalaitosten toimintaa verkkovikojen yhteydessä. Verkkojännitteen riittävän jännite- ja kulmajäykkyyden varmistaminen on kuitenkin erityisen haastavaa suuntaajavaltaisilla alueilla, joilla verkkoa luovien laitteistojen osuus on vähäinen. Käytännössä riittävää suorituskykyä ei voida saavuttaa pelkästään säätöparametreja optimoimalla.

Fingridin tekemien teknisten analyysien perusteella oikein toteutetulla verkkoa luovalla säädöllä on luonnostaan kyvykkyys estää edellä kuvattuja ongelmia. Verkkoa luova laitteisto pyrkii vastustamaan jänniteosoittimen muutoksia vastaamalla verkon jännitteen kulmamuuutukseen lähes välittömällä pätootehovasteella sekä verkon jännitteen amplitudimuutukseen lähes välittömällä loistehovasteella. Jännitteen amplitudijäykkyyttä parantavan loistehovasteen on analyysissä havaittu olevan keskeistä suuntaajalähtöisten jänniteheiluntojen vaimentamiseksi. Jännitteen kulmamuuutoksia vastustavan pätootehovasteen on puolestaan havaittu olevan keskeistä suuntaajakytketyn voimalaitoksen lähivikakestoisuuden varmistamiseksi suuntaajavaltaisilla alueilla.

9.10.2026

Nämä ominaisuudet ovat välttämättömiä suuntaajakytketyn voimalaitoksen stabiilin toiminnan varmistamiseksi, joka on ehdoton edellytys Fingridin järjestelmäteknisten vaatimusten täyttymiselle (ks. VJV2024, luku 18.2.1) ja siten suuntaajakytketyn voimalaitoksen verkkoon liittämiseksi. Kuvatut ominaisuudet on mahdollista toteuttaa luvussa 2 kuvatulla tavalla joko suuntaajakytketyn voimalaitoksen laitteistoon toteutetun verkkoa luovan säädön avulla tai suuntaajakytketyn voimalaitoksen liittymispisteen läheisyyteen liitettävällä erillisellä verkkoa luovalla lisälaitteistolla kuten sähkövarastolla, energiavarastolla varustetulla STATCOM-laitteistolla (engl. energy-storage-equipped static synchronous compensator, lyh. ES-STATCOM) tai tahtikoneella kuten synkronikompensaattorilla.

Fingrid on julkaissut verkkosivuillaan aihetta taustoittavan teknisen selvityksen [1].

2

Vaatimusten soveltamisala ja vaatimustenmukaisuuden osoittaminen

Tässä dokumentissa esitetyt erityistarkasteluvaatimukset koskevat kaikkia Suomen sähköjärjestelmään kytkettyjä tyyppin D suuntaajakytkettyjä voimalaitoksia, joiden liittymispisteen ESCR-arvo on alle 1,0.

Fingrid määrittää ESCR-arvot osana jatkuvaa suunnitteluprosessiaan ja niiden suuruus määräytyy olemassa olevien sekä sovittujen, vielä rakentumattomien liittymisten perusteella. Hyvin alhaisia, alle $ESCR < 1,0$, arvoja esiintyy tuulivoimavaltaisilla alueilla, joilla tahtikoneiden määrä on vähäinen tai jotka ovat kaukana tahtikoneista.

Fingrid toimittaa ESCR-arvon liittyjälle osana VJV2024:n luvun 5 mukaista erityistarkasteluvaatimusten arviointia. Arviointi suoritetaan liittäjän pyynnöstä vaatimusten todentamisprosessin alussa, vaiheessa 0 (VJV2024, luku 6.4.3.2) ennen liittymissopimuksen solmimista. Liittäjän tulee pyytää erityistarkasteluvaatimusten arviointia Fingridiltä riippumatta siitä, liittyykö voimalaitos Fingridin verkkoon vai muun verkonhaltijan, kuten jakeluverkkoyhtiön verkkoon.

Tässä dokumentissa vaaditut tarkastelut suoritetaan osana VJV2024:n mukaista vaatimusten todentamisprosessia, sen vaiheessa 1. Fingrid kuitenkin suosittelee Liittijää varmistamaan laitetoimittajiltaan jo vaiheessa 0 (ennen laitteiden hankintaa) vaatimusten täyttymisen voimalaitoksen alustavilla suunnitteluarvoilla.

Laitevalmistaja voi halutessaan saada käyttöönsä tässä dokumentissa kuvatut mallien testaustyökalut arvioidakseen teknologiansa vaatimustenmukaisuutta. Fingrid arvioi voimalaitoksen vaatimustenmukaisuuden aina laitokohtaisesti eikä myönnä yksittäisille laitteille sertifikaatteja tai pidä yllä listaa vaatimukset täyttävistä laitteista. Laitevalmistaja voi kuitenkin saada Fingridiltä lausunnon teknologiansa kyvykkyydestä täyttää tässä dokumentissa esitetyt vaatimukset yleisellä tasolla.

9.10.2026

3 Vaatimukset

3.1 Vaatimus verkkoa luovasta säädöstä

Suuntaajakytketyltä voimalaitokselta vaaditaan kyvykkyyttä verkkoa luovaan säätöön joko voimalaitoksen oman säädön tai lisälaitteiston tuottamana, mikäli Fingridin voimalaitokselle toimittama ESCR-arvo alittaa arvon 1,0. Verkkoa luovan lisälaitteiston vähimmäismitoitus määräytyy voimalaitokselle toimitetun ESCR-arvon suuruuden perusteella. Eri lisälaitteiden mitoitus on esitetty Taulukossa 1. Liittyjä valitsee lisälaitteiston tyypin.

Sähkövarastoilla mitoitusarvo perustuu sähkövaraston mitoitustehoon (P_{BESS} , sama arvo tuotanto- ja kulutustilalle) suhteessa liitettävän suuntaajakytketyn voimalaitoksen mitoitustehoon (P_{max}). Vastaavasti ES-STATCOM:illa mitoitusarvo perustuu ES-STATCOMin energiavaraston mitoitustehoon (P_{ESTAT}) suhteessa liitettävän suuntaajakytketyn voimalaitoksen mitoitustehoon. Tahtikoneella mitoitusarvo perustuu tahtikoneen alkuoikosulkutehoon (S''_k) suhteessa liitettävän suuntaajakytketyn voimalaitoksen mitoitustehoon.

Taulukko 1. Vaatimus verkkoa luovan lisälaitteiston mitoitustehosta.

ESCR	Sähkö- varasto ($P_{\text{BESS}} / P_{\text{max}}$)	ES- STATCOM ($P_{\text{ESTAT}} / P_{\text{max}}$)	Tahtikone (S''_k / P_{max})
$\text{ESCR} \geq 1.0$	-	-	-
$0.9 \leq \text{ESCR} < 1.0$	$\pm 10 \%$	$\pm 7 \%$	33 %
$0.7 \leq \text{ESCR} < 0.9$	$\pm 20 \%$	$\pm 13 \%$	66 %
$\text{ESCR} < 0.7$	$\pm 30 \%$	$\pm 20 \%$	100 %

Verkkoa luovan lisälaitteiston tulee olla kytkettynä verkkoon ja kyetä toimimaan Taulukon 1 mukaisten mitoitusarvojensa puitteissa aina voimalaitoksen toimiessa vähintään 50 % mitoitusteholla. Keskeytys-, vika- tai muussa poikkeuksellisessa tilanteessa Fingridillä on oikeus pyytää lisälaitteisto verkkoon, mikäli voimalaitoksen stabiili toiminta alle 50 % teholla edellyttää lisälaitteiston käyttöä. Lisälaitteiston rakentaminen ja käyttöönotto tulee ajoittaa siten, että se on käytettävissä voimalaitoksen aloittaessa pätötehon syötön verkkoon (ION).

Verkkoa luovan sähkövaraston tulee noudattaa sähkövarastoille asetettuja järjestelmäteknisiä vaatimuksia (SJV2024), mikäli sähkövarastolla tuotetaan järjestelmäpalveluita eli laitteisto osallistuu sähkö- tai reservimarkkinoille. Lisälaitteistona käytettävää verkkoa luovaa sähkövarastoa on sallittua käyttää normaalisti sähkö- ja reservimarkkinoilla, mutta markkinakäyttö ei saa rajoittaa Taulukon 1 mukaisten vähimmäismitoitusarvojen mukaista voimalaitoksen toimintaa stabiloivaa vaikutusta.

