

Saarekekäyttöraatkaisut – simulointien kaikki tulokset: A-C -osiot

Lasse Peltonen

lasse.peltonen@tuni.fi

Tämä kalvosarja sisältää kaikki simulointitarkastelut osioista A-C

- Loppuraporttiin (erillinen kalvosarja) on valittu noin puolet tämän esityksen kalvoista

A: Saarekoitumiset – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

- Tarkastellaan mikroverkon saarekoitumista tilanteissa, joissa mikroverkko sisältää 1) suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita (tahtikoneita) ja 2) tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä
 - Mikroverkon dynamiikka määräytyy tuotantoyksikkötyypeistä ja tuotantoyksiköiden kokonaistehosuhteista (1 vs 2)
 - Mikroverkon, jossa 90 % (suurin osa) on tahtikoneita ja 10 % tehoelektroniikkaliitännäisiä yksiköitä vasteet ovat mahdollisesti / todennäköisesti huomattavan erilaiset kuin mikroverkon, jossa 90 % on tehoelektroniikkaliitännäisiä yksiköitä ja 10 % on tahtikoneita
 - Jos tahtigeneraattorin koko on suuri suhteessa mikroverkon kokonaistehoon, voi olla luontevinta ottaa säätösuureeksi tahtikoneen pyörimisnopeus (~taajuus)
 - Jos taas tahtigeneraattorin teho mikroverkon kokonaistehosta on pieni ja käytössä on yllä kuvattu taajuudensäätö, saattaa roottori heilahdella herkästi erityisesti muutostilanteissa johtuen pienestä hitausmomentista
 - Mikroverkon säätö hankaloituu ja robustisuus heikkenee
 - Tällaisessa tapauksessa vaihtoehto voi olla esim. sisällyttää BESS:iin taajuuden emulointi lisäsäätöpiirien avulla, jonka seurauksena voi olla mahdollista vakauttaa mikroverkkoa ja pienentää taajuuden heilahteluja
 - Tällöin tahtigeneraattorin oma taajuudensäätöpiiri tukee BESS:n muodostamaa taajuutta
 - Jännitteensäädössä on huomioitava ainakin tahtikoneiden verrattain hidaskäyttäytyminen verrattuna tehoelektroniikkaliitännäisten tuotantoyksiköiden hyvin nopeaan vastenopeuteen

A: Saarekoituminen 1a – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

Tarkastelukokonaisuudet ja niiden perusteet:

➤ Vertaillaan vasteita, jossa saarekoitumistapahtumassa:

A – 1a ei ole viiveitä

A – 1b ei ole viiveitä, BESS:n jännitteensäätöä on hidastettu

A – 1c ei ole viiveitä, tahtigeneraattorit eivät osallistu jännitteensäätöön, mutta BESS:n säätö kuten A – 1a (nopea)

➤ Jännitteensäädön keskinäisen dynamiikan tarkastelua

A – 2a on viiveitä: BESS + PV + 2 SG

A – 2b 150 ms + 100 ms viive, BESS:n jännitteensäätöä on hidastettu

A – 2c: 150 ms + 100 ms viive : BESS + ~~PV~~ + 2 SG (ei PV:tä)

➤ Viiveiden huomioiminen on olennainen osa, koska viiveitä on aina ja viiveet poikkeuksetta heikentävät stabiiliutta ja robustisuutta

➤ Vertaillaan vasteita, kun tuotantoyksiköiden säätöpiirien parametreja on muutettu

A – 3a säätöpiirien parametrit (säätäjien vahvistus, integrointiakavakio jne.) ovat huonosti viritetty ko. käyttötilanteeseen

A – 3b muutetaan säätöpiirien parametreja simulointiajon aikana ns. lennosta

➤ Tuotantoyksiköiden lisäksi säätöpiirien toteutus ja parametrisointi vaikuttavat suoraan mikroverkon dynamiikkaan

A: Saarekoituminen 1a – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

1. Ennen saarekoitumista mikroverkko toimii muun verkon rinnalla normaalisti toimintapisteessä, jossa:
 - BESS syöttää taustaverkkoon ennen vikaa ja sitä seuraavaa saarekoitumista 2.0 MW ja 1.0 Mvar
 - PV syöttää verkkoon nimellistehonsa verran pätötehoa (2.0 MW), loisteho on nolla
 - Molemmat tahtikoneet syöttävät verkkoon n. 1.0 MW ja 0.2 Mvar
 - Mikroverkon kuormitus: 3.5 MW ja 0.75 Mvar
 - Kuormitus on mallinnettu resistanssin ja (induktiivisen) reaktanssin rinnankytkentänä
 - BESS voisi hyvin myös ottaa verkosta pätö- tai loistehoa ja PV esim. tuottaa 75 % nimellistehosta, mutta tarkasteluihin on nyt valittuina nämä lähtökohdat
2. Verkko (niin mikroverkon osa kuin taustaverkko) on tasapainotilanteessa, eli verkossa ei ole taajuus-, jännite- tai tehovärähtelyjä tai muita merkittäviä muutoksia → steady-state -toimintapiste
3. Saarekoituminen tapahtuu ulkoisen vian (3-vaiheinen oikosulku) seurauksena.
 - Ulkoinen vika → vika on taustaverkon puolella
 - Vika tapahtuu ajanhetkellä $t = 10.0$ sekuntia
4. Vian johdosta mikroverkon ja taustaverkon liitännäispisteen (Point of Common Coupling, PCC) jännite laskee
5. Sitten, kun PCC RMS-jännite putoaa alle 0.85 p.u.:n, niin liitännäispisteessä oleva katkaisija (Circuit Breaker, CB) avautuu
 - 0.85 p.u.:n raja-arvo ei perustu mihinkään tiettyyn kriteeriin/kriteereihin, vaan on tarkasteluiden kannalta ”sopivan suuruinen” raja-arvo

A: Saarekoituminen 1a – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

6. BESS:n toimintaperiaate (sekundäärisäätö) määräytyy:
 - PCC-katkaisijan tilatiedosta (auki/kiinni)
 - Siitä, onko mikroverkossa pyöriviä koneita vai ei → tahtigeneraattoreiden katkaisijoiden tilatiedot
 - A-osion tarkasteluissa tahtigeneraattorit pysyvät mikroverkossa
7. Ei lisättyä viivettä katkaisijan avautumisessa eli heti, kun PCC:n RMS-jännite on alle 0.85 p.u., niin katkaisija avautuu
 - Saarekoituminen
8. PCC-katkaisijan avautumisen jälkeen BESS siirtyy heti grid-feeding –moodista säätämään verkon taajuutta ja jännitettä
 - Heti → BESS:n toimintatilan muutos (sekundäärisäätö) on välitön eli ei viivettä
 - Tahtigeneraattorit muodostavat verkon, joten BESS on käytännössä tämän jälkeen grid-supporting –moodissa
 - Huom.: seuraavalla kalvolla on avattu käsitteet ”grid-feeding”, ”grid-supporting” ja ”grid-forming”
8. Tuotantoyksiköiden (BESS, 2 SG:tä) välinen tehonjako määräytyy pätö- ja loistehon osalta droopin (droop-kertoimien) perusteella
9. PV toimii sekä pätö- että loistehon osalta grid-feeding –moodissa
 - Pätöteho = nimellisteho (2.0 MW)
 - Loisteho on 0 Mvar
10. PV:ssä on ylivirtasuojaus, mutta jännite- ja taajuussuojaukset eivät ole aktivoituneina
 - Tarkastellaan, miten PV:n mukanaolo vian aikana ja heti sen jälkeen vaikuttaa vasteisiin

1. Grid-feeding (-moodi)

- Tuotantoyksikkö tuottaa pätötehoa verkkoon esim. suoraan verrannollisena auringon paisteeseen tai tuulen nopeuteen
- Akkua voidaan ladata ennalta suunnitellun lataussyklin mukaisesti
 - Tuotantoyksiköiden tehontuotto (voi päteä myös loistehoon) ei perustu tai muutu verkon kuormitustilanteen mukaan
- Tuotantoyksiköt tarvitsevat ulkoisen verkon muodostaman jännitteen, johon vaihtosuuntaajat tahdistuvat
 - Eivät pysty muodostamaan verkkoa itse tai toimimaan saarekkeessa, jossa ei ole verkkoa muodostavaa yksikköä

2. Grid-supporting

- Tuotantoyksiköt tarvitsevat ulkoisen verkon muodostaman jännitteen, johon vaihtosuuntaajat tahdistuvat
 - Eivät pysty muodostamaan verkkoa itse tai toimimaan saarekkeessa, jossa ei ole verkkoa muodostavaa yksikköä
- Erona grid-feeding –moodiin on, että joko pätö- tai loisteho, tai molemmat, määräytyvät verkon kuormitustilanteen mukaan (käytännössä siis taajuuden ja/tai jännitteen mukaan)
- PV voi toimia pätötehon osalta grid-feeding –moodissa, mutta loistehon osalta grid-supporting –moodissa ja tukea verkon jännitettä (oletus tietysti on, että pätötehon tuotto on pienempi, kuin yksikön näennäisteho)

3. Grid-forming

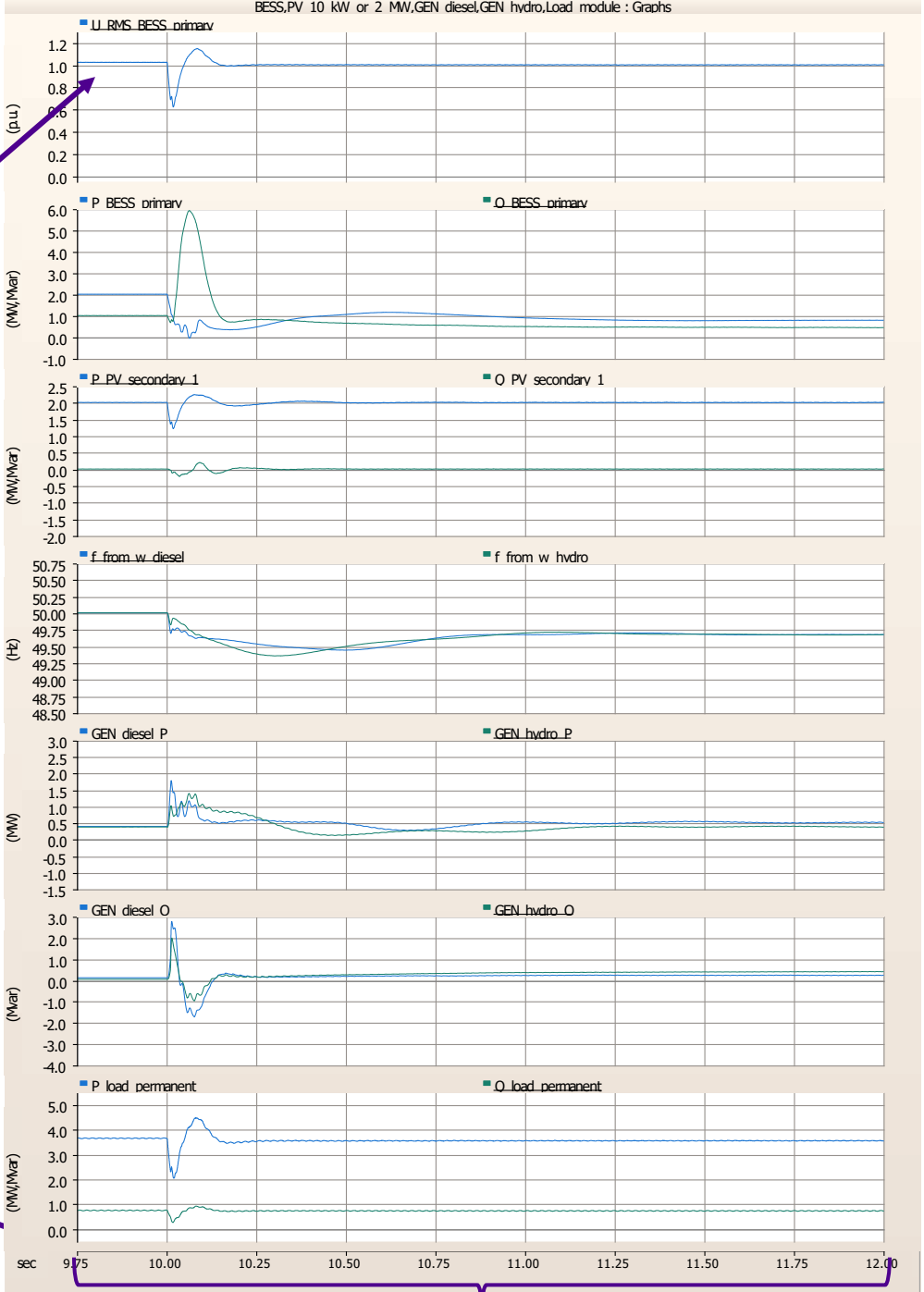
- Muodostaa itse verkon eli käytännössä osoitinsuureita ajatellen jännitevektorin pituuden (RMS-jännite) ja osoittimen kulman valittuun referenssitason nähden (taajuus)
- Voi toimia saarekkeessa yksin (tai useampia grid-forming –yksiköitä) ja verkon rinnalla
- Ajankohtaista: paljon tutkitaan nyt pitäisikö ja millä tavalla esim. akkuvarastojen toimia grid-forming –moodissa tukeakseen (kanta)verkkoa tehokkaasti
 - Yksityiskohdat menevät syvälle vaihtosuuntaajien säädön periaatteisiin, mutta eräs säätötapa on/voi olla PSC (Power Synchronous Control)

A: Saarekoituminen 1a – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

Heti, kun U_{PCC} putoaa vian seurauksena alle 0.85 p.u., niin saarekoituminen tapahtuu

Kuvaajien yksiköt

Kuvaajat näyttävät reilu 2 sekunnin mittaisen ajanjakson

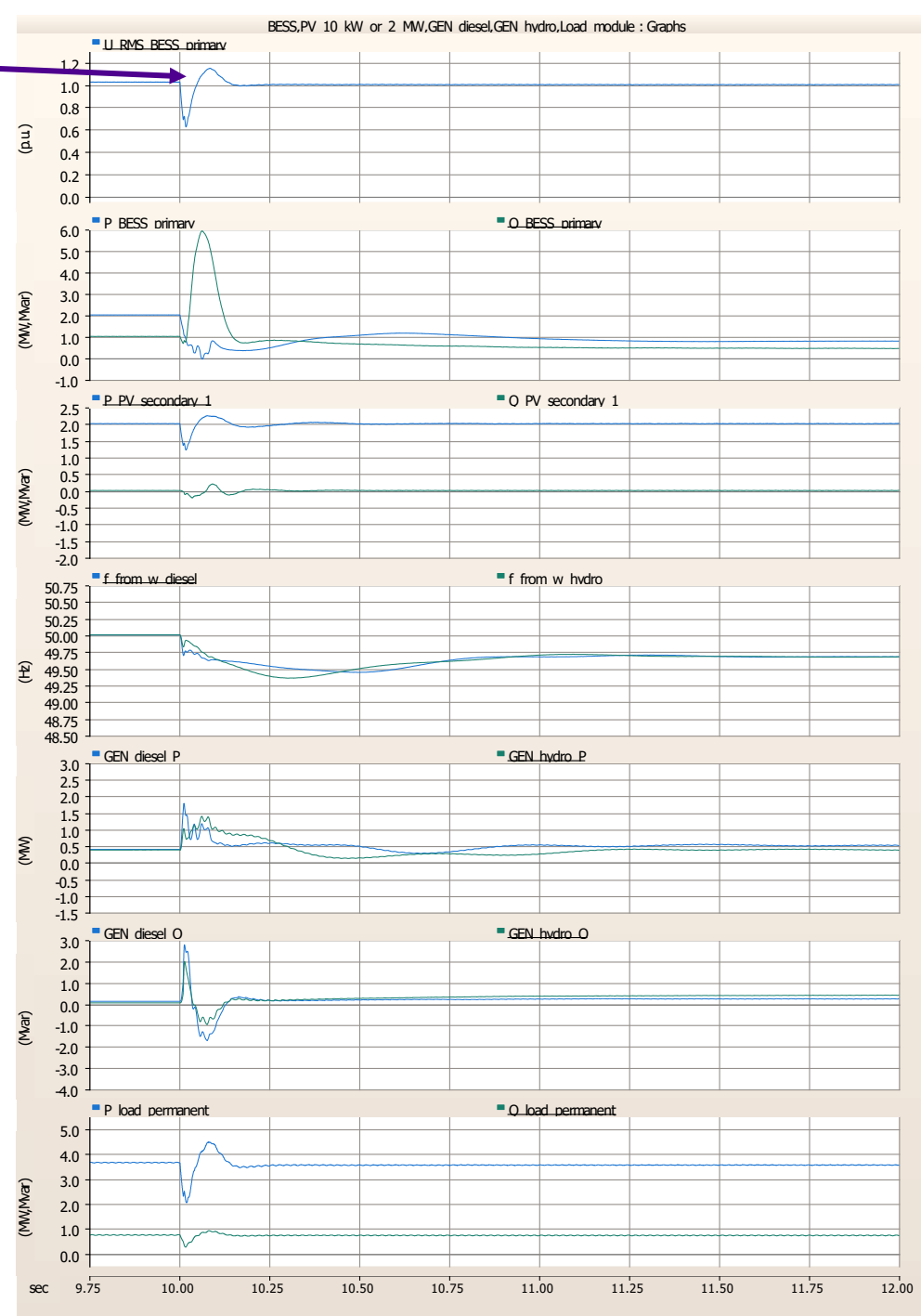


- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← Tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudesta johdettu "taajuus"
- ← Tahtigeneraattoreiden pätötehot
- ← Tahtigeneraattoreiden loistehot
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

**Ylijännite

Tuloksia A – 1a:

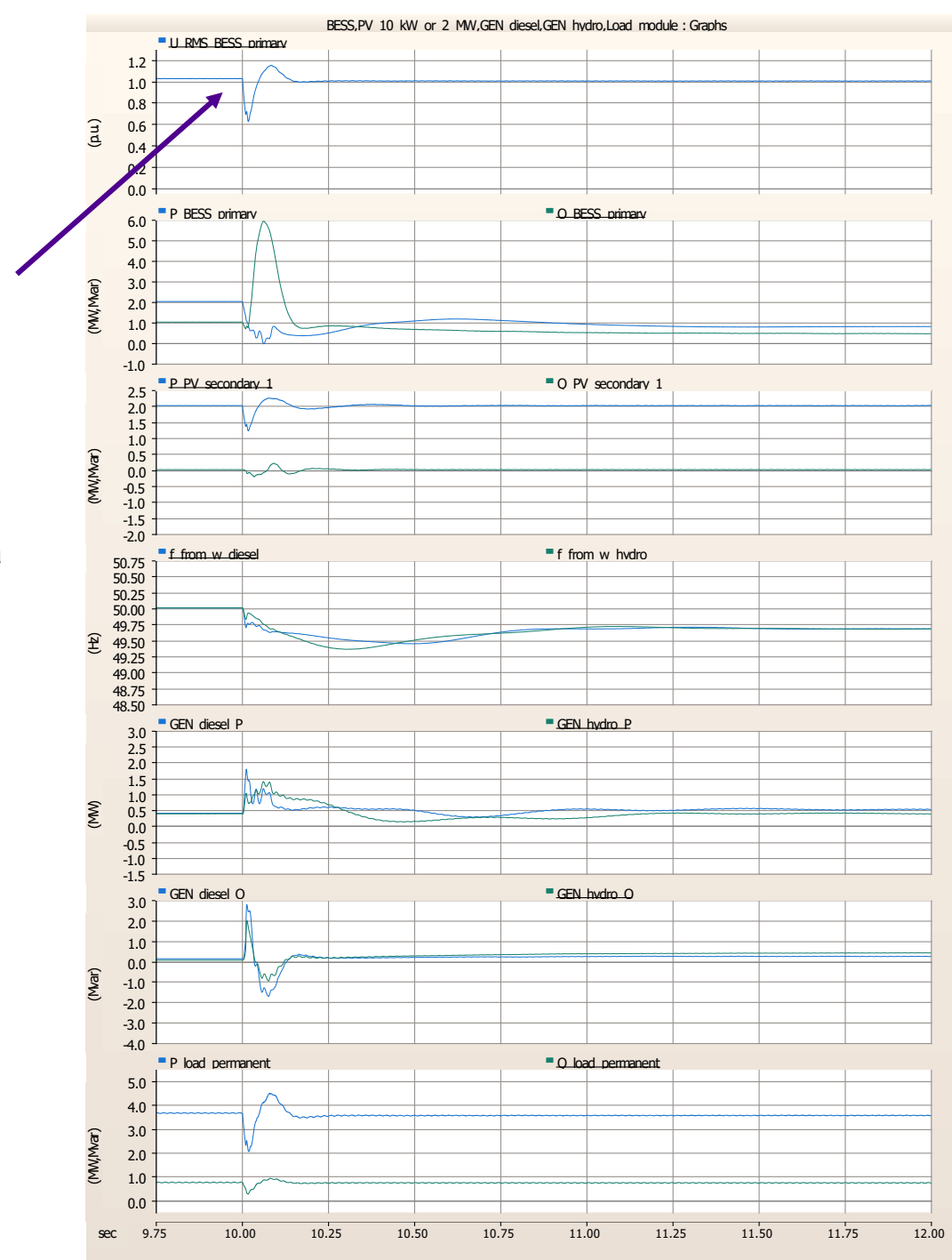
- Voidaan ajatella, että kyseessä on ”ideaalinen saarekoituminen”
- Ei viiveitä, suojaukset ovat pois päältä (pl. ylivirtasuojaus on päällä)
- Kyseisillä tuotantoyksiköillä ja valituilla säätöperiaatteilla tämä saarekoitumistapahtuma on niin sujuva, kuin se voi olla.
- Muodostaa vertailuskenaarion jatkotarkasteluille



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← Tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudesta johdettu ”taajuus”
- ← Tahtigeneraattoreiden pätötehot
- ← Tahtigeneraattoreiden loistehot
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

Tuloksia A – 1a:

- Ajanhetken $t = 10$ s asti BESS:llä on aktivoituneina pätö- ja loistesuureista vastaavat säätöpiirit ja taajuuden- ja jännitteensäätöpiirit ovat estotilassa
- Taajuuden- ja jännitteensäätöpiirien sisään- ja ulosmenosuureet ovat nollia ajanhetken $t = 10$ s asti



← BESS:n ensiöjännite

← BESS:n pätö- ja loisteho

← PV:n pätö- ja loisteho

← Tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudesta johdettu "taajuus"

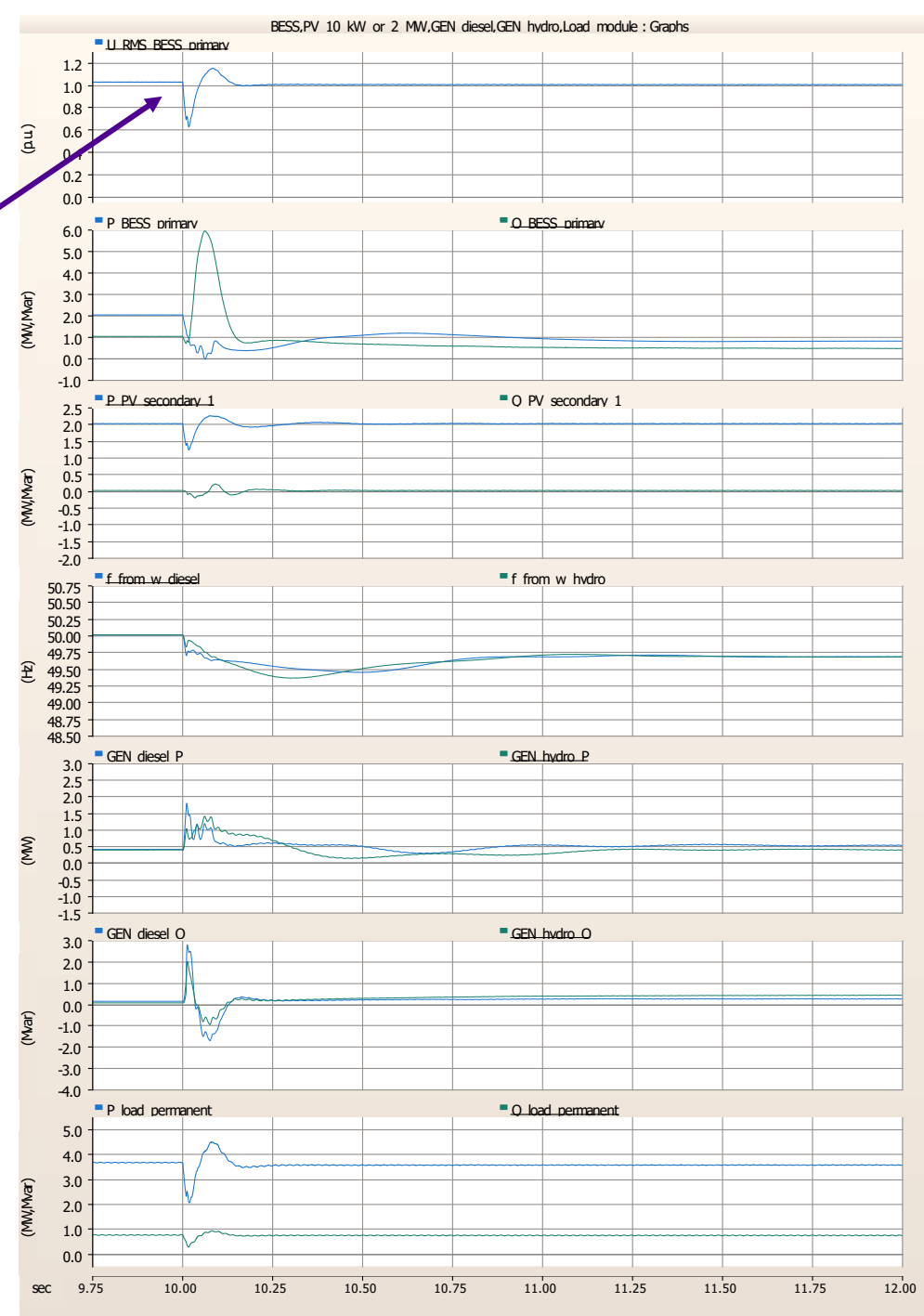
← Tahtigeneraattoreiden pätötehot

← Tahtigeneraattoreiden loistehot

← Kuormituksen pätö- ja loistehot

Tuloksia A – 1a:

- BESS:llä säätömoodin vaihto teho-ohjearvoista taajuuden- ja jännitteensäätöön sujuu viiveettä, mutta lukitustilan johdosta taajuuden- ja jännitteensäätöpiirien ulostulo-ohjearvot lähtevät nolosta
- Osaksi myös tästä syystä mikroverkossa jännitekuoppa on selkeästi alhaisempi, kuin katkaisijan jännitteen raja-arvo (0.85 p.u.)
- Myös muiden tuotantoyksiköiden toiminta vaikuttaa kokonaisvasteeseen
- Lukitus on tehty etteivät poiskytkettyjen säätöpiirien integraattorit ajautusi esim. maksimirajalle, jolloin lukituksen poistumisen jälkeen transientit voisivat olla haitallisen suuria ylisuurista ulostuloarvoista johtuen



← BESS:n ensiöjännite

← BESS:n pätö- ja loisteho

← PV:n pätö- ja loisteho

← Tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudesta johdettu "taajuus"

← Tahtigeneraattoreiden pätötehot

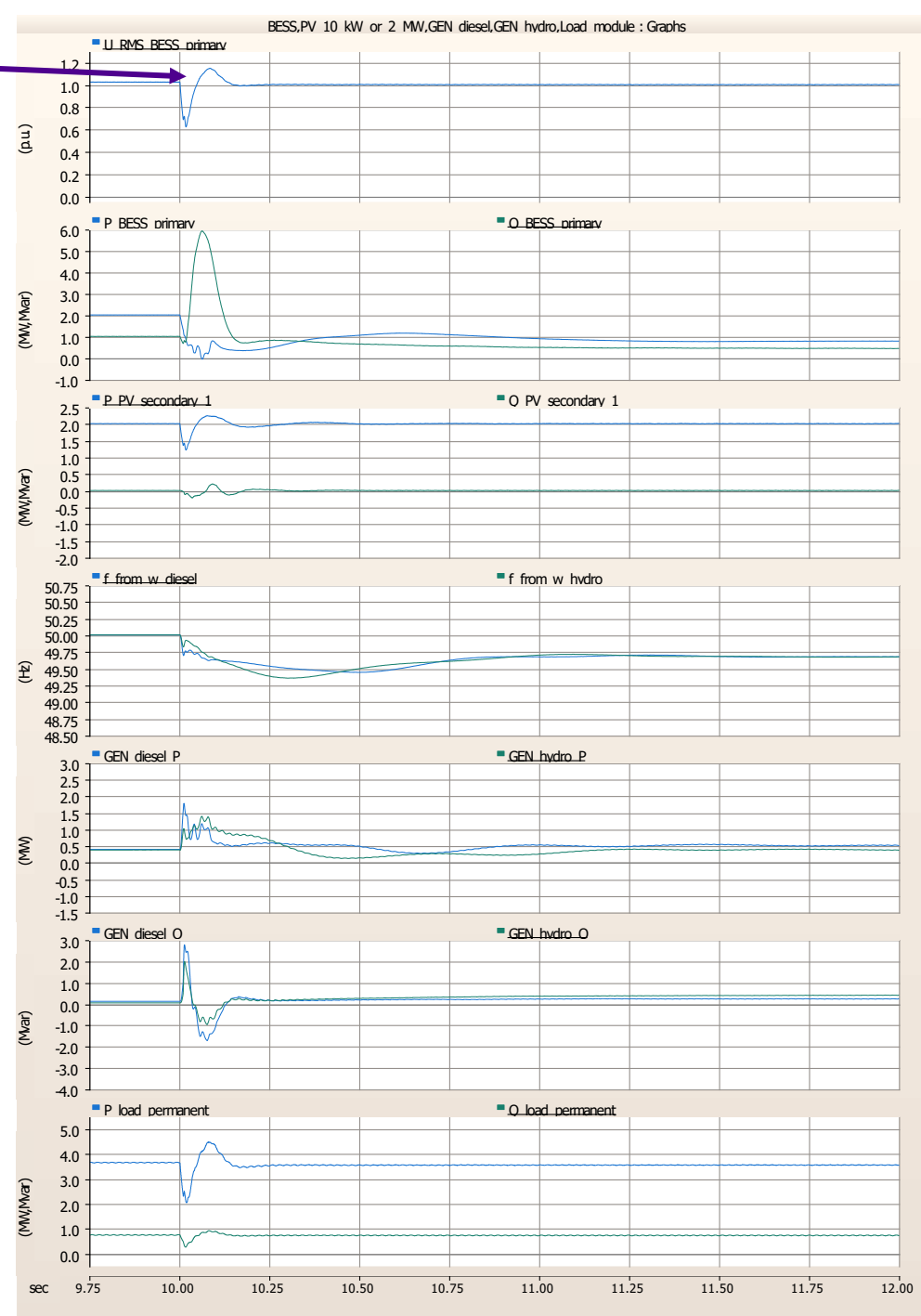
← Tahtigeneraattoreiden loistehot

← Kuormituksen pätö- ja loistehot

**Ylijännite

Tuloksia A – 1a:

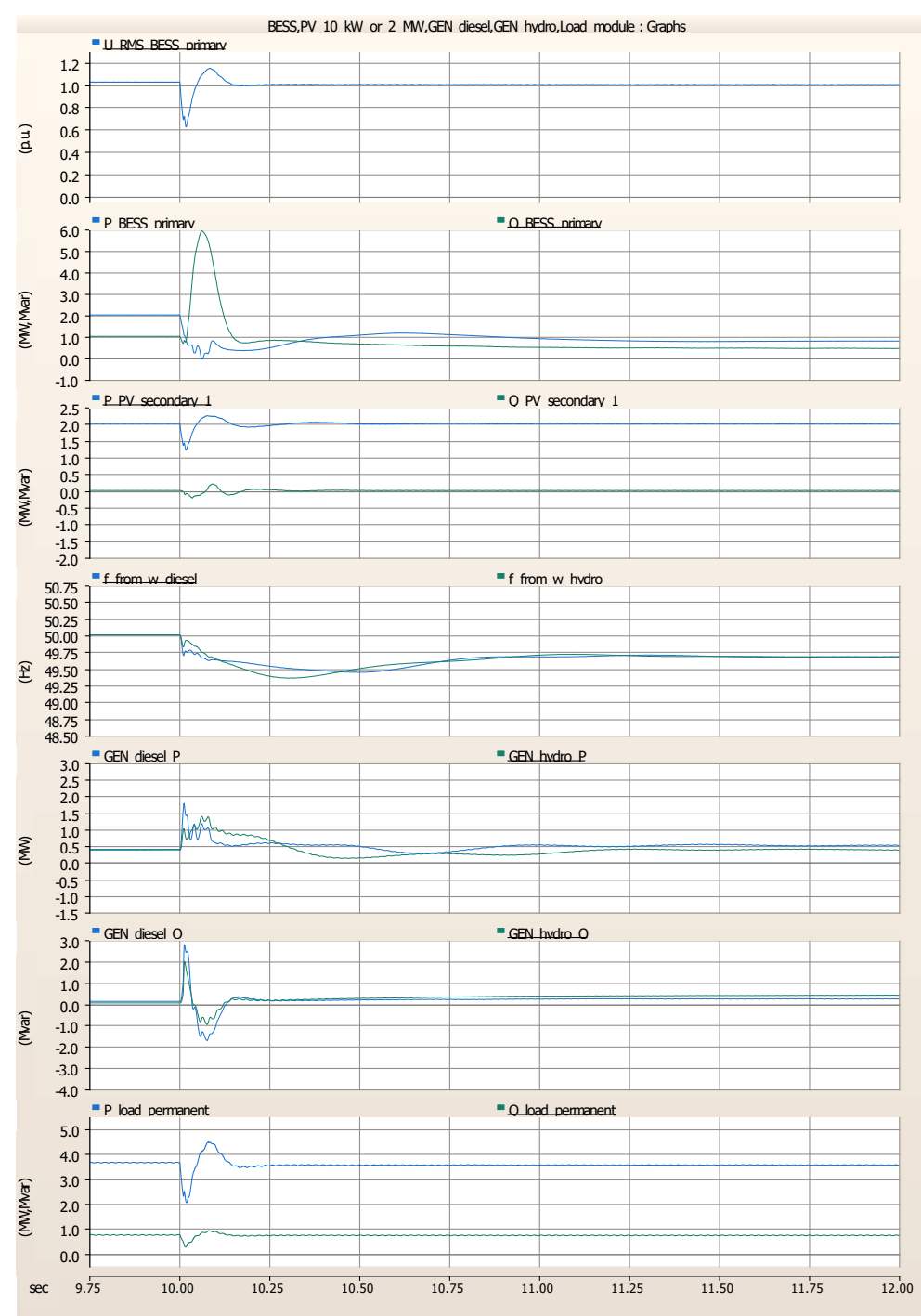
- Vaihtosuuntaajan kykyä säätää pätö- ja loistehoa nopeasti on hyödynnetty BESS:n tapauksessa
- Nähdään kuitenkin, että erityisesti BESS:n jännitteensäätö olisi voinut olla myös hitaampi (vrt. skenaario A – 1b)
- Selkeä ylijännite** saarekoitumistapahtuman yhteydessä
- PV on saavuttanut tasapainon jo reilu 250 ms saarekoitumisesta
- PV:n (ja myös BESS:n) vian aikainen ja vian jälkeisen vasteen ns. hyvyys tai huonous riippuu ennen kaikkea siitä, kuinka hyvin vaihelukko (Phase Locked Loop, PLL) pystyy seuraamaan verkon jännitteen kulmaa
 - Tästä saadaan vaihtosuuntaajalle taajuus, joita säätöpiirit tarvitsevat etenkin koordinaatiomuunnoksiin
 - Jännitteen kulma = tehokulma



- BESS:n ensiöjännite
- BESS:n pätö- ja loisteho
- PV:n pätö- ja loisteho
- Tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudesta johdettu "taajuus"
- Tahtigeneraattoreiden pätötehot
- Tahtigeneraattoreiden loistehot
- Kuormituksen pätö- ja loistehot

Tuloksia A – 1a:

- Parhaan stabiiliuden kannalta BESS:n säätö (niin P kuin Q) on ehkä tarpeettoman nopea, mutta nopea säätö voi tuoda paremmin esille ”yllättävät” vuorovaikutukset eri tuotantoyksiköiden välillä etenkin, kun on tarkastelut käsittävät hyvin nopeita ilmiöitä, kuten:
 - Vikatilanteiden vasteita
 - Saarekoitumisia
- Säätöparametrien valinta on aina optimointi- ja painotuskysymys:
 - Nopeilla vasteilla voidaan pienentää vian aikaista jännitekuoppaa, mutta lisätä värähtelyherkkyyttä (heikentää stabiiliutta)
 - Hitaampi säätö parantaa usein stabiiliutta, mutta tämä ei kuitenkaan ole automaatio etenkin silloin, kun kahden eri tuotantoyksikön säädön vaste osuu lähelle toisiaan (esim. ajassa mitattuna)
 - Tällöin säätäjät voivat alkaa ”taistelemaan” toisiaan vastaa (hunting)



← BESS:n ensiöjännite

← BESS:n pätö- ja loisteho

← PV:n pätö- ja loisteho

← Tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudesta johdettu ”taajuus”

← Tahtigeneraattoreiden pätötehot

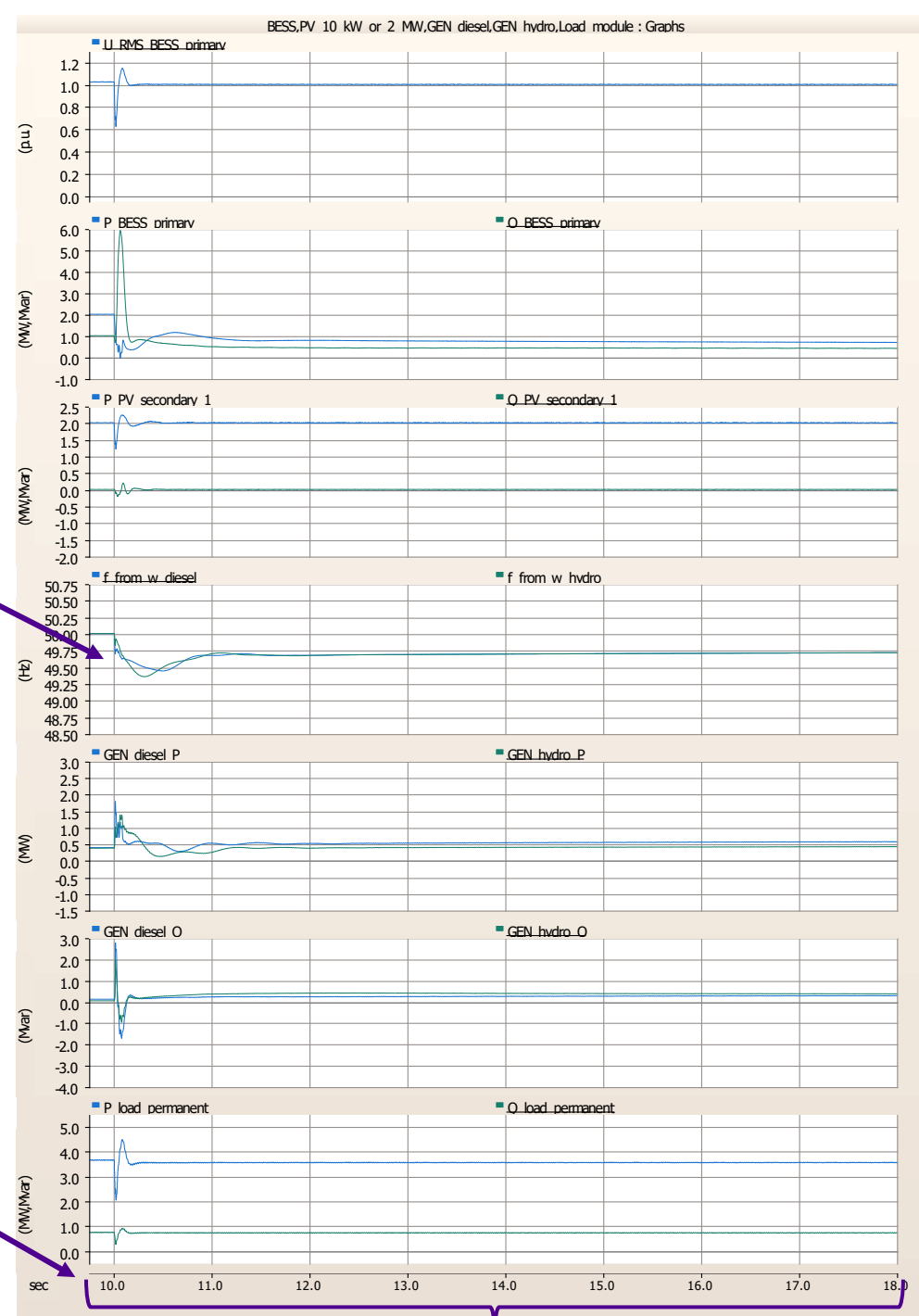
← Tahtigeneraattoreiden loistehot

← Kuormituksen pätö- ja loistehot

Tuloksia A – 1a:

- n. 1.5 sekuntia saarekoitusmistapahtumasta on saavutettu uusi tasapaino
- Taajuus on nyt pienempi, kuin 50 Hz, koska aiemmin taustaverkko määräsi taajuuden (50 Hz), mutta nyt taajuus määräytyy säätöön osallistuvien tuotantoyksiköiden droop-kertoimista ja kuorman suuruudesta
- Vain nollakuormituksella taajuus on 50 Hz

Kuvaajat näyttävät n. 10 sekunnin mittaisen ajanjakson



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← Tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudesta johdettu "taajuus"
- ← Tahtigeneraattoreiden pätötehot
- ← Tahtigeneraattoreiden loistehot
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

Tuloksista A – 1a:

- Seuraavalla kalvolla on näytettynä ulostulosuureita ilman kuvaajia
- Tätä seuraavalla kalvolla on kuvaajat ja yo. ulostulosuureiden tiedot
- Kuvaajien suuret ovat myös itse kuvaajien yläpalkissa
 - Y-akselin vieressä näkyy yksikkö.
- Sitä seuraavalla kalvolla on kuvaajat ilman ”päälle liimattuja” ulostulosuuretekstejä
- Täydentävät kuvaajasuuret ovat pitkässä tuloskalvoesityksessä, mutta suurinta osaa ei ole lyhyemmässä kalvosarjassa
 - Tarkoitus on nostaa esille, että EMT-simuloinneissa on suuri määrä tarkasteltavia ulostulosuureita ja ”kaikki suuret ovat yhtä tärkeitä”

BESS:n ensiöjännite

PV:n ensiöjännite

Tahtigeneraattoreiden
pyörimisnopeudet

BESS:n pätö- ja loisteho

PV:n pätö- ja loisteho

Tahtigeneraattorin (diesel)
sähköinen ja mekaaninen
momentti

BESS:n i_{d_ref} - ja mitattu
 i_d -virta

PV:n i_{d_ref} - ja mitattu i_d -
virta

Tahtigeneraattorin (hydro)
sähköinen ja mekaaninen
momentti

BESS:n i_{q_ref} - ja mitattu
 i_q -virta

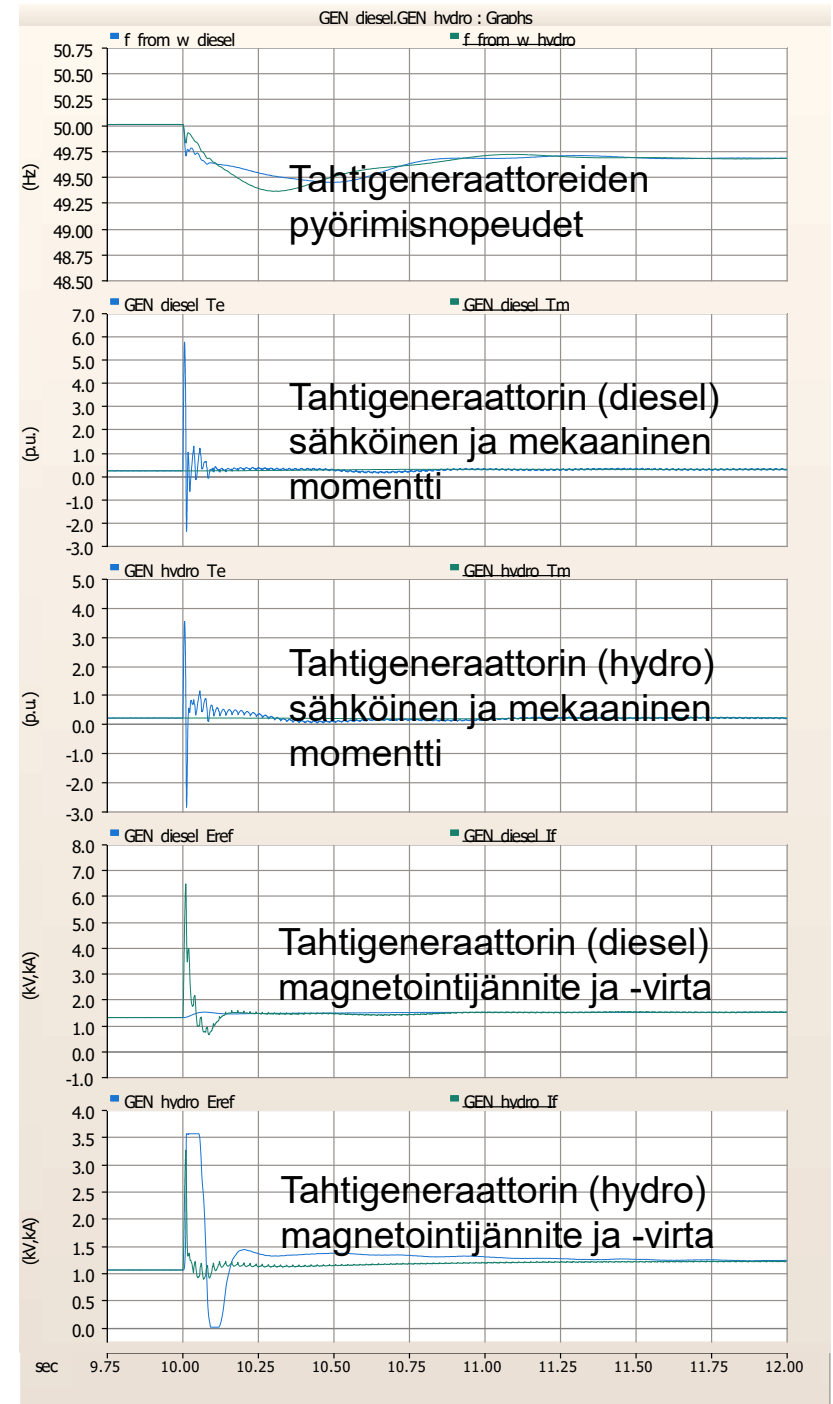
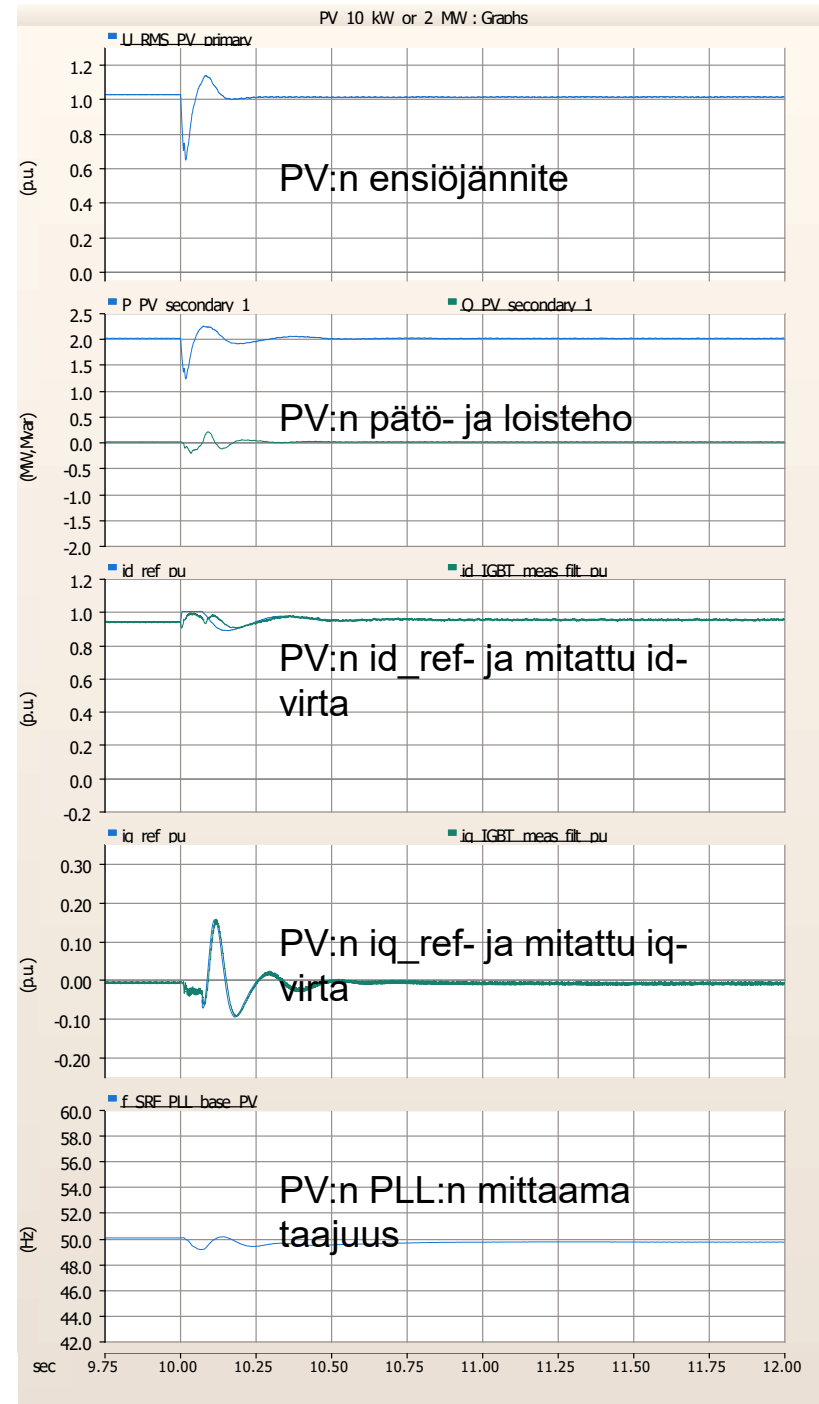
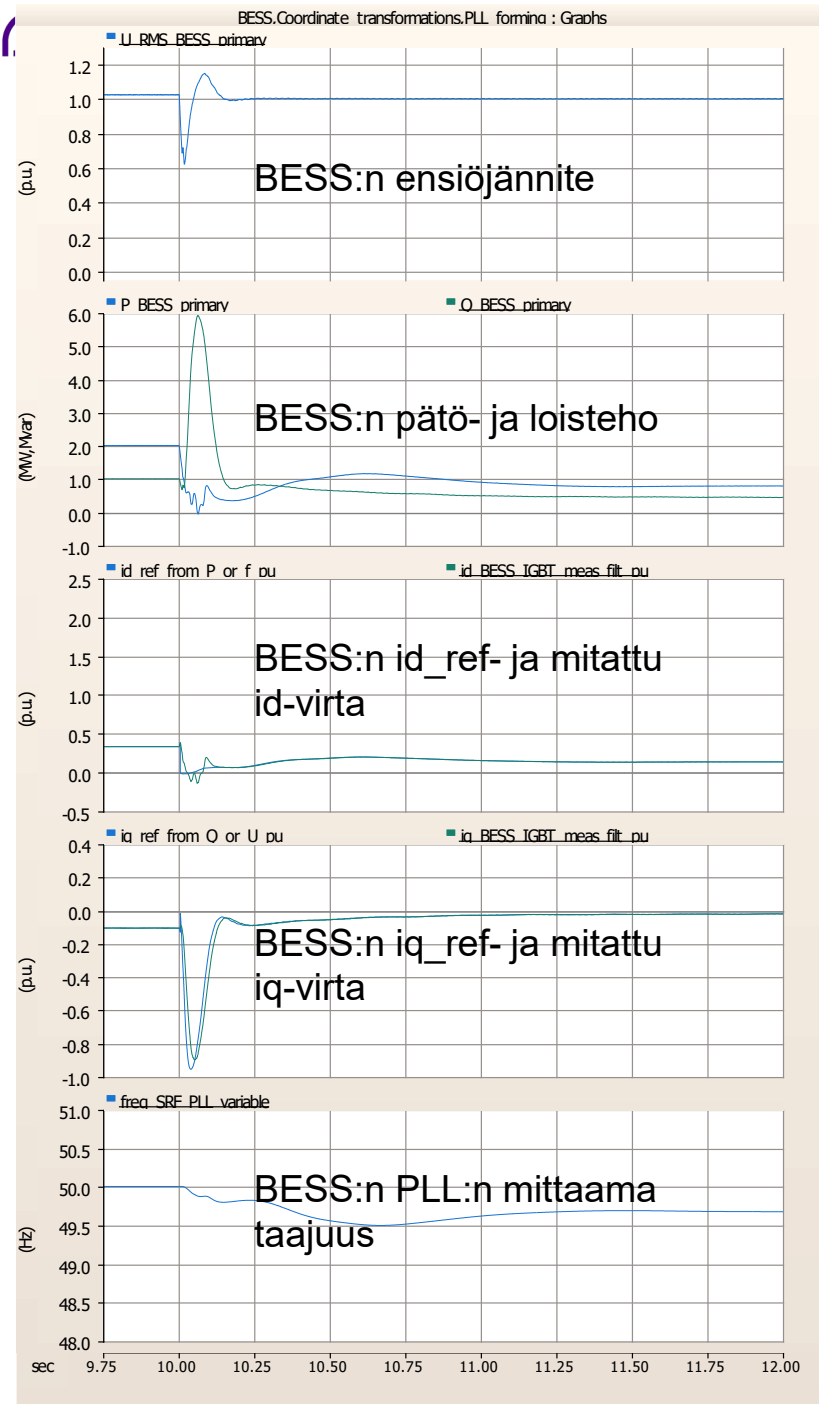
PV:n i_{q_ref} - ja mitattu i_q -
virta

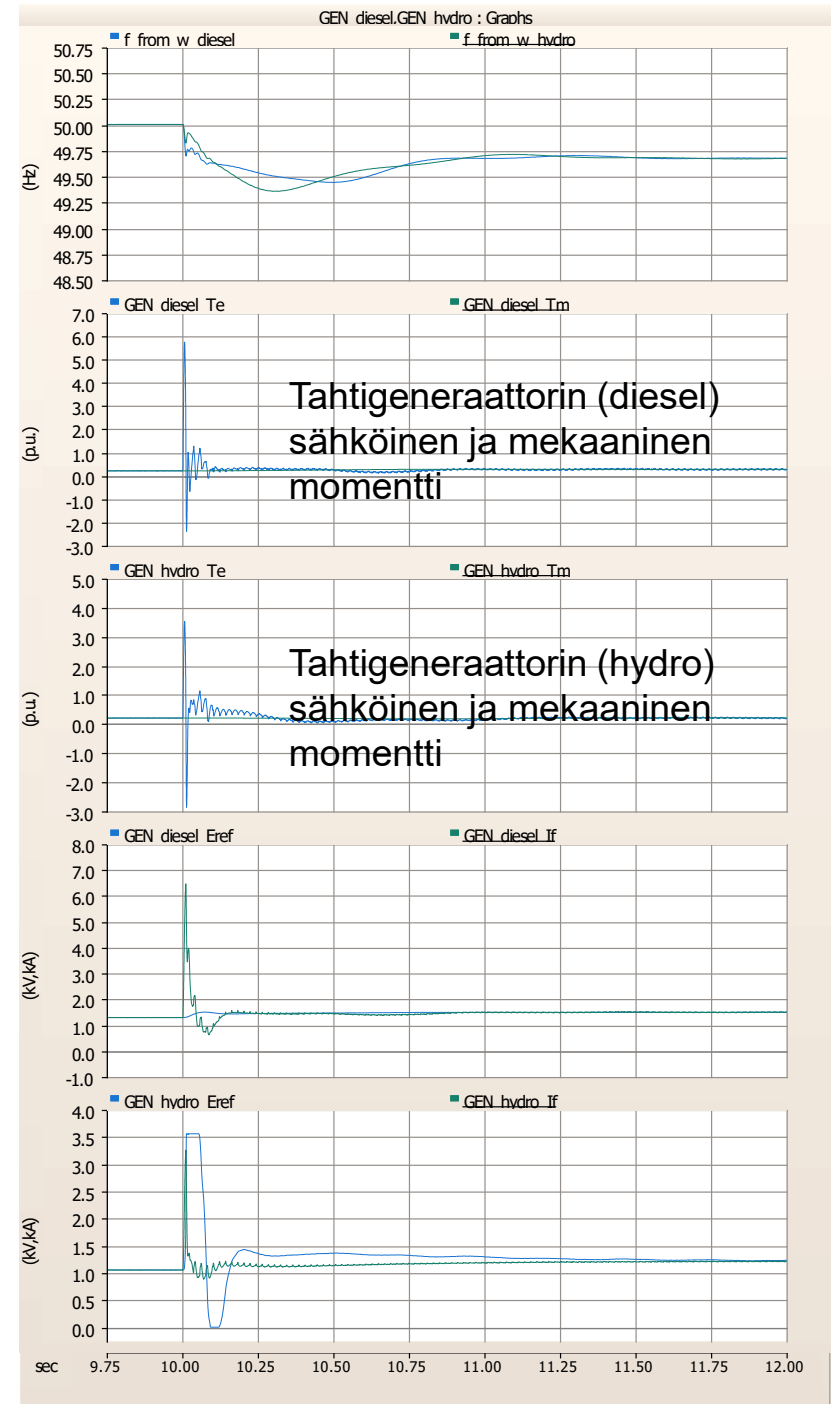
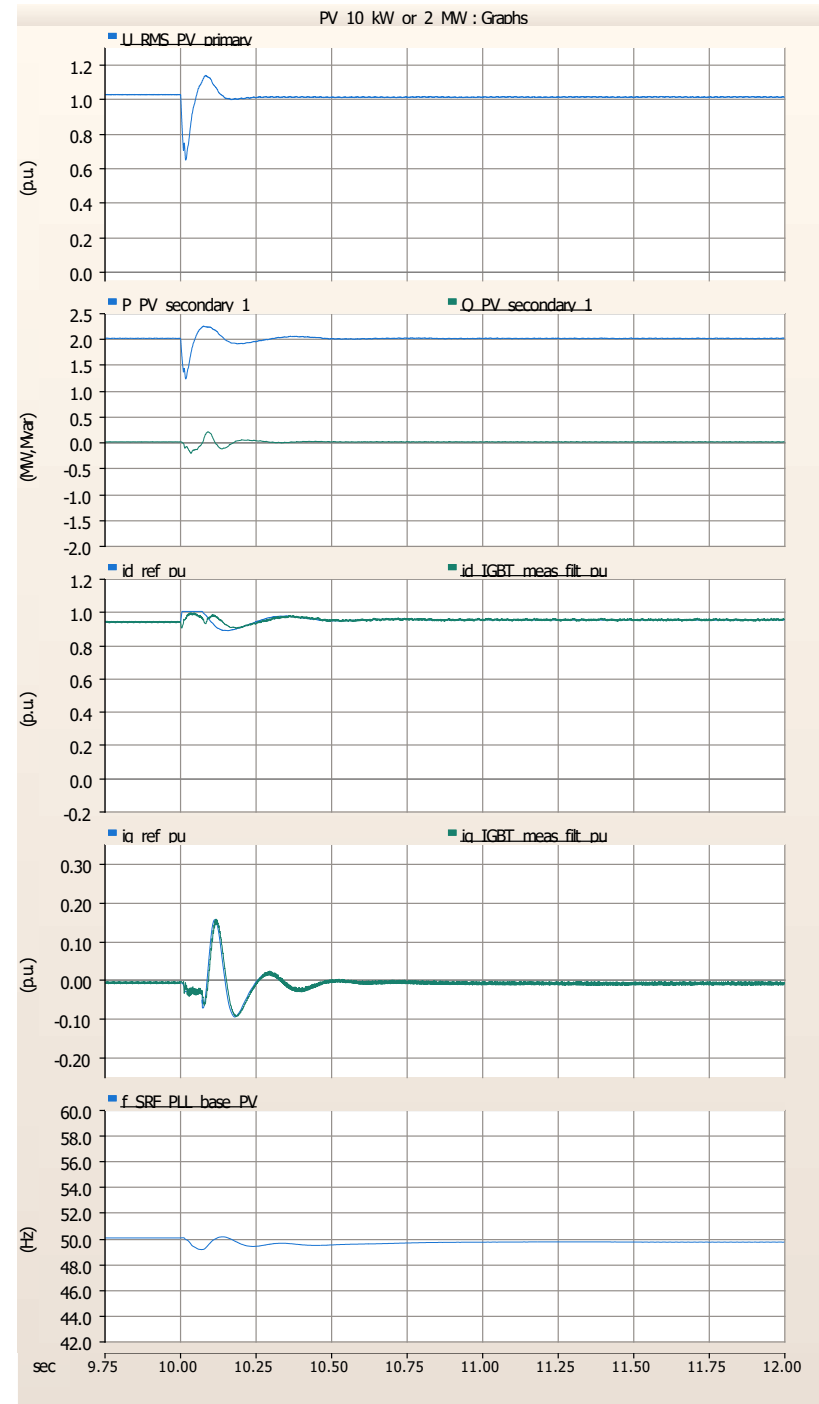
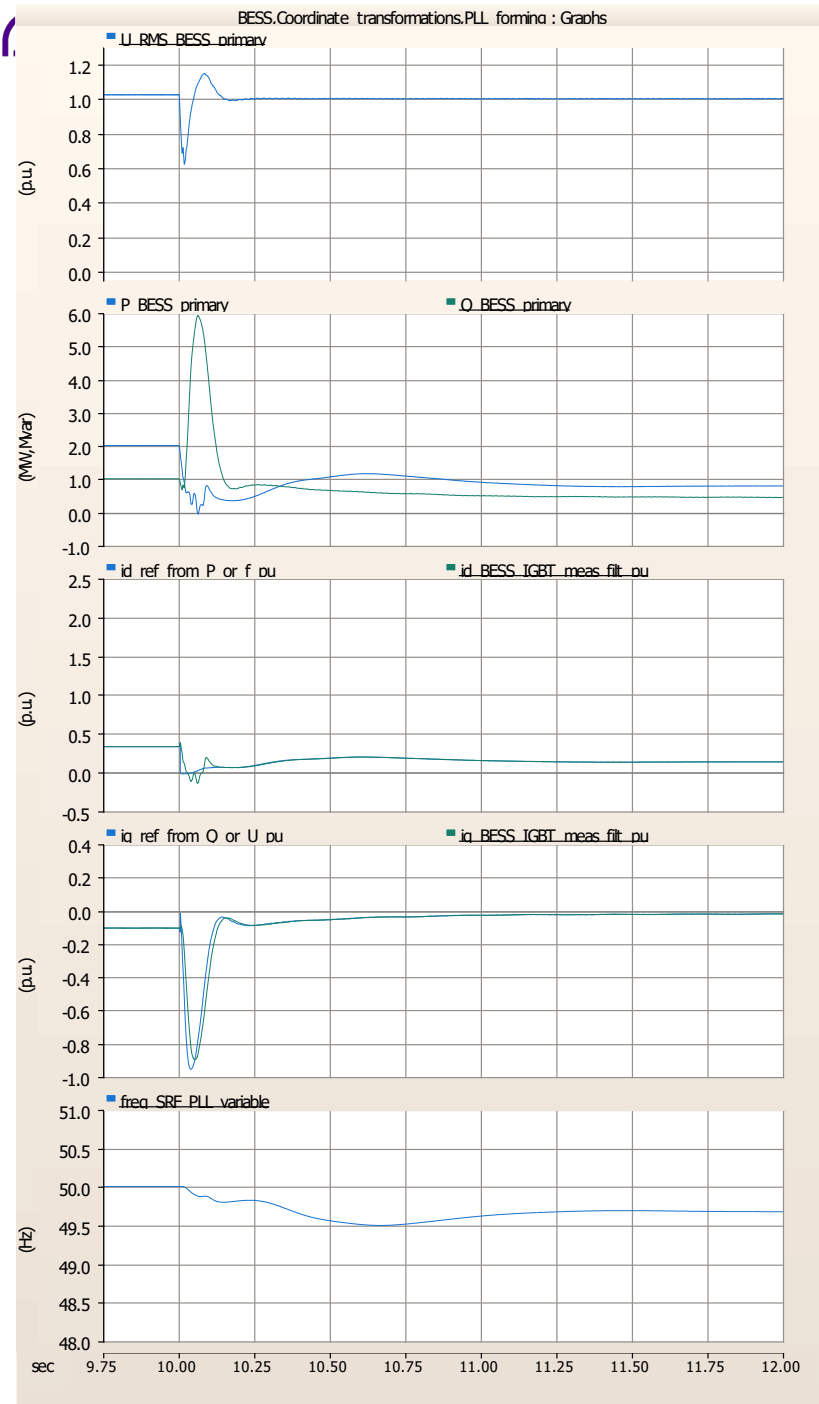
Tahtigeneraattorin (diesel)
magnetointijännite ja -virta