9.10.2026

Mikäli ES-STATCOM-laitteistolla tuotetaan järjestelmäpalveluita, tulkitaan se sähkövarastoksi.

Mikäli sähkövarastolla ei tuoteta järjestelmäpalveluja, sähkövarasto voidaan tulkita ES-STATCOM-laitteistoksi, jolloin siihen sovelletaan ES-STATCOM-laitteiston mitoitusarvoja (Taulukko 1).

ES-STATCOM-laitteiston tulee kyetä syöttämään mitoituspätötehonsa vähintään 200 ms ajan. ES-STATCOM-laitteiston tulee noudattaa SJV2024 luvun 12.2 loistehokapasiteettivaatimusta, joka määrittää laitteiston mitoitusteholla (P_{ESTAT}). ES-STATCOM-laitteistolla on mahdollista täyttää voimalaitoksen loistehokapasiteettivaatimus täysin tai osittain sen sijaitessa voimalaitoksen kanssa samassa liittymispisteessä. Tällöin on huomioitava, että laitteiston tulee olla käytössä aina voimalaitoksen toimiessa minimitehonsa yläpuolella.

3.2 Sijaintiin liittyvät vaatimukset

Mikäli verkkoa luovaa säätö toteutetaan voimalaitoksen omien suuntaajayksiköiden sijasta erillisellä lisälaitteistolla, tulee tämä laitteisto sijoittaa sähköisesti mahdollisimman lähelle voimalaitoksen suuntaajayksiköitä. Lisälaitteisto voidaan liittää joko

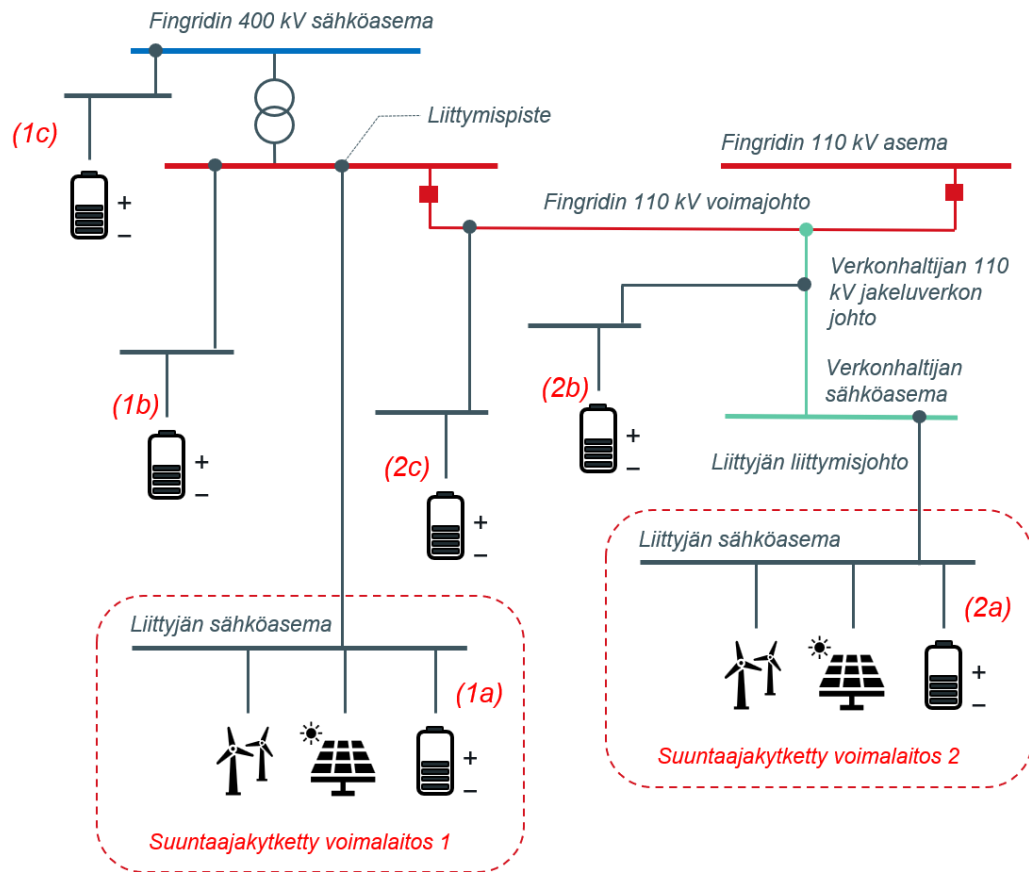
- osaksi voimalaitoksen sisäistä sähköjärjestelmää
- verkonhaltijan tai Fingridin samalle sähköasemalle, johon voimalaitoskin on liitetty säteittäisellä yhteydellä
- verkonhaltijan tai Fingridin samalle 110 kV voimajohdolle, johon voimalaitoskin on liitetty.

Periaatteena on, että Fingridin renkaaseen kytketyn 110 kV tai 400 kV johdon vika ei saa johtaa voimalaitoksen ja sen lisälaitteiston päätymiseen erillisiin verkon osiin. Näin ollen ne eivät voi sijaita eri Fingridin asemilla (400 kV tai 110 kV) tai siten, että toinen on liitetty Fingridin kytkinlaitokselle ja toinen 110 kV voimajohdolle. Lisälaitteiston sijoituksessa on huomioitava, että laitteiston on oltava aina käytettävissä voimalaitoksen syöttäessä tehoa luvun 3.1 vaatimusten mukaisesti.

Voimalaitoksen ja lisälaitteiston sähköinen etäisyys ei saa olla yli 60 km. Etäisyydessä tulee huomioida myös muuttuvat jakorajat, jotka määräytyvät näiden vaatimusten kannalta verkon normaalin (pääasiallisen) käyttötilanteen mukaan. Verkon jännitetaso (400 kV ja 110 kV) ei vaikuta etäisyyden määrittämiseen.

Kuva 1 havainnollistaa erilaisia liittämistapoja.

9.10.2026



Kuva 1. Esimerkkejä lisälaitteiston liittämistavoista. Suuntaajakytketyn voimalaitoksen 1 liittymispiste on Fingridin 110 kV sähköasemalla, jolloin sen lisälaitteisto voi liittyä voimalaitokselle (1a) tai säteittäisellä yhteydellä samalle Fingridin sähköasemalle 110 kV (1b) tai 400 kV (1c) jännitetasoon. Suuntaajakytketyn voimalaitoksen 2 liittymispiste on Fingridin 110 kV johtoon liittyvän jakeluverkkoyhtiön asemalla, jolloin sen lisälaitteisto voi liittyä voimalaitokselle (2a), jakeluverkkoyhtiön 110 kV johdolle/asemalle (2b) tai Fingridin 110 kV johdolle (2c).

9.10.2026

3.3 Vaatimukset verkkoa luoville laitteistoille

Tässä luvussa esitellään vaatimukset verkkoa luoville laitteistoille, joiden avulla voimalaitoksen stabiili toiminta ja lähivikakestoisuus suuntaajavaltaisilla alueilla voidaan varmistaa.

3.3.1 Verkkoa luovan säädön toteutus suuntaajakytketylle voimalaitokselle

3.3.1.1 Yleiset vaatimukset

Verkkoa luovan suuntaajakytketyn voimalaitoksen verkkoa luovien ominaisuuksien

- tulee olla toteutettu kaikkiin voimalaitoksen suuntaajakytkettyihin yksiköihin.
- tulee olla toiminnassa aina voimalaitoksen ollessa kytkeytyneenä verkkoon, eikä toimintatila saa vaihtua verkon muutostilanteissa tai häiriöissä.
- tulee olla toiminnassa voimalaitoksen toimiessa missä tahansa mitoitustehon ja voimalaitokselta vaaditun loistehokapasiteetin rajaamassa toimintapisteessä.
- tulee olla toiminnassa kaikissa voimalaitoksen pätötehoa säätävissä säätötiloissa kuten vakioitehosäädössä ja taajuussäädössä.
- tulee olla toiminnassa kaikissa voimalaitoksen loistehoa säätävissä säätötiloissa kuten vakiojännitesäädössä, vakioiloistehosäädössä ja vakioitehokerroinsäädössä.
- toiminta suuntaajien virtarajoilla tulee koordinoita siten, että mahdollinen tarve rajoittaa virtaa ei aiheuta epäjatkuvuutta verkkoa luovan säädön toimintaan tai muutoin vaaranna voimalaitoksen stabiilia toimintaa.
- toiminta tulee koordinoita voimalaitoksen muiden pätö- ja loistehoon vaikuttavien säätöjen ja muiden ylemmän tason säätöjen (esim. hybridivoimalaitoksen laitostason säädöt) kanssa siten, että säätöjen välisiä haitallisia vuorovaikutuksia ei esiinny.

3.3.1.2 Toiminnalliset vaatimukset

Verkkoa luoville säätöominaisuuksille asetetaan seuraavat toiminnalliset vaatimukset:

1) Voimalaitoksen jännitelähdikäyttäytyminen ja vasteen rajoittaminen

- a) Verkon jännitteen askelmaisessa kulmamuuutoksessa voimalaitoksen pätövirran tulee muuttua luonnollisesti sisäisen jännitelähteen, verkon jännitteen ja niiden välisen efektiivisen impedanssin (ks. kohta 3) määääämällä tavalla. Vasteen tulee alkaa lähes viiveettömästi ja sen tulee vastustaa jännitteen kulmamuuutosta. Tällöin voidaan katsoa laitteen tukevan järjestelmän kulmajäykkyyttä.
- b) Verkon jännitteen askelmaisessa amplitudimuuutoksessa voimalaitoksen loisvirran tulee muuttua luonnollisesti sisäisen jännitelähteen, verkon jännitteen ja niiden välisen efektiivisen impedanssin määääämällä tavalla. Vasteen tulee alkaa lähes

9.10.2026

viiveettömästi ja sen tulee vastustaa jännitteen amplitudimuutosta. Tällöin voidaan katsoa laitteen tukevan järjestelmän jännitejäykkyyttä.

- c) Kohtien a ja b mukaisen vasteen tulee näkyä voimalaitoksen suuntaajajyksiköiden liittimissä muutaman millisekunnin kuluessa verkon jännitteen muutoksesta. Säättötavoitteena on pitää säätötekniisesti muodostetun sisäisen jännitelähteen jänniteosoitin likimain vakiona subtransientista transienttiin ulottuvalla aikavälillä. Vasteen tulee hyödyntää laitteiston käytettävissä olevaa kapasiteettia huomioiden kohdissa d, e ja f määritellyt virta-, teho- ja energiarajoitukset.
 - d) Voimalaitoksen pätötehovaste saa rajoittua primäärienergian saatavuuden, suuntaajajyksiköiden virtakapasiteetin sekä voimalaitoksen luontaisen energiakapasiteetin perusteella. Teho- tai virtarajoitus ei saa keskeyttää verkkoa luovaa säätöä, aiheuttaa epäjatkovaa toimintatilaa muutosta tai vaarantaa voimalaitoksen stabiilia toimintaa. Voimalaitoksen tulee myös rajoituksen aikana käyttäytyä jännitelähteenä efektiivisen impedanssin takana käytettävissä olevien virta-, teho- ja energiarajojen puitteissa.
 - e) Voimalaitokselta, jolla ei ole energiavarastoa tai muuta riittävää sisäänrakennettua energiakapasiteettia, ei edellytetä kohdan a mukaista pätötehon kasvattamista sen toimiessa suurimmalla käytettävissä olevalla pätöteholla tai virtarajalla. Tätä varten voimalaitokselta ei edellytetä jatkuvan pätötehoreservin varaamista. Pätötehovaste voidaan tällöin rajoittaa käytettävissä olevan pätöteho- ja virtakapasiteetin perusteella noudattaen kohdassa d määriteltyjä periaatteita.
 - f) Voimalaitokselta, jolla ei ole energiavarastoa tai muuta soveltuvaa energian vastaanottokykyä, ei edellytetä pätötehon ottamista sähköverkosta. Jos verkkoa luova vaste muutoin johtaisi pätötehon siirtosuunnan vaihtumiseen, pätötehovaste voidaan rajoittaa nolnaan kohdassa d määriteltyjen periaatteiden mukaisesti.
- 2) Voimalaitoksen kyvykkyys toimia saarekkeessa energia- ja tehorojojen puitteissa
- a) Voimalaitoksen tulee ulkoisen sähköverkon jännite- ja taajuusreferenssin hävitessä muodostaa ja ylläpitää jännitelähdemäistä käyttäytymistä sekä vakauttaa saarekkeen jännite käytettävissä olevien virta-, teho- ja energiarajojensa puitteissa.
 - b) Voimalaitoksen tulee kyetä syöttämään paikallista kuormaa siten, että saarekkeen muodostuminen ei johda välittömään jännitteen tai taajuuden hallinnan menettämiseen.
 - c) Vaatimus koskee voimalaitoksen välitöntä dynaamista käyttäytymistä saarekkeen muodostumisen jälkeen eikä edellytä jatkuvaa saarekekäyttökykyä tai pitkäaikaisen tehotasapainon ylläpitämistä.

9.10.2026

3) Efektiivinen impedanssi

- a) Voimalaitoksen efektiivisen impedanssin reaali- ja imaginaariosan tulee olla positiivisia liittymispisteestä katsottuna.
- b) Voimalaitoksen myötäkomponentin efektiivinen impedanssi saa liittymispisteestä katsottuna olla enintään 0,5. Efektiivisen impedanssin reaktanssin ja resistanssin suhteen X/R tulee olla suurempi kuin 10.
- c) Vastakomponentin efektiivisen impedanssin tulee olla suuruusluokaltaan myötäkomponentin efektiivistä impedanssia vastaava.
- d) Kohtien a–c vaatimusten tulee täytyä eri syvyisissä jännitekuopissa sekä jännitteen kulmamuuutoksissa muutoksen aikana sekä häiriön alkuvaiheessa ja myöhemmissä vaiheissa.
- e) Efektiivinen impedanssi saa ylittää kohdassa b määritetyn enimmäisarvon, jossa Voimalaitos toimii virtarajojen läheisyydessä tai saavuttaa virtarajan. Virtarajoitus tulee kuitenkin toteuttaa niin, että voimalaitoksen laitteisto säilyttää jännitelähteominaisuudet ja näyttäytyy liittymispisteestä katsottuna jännitelähteenä efektiivisen impedanssin takana.
- f) Efektiivinen impedanssi muodostuu voimalaitoksen liittymispisteestä katsotusta fyysisestä impedanssista sekä verkkoa luovan säädön muodostamasta virtuaalisesta impedanssista.

4) Stabiilius- ja vaimennusominaisuudet

- a) Voimalaitoksen tulee säilyttää piensignaalistabiilius sille määritellyissä toimintapisteissä ja verkkotilanteissa. Voimalaitos laite- ja laitostason säätöineen ei saa aiheuttaa vaimentumattomia tai heikosti vaimenevia heilahteluita.
- b) Voimalaitos ei saa vahvistaa sähköjärjestelmän taajuus-, jännite- tai tehoheilahteluita eikä heikentää niiden vaimentumista. Erityistä huomiota tulee kiinnittää seuraaviin dq-koordinaatistossa tarkasteltaviin taajuusalueisiin:¹
 - i) 0,2–1,0 Hz (tulkittuna dq-tasossa), jolla voi esiintyä sähköjärjestelmän alueiden välisiä tehoheilahteluita
 - ii) 1–15 Hz (tulkittuna dq-tasossa), jolla voi esiintyä suuntaajakytkettyjen laitteistojen ja sähköverkon välisiin vuorovaikutuksiin liittyviä jännite- ja tehoheilahteluita; sekä
 - iii) 15–45 Hz, jolla voi esiintyä sarjakompensoidun verkon resonansseihin liittyviä heilahteluita.

¹ dq-tasossa (koordinaatistossa) esitetyt taajuudet voidaan esittää abc-tasossa suhteessa 50 Hz:n nimellistaajuuteen, esim. 1–15 Hz taajuusalue dq-tasossa voidaan tulkita abc-tasossa taajuusalueina 35–49 Hz ja 51–65 Hz.