BESS:n PLL:n mittaama
taajuus

PV:n PLL:n mittaama
taajuus

Tahtigeneraattorin (hydro)
magnetointijännite ja -virta





Tahtigeneraattorin (diesel)
sähköinen ja mekaaninen
momentti

Tahtigeneraattorin (hydro)
sähköinen ja mekaaninen
momentti

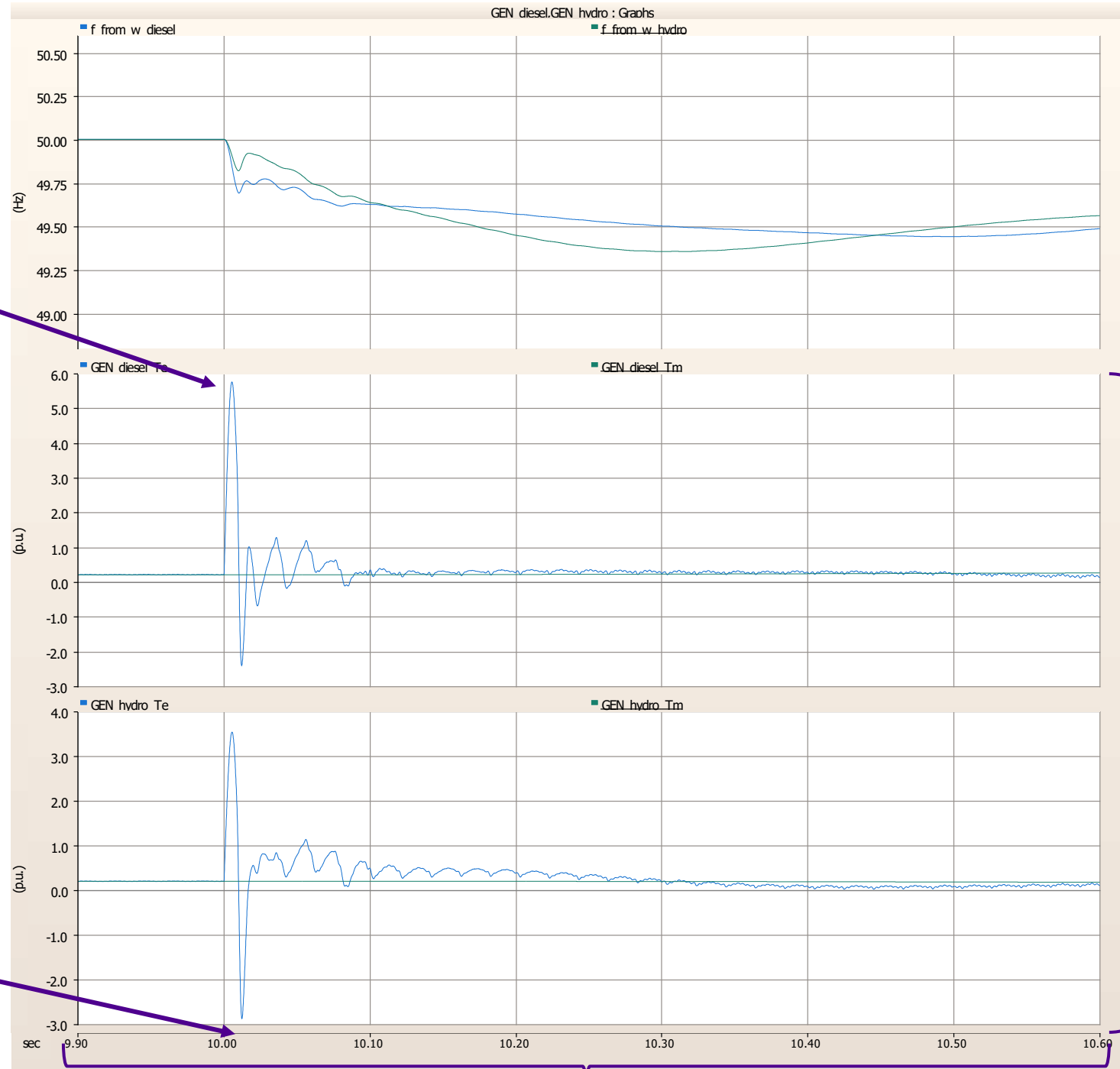
Tuloksista A – 1a:

- Piirtämällä kuvaajia paljon on mahdollista löytää mahdollisia virhelähteitä, tehdä tarkempia analyysejä ja ymmärtää paremmin mallin kokonaisvasteita
 - On selvää, että mitä enemmän kuvaajia piirretään, sen hitaammaksi simulointi muuttuu
- On myös huomioitava mikä on kuvaajien tallennusväli, joka on, tai voi olla eri, kuin simuloinnin laskennan aika-askel
- Kuvaajien tallennusväli ei luonnollisesti voi olla pienempi kuin simuloinnin aika-askel (yhtälöryhmien aika-askel), koska tällaista tietoa/dataa ei ole piirrettäväksi
- Oletusarvoiset aika-askeleet tämän projektin simuloineissa:
 - simuloinnin aika-askel 10 us
 - kuvaajien tallennusväli 100 us
 - detailed-/averaged-mallivertailuissa averaged-mallien simuloinnin aika-askelta muutetaan välillä 10 us – 100 us
- Tämän lisäksi on huomioitava onko suureita (alipäästö)suodatettu ja kuinka paljon
 - Tämä pätee etenkin RMS-suureisiin
- Hetkellisarvosuureita ei ole (lähtökohtaisesti) syytä suodattaa jos tarkoitus on vain piirtää kuvaajat näytille
 - Joskus suodattimen helpottaa kokonaisvasteen hahmottamista
 - Tällöin kuitenkin tarkka vaste on hyvä myös mukana
- Säättöä varten hetkellisarvojenkin suodatus on tyypillistä
 - Tapauskohtaista on kannattaako, ja kuinka paljon suureita (mitä ”tyyppiä” tahansa) suodattaa

Tuloksia A – 1a:

- Oikosulun aikana tahtigeneraattoreihin kohdistuvat sähköiset momentit ovat tyypillisesti hyvin suuria
- Jos generaattorin ”näkemä” verkon jännite on nolla tai hyvin pieni, niin keskimääräinen sähköinen momentti on nolla
- Vian aikana generaattoreiden roottorit kiihtyvät
- Tässä skenaariossa on kuitenkin siirrytty saarekkeeseen katkotta, jolloin jännite on pysynyt suhteellisen korkeana
 - Generaattoreiden kuormitus pysyy suurena → roottorit eivät ala kiihtymään

Kuvaajat näyttävät 0.7 sekunnin mittaisen ajanjakson



← Tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudet

← Tahtigeneraattoreiden sähköiset ja mekaaniset momentit

A: Saarekoituminen 1b – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

Tarkastelukokonaisuudet ja niiden perusteet:

➤ Vertaillaan vasteita, jossa saarekoitumistapahtumassa:

A – 1a ei ole viiveitä

A – 1b ei ole viiveitä, BESS:n jännitteensäätöä on hidastettu

A – 1c ei ole viiveitä, tahtigeneraattorit eivät osallistu jännitteensäätöön, mutta BESS:n säätö kuten A – 1a (nopea)

➤ Jännitteensäädön keskinäisen dynamiikan tarkastelua

A – 2a on viiveitä: BESS + PV + 2 SG

A – 2b 150 ms + 100 ms viive, BESS:n jännitteensäätöä on hidastettu

A – 2c: 150 ms + 100 ms viive : BESS + ~~PV~~ + 2 SG (ei PV:tä)

➤ Viiveiden huomioiminen on olennainen osa, koska viiveitä on aina ja viiveet poikkeuksetta heikentävät stabiiliutta ja robustisuutta

➤ Vertaillaan vasteita, kun tuotantoyksiköiden säätöpiirien parametreja on muutettu

A – 3a säätöpiirien parametrit (säätäjien vahvistus, integrointiakavakio jne.) ovat huonosti viritetty ko. käyttötilanteeseen

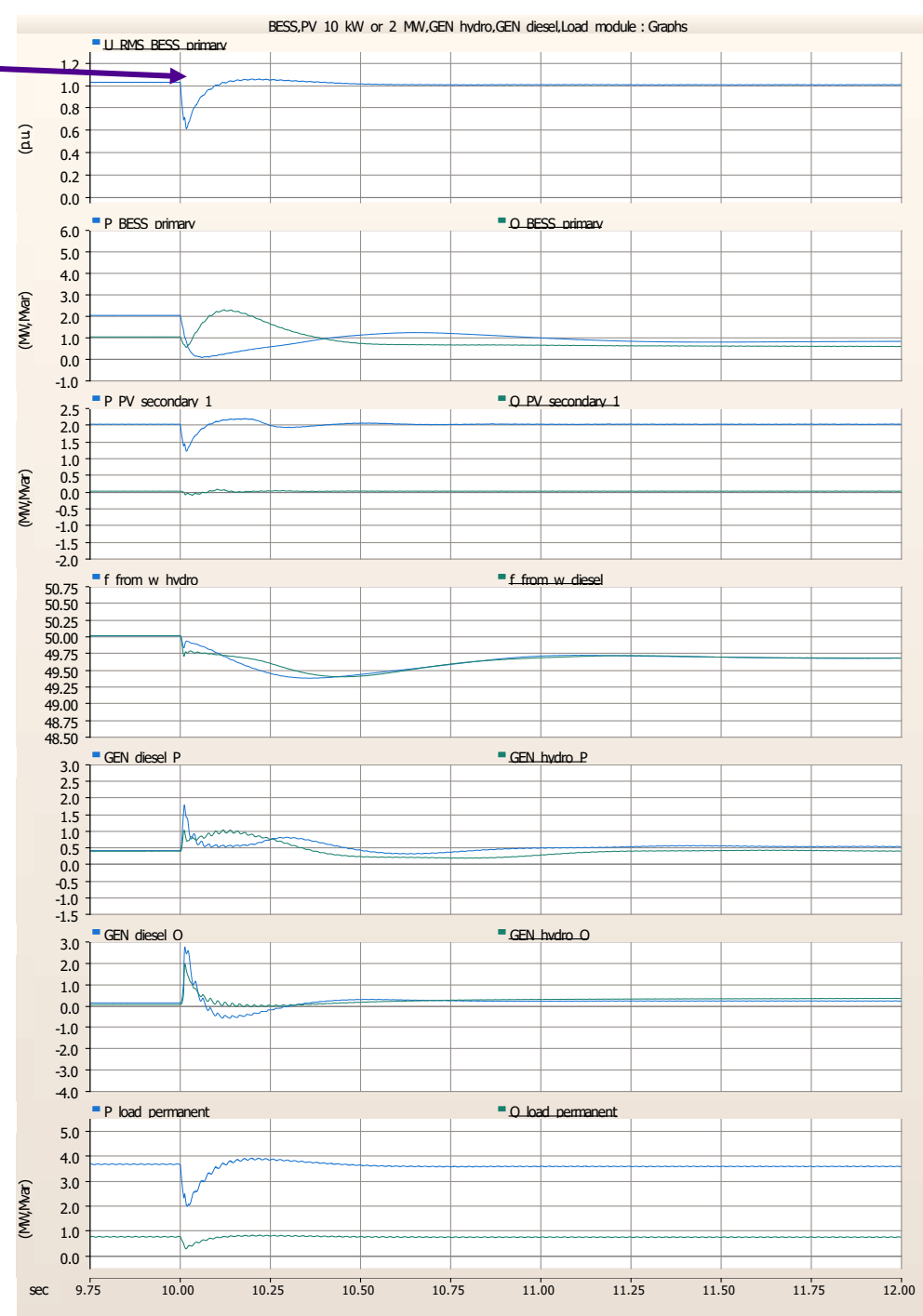
A – 3b muutetaan säätöpiirien parametreja simulointiajon aikana ns. lennosta

➤ Tuotantoyksiköiden lisäksi säätöpiirien toteutus ja parametrisointi vaikuttavat suoraan mikroverkon dynamiikkaan

Vain pieni ylijännite

Tuloksia A – 1b:

- Tässä vertailuna edelliseen skenaarioon (A-1a) tilanne, jossa BESS:n jännitteensätöä on tarkoituksella hidastettu
- Ylijännite on pienempi, mutta vastaavasti asettumisaika on suurempi
 - Lähtökohtaisesti pätee: pienempi ylitys, suurempi asettumisaika ja toisinpäin
- Säätö toimii p.u.-tasossa (skaalattuna näin), joten myös vahvistukset ja integrointiakavakiot ovat pu-arvoina
 - Vahvistusta on pudotettu molemmissa jännitteensätöpiirin osissa 50 %
 - Integraattorin aikavakiota on kasvatettu 50 %
 - Jännitteensätöpiirissä ulkoinen piiri (outer loop) on jännitteensätöpiiri ja sisäinen piiri (inner loop) huolehtii virtasäädöstä
 - Taajuudensätöpiiriä ei ole muokattu (siinäkin vastaavasti "inner loop" ja "outer loop")



- BESS:n ensiöjännite
- BESS:n pätö- ja loisteho
- PV:n pätö- ja loisteho
- Tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudesta johdettu "taajuus"
- Tahtigeneraattoreiden pätötehot
- Tahtigeneraattoreiden loistehot
- Kuormituksen pätö- ja loistehot

A: Saarekoituminen 1c – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

Tarkastelukokonaisuudet ja niiden perusteet:

➤ Vertaillaan vasteita, jossa saarekoitumistapahtumassa:

A – 1a ei ole viiveitä

A – 1b ei ole viiveitä, BESS:n jännitteensäätöä on hidastettu

A – 1c ei ole viiveitä, tahtigeneraattorit eivät osallistu jännitteensäätöön, mutta BESS:n säätö kuten A – 1a (nopea)

➤ Jännitteensäädön keskinäisen dynamiikan tarkastelua

A – 2a on viiveitä: BESS + PV + 2 SG

A – 2b 150 ms + 100 ms viive, BESS:n jännitteensäätöä on hidastettu

A – 2c: 150 ms + 100 ms viive : BESS + ~~PV~~ + 2 SG (ei PV:tä)

➤ Viiveiden huomioiminen on olennainen osa, koska viiveitä on aina ja viiveet poikkeuksetta heikentävät stabiiliutta ja robustisuutta

➤ Vertaillaan vasteita, kun tuotantoyksiköiden säätöpiirien parametreja on muutettu

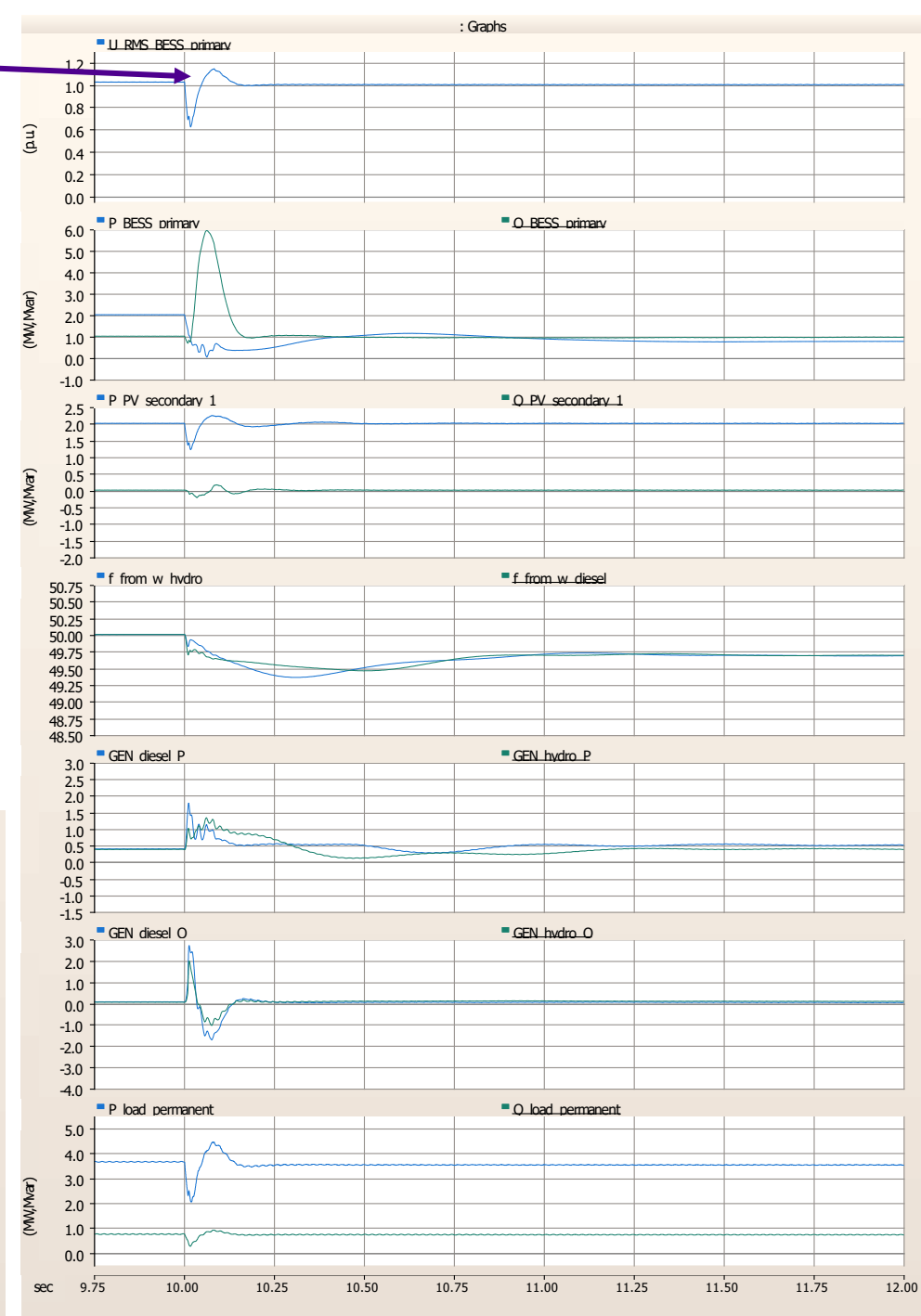
A – 3a säätöpiirien parametrit (säätäjien vahvistus, integrointiakavakio jne.) ovat huonosti viritetty ko. käyttötilanteeseen

A – 3b muutetaan säätöpiirien parametreja simulointiajon aikana ns. lennosta

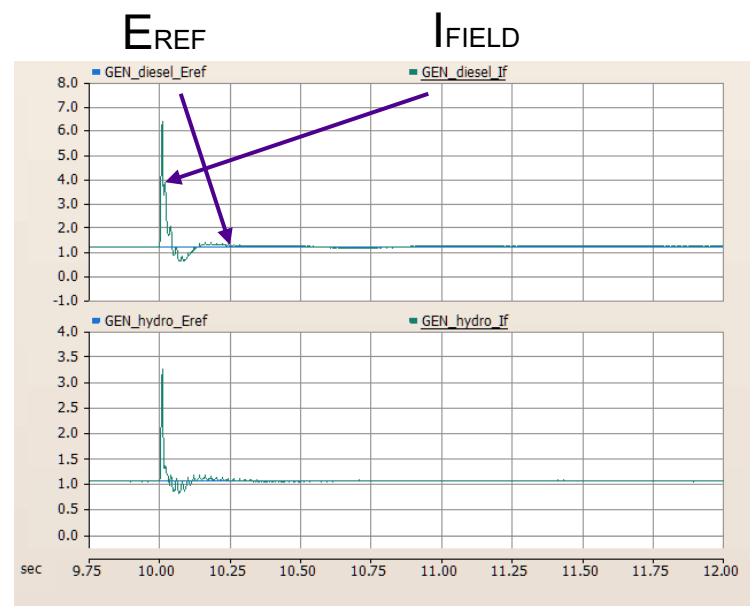
➤ Tuotantoyksiköiden lisäksi säätöpiirien toteutus ja parametrisointi vaikuttavat suoraan mikroverkon dynamiikkaan

Tuloksia A – 1c:

- Tässä sama skenaario kuin A- 1, mutta erona se, etteivät tahtigeneraattorit osallistu jännitteensäätöön
- Tahtigeneraattoreiden E_{REF} on vakio
- Vaste-erot hyvin pieniä verrattuna perusskenaarioon (A-1)
- Tulokset vahvistavat vaihtosuuntaajan säädön merkitystä erityisesti nopeissa transienteissa

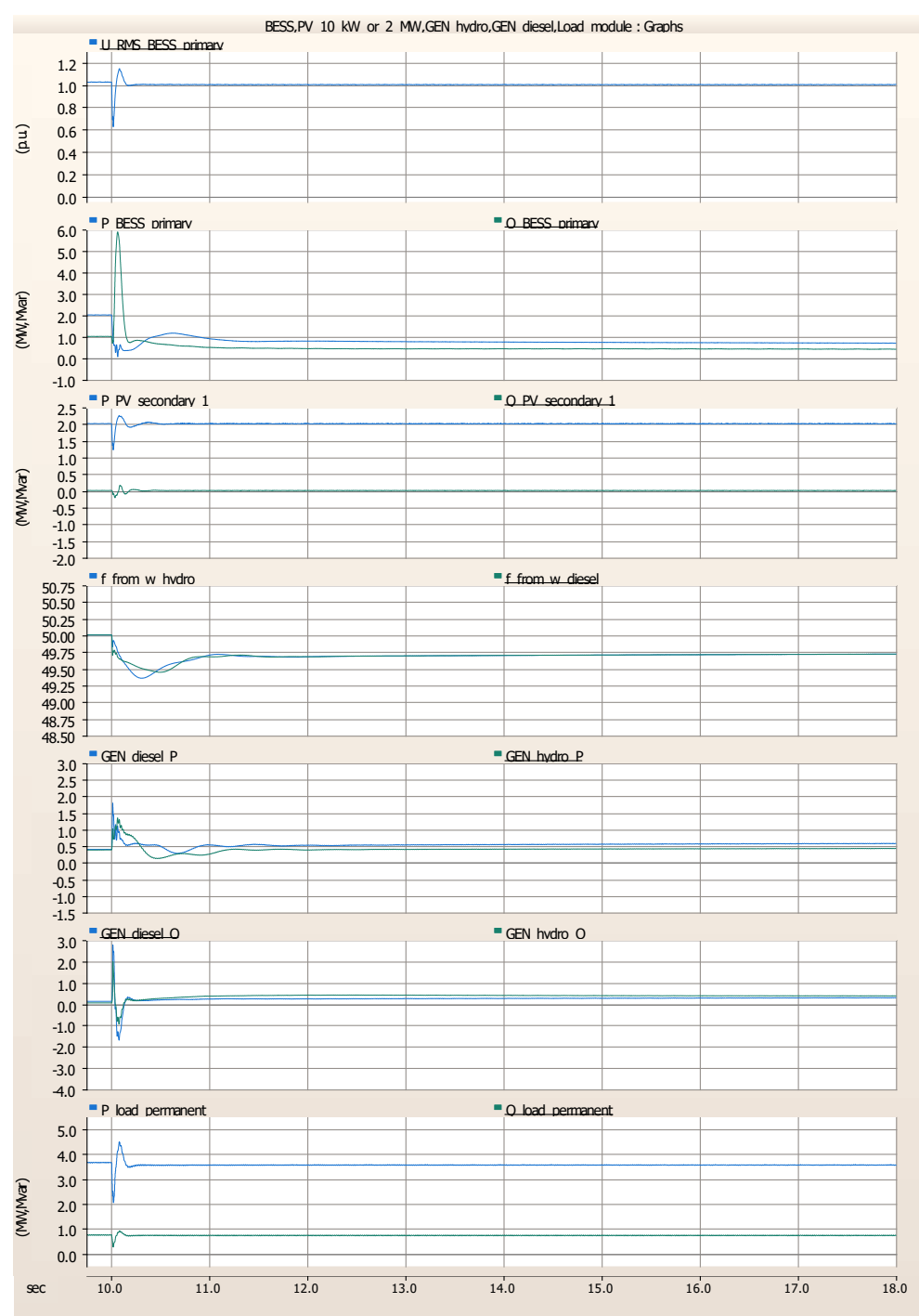


- BESS:n ensiöjännite
- BESS:n pätö- ja loisteho
- PV:n pätö- ja loisteho
- Tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudesta johdettu "taajuus"
- Tahtigeneraattoreiden pätötehot
- Tahtigeneraattoreiden loistehot
- Kuormituksen pätö- ja loistehot



Lyhyesti taajuudesta

- Oikealla lukee: ”Tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudesta johdettu ”taajuus””, jossa sana ”taajuus” on sitaateissa.
- Taajuus mitataan jännitteiden hetkellisarvokäyristä, joten ei olisi oikein ilmaista asia sanomalla, että tahtikoneiden pyörimisnopeus = taajuus.
- Verkon tasapainotilassa tahtikoneiden pyörimisnopeudesta johdettu ”taajuus” ja jännitteistä mitattu taajuus ovat lähellä toisiaan, mutta lähtökohtaisesti häiriötilanteissa nämä kaksi voivat erota huomattavastikin
 - Generaattoreiden roottorit heilahtelevat toisiaan vasten ja eri heilahtelualueita on useampia. Eri alueilla on usein myös eri heilahtelutaajuus, joilla ne heilahtelevat toisiaan vasten.
 - Tarkasti ottaen taajuus ei ole siis verkolle yhteinen suure, vaan vaihtelee mittausspaikasta ja käyttötilanteen mukaan.



← Tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudesta johdettu ”taajuus”

A: Saarekoituminen 1a, 1b ja 1c – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

Johtopäätöksiä

- Säätoparametrien valinta on aina optimointi- ja painotuskysymys:
- Nopeilla vasteilla voidaan pienentää vian aikaista jännitekuoppaa, mutta lisätä värähtelyherkkyyttä (mahdollisesti heikentää stabiiliutta)
- Hitaampi säätö parantaa usein stabiiliutta, mutta tämä ei kuitenkaan ole automaatio etenkin silloin, kun kahden eri tuotantoyksikön säädön vaste osuu lähelle toisiaan (ajassa mitattuna)
- Tällöin säätäjät voivat alkaa ”taistelemaan” (hunting) toisiaan vastaan
- Hidastamalla säätövasteita ylijännite (yksi esimerkki tarkastelusuureista) on pienempi, mutta vastaavasti asettumisaika on suurempi
- Lähtökohtaisesti pätee: pienempi ylitys, suurempi asettumisaika ja toisinpäin

A: Saarekoituminen 1a, 1b ja 1c – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

Johtopäätöksiä

- Vertailu perustilanteen (A-1a) ja tilanteen, jossa BESS:n jännitteensäätöpiirin parametreja on muutettu & hidastettu (A – 1b) osoittaa, kuinka merkittävässä osassa säätöpiirien parametrit tehoelektroniikkaliitännäisten yksiköiden vasteissa on
 - Vaikuttaa suoraan mikroverkon dynamiikkaan ja kokonaisvasteisiin
 - Mitä suurempi on BESS:n koko suhteessa mikroverkon kokonaistehoon, sitä suurempi merkitys on BESS:n säätöparametrien arvoilla
 - Myös säätömenetelmä on vähintään yhtä tärkeä, kuin parametrisointi, mutta eri vasteiden eroja eri säätömenetelmien avulla ei tässä tutkittu
- Tehoelektroniikkaliitännäisissä yksiköissä ei ole tahtigeneraattoreiden luontaista hitausmomenttia, joka voi olla, tilanteesta riippuen, hyvä (stabiiliutta parantava) tai huono (esim. säädön nopeutta rajoittava) ominaisuus
 - Hitausmomentin olemassaolo (tai sen puuttuminen) vaikuttaa erityisesti taajuudensäätöön
- ”Hitausmomentin” lisääminen esim. BESS:n vasteisiin saadaan aikaan vain säätöpiirien ja mittausten avulla → emuloidaan tahtikoneen ominaisuuksia
 - Tässä on aina mittaustiedon saannin (ja tiedon prosessoinnin yms.) pituinen viive, siinä missä tahtikone reagoi heti roottorin ja staattorin magneettikenttien vuorovaikutuksen kautta

A: Saarekoituminen 1a, 1b ja 1c – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

Johtopäätöksiä

- Tahtikoneen hitausmomentti kytkeytyy verkkoon roottorin ja staattorin voimakkaiden magnettikenttien välityksellä ns. automaattisesti, joten mittauksia tai muita takaisinkytkentöjä ei tarvita
- BESS:n / tehoelektroniikkaliitännäisten tuotantoyksiköiden suhteen tilanne on täysin erilainen, koska ”emuloitu hitausmomentti” vaikuttaa vasta sitten (voidaan hyödyntää), kun muutoksia verkossa (taajuudenmuutos) on jo tapahtunut ja mittauksin on saatu tästä muuttumisesta tietoa
- Vasta tämän jälkeen BESS:n ”hitausmomenttia” voidaan hyödyntää taajuuden/verkon stabiloinnissa
- Tahtigeneraattoreilla tätä viivettä ei ole, koska roottori on jatkuvasti sähkömagnettisessa vuorovaikutuksessa staattorin magnettikentän kanssa
- Mittausviiveen jälkeen BESS:n kyky hyödyntää emuloitua hitausmomenttia on tyypillisesti paljon (kertaluokkia) nopeampi, kuin tahtigeneraattorin taajuudensäätökyky
- Usein ”inertialla” tarkoitetaan (virheellisesti) juuri hitausmomenttia

A: Saarekoituminen 1a, 1b ja 1c – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

Johtopäätöksiä

- Tahtigeneraattorin jännitteensäädössä on myös huomattavan paljon hitautta verrattuna vaihtosuuntaajan kykyyn säätää jännitettä (loistehoa)
- Tahtigeneraattorin roottoripiirissä on magnetoimiskäämit (suuri energiavarasto), joiden avulla luodaan staattorikäämeihin jännitteet
- Magnetoimiskäämien induktanssi on tarkoituksella suuri, jotta riittävän suuri magneettikenttä (\rightarrow magneettivuon tiheys, B) saadaan muodostettua roottorin ja staattorin välisen ilmavälin yli.
- Tämän magneettikentän suuruutta täytyy kuitenkin muuttaa, jos halutaan generaattorin osallistuvan jännitteensäätöön
- Magnetoimiskäämien induktiivinen reaktanssi pyrkii luonnostaan vastustamaan jännitteenmuutosta sen itsensä yli
 \rightarrow Tämä, Lenzin lakiin perustuva, sähkömagneettinen ilmiö saattaa aiheuttaa satojen millisekuntien viiveen jännitteensäätöön
- Viiveen pituus riippuu tahtikoneen koosta, magnetoimismenetelmästä ja säätöpiirien parametreista (erityisesti magnetointilaitteen vahvistus), mutta on ilmiönä sama kaikissa tahtikoneissa

A: Saarekoituminen 1a, 1b ja 1c – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

Johtopäätöksiä – enemmän yleisesti mallinnuksesta

- Piirtämällä kuvaajia paljon on mahdollista löytää mahdollisia virhelähteitä, tehdä tarkempia analyysejä ja ymmärtää paremmin mallin kokonaisvasteita
 - On selvää, että mitä enemmän kuvaajia piirretään, sen hitaammaksi simulointi muuttuu
- On myös huomioitava mikä on kuvaajien tallennusväli, joka on, tai voi olla eri, kuin simuloinnin laskennan aika-askel
- Kuvaajien tallennusväli ei luonnollisesti voi olla pienempi kuin simuloinnin aika-askel (yhtälöryhmien aika-askel), koska tällaista tietoa/dataa ei ole piirrettäväksi
- Oletusarvoiset aika-askeleet tämän projektin simuloineissa:
 - simuloinnin aika-askel 10 us
 - kuvaajien tallennusväli 100 us
 - detailed-/averaged-mallivertailuissa averaged-mallien simuloinnin aika-askelta muutetaan välillä 10 us – 100 us
- Tämän lisäksi on huomioitava onko suureita (alipäästö)suodatettu ja kuinka paljon
 - Tämä pätee etenkin RMS-suureisiin
- Hetkellisarvosuureita ei ole (lähtökohtaisesti) syytä suodattaa jos tarkoitus on vain piirtää kuvaajat näytille
 - Joskus suodattimen helpottaa kokonaisvasteen hahmottamista
 - Tällöin kuitenkin tarkka vaste on hyvä myös mukana
- Säätöä varten hetkellisarvojenkin suodatus on tyypillistä
 - Tapauskohtaista on kannattaako, ja kuinka paljon suureita (mitä ”tyyppiä” tahansa) suodattaa

A: Saarekoituminen 2a – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

Tarkastelukokonaisuudet ja niiden perusteet:

➤ Vertaillaan vasteita, jossa saarekoitumistapahtumassa:

A – 1a ei ole viiveitä

A – 1b ei ole viiveitä, BESS:n jännitteensäätöä on hidastettu

A – 1c ei ole viiveitä, tahtigeneraattorit eivät osallistu jännitteensäätöön, mutta BESS:n säätö kuten A – 1a (nopea)

➤ Jännitteensäädön keskinäisen dynamiikan tarkastelua

A – 2a on viiveitä: BESS + PV + 2 SG

A – 2b 150 ms + 100 ms viive, BESS:n jännitteensäätöä on hidastettu

A – 2c: 150 ms + 100 ms viive : BESS + ~~PV~~ + 2 SG (ei PV:tä)

➤ Viiveiden huomioiminen on olennainen osa, koska viiveitä on aina ja viiveet poikkeuksetta heikentävät stabiiliutta ja robustisuutta

➤ Vertaillaan vasteita, kun tuotantoyksiköiden säätöpiirien parametreja on muutettu

A – 3a säätöpiirien parametrit (säätäjien vahvistus, integrointiakavakio jne.) ovat huonosti viritetty ko. käyttötilanteeseen

A – 3b muutetaan säätöpiirien parametreja simulointiajon aikana ns. lennosta

➤ Tuotantoyksiköiden lisäksi säätöpiirien toteutus ja parametrisointi vaikuttavat suoraan mikroverkon dynamiikkaan

A: Saarekoituminen 2a – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

- Muuten sama saarekoitumistilanne, kuin "A – 1a", mutta nyt saarekoitumisen yhteydessä on otettu mukaan viiveitä
 - Katkaisijan avausviive on 150 ms siitä, kun PCC-jännite on laskenut alle 0.85 p.u.:n
 - Jännite mikroverkossa laskee selkeästi alle 0.85 p.u.:n → jännite ehtii romahtamaan lähellä nollaa
 - Tiedonsiirtoviive katkaisijan avautumisen jälkeen on 100 ms eli ennen, kuin BESS:n moodi vaihtuu grid-feeding → grid-supporting
 - Kokonaisviive vian alkamisesta BESS:n säätömoodin vaihtoon on 250 ms
 - On huomattava, että tahtigeneraattorit ovat jo automaattisesti "grid-forming"^{**} -moodissa, koska roottorin ja staattorin väliset sähkömagneettiset vuorovaikutukset luovat verkon ns. automaattisesti.
 - ^{**}grid-forming, -feeding ja -supporting ovatkin lähinnä tehoelektroniikkaliitäntäisiä yksiköitä varten muodostettu termistö – tahtikoneiden osalta vastaavia termejä ei (ainakaan samassa määrin) käytetä. On lähinnä tahtigeneraattoreita, jotka toimivat (joita ajetaan):
 1. vakiomomentilla tai...
 2. ...jotka osallistuvat taajuudensäätöön
- Verrattuna tilanteeseen, jossa tahtigeneraattoreita ei olisi, niin tässä BESS:n viive (100 ms) toimintatilan muutoksessa ei todennäköisesti ole kovin merkittävä
 - Myöhemmin B-osiossa tehdään vertailuja muuten samanlaiseen tilanteeseen sillä erotuksella, että tahtigeneraattoreita ei ole mikroverkossa

A: Saarekoituminen 2a – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

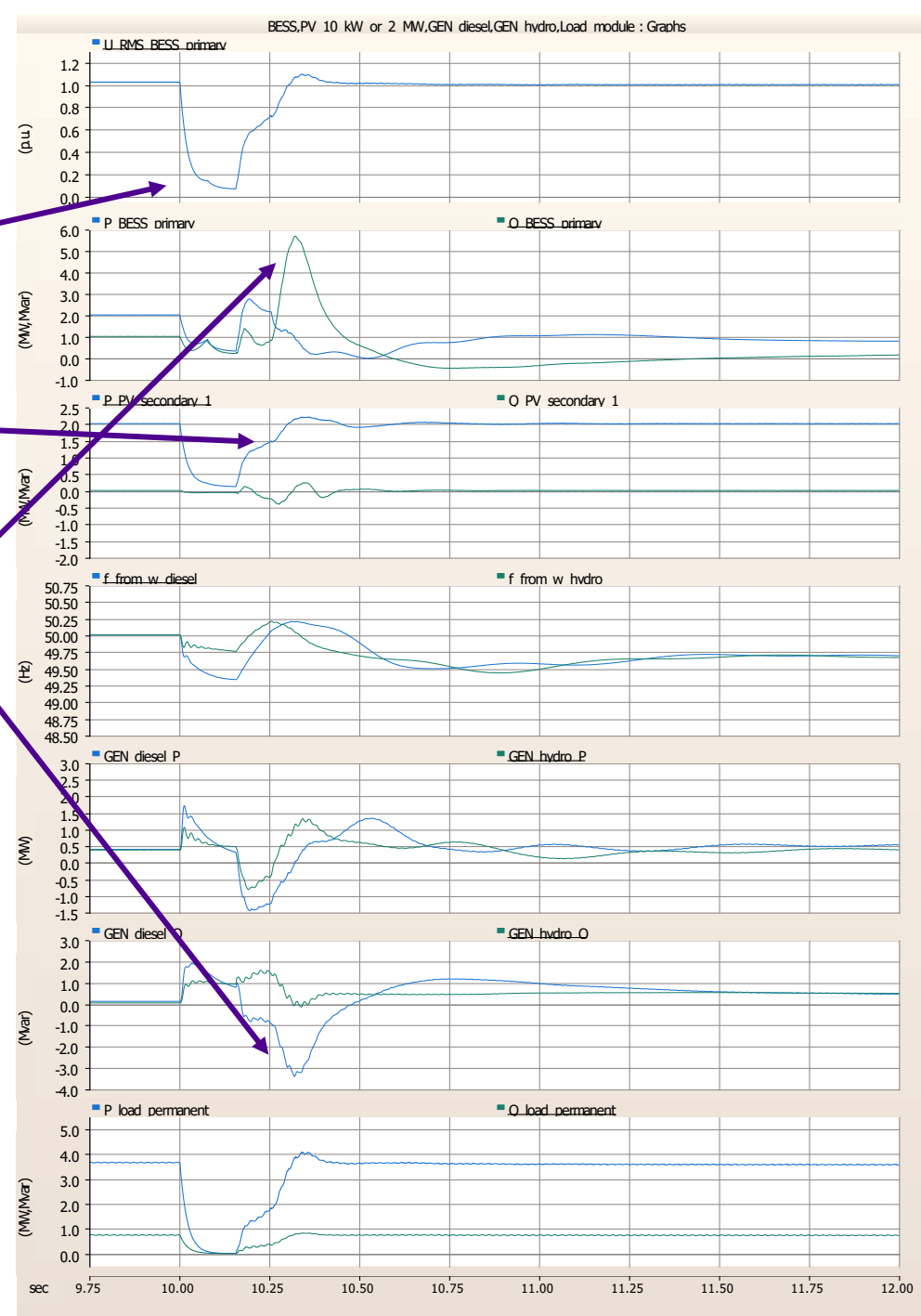
Verrattuna edelliseen skenaarioon, vain kohdissa 6 ja 7 on eroja, joten vain nämä kohdat on nostettu esille.

6. 150 millisekunnin viive katkaisijan avautumisessa siitä, kun PCC:n RMS-jännite on alle 0.85 p.u.
 - Saarekoituminen tapahtuu siis 150 millisekuntia myöhemmin verrattuna edelliseen skenaarioon

7. PCC-katkaisijan avautumisen jälkeen BESS ei siirry heti grid-feeding –moodista säätämään verkon taajuutta ja jännitettä, vaan tässä muutoksessa on 100 ms viive
 - Voi ajatella, että sekundäärisäädössä on em. 100 ms:n viive
 - Kokonaisviive vian alkamisesta BESS:n säätömoodin vaihtoon on 250 ms
 - Tämän 250 ms:n aikana BESS jatkaa edellisessä moodissa eli syöttää verkkoon 2.5 MW ja 1.0 Mvar
 - Tai ainakin pyrkii syöttämään – verkon jännitteet ja siitä, miten BESS pystyy pysymään vikatilanteen aikana verkon tahdissa, määräävät suurimmaksi osin kuinka hyvin ulostulotehot seuraavat ohjearvotehoja

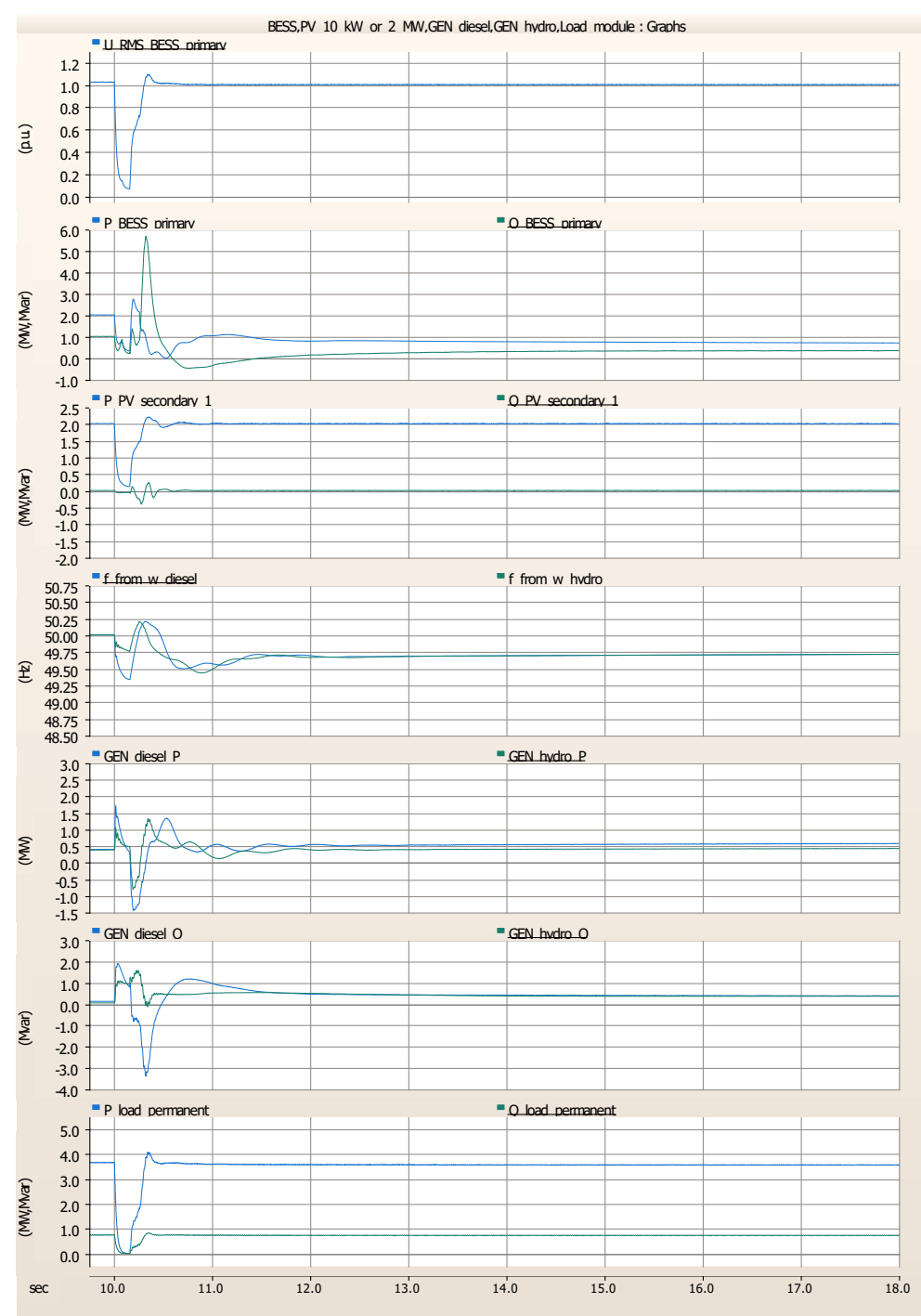
Tuloksia A – 2a:

- Viive syventää jännitekuoppaa
- PV pystyy varsin nopeasti toipumaan viasta
 - 250 ms:ia viasta sekä pätö- että loisteho ovat jo lähes täysin tasaantuneet
- BESS:n ja tahtigeneraattoreiden kesken tapahtuvassa jännitteensäädössä on huomattavaa loistehonsiirtoa (reactive power circulation?)
 - Hidastamalla BESS:n jännitteensäätöä tai vaihtamalla BESS vakiloistehonsäätöön voisi parantaa tilannetta
 - Tällöin tosin vaihtosuuntaajan nopeita tehovasteita ei pystyttäisi täysin hyödyntämään
 - Hyvä esimerkki ”yllättävistä vuorovaikutuksista”



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← Tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudesta johdettu ”taajuus”
- ← Tahtigeneraattoreiden pätötehot
- ← Tahtigeneraattoreiden loistehot
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

Tuloksia A – 2a:



← BESS:n ensiöjännite

← BESS:n pätö- ja loisteho

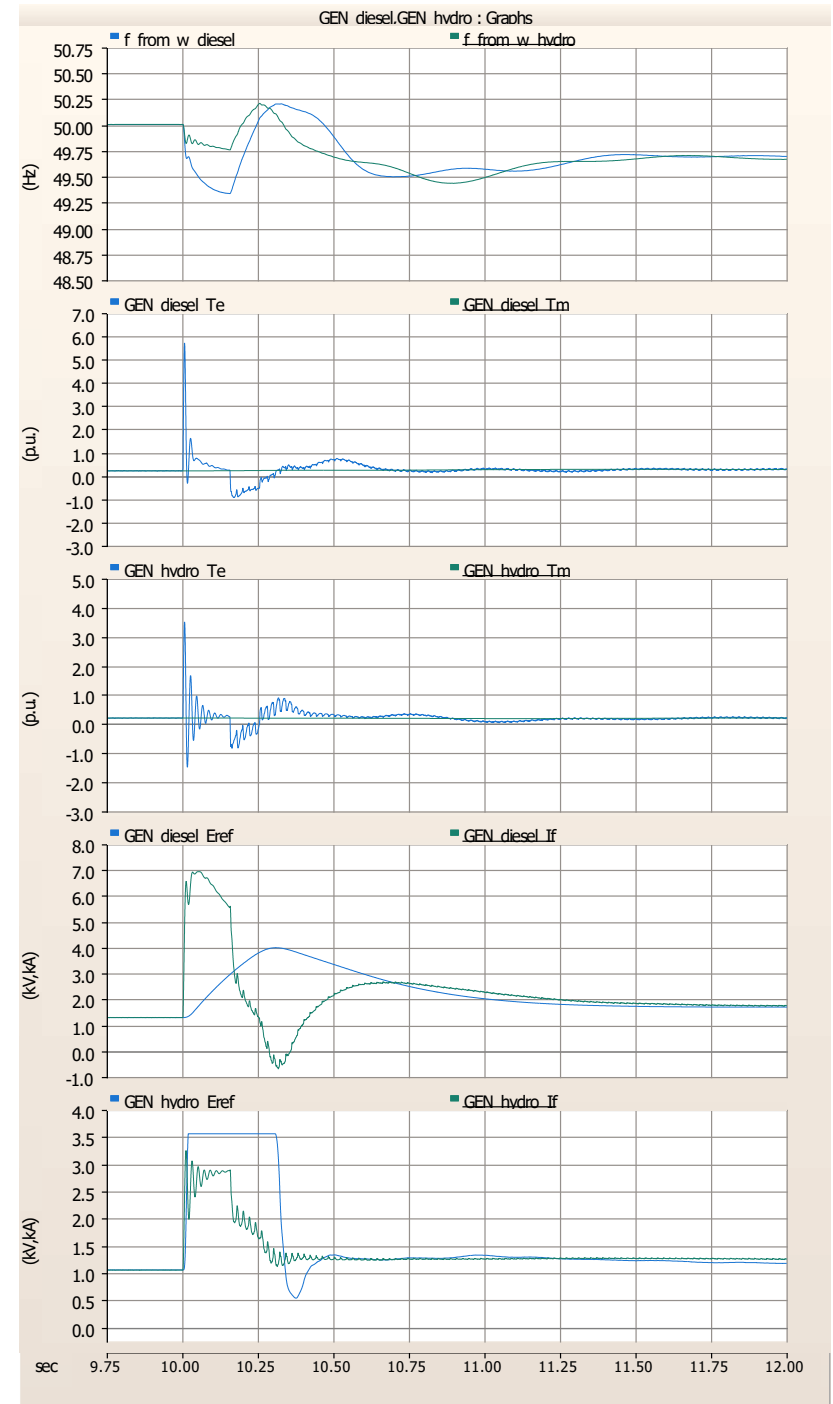
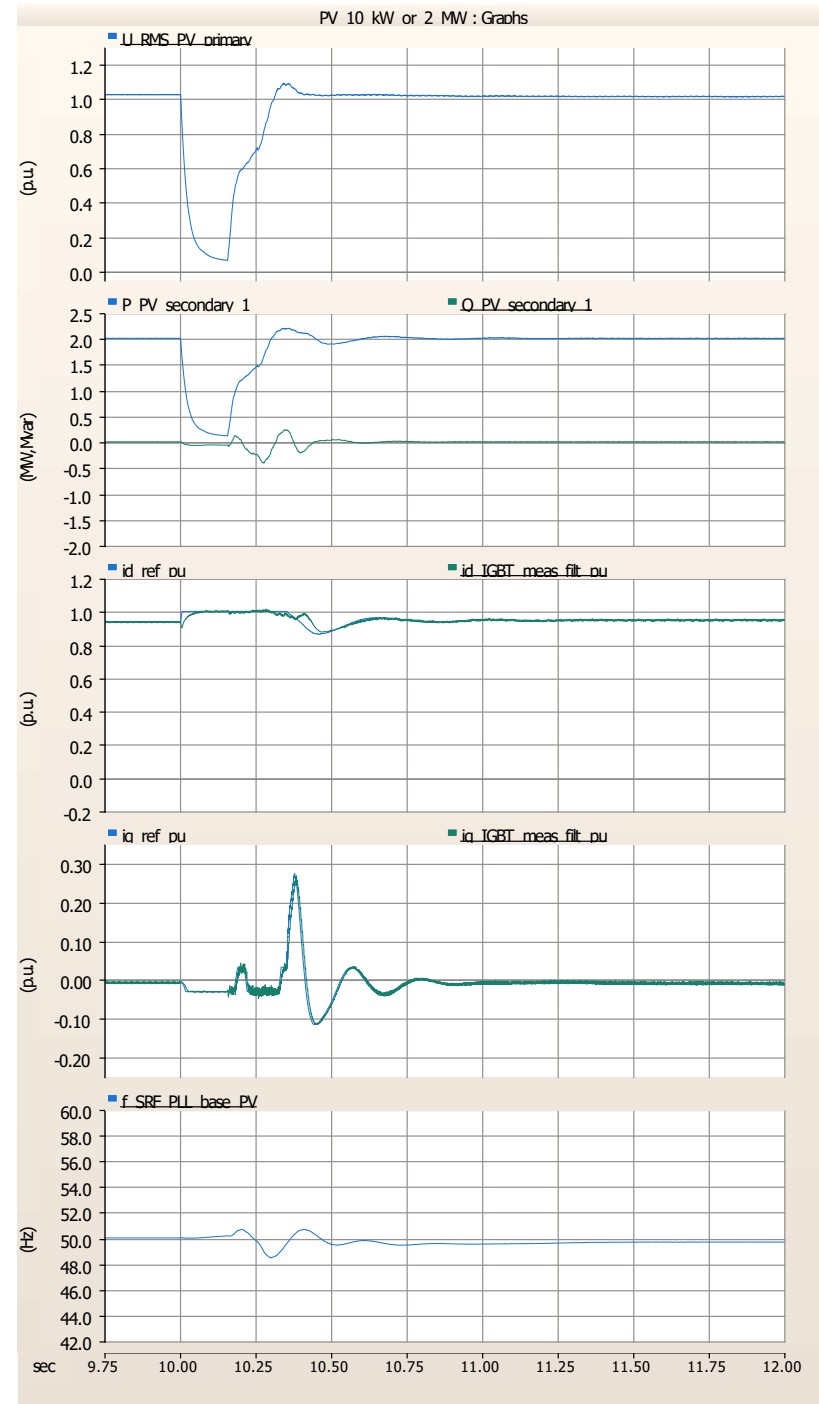
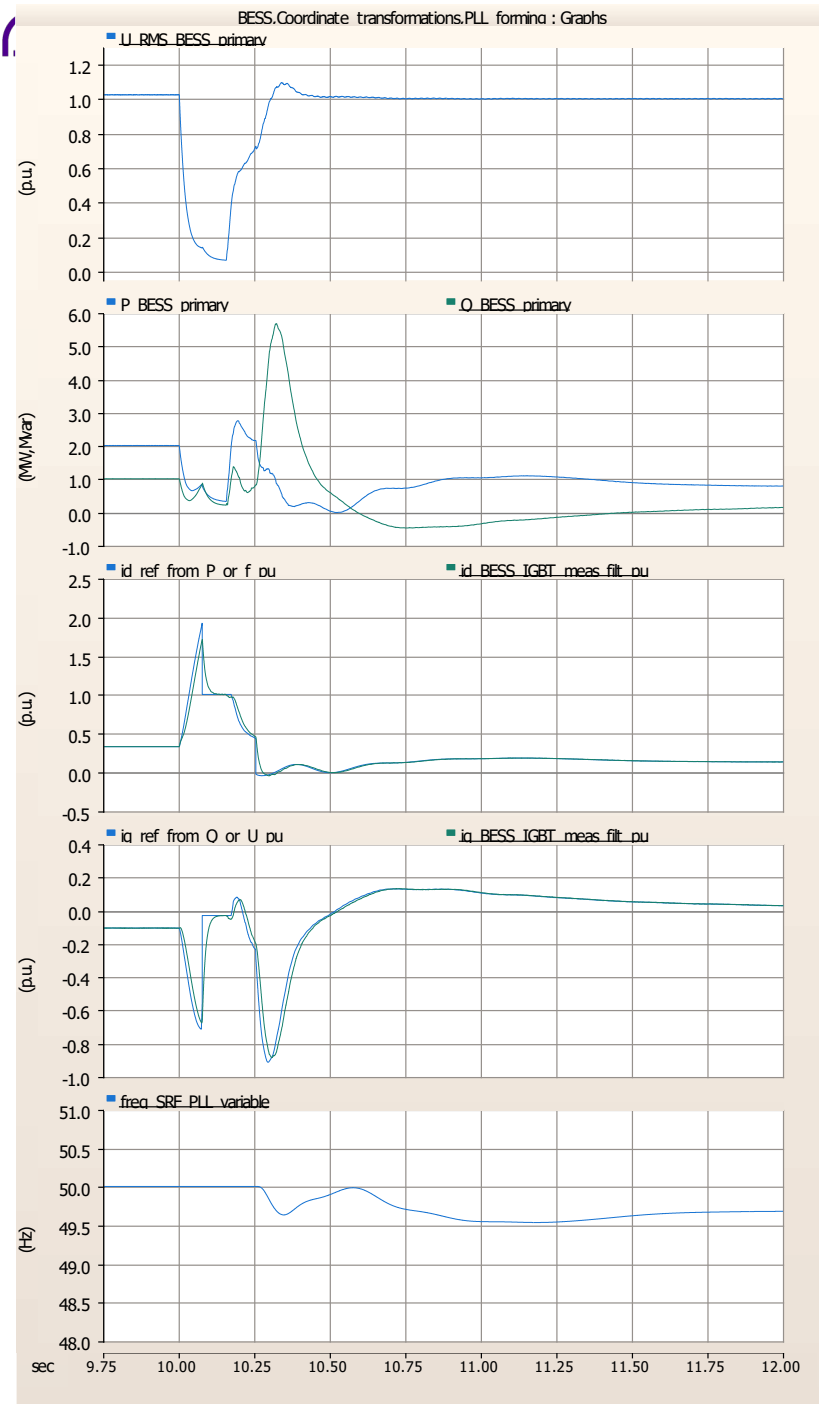
← PV:n pätö- ja loisteho

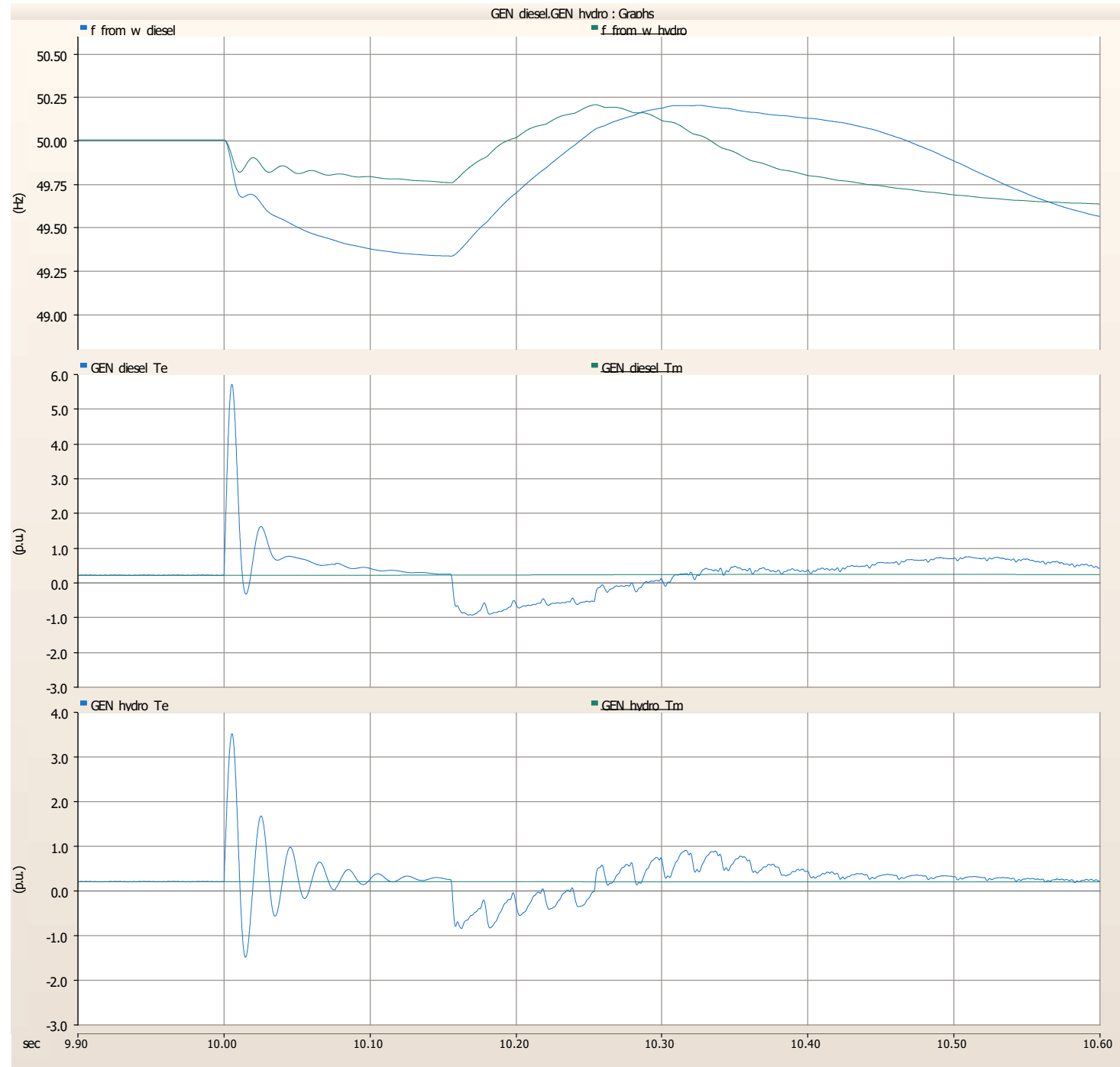
← Tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudesta johdettu "taajuus"

← Tahtigeneraattoreiden pätötehot

← Tahtigeneraattoreiden loistehot

← Kuormituksen pätö- ja loistehot





A: Saarekoituminen 2b – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

Tarkastelukokonaisuudet ja niiden perusteet:

➤ Vertaillaan vasteita, jossa saarekoitumistapahtumassa:

A – 1a ei ole viiveitä

A – 1b ei ole viiveitä, BESS:n jännitteensäätöä on hidastettu

A – 1c ei ole viiveitä, tahtigeneraattorit eivät osallistu jännitteensäätöön, mutta BESS:n säätö kuten A – 1a (nopea)

➤ Jännitteensäädön keskinäisen dynamiikan tarkastelua

A – 2a on viiveitä: BESS + PV + 2 SG

A – 2b 150 ms + 100 ms viive, BESS:n jännitteensäätöä on hidastettu

A – 2c: 150 ms + 100 ms viive : BESS + ~~PV~~ + 2 SG (ei PV:tä)

➤ Viiveiden huomioiminen on olennainen osa, koska viiveitä on aina ja viiveet poikkeuksetta heikentävät stabiiliutta ja robustisuutta

➤ Vertaillaan vasteita, kun tuotantoyksiköiden säätöpiirien parametreja on muutettu

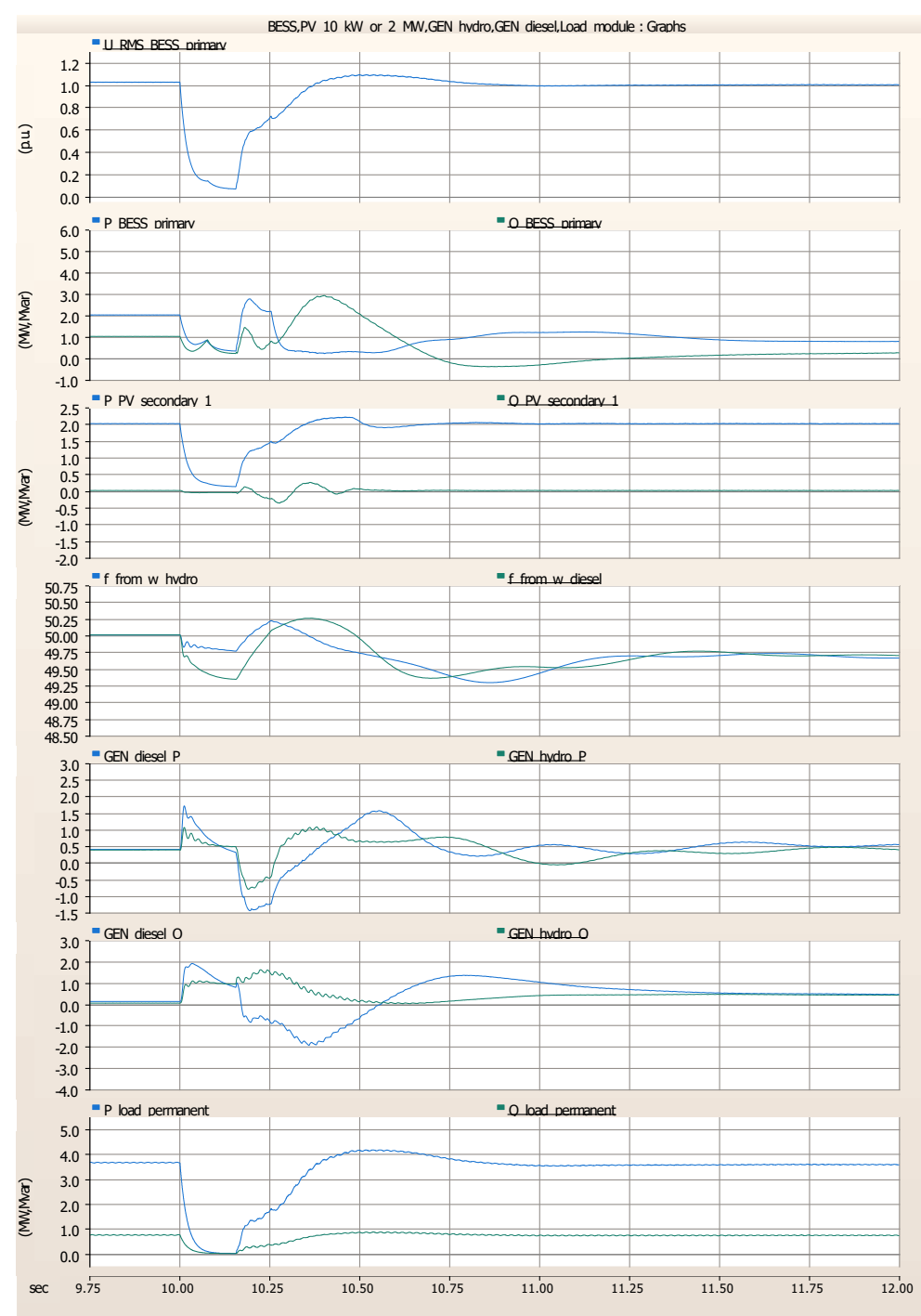
A – 3a säätöpiirien parametrit (säätäjien vahvistus, integrointiakavakio jne.) ovat huonosti viritetty ko. käyttötilanteeseen

A – 3b muutetaan säätöpiirien parametreja simulointiajon aikana ns. lennosta

➤ Tuotantoyksiköiden lisäksi säätöpiirien toteutus ja parametrisointi vaikuttavat suoraan mikroverkon dynamiikkaan

Tuloksia A – 2b:

- Tässä vertailuna edelliseen skenaarioon (A – 2a), jossa BESS:n jännitteensäätöä on tarkoituksella hidastettu
- Sääto toimii p.u.-tasossa (skaalattuna näin), joten myös vahvistukset ja integraatiokavakiot ovat pu-arvoina
- Vahvistusta on pudotettu molemmissa jännitteensäätöpiirin osissa 50 %
- Integraattorin aikavakiota on kasvatettu 50 %



A: Saarekoituminen 2a ja 2b – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

Johtopäätöksiä

- Jakeluverkkoyhtiön on tärkeä tietää eri tuotantoyksiköiden viiveet toimintatilojen muutoksissa
- Mitkä toimintatilojen muutokset ovat mahdollisia eri käyttötilanteissa
 - Pätee molemmissa tilanteissa eli silloin, kun mikroverkkoa ajetaan muun verkon rinnalla ja saarekekäytössä
- Onko joku toimintatilan muutos lukittuna, jos esim. jännite on liian pitkään ollut alle tietyn p.u.-arvon?
- Pystyykö viiveisiin vaikuttamaan?
- Eri tuotantoyksiköiden "high-level" –koordinaation tunteminen on tärkeää, vaikka tarkkoja säätöpiirejä ja niiden parametreja ei olisikaan tiedossa
- Yleisemmin tuotantoyksikön hankintavaiheessa on syytä pyytää käyttöönottestien tulokset ja muut mahdolliset mittaukset, jotka on tehty esim. vikatilanteissa
 - Mittaustuloksista on kunnolla hyötyä vasta sitten, kun on tiedossa miten ja missä mittaus on tehty ja mitkä ovat suojauspiirien raja-arvot (edes jollakin tarkkuudella)

A: Saarekoituminen 2c – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

Tarkastelukokonaisuudet ja niiden perusteet:

➤ Vertaillaan vasteita, jossa saarekoitumistapahtumassa:

A – 1a ei ole viiveitä

A – 1b ei ole viiveitä, BESS:n jännitteensäätöä on hidastettu

A – 1c ei ole viiveitä, tahtigeneraattorit eivät osallistu jännitteensäätöön, mutta BESS:n säätö kuten A – 1a (nopea)

➤ Jännitteensäädön keskinäisen dynamiikan tarkastelua

A – 2a on viiveitä: BESS + PV + 2 SG

A – 2b 150 ms + 100 ms viive, BESS:n jännitteensäätöä on hidastettu

A – 2c: 150 ms + 100 ms viive : BESS + ~~PV~~ + 2 SG (ei PV:tä)

➤ Viiveiden huomioiminen on olennainen osa, koska viiveitä on aina ja viiveet poikkeuksetta heikentävät stabiiliutta ja robustisuutta

➤ Vertaillaan vasteita, kun tuotantoyksiköiden säätöpiirien parametreja on muutettu

A – 3a säätöpiirien parametrit (säätäjien vahvistus, integrointiakavakio jne.) ovat huonosti viritetty ko. käyttötilanteeseen

A – 3b muutetaan säätöpiirien parametreja simulointiajon aikana ns. lennosta

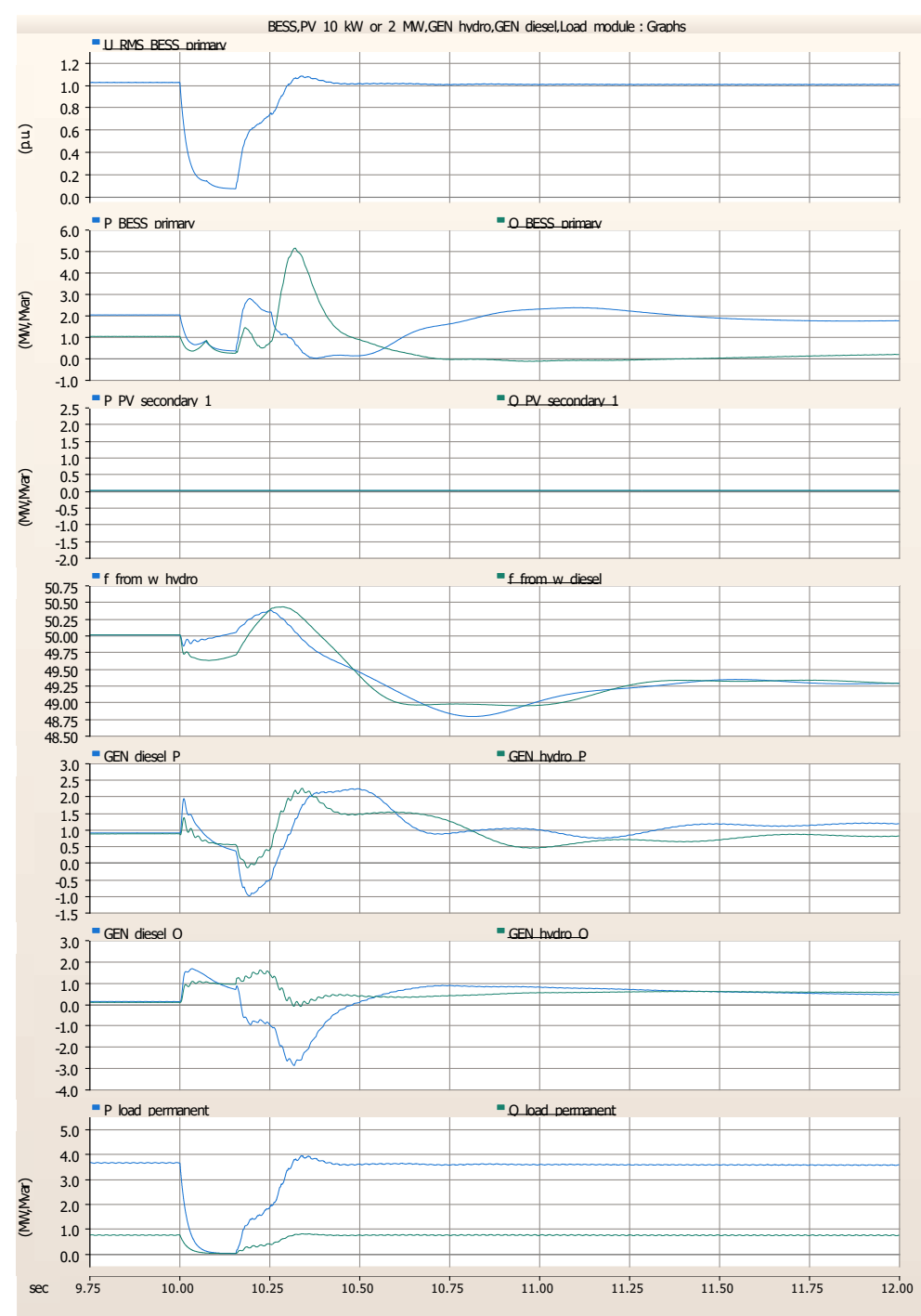
➤ Tuotantoyksiköiden lisäksi säätöpiirien toteutus ja parametrisointi vaikuttavat suoraan mikroverkon dynamiikkaan

A: Saarekoituminen 2c – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

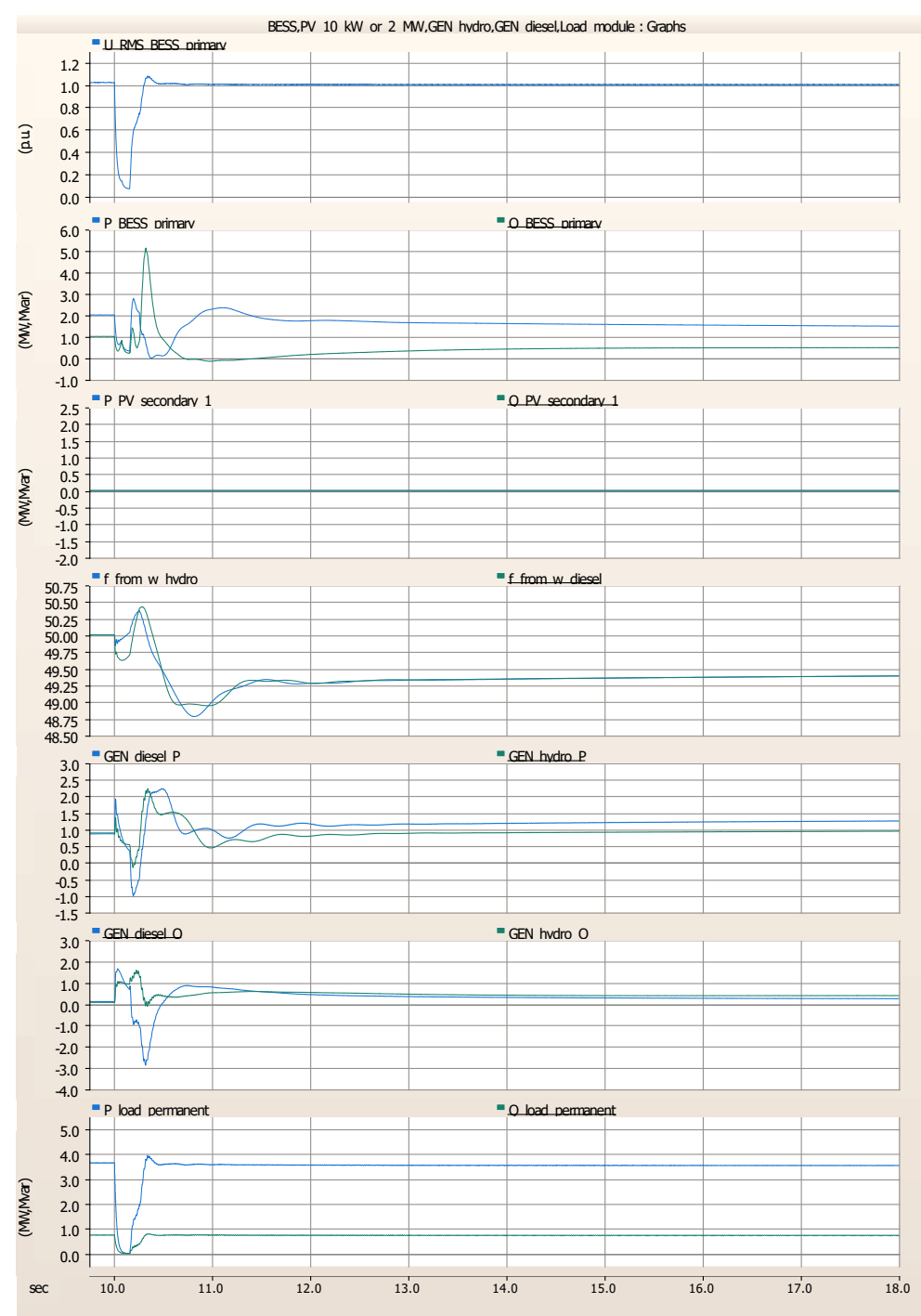
- Muuten sama, kuin "A: Saarekoituminen 2a", mutta:
 - Nyt vain BESS ja kaksi tahtigeneraattoria
 - Ei PV:tä
 - 2a-kohdassa tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudet laskivat vian ja BESS:n toimintatilamoodin vaihtoviiveen ajan
 - Kun tahtigeneraattoreita ajettiin taustaverkon vian aikana siten, ettei tehoelektroniikkayksiköitä ollut verkossa, niin koneiden toiminta oli odotettua
 - Pyörimisnopeudet kasvoivat vian aikana
 - Tarkoitus on selvittää muuttuuko tilanne, kun toinen tehoelektroniikkayksiköistä on irti verkosta

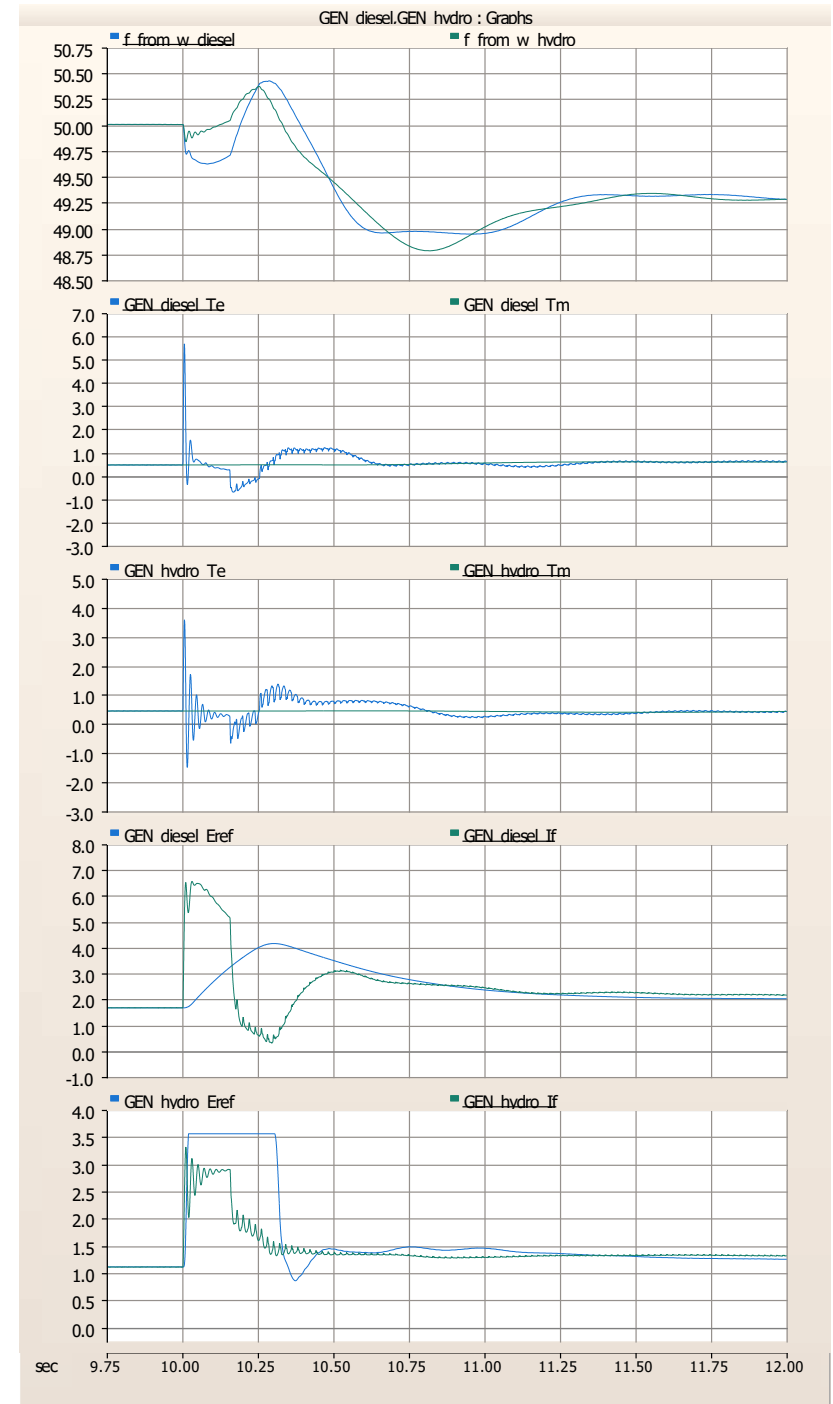
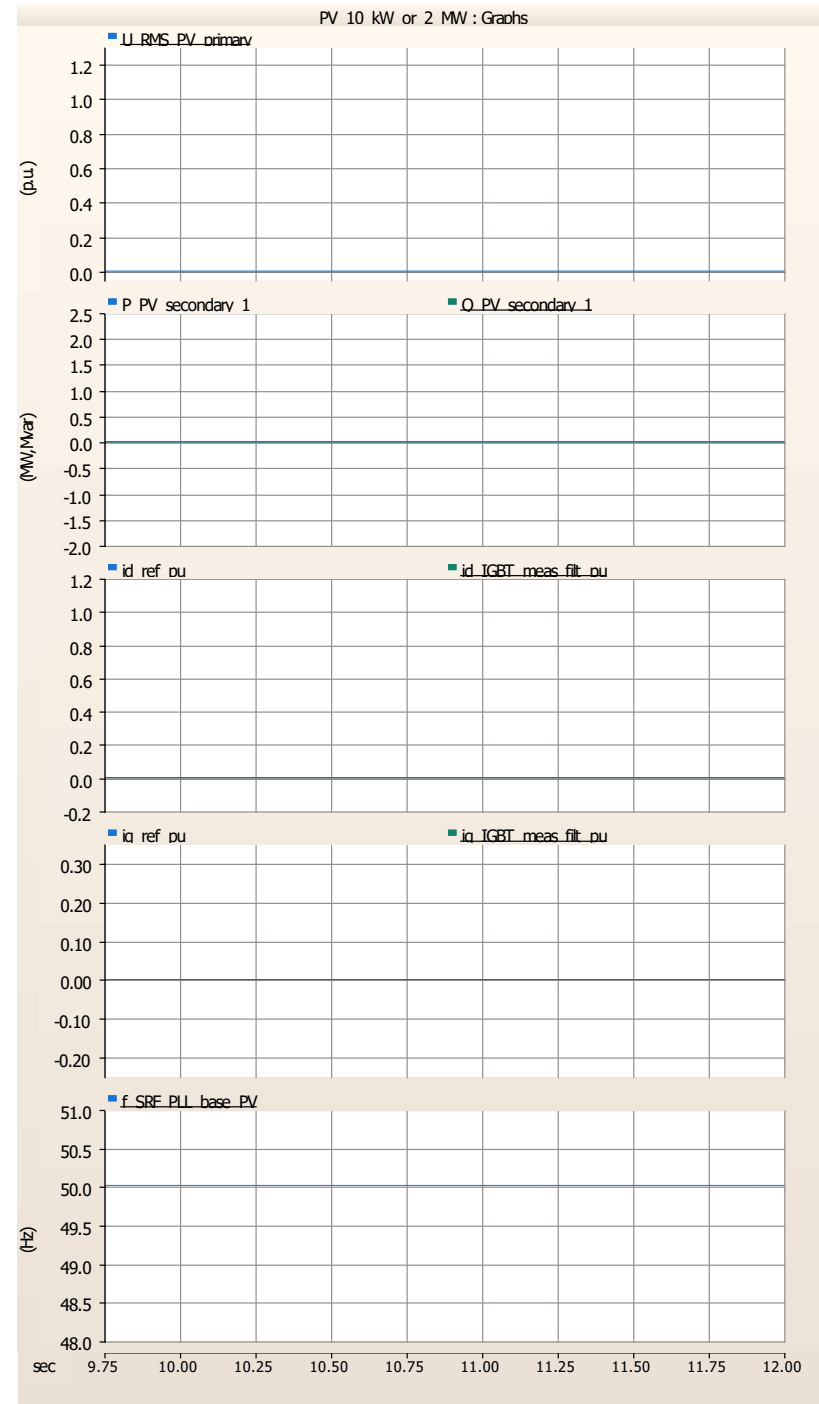
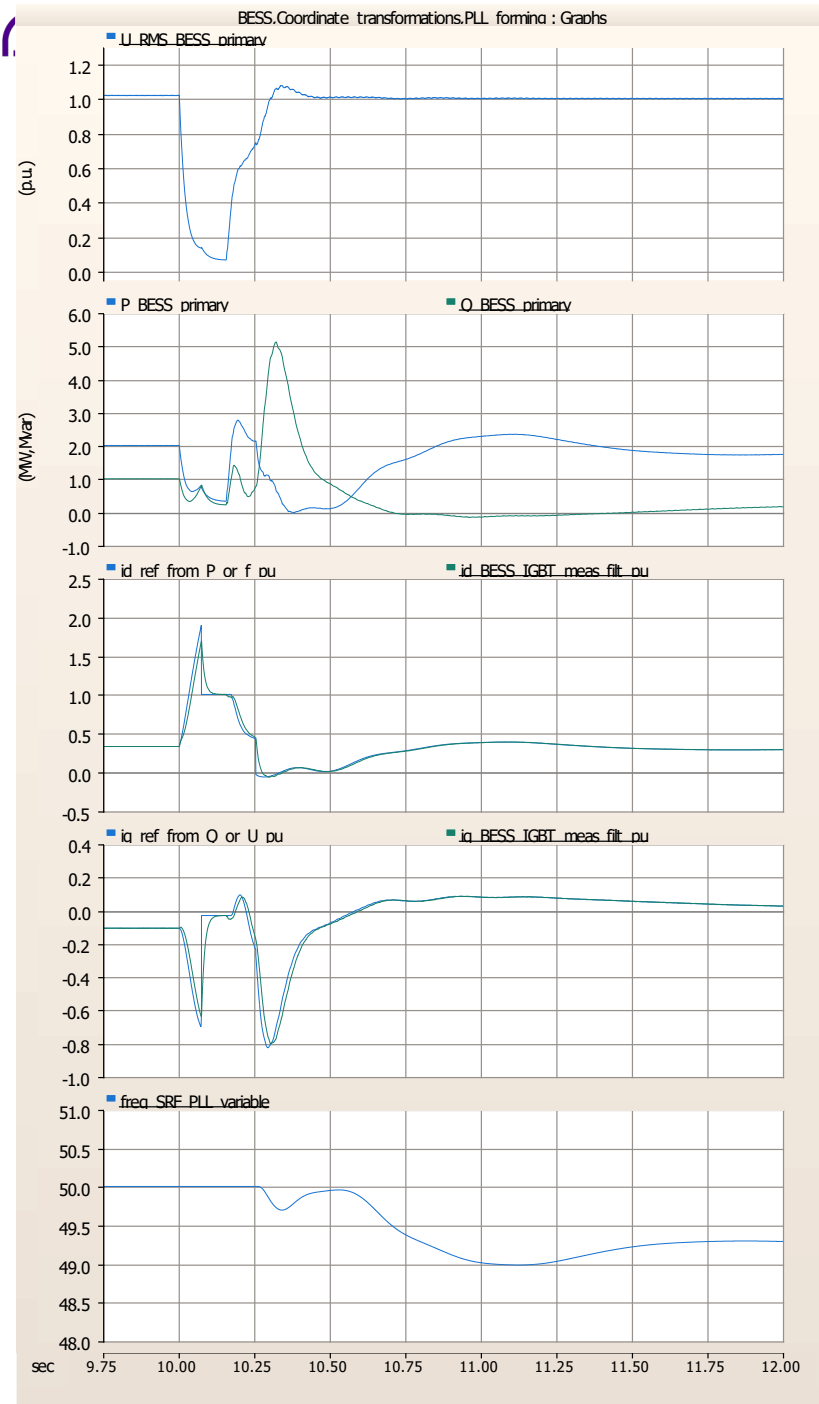
Tuloksia A – 2c:

- Saarekoitumisen jälkeen, mutta kuitenkin kokonaisviiveen aikana, pyörimisnopeudet kääntyvät nyt nousuun
- Suurin syy on, että tehonjaon ollessa erilainen (ei PV:tä), mekaaninen momentti on suurempi, kuin tilanteessa 2a (jonka vastaava kuva seuraavalla kalvolla)
- Sähköiset vastamomentit ovat 2a- ja 2b- kohdissa ehkä hieman yllättäen hyvin samankaltaiset



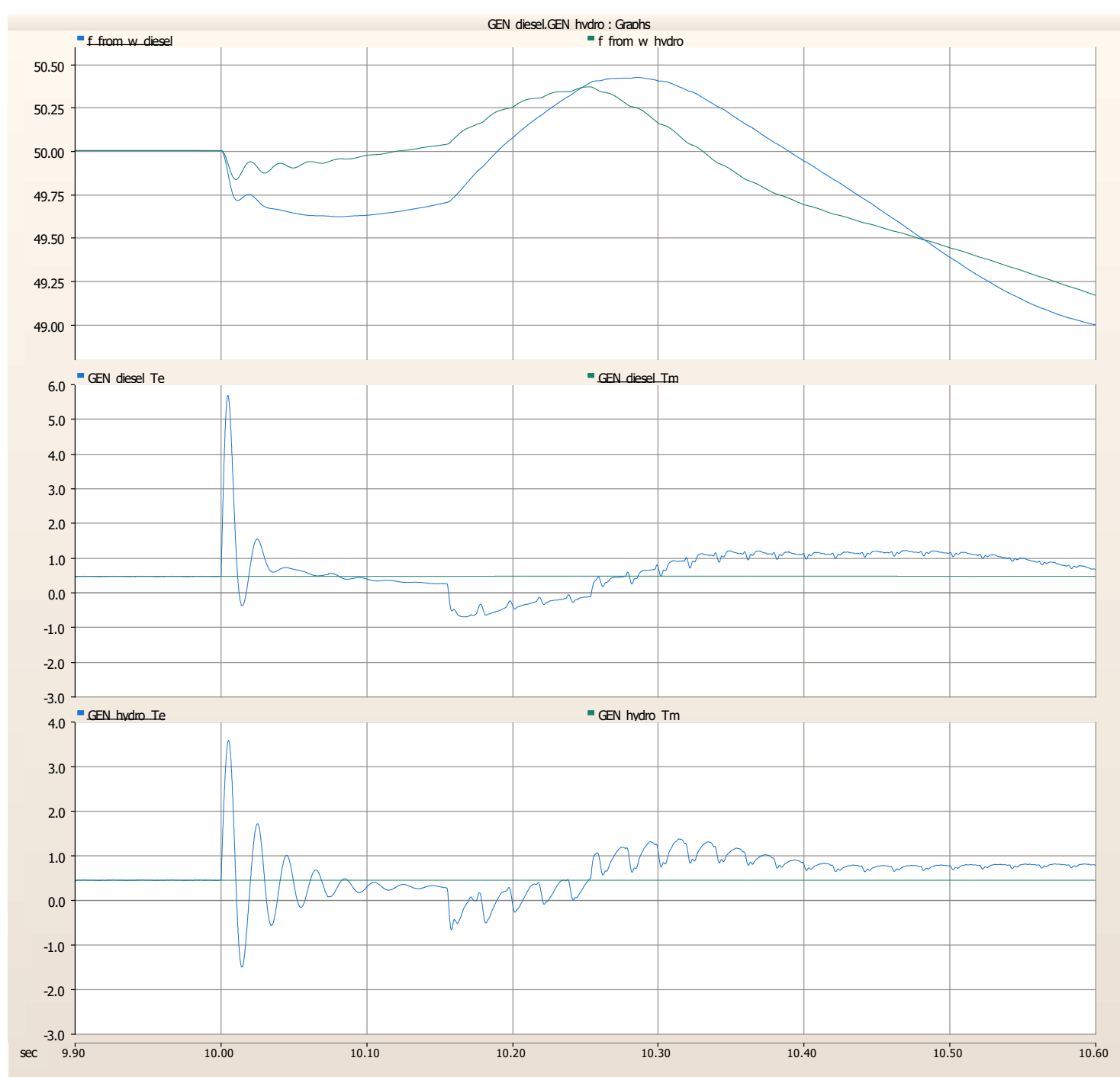
Tuloksia A – 2c:



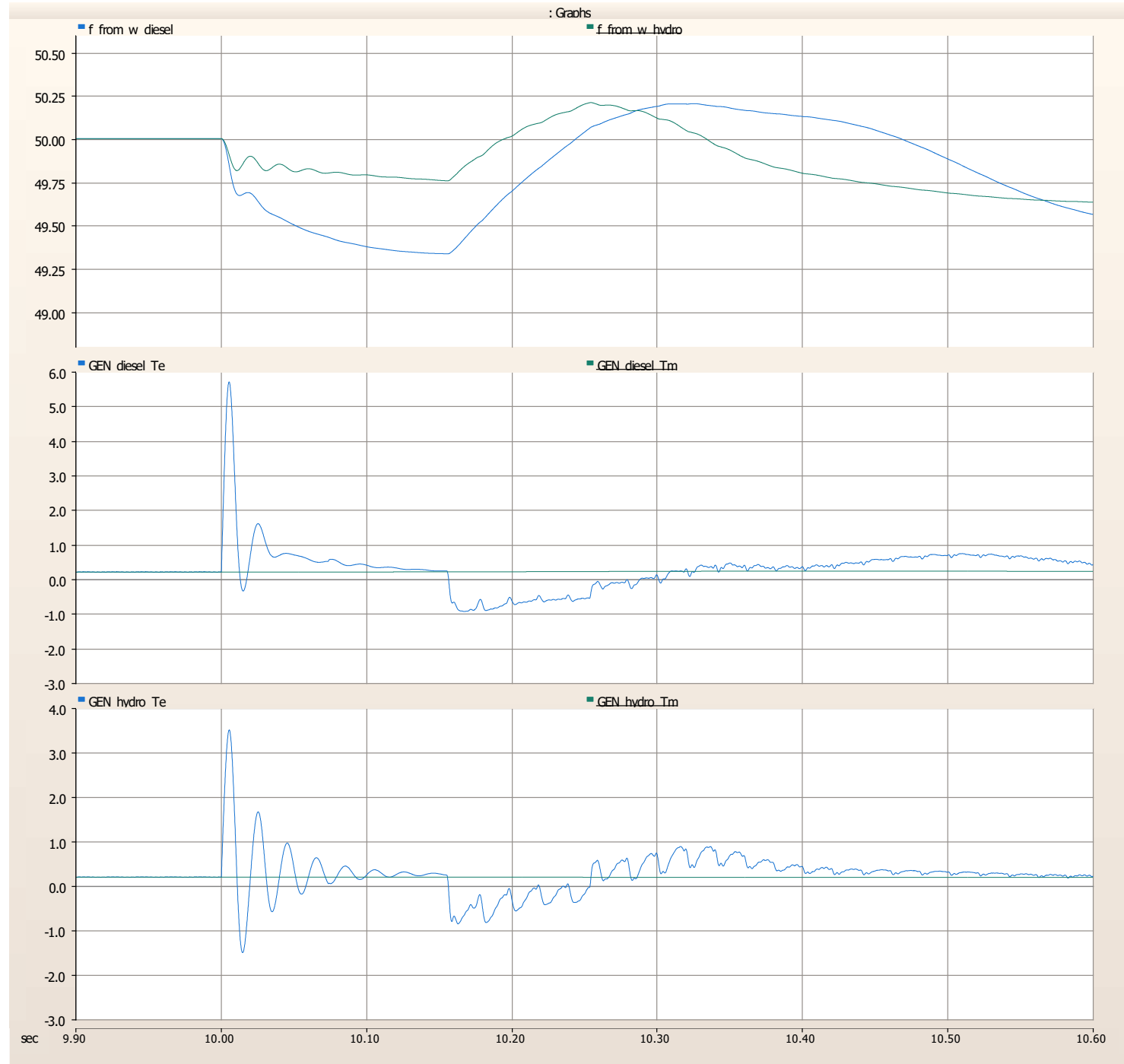


Tuloksia A – 2c:

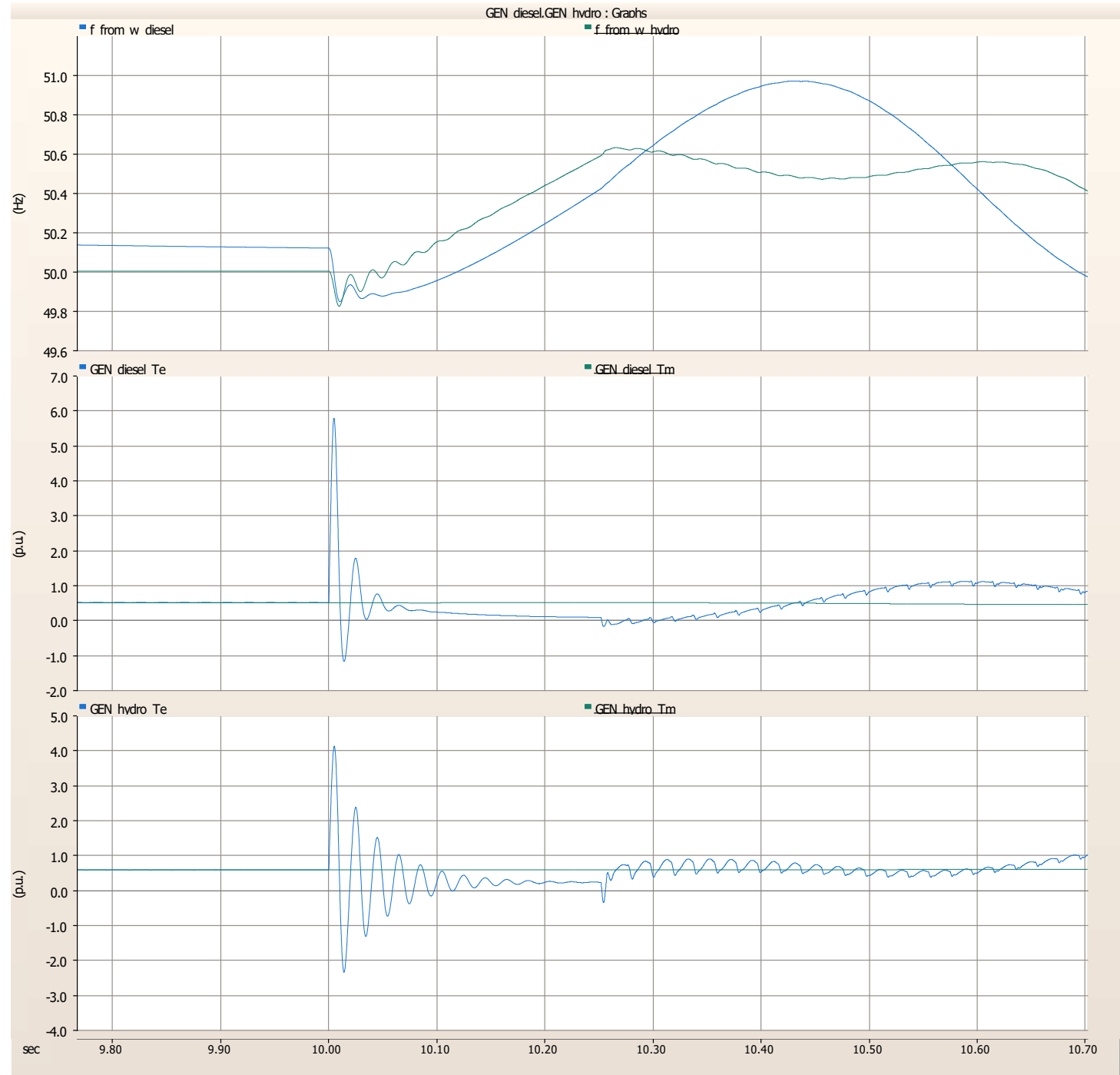
- Pyörimisnopeudet kääntyvät nyt nousuun saarekoitumisessa sen jälkeen, kun katkaisija on avautunut
- Suurin syy pyörimisnopeuksien nousuun on se, että tehonjaon ollessa erilainen (ei PV:tä), mekaaninen momentti (alustus) on tahtigeneraattoreilla suurempi, kuin tilanteessa 2a (jonka vastaava kuva seuraavalla kalvolla)
- Sähköiset vastamomentit ovat 2a- ja 2b-kohdissa ehkä hieman yllättäen hyvin samankaltaiset



- Tässä vielä aiemmin näytetyt 2a-tarkastelun tulokset vertailua helpottamaan



- Tässä vian aikaiset ja saarekoitumisen alun vasteet, kun mikroverkossa on vain tahtikoneita (ei BESS:iä eikä PV:tä) ja vika tapahtuu tahtikoneiden lähellä
- Loogiset pyörimisnopeus- ja vääntömomenttivasteet
- Tahtikoneilla aina ensimmäisen roottorin puolikierroksen aikana sähköinen vastamomentti kasvaa, koska 3-vaiheisen vikavirran DC-komponentin muodostama magneettikenttä pysyy paikoillaan roottorin jatkaessa pyörimistä
- Vastustaa roottorin pyörimistä voimakkaasti puolen kierroksen ajan
- Jos jäännösjännite on nolla (generaattorin navoissa), niin keskimääräinen sähköinen vastamomentti on nolla
- Pyörimisnopeus kasvaa
- Ko. tarkasteluissa koneiden napajännite n. 0.1 p.u.



A: Saarekoituminen 2a ja 2c – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

Johtopäätöksiä

- Tarkastelut tehty lähinnä varmistamaan, että malli toimii ”oikein”
- Suurin syy pyörimisnopeuksien nousuun on se, että tehonjaon ollessa erilainen (ei PV:tä), mekaaninen momentti on tahtigeneraattoreilla suurempi, kuin tilanteessa 2a

A: Saarekoituminen 3a – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

Tarkastelukokonaisuudet ja niiden perusteet:

➤ Vertaillaan vasteita, jossa saarekoitumistapahtumassa:

A – 1a ei ole viiveitä

A – 1b ei ole viiveitä, BESS:n jännitteensäätöä on hidastettu

A – 1c ei ole viiveitä, tahtigeneraattorit eivät osallistu jännitteensäätöön, mutta BESS:n säätö kuten A – 1a (nopea)

➤ Jännitteensäädön keskinäisen dynamiikan tarkastelua

A – 2a on viiveitä: BESS + PV + 2 SG

A – 2b 150 ms + 100 ms viive, BESS:n jännitteensäätöä on hidastettu

A – 2c: 150 ms + 100 ms viive : BESS + ~~PV~~ + 2 SG (ei PV:tä)

➤ Viiveiden huomioiminen on olennainen osa, koska viiveitä on aina ja viiveet poikkeuksetta heikentävät stabiiliutta ja robustisuutta

➤ Vertaillaan vasteita, kun tuotantoyksiköiden säätöpiirien parametreja on muutettu

A – 3a säätöpiirien parametrit (säätäjien vahvistus, integrointiaikavakio jne.) ovat huonosti viritetty ko. käyttötilanteeseen

A – 3b muutetaan säätöpiirien parametreja simulointiajon aikana ns. lennosta

➤ Tuotantoyksiköiden lisäksi säätöpiirien toteutus ja parametrisointi vaikuttavat suoraan mikroverkon dynamiikkaan

A: Saarekoituminen 3a – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

Verrattuna skenaarioon 1a, verkon tapahtumissa ei ole eroja → saarekoituminen tapahtuu samoin, kuin skenaariossa 1a

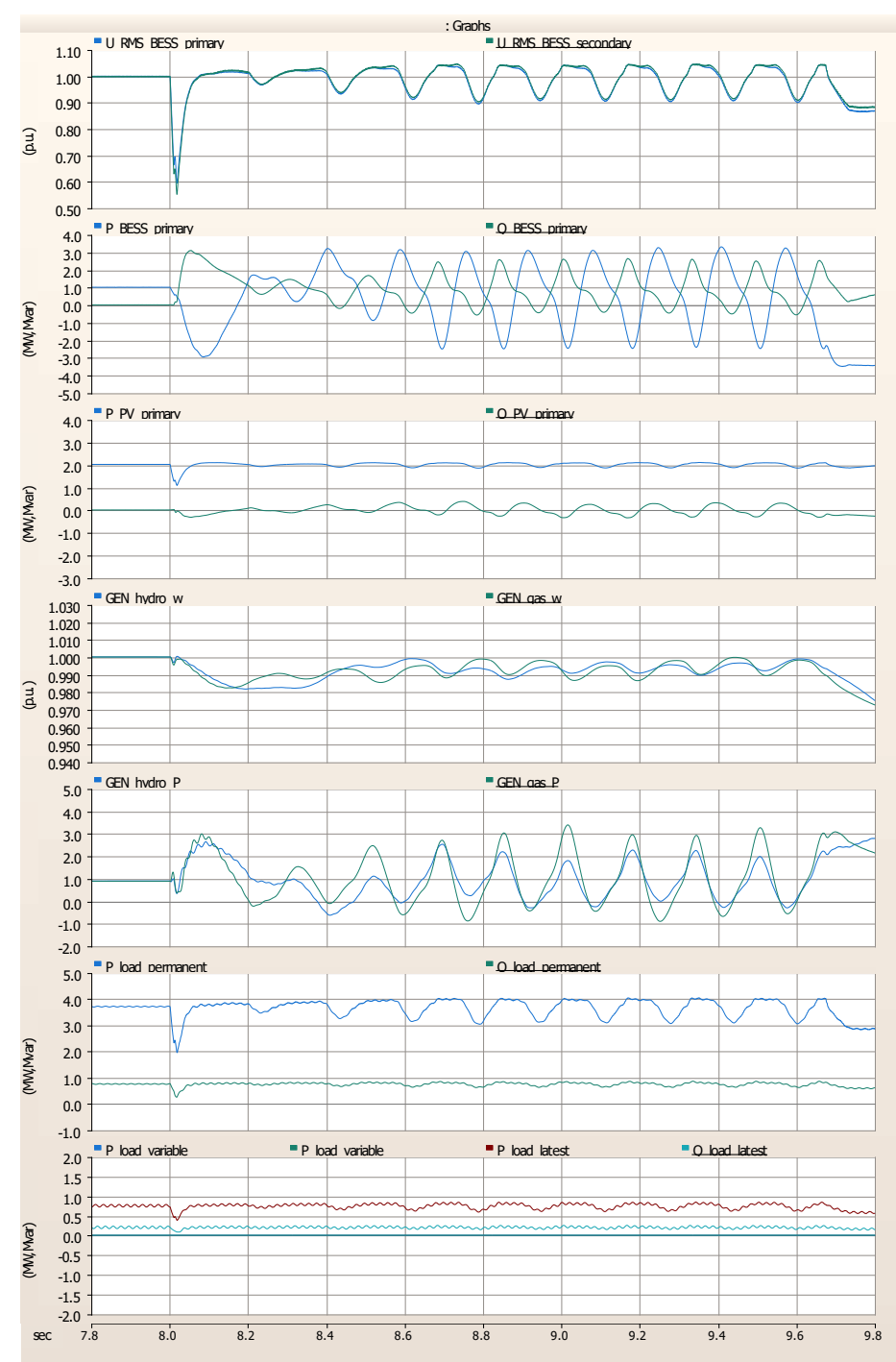
- Ei viiveitä, samat muutokset

Erot tulevat seuraavista:

- BESS:n jännite- ja virtasäätöpiirien vahvistuksia ja integrointiaikavakioita on muutettu stabiiliuden kannalta huonompaan suuntaan
- Tässä käyttötilanteessa tarkoittaa, että erityisesti BESS:n säätö on yleisesti liian nopea
 - Lisäksi: BESS:n DC-jännite hieman liian pieni
 - Droop-kertoimet suhteellisen pieniä, eli tuotantoyksiköt reagoivat herkästi jännite- ja taajuusmuutoksiin
 - Muidenkin tuotantoyksiköiden säätäjien vasteet ”eivät ole optimaalisia”

Tuloksia A – 3a:

- Parametrimuutosten ei tarvitse välttämättä olla isoja, jotta stabiiliuden raja ylitetään
- Nyt kaikki tehdyt muutokset olivat tarkoituksella huonompaan suuntaan
 - Siten kuitenkin, että yksittäinen muutos ei ollut suhteellisen suuri
- Ylivirran suojaustoimintoa lukuunottamatta aktivoituneena ei ollut muita suojauksia
 - Mitkä tahansa **realistiset suojausarvot** olisivat johtaneet kuvatussa tilanteessa ainakin joidenkin, tai kaikkien, tuotantoyksiköiden irtikytkentään



← BESS:n ensiöjännite

← BESS:n pätö- ja loisteho

← PV:n pätö- ja loisteho

← Tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudesta johdettu "taajuus"

← Tahtigeneraattoreiden pätötehot

← Kuormituksen pätö- ja loistehot

A: Saarekoituminen 3b – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

Tarkastelukokonaisuudet ja niiden perusteet:

➤ Vertaillaan vasteita, jossa saarekoitumistapahtumassa:

A – 1a ei ole viiveitä

A – 1b ei ole viiveitä, BESS:n jännitteensäätöä on hidastettu

A – 1c ei ole viiveitä, tahtigeneraattorit eivät osallistu jännitteensäätöön, mutta BESS:n säätö kuten A – 1a (nopea)

➤ Jännitteensäädön keskinäisen dynamiikan tarkastelua

A – 2a on viiveitä: BESS + PV + 2 SG

A – 2b 150 ms + 100 ms viive, BESS:n jännitteensäätöä on hidastettu

A – 2c: 150 ms + 100 ms viive : BESS + ~~PV~~ + 2 SG (ei PV:tä)

➤ Viiveiden huomioiminen on olennainen osa, koska viiveitä on aina ja viiveet poikkeuksetta heikentävät stabiiliutta ja robustisuutta

➤ Vertaillaan vasteita, kun tuotantoyksiköiden säätöpiirien parametreja on muutettu

A – 3a säätöpiirien parametrit (säätäjien vahvistus, integrointiakavakio jne.) ovat huonosti viritetty ko. käyttötilanteeseen

A – 3b [muutetaan säätöpiirien parametreja simulointiajon aikana ns. lennosta](#)

➤ Tuotantoyksiköiden lisäksi säätöpiirien toteutus ja parametrisointi vaikuttavat suoraan mikroverkon dynamiikkaan

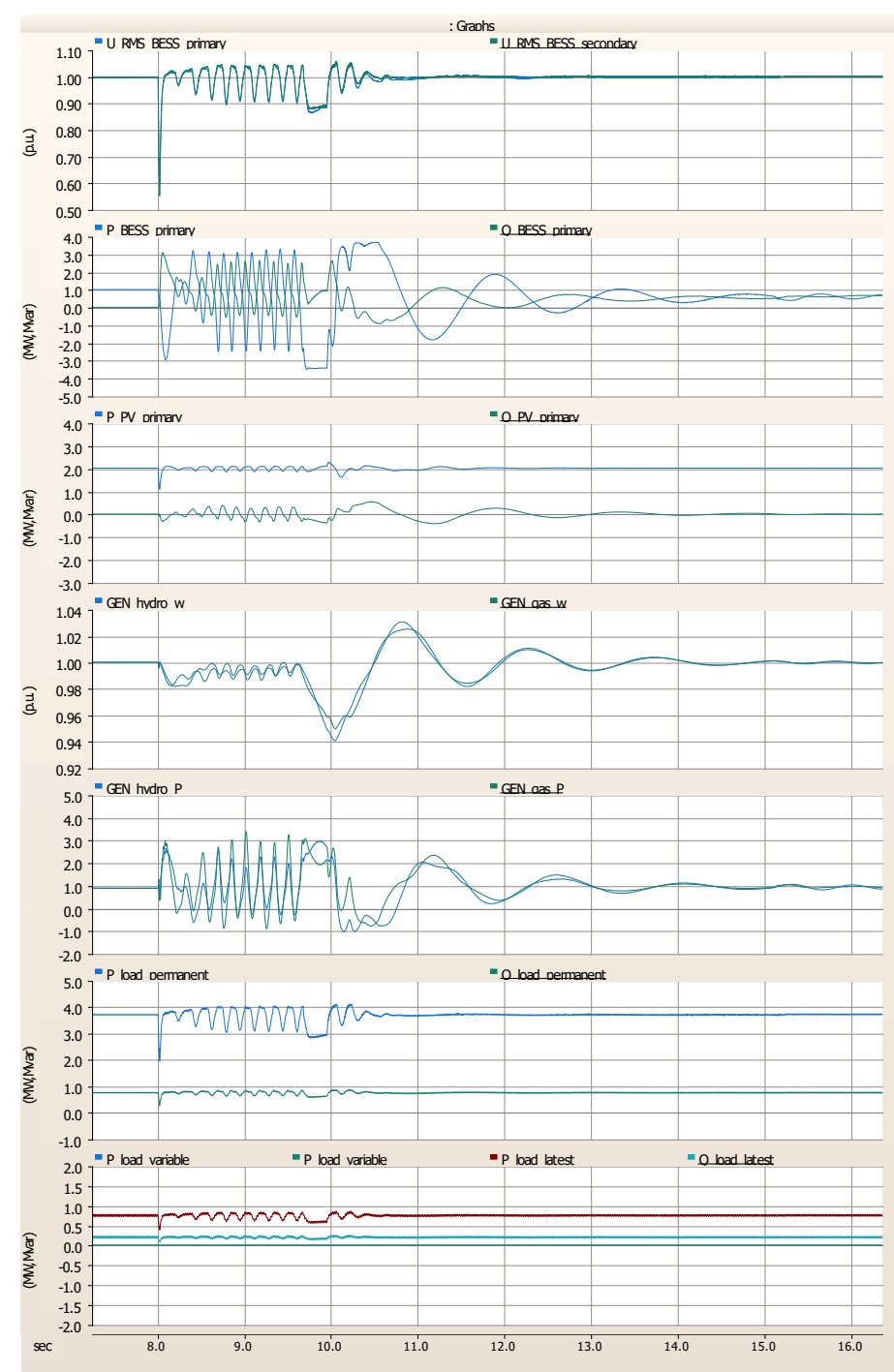
A: Saarekoituminen 3b – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

Edellisen simulointitapahtuman jatkotarkastelu

- Tehdään muutoksia ns. lennossa edellisen kalvon tilanteessa, jossa suureiden värähtely oli suurta, parempaan (eli tässä alkuperäiseen) suuntaan muun muassa seuraaviin kohtiin:
 - muutetaan säätäjien parametrejä → hidastetaan vasteita
 - kasvatetaan droop-kertoimia → tuotantoyksiköt eivät reagoi niin herkästi jännite- ja taajuusmuutoksiin
 - muutetaan modulointitekniikkaa siirtymällä sinikolmiovertailusta (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) → avaruusvektorimodulointiin (SpaceVector Pulse Width Modulation)
 - SVPWM hyödyntää paremmin DC-jännitettä

Tuloksia A – 3b:

- Aiemmalla kalvolla tulosten A – 3a kuvatut muutokset on tehty ajanhetkellä 9.5 sekuntia
- Mikroverkko stabiloituu muutama sekunti muutosten jälkeen
- Generaattoreiden pyörimisnopeuksien tasaantumisessa menee useampi sekunti
- Tässä BESS:n nimellisteho oli 5.0 MVA:ta ja generaattoreiden yhteenlaskettu nimellisteho 4.0 MVA:ta
- Jos koneiden nimellisteho olisi ollut 40.0 MVA:ta ja BESS:n teho olisi pysynyt samana, niin mikroverkon stabiloituminen olisi samoilla säätöparametreilla kestänyt huomattavasti kauemmin
- Näin voimakkaissa transienteissa, ja koneiden koon ollessa hallitseva, verkko olisi todennäköisesti ajautunut peruuttamattomasti epästabiliin tilaan
- Tahtigeneraattorit eivät olisi enää tahtikäytössä keskenään



← BESS:n ensiöjännite

← BESS:n pätö- ja loisteho

← PV:n pätö- ja loisteho

← Tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudesta johdettu "taajuus"

← Tahtigeneraattoreiden pätötehot

← Kuormituksen pätö- ja loistehot

A: Saarekoituminen 3a ja 3b – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

Johtopäätöksiä

- Parametrimuutosten ei tarvitse välttämättä olla isoja, jotta stabiiliuden raja ylitetään
- Nyt kaikki tehdyt muutokset olivat tarkoituksella huonompaan suuntaan
 - Siten kuitenkin, että yksittäinen parametrimuutos ei ollut yli 50 %:ia
- Mikroverkossa tietyillä ajanhetkillä olevien tuotantoyksiköiden määrä ja tyyppi saattaa vaihdella voimakkaasti
- Tuotantoyksiköiden katkaisijoiden tilatiedot kertovat mitkä yksiköt ovat kiinni verkossa ja mitkä eivät
- Näiden katkaisijoiden tilatietojen perusteella on mahdollista määrittää kuhunkin käyttötilanteeseen parhaiten sopivat eri tuotantoyksiköiden säätöpiirien parametrit
- Tällöin olisi mahdollista varmistaa, että esim. PV:n ulostulotehoa ei jouduta rajoittamaan, jotta mikroverkon stabiilius säilyy
 - Tavoite kokonaisuudessaan, että kaikki tuotantoyksiköt pystyisivät toimimaan optimaalisesti, tai lähellä optimaalista käyttötilaa
 - Sopivien säätöpiirien parametrien löytäminen eri käyttötilanteisiin voi olla kuitenkin hyvin aikaa vievää ja joissain tapauksissa myös erittäin hankalaa, koska muutettavia parametreja on paljon ja yhteen tuotantoyksikköön tehdyt muutokset voivat vaikuttaa yllättävillä tavoilla muiden yksiköiden vasteisiin, vaikka näiden yksiköiden säätöpiirien parametreja ei oltaisi muutettu

A: Saarekoituminen 3a ja 3b – suoraan verkkoon kytkettyjä pyöriviä koneita ja tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

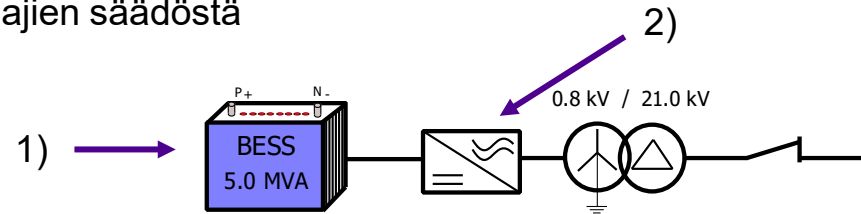
Johtopäätöksiä

- Säättöpiirien parametreja voidaan yrittää löytää myös adaptiivisten säätömenetelmien kautta:
 - "An adaptive control system automatically compensates for variations in system dynamics by adjusting the controller characteristics so that the overall system performance remains the same, or rather maintained at optimum level."
 - <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/adaptive-control-systems#:~:text=An%20adaptive%20control%20system%20automatically,in%20plant%20performance%20with%20time.>

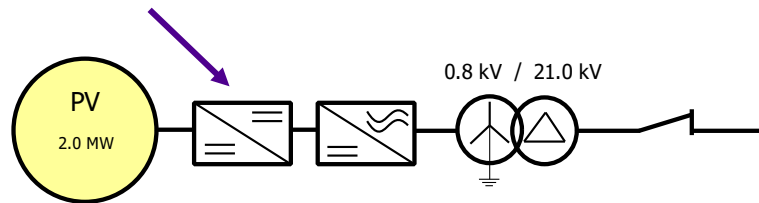
B: Saarekoitumiset 1 ja 2 – vain tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

➤ Tarkastellaan mikroverkon saarekoitumista tilanteissa, joissa mikroverkko sisältää vain tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

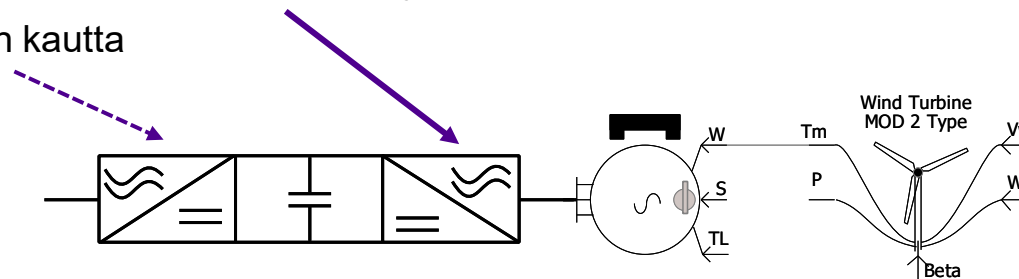
- Suoraan verkkoon kytkettyjen pyörivien koneiden puuttuessa mikroverkon käyttäytyminen riippuu pääasiassa 1) primäärilähteen rajoituksista ja 2) vaihtosuuntaajien säädöstä



- Hakkuri löytyy poikkeuksetta PV:stä ja yhdistelmistä, jossa akku on kytketty PV:n DC-välilännitepiiriin
- Hakkurin toiminta vaikuttaa verkkoon vasta vaihtosuuntaajan kautta



- Myös pyörivien koneiden puoleinen vaihtosuuntaaja vaikuttaa mikroverkon vasteisiin, mutta vasta DC-kondensaattorin ja verkkovaihtosuuntaajan kautta



B: Saarekoitumiset 1 ja 2 – vain tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

- Kahdella ulkoisesti ”samannäköisellä” mikroverkolla (sama määrä ja tyyppi tuotantoyksiköitä sekä kuormia) voi olla toisistaan täysin poikkeavat säätöperiaatteet
- Vasteet voivat olla eri käyttö- ja vikatilanteissa hyvin erilaiset
- Mikroverkon rakenne/kombinaatio/tms.:
 - 1) silmukoitu, 2) säteittäinen, 3) rengas → vaikuttaa suojaukseen toteutukseen
 - Tuotantoyksiköiden oikosulkuteho (vikavirran syöttökyky) on merkittävä asia suojauksen valinnassa
 - Korostuu vain tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä sisältävässä mikroverkossa, koska vikavirran syöttökyky on usein huomattavasti paljon pienempi, kuin tahtikoneita sisältävässä mikroverkossa
 - Suoraan kytketyt epätahtikoneet syöttävät vain vian alussa hetken suurehkoa vikavirtaa → vikavirran vaste eroaa huomattavasti tahtikoneista
- R/X-suhde (johtimien, muuntajien ja suodattimien yhteenlaskettu resistanssi/reaktanssi –suhde) → voi vaikuttaa kuinka hyvin perinteiset säätömenetelmät (P/f ja Q/U) toimivat
 - Perinteinen: tehokulman muutos vaikuttaa (pääasiassa) pätötehon siirtoon ja jännitteen itseisarvojen erotus vaikuttaa (pääasiassa) loistehonsiirtoon

Tarkastelukokonaisuudet ja niiden perusteet:

➤ Vertaillaan vasteita, jossa saarekoitumistapahtumassa:

B – 1a ei ole viiveitä

B – 1b on viiveitä

B – 1c ei ole viiveitä, saarekoituminen tapahtuu eri tehotasapainosta → mikroverkon kokonaisteho (BESS + PV) vaihtelevat yli ja alle mikroverkon kuorman

B – 1d on viiveitä, saarekoituminen tapahtuu eri tehotasapainosta → mikroverkon kokonaisteho (BESS + PV) vaihtelevat yli ja alle mikroverkon kuorman

B – 2a ei ole viiveitä, PV osallistuu jännitteensäätöön

B – 2b on viiveitä, PV osallistuu jännitteensäätöön

B – 3 PV:n PLL:n häiriö

➤ Verrattuna A-tarkasteluihin, jossa tahtigeneraattorit olivat mukana, niin B-tarkasteluissa tiedonsiirtoviiven aikana (eli kun saarekoituminen on jo tapahtunut PCC-katkaisijan avauduttua), mikroverkossa ei ole yksikköä, joka muodostaisi verkon eli käytännössä jännitereferenssikäyrät

➤ Tiedonsiirtoviiveen aikana BESS ei ole vielä saanut käskyä toimintamoodin vaihtamiseen grid-feeding –moodista grid-forming –moodiin