9.10.2026

- c) Mikäli kohtien a ja b vaatimukset eivät täyty voimalaitoksen luonnollisten ominaisuuksien tai säätöparametrien virityksen ansiosta, tulee voimalaitokseen toteuttaa tarvittava vaimennustoiminto.

5) Toiminta epäsymmetrisellä verkkojännitteellä

- a) Voimalaitoksen tulee käyttäytyä epäsymmetrisissä verkkotilanteissa myös vastakomponenttijärjestelmässä jännitelähteenä efektiivisen impedanssin takana. Jännitteen vastakomponentin aiheuttaman vastakomponentin virran tulee määräytyä verkkojännitteen vastakomponentin ja vastakomponentin efektiivisen impedanssin perusteella käytettävissä olevan virtakapasiteetin puitteissa.
- b) Vastakomponenttivaste saa rajoittua voimalaitoksen jatkuvan ja lyhytaikaisen virtakapasiteetin perusteella. Vastakomponenttivirran rajoittaminen ei saa keskeyttää verkkoa luovaa säätöä, aiheuttaa epäjatkovaa toimintatilan muutosta tai vaarantaa voimalaitoksen stabiiliutta toimintaa. Myötä- ja vastakomponenttivirrat tulee rajoitustilanteessa koordinoita siten, että voimalaitoksen kokonaisvirta pysyy laitteiston virtakapasiteetin rajoissa ja käyttäytyminen jännitelähteenä efektiivisen impedanssin takana säilyy.

3.3.1.3 Stabiiliutta koskevat vaatimukset

Voimalaitos laitos- ja laitetasoisine säätöineen tulee suunnitella toimimaan stabiilisti osana voimajärjestelmää, jossa suuntaajakytkettyjen voimalaitosten ja suuntaajakytkettyjen kulutuslaitteistojen osuus on hallitseva tahtikonevoimalaitosten määrään verrattuna. (VJV2024, 18.2.1)

Voimalaitoksen on pystyttävä pysymään liitettynä sähköverkkoon silmukoituneen verkon yksi- tai kolmivaiheisten vikojen sekä automaattisten jälleenkytkentöjen aikana, mikäli voimalaitoksen liittymispiste ei ole irti kytkettävässä sähköverkon osassa. Voimalaitos ei saa kytkeytyä irti ja sen tulee jatkaa toimintaansa stabiilisti ja toimintapisteen palautua muutosta edeltäneeseen toimintapisteeseen, mikäli verkon jännitteessä tapahtuu pysyvä askelmainen kulmamuuutos, jonka suuruus on korkeintaan ± 30 astetta.

3.3.2 Lisälaitteena toimiva verkkoa luova sähkövarasto tai ES-STATCOM

3.3.2.1 Yleiset vaatimukset

Verkkoa luovan suuntaajakytketyn voimalaitoksen verkkoa luovien ominaisuuksien

- tulee olla toteutettu kaikkiin voimalaitoksen suuntaajakytkettyihin yksiköihin.
- tulee olla toiminnassa aina voimalaitoksen ollessa kytkeytyneenä verkkoon, eikä toimintatila saa vaihtua verkon muutostilanteissa tai häiriöissä.
- tulee olla toiminnassa voimalaitoksen toimiessa missä tahansa mitoitustehon ja voimalaitokselta vaaditun loistehokapasiteetin rajaamassa toimintapisteessä.
- tulee olla toiminnassa kaikissa voimalaitoksen pätötehoa säätävissä säätötiloissa kuten vakiotehosäädössä ja taajuussäädössä.

9.10.2026

- tulee olla toiminnassa kaikissa voimalaitoksen loistehoa säätävissä säätötiloissa kuten vakiojännitesäädössä, vakioloistehosäädössä ja vakiotehokerroinsäädössä.
- toiminta suuntaajien virtarajoilla tulee koordinoida siten, että mahdollinen tarve rajoittaa virtaa ei aiheuta epäjatkuvuutta verkkoa luovan säädön toimintaan tai muutoin vaaranna voimalaitoksen stabiilia toimintaa.
- toiminta tulee koordinoida voimalaitoksen muiden pätö- ja loistehoon vaikuttavien säätöjen ja muiden ylemmän tason säätöjen (esim. hybridivoimalaitoksen laitostason säädöt) kanssa siten, että säätöjen välisiä haitallisia vuorovaikutuksia ei esiinny, eivätkä ylemmän tason säädöt rajoita verkkoa luovan säädön vastetta.

3.3.2.2 Toiminnalliset vaatimukset

Verkko luoville säätöominaisuuksille asetetaan seuraavat toiminnalliset vaatimukset:

- 1) Sähkövaraston tai ES-STATCOMin jännitelähdekäyttäytyminen ja vasteen rajoittaminen
 - a) Verkon jännitteen askelmaisessa kulmamuutoksessa sähkövaraston tai ES-STATCOMin pätövirran tulee muuttua luonnollisesti sisäisen jännitelähteen, verkon jännitteen ja niiden välisen efektiivisen impedanssin määräämällä tavalla. Vasteen tulee alkaa lähes viiveettömästi ja sen tulee vastustaa jännitteen kulmamuutosta. Tällöin voidaan katsoa laitteen tukevan järjestelmän kulmajäykkyyttä.
 - b) Verkon jännitteen askelmaisessa amplitudimuutoksessa sähkövaraston tai ES-STATCOMin loisvirran tulee muuttua luonnollisesti sisäisen jännitelähteen, verkon jännitteen ja niiden välisen efektiivisen impedanssin määräämällä tavalla. Vasteen tulee alkaa lähes viiveettömästi ja sen tulee vastustaa jännitteen amplitudimuutosta. Tällöin voidaan katsoa laitteen tukevan järjestelmän jännitejäykkyyttä.
 - c) Kohtien a ja b mukaisen vasteen tulee näkyä sähkövaraston tai ES-STATCOMin suuntaajajyksiköiden liittimissä muutaman millisekunnin kuluessa verkon jännitteen muutoksesta. Säätötavoitteena on pitää säätöteknisesti muodostetun sisäisen jännitelähteen jänniteosoitin likimain vakiona subtransientista transienttiin ulottuvalla aikavälillä. Vasteen tulee hyödyntää laitteiston käytettävissä olevaa kapasiteettia huomioiden kohdassa d määritellyt virta-, teho- ja energiarajoitukset.
 - d) Sähkövaraston tai ES-STATCOMin pätötehovaste saa rajoittua primäärienergian saatavuuden, suuntaajajyksiköiden virtakapasiteetin sekä laitoksen luontaisen energiakapasiteetin perusteella. Teho- tai virtarajoitus ei saa keskeyttää verkkoa luovaa säätöä, aiheuttaa epäjatkovaa toimintatilan muutosta tai vaarantaa voimalaitoksen stabiilia toimintaa. Voimalaitoksen tulee myös rajoituksen aikana käyttäytyä jännitelähteenä efektiivisen impedanssin takana käytettävissä olevien virta-, teho- ja energiarajojen puitteissa.

9.10.2026

2) Sähkövaraston tai ES-STATCOMin saarekekyvykyys

- a) Saareketestissä arvioidaan laitteiston välitöntä jännitelähdettäytymistä ulkoisen sähköverkon luoman jännite- ja taajuusreferenssin hävitessä. Laitteiston tulee vakauttaa saarekkeen jännite ja vastata saarekkeen pätö- ja loistehoepäatasapainoon käytettävissä olevien virta-, teho- ja energiarajojensa puitteissa.
- b) Laitteiston tulee saarekkeen muodostuessa muuttaa pätötehoaan välittömästi paikallisen kuorman ja muun saarekkeeseen jäävän tuotannon välisen tehoepäatasapainon perusteella. Testissä tulee todentaa laitteiston kyky sekä syöttää pätötehoa saarekkeeseen että ottaa pätötehoa saarekkeesta.
- c) Laitteiston tulee säilyttää verkkoa luova säätö koko arviointijakson ajan ja käyttäytyä jännitelähteenä efektiivisen impedanssin takana. Teho-, energia- tai virtarajan saavuttaminen ei saa aiheuttaa epäjatkovaa toimintatilan muutosta, verkkoa luovan säädön keskeytymistä tai laitteiston epästabiliilista toimintaa.

3) Efektiivinen impedanssi

- a) Sähkövaraston tai ES-STATCOM laitteiston efektiivisen impedanssin reaali- ja imaginaariosan tulee olla positiivisia liittymispisteestä katsottuna.
- b) Sähkövaraston tai ES-STATCOM laitteiston myötäkomponentin efektiivinen impedanssi saa liittymispisteestä katsottuna olla enintään 0,5. Efektiivisen impedanssin reaktanssin ja resistanssin suhteen X/R tulee olla suurempi kuin 10.
- c) Vastakomponentin efektiivisen impedanssin tulee olla suuruusluokaltaan myötäkomponentin efektiivistä impedanssia vastaava.
- d) Kohtien a–c vaatimusten tulee täytyä eri syvyisissä jännitekuopissa sekä jännitteen kulmamutoksissa muutoksen aikana sekä häiriön alkuvaiheessa ja myöhemmissä vaiheissa.
- e) Efektiivinen impedanssi saa ylittää kohdassa b määritetyn enimmäisarvon, jos sähkövarasto tai ES-STATCOM-laitteisto toimii virtarajojen läheisyydessä tai saavuttaa virtarajan. Virtarajoitus tulee kuitenkin toteuttaa niin, että sähkövarasto tai ES-STATCOM laitteisto säilyttää jännitelähteominaisuudet ja näyttäyty liittymispisteestä katsottuna jännitelähteenä efektiivisen impedanssin takana.
- f) Efektiivinen impedanssi muodostuu sähkövaraston tai ES-STATCOM laitteiston liittymispisteestä katsotusta fyysisestä impedanssista sekä verkkoa luovan säädön muodostamasta virtuaalisesta impedanssista.

9.10.2026

4) Stabiilius- ja vaimennusominaisuudet

- a) Sähkövaraston tai ES-STATCOM laitteiston tulee säilyttää piensignaalistabiilius sille määritellyissä toimintapisteissä ja verkkotilanteissa. Voimalaitos laite- ja laitostason säätöineen ei saa aiheuttaa vaimentumattomia tai heikosti vaimenevia heilahteluita.
- b) Sähkövaraston tai ES-STATCOM laitteiston ei saa vahvistaa sähköjärjestelmän taajuus-, jännite- tai tehoheilahteluita eikä heikentää niiden vaimentumista. Erityistä huomiota tulee kiinnittää seuraaviin dq-koordinaatistossa tarkasteltaviin taajuusalueisiin²:
 - i) 0,2–1,0 Hz (tulkittuna dq-tasossa), jolla voi esiintyä sähköjärjestelmän alueiden välisiä tehoheilahteluita
 - ii) 1–15 Hz (tulkittuna dq-tasossa), jolla voi esiintyä suuntaajakytkettyjen laitteistojen ja sähköverkon välisiin vuorovaikutuksiin liittyviä jännite- ja tehoheilahteluita; sekä
 - iii) 15–45 Hz, jolla voi esiintyä sarjakompensoidun verkon resonansseihin liittyviä heilahteluita.
- c) Mikäli kohtien a ja b vaatimukset eivät täyty laitoksen luonnollisten ominaisuuksien tai säätöparametrien virityksen ansiosta, tulee laitokseen toteuttaa tarvittava vaimennustoiminto.

5) Toiminta epäsymmetrisellä verkkojännitteellä

- a) Sähkövaraston tai ES-STATCOM laitteiston tulee käyttäytyä epäsymmetrisissä verkkotilanteissa myös vastakomponenttijärjestelmässä jännitelähteenä efektiivisen impedanssin takana. Jännitteen vastakomponentin aiheuttaman vastakomponenttivirran tulee määräytyä verkkojännitteen vastakomponentin ja vastakomponentin efektiivisen impedanssin perusteella käytettävissä olevan virtakapasiteetin puitteissa.
- b) Vastakomponenttivaste saa rajoittua sähkövaraston tai ES-STATCOM laitteiston jatkuvan ja lyhytaikaisen virtakapasiteetin perusteella. Vastakomponenttivirran rajoittaminen ei saa keskeyttää verkkoa luovaa säätöä, aiheuttaa epäjatkovaa toimintatilan muutosta tai vaarantaa voimalaitoksen stabiilia toimintaa. Myötä- ja vastakomponenttivirrat tulee rajoitustilanteessa koordinaoida siten, että laitoksen kokonaisvirta pysyy laitteiston virtakapasiteetin rajoissa ja käyttäytyminen jännitelähteenä efektiivisen impedanssin takana säilyy.

² dq-tasossa (koordinaatistossa) esitetyt taajuudet voidaan esittää abc-tasossa suhteessa 50 Hz:n nimellistaajuuteen, esim. 1–15 Hz taajuusalue dq-tasossa voidaan tulkita abc-tasossa taajuusalueina 35–49 Hz ja 51–65 Hz.

9.10.2026

3.3.2.3 Stabiiliutta koskevat vaatimukset

Sähkövarasto tai ES-STATCOM laitos- ja laitetasoisine säätöineen tulee suunnitella toimimaan stabiilisti osana voimajärjestelmää, jossa suuntaajakytkettyjen voimalaitosten ja suuntaajakytkettyjen kulutuslaitteistojen osuus on hallitseva tahtikonevoimalaitosten määrään verrattuna.

Sähkövaraston tai ES-STATCOMin on pystyttävä pysymään liitettynä sähköverkkoon silmukoituneen verkon yksi- tai kolmivaiheisten vikojen sekä automaattisten jälleenkytkentöjen aikana, mikäli voimalaitoksen liittymispiste ei ole irti kytkettävässä sähköverkon osassa. Sähkövarasto tai ES-STATCOM ei saa kytkeytyä irti ja sen tulee jatkaa toimintaansa stabiilisti ja toimintapisteen palautua muutosta edeltäneeseen toimintapisteeseen, mikäli verkon jännitteessä tapahtuu pysyvä askelmainen kulmamuuutos, jonka suuruus on korkeintaan ± 30 astetta.

3.3.3 Tahtikone

Tahtikone voi olla itsenäinen synkronikompensaattori tai tahtikonevoimalaitoksen turbiiniin/moottoriin kiinteällä tai avattavalla kytkimellä yhdistetty tahtigeneraattori.

Tahtikonelaitteiston tulee noudattaa VJV2024:n mukaisia vaatimuksia.

Lisälaitteistona käytettävää tahtikonetta on sallittua käyttää normaalisti sähkö- ja reservimarkkinoilla.

Tahtikonelaitteistolla on mahdollista täyttää voimalaitoksen loistehokapasiteettivaatimus täysin tai osittain sen sijaitessa voimalaitoksen kanssa samassa liittymispisteessä. Tällöin on huomioitava, että laitteiston tulee olla käytössä aina voimalaitoksen toimiessa minimitehonsa yläpuolella.

Tahtikonelaitteiston mitoitusoikosulkuteho on laskettava perustuen IEC 60909-0 standardin määrittämään menetelmään. Mitoitusoikosulkutehon on täyttyvä tahtikonelaitoksen liittymispisteestä tarkasteltuna. Liittymispisteen oikosulkutehon laskennassa on noudatettava seuraavia periaatteita:

- Laskenta suoritetaan liittymispisteen nimellisjännitteellä.
- Jännitekerroin oikosulkuvirran laskennassa on 1.0.
- Laskenta suoritetaan käyttämällä generaattorin kyllästynyttä subtransienttia pitkittäisreaktanssia (x_d'') sekä muuntajan reaktanssia.
- Laskennassa on otettava huomioon tahtikoneen ja liittymispisteen välisen sähköverkon komponenttien impedanssit.

9.10.2026

3.4 Vaaditut dynaamiset tarkastelut

Tässä luvussa kuvatut tarkastelut tulee suorittaa PSCAD-ohjelmistolla laaditulla simulointimallilla, joka täyttää Fingridin voimassa olevat mallinnusvaatimukset. Käytetty malli tulee toimittaa Fingridille osana VJV2024:n vaiheen 1 dokumentaatiota.