➤ PV on koko ajan grid-feeding –moodissa eli PV tarvitsee jonkun muun tuotantoyksikön muodostamat jännitteet, joita seurata

➤ Vaikka PV on grid-feeding –moodissa (pätötehon suhteen), se voi tukea jännitettä (grid-supporting –moodi loistehon suhteen)

B: Saarekoituminen 1 – vain tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

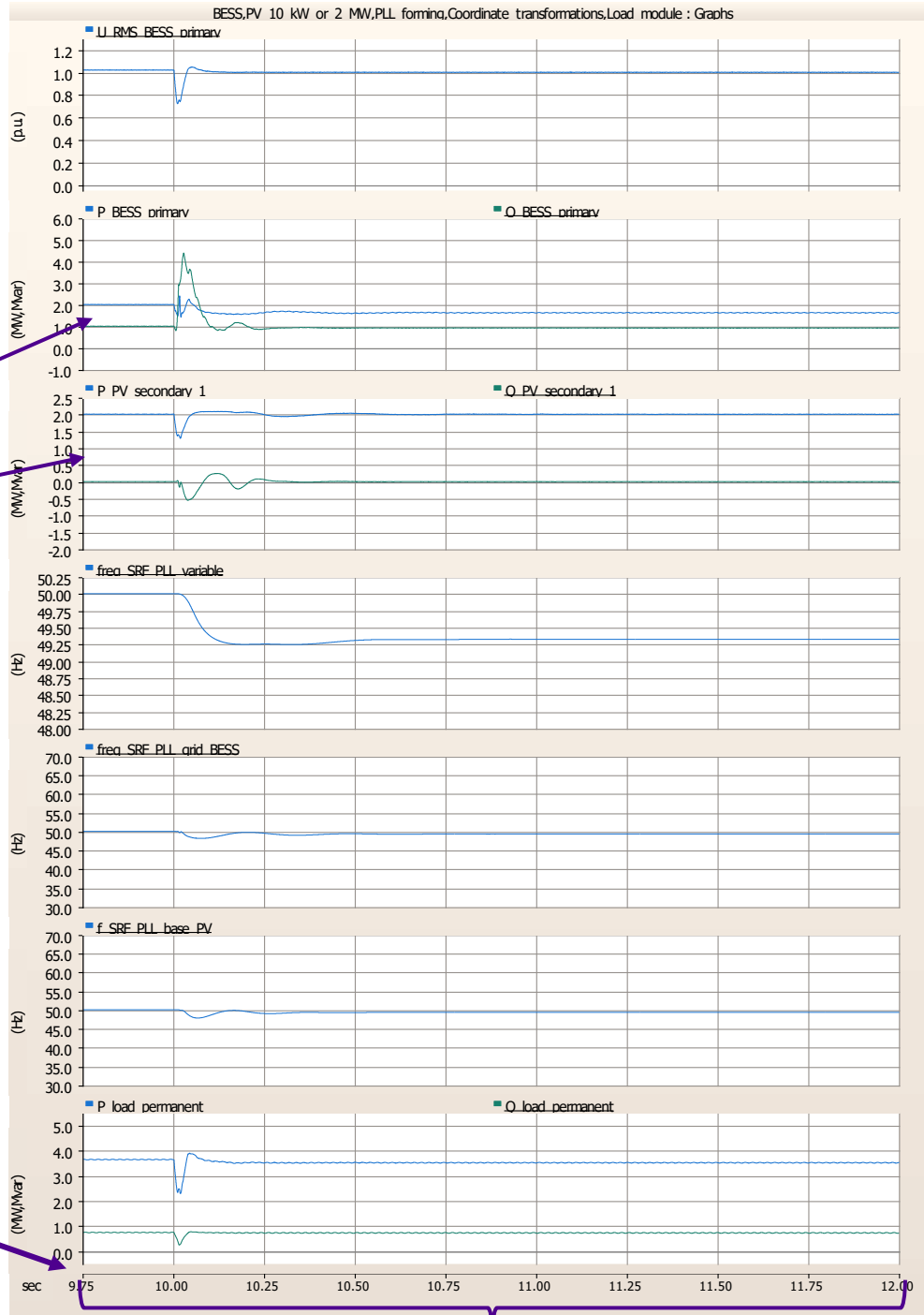
➤ Ensin tarkastelussa on viiveetön saarekoituminen

1. Ennen saarekoitumista mikroverkko toimii muun verkon rinnalla normaalisti toimintapisteessä, jossa:
 - BESS syöttää verkkoon 2.0 MW ja 1.0 Mvar
 - PV syöttää verkkoon nimellistehonsa verran pätötehoa (2.0 MW), loisteho on nolla
 - Esim. BESS voisi hyvin myös ottaa verkosta pätö- tai loistehoa, mutta tarkasteluihin on nyt valittuna nämä lähtökohdat
2. Verkko (niin mikroverkon osa kuin taustaverkko) on tasapainotilanteessa, eli verkossa ei ole taajuus-, jännite- tai tehovärähtelyjä tai muita merkittäviä muutoksia → steady-state -toimintapiste
3. Saarekoituminen tapahtuu ulkoisen vian (3-vaiheinen oikosulku) seurauksena
 - Ulkoinen vika → vika on taustaverkon puolella
 - Vika tapahtuu ajanhetkellä $t = 10.0$ sekuntia
4. Vian johdosta mikroverkon ja taustaverkon liitännäispisteen (Point of Common Coupling, PCC) jännite laskee
5. Sitten, kun PCC RMS-jännite putoaa alle 0.85 p.u.:n, niin liitännäispisteessä oleva katkaisija (Circuit Breaker, CB) avautuu
 - 0.85 p.u.:n raja-arvo ei perustu mihinkään tiettyyn kriteeriin/kriteereihin, vaan on tarkasteluiden kannalta ”sopivan suuruisen” raja-arvo

6. BESS:n toimintaperiaate (sekundäärisäätö) määräytyy:
 - PCC-katkaisijan tilatiedosta (auki/kiinni)
 - Siitä, onko mikroverkossa pyöriviä koneita vai ei → tahtigeneraattoreiden katkaisijoiden tilatiedot
 - B-osion tarkasteluissa tahtigeneraattoreita ei ole
7. Ei lisättyä viivettä katkaisijan avautumisessa eli heti, kun PCC:n RMS-jännite on alle 0.85 p.u., niin katkaisija avautuu
 - Saarekoituminen
8. PCC-katkaisijan avautumisen jälkeen BESS siirtyy heti grid-feeding –moodista grid-forming –moodiin, eli BESS muodostaa verkon
 - Heti → BESS:n toimintatilan muutos (sekundäärisäätö) on välitön eli ei viivettä
9. Nyt tuotantoyksiköiden (BESS, PV) välinen pätötehonjako tehonjako määräytyy ”auringon paisteen mukaan” (ambient conditions)
 - PV tuottaa tässä nimellistehonsa verran pätötehoa, BESS tuottaa loput
10. PV toimii sekä pätötehon osalta grid-feeding –moodissa
 - Pätöteho = nimellisteho (2.0 MW) – kaikki tarkastelut
 - Loisteho on 0 Mvar (B – 1 -tarkastelut)
 - B – 2 -tarkasteluissa PV tukee jännitettä → PV:n nimellisteho on nostettu 2.8 MVA:n, jotta PV:llä on kapasiteettia myös loistehontuotantoon
11. PV:ssä on ylivirtasuojaus, mutta jännite- ja taajuussuojaukset eivät ole aktivoituneina
 - Tarkastellaan, miten PV:n mukanaolo vian aikana ja heti sen jälkeen vaikuttaa vasteisiin

B: Saarekoituminen 1a – vain tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

- Katkaisijan avausviive: 0 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 0 ms
- BESS:n tehot 2 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

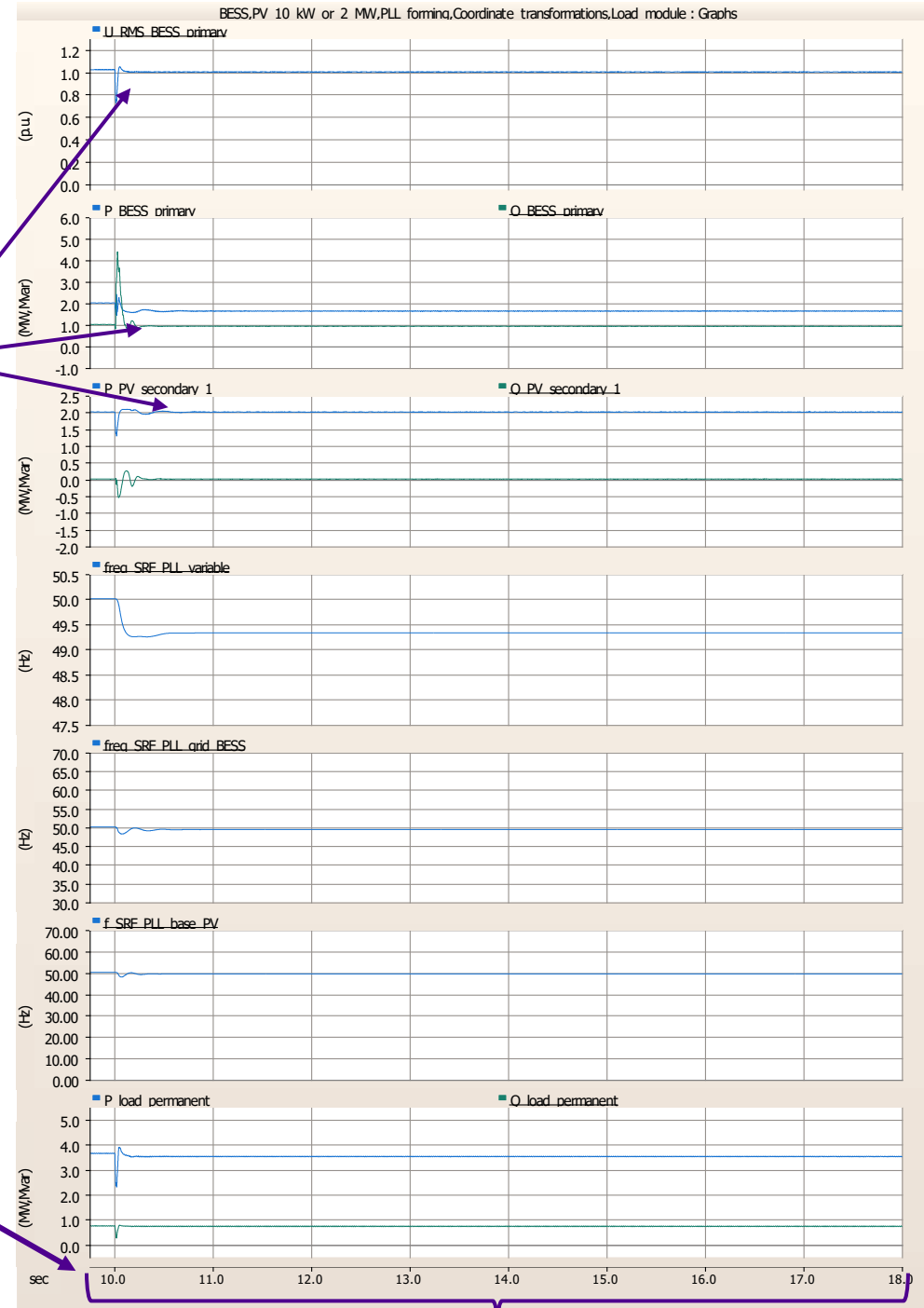
➤ Verrattuna A-osion tarkasteluihin, nämä suureet ovat nyt eri, koska tahtigeneraattoreita ei ole

Kuvaajat näyttävät reilu 2 sekunnin mittaisen ajanjakson

B: Saarekoituminen 1a – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

- Mikroverkko saavuttaa nopeasti uuden tasapainoaseman
- Looginen tulos ajatellen, että viiveiden puuttuessa BESS:n nopea säätö saa mikroverkon hallintaan

Kuvaajat näyttävät n. 10 sekunnin mittaisen ajanjakson



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

Tuloksista A – 1a:

- Seuraavalla kalvolla on näytettynä ulostulosuureita ilman kuvaajia
- Sitä seuraavalla kalvolla on kuvaajat
- Kuvaajien suureet ovat myös itse kuvaajien yläpalkissa
 - Y-akselin vieressä näkyy yksikkö.
- Täydentävät kuvaajasuureet ovat pitkässä tuloskalvoesityksessä, mutta suurinta osaa ei ole lyhyemmässä kalvosarjassa
 - Tarkoitus on nostaa esille, että EMT-simuloinneissa on suuri määrä tarkasteltavia ulostulosuureita ja ”kaikki suureet ovat yhtä tärkeitä”

BESS:n ensiöjännite

PV:n ensiöjännite

BESS:n toision pääjännite

BESS:n pätö- ja loisteho

PV:n pätö- ja loisteho

BESS:n toisiovirta

BESS:n id_ref- ja mitattu id-virta

PV:n id_ref- ja mitattu id-virta

PV:n toision pääjännite

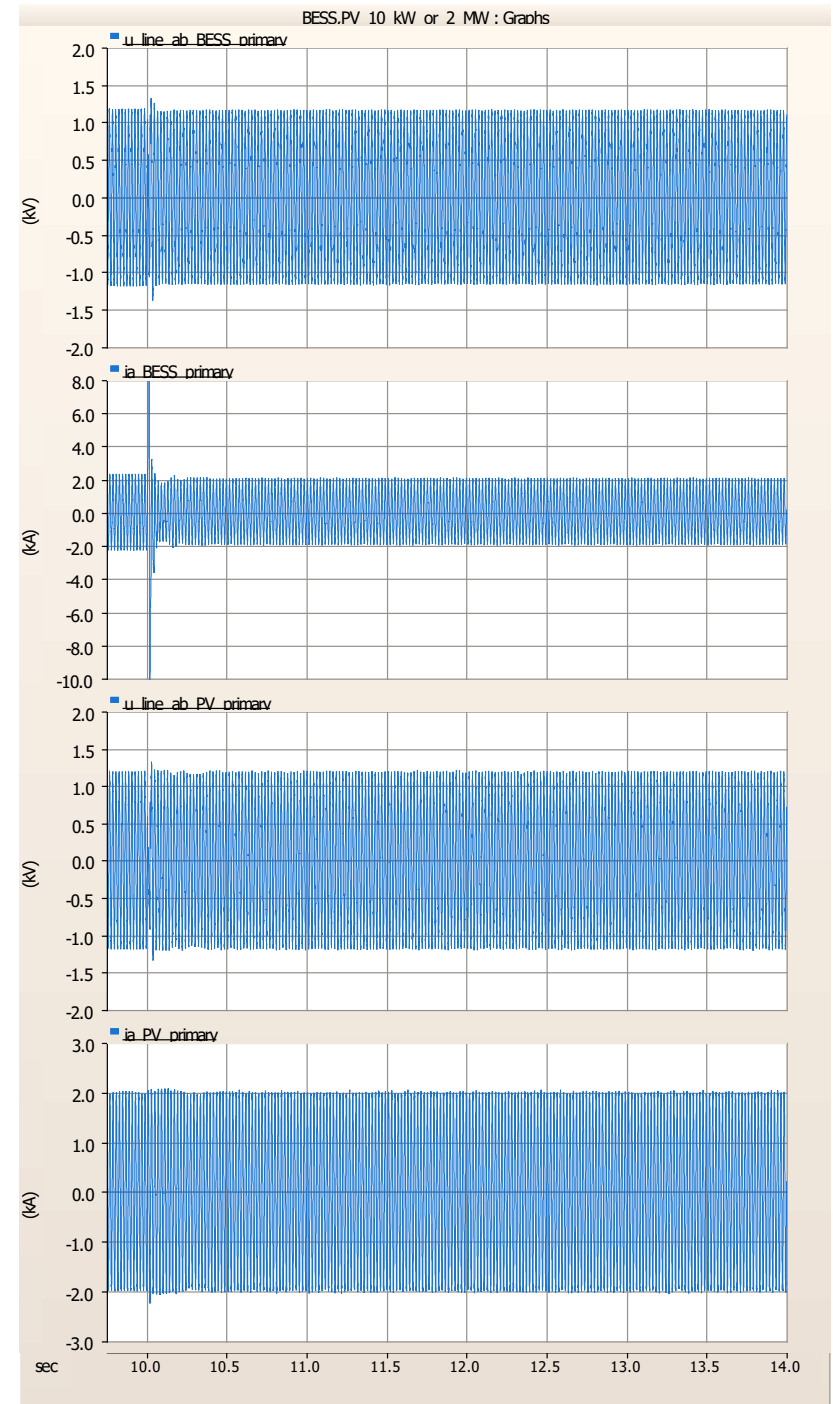
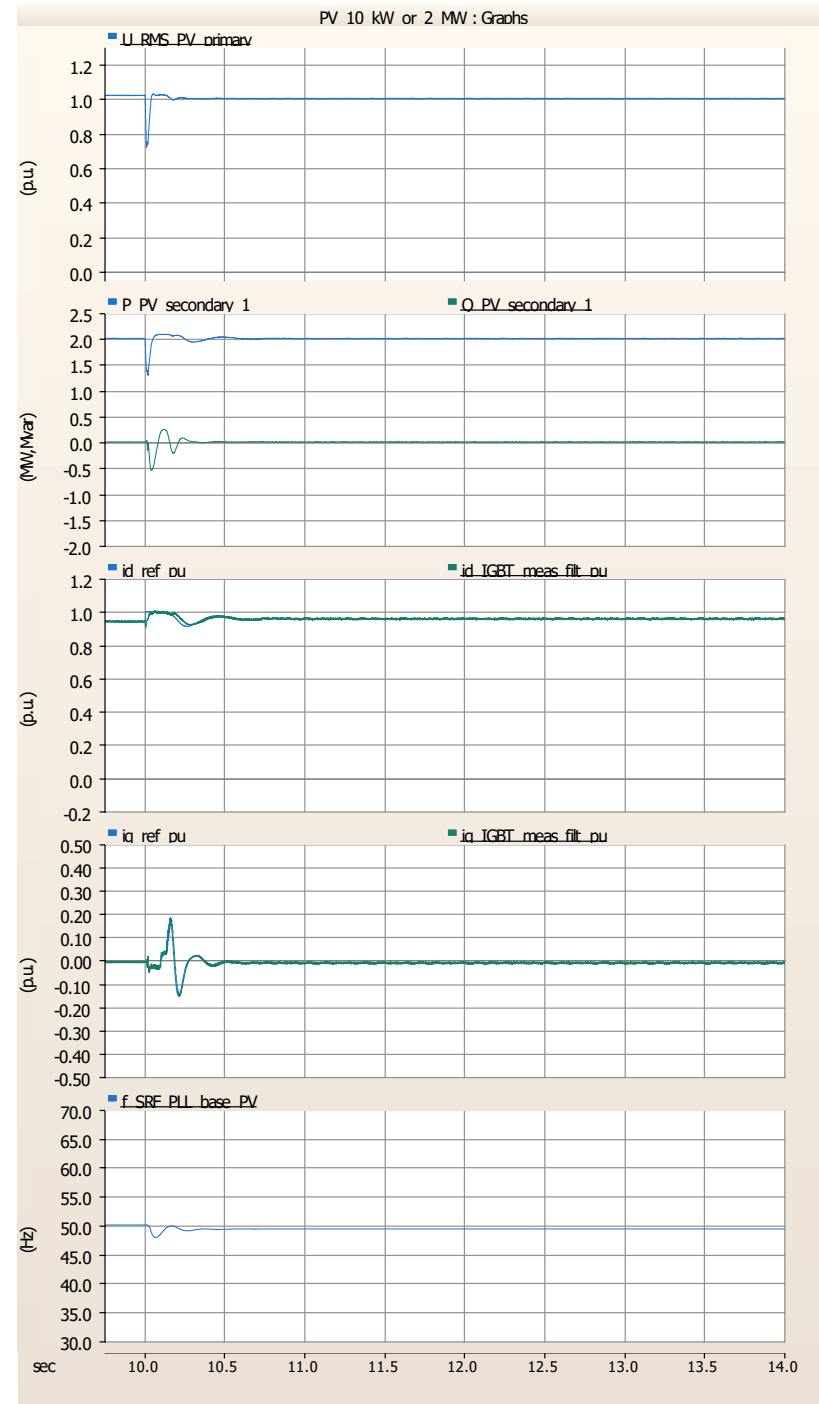
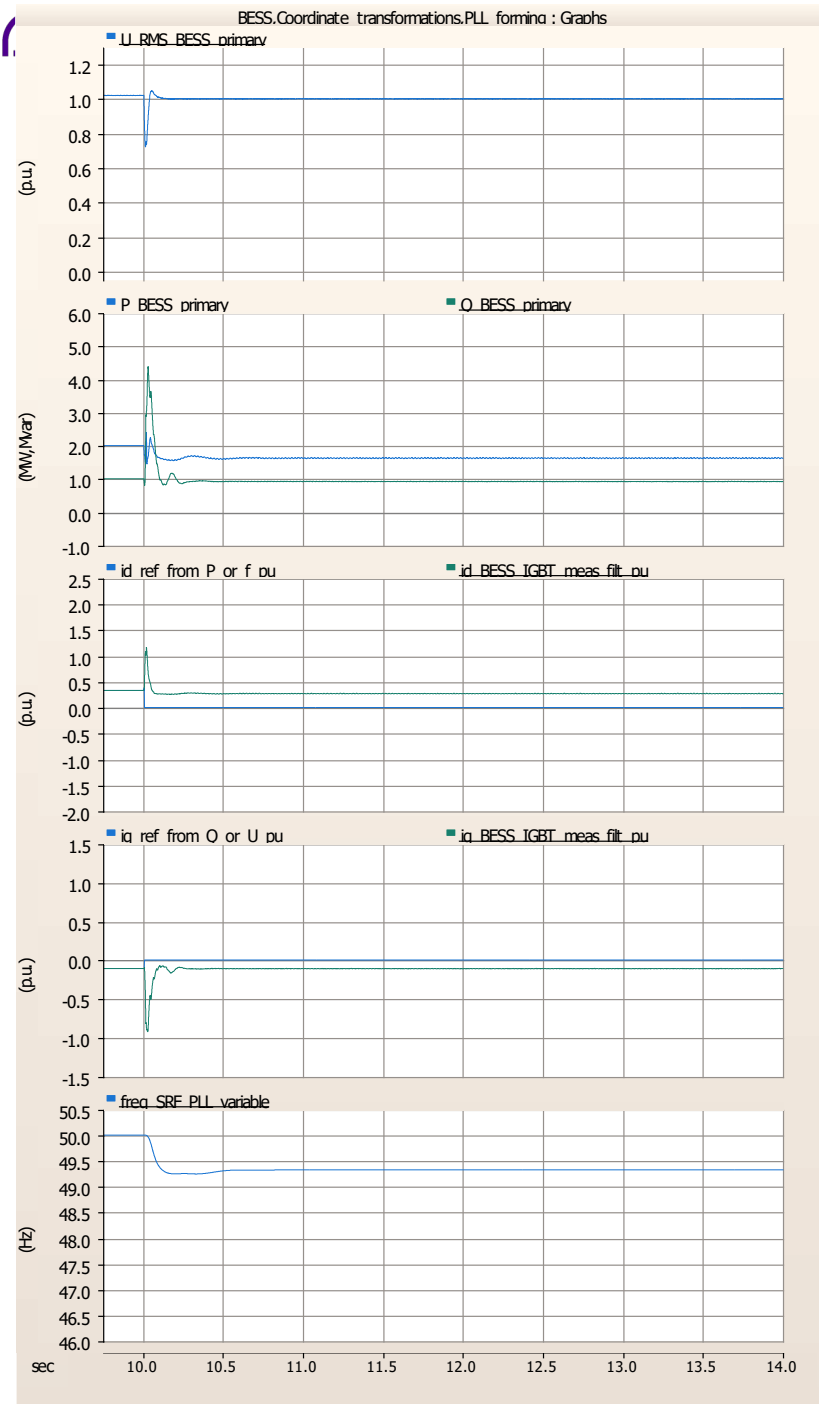
BESS:n iq_ref- ja mitattu iq-virta

PV:n iq_ref- ja mitattu iq-virta

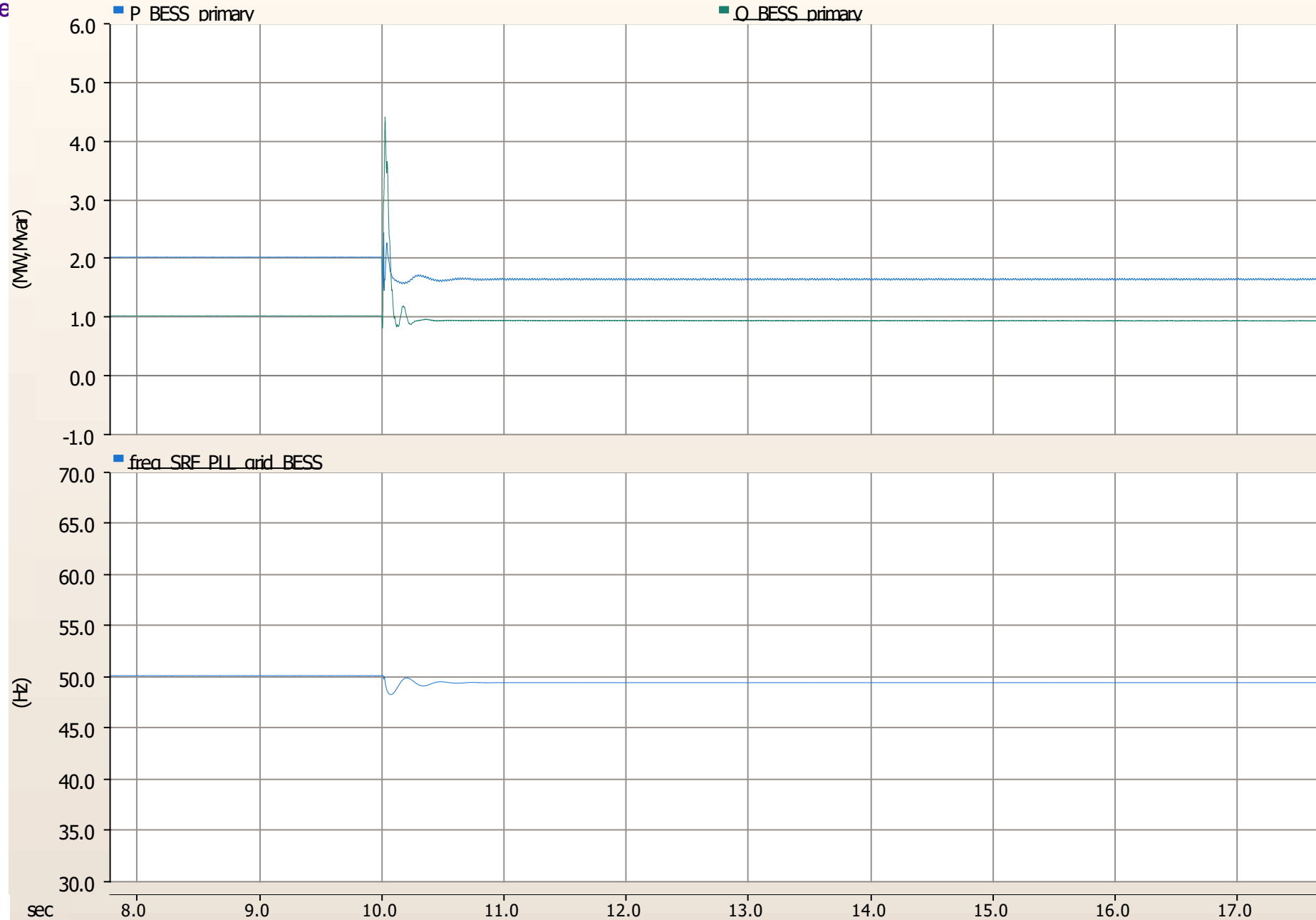
BESS:n PLL:n mittaama taajuus

PV:n PLL:n mittaama taajuus

PV:n toisiovirta



BESS.Coordinate transformations : Graphs

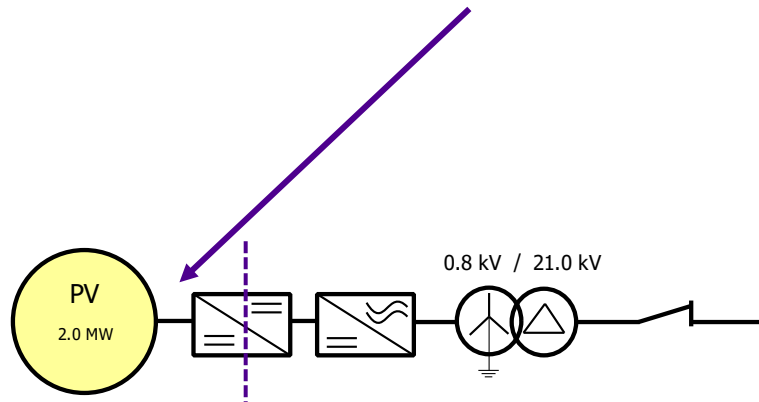


BESS:n pätö- ja loisteho

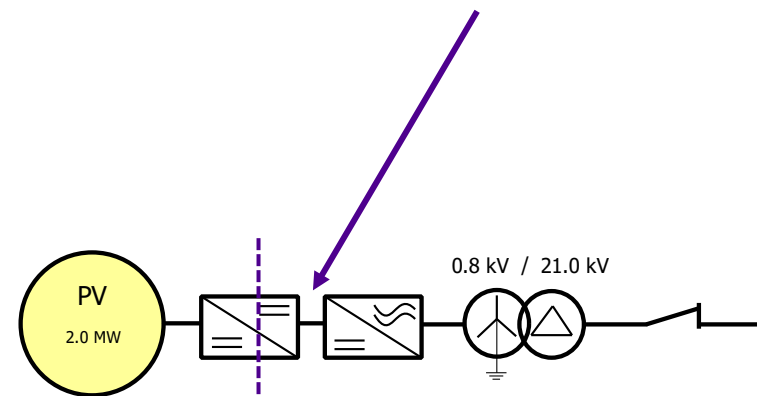
BESS:n PLL:n mittaama taajuus

Tuloksista A – 1a:

- Nyt, kun tahtikoneita ei ole, niin tuloksissa on esitetty lisää PV:n suureita
- Kun tekstissä mainitaan "PV:n paneelien jännite/virta/teho", niin kyseessä on hakkurista itse paneelien suuntaan oleva DC-piiri



- Kun tekstissä mainitaan "PV:n DC-puolen jännite/virta/teho", niin kyseessä on hakkurista vaihtosuuntaajan suuntaan oleva DC-piiri
- PV:ssä on (tyypillisesti) kaksi DC-piiriä hakkurilla "erotettuina"



Uudet suureet

BESS:n ensiöjännite

BESS:n pätö- ja loisteho

BESS:n i_{d_ref} - ja mitattu i_d -virta

BESS:n i_{q_ref} - ja mitattu i_q -virta

BESS:n PLL:n mittaama taajuus

PV:n paneelien jännite

PV:n paneelien virta

PV:n laskettu paneeliteho

PV:n MPPT:n ohjearvo

PV:n hakkurin "duty cycle"

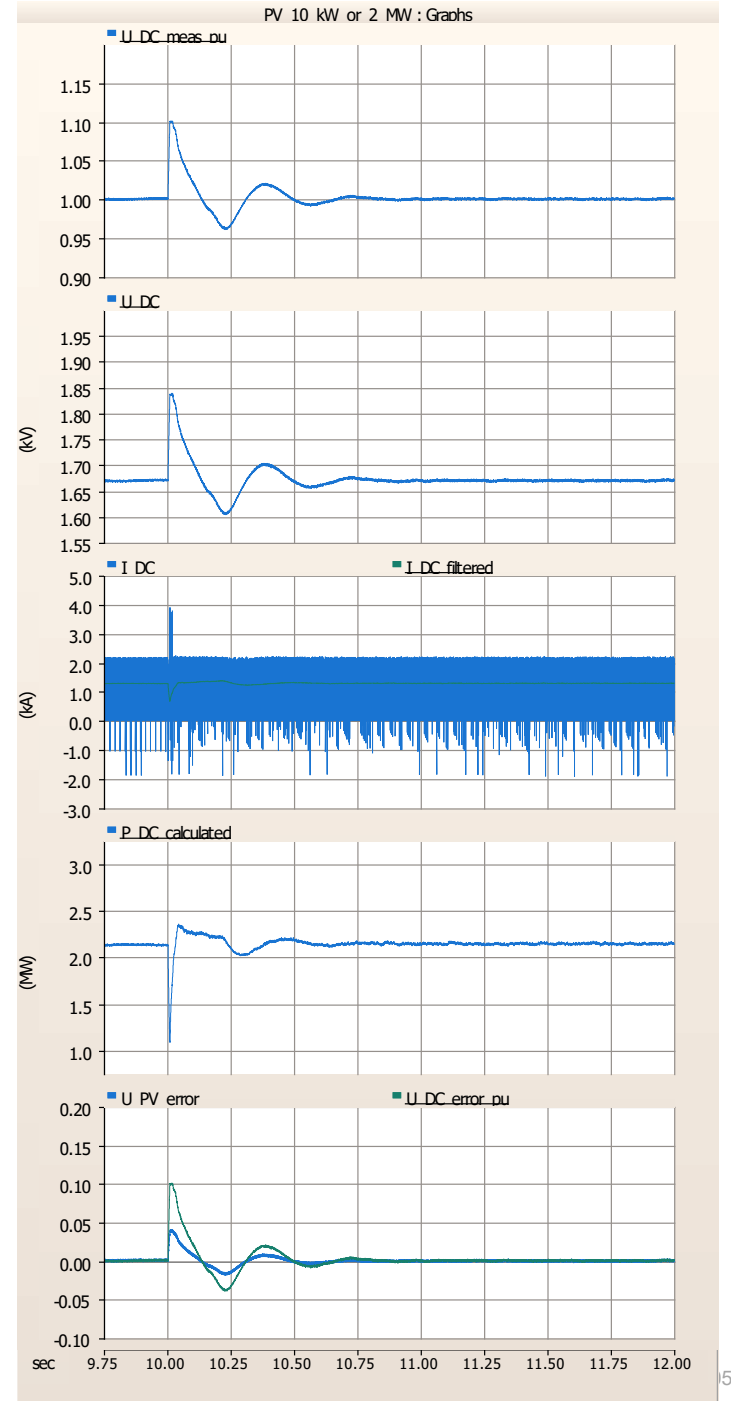
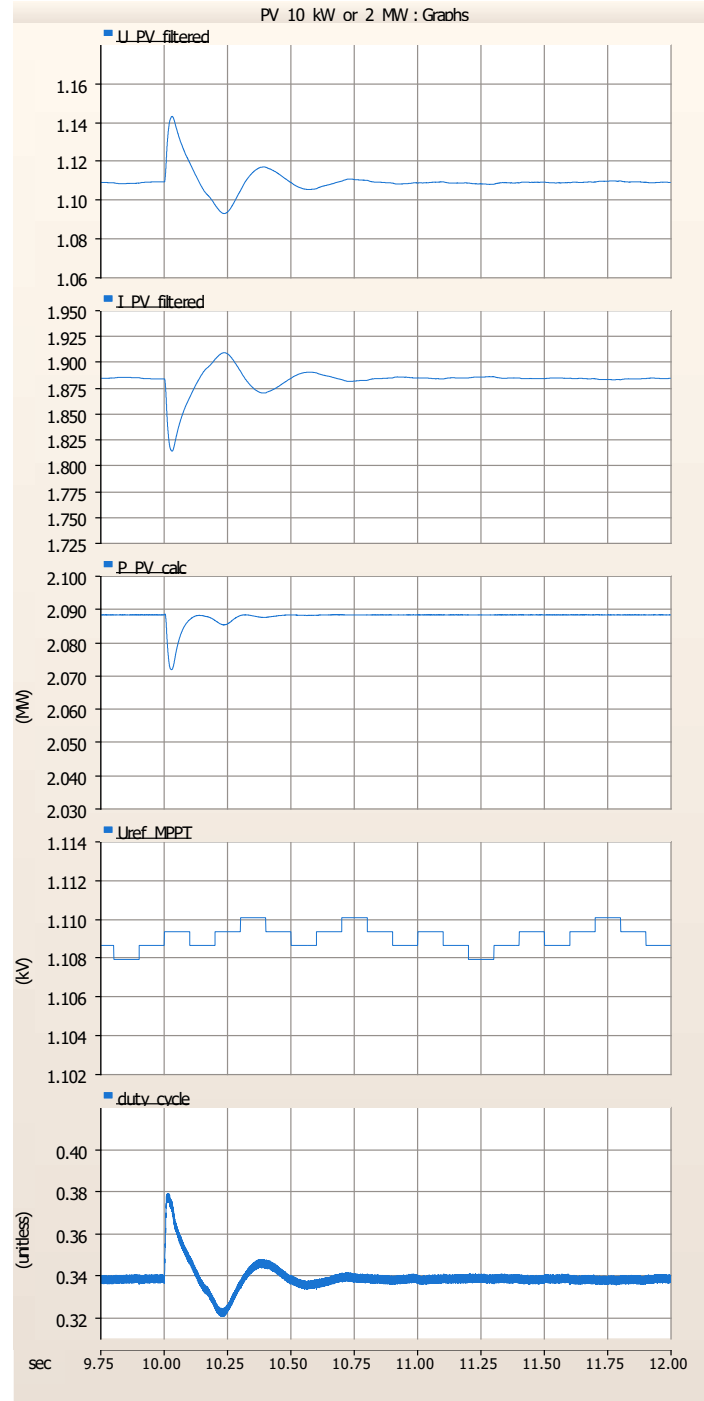
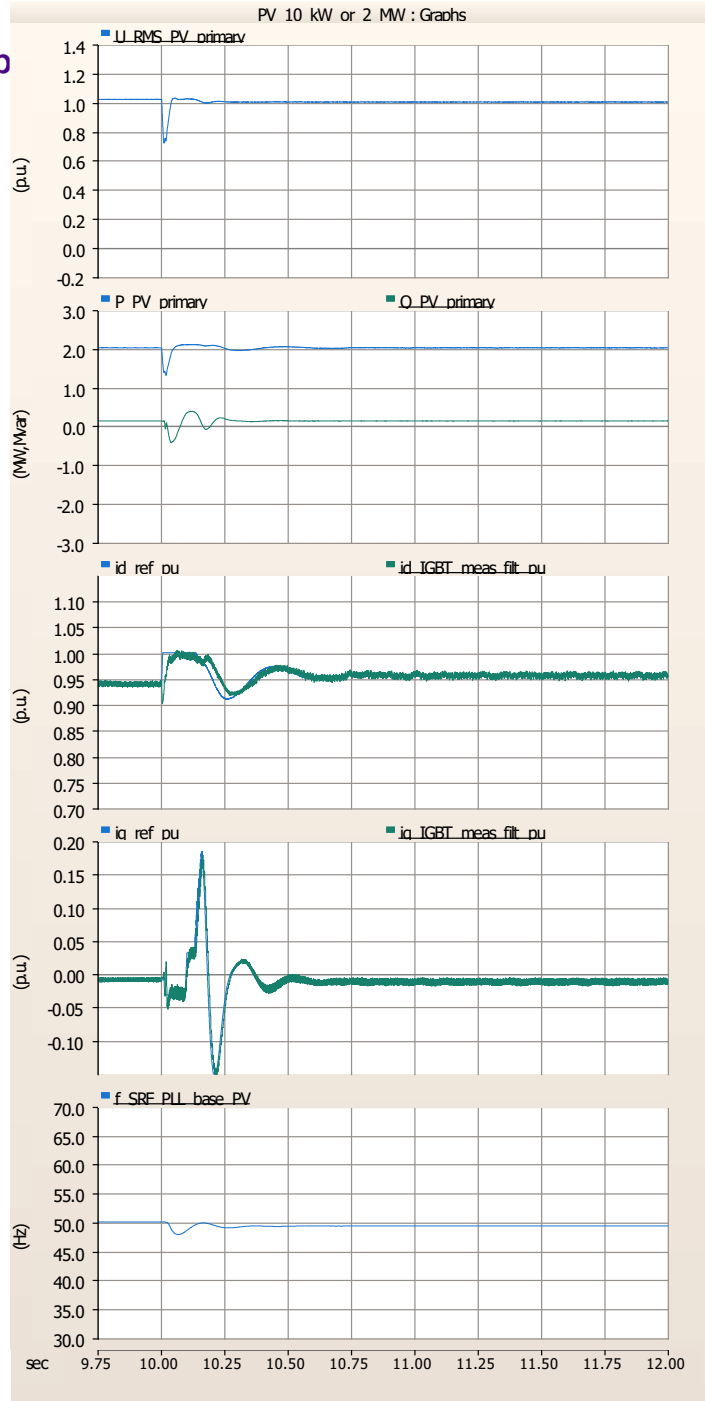
PV:n DC-puolen jännite p.u-arvona

PV:n DC-puolen jännite kV:na

PV:n DC-virta ja suodatettu DC-virta

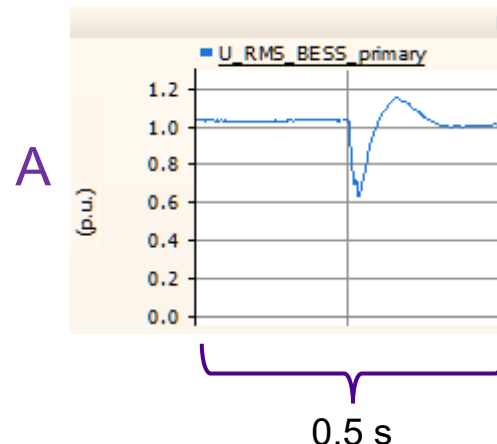
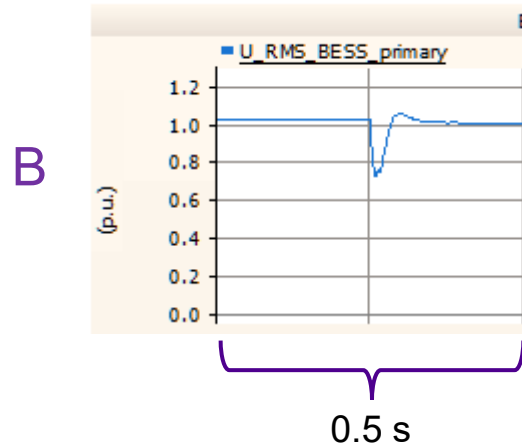
PV:n laskettu DC-piirin teho

PV:n DC:n jännitevirhe kV:na ja p.u.:na



Johtopäätöksiä

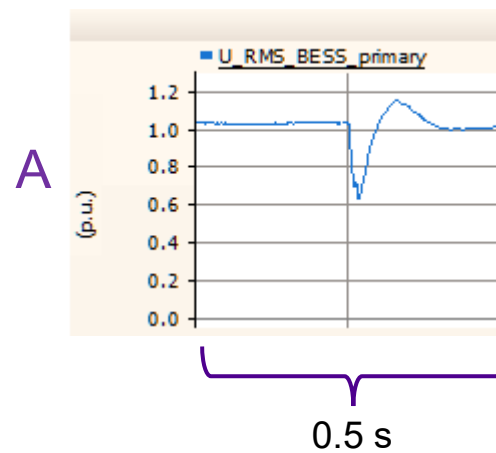
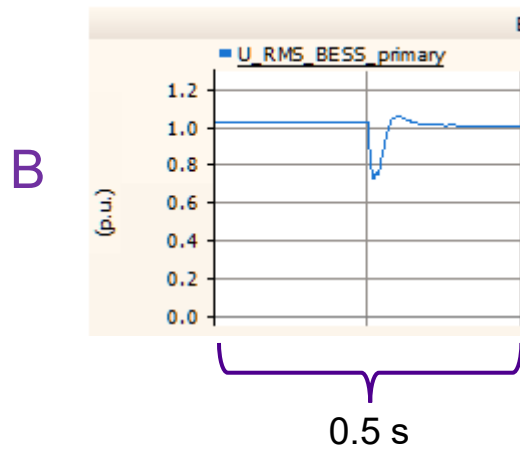
- Katkaisijan avautuminen aiheuttaa BESS:n toimintamoodin siirtymisen heti grid-feeding –moodista grid-forming –moodiin
- Tämä ideaalinen toimintatilan muutosnopeus edesauttaa, että saarekoituminen sujuu ilman merkittäviä teho-, jännite- tai taajuusvärähtelyjä
 - Looginen tulos ajatellen, että viiveiden puuttuessa BESS:n nopea säätö saa mikroverkon hallintaan
- PV:n vaihelukko pystyy synkronoitumaan BESS:n muodostamiin jännitteisiin nopeasti, jolloin PV:n pätö- ja loistehot tasaantuvat pian saarekoitumisen jälkeen
- Viiveettömässä siirtymisessä tahtigeneraattoreiden puuttuminen (tässä lähinnä niiden hidas jännitteensäätö) saattaa edesauttaa mikroverkon nopeaa stabiloitumista saarekoitumisen jälkeen
 - Syntyvä jännitekuoppa on pienempi ja tasapainotila saavutetaan nopeammin
 - On syytä nostaa esille, että nyt BESS:n jännitteensäätö toimii eri säätöpiirien kautta, koska BESS muodostaa itse verkon jännitteen



← Tahtikoneet mukana

Johtopäätöksiä

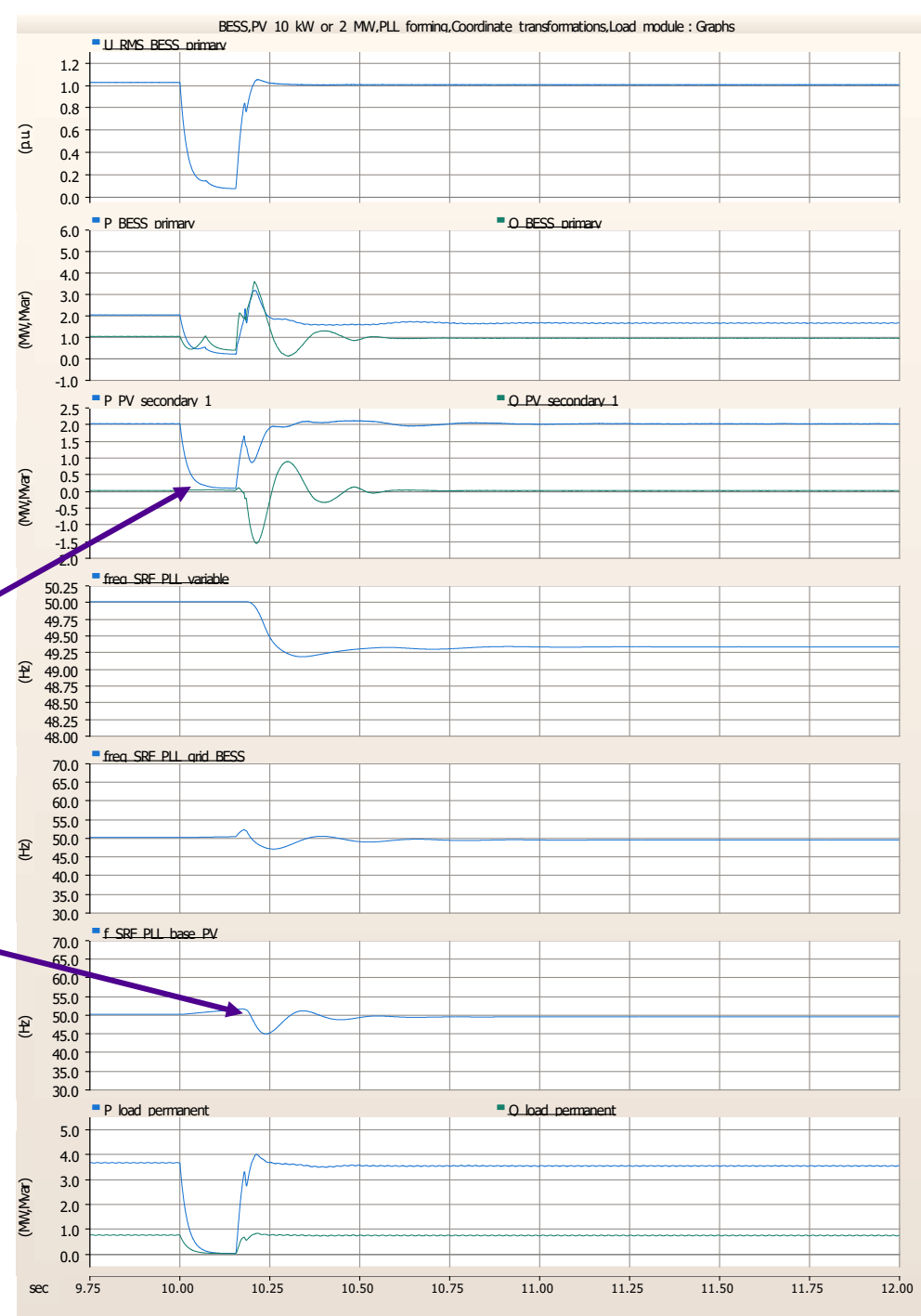
- Ao. eroista (parempi / huonompi) ei voida vielä vetää merkittäviä johtopäätöksiä, koska esim. viiveitä ei ole huomioitu



← Tahtikoneet mukana

B: Saarekoituminen 1b – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

- Katkaisijan avausviive: 150 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 25 ms
- BESS:n tehot 2.0 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar
- Katkaisijan avausviiveen aikana PV:n PLL pystyy jollain tarkkuudella seuraamaan jännitteen kulmaa jäännösjännitteen avulla (jännitekuoppa ei ole 100 %)
- Tiedonsiirtoviiveen aikana taustaverkkoa ei ole eikä BESS ole vielä muodostanut verkkoa
- Tämän viiveen ja uudelleentahdistumisen aikana PLL:n ulostulossa on voimakas, lyhytkestoinen transientti, joka näkyy etenkin hyvin voimakkaina loistehovärähtelyinä



← BESS:n ensiöjännite

← BESS:n pätö- ja loisteho

← PV:n pätö- ja loisteho

← BESS:n taajuuden ohjearvo

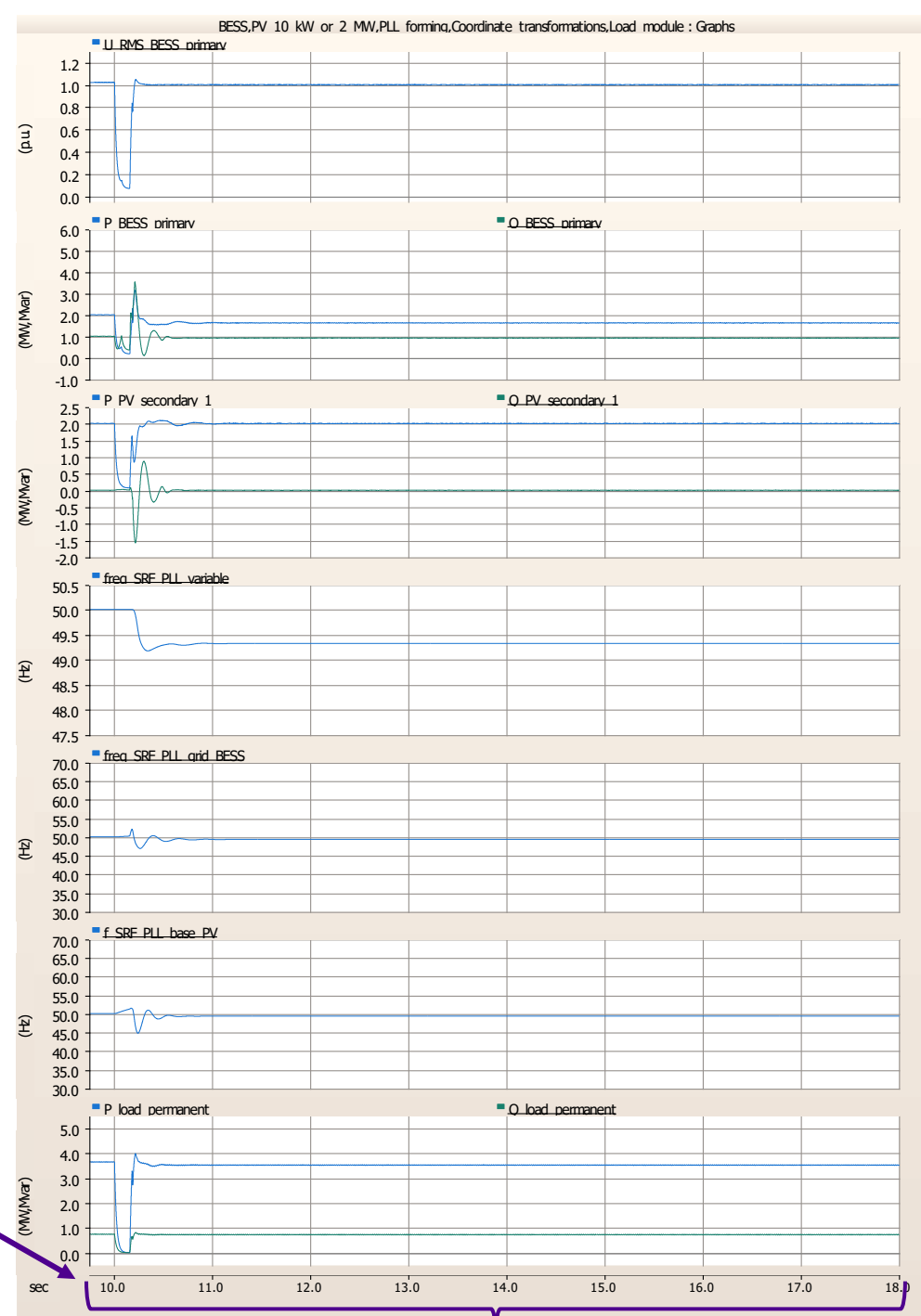
← BESS:n PLL:n mittaama taajuus

← PV:n PLL:n mittaama taajuus

← Kuormituksen pätö- ja loistehot

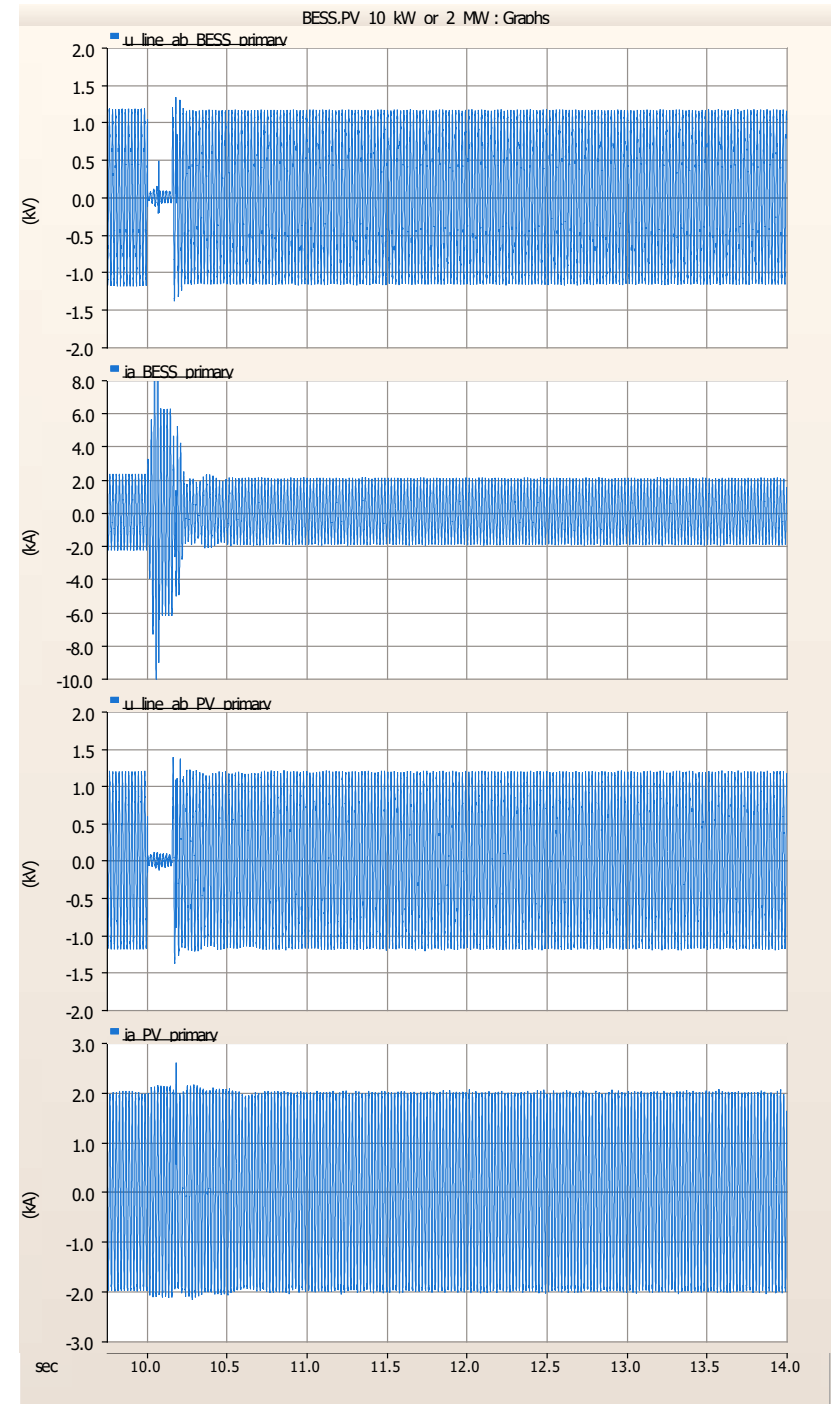
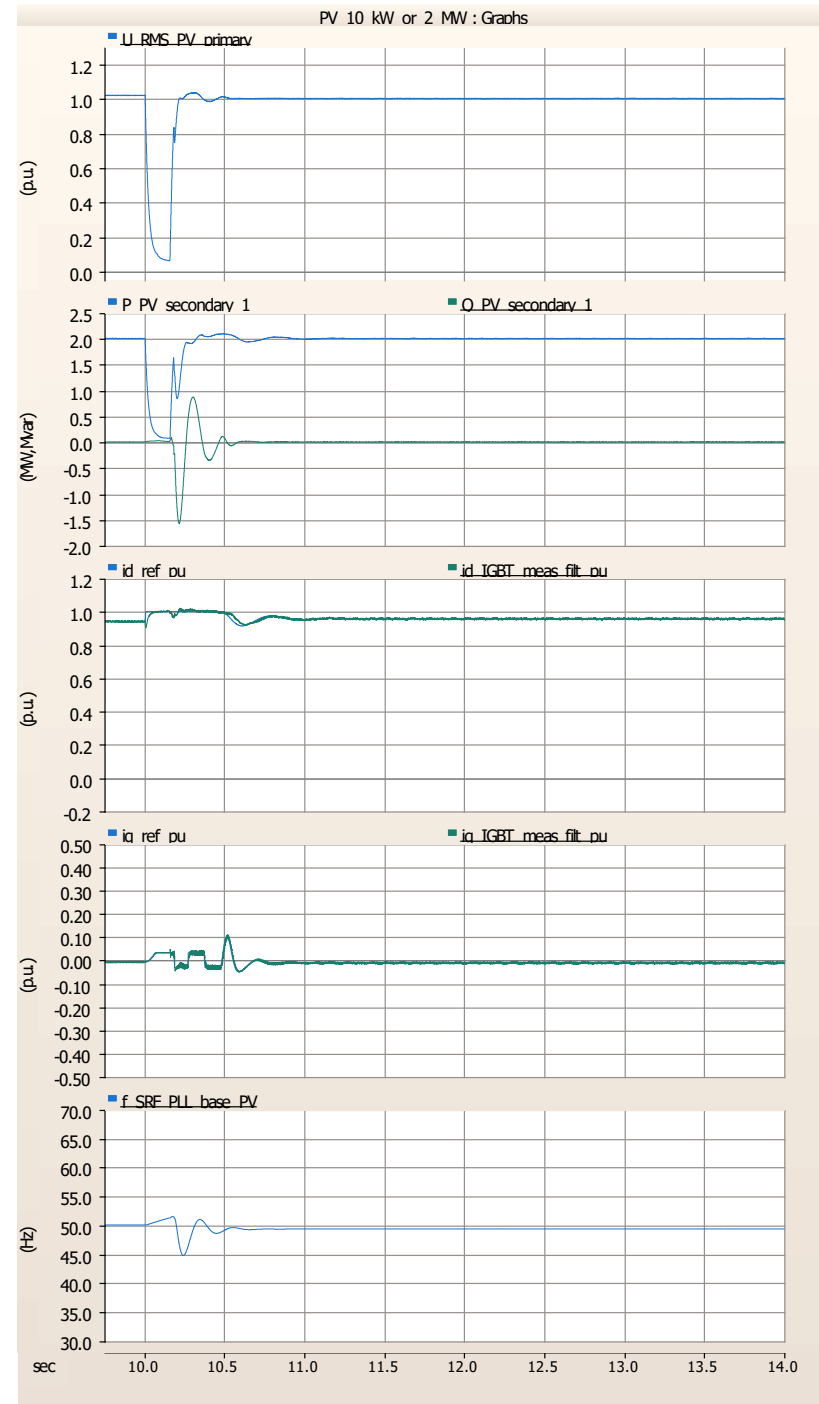
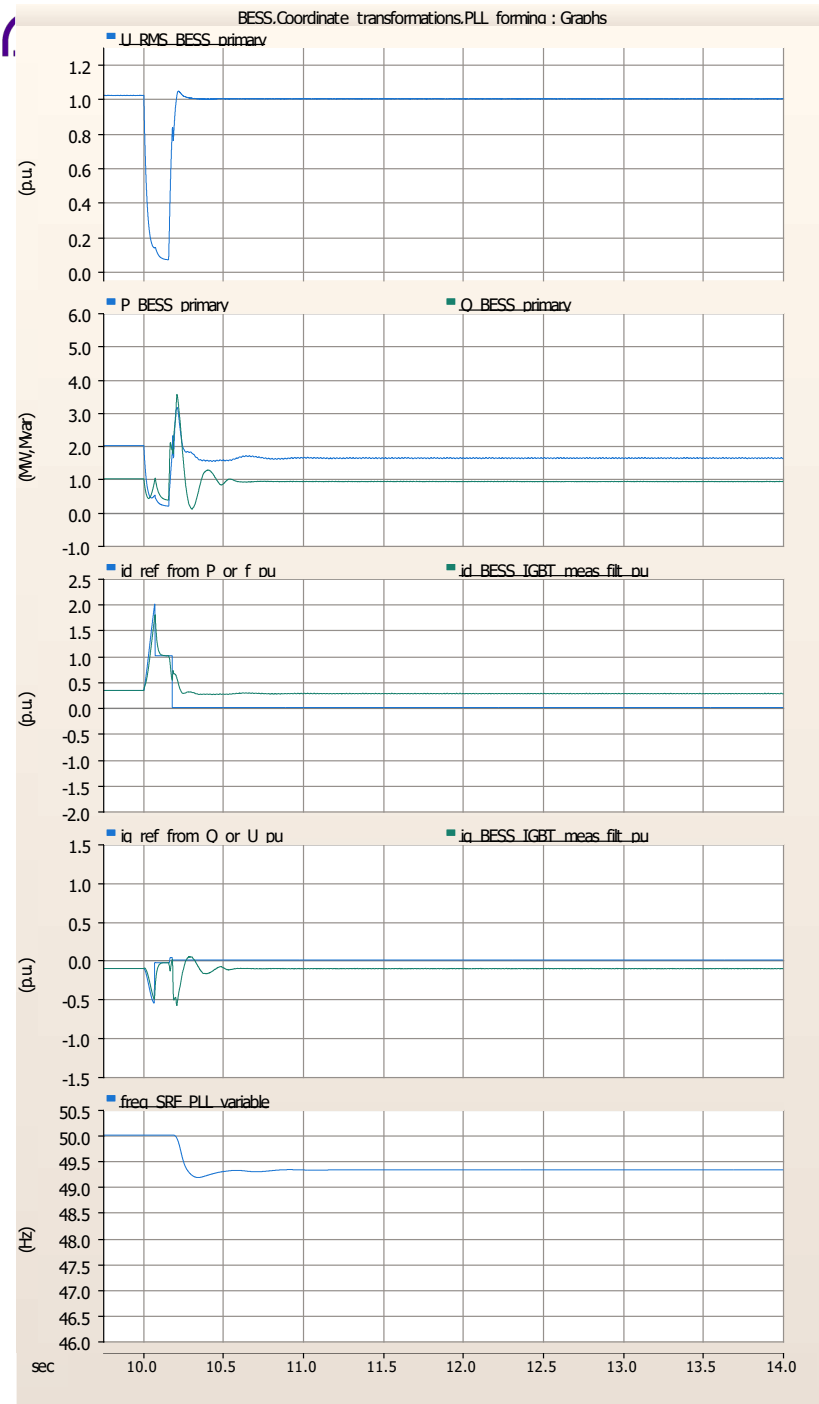
B: Saarekoituminen 1b – vain tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