3.4.1 Verkkoa luovalle voimalaitokselle suoritettavat dynaamiset tarkastelut

Verkkoa luovalle voimalaitokselle suoritetaan VJV2024:ssä määriteltyjen dynaamisten tarkasteluiden lisäksi luvuissa 3.4.1.1–3.4.1.7 määritetyt tarkastelut. Tarkastelut tulee suorittaa viimeistään vaatimusten todentamisprosessin vaiheessa 1. Fingrid kuitenkin suosittelee, että tarkastelut tehdään voimalaitoksen alustavilla suunnitteluarvoilla jo vaatimusten todentamisprosessin vaiheessa 0 ennen voimalaitosteknologian valintaa ja laitteiden hankintaa.

3.4.1.1 Toiminta jännitehäiriön yhteydessä

Tarkastelun tulee kuvata voimalaitoksen dynaaminen toiminta jännitehäiriöiden yhteydessä, laskentaperusteet tarkasteltaville häiriöille 1–4 on esitetty taulukossa 2.

Jännitehäiriötarkastelu tulee suorittaa seuraavin oletuksin:

- Liittymispisteen oikosulkutehon oletetaan olevan liittymispisteen verkonhaltijan ilmoittaman normaalin vaihteluvälin alarajalla ennen häiriötä.
- Tarkasteltavat viat ovat liittymispisteessä tapahtuva
 - I. 3-vaiheinen vikavastukseton oikosulku,
 - II. 2-vaiheinen vikavastukseton oikosulku,
 - III. 2-vaiheinen vikavastukseton oikosulku maakosketuksella sekä
 - IV. 1-vaiheinen vikavastukseton maasulku.
- Tarkastelun tuloksia tulee verrata voimalaitoksen suojausasetteluihin ja osoittaa, ettei suojaus toimi virheellisesti jännitehäiriössä.

Taulukko 2 Jännitehäiriötarkastelussa käytettävät lähtötiedot.

Lähtötieto	Häiriö 1	Häiriö 2	Häiriö 3	Häiriö 4
Jännitehäiriön kesto	200 ms	200 ms	200 ms	250 ms
Liittymispisteen jännite häiriön aikana	0,0 pu	0,0 pu	0,0 pu	0,25 pu
Liittymispisteen oikosulkuteho ennen häiriötä	Normaali	Normaali	Normaali	Normaali
Liittymispisteen oikosulkuteho häiriön jälkeen	Minimi	Minimi, jännitteen kulmaero +30°	Minimi, jännitteen kulmaero -30°	Normaali
Tarkasteltavat viat	I-IV	I	I	I

9.10.2026

3.4.1.2 Verkon jännitteen kulmamuutos

Tarkastelussa on osoitettava luvun 3.3.1.3 vaatimusten mukainen voimalaitoksen kyky pysyä kytkeytyneenä verkkoon ja jatkaa toimintaansa verkon jännitehäiriöissä, jonka seurauksena tapahtuu verkon jännitteen vaihekulman muutos, jonka suuruus on $+30^\circ$ ja -30° .

3.4.1.3 Toiminta saarekekäytössä

Saareketestissä arvioidaan voimalaitoksen välitöntä jännitelähdettäytymistä ulkoisen sähköverkon jännite- ja taajuusreferenssin hävitessä. Voimalaitoksen tulee vakauttaa saarekkeen jännite ja syöttää paikallista kuormaa käytettävissä olevien virta-, teho- ja energiarajojensa puitteissa. Paikallinen kuorma ja voimalaitoksen testausta edeltävä toimintapiste tulee valita siten, ettei saarekkeen muodostuminen edellytä energiavarastottomalta voimalaitokselta käytettävissä olevan pätötehon kasvattamista tai pätötehon ottamista verkosta.

Saareketestillä ei todenneta voimalaitoksen jatkuvaa saarekekäyttökykyä eikä kykyä ylläpitää saarekkeen pitkäaikaista tehotasapainoa. Voimalaitoksen jännitelähdettäytymistä arvioidaan 15 ms:n kuluttua saarekkeen muodostumisesta alkavalla kolmen sähköisen jakson mittausjaksolla. Voimalaitoksen tulee jatkaa saarekkeen syöttämistä koko arviointijakson ajan eli vähintään 75 ms saarekkeen muodostumisesta. Tämän jälkeen saarekkeen syöttämisen jatkamista ei edellytetä.

3.4.1.4 Impedanssiskannaus

Voimalaitokselle suoritetaan dynaaminen impedanssiskannaus taajuusalueella 1–300 Hz. Skannaus suoritetaan liittymispisteestä tai suuntaajatasolla siten, että skannaus huomioi verkkoa luovan säädön toiminnan oikein. Fingrid arvioi impedanssiskannauksen tuloksia luvun 3.3.1 vaatimuksia vasten.

3.4.1.5 Jänniteheilahtelujen vaimennustesti

Verkkoa luovalle voimalaitokselle suoritetaan liitteessä 1 kuvattu jänniteheilahtelujen vaimennustesti. Fingrid arvioi jänniteheilahtelujen vaimennustestin tuloksia luvun 3.3.1 vaatimuksia vasten.

3.4.1.6 Kulmaheilahtelujen vaimennustesti

Verkkoa luovalle voimalaitokselle suoritetaan liitteessä 2 kuvattu kulmaheilahtelujen vaimennustesti. Fingrid arvioi kulmaheilahtelujen vaimennustestin tuloksia luvun 3.3.1 vaatimuksia vasten.

3.4.1.7 Kyvykyys toimia osana suuntaajavaltaista järjestelmää

Liittyjä toimittaa verkkoa luovasta voimalaitoksesta PSCAD-simulointimallin. Fingrid arvioi simulointimallin avulla voimalaitoksen kykyä toimia ilman lisälaitteita liittymispisteessä heikentämättä voimajärjestelmän stabiiliutta.

9.10.2026

3.4.1.8 Efektiivisen impedanssin määrittäminen

Verkkoa luovan voimalaitoksen efektiivinen impedanssi määritetään liitteessä 5 kuvatus periaatteen mukaisesti.

3.4.2 Verkkoa seuraavalle voimalaitokselle suoritettavat dynaamiset tarkastelut

Tässä luvussa verkkoa seuraavalla voimalaitoksella tarkoitetaan voimalaitosta, jonka liittäminen verkkoon edellyttää lisälaitteistoa. Lisälaitteistolle suoritettavat dynaamiset tarkastelut on määritetty luvuissa 3.4.3 ja 3.4.4.

Verkkoa seuraavalle voimalaitokselle suoritetaan VJV2024:ssä määritetyt dynaamiset tarkastelut. Mikäli voimalaitokselle toimitettu ESCR-arvo on 1,0 tai pienempi, suoritetaan voimalaitokselle simuloinnit ESCR-testipenkkimallilla. ESCR-testipenkkimalli on kuvattu tarkemmin liitteessä 4.

Testipenkkimallilla suoritettavat tarkastelut suoritetaan ainoastaan verkkoa seuraavalle voimalaitokselle ilman lisälaitteistoa.

3.4.3 Verkkoa luovalle sähkövarastolle ja ES-STATCOMille suoritettavat dynaamiset tarkastelut

Verkkoa luovalle sähkövarastolle sekä ES-STATCOMille suoritetaan SJV2024:ssä määritetyt dynaamiset tarkastelut. Tämän lisäksi vaatimusten todentamisprosessin vaiheessa 1 suoritetaan luvuissa 3.4.3.1–3.4.3.4 määritellyt tarkastelut.

Fingrid kuitenkin suosittelee, että luvuissa 3.4.3.1–3.4.3.4 määritetyt tarkastelut suoritetaan alustavilla suunnitteluarvoilla jo vaiheessa 0 ennen sähkövarasto- tai ES-STATCOM-teknologian valintaa.

3.4.3.1 Jänniteheilahtelujen vaimennustesti

- Verkkoa luovan sähkövaraston tai ES-STATCOMin vaaditaan saavuttavan vahvistuskerroin, joka on alle 0,5 pu taajuusalueella 1–10 Hz sekä alle 0,9 pu taajuusalueella 0,3–0,5 Hz ja 10–40 Hz (tulkittuna dq-tasossa).
- Verkkoa luovan sähkövaraston tai ES-STATCOMin vaaditaan saavuttavan kulmaero, joka on 120 ja 240 asteen välissä koko tarkastellulla taajuuskaistalla 0,3–40 Hz (tulkittuna dq-tasossa).
- Jänniteheilahtelujen vaimennustesti on kuvattu tarkemmin liitteessä 1.