- Katkaisijan avausviive: 150 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 25 ms
- BESS:n tehot 2.0 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar

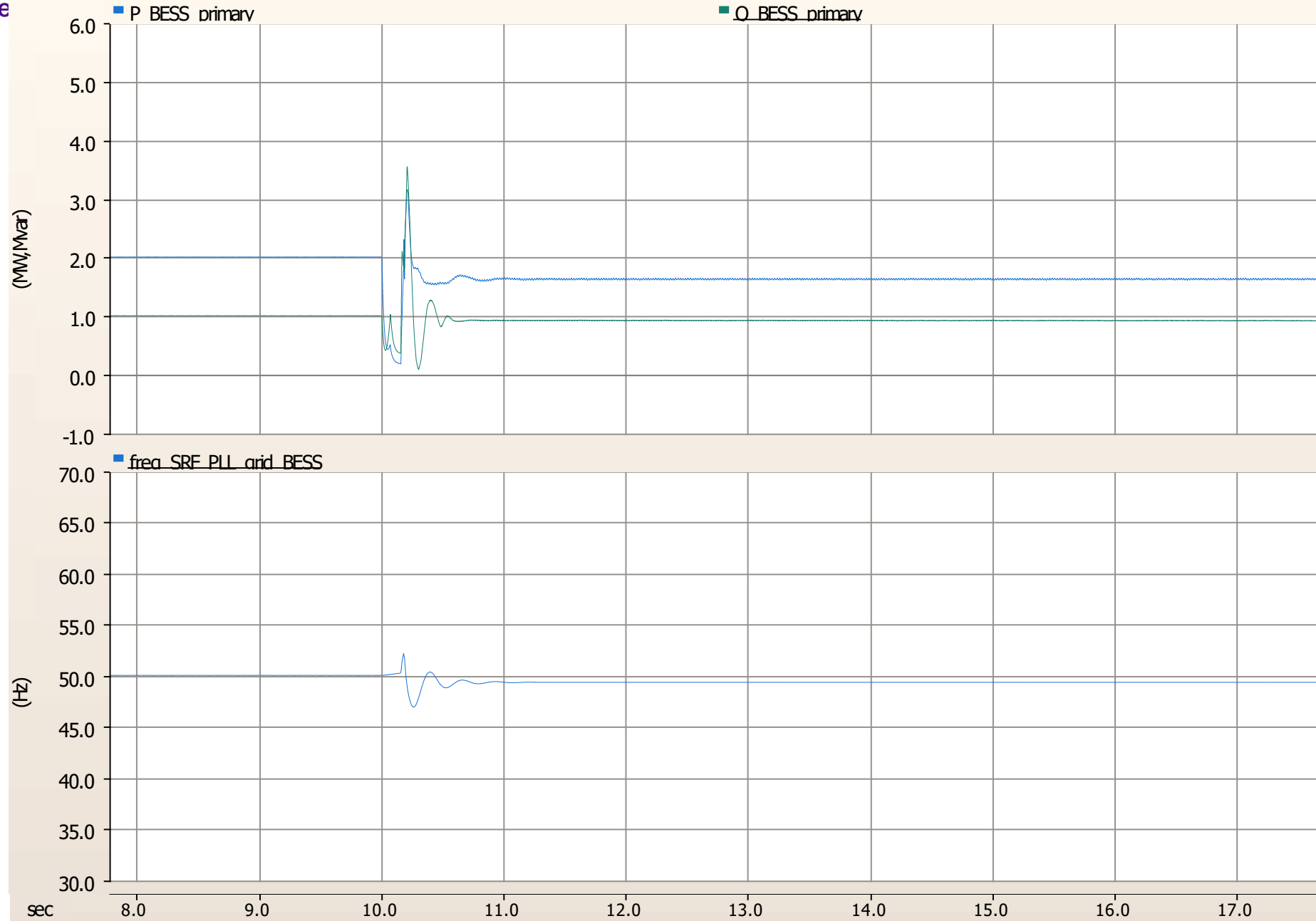


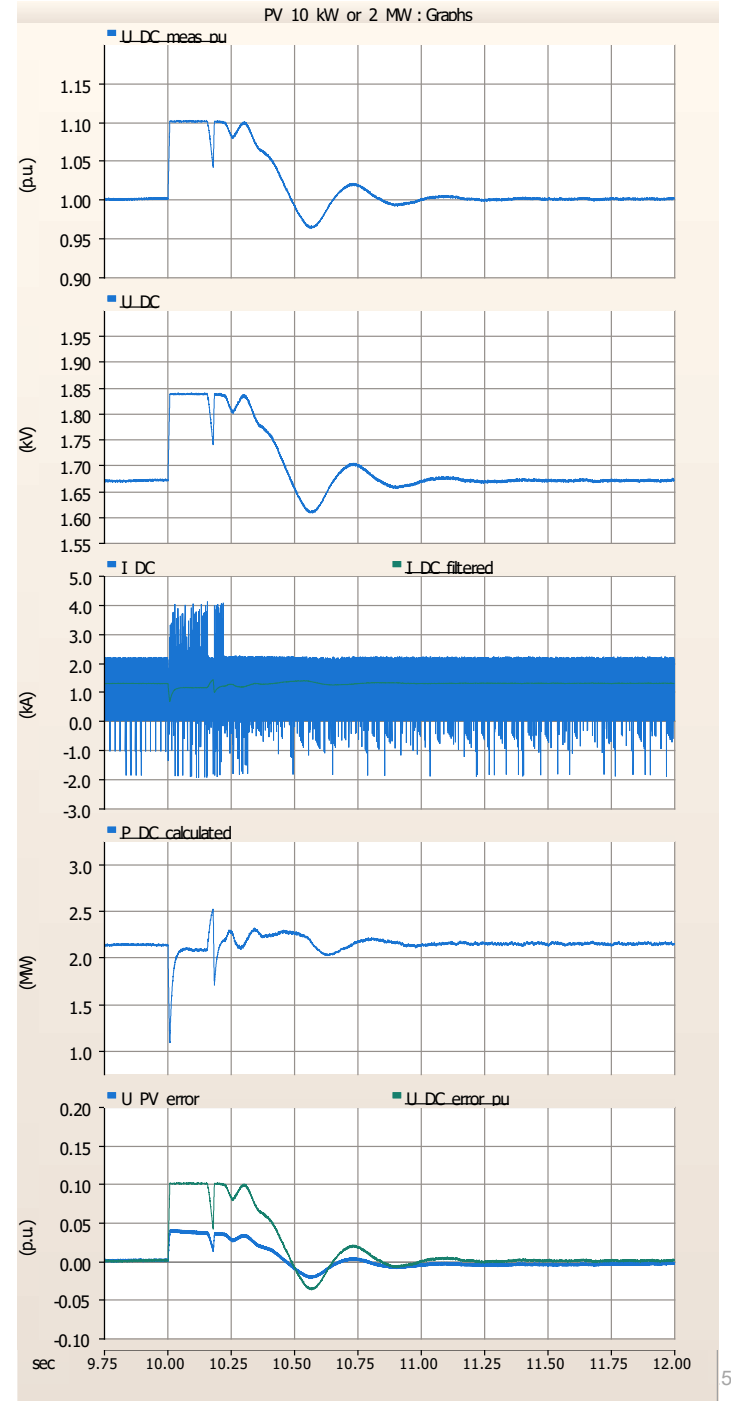
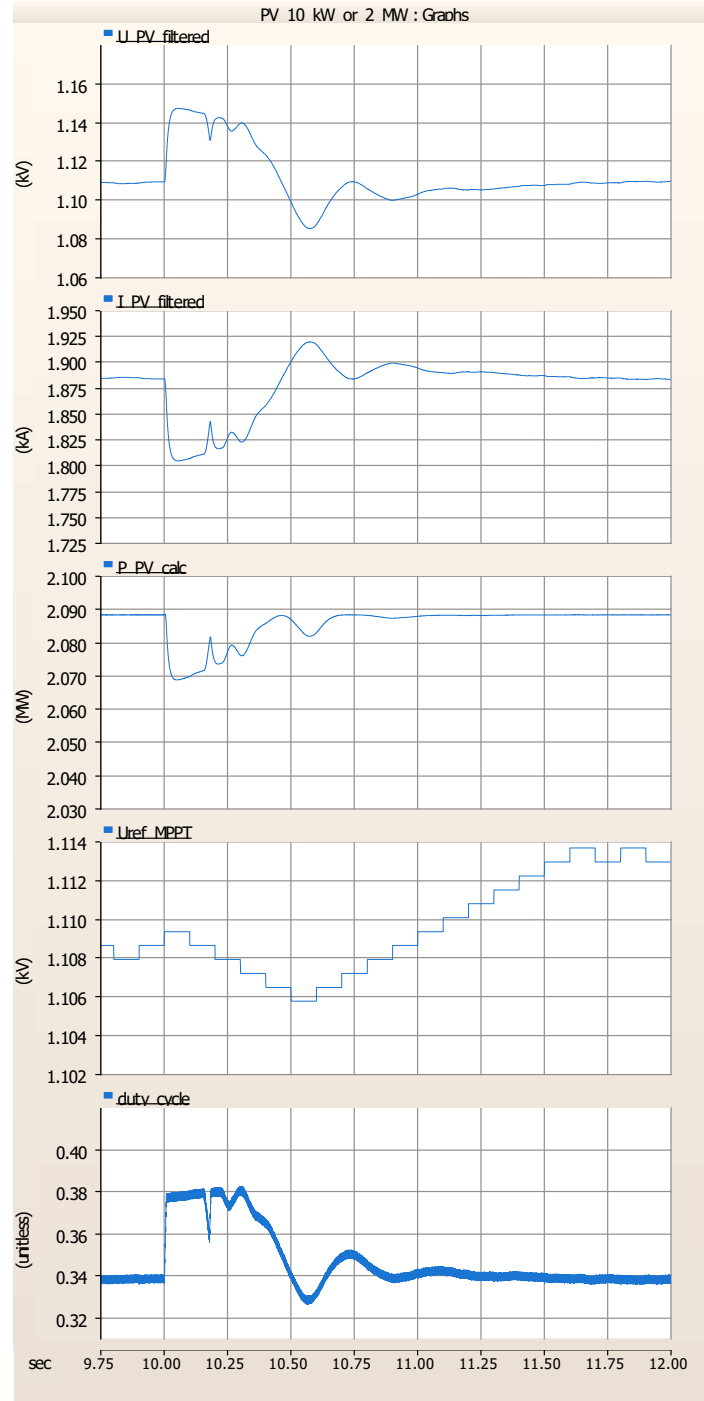
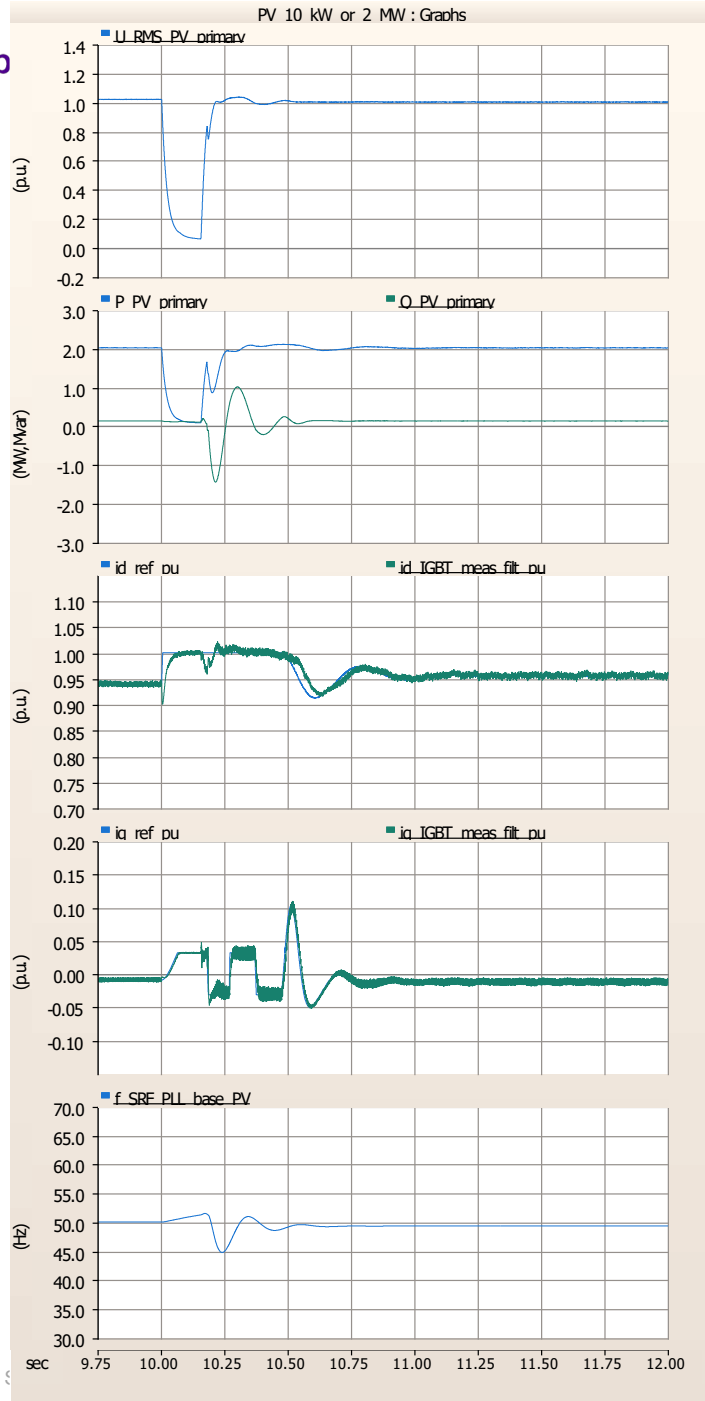
- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

Kuvaajat näyttävät n. 10 sekunnin mittaisen ajanjakson



BESS.Coordinate transformations : Graphs





Johtopäätöksiä

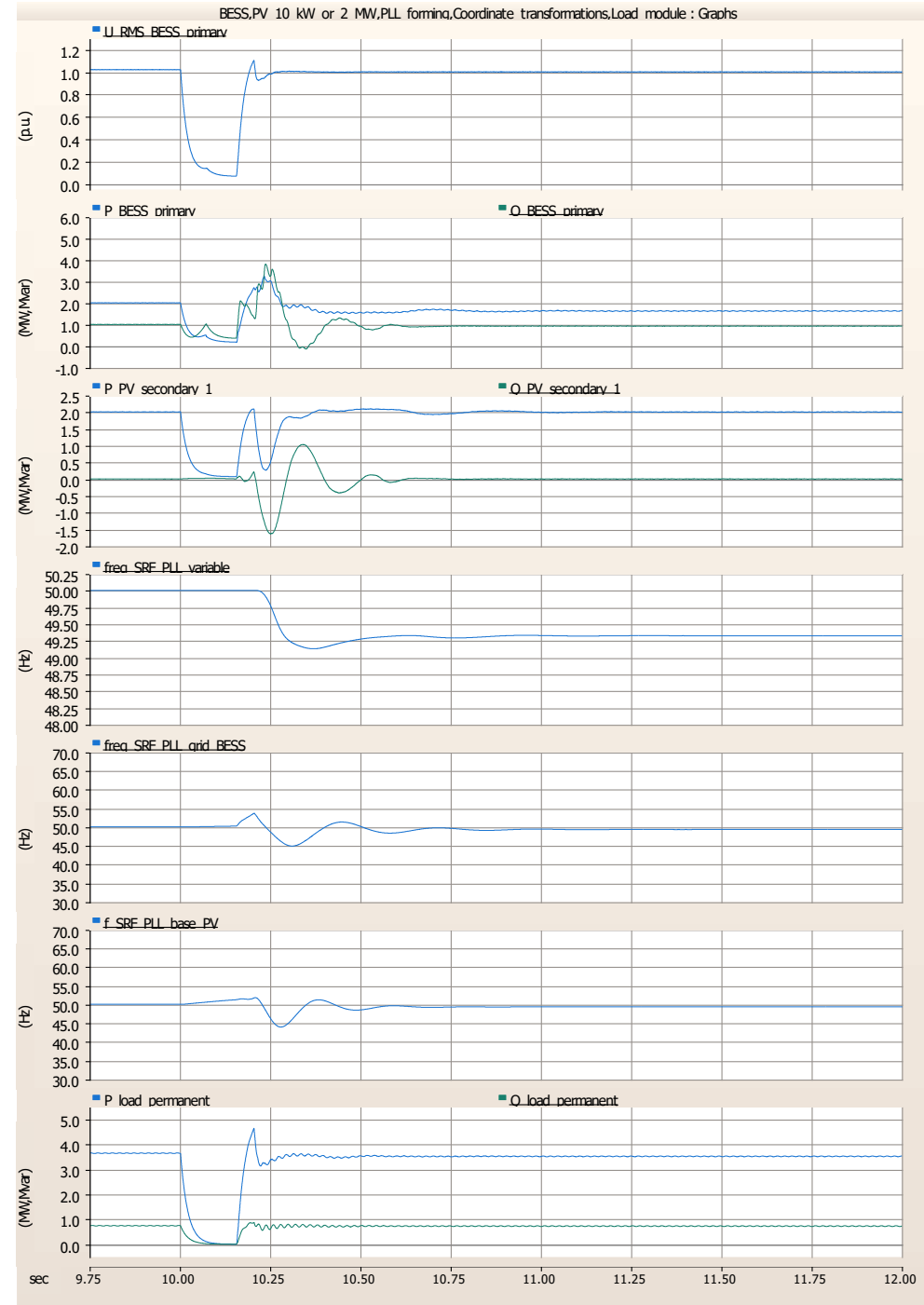
- Katkaisijan avautumisen jälkeen BESS:n toimintamoodissa on 25 ms:n viive, ennen kuin BESS siirtyy grid-feeding –moodista grid-forming –moodiin
- Tämän 25 ms:n aikana BESS pyrkii syöttämään ohjearvotehot (2.0 MW ja 1.0 Mvar) verkkoon, mutta ei tähän käytännössä pysty, koska jäännösjännite on pieni (n. 10 %) ja BESS toimii maksimivirtarajallaan
- Tiedonsiirtoviiveen aikana taustaverkkoa ei ole eikä BESS ole vielä muodostanut verkkoa
- Tämän tiedonsiirtoviiveen / aikajakson aikana mikroverkon toiminta on lähtökohtaisesti hyvin epästabiili / labiili
- BESS käytännössä tahdistuu omiin jännitteihinsä ilman, että PLL:n säätöpiirissä olisi negatiivista takaisinkytkentää → negatiivisella takaisinkytkennällä on positiivinen vaikutus stabiiliuteen
- Katkaisijan avausviiven aikana PV:n PLL pystyy jollain tarkkuudella seuraamaan jännitteen kulmaa jäännösjännitteen avulla (jännitekuoppa ei ole 100 %)
- Tämän viiveen ja uudelleentahdistumisen aikana PLL:n ulostulossa on voimakas, lyhytkestoinen transientti, joka näkyy etenkin PV:n hyvin voimakkaina loistehovärähtelyinä
- PV:n vaihelukko pystyy synkronoitumaan BESS:n muodostamiin jännitteisiin nopeasti, jolloin PV:n pätö- ja loistehot tasaantuvat pian saarekoitumisen jälkeen

Tarkastelukokonaisuudet ja niiden perusteet:

- Kasvatetaan BESS:n tiedonsiirtoviivettä

B: Saarekoituminen 1b – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

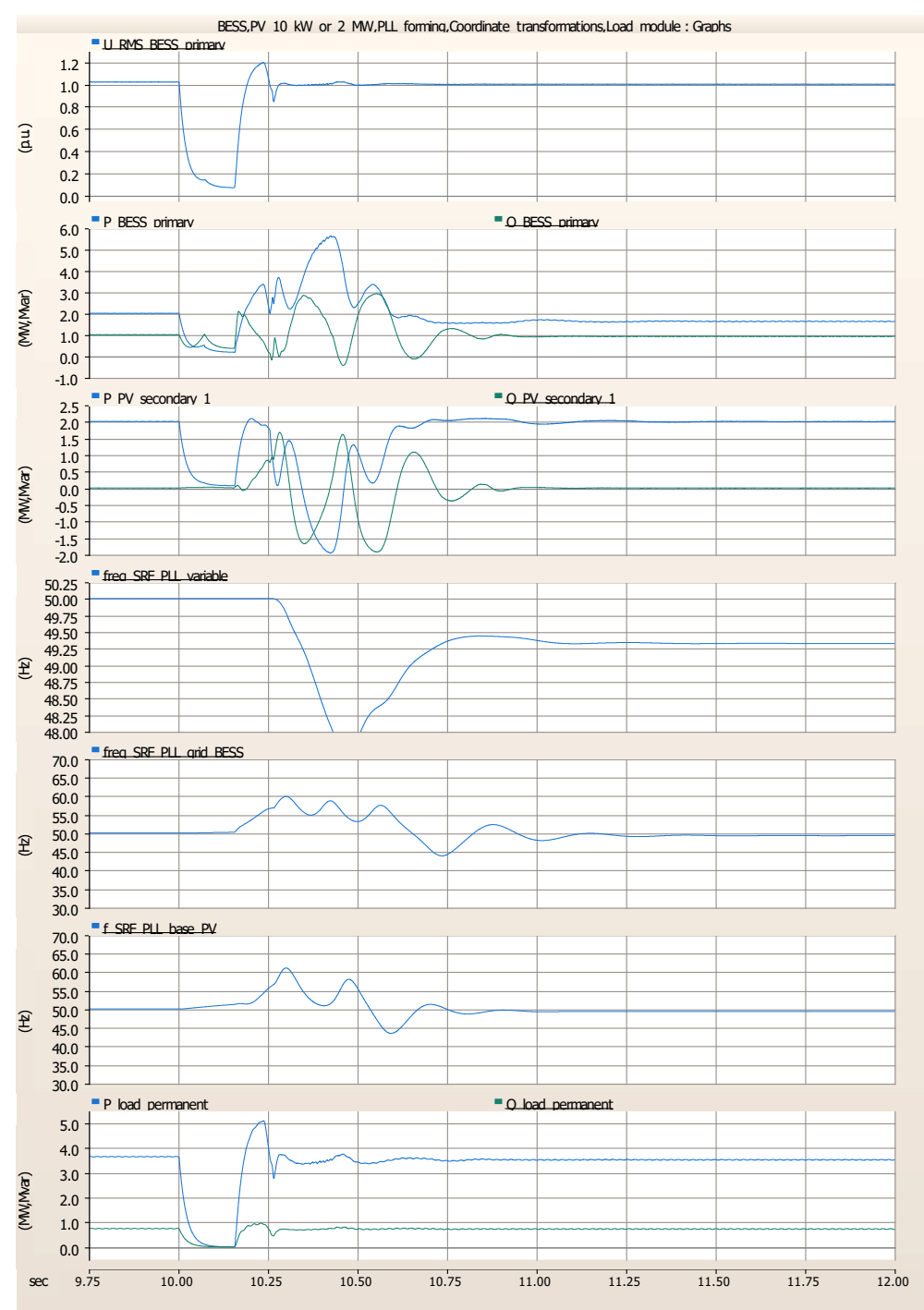
- Katkaisijan avausviive: 150 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 50 ms
- BESS:n tehot 2 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

B: Saarekoituminen 1b – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

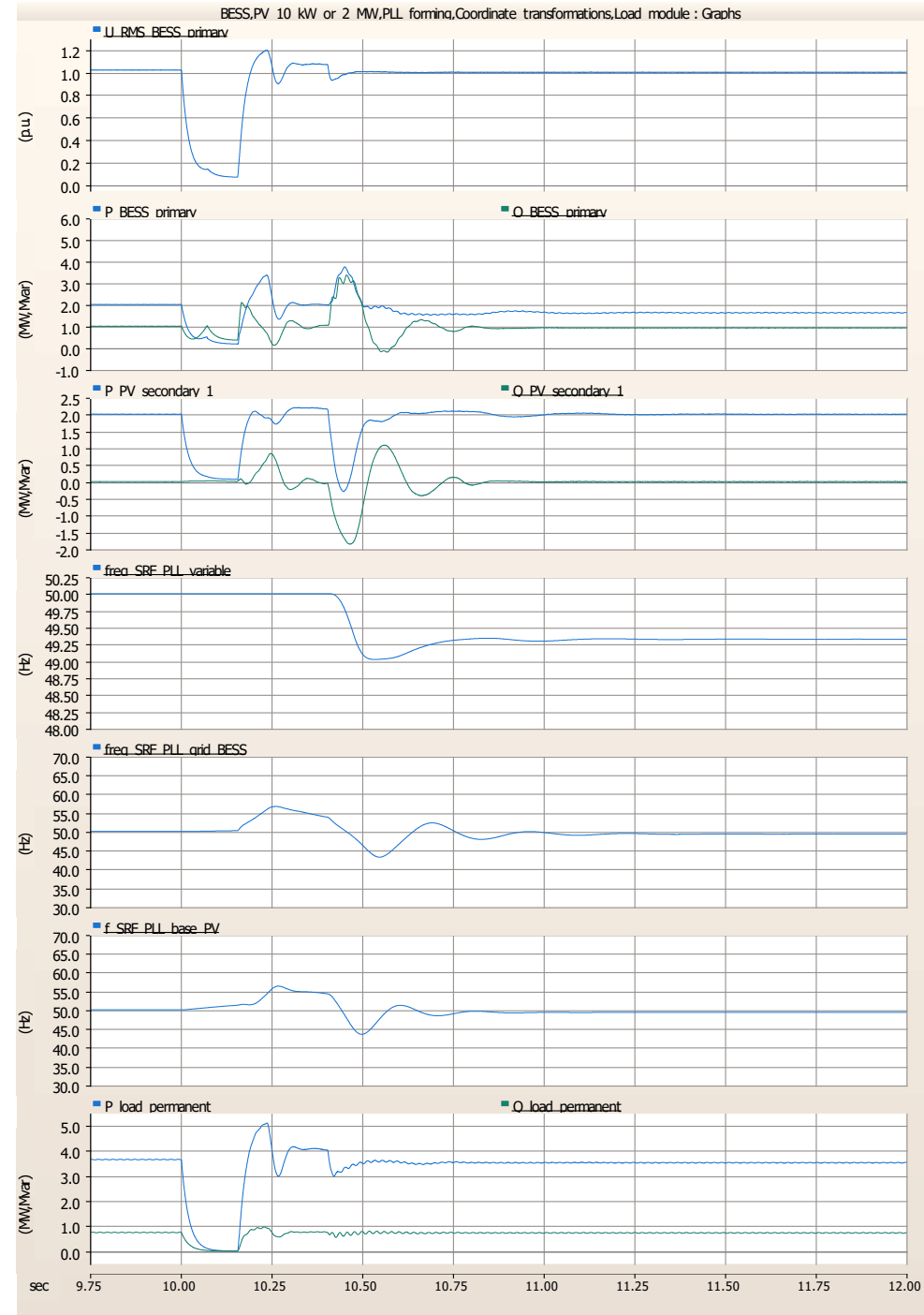
- Katkaisijan avausviive: 150 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 100 ms
- BESS:n tehot 2 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

B: Saarekoituminen 1b – vain tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

- Katkaisijan avausviive: 150 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 250 ms
- BESS:n tehot 2 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar

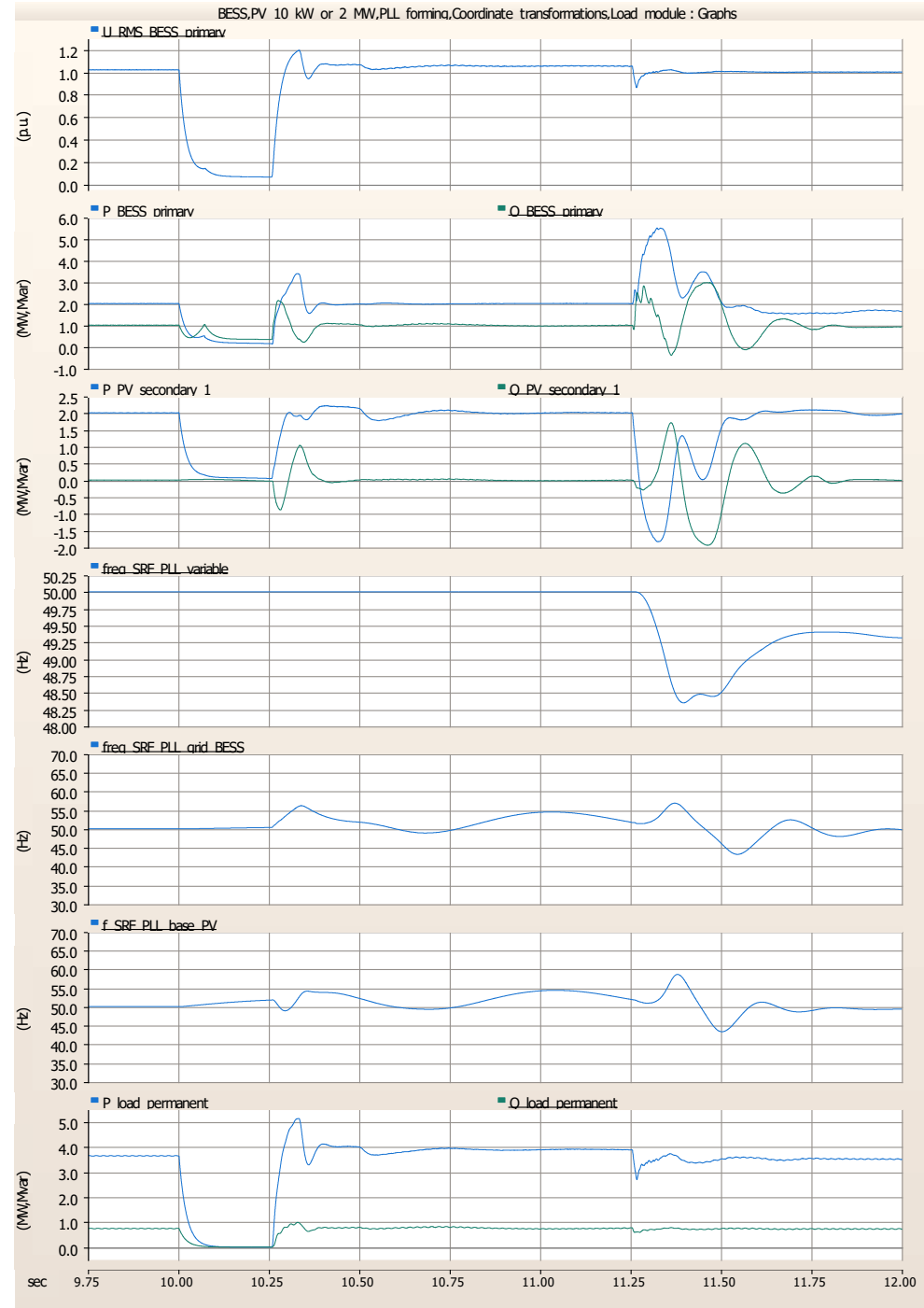


- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

B: Saarekoituminen 1b – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

- Katkaisijan avausviive: 250 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 1000 ms
- BESS:n tehot 2 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar

- Tämän skenaarion pidemmät vasteet näytetään 4 kalvoa myöhemmin

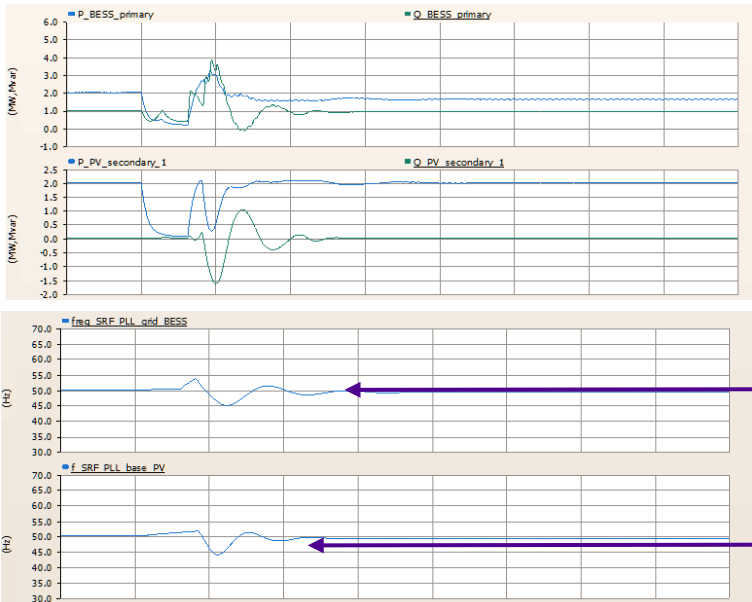


- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

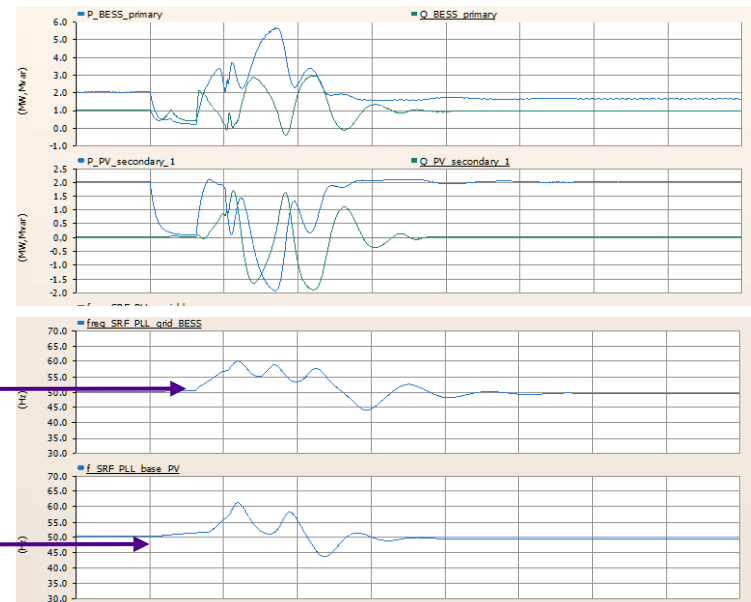
Johtopäätöksiä

- Tiedonsiirtoviiveen kasvattaminen 50 us:sta 100 us:iin huonontaa saarekoitumista
- Kuitenkin seuraavaa muutos 100 us:sta 250 us:iin näennäisesti parantaa tilannetta
- Tämä vahvistaa oletusta, että tiedonsiirtoviiveen aikana tapahtumat eivät välttämättä ole loogisia
 - Ei ainakaan siinä mielessä loogisia, kuin on totuttu asioita tarkastelemaan tahtikonemaailmassa
- Epärealistisen pitkän tiedonsiirtoviiveen (1000 ms) mikroverkko näyttäisi olevan stabiili (epärealistisen pitkä, jos tarkoituksena on saarekoituminen katkotta)
- Kuitenkin, kun BESS saa käskyn toimintatilan muutokseen 1000 ms:n jälkeen, mikroverkossa näkyvät voimakkaat teho- ja jännitevärähtelyt
- Syitä tehovärähtelyjen kasvulle voi yrittää hakea esim. BESS:n ja PV:n PLL:n vasteista: vasemmalla 50 ms:n viiveen tulokset, oikealla 100 ms:n viiveen tulokset

50 ms:n
tiedonsiirtoviive



100 ms:n
tiedonsiirtoviive



Johtopäätöksiä

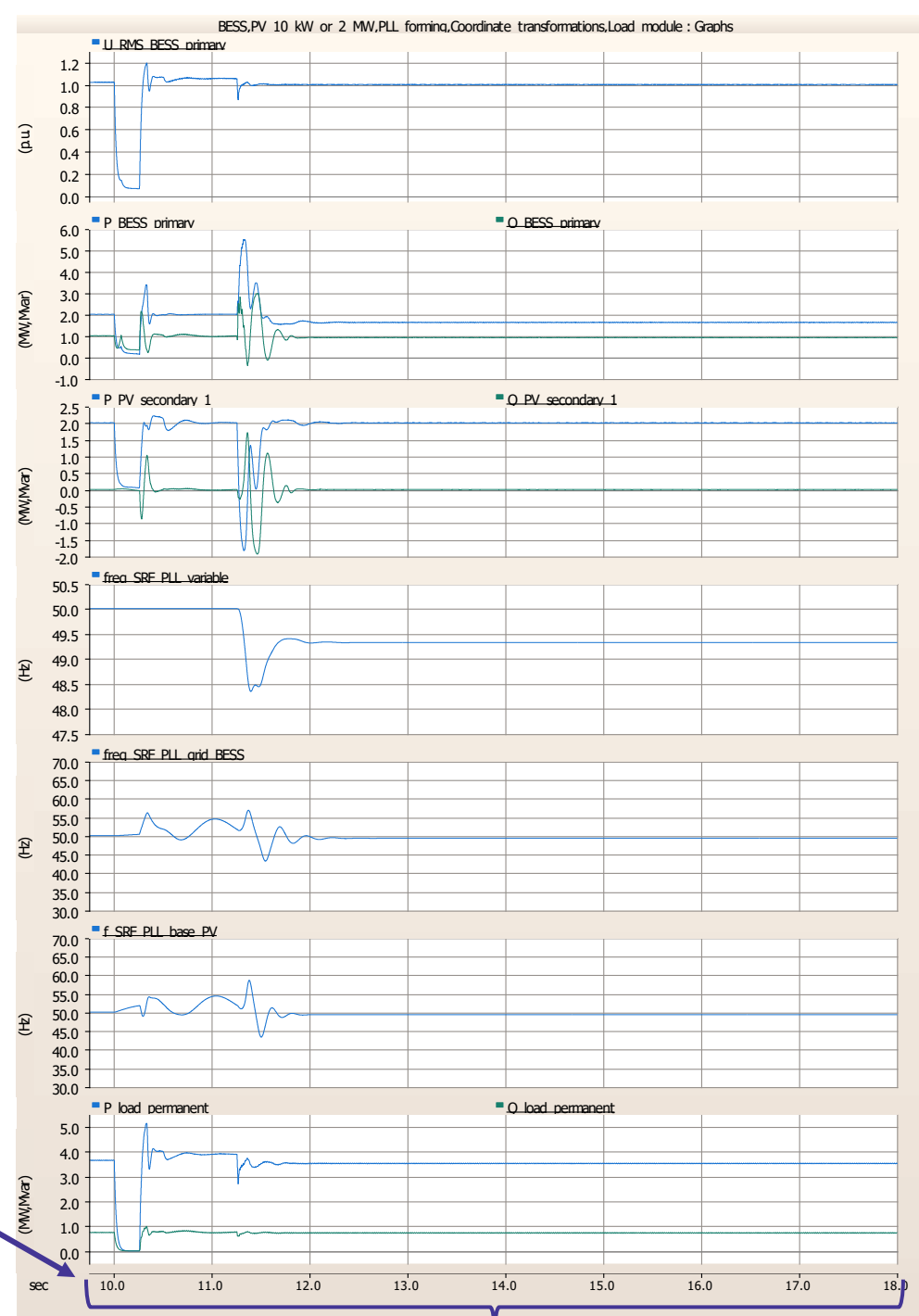
- Kysymyksessä ei välttämättä kuitenkaan ole PLL:sta johtuva varsinainen mittausvirhe
- Tiedonsiirtoviiveen aikana näyttää olevan kontrolloimaton jakso mikroverkossa, jonka aikana ”kukaan ei tiedä mitä tapahtuu”
- Yksi ratkaisu voisi olla, että vähintään yhden tuotantoyksikön mikroverkossa pitäisi sisältää ”inertian (hitausmomentin) emulointi”, jolloin tehotasapaino määrää taajuuden tiedonsiirtoviiveen aikanakin
- Yo. ei todennäköisesti ole kuitenkaan helppo tapa, koska inertian emuloinnilla varustetun tuotantoyksikön täytyy mitatuista jännitteistä ja virroista laskea pätö- ja loistehot
- Todellisten tehojen laskenta nopeasti ja riittävän luotettavasti esim. vikatilanteissa on vaikeaa
- Muita ratkaisujakin varmasti etsitään

Johtopäätöksiä

- Seuraavalla kalvolla vielä pidemmältä ajanjaksolta vasteet, kun katkaisijan avausviive on 250 ms (ei 150 ms) ja tiedonsiirtoviive 1000 ms
- Katkaisijan avausviive ei näytä vaikuttavan stabiloitumiseen
- On huomattava, että nyt taustaverkkona on taajuuden osalta täysin jäykkä Thevenin jännitelähde
- Oikeasti kyseinen taustaverkko pitää sisällään tahtigeneraattoreita ja muita tuotantoyksiköitä
 - Tällöin taajuus muuttuu ja myös yliaallot vaikuttavat PLL:n toimintaan
 - Myös jännite muuttuu (voi muuttua) enemmän jännitesäätäjien hitauden takia

B: Saarekoituminen 1b – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

- Katkaisijan avausviive: 250 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 1000 ms
- BESS:n tehot 2 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

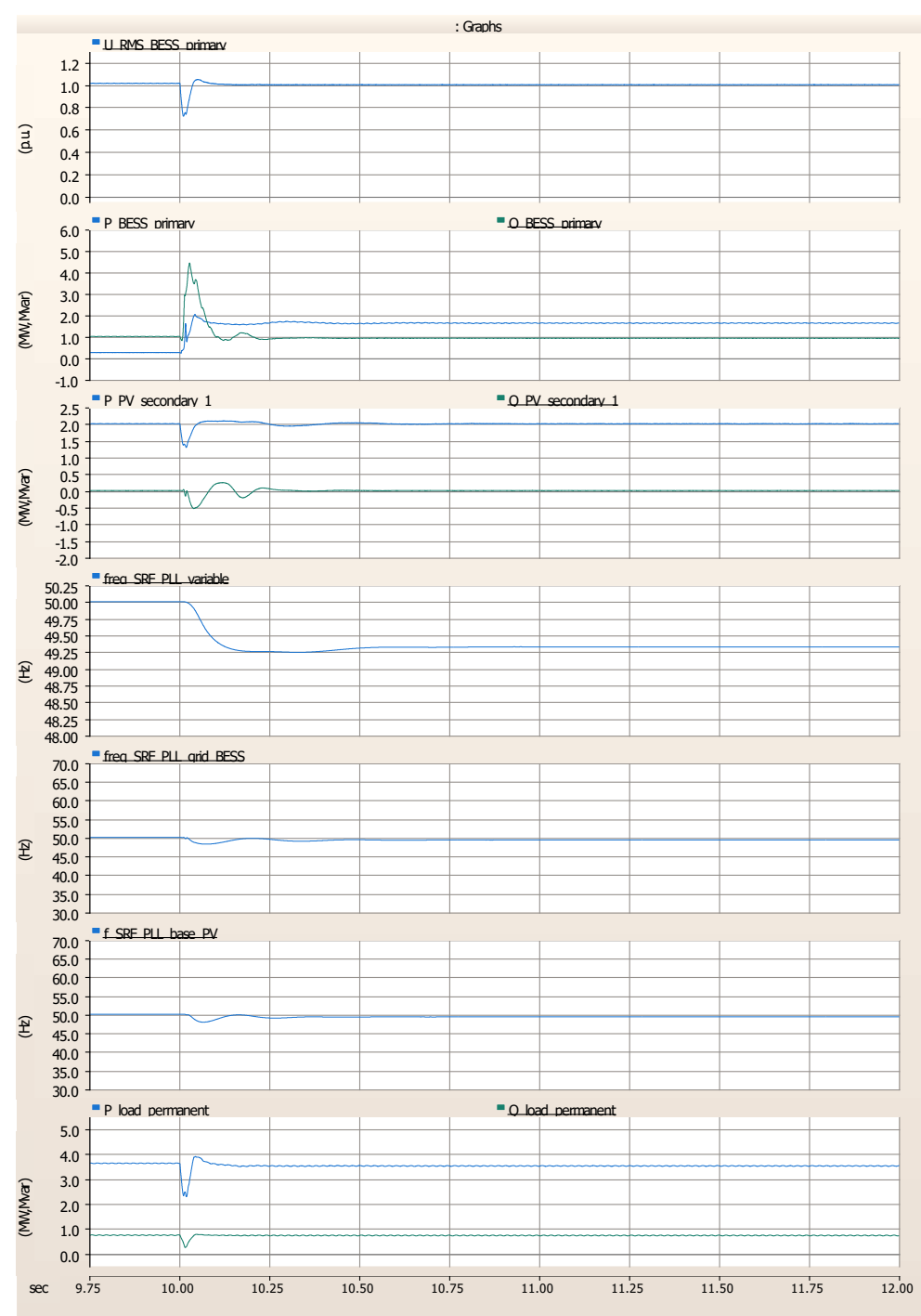
Kuvaajat näyttävät n. 10 sekunnin mittaisen ajanjakson

Tarkastelukokonaisuudet ja niiden perusteet:

- Muutetaan mikroverkon tehotasapainoa ennen vikaa ja sitä seuraavaa saarekoitumista
- Edellisissä 1a- ja 1b –tarkasteluissa tuotantoyksiköiden yhteenlaskettu teho ennen vikaa (4.0 MW) oli lähellä mikroverkon kokonaiskuormitusta (3.5 MW)
- Loistehon suhteen tilanne oli myös lähellä tasapainoa
- Ei viiveitä

B: Saarekoituminen 2a – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

- Katkaisijan avausviive: 0 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 0 ms
- BESS:n tehot 0.25 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar



← BESS:n ensiöjännite

← BESS:n pätö- ja loisteho

← PV:n pätö- ja loisteho

← BESS:n taajuuden ohjearvo

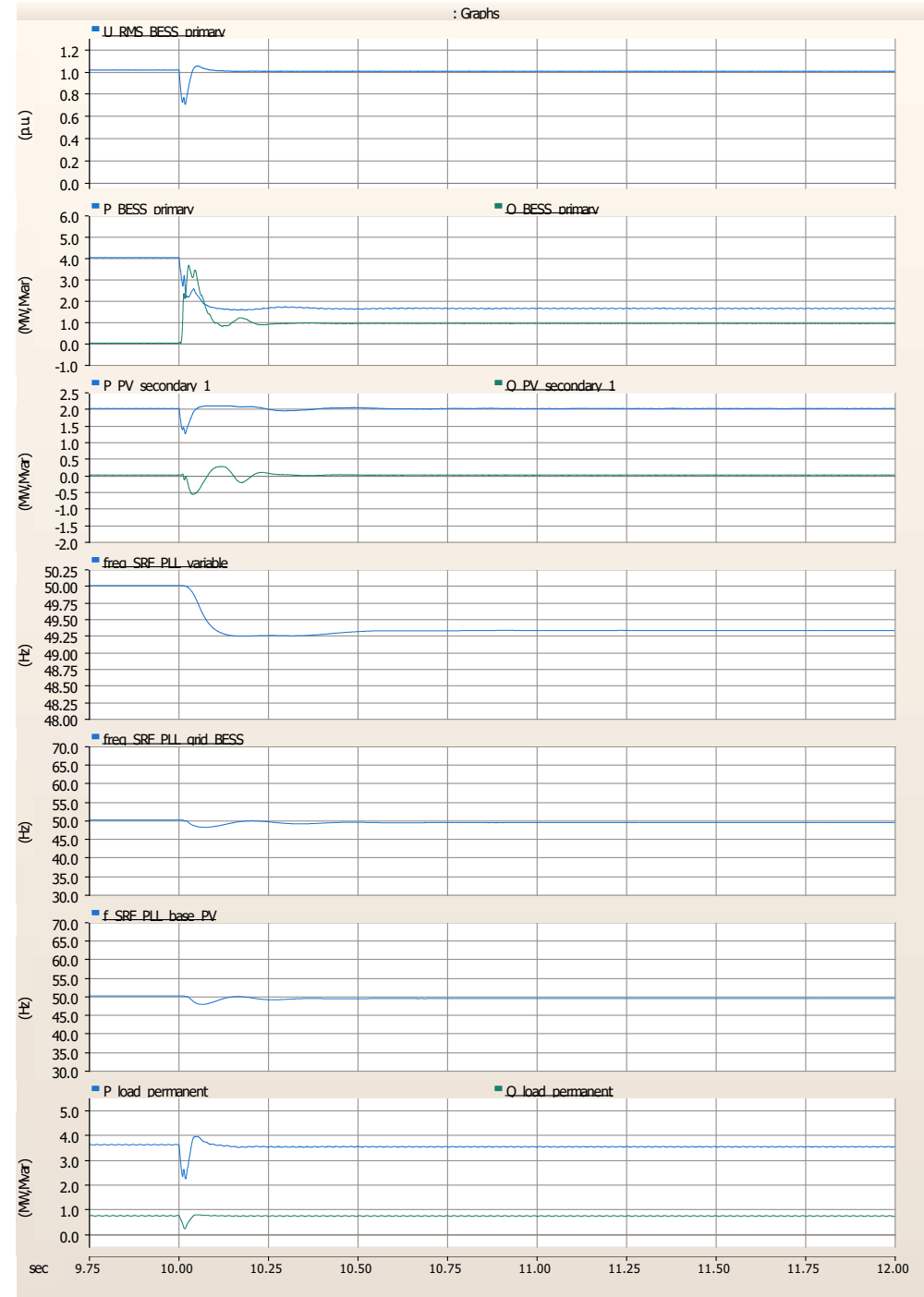
← BESS:n PLL:n mittaama taajuus

← PV:n PLL:n mittaama taajuus

← Kuormituksen pätö- ja loistehot

B: Saarekoituminen 3a – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

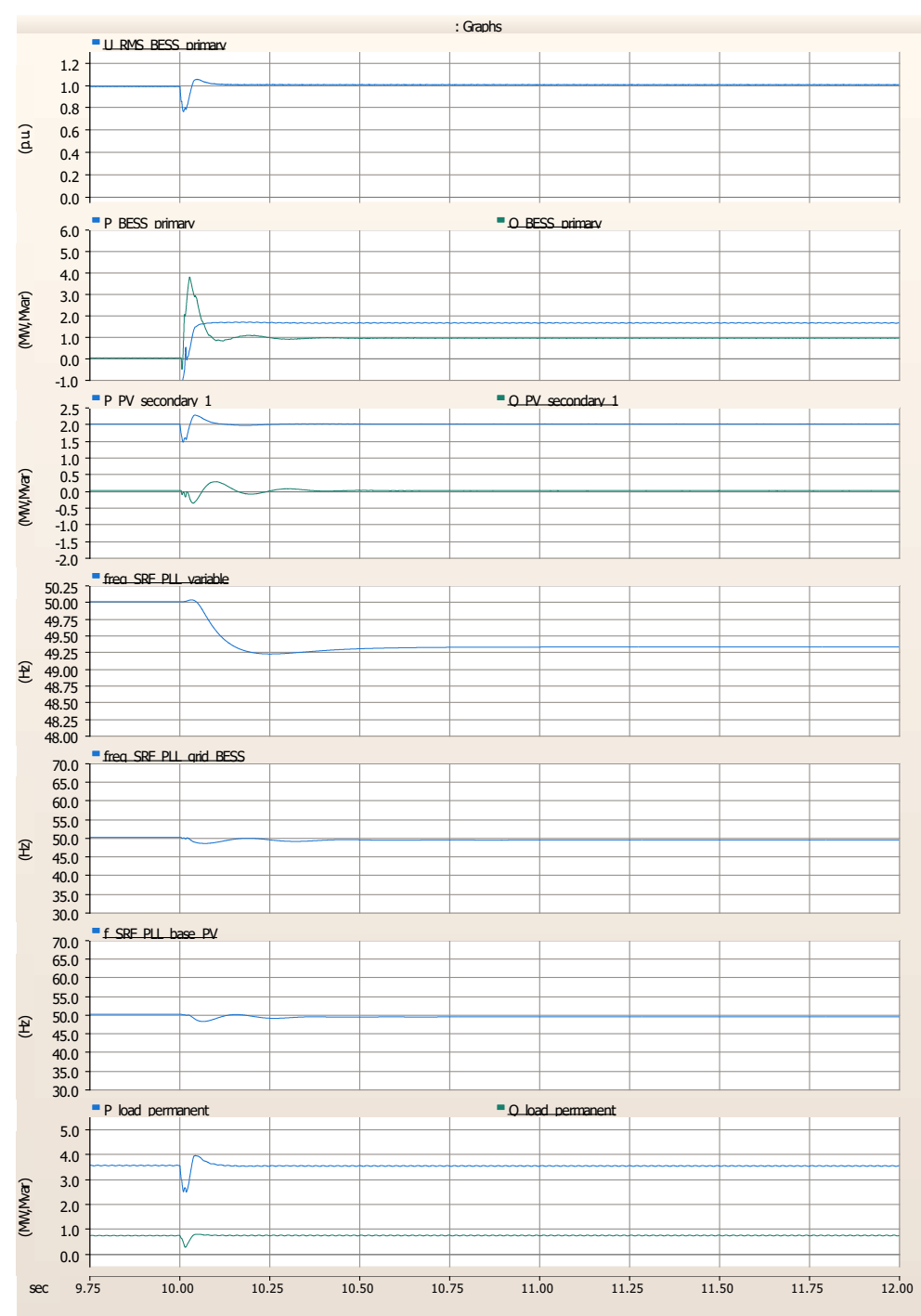
- Katkaisijan avausviive: 0 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 0 ms
- BESS:n tehot 4.0 MW / 0.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

B: Saarekoituminen 4a – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

- Katkaisijan avausviive: 0 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 0 ms
- BESS:n tehot -2.0 MW / 0.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar



← BESS:n ensiöjännite

← BESS:n pätö- ja loisteho

← PV:n pätö- ja loisteho

← BESS:n taajuuden ohjearvo

← BESS:n PLL:n mittaama taajuus

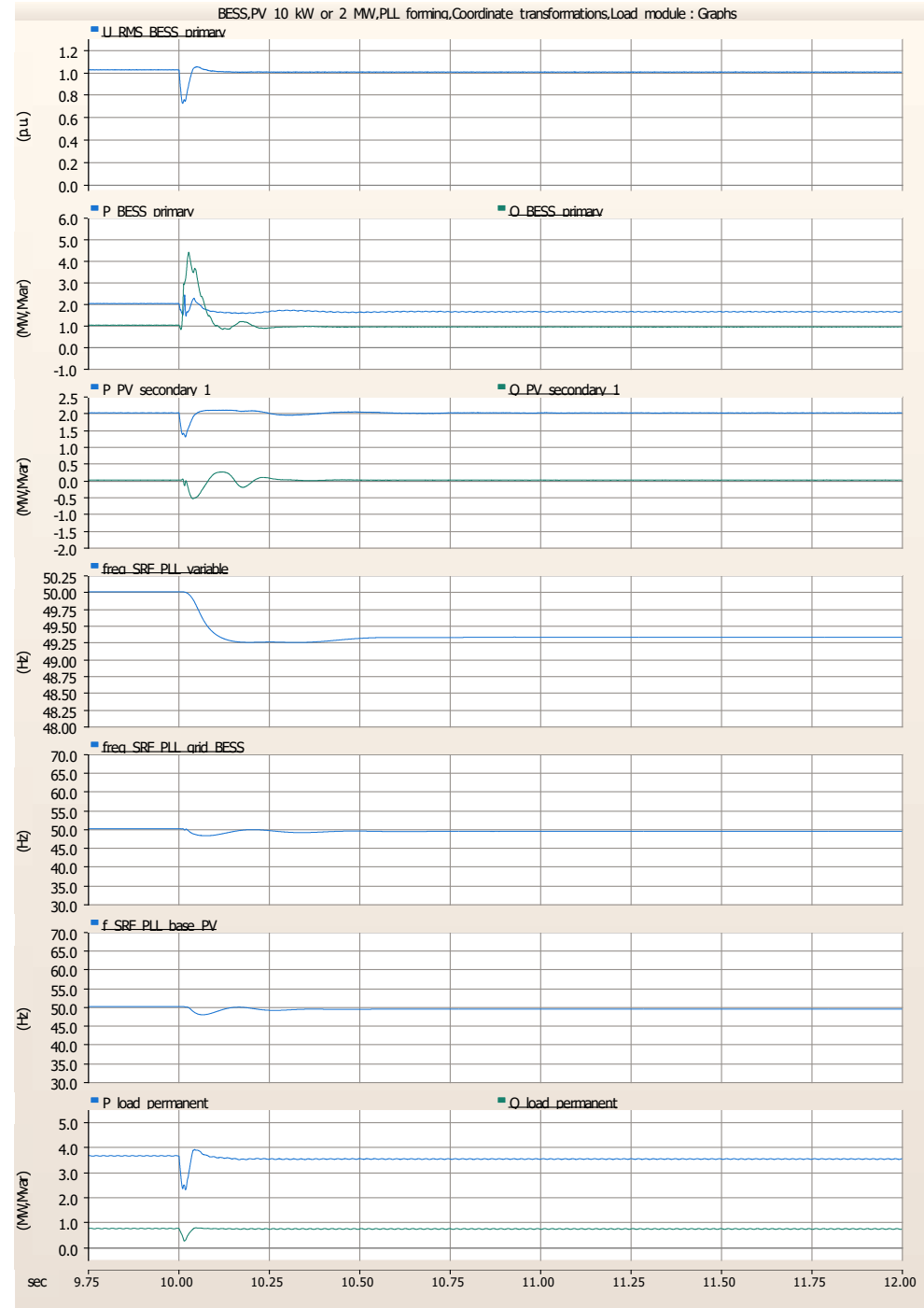
← PV:n PLL:n mittaama taajuus

← Kuormituksen pätö- ja loistehot

B: Saarekoituminen 1a – vain tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

- Katkaisijan avausviive: 0 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 0 ms
- BESS:n tehot 2 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar

➤ Tässä alkuperäisen tehotasapainon kanssa saarekoitusmismvasteet viiveettömässä tilanteessa vertailuksi



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

Johtopäätöksiä

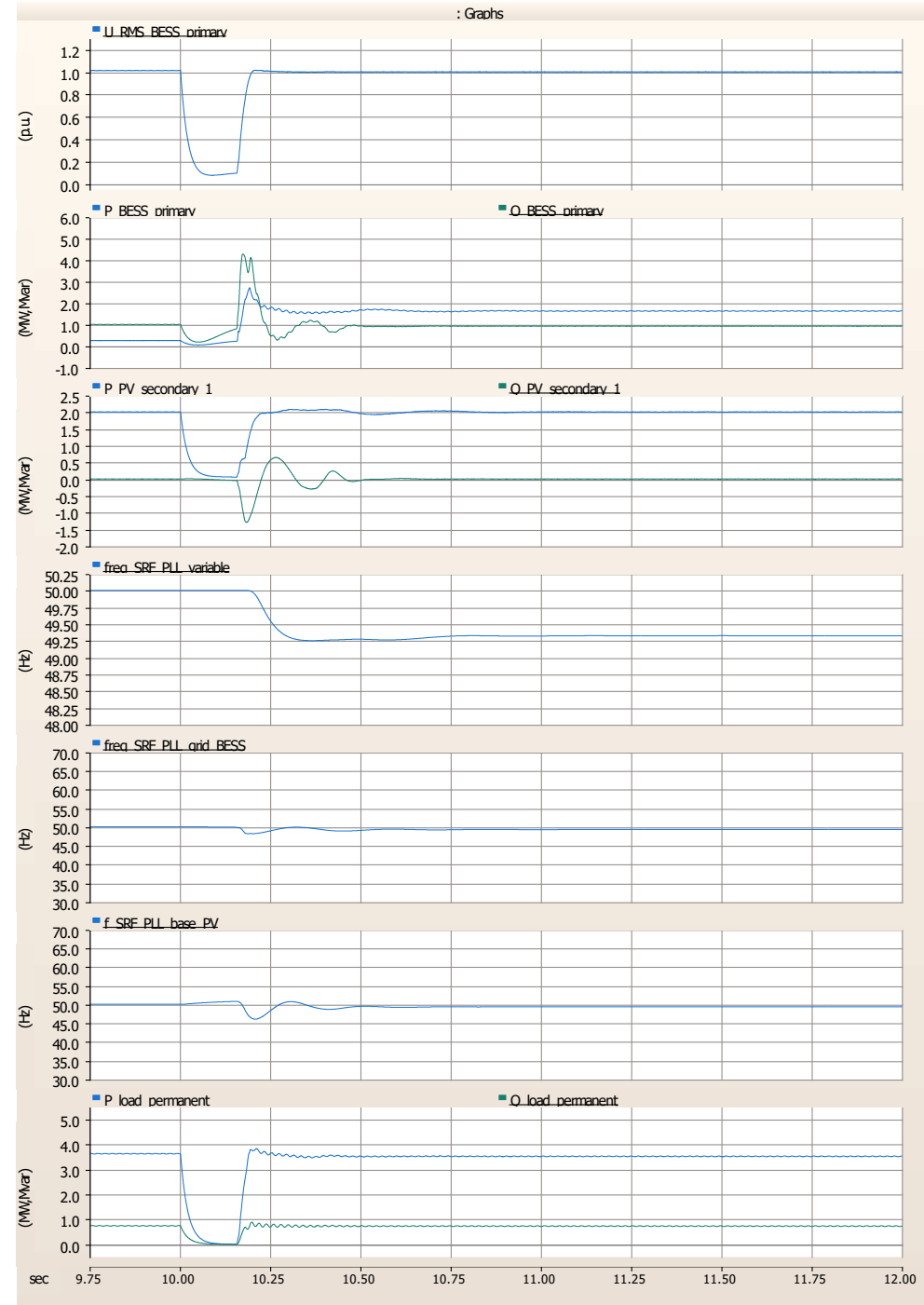
- Tehotasapainon muuttuminen viiveettömässä saarekoitumisessa ei näytä aiheuttavan merkittäviä muutoksia jännite- ja tehovasteisiin
- BESS on nopea, joka on tässä merkittävässä roolissa