3.4.3.2 Kulmaheilahtelujen vaimennustesti

- Verkkoa luovan sähkövaraston tai ES-STATCOMin vaaditaan saavuttavan vahvistuskerroin, joka on alle 0,9 pu koko tarkastellulla taajuuskaistalla.
- Verkkoa luovan sähkövaraston tai ES-STATCOMin vaaditaan saavuttavan kulmaero, joka on 120 ja 240 asteen välissä koko tarkastellulla taajuuskaistalla.

9.10.2026

- Kulmaheilahtelujen vaimennustesti on kuvattu tarkemmin liitteessä 2.

3.4.3.3 GFM-testipenkki

- GFM-testipenkissä sähkövaraston tai ES-STATCOMin vaaditaan osoittavan kyvykkyys estää tuulipuistojen irtoaminen viassa tukemalla jännitteen vaihekulmaa ja pienentämällä vian jälkeistä ylijännitettä. Mikäli tuulipuisto irtoaa verkosta vian aikana tai viasta palautuessa, lisälaitteen vaadittu stabilointikyvykkyys ei täyty
- GFM-testipenkki on kuvattu tarkemmin liitteessä 3.

3.4.3.4 Efektiivisen impedanssin määrittäminen

- Verkkoa luovan sähkövaraston tai ES-STATCOMin efektiivisen impedanssin tulee täyttää luvun 3.3.2.2 toiminnalliset vaatimukset.
- Verkkoa luovan sähkövaraston tai ES-STATCOMin efektiivinen impedanssi määritetään liitteessä 5 kuvatun periaatteen mukaisesti.

3.4.4 Tahtikoneelle suoritettavat dynaamiset tarkastelut

Tahtikoneelle tulee suorittaa VJV2024:n luvun 10.5.4 mukainen jännitehäiriötarkastelu.

9.10.2026

4 Instrumentointi ja reaaliaikainen tiedonvaihto

4.1 Instrumentointi

Voimalaitoksen yhteyteen sijoitettava lisälaitteisto tulee varustaa VJV2024 luvun 9.5 mukaisella jatkuvatoimisella tallenninjärjestelmällä, joka mittaa lisälaitteiston syöttämää virtaa ja jännitettä siten, että lisälaitteiston vaste voidaan todentaa erillään muun voimalaitoksen vasteesta.

4.2 Reaaliaikainen tiedonvaihto

Voimalaitoksen yhteyteen sijoitettavasta lisälaitteistosta on toimitettava Fingridille tieto laitoksen käytettävyydestä:

- ES-STATCOMista toimitetaan "käytössä"-tieto, joka muodostetaan laitteiston automaatiojärjestelmässä
- tahtikoneesta toimitetaan generaattorikatkaisijan tilatieto

Sähkövarastosta toimitetaan Fingridille joka tapauksessa pätö- ja loistehotiedot, joten erillistä käytettävyydestietoa ei tarvita.

9.10.2026

5 Toimitettavat dokumentit ja simulointimallit

Lisälaitteista tulee toimittaa voimalaitoksen vaatimusten todentamisprosessin vaiheessa 1

- tekninen dokumentaatio, jonka laajuus vastaa VJV2024:ssa voimalaitoksesta toimitettavaksi määritettyä laajuutta
- Fingridin mallinnusohjeen mukaiset simulointimallit PSCAD- ja PSSE-ohjelmistoille.

Mikäli lisälaitteisto toteutetaan sähkövarastona tai ES-STATCOMina, lisälaitetta koskeva dokumentaation laajuus on SJV2024:n mukainen.

Dokumentaatioon tulee lisäksi sisällyttää

- yksityiskohtainen järjestelmäkuvaus, joka osoittaa luvun 3.3 vaatimusten täyttymisen.
- vapaamuotoinen raportti luvun 3.4 dynaamisista tarkasteluista. Tarkasteluiden tuloksia voidaan käyttää em. järjestelmäkuvauksessa vaatimusten täyttymisen perusteluun.

9.10.2026

6 Käyttöönottokokeet

Voimalaitoksen käyttöönottokokeet suoritetaan soveltuvin osin VJV2024:n mukaisessa laajuudessa. Lisälaitteiston ollessa sähkövarasto tai ES-STATCOM, käyttöönottokokeet ja niiden raportointi suoritetaan soveltuvin osin SJV2024:n mukaisessa laajuudessa.

Verkkoa luovien ominaisuuksien todentamisessa (ml. mallinnustietojen todentaminen) voidaan käyttää Fingridin suostumuksella jatkuvatoimiseen tallenninjärjestelmään (luku 3) perustuvaa jatkuvaa seurantaa, mikäli vasteen todentaminen kokein ei ole mahdollista.

Käyttöönottokokeista tulee toimittaa vaatimusten todentamisprosessin vaiheessa 2 VJV2024:n mukainen käyttöönottokoesuunnitelma ja käyttöönottoraportti.

9.10.2026

Liite 1 / Jänniteheilahtelujen vaimennustesti

- Testissä taustaverkosta syötetään jänniteheilahtelua taajuuksilla 0,3–0,5 Hz sekä taajuusalueella 1–40 Hz. Testissä lähdeimpedanssin taakse syötetään taajuudella f_k jännitehäiriö $\Delta V_{scr}(f_k)$, ja saman taajuuden jännitekomponentti mitataan liittymispisteessä $\Delta V_{poc}(f_k)$. Lisäksi mitataan laitoksen liittymispisteeseen syöttämä loisteho $\Delta Q_{poc}(f_k)$. Tuloksissa arvioidaan seuraavia suureita:
 - i. Vahvistuskerroin kuvaa laitoksen vahvistavaa tai vaimentavaa vaikutusta jänniteheilahteluihin. Vahvistuskerroin lasketaan kaavan
$$UampF(k) = \frac{|V_{poc}(f_k)|}{|V_{scr}(f_k)|}$$
 mukaisesti. Laitoksen katsotaan vaimentavan taajuuden f_k jännitevaihtelua, jos vahvistuskerroin saa arvon 1,0 tai pienemmän.
 - ii. Kulmaero kuvaa jännitteen ja syötetyn loistehon välistä kulmaeroa. Jännitteen ja loistehon välinen kulmaero on jänniteheilahtelua vaimentava, mikäli kulmaero on 90 ja 270 asteen välissä.
 - iii. Loistehovaste kuvaa laitoksen syöttämän loistehon suuruutta suhteessa jännitemuutokseen. Loistehovaste lasketaan kaavan
$$QrespF(k) = \frac{|Q_{poc}(f_k)|}{|V_{poc}(f_k)|}$$
 mukaisesti.
- Testi suoritetaan taustaverkon arvolla SCR on 2 ja X/R on 10. Sähkövaraston tapauksessa testi suoritetaan maksimipurku, maksimilataus ja nollateholla. ES-STATCOMin pätöteho on testin lähtötilanteessa nolla.

9.10.2026

Liite 2 / Kulmaheilahtelujen vaimennustesti

- Testissä taustaverkosta syötetään jännitteen kulmaheilahtelua taajuuksilla 0,3–0,5 Hz sekä taajuusalueella 1–40 Hz. Testissä lähdeimpedanssin taakse syötetään taajuudella f_k jännitehäiriö $\Delta V_{scr}(f_k)$, ja saman taajuuden jännitekomponentti mitataan liittymispisteessä $\Delta V_{poc}(f_k)$. Lisäksi mitataan laitoksen liittymispisteeseen syöttämä loisteho $\Delta Q_{poc}(f_k)$. Tuloksissa arvioidaan seuraavia suureita:
 - i. Vahvistuskerroin kuvaa laitoksen vahvistavaa tai vaimentavaa vaikutusta kulmaheilahteluihin. Vahvistuskerroin lasketaan kaavan $\theta_{amp}F(k) = \frac{ph(V_{poc}(f_k))}{ph(V_{scr}(f_k))}$ mukaisesti. Laitoksen katsotaan vaimentavan taajuuden f_k kulmavaihtelua, jos vahvistuskerroin saa arvon 1,0 tai pienemmän.
 - ii. Kulmaero kuvaa jännitteen kulman ja laitoksen syötettämän pätötehon välistä kulmaeroa. Jännitteen vaihekulman ja pätötehon välinen kulmaero on kulmaheilahtelua vaimentava, mikäli kulmaero on 90 ja 270 asteen välissä.
 - iii. Pätötehovaste kuvaa laitoksen syöttämän loistehon suuruutta suhteessa kulmamuuutukseen. Pätötehovaste lasketaan kaavan $PrespF(k) = \frac{|P_{poc}(f_k)|}{ph(V_{poc}(f_k))}$ mukaisesti.
- Testi suoritetaan taustaverkon arvolla SCR on 2 ja X/R on 10. Sähkövaraston ja ES-STATCOMin pätöteho on testin lähtötilanteessa nollateholla. Sähkövarasto ja ES-STATCOM ovat tilanteessa jännitesäädöllä 4 %:n statiikalla ja taustaverkon jännite on liittymispisteen nimellisjännite.