Tarkastelukokonaisuudet ja niiden perusteet:

- On viiveitä
- Ensiksi on lyhyt tiedonsiirtoviive (25 ms)
- Ao. muuten samoin, kuin 1c
- Muutetaan mikroverkon tehotasapainoa ennen vikaa ja sitä seuraavaa saarekoitumista
- Edellisissä 1a- ja 1b –tarkasteluissa tuotantoyksiköiden yhteenlaskettu teho ennen vikaa (4.0 MW) oli lähellä mikroverkon kokonaiskuormitusta (3.5 MW)
- Loistehon suhteen tilanne oli myös lähellä tasapaino

B: Saarekoituminen 1d – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

- Katkaisijan avausviive: 150 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 25 ms
- BESS:n tehot 0.25 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar



← BESS:n ensiöjännite

← BESS:n pätö- ja loisteho

← PV:n pätö- ja loisteho

← BESS:n taajuuden ohjearvo

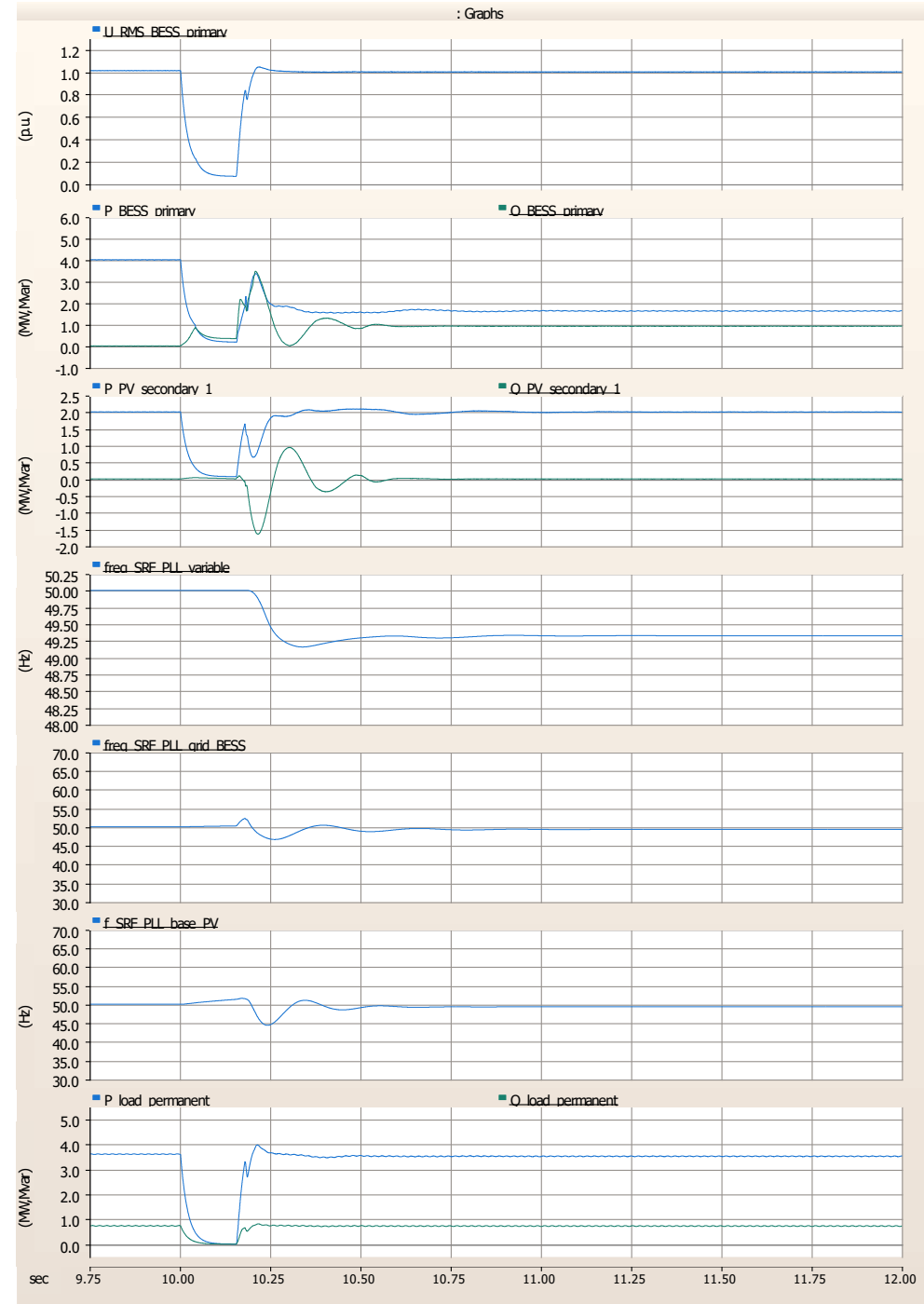
← BESS:n PLL:n mittaama taajuus

← PV:n PLL:n mittaama taajuus

← Kuormituksen pätö- ja loistehot

B: Saarekoituminen 1d – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

- Katkaisijan avausviive: 150 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 25 ms
- BESS:n tehot 4.0 MW / 0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0 Mvar



← BESS:n ensiöjännite

← BESS:n pätö- ja loisteho

← PV:n pätö- ja loisteho

← BESS:n taajuuden ohjearvo

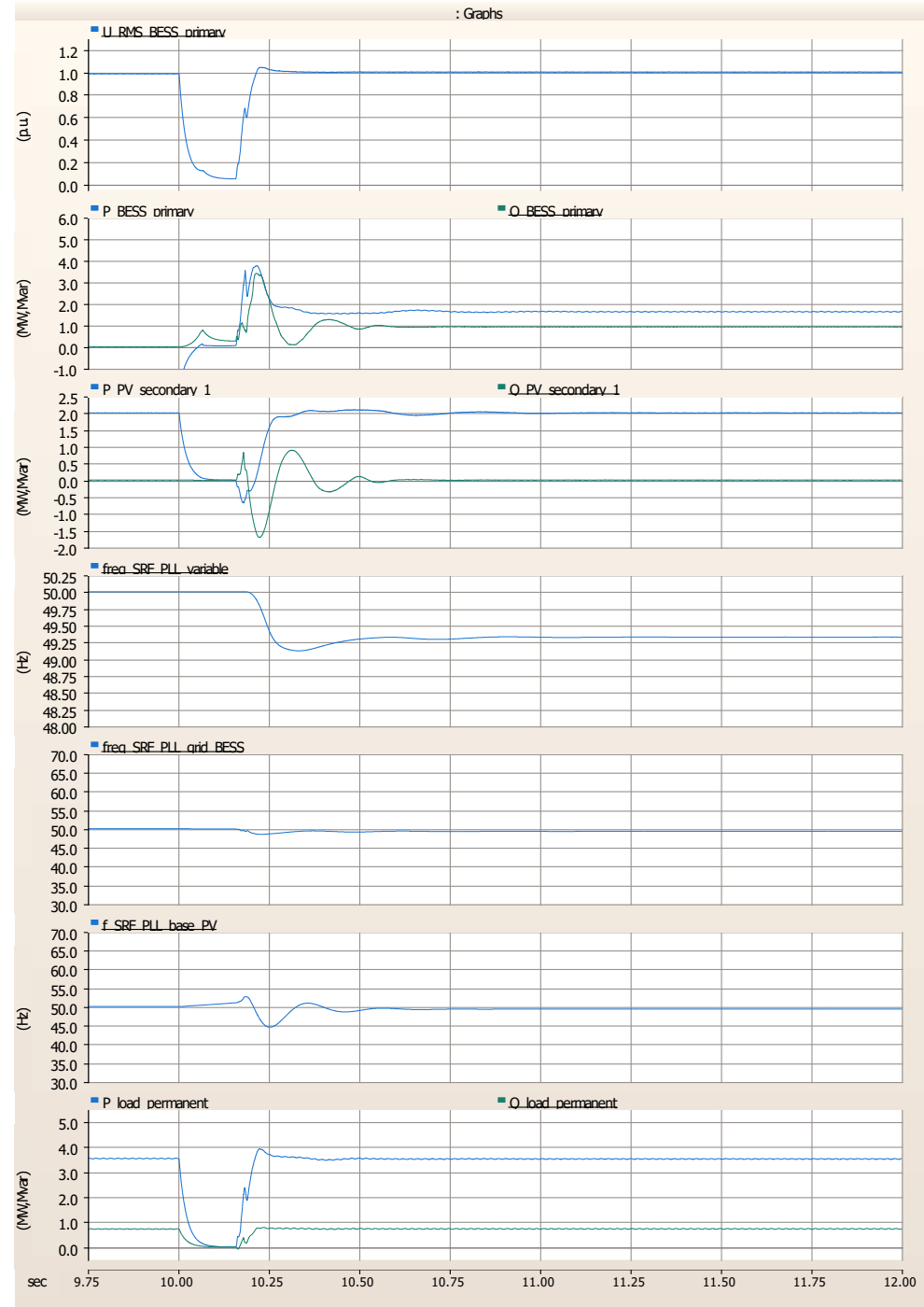
← BESS:n PLL:n mittaama taajuus

← PV:n PLL:n mittaama taajuus

← Kuormituksen pätö- ja loistehot

B: Saarekoituminen 1d – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

- Katkaisijan avausviive: 150 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 25 ms
- BESS:n tehot -2.0 MW / 0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0 Mvar



← BESS:n ensiöjännite

← BESS:n pätö- ja loisteho

← PV:n pätö- ja loisteho

← BESS:n taajuuden ohjearvo

← BESS:n PLL:n mittaama taajuus

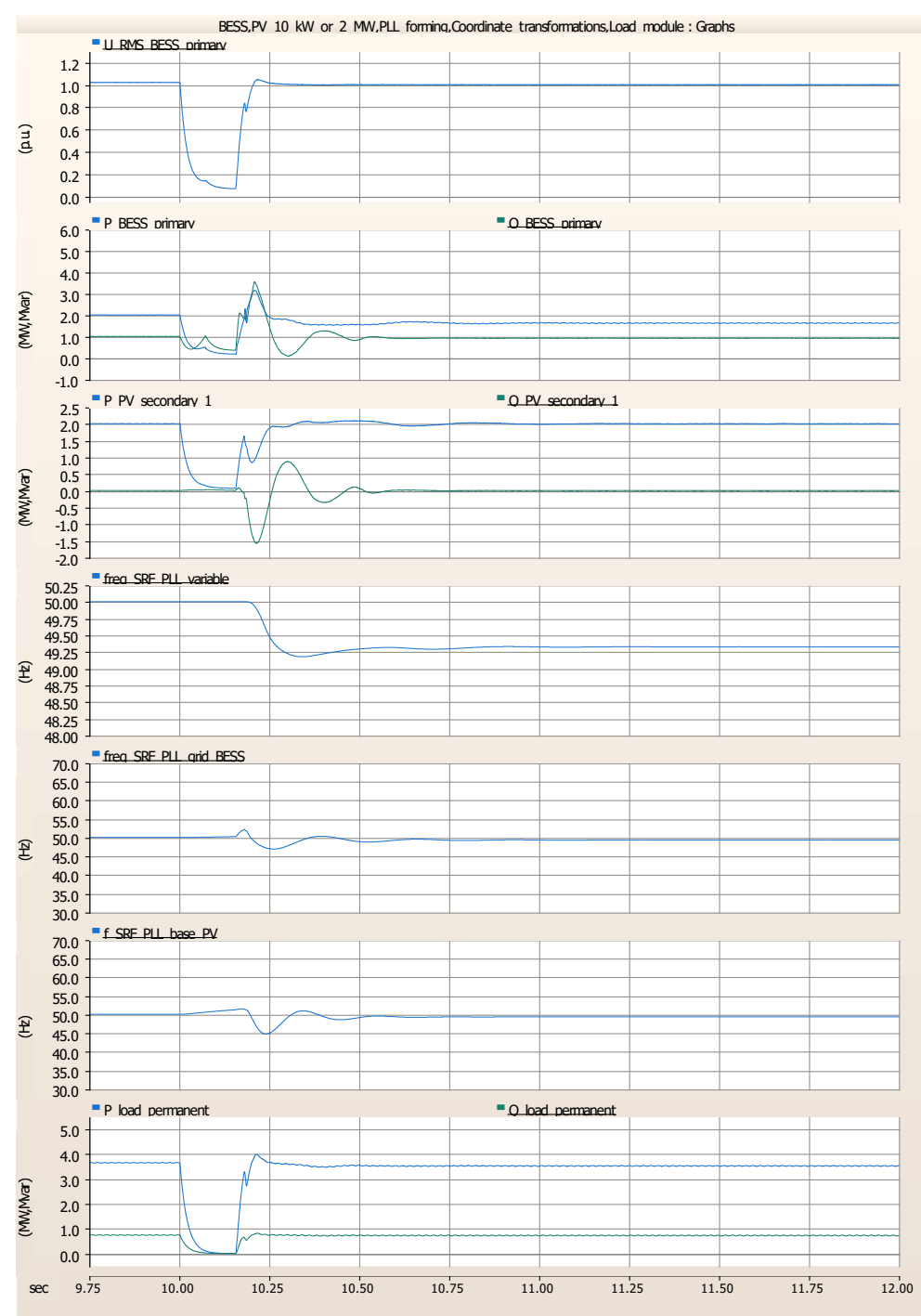
← PV:n PLL:n mittaama taajuus

← Kuormituksen pätö- ja loistehot

B: Saarekoituminen 1b – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

- Katkaisijan avausviive: 150 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 25 ms
- BESS:n tehot 2.0 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar

- Tässä alkuperäisen tehotasapainon kanssa saarekoitusmismvasteet 25 ms:n viiveen kanssa vertailuksi



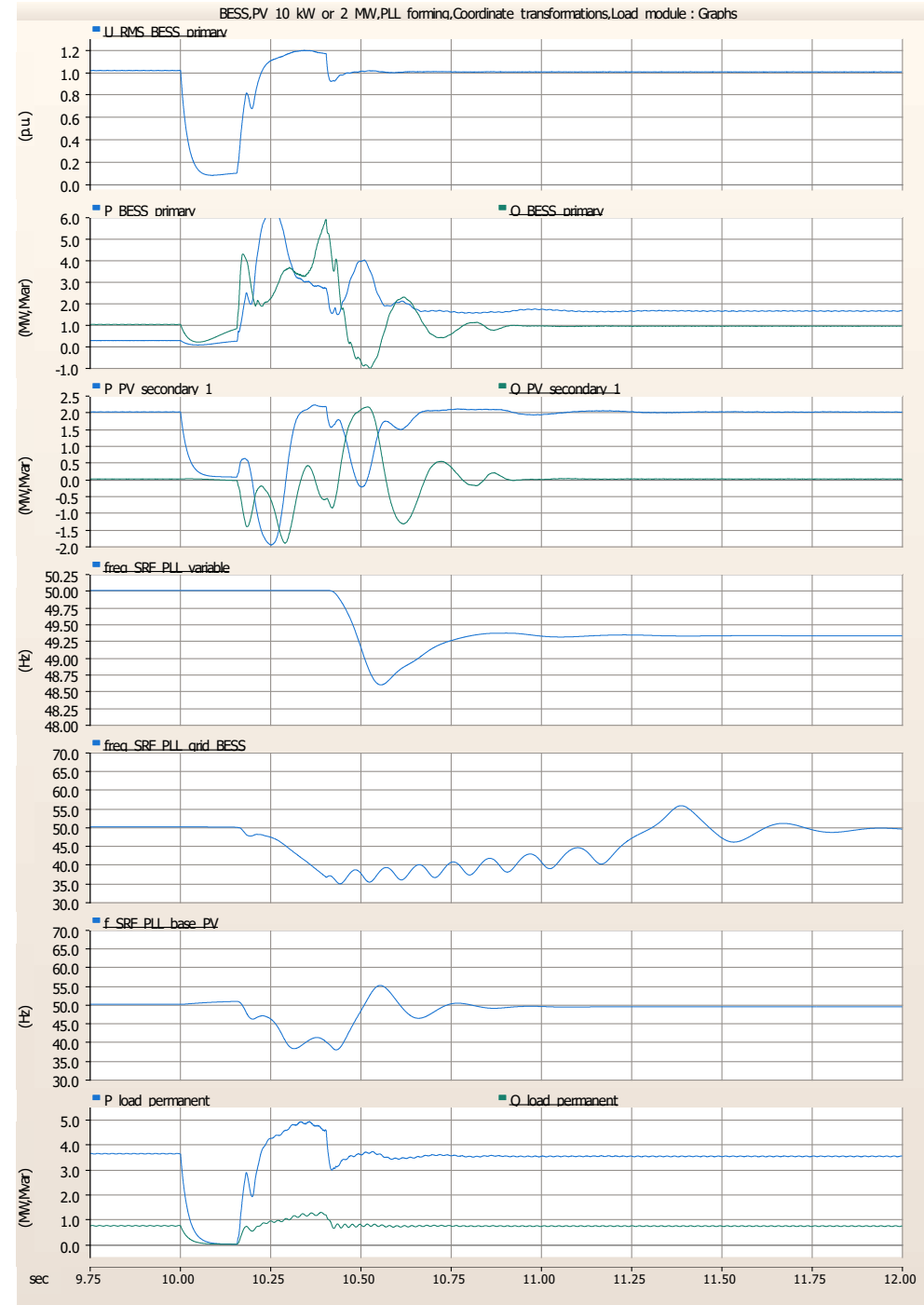
- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

Tarkastelukokonaisuudet ja niiden perusteet:

- On viiveitä
- Nyt pitkäkö tiedonsiirtoviive (150 ms)
- Ao. muuten samoin, kuin 1c
- Muutetaan mikroverkon tehotasapainoa ennen vikaa ja sitä seuraavaa saarekoitumista
- Edellisissä 1a- ja 1b –tarkasteluissa tuotantoyksiköiden yhteenlaskettu teho ennen vikaa (4.0 MW) oli lähellä mikroverkon kokonaiskuormitusta (3.5 MW)
- Loistehon suhteen tilanne oli myös lähellä tasapaino

B: Saarekoituminen 1d – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

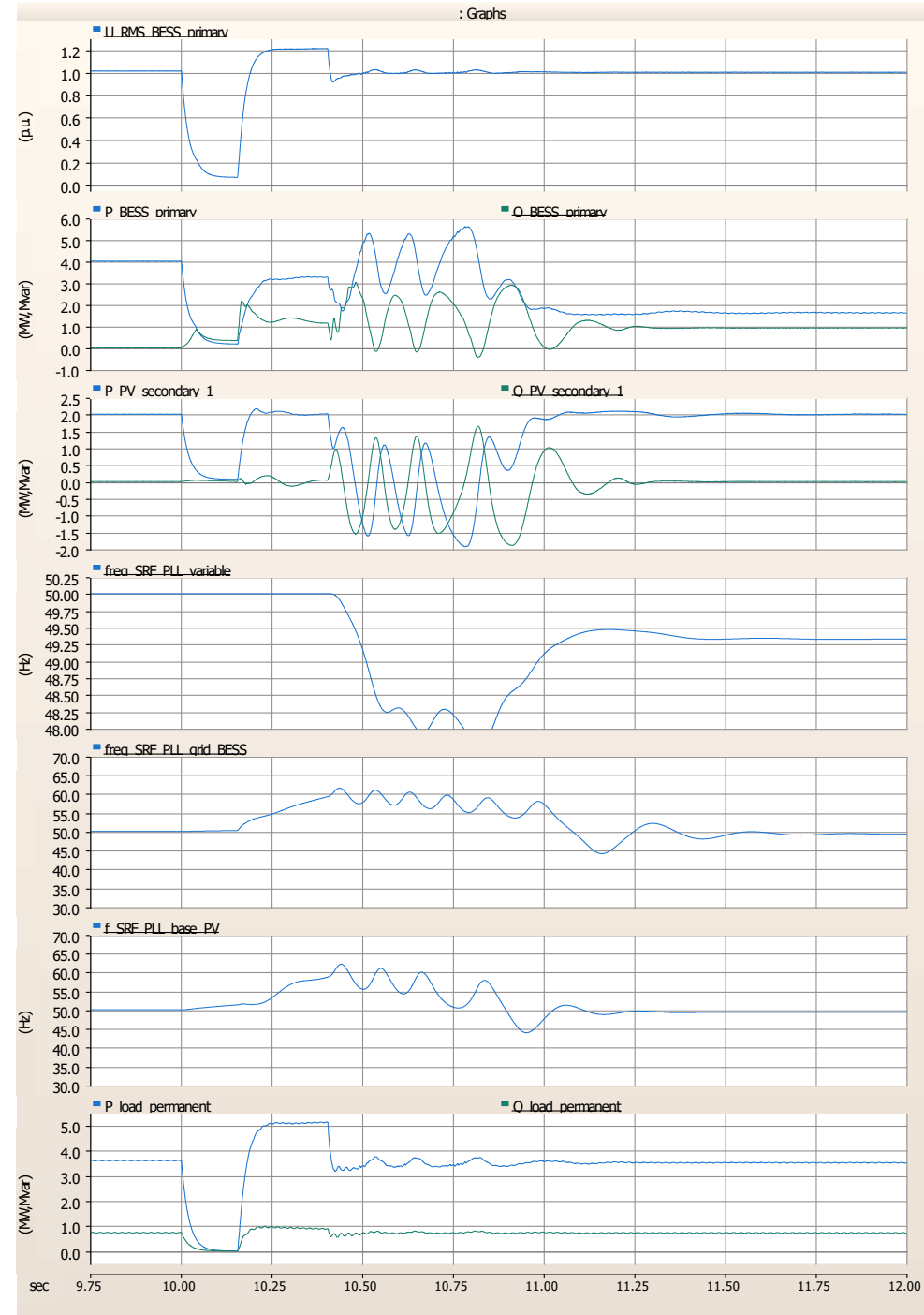
- Katkaisijan avausviive: 150 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 250 ms
- BESS:n tehot 0.25 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

B: Saarekoituminen 1d – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

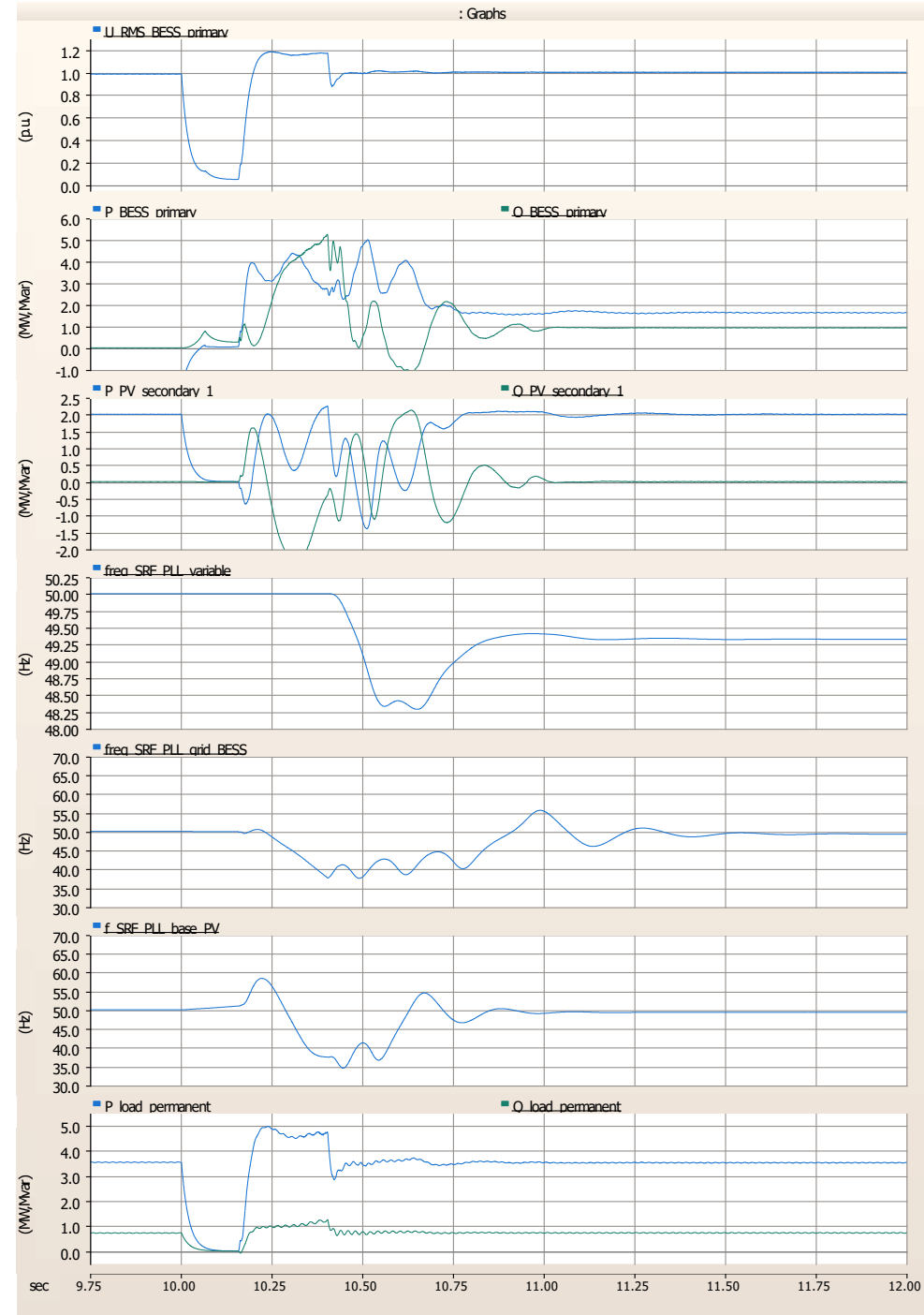
- Katkaisijan avausviive: 150 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 250 ms
- BESS:n tehot 4.0 MW / 0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0 Mvar



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

B: Saarekoituminen 1d – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

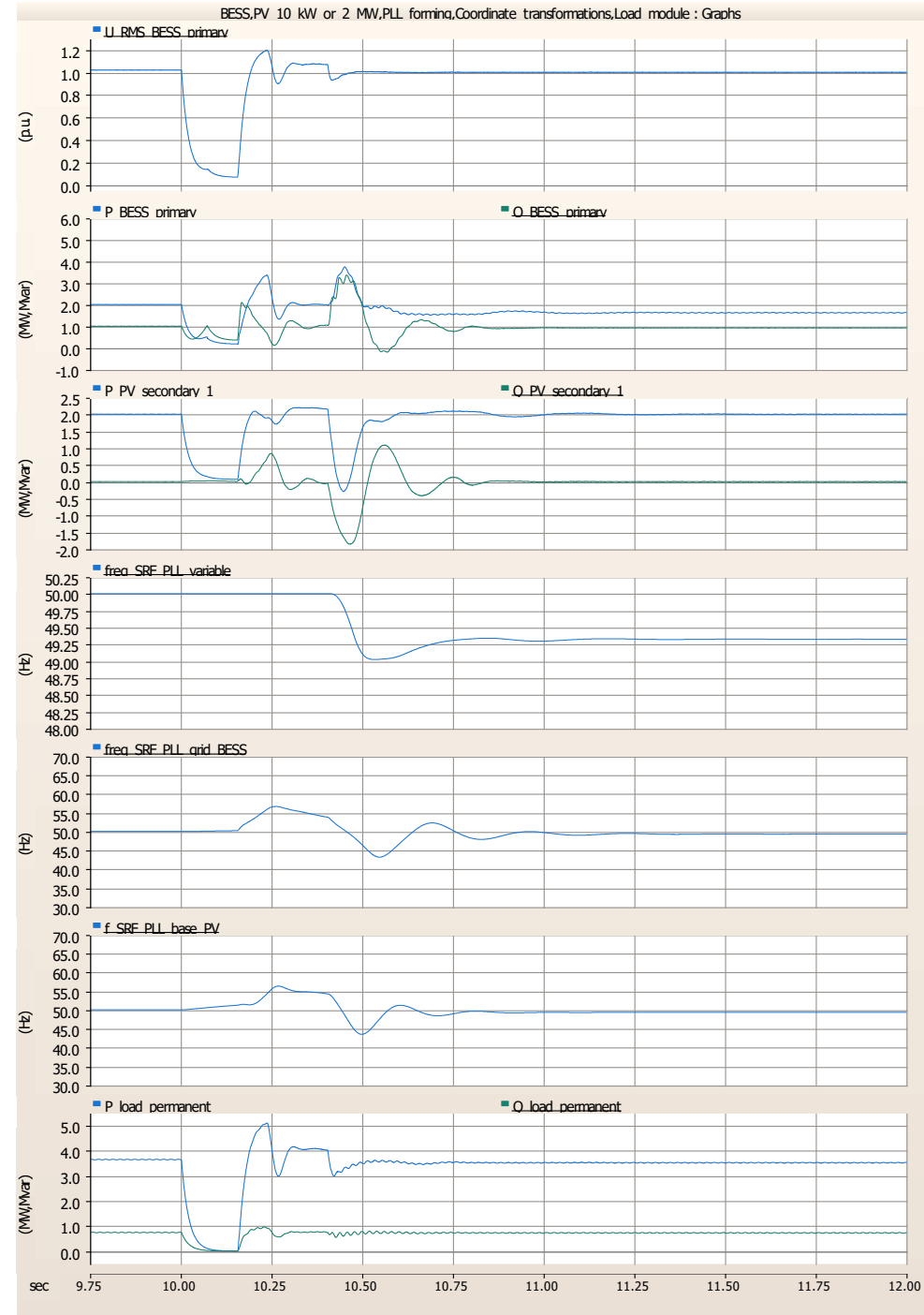
- Katkaisijan avausviive: 150 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 250 ms
- BESS:n tehot -2.0 MW / 0.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

B: Saarekoituminen 1b – vain tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

- Katkaisijan avausviive: 150 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 250 ms
- BESS:n tehot 2.0 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

Johtopäätöksiä

- Tehotasapainon muuttuminen, kun saarekoitumisessa on viiveitä, muuttaa vasteita merkittävästi
- Tämä pätee lähinnä, kun tiedonsiirtoviive on 250 ms
- 25 ms:n tiedonsiirtoviiveen aikana osa tehotasapainoista oli ehkä ”hieman parempia, toiset hieman huonompia”
 - Vaste-erot voivat olla hyvin pienistäkin syistä kiinni, eivätkä välttämättä loogisia
- Sen sijaan 250 ms:n tiedonsiirtoviiveen (pitkä aika), suuremman tehoepätasapainon ja voimakkaiden tehovärähtelyjen välillä näyttäisi olevan selvä korrelaatio
 - Todennäköisesti myös kausaliiteetti

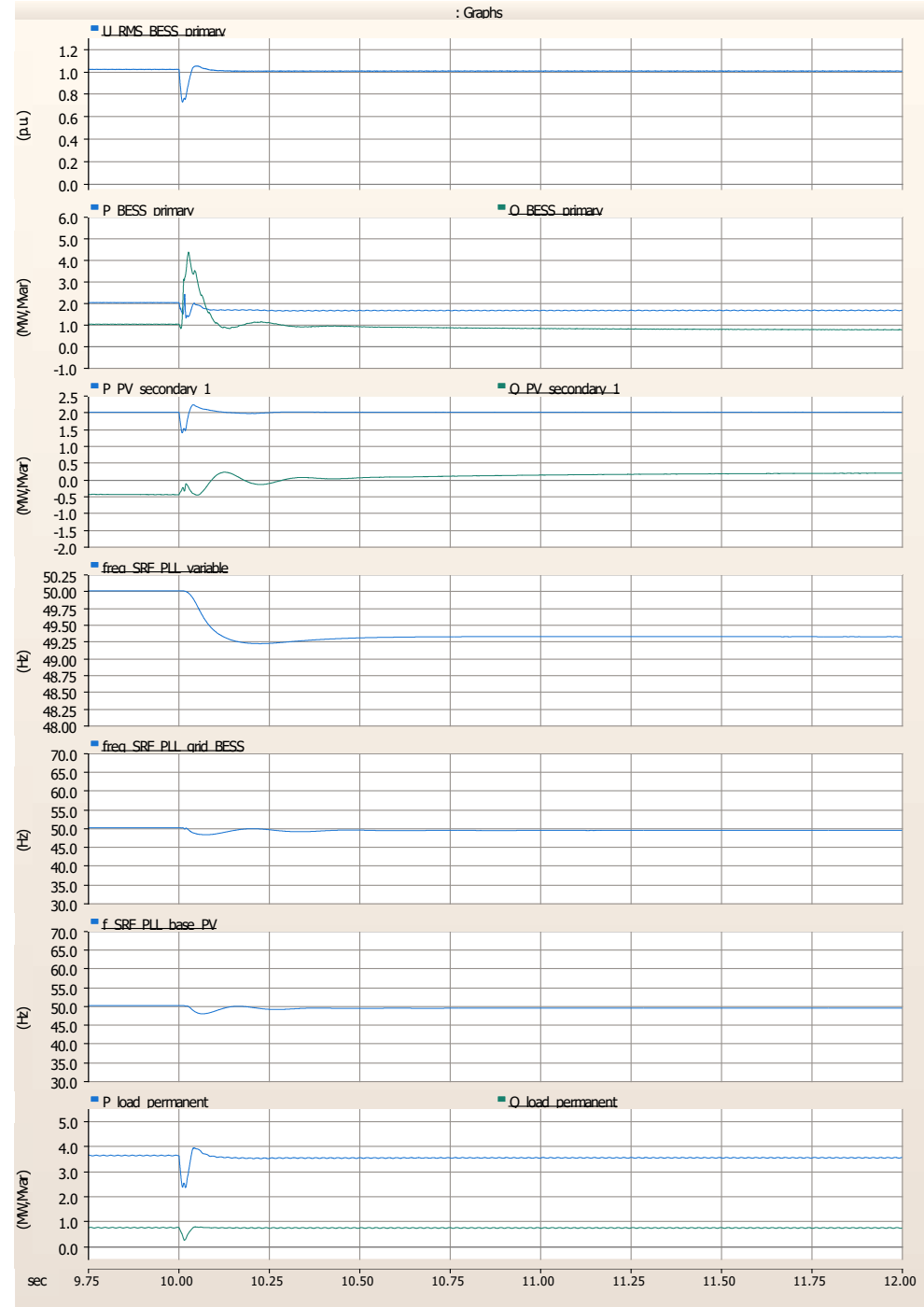
B: Saarekoituminen 2a – vain tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä, PV osallistuu jännitteensäätöön

Tarkastelukokonaisuus

- Tarkastellaan vian jälkeistä saarekoitumista, jossa PV osallistuu jännitteensäätöön
- Ei viiveitä

B: Saarekoituminen 2a – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

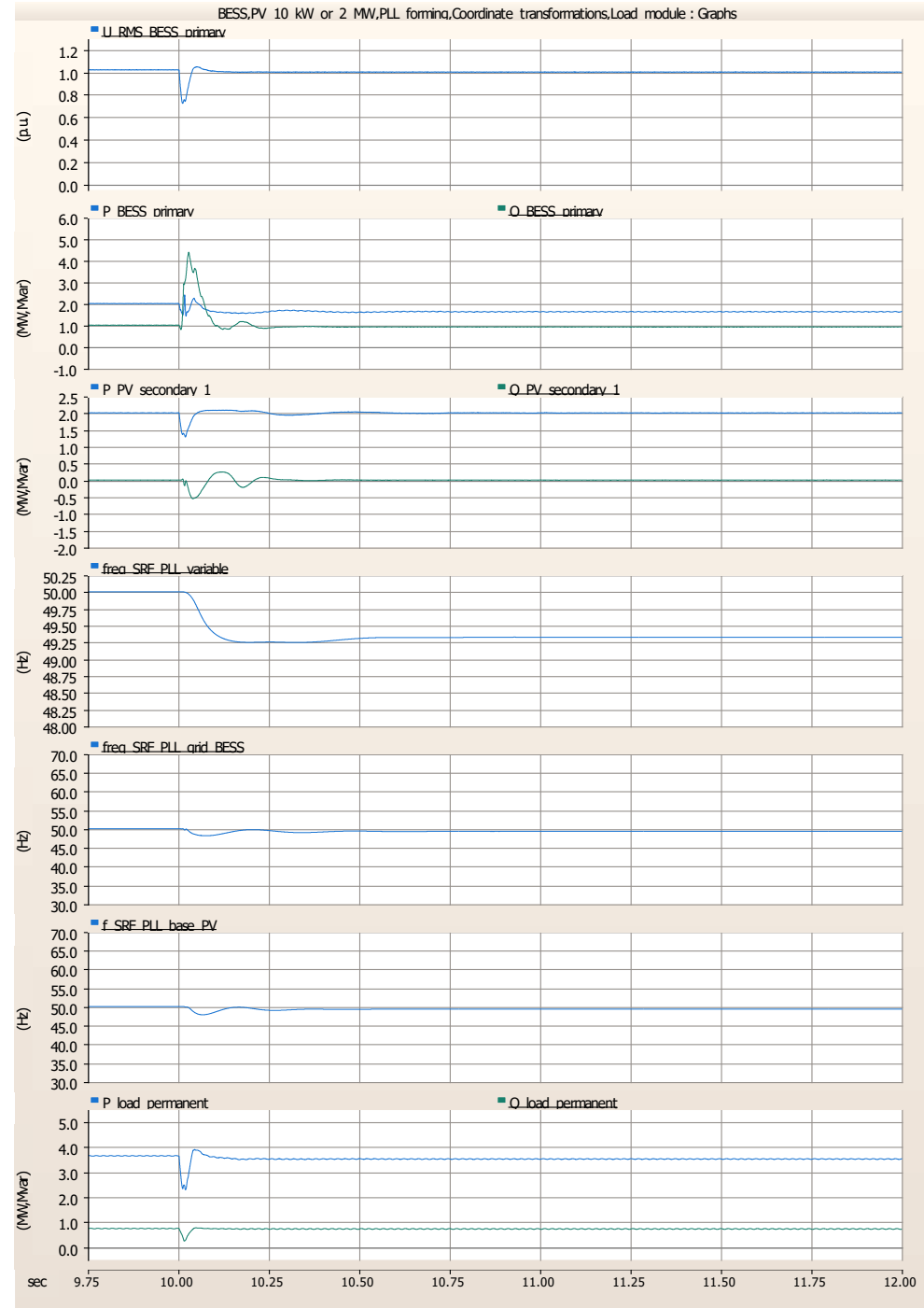
- Katkaisijan avausviive: 0 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 0 ms
- BESS:n tehot 0.25 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar
- PV:n nimellisteho 2.8 MVA
- PV osallistuu jännitteensäätöön



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

B: Saarekoituminen 1a – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

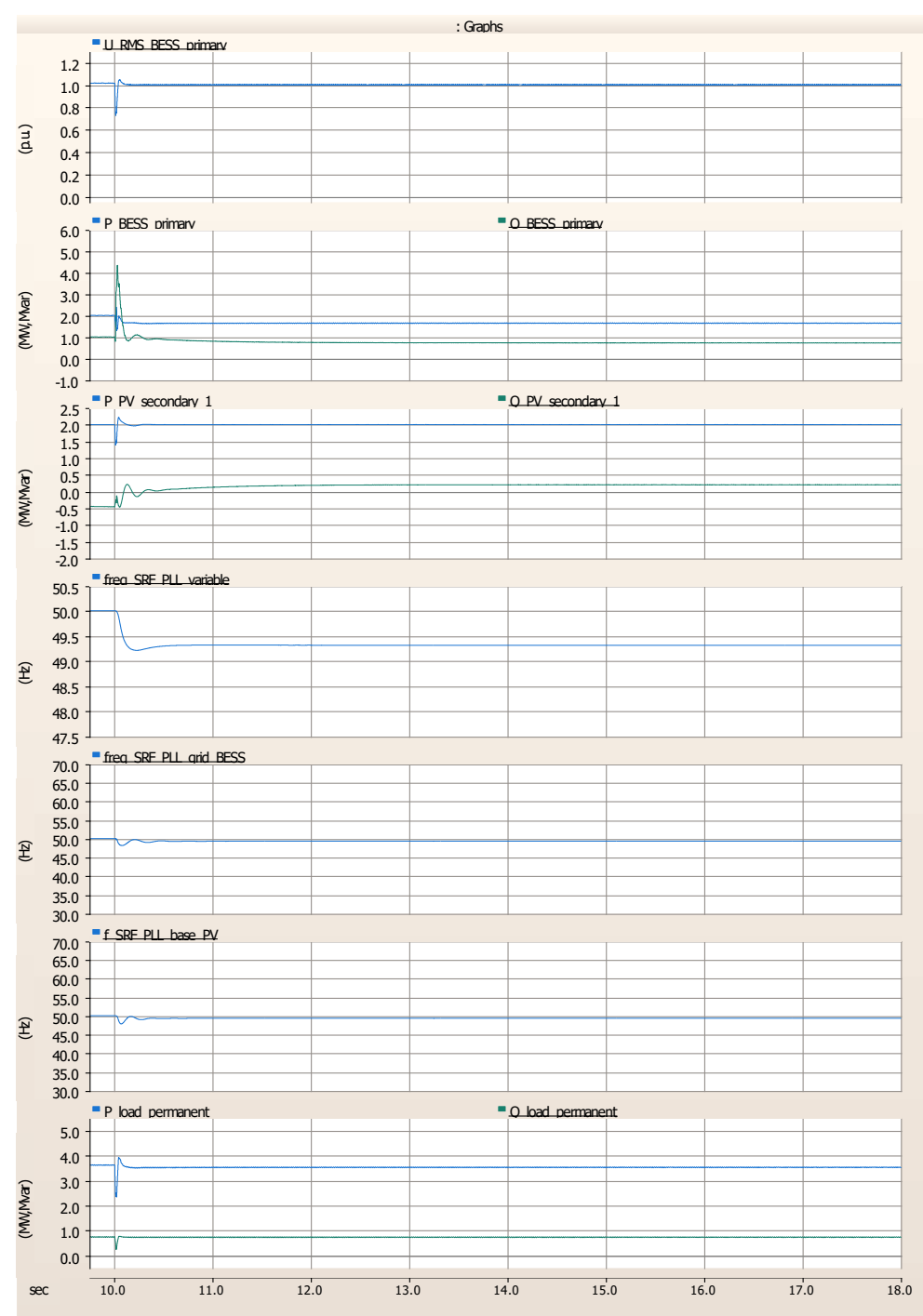
- Katkaisijan avausviive: 0 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 0 ms
- BESS:n tehot 2 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar
- Vertailu vastaavaan skenaarioon, jossa PV ei osallistu jännitteensäätöön



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

B: Saarekoituminen 2a – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

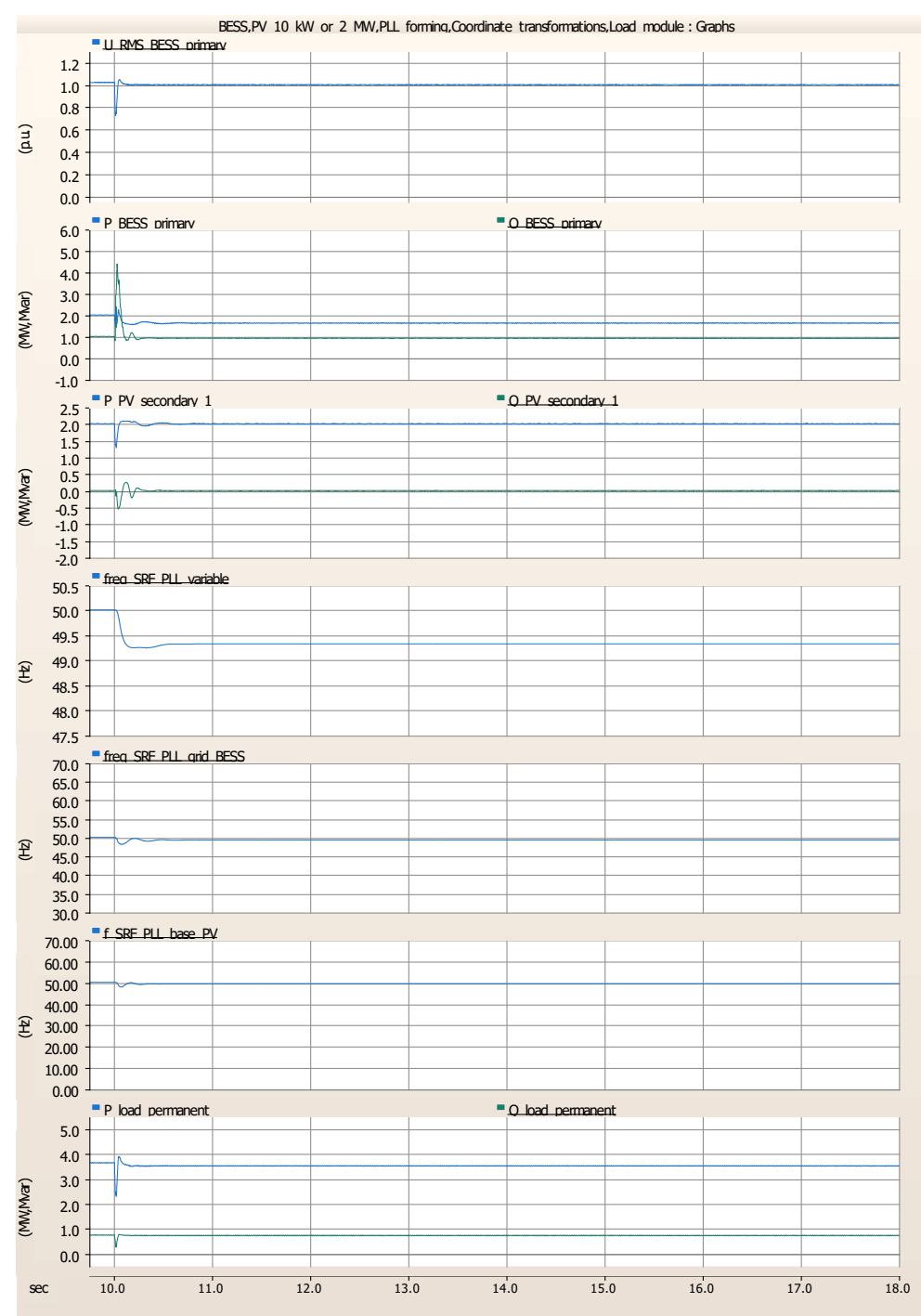
- Katkaisijan avausviive: 0 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 0 ms
- BESS:n tehot 0.25 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar
- PV:n nimellisteho 2.8 MVA
- PV osallistuu jännitteensäätöön

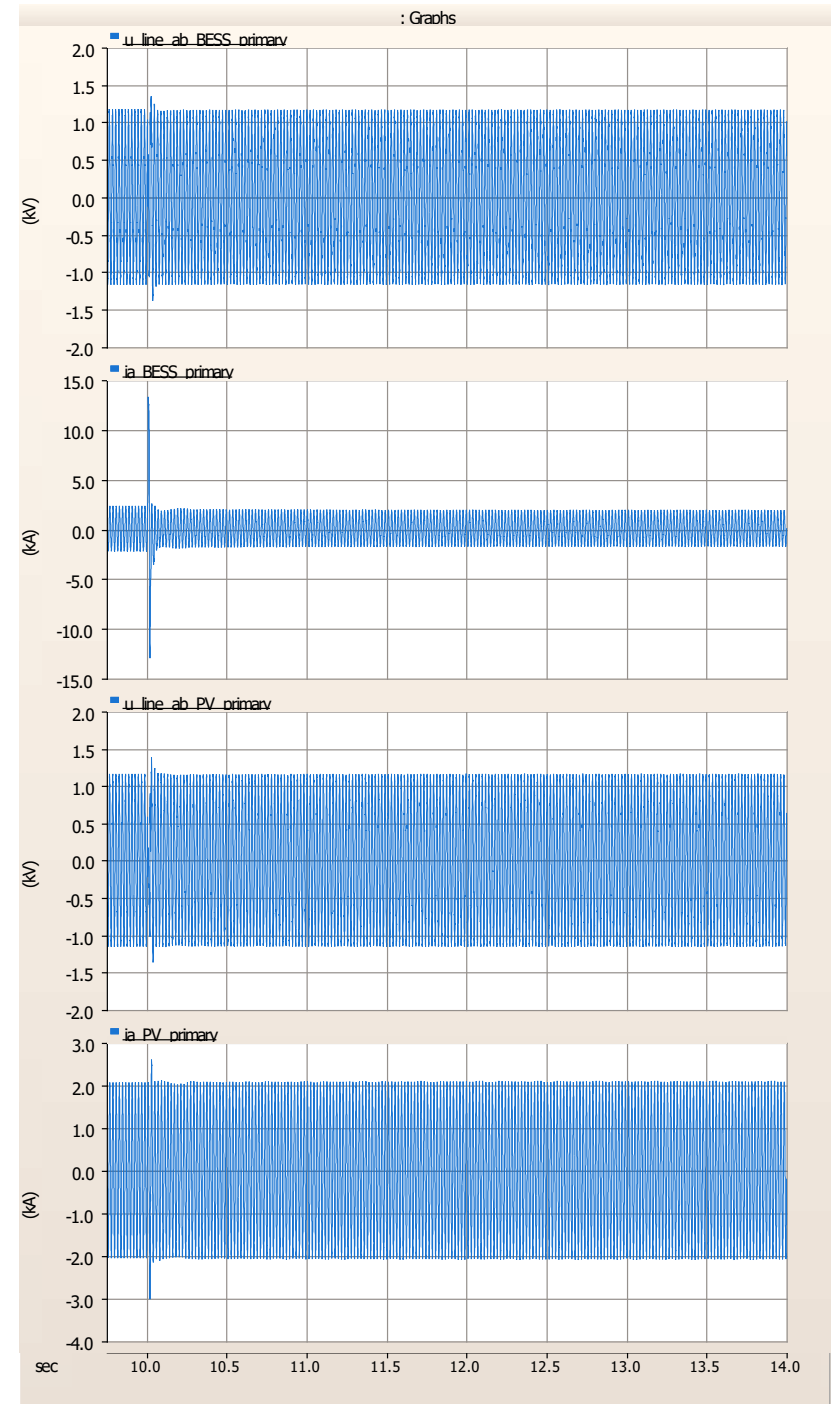
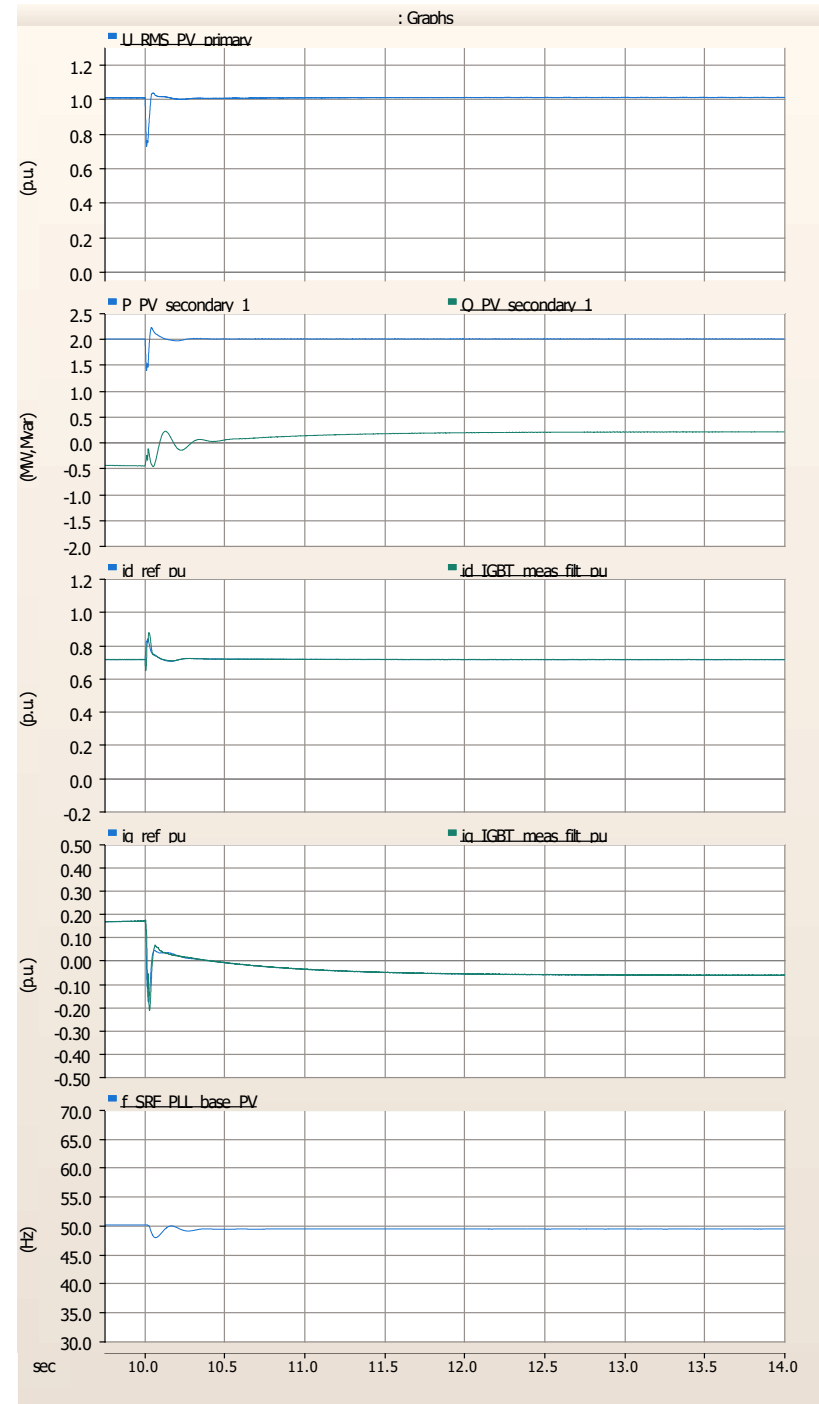
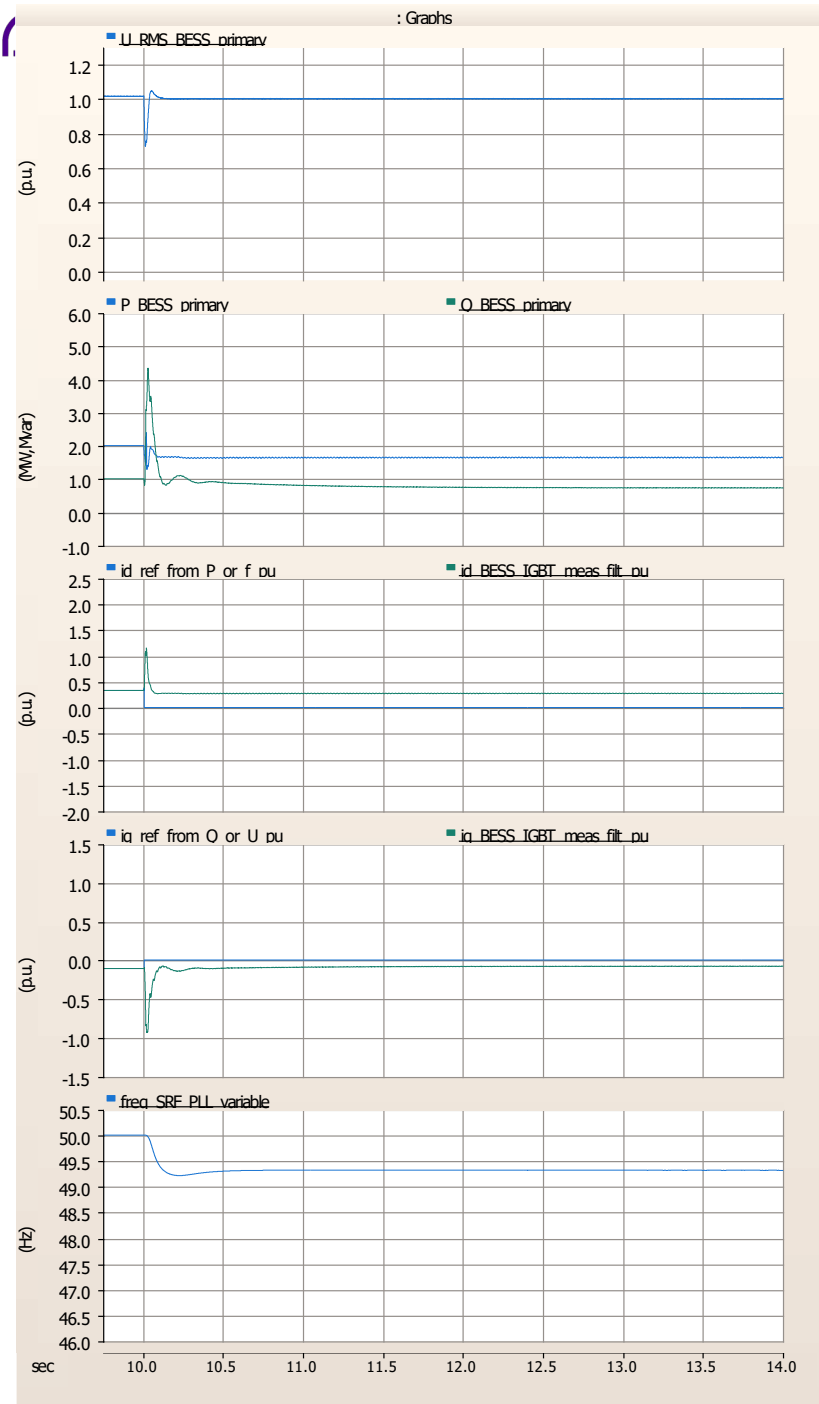


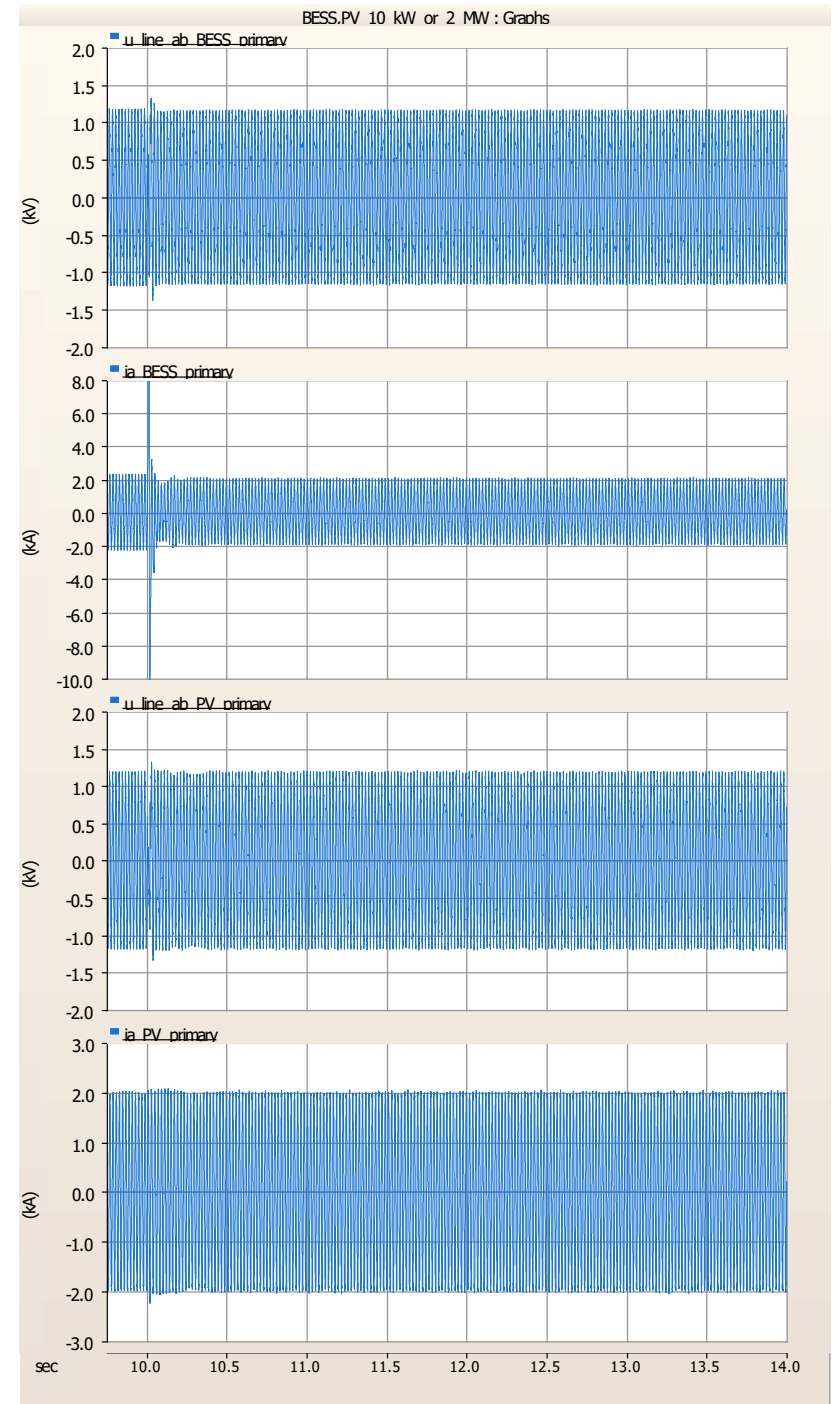
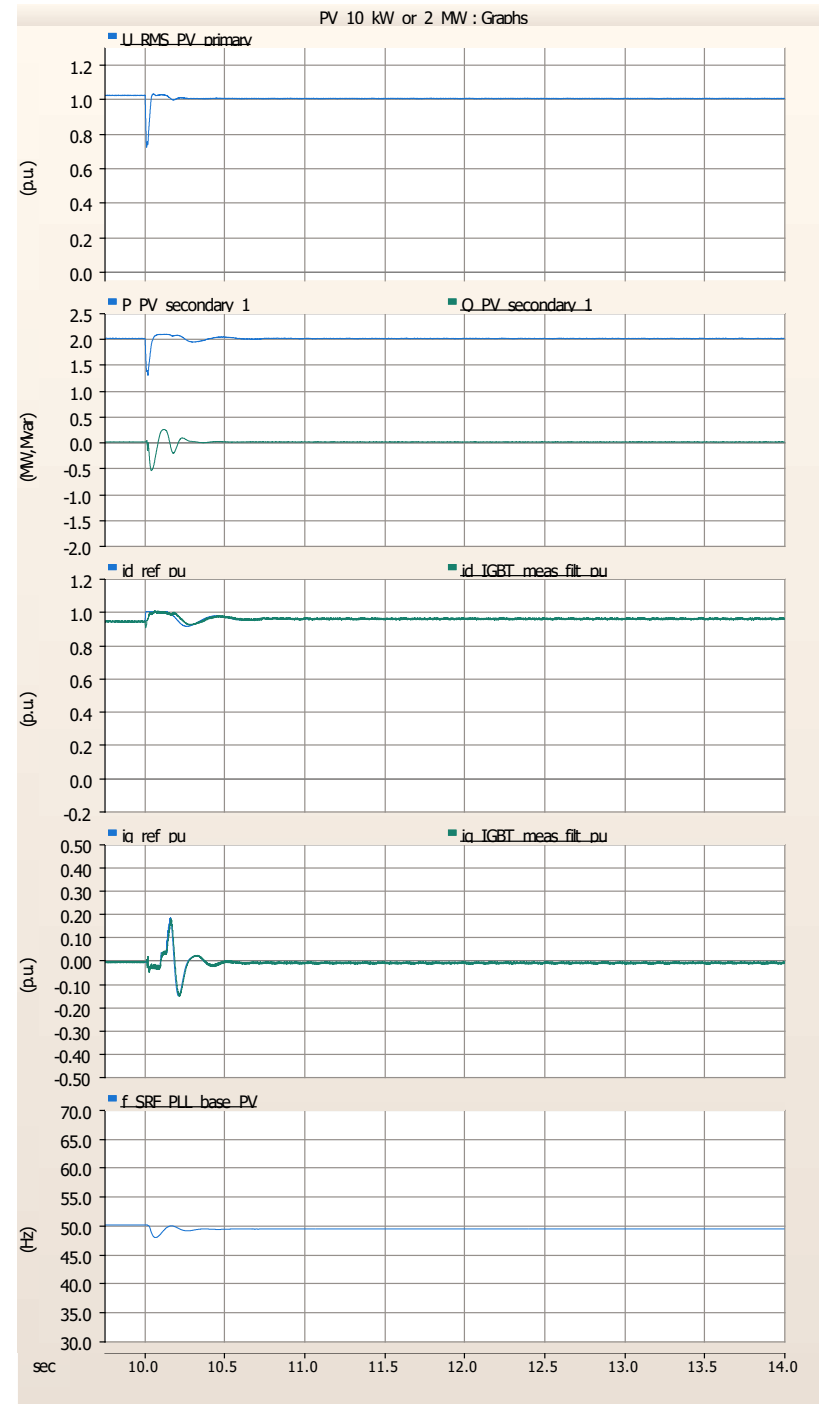
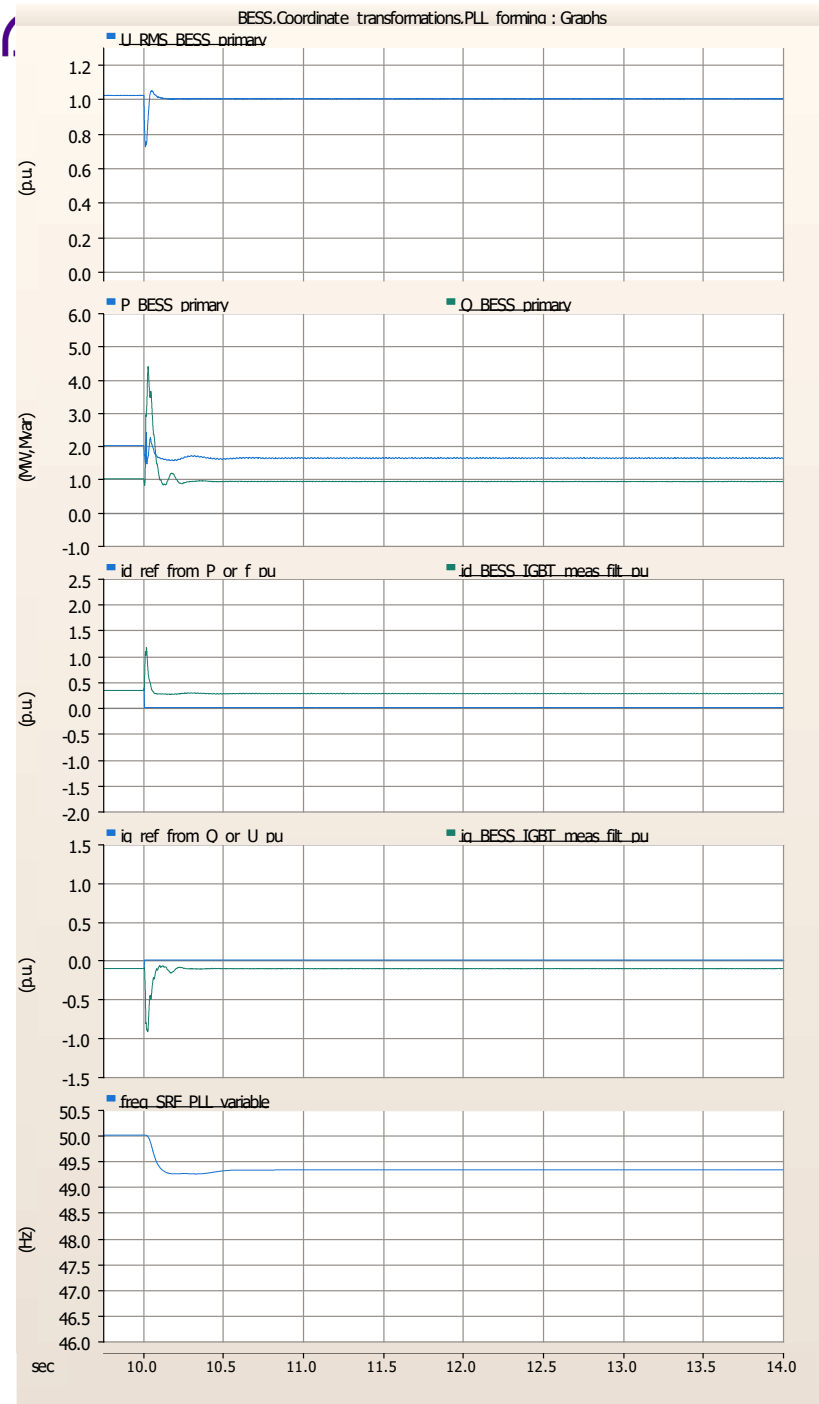
- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

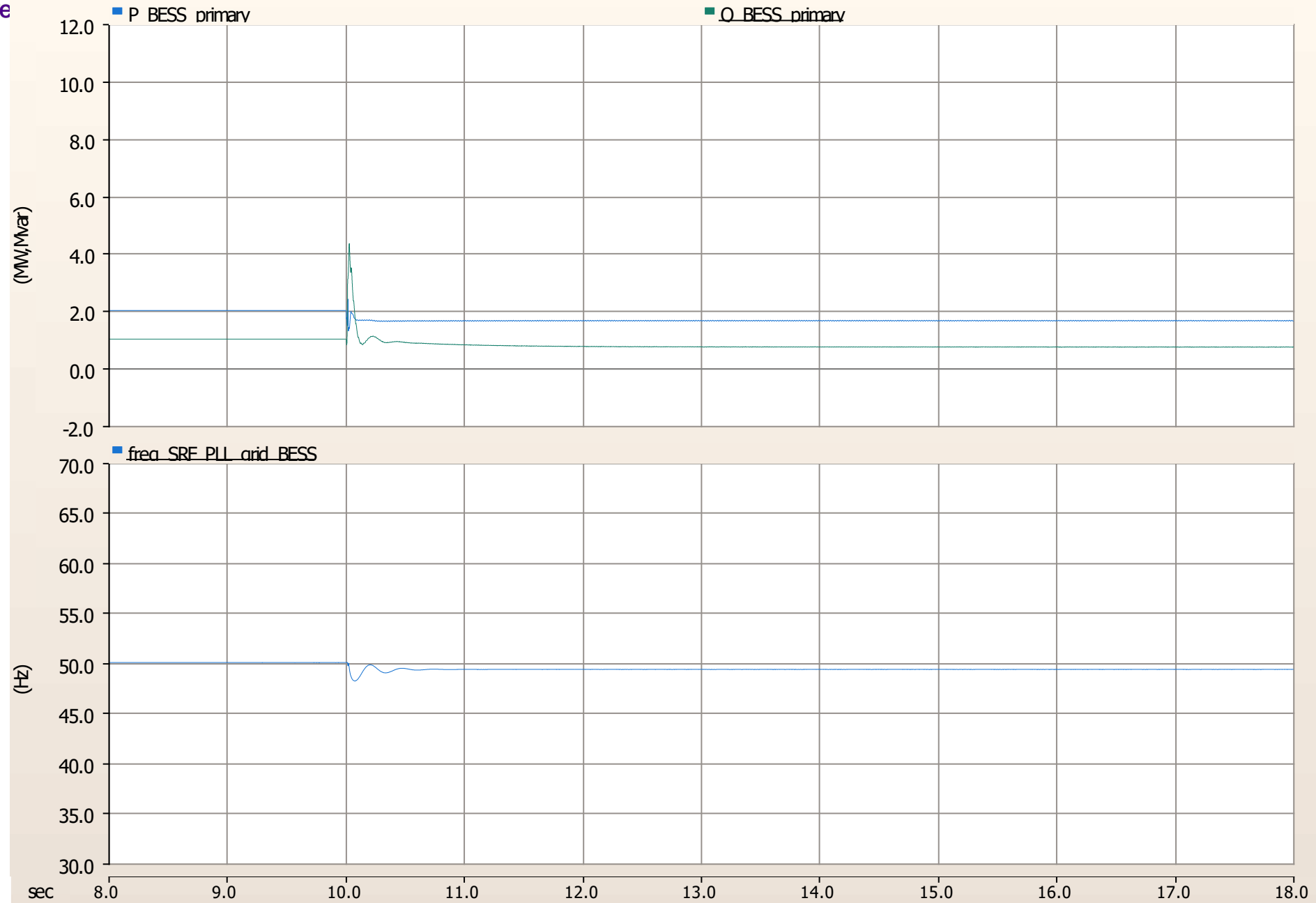
B: Saarekoituminen 1a – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

- Katkaisijan avausviive: 0 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 0 ms
- BESS:n tehot 2 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar
- Vertailu vastaavaan skenaarioon, jossa PV ei osallistu jännitteensäätöön

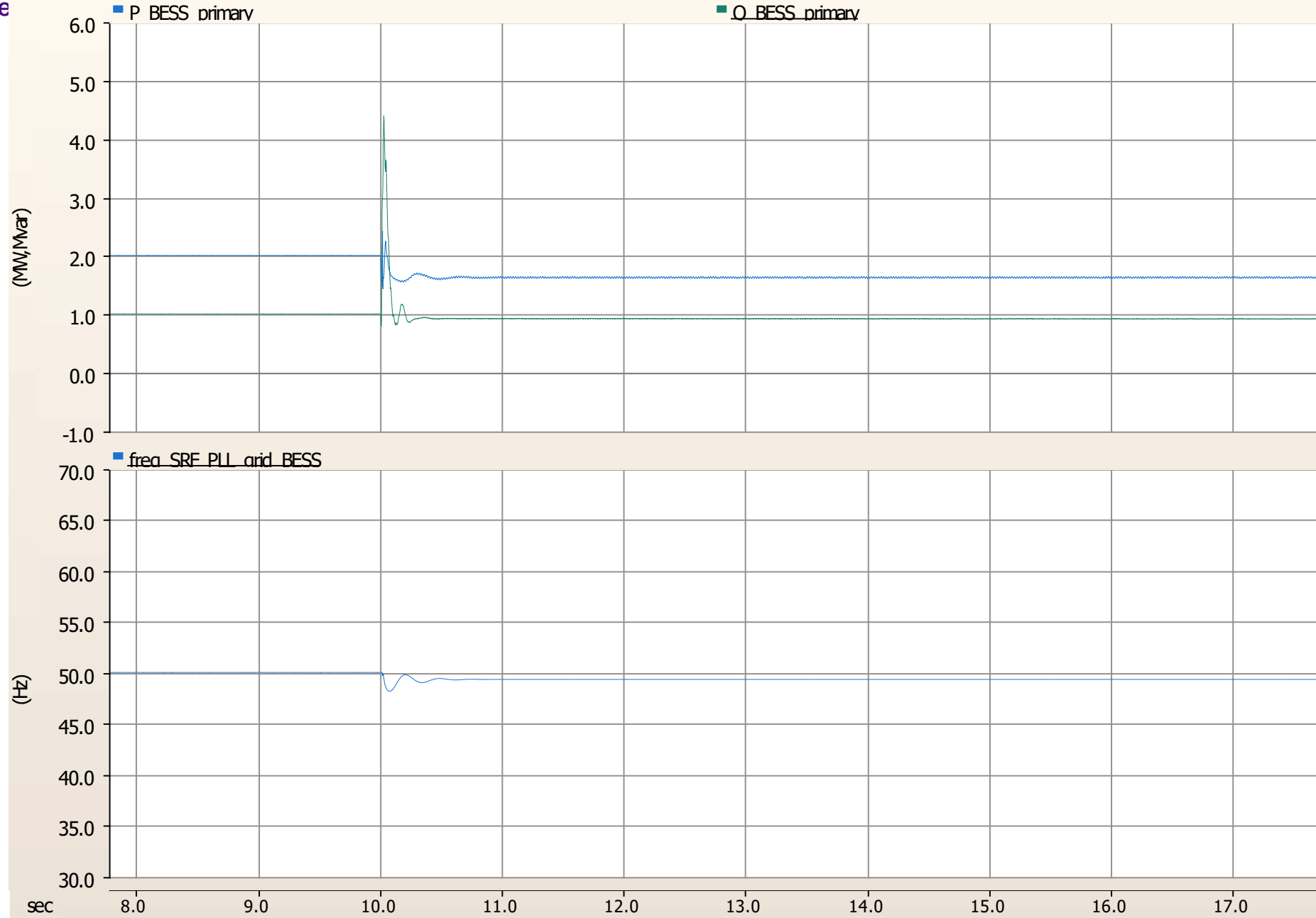


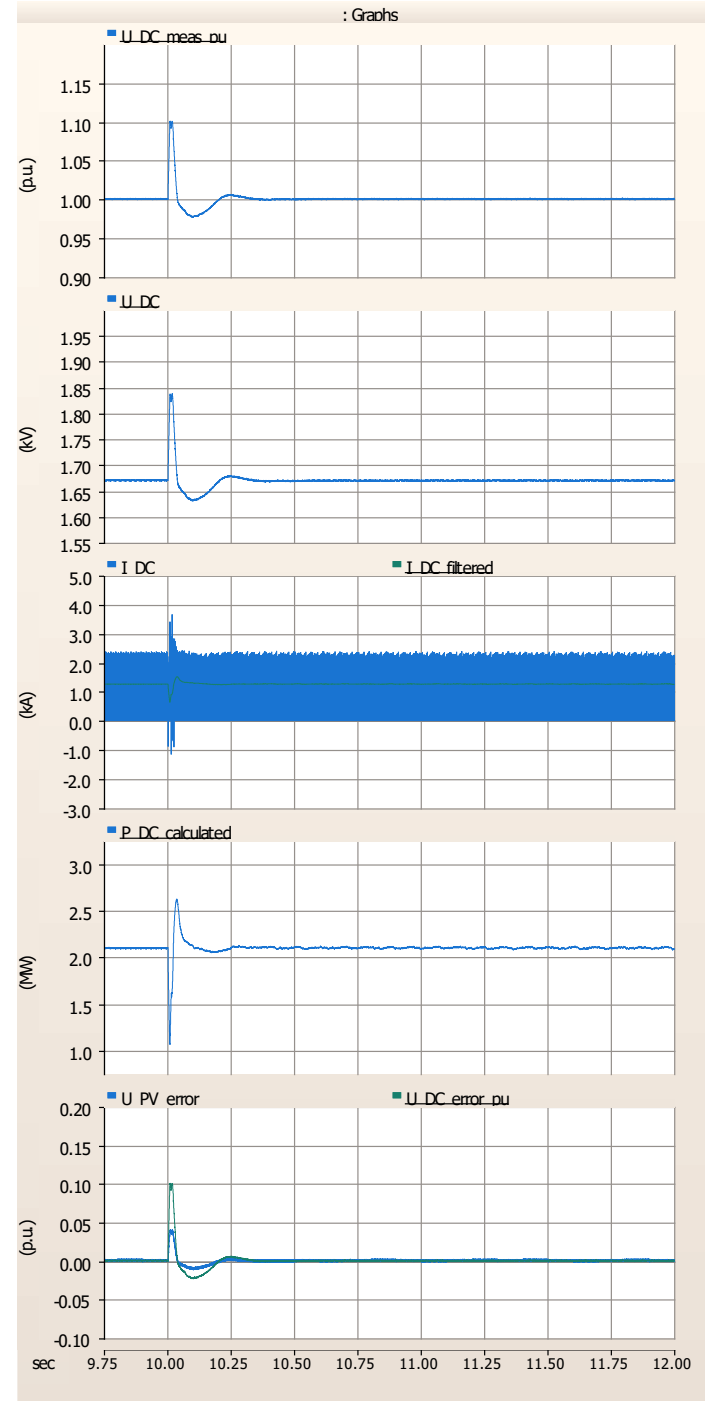
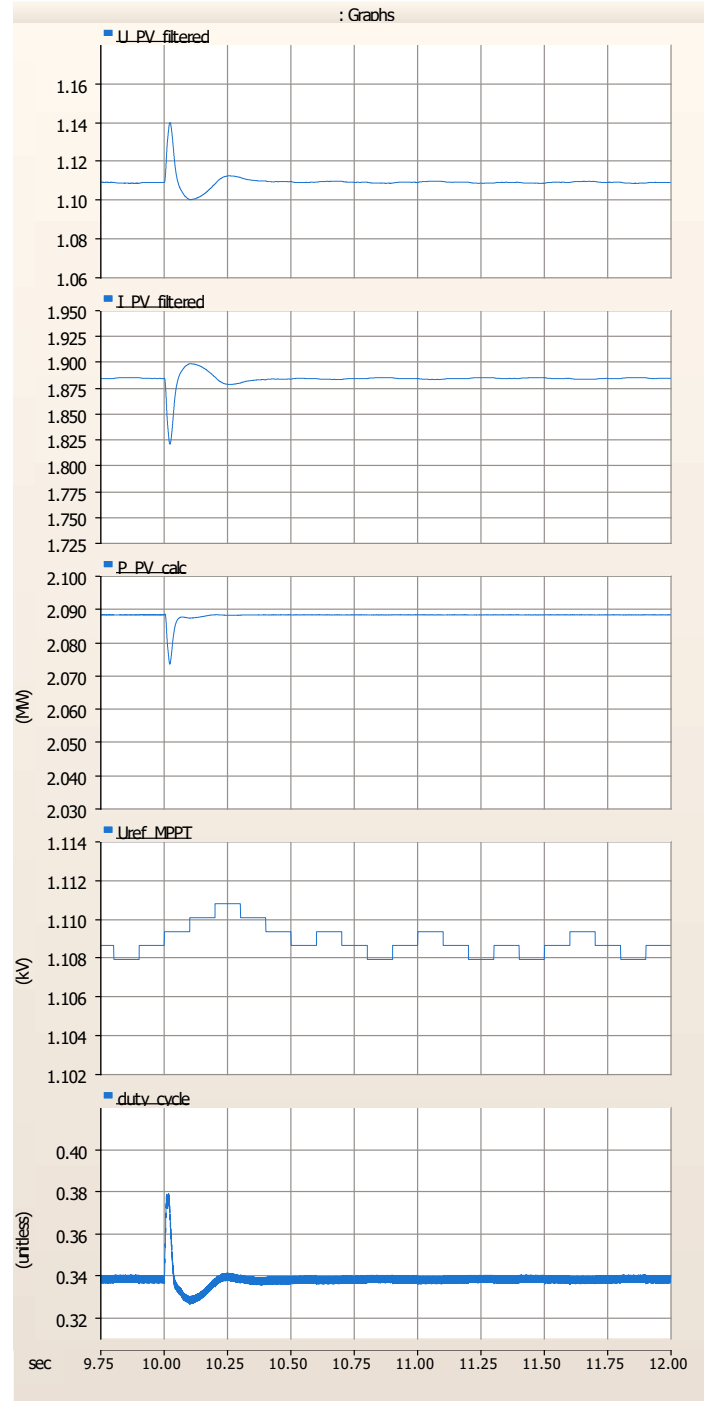
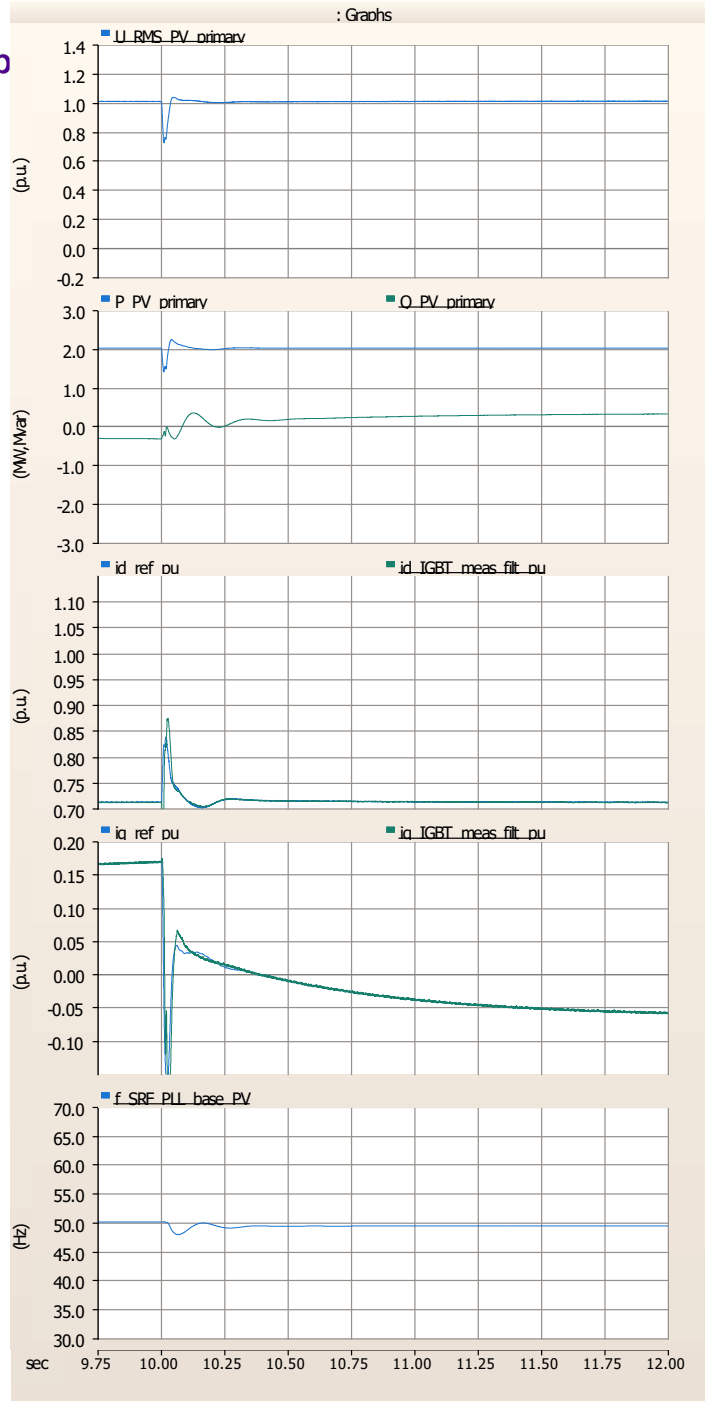


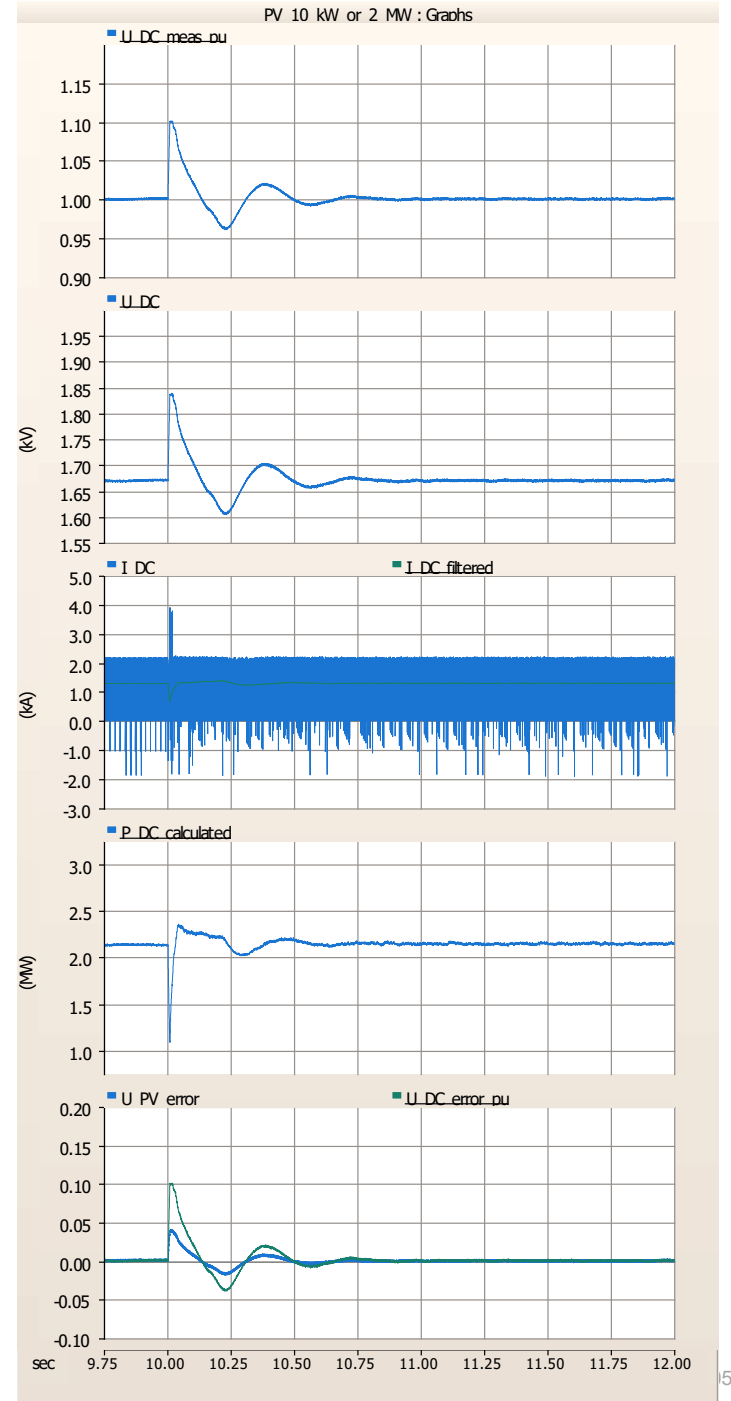
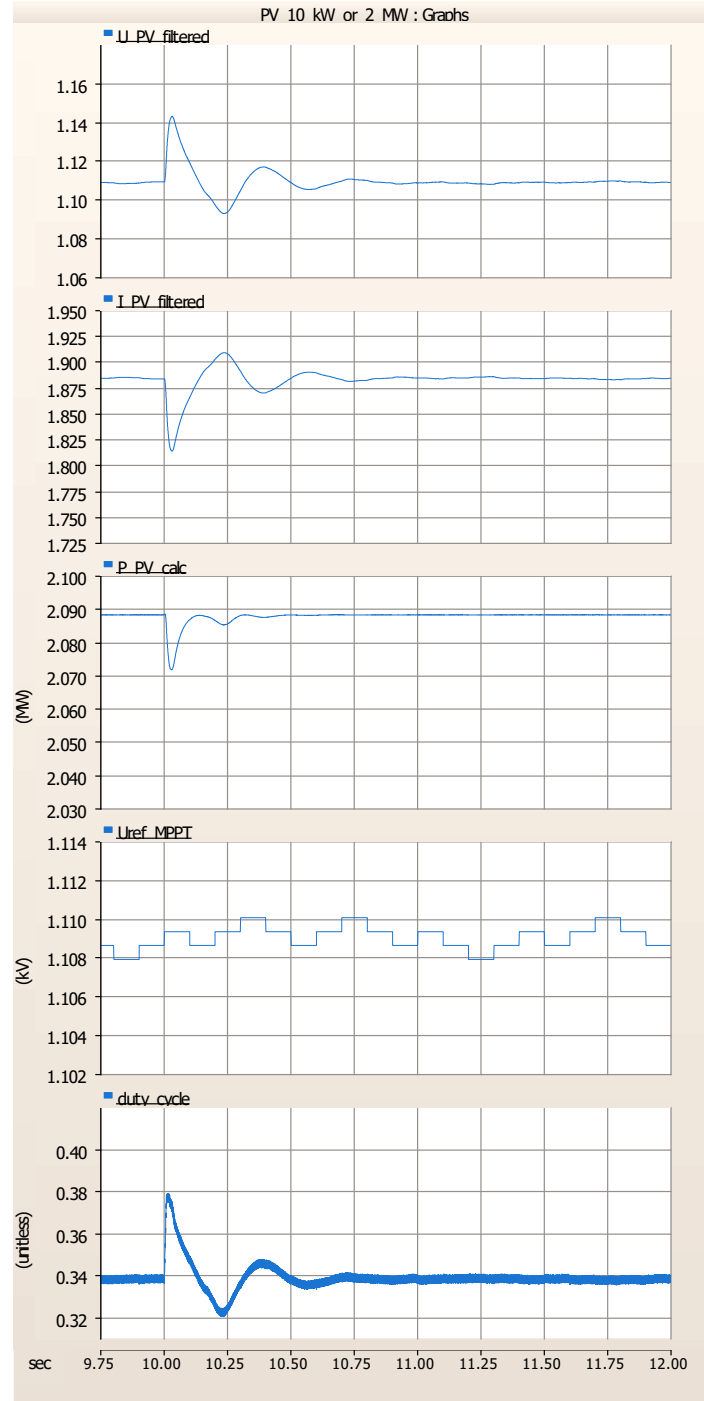
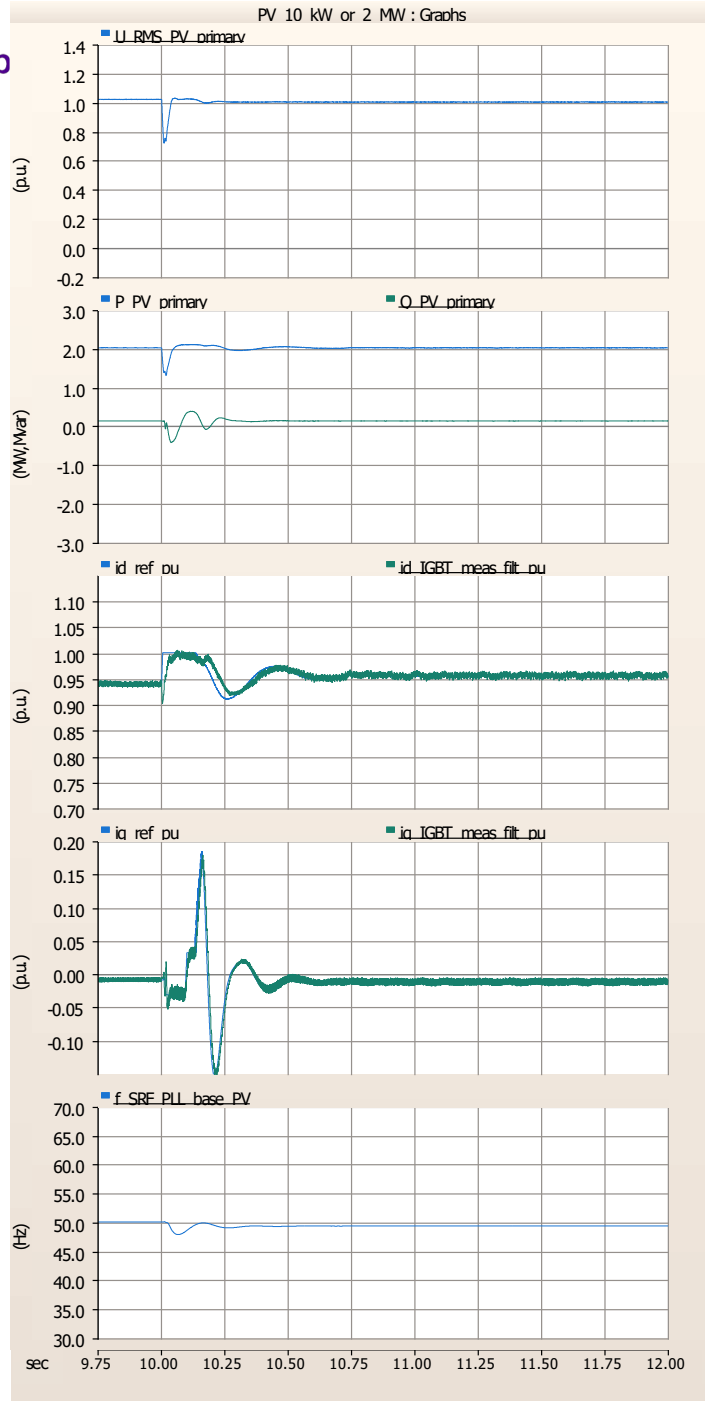




BESS.Coordinate transformations : Graphs







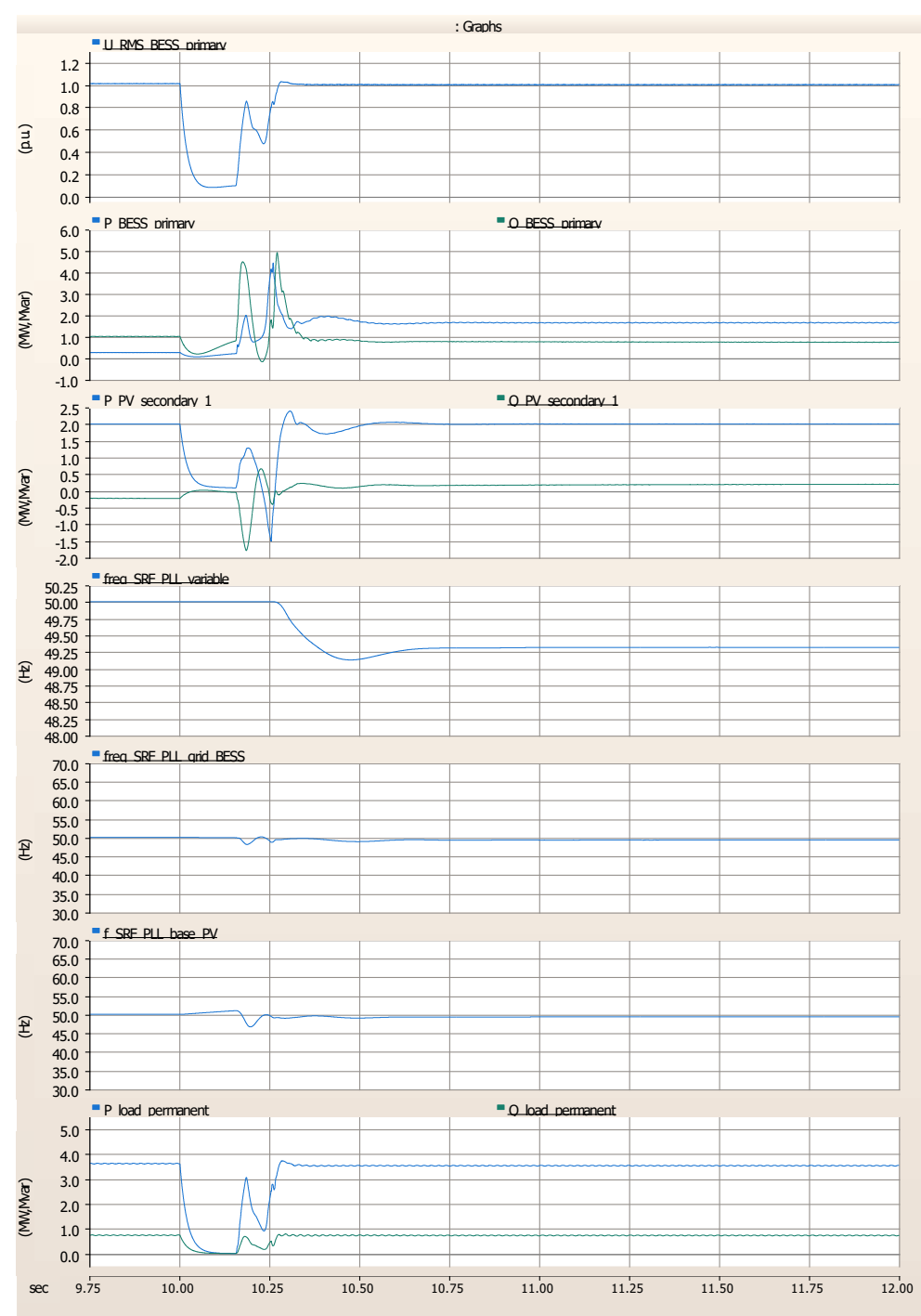
B: Saarekoituminen 2b – vain tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä, PV osallistuu jännitteensäätöön

Tarkastelukokonaisuus

- Tarkastellaan vian jälkeistä saarekoitumista, jossa PV osallistuu jännitteensäätöön
- On viiveitä: 150 ms katkaisijan avausviive ja 100 ms BESS:n tiedonsiirtoviive

B: Saarekoituminen 2b – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä

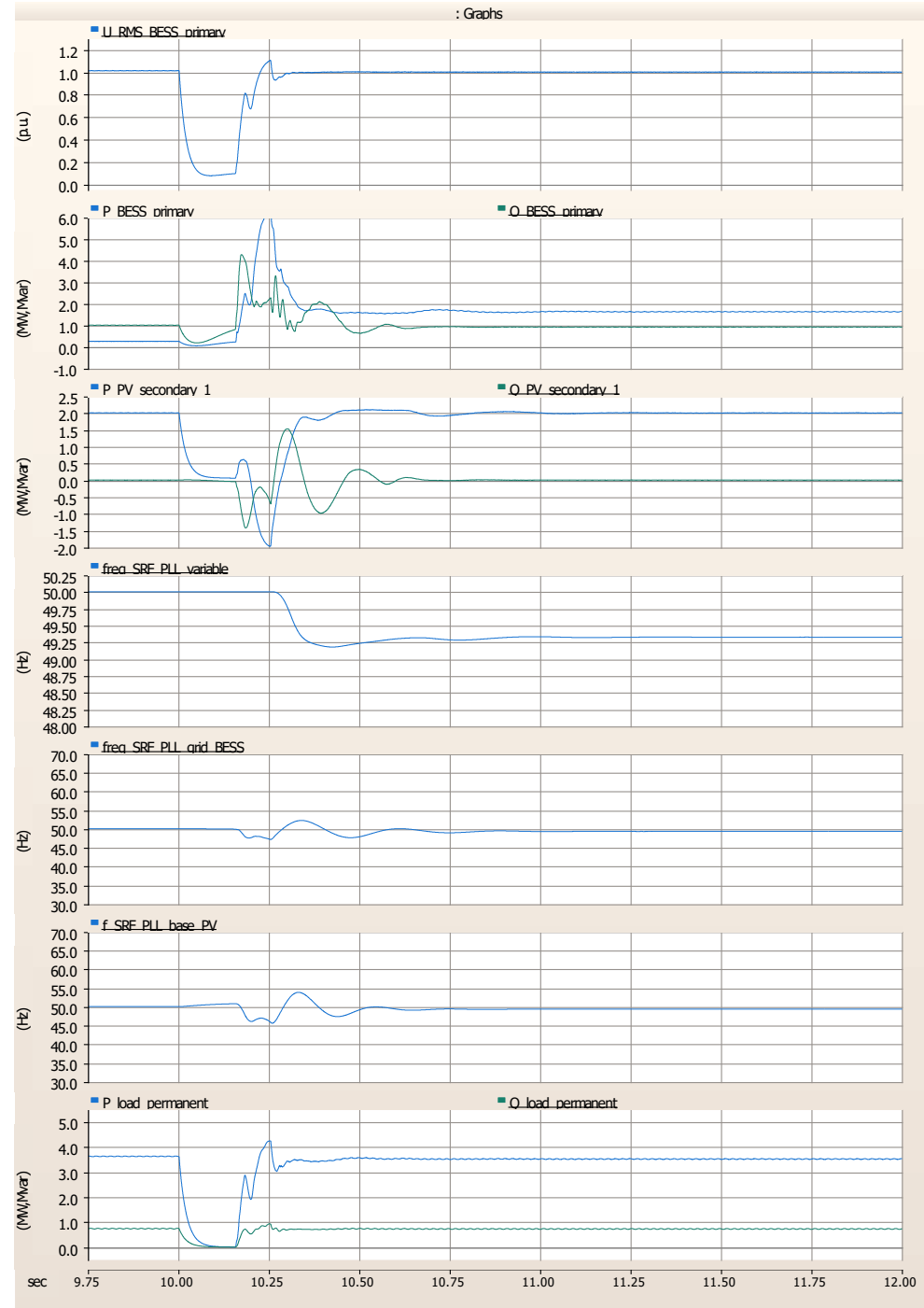
- Katkaisijan avausviive: 150 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 100 ms
- BESS:n tehot 0.25 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar
- PV:n nimellisteho 2.8 MVA
- PV osallistuu jännitteensäätöön



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

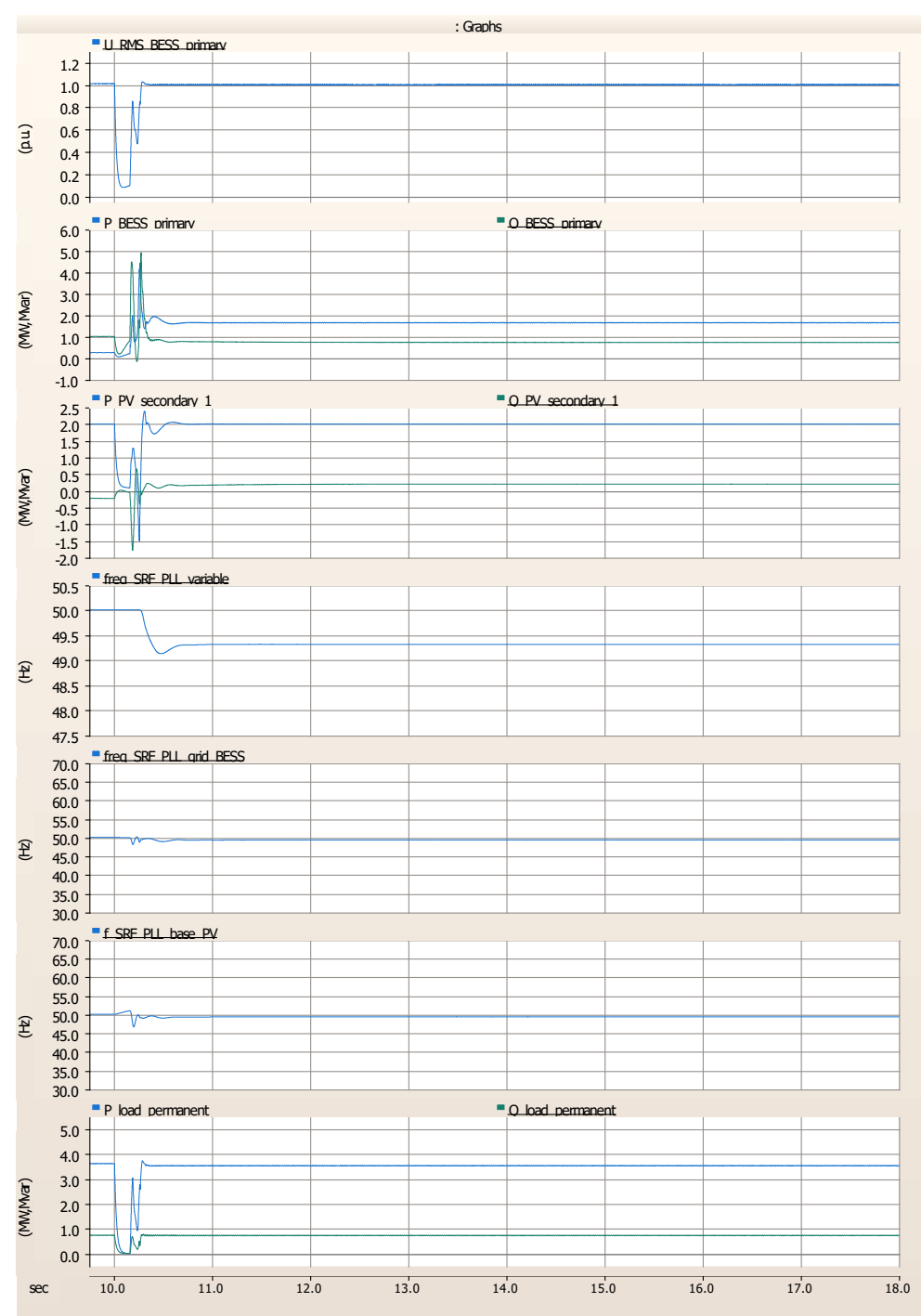
B: Saarekoituminen 1b – vain tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä

- Katkaisijan avausviive: 150 ms
- BESS:n tiedonsiirtoviive: 100 ms
- BESS:n tehot 0.25 MW / 1.0 Mvar
- PV:n tehot 2.0 MW / 0.0 Mvar
- Vertailu vastaavaan skenaarioon, jossa PV ei osallistu jännitteensäätöön



- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← BESS:n taajuuden ohjearvo
- ← BESS:n PLL:n mittaama taajuus
- ← PV:n PLL:n mittaama taajuus
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

➤ PV osallistuu jänniteensäätöön



← BESS:n ensiöjännite

← BESS:n pätö- ja loisteho

← PV:n pätö- ja loisteho

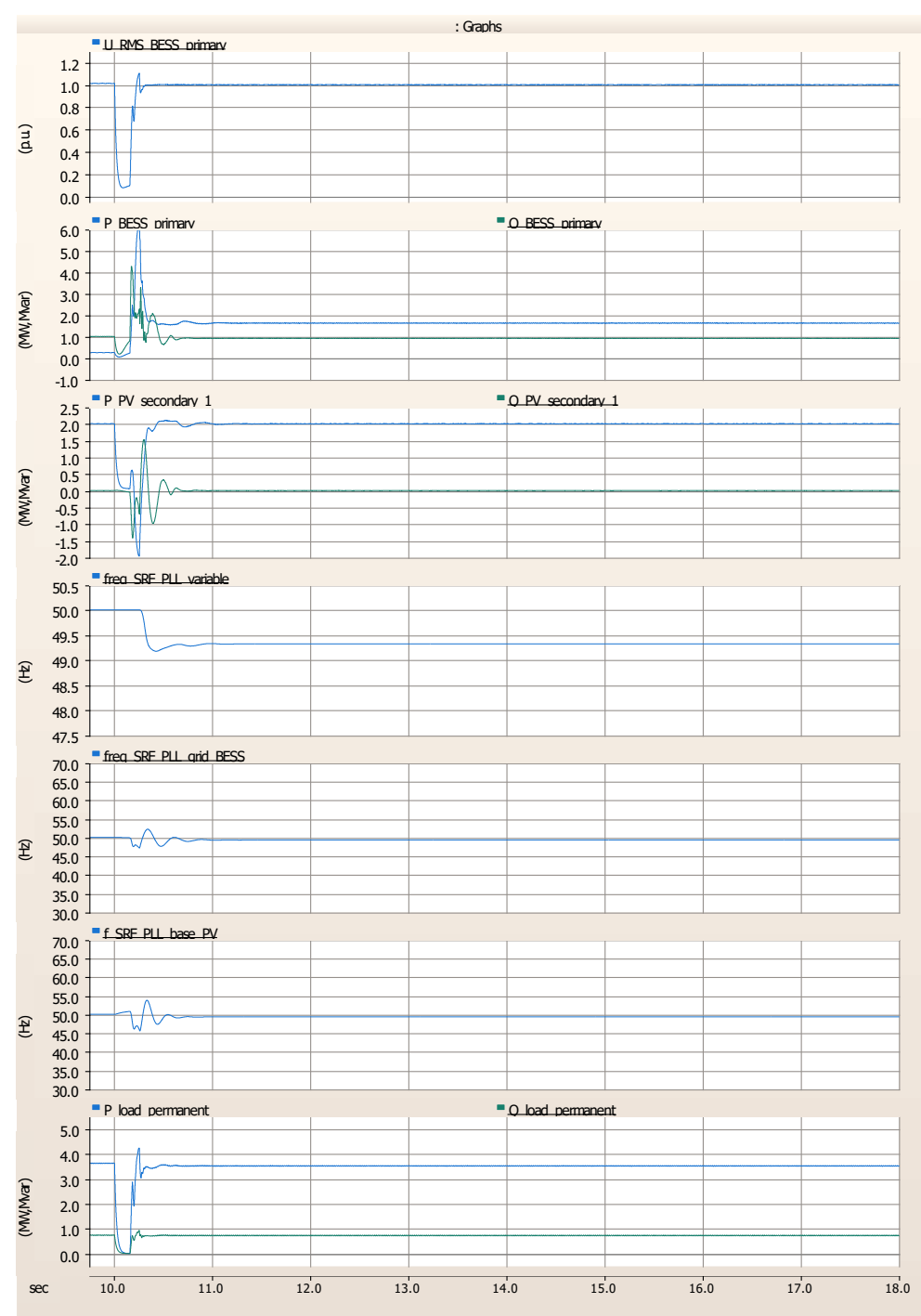
← BESS:n taajuuden ohjearvo

← BESS:n PLL:n mittaama taajuus

← PV:n PLL:n mittaama taajuus

← Kuormituksen pätö- ja loistehot

➤ PV ei osallistu jännitteensäätöön



← BESS:n ensiöjännite

← BESS:n pätö- ja loisteho

← PV:n pätö- ja loisteho

← BESS:n taajuuden ohjearvo

← BESS:n PLL:n mittaama taajuus

← PV:n PLL:n mittaama taajuus

← Kuormituksen pätö- ja loistehot

B: Saarekoituminen 2a ja 2b – vain tehoelektroniikkaliitäntäisiä tuotantoyksiköitä, PV osallistuu jännitteensäätöön

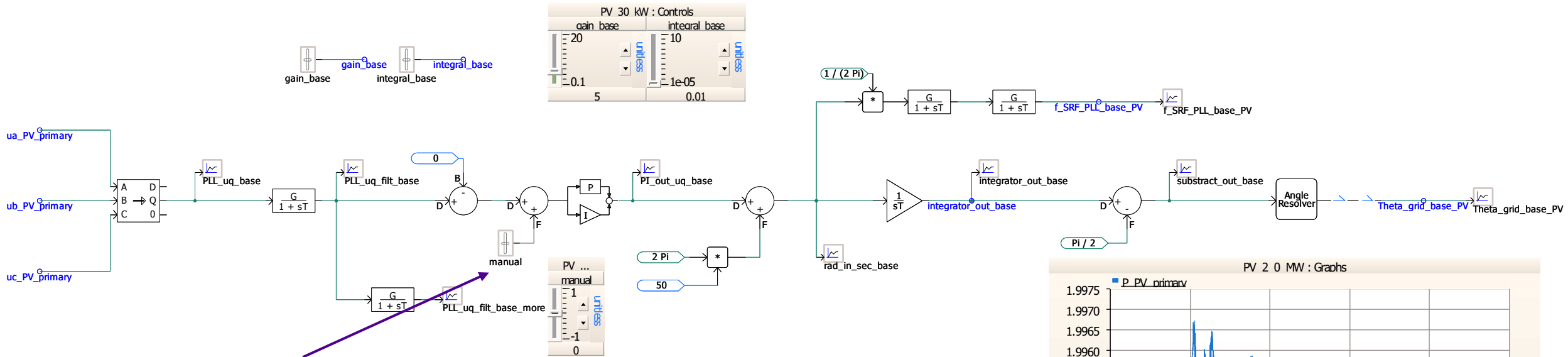
Johtopäätöksiä

- Simulointiesimerkkien perusteella PV:n osallistuminen jännitteensäätöön viiveettömässä tapauksessa ei käytännössä muuta vasteita
- Simulointiesimerkkien perusteella PV:n osallistuminen jännitteensäätöön, kun saarekoitumisessa on viiveitä, ei pienennä teho- ja jännitevärähtelyjen tai nopeita niiden tasaantumista, vaan päinvastoin ehkä lisää hieman tehovärähtelyjä ja saattaa myös pitkittää tehovärähtelyjen tasaantumista

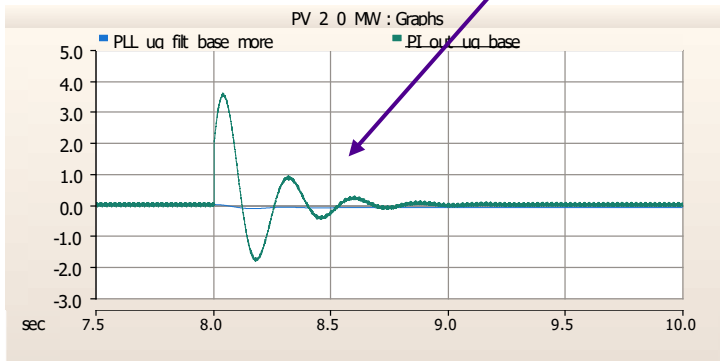
Vaihelukon (Phase-Locked Loop, PLL) sisäinen häiriö

- Tehdään manuaalisesti (tarkoituksella) virhe PLL:n säätöpiiriin, jonka PLL itse korjaa

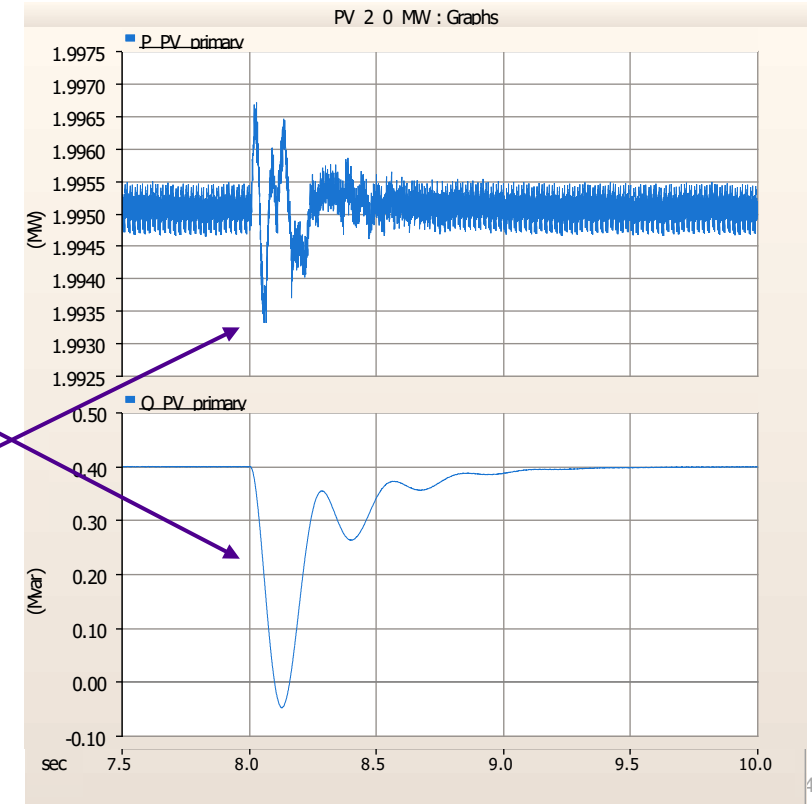
B: Saarekoituminen 3 – vain tehoelektroniikkaliitännäisiä tuotantoyksiköitä



- Tehdään manuaalisesti virhe PLL:n säätöpiiriin, jonka PLL itse korjaa



- Testi näyttää vahvistavan sitä, että PLL:n mittausvirhe kohdistuu etenkin loistehoon
- Pätötehossa ei mainittavia värähtelyjä (huomaa zoomausasteikko)



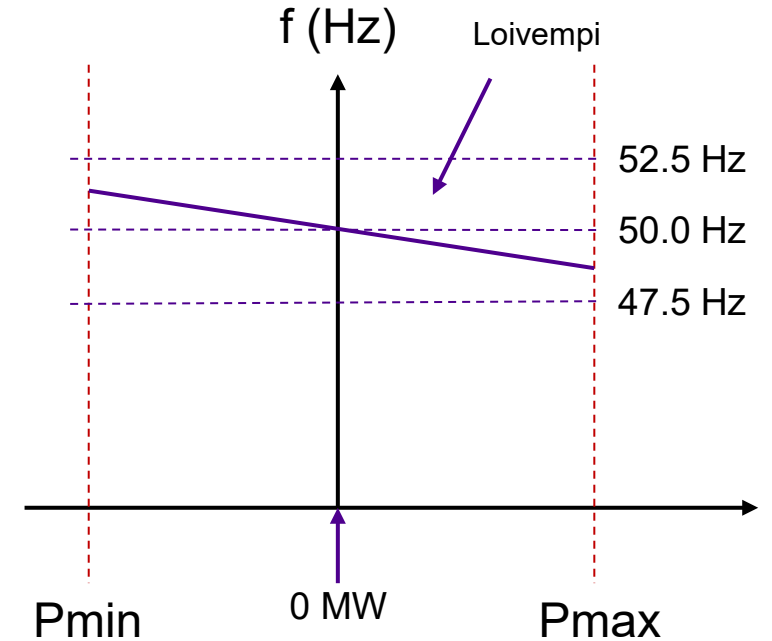
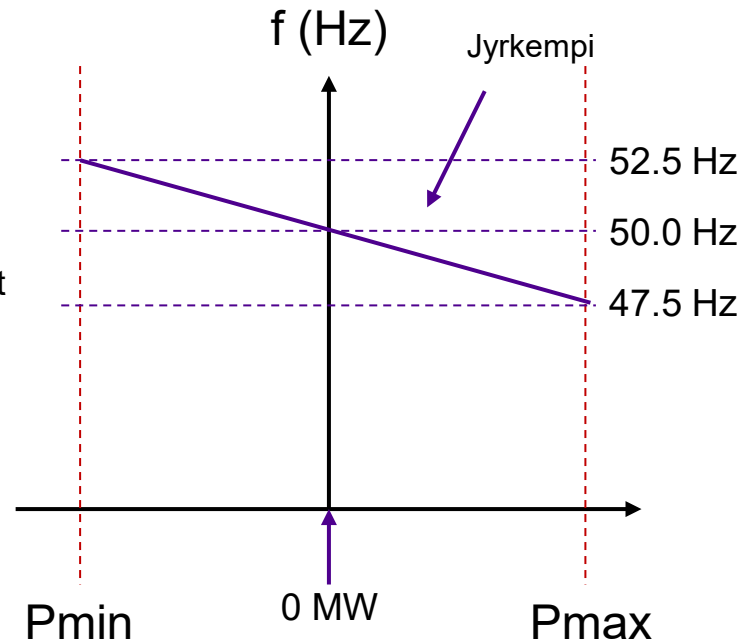
Johtopäätöksiä

- Testi näyttää vahvistavan sitä, että PLL:n mittausvirhe kohdistuu etenkin loistehoon
- Pätötehossa ei mainittavia värähtelyjä

C: Tuotantoyksiköiden keskinäinen tehonsäätö

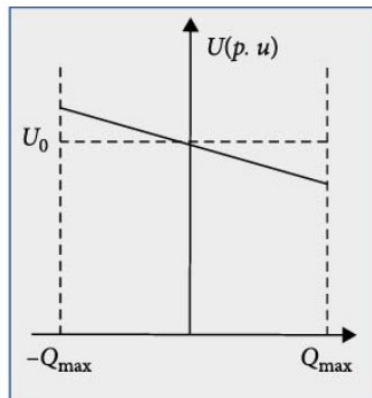
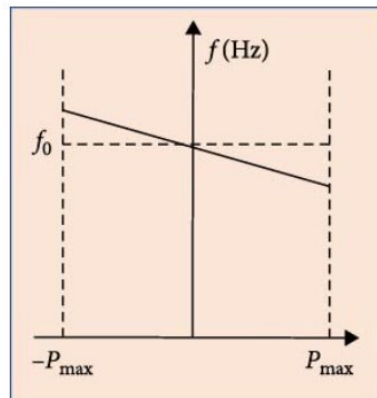
Tarkastelukokonaisuudet ja niiden perusteet

- Droop-tehonjakoperiaate on oleellinen osa minkä tahansa verkon toimintaa
- Droop-kertoimet tuotantoyksiköiden välillä vaikuttavat siihen, kuinka paljon kukin yksikkö muuttaa:
 - pätötehoa taajuuden muuttuessa
 - loistehoa jännitteen muuttuessa
- droop-kerroin kuvaa pätö- tai loistehosuoran kulmakerrointa



- Suurempi droop-kerroin \rightarrow käyrä on kaltevampi \rightarrow tarvitaan suurempi taajuudenmuutos, jotta pätötehoa lisätään (tai vähennetään jos ollaan yli 50 Hz)
- Osallistuu suhteessa vähemmän pätötehon säätöön taajuudenmuutosta kohden
- Yo. esimerkissä yksikkö tuottaa maksimitehon, kun taajuus on pudonnut 47.5 Hz:iin

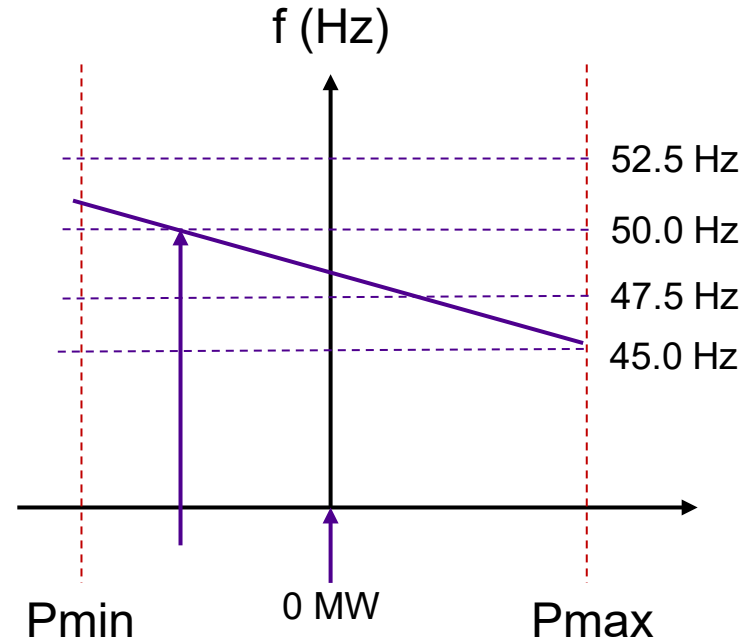
- Pienempi droop-kerroin \rightarrow käyrä on enemmän vaakatasossa \rightarrow tarvitaan pienempi taajuudenmuutos, jotta pätötehoa lisätään (tai vähennetään jos ollaan yli 50 Hz)
- Osallistuu suhteessa enemmän pätötehon säätöön taajuudenmuutosta kohden
- Yo. esimerkissä yksikkö tuottaa maksimitehon, kun taajuus on pudonnut 48.75 Hz:iin