9.10.2026

Liite 3 / GFM-testipenkkitarkastelu verkkoa luovalle lisälaitteistolle

GFM-testipenkillä osoitetaan lisälaitteen kyvykkyys tukea verkkoa seuraavilla suuntaajilla toteutetun tuulivoimalaitoksen toimintaa viassa. Fingrid toimittaa liittyjälle testipenkin ja tarkemmat ohjeet testin suorittamiseksi.

Testipenkki on PSCAD-malli, johon on kytketty seitsemän kappaletta geneerisiä tuulipuistomalleja. Testipenkissä liittyjä lisää jokaisen tuulipuiston rinnalle sähkövaraston tai ES-STATCOM laitteiston. Sähkövaraston koko skaalataan testipenkissä ohjeiden mukaisesti niin, että sen suuruus on 30 % geneerisen tuulipuiston koosta. ES-STATCOM skaalataan niin, että sen suuruus on 20 % geneerisen tuulipuiston koosta.

Testipenkki sisältää kaksi testiä, joilla voidaan varmistaa lisälaitteen vaadittu kyvykkyys tukea verkkoa seuraavia suuntaajia. Testipenkin geneerisille tuulipuistoille on asetettu raja-arvot liittymispisteen vaihtojännitteen suuruudelle ja suuntaajan DC-välipiiriin kertyvälle energialle. Raja-arvojen ylittyessä tuulipuisto irtaoo verkosta, ja tarvittava lisälaitteen kyvykkyys ei täyty. Lisälaitteen on kyettävä pitämään liittymispisteen jännite ja DC-välipiiriin kertyvä energia alle raja-arvojen.

Testissä sähkövaraston ja ES-STATCOMin pätöteho on testin lähtötilanteessa nolla.

9.10.2026

Liite 4 / ESCR-testipenkkitarkastelu verkkoa seuraavalla voimalaitokselle

ESCR-testipenkkimallilla testataan verkkoa seuraavan laitoksen kyvykkyyttä toimia osana suuntaajavaltaista järjestelmää. Fingrid toimittaa liittyjälle testipenkin ja tarkemmat ohjeet testin suorittamiseksi.

Testipenkki on PSCAD-malli, jossa on kuusi sähköasemaa, joihin liitetään yhteensä seitsemän saman voimalaitoksen simulointimallia. Simuloinneissa kaikkien voimalaitosten on selviydyttävä verkkoviasta ja sitä seuraavasta määritetyn voimajohdon irtikytkennästä ilman irtoamista verkosta tai heikosti vaimenevien värähtelyjen syntymistä.

9.10.2026

Liite 5 / Efektiivisen impedanssin määrittäminen**Testattavat häiriöt**

Efektiivinen impedanssi ja sen X/R -suhde tulee määrittää verkkoa luovalle suuntaajakytketylle voimalaitokselle, sähkövarastolle tai ES-STATCOMille eri syvyisissä symmetrisissä ja epäsymmetrisissä jännitekuopissa sekä jännitteen kulmamuutoksissa.

Määrittäminen tarkoitetaan on kuvata laitoksen liittymispisteestä havaittavaa jännitelähdettä käyttäytymistä sekä käyttäytymisen muuttumista häiriön alkuvaiheesta myöhempään transienttivaiheeseen.

Efektiivinen impedanssi määritetään vähintään seuraavissa tapauksissa:

- a) kolmivaiheiset jännitekuopat, joiden jännitteen jännite on 0–90 % nimellijännitteestä 10 prosenttiyksikön välein
- b) yksivaiheiset jännitekuopat, joiden jännitteen jännite on 0–90 % nimellijännitteestä 10 prosenttiyksikön välein
- c) jännitteen kulmamuutokset välillä 5–30 astetta 5 asteen välein sekä positiiviseen että negatiiviseen suuntaan.

Jännitekuopat toteutetaan ilman tarkoituksellista jännitteen kulmamuutosta. Jännitteen kulmamuutokset toteutetaan ilman tarkoituksellista jännitteen amplitudin muutosta.

Testit suoritetaan eri pätö- ja loistehon toimintapisteissä siten, että laitoksen käyttäytyminen tulee arvioiduksi vähintään pienimmällä, suurimmalla ja niitä vastaavilla tavanomaisilla käyttötehoilla. Testi suositellaan tehtäväksi PSCAD-mallilla.

Tarkasteluajankohdat ja aikaikkunat

Efektiivinen impedanssi määritetään seuraavissa häiriön alkamisesta laskettavissa vaiheissa:

- a) häiriöaikainen vaste, joka määritetään ensimmäisestä häiriön jälkeen esiintyvistä luotettavasti määritettävissä olevasta virta- tai tehovasteen huipusta, kuitenkin viimeistään 10 ms:n kuluessa häiriön alkamisesta
- b) varhainen transienttivaste, joka määritetään 30 ms:n kuluttua häiriön alkamisesta
- c) myöhäisempi transienttivaste, joka määritetään 100 ms:n kuluttua häiriön alkamisesta.

Kohtien b ja c arvot määritetään yksittäisen mittausnäytteen sijasta kyseisen tarkasteluajankohdan ympärille määritellystä aikaikkunasta. Aikaikkunan pituuden tulee olla riittävä perustajaisen jännite- ja virtakomponentin luotettavaan määrittämiseen, mutta se ei saa peittää efektiivisen impedanssin olennaisia muutoksia tarkasteltavalla aikavälillä.

Häiriöaikaisen vasteen tarkastelussa käytetään vaihekohtaisten hetkellisarvojen tai paikallaan pysyvissä koordinaatistossa esitettyjen jännite- ja virtavektorien perusteella

9.10.2026

määritettyä vastetta. Koko jakson yli keskiarvoistavaa menetelmää ei saa käyttää, jos keskiarvoistus peittää ensimmäisen 10 ms:n aikana tapahtuvan vasteen tai virtarajoituksen aktivoitumisen.

Efektiiivisen impedanssin laskenta

Efektiiivinen impedanssi määritetään myötä- ja vastakomponenteille tapahtumaa edeltävien ja tarkasteluhetkellä mitattujen kompleksisten jännite- ja virtakomponenttien muutosten suhteena:

$$\underline{Z}_{\text{eff},k}(t) = -\frac{\Delta \underline{U}_k(t)}{\Delta \underline{I}_k(t)}, \quad k \in \{1, 2\},$$

missä $k = 1$ tarkoittaa myötäkomponenttia, ja $k = 2$ vastakomponenttia. Virran positiivinen suunta on laitteistosta verkkoon.

Impedanssin resistanssi, reaktanssi, itseisarvo ja X/R -suhde määritetään seuraavasti:

$$R_{\text{eff},k} = \text{Re}\{\underline{Z}_{\text{eff},k}\}, \quad X_{\text{eff},k} = \text{Im}\{\underline{Z}_{\text{eff},k}\},$$

$$Z_{\text{eff},k} = |\underline{Z}_{\text{eff},k}|, \quad \frac{X}{R} = \frac{X_{\text{eff},k}}{R_{\text{eff},k}}.$$

Myötäkomponentin efektiiivinen impedanssi määritetään kaikissa testattavissa tapahtumissa ja vastakomponentin efektiiivinen impedanssi epäsymmetrisissä jännitekuopissa. Jännitteen kulmamuuutoksissa laskenta tehdään kompleksisilla osoittimilla.

9.10.2026

Viitteet

[1] Managing converter stability through grid forming
(URL: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/white-paper---managing-converter-stability-through-grid-forming.pdf>)