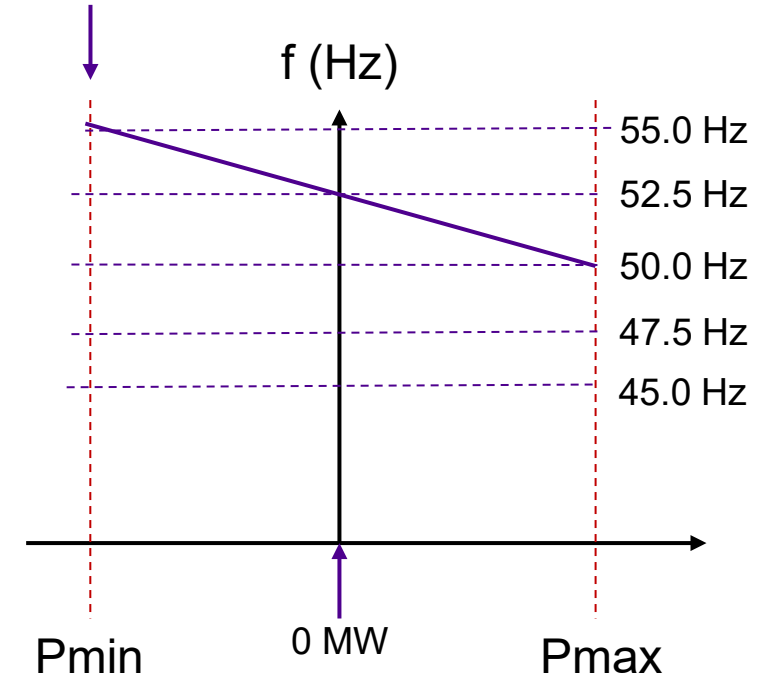
C: Tuotantoyksiköiden keskinäinen tehonsäätö

Tarkastelukokonaisuudet ja niiden perusteet

- Droop-kertoimen lisäksi käyrän "off-set:iä" voidaan muuttaa
 - Siirretään käyrän ja Y-akselin leikkauspistettä
- Tämä on käytännössä tuotantoyksiköillä sekundaarisäätö, jolla taajuus saadaan takaisin nimellisarvoonsa
- Pelkkä droop-säätö, ilman sekundäärisäätöä (integrointia), jättää aina taajuus- tai jännitepoikkeaman



- Yo. esimerkissä yksikkö tuottaa maksimitehon, kun taajuus on pudonnut 45.0 Hz:iin
- Jos taajuus on 50.0 Hz, niin yksikkö ottaa (reilu) puolet pätötehokapasiteetistaan (esim. akkua ladataan)



- Yo. esimerkissä yksikkö tuottaa maksimitehon, kun taajuus on 50.0 Hz
- Jos taajuus on 55.0 Hz, niin yksikkö ottaa 100 % pätötehokapasiteetistaan (esim. akkua ladataan)

- Tehonsäätövoima = $1 / \text{droop-kerroin}$

Tarkastelukokonaisuudet:

1. BESS:n ja PV:n droop-vasteet *verkon rinnalla*
 - a) samat droop-arvot
 - b) eri droop-arvot

2. BESS:n ja PV:n droop-vasteet saarekkeessa - **ei** tahtikoneita
 - perinteinen säätö (P/f ja Q/U) + viiveet

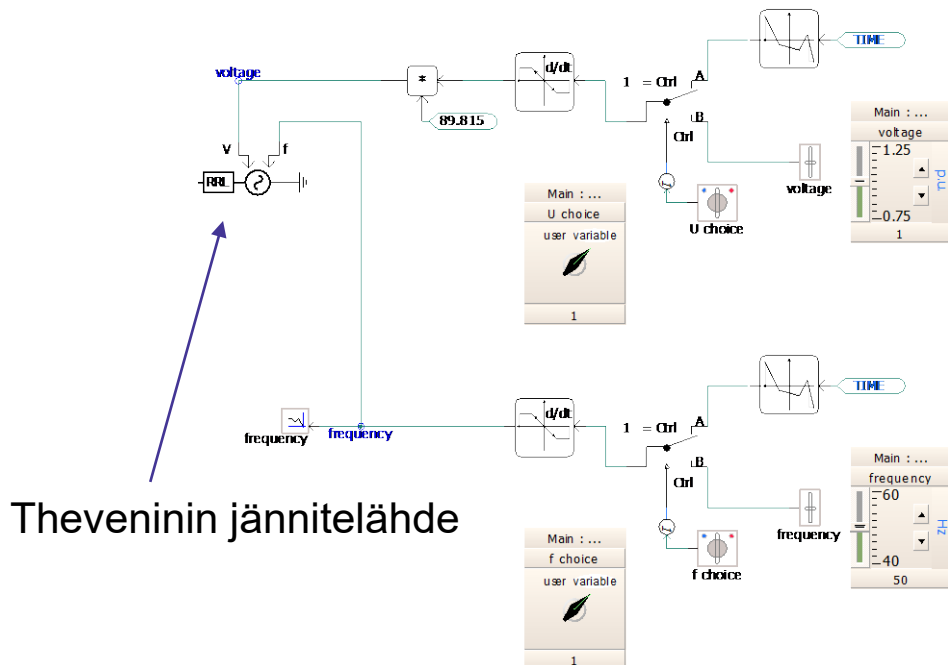
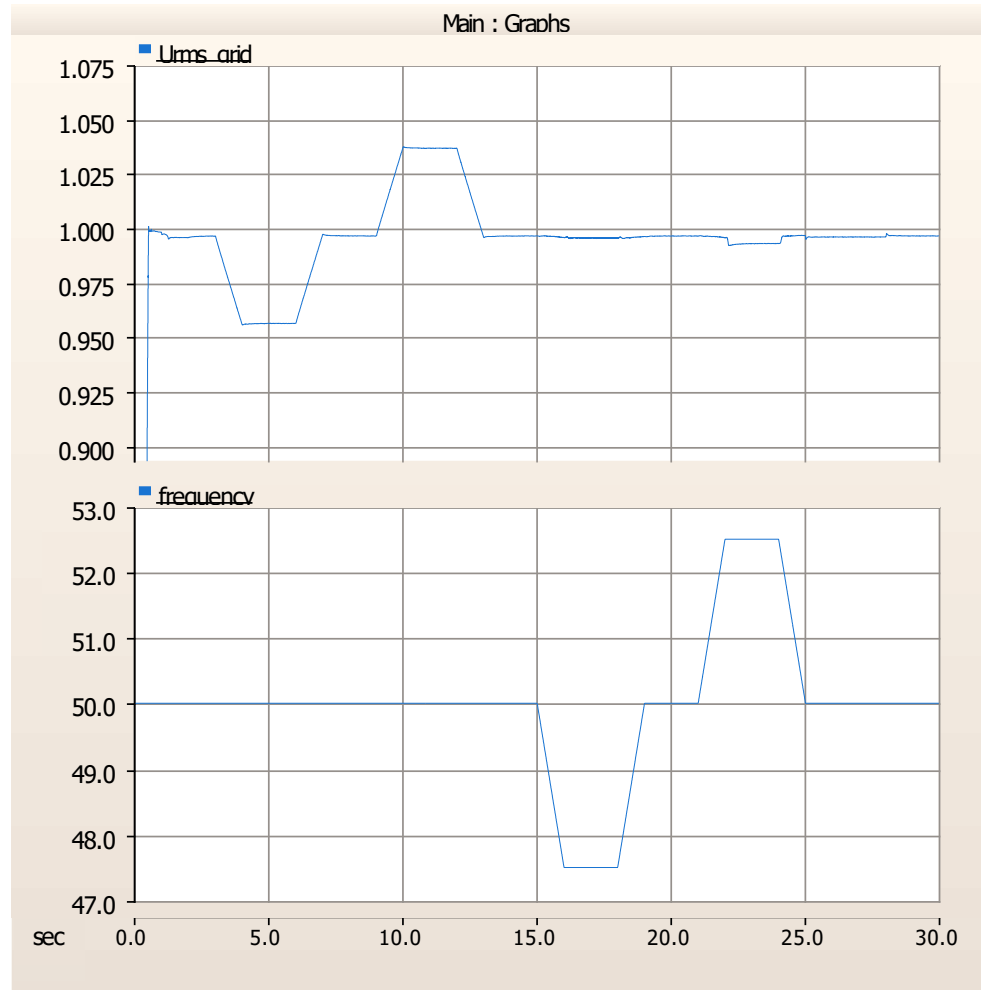
3. BESS:n ja PV:n droop-vasteet saarekkeessa – **tahtikone** mukana
 - perinteinen säätö (P/f ja Q/U) + viiveet

1a) Akku ja PV verkon rinnalla jännite- ja taajuusmuutoksissa

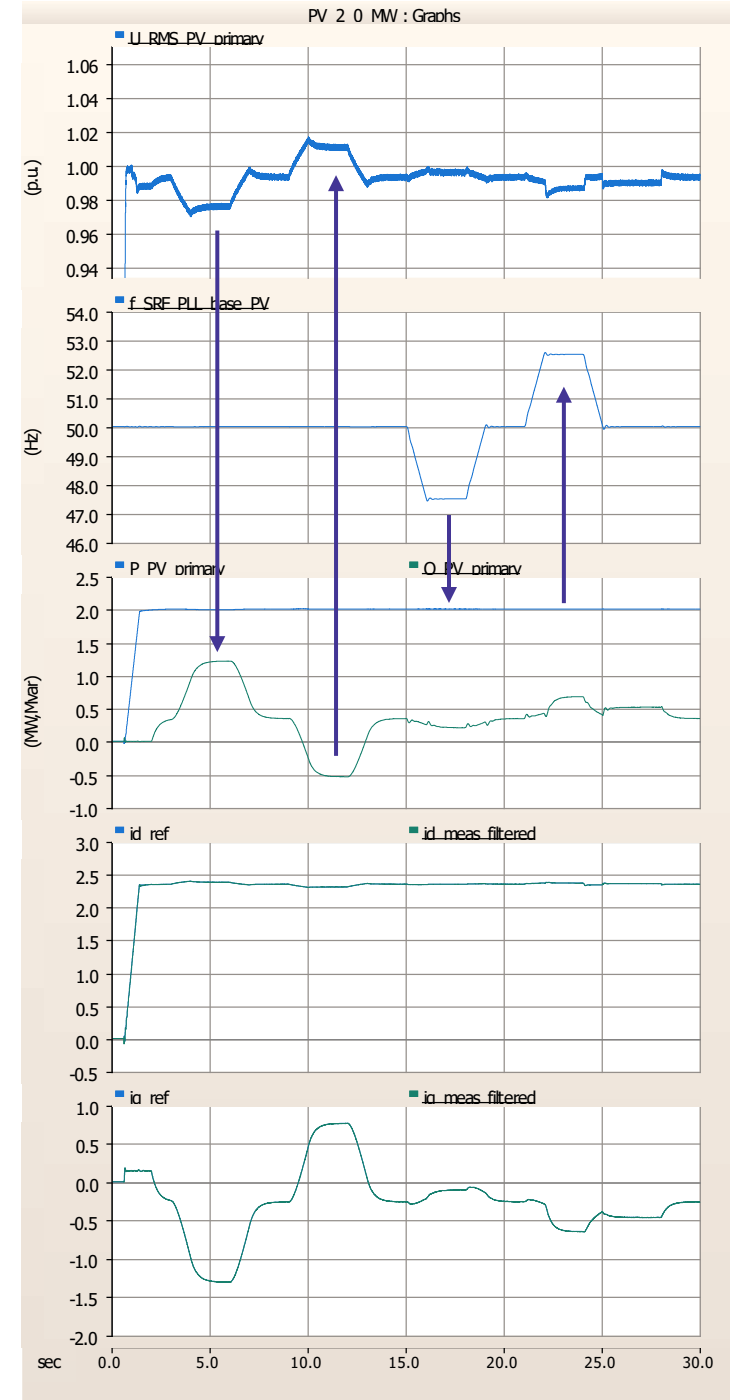
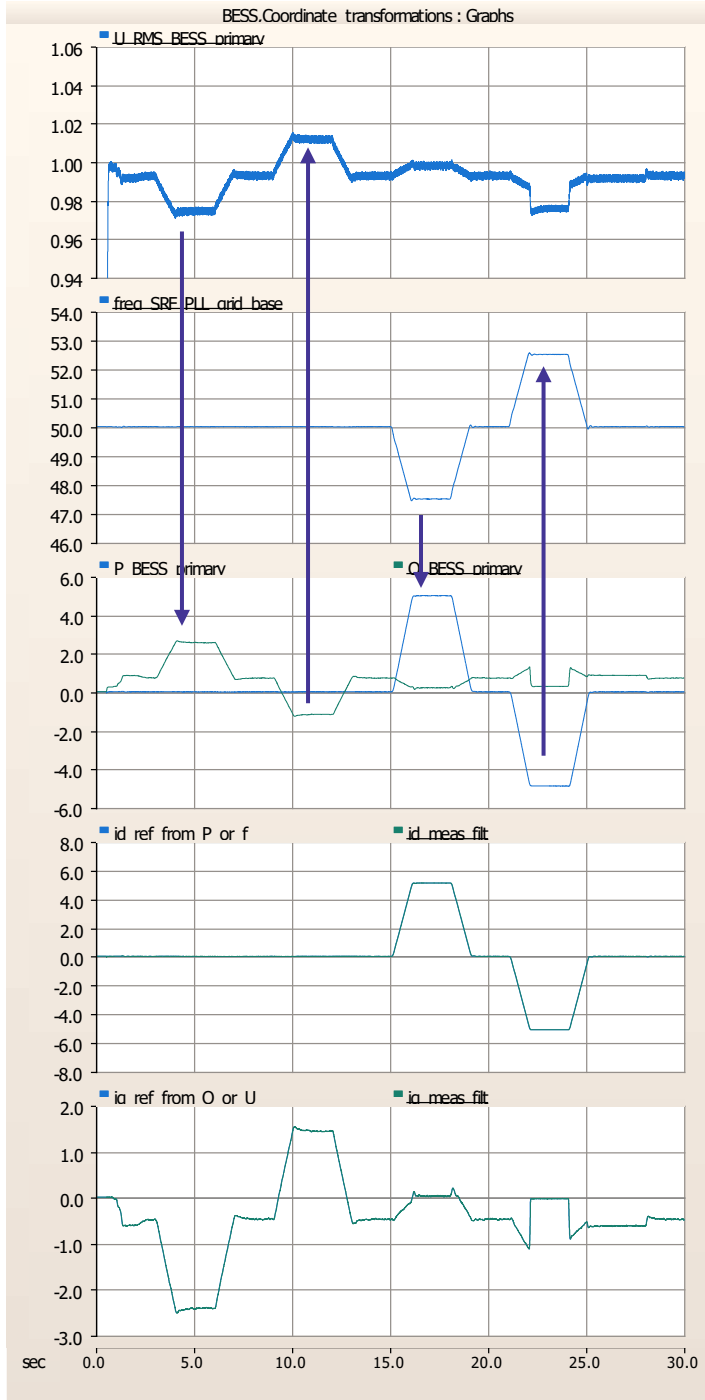
-Droop 5 %

1a) Akku ja PV verkon rinnalla jännite- ja taajuusmuutoksissa

1. Ensin ulkoisen verkon:
 - jännitettä muutetaan alas ja ylös
 - ...sitten taajuutta muutetaan alas ja ylös
2. Akku: päto- ja loistehdroop käytössä (5 %)
3. PV: loistehdroop käytössä (5 %)

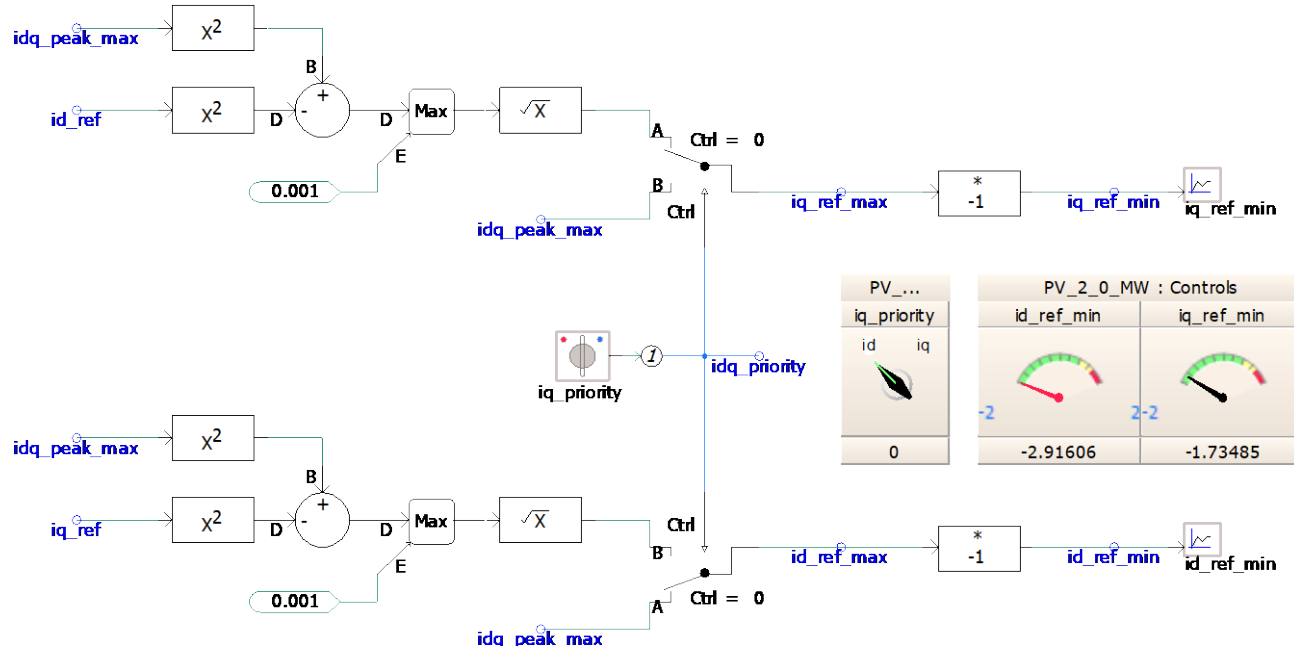


Akun pätö- ja loistehovasteet



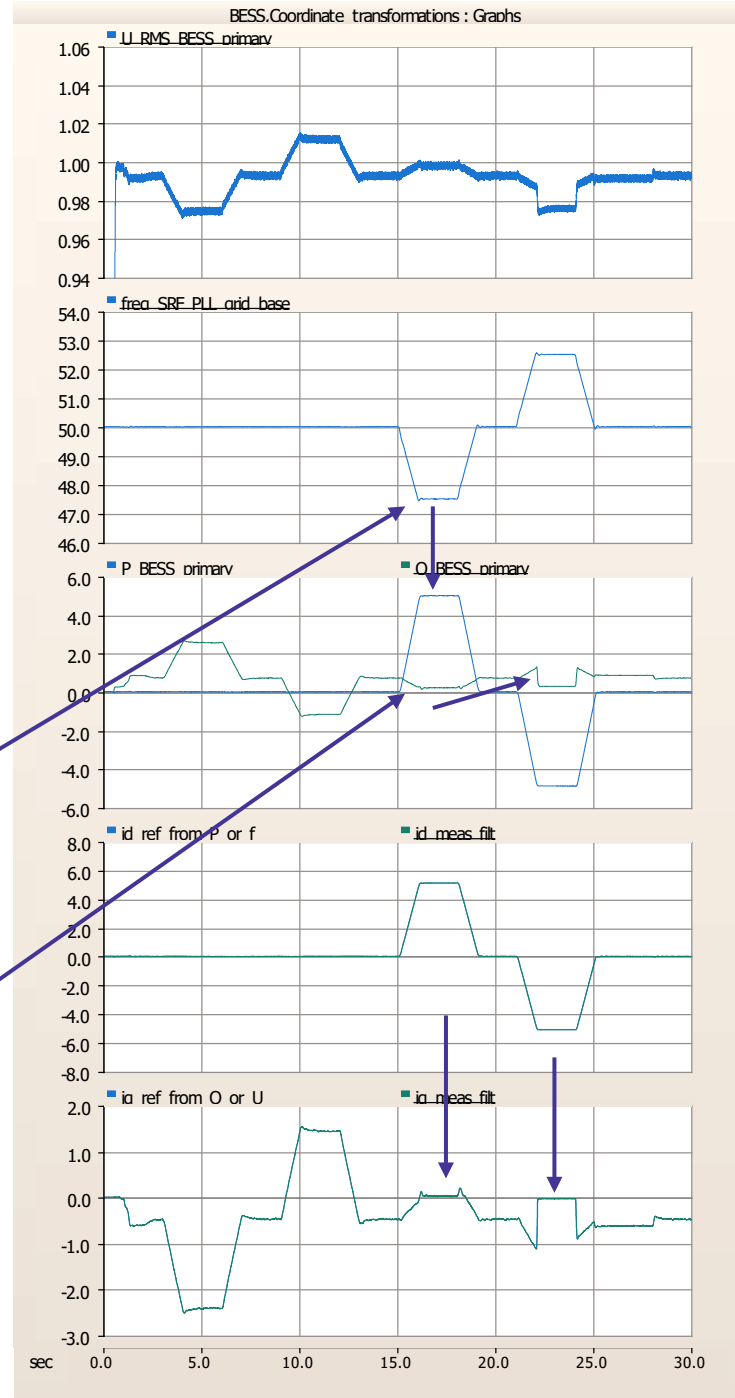
PV:n pätö- ja loistehovasteet

Akun / PV:n pätö- ja loistehon priorisointilogiikka



Kun droop on 5 %, niin 47.5 Hz taajuus (2.5 Hz pudotus) tarkoittaa koko nimellistehon aktivointia

Loistehontuotantoa joudutaan rajoittamaan

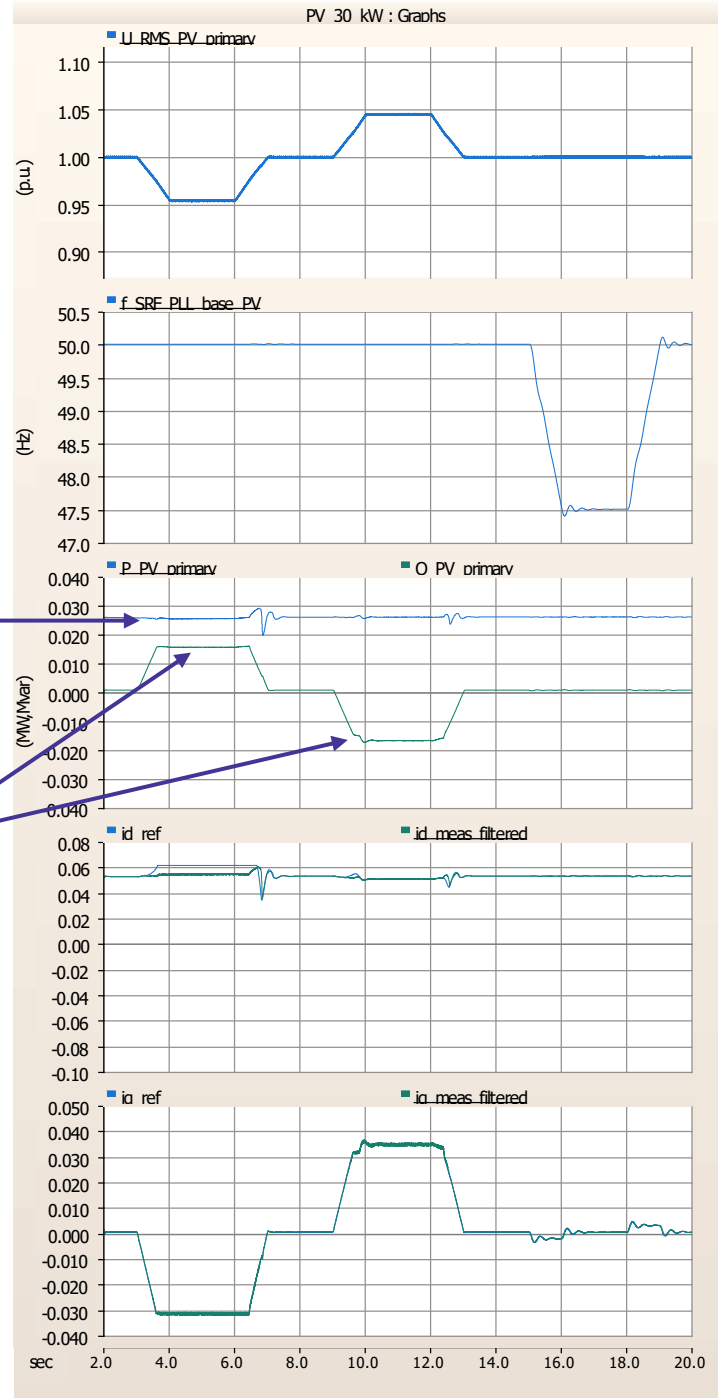


PV verkon rinnalla – id ja iq priorisointi

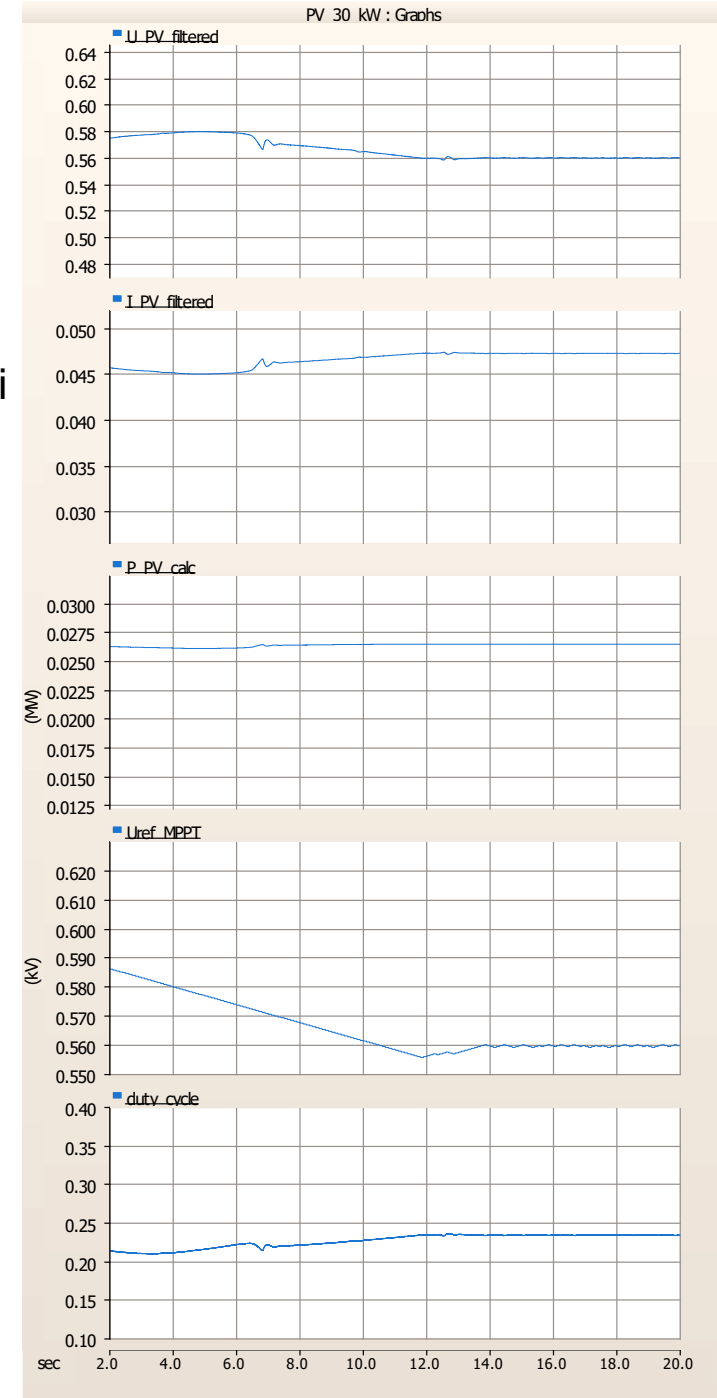
id-priorisointi

Pätöteho pysyy ~vakiona

Loistehon minimi- ja maksimit
(itseisarvo) eivät ylitä 20 kVA:ta



PV:n DC-puoli
"rauhallinen"

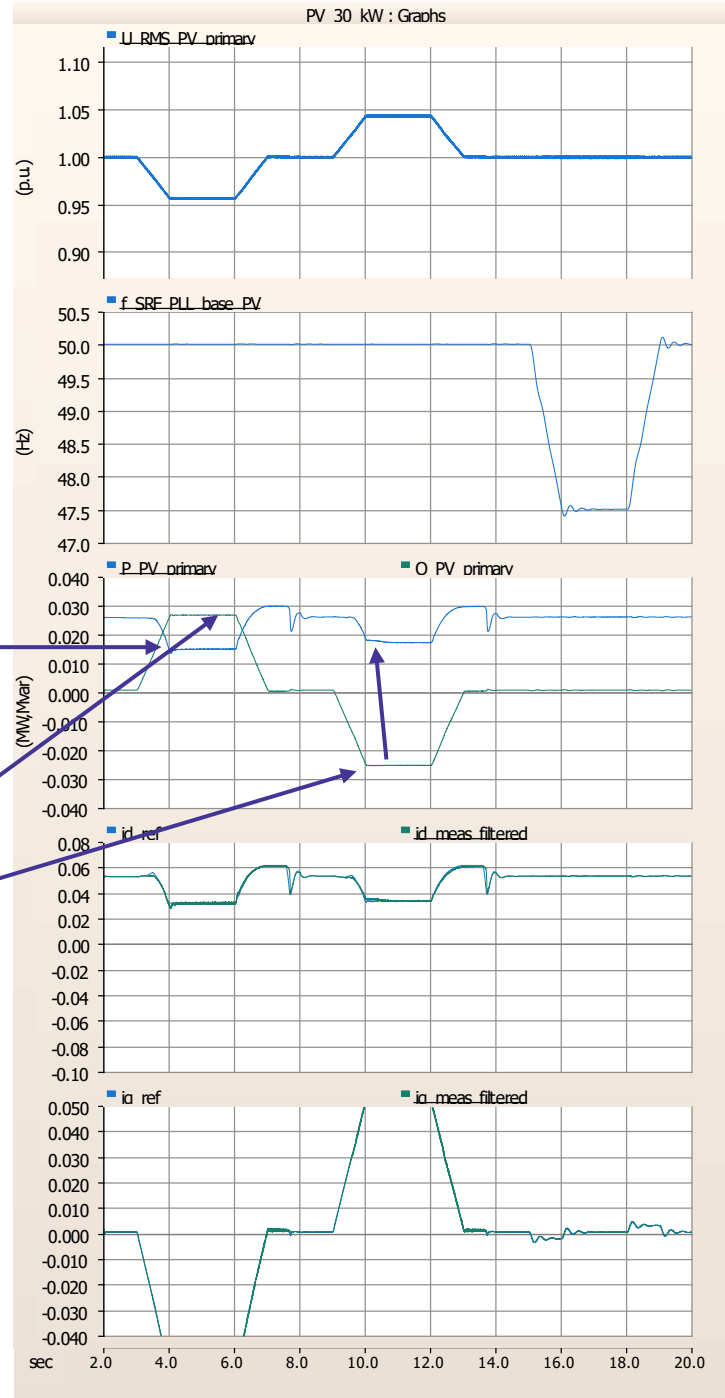


PV verkon rinnalla – id- ja iq-priorisointi

iq-priorisointi

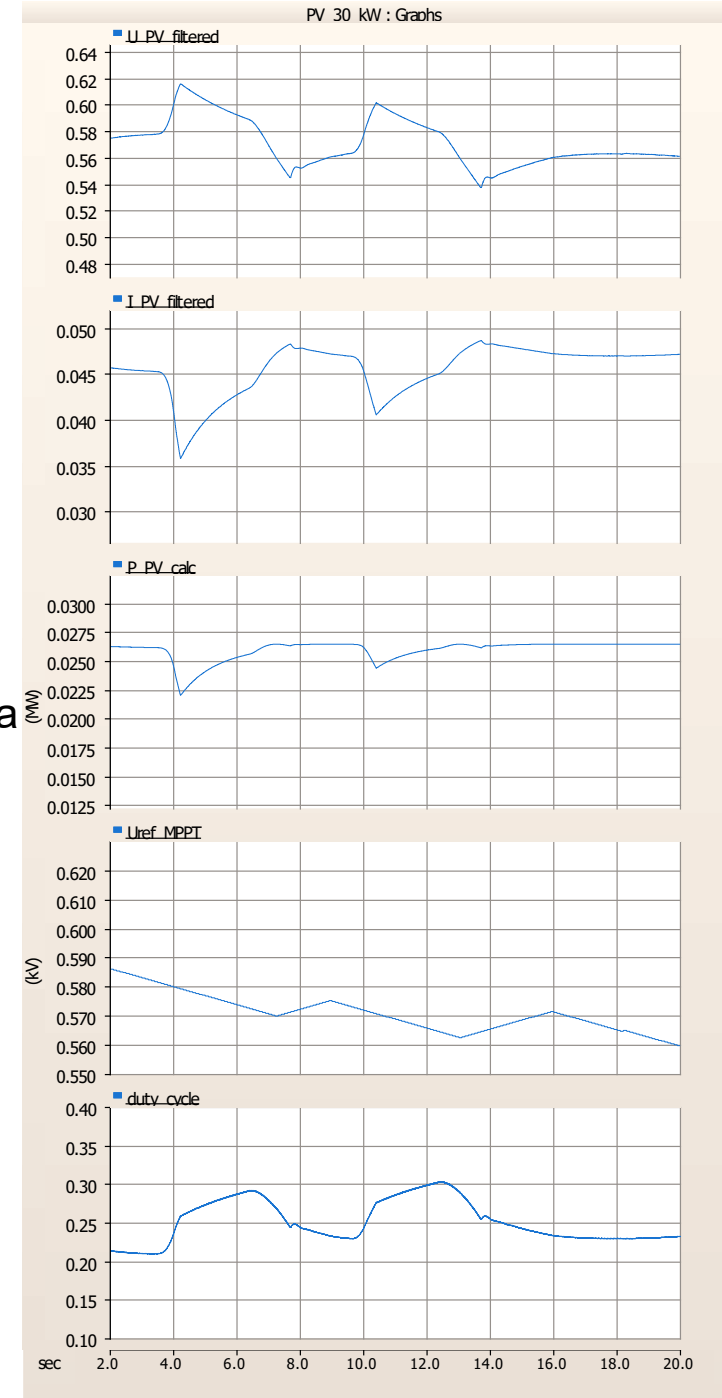
Pätötehoa rajoitetaan

Loistehoa tuotetaan koko drooppia vastaava määrä



Pätötehon rajoitukset näkyvät heti PV:n DC-puolelle

Ilman PV:tä / primäärienergiaa → STATCOM

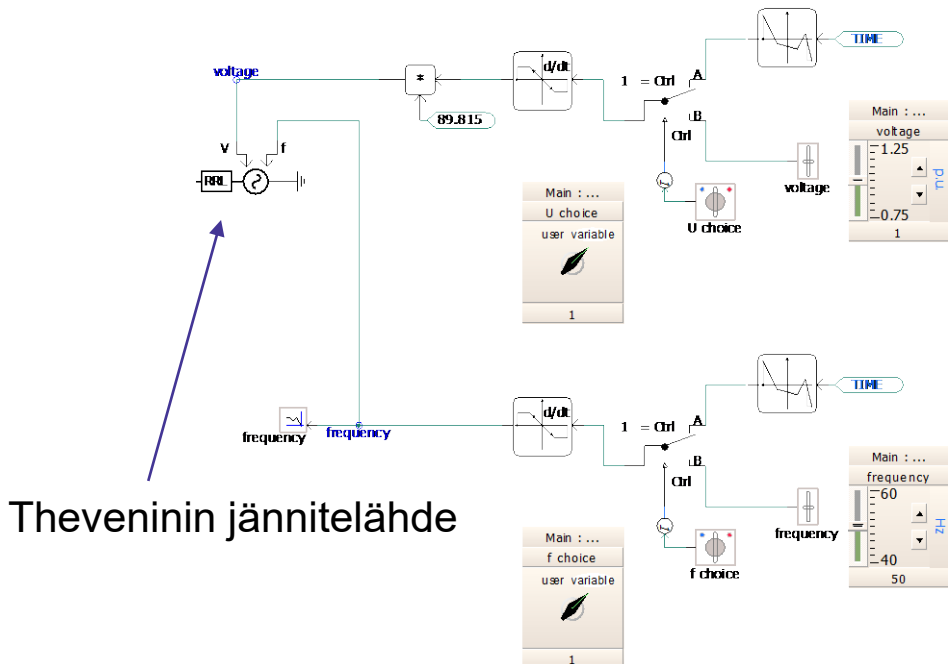
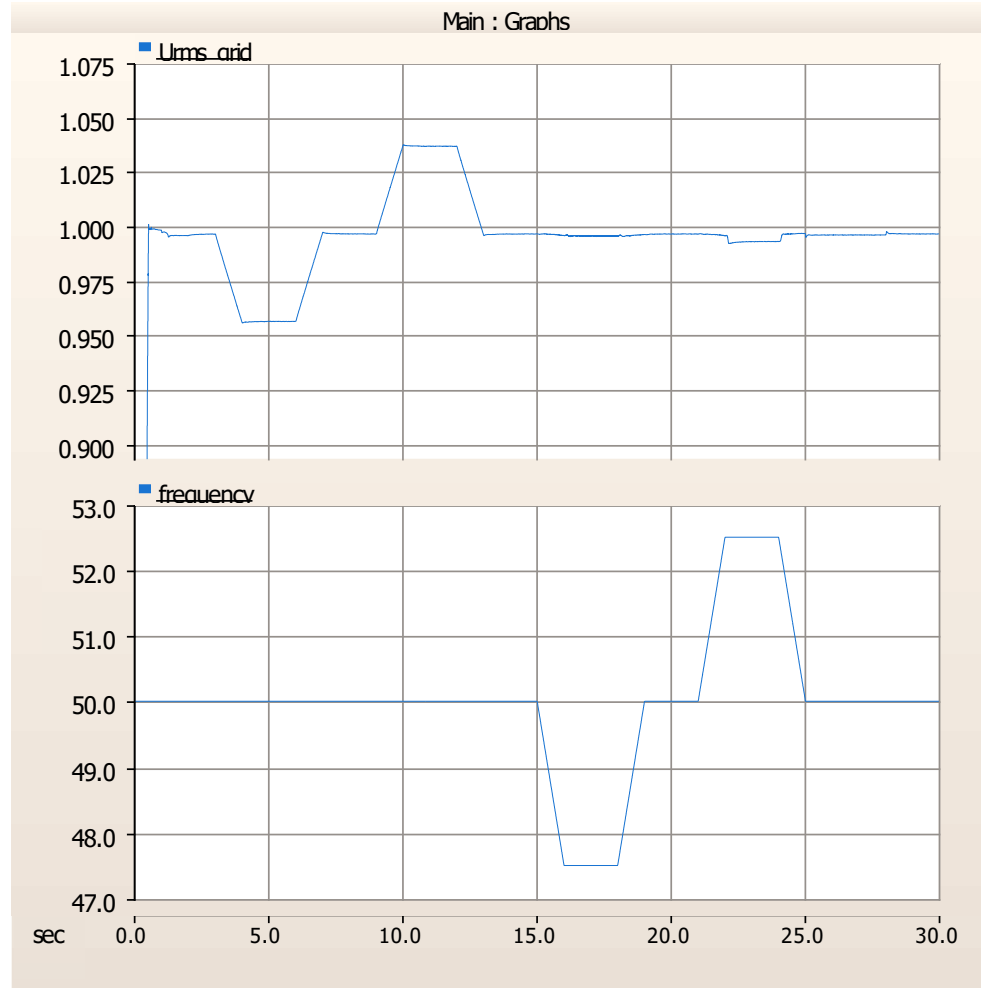


1b) Akku ja PV verkon rinnalla jännite- ja taajuusmuutoksissa

- Akku: droopit 3 % (f) ja 10 % (U)
- PV: 7 % (U)

1b) Akku ja PV verkon rinnalla jännite- ja taajuusmuutoksissa

1. Ensin ulkoisen verkon:
 - jännitettä muutetaan alas ja ylös
 - ...sitten taajuutta muutetaan alas ja ylös
2. Akku: päto- ja loistehdroop käytössä (3 % /10 %)
3. PV: loistehdroop käytössä (7 %)

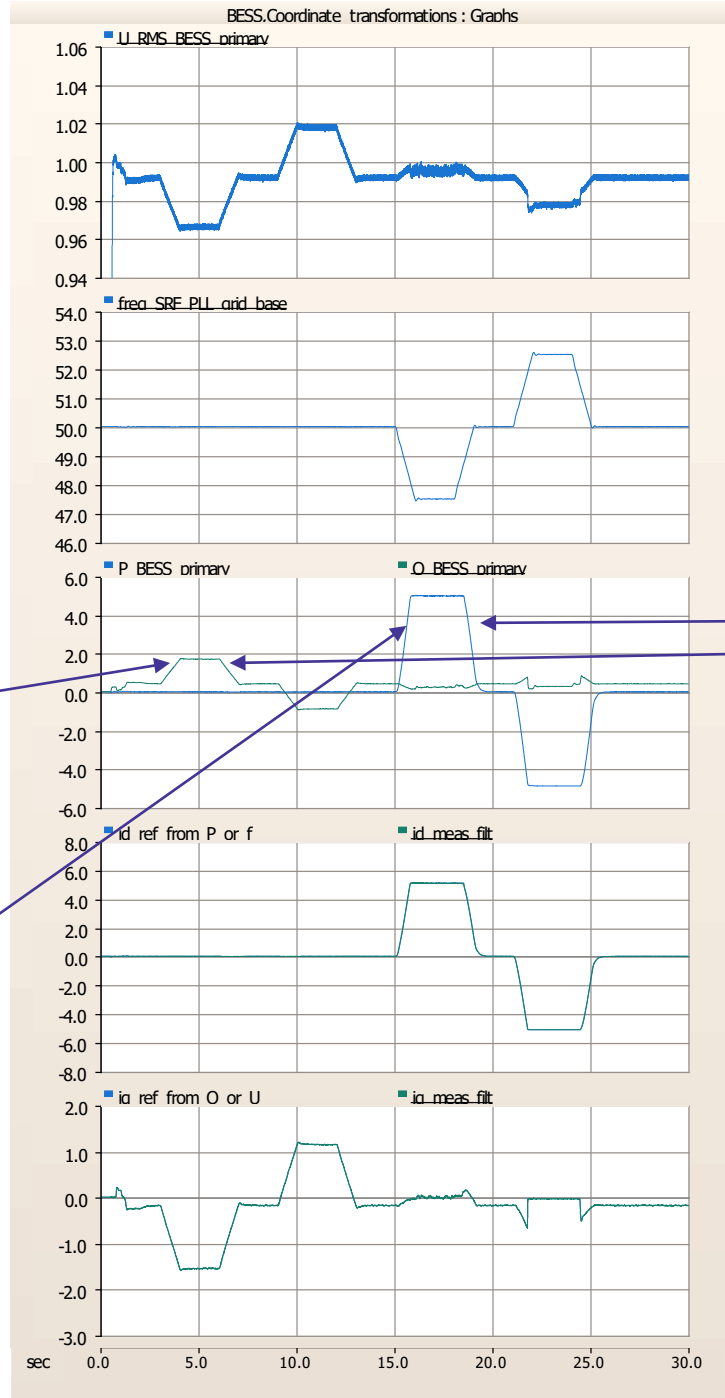


Akun pätö- ja loistehovasteet

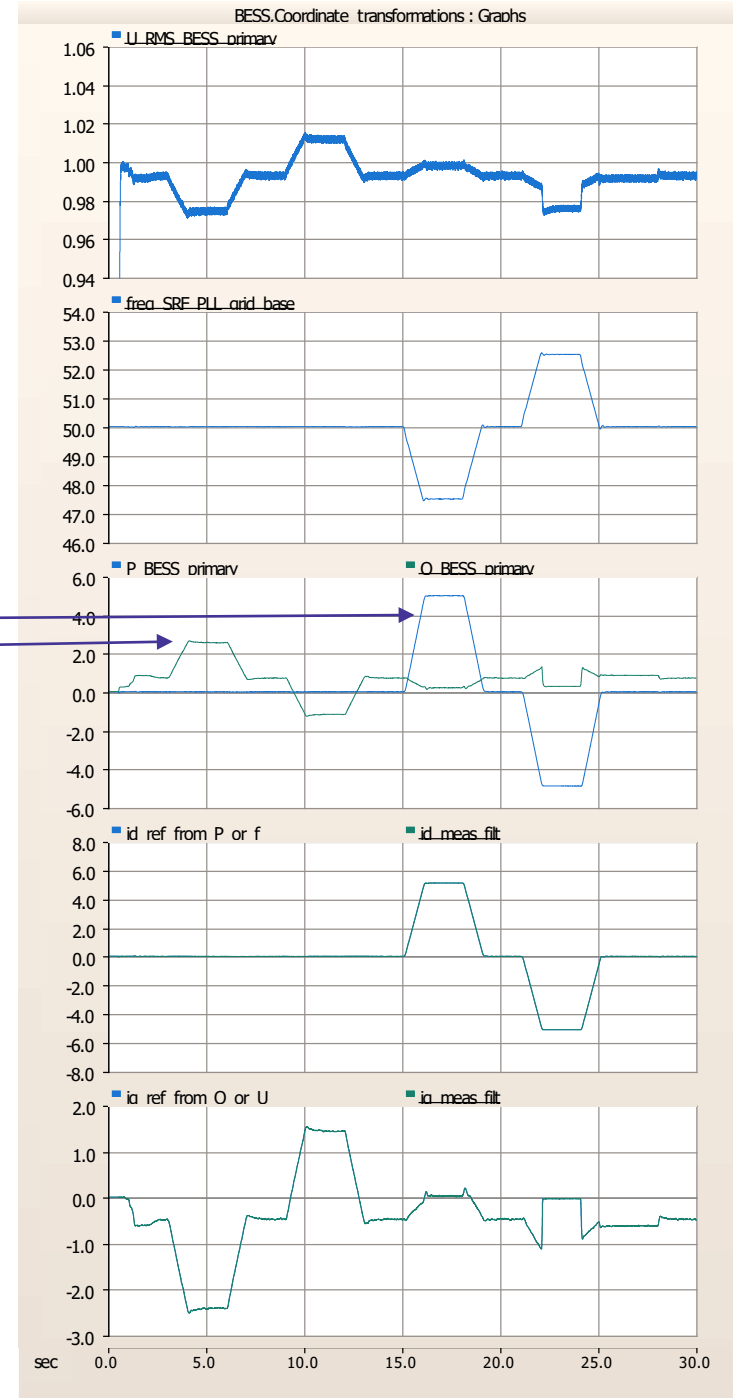
- Pätötehdroop 3 %
- Loistehodroop 10 %

Loisteho on pienempi

Pätöteho nousee nyt nopeammin – maksimi on sama

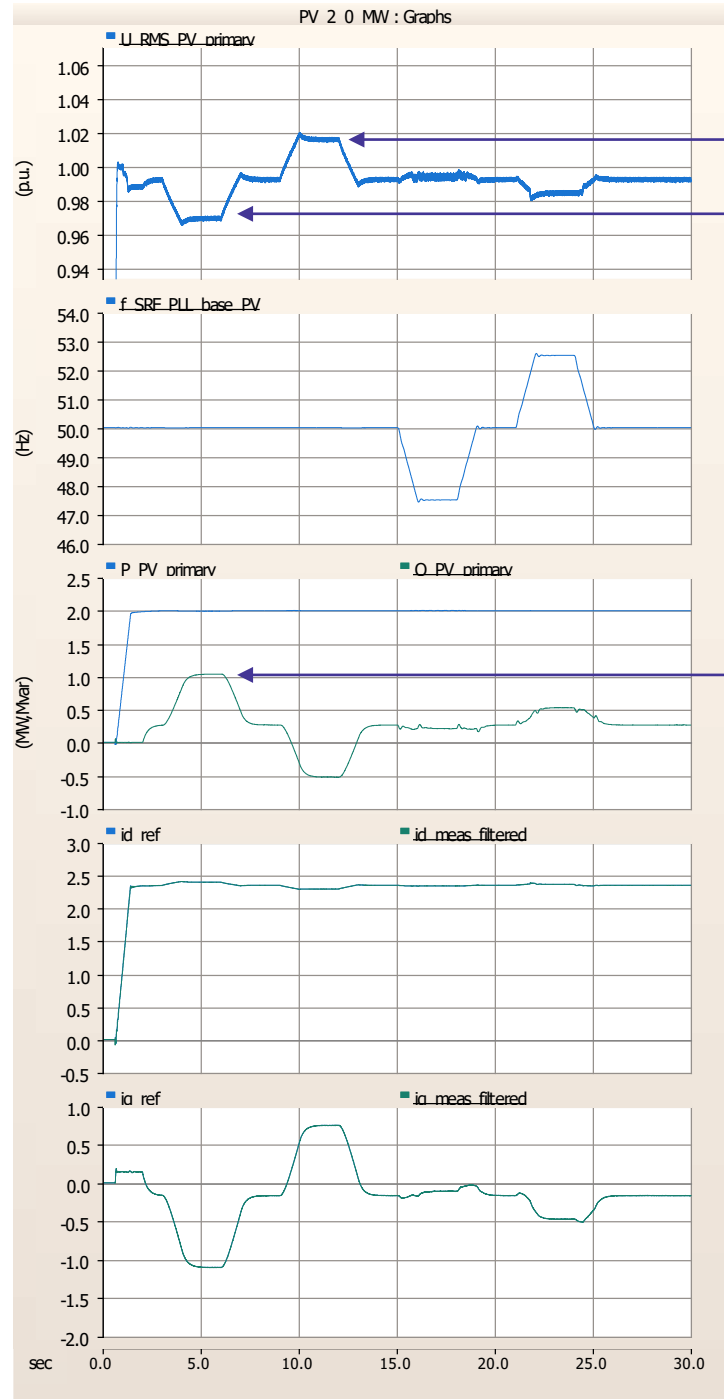


- Pätötehdroop 5 %
- Loistehodroop 5 %



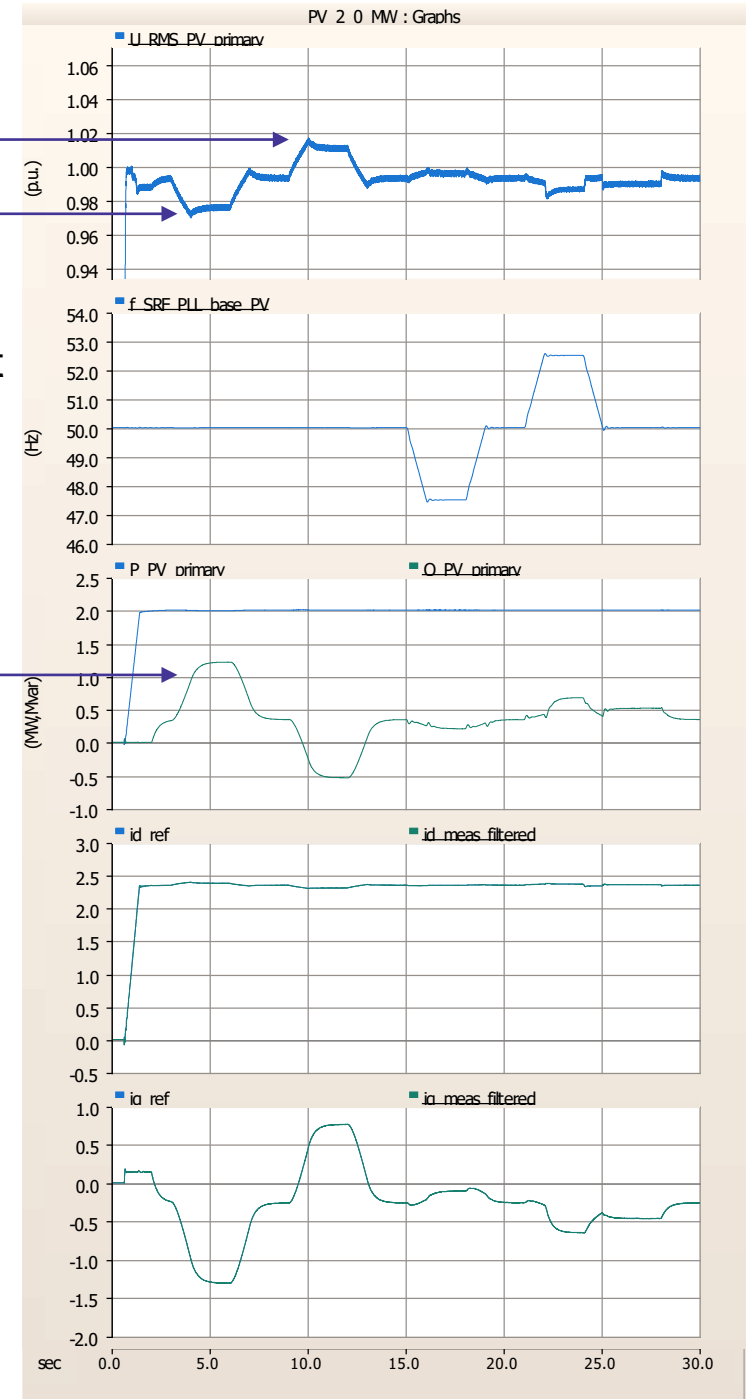
PV:n pätö- ja loistehovasteet

Loistehodroop 7.5 %



Jännitemuutokset
tuotantoyksikön
navoissa suuremmat

Loistehodroop 5 %



Loistehomuutos on
pienempi (samalla
jännitemuutoksella,
kun droop-arvo on
suurempi)

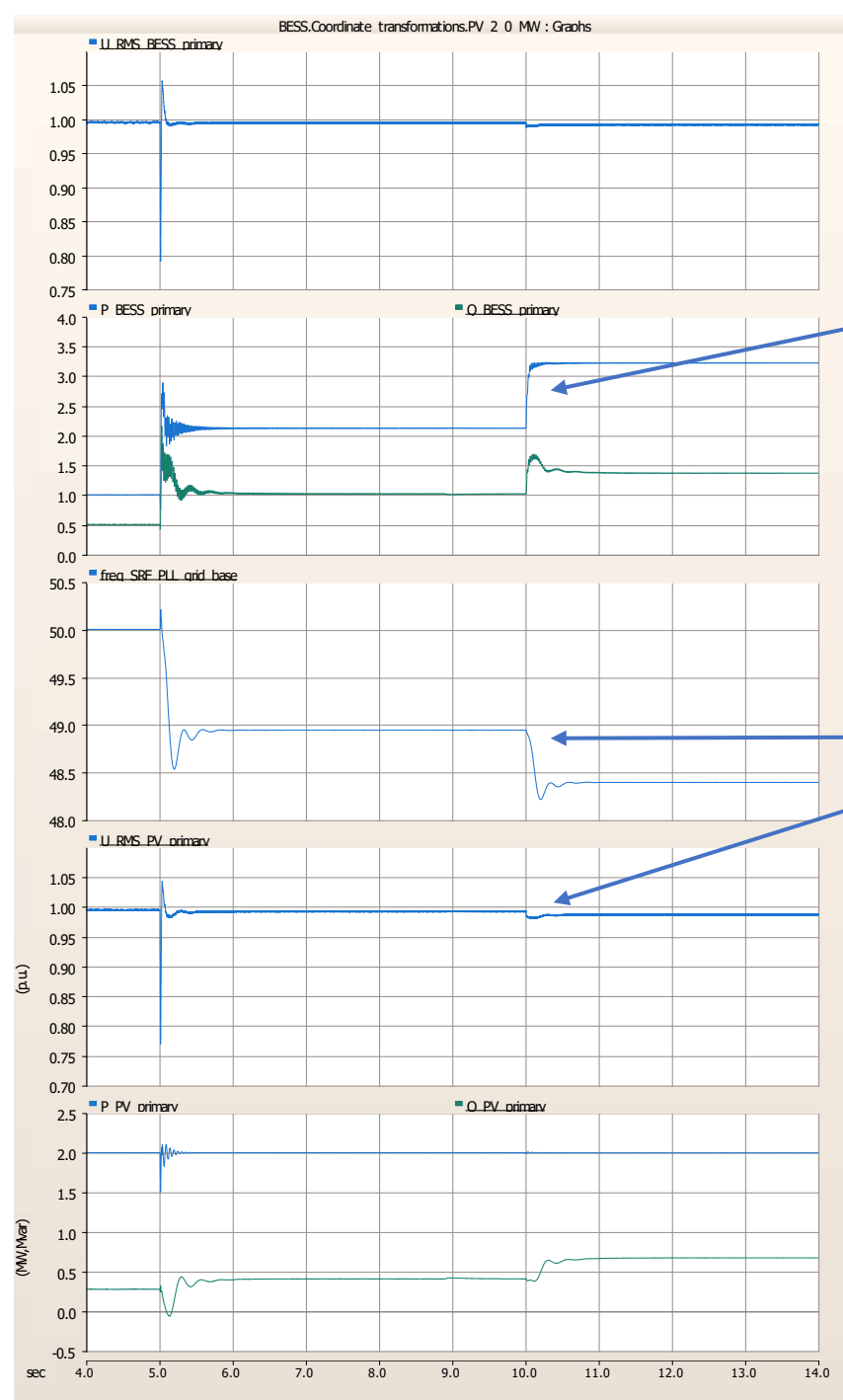
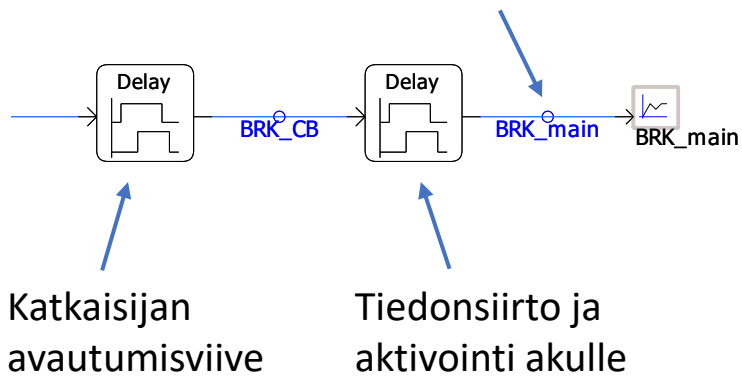
2) Saarekoituminen: BESS (4.0 MVA) & PV (2.5 MVA)

- Droopit 5 %
- Viiveet muuttuvat

2) Saarekoituminen: BESS (4.0 MVA) & PV (2.5 MVA)

- Droopit (5 %) jokaisessa tuotantoyksikössä (PV:ssä vain U/Q)
- delay CB: 0 ms
- delay communication: 0 ms

Kokonaisviive akulle:
0 ms + 0 ms = 0 ms



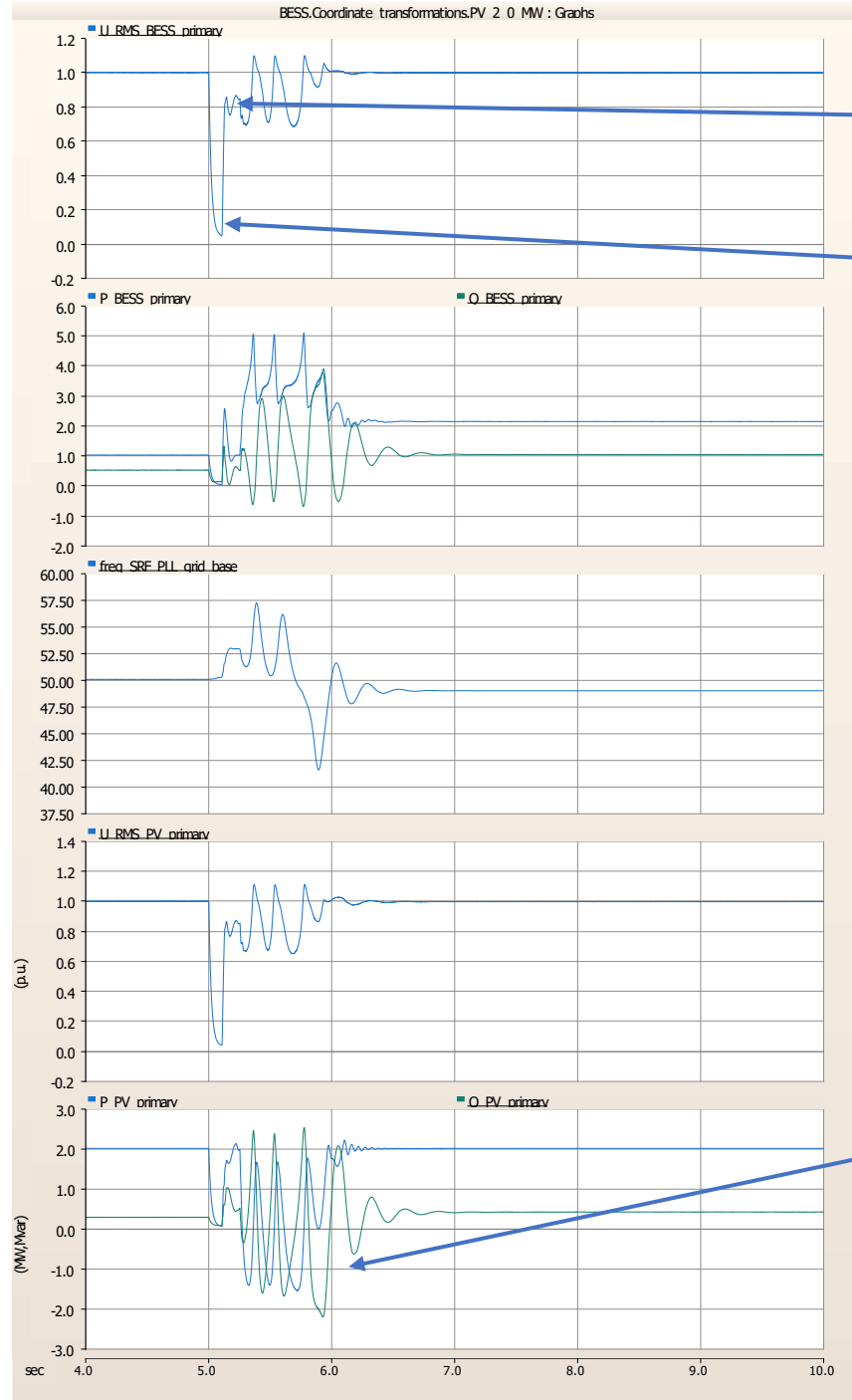
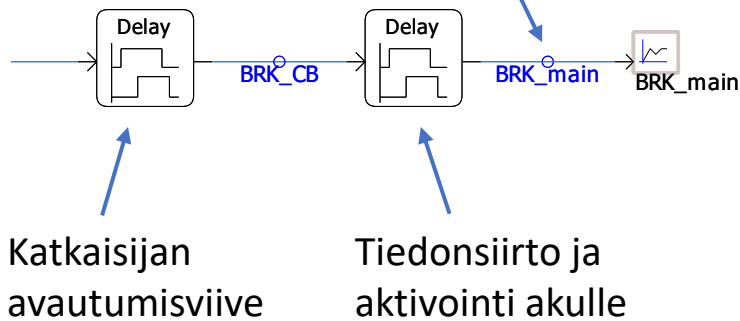
Päätö- ja loistehokuorman lisäys

Perinteinen

2) Saarekoituminen: BESS (4.0 MVA) & PV (2.5 MVA)

- Droopit (5 %) jokaisessa tuotantoyksikössä (PV:ssä vain U/Q)
- Perinteiseen säätötapaan perustuva säätö
- delay CB: 100 ms
- delay communication: 150 ms

Kokonaisviive akulle:
 $100\text{ ms} + 150\text{ ms} = 250\text{ ms}$



Tiedonsiirtoviive

Katkaisijan viive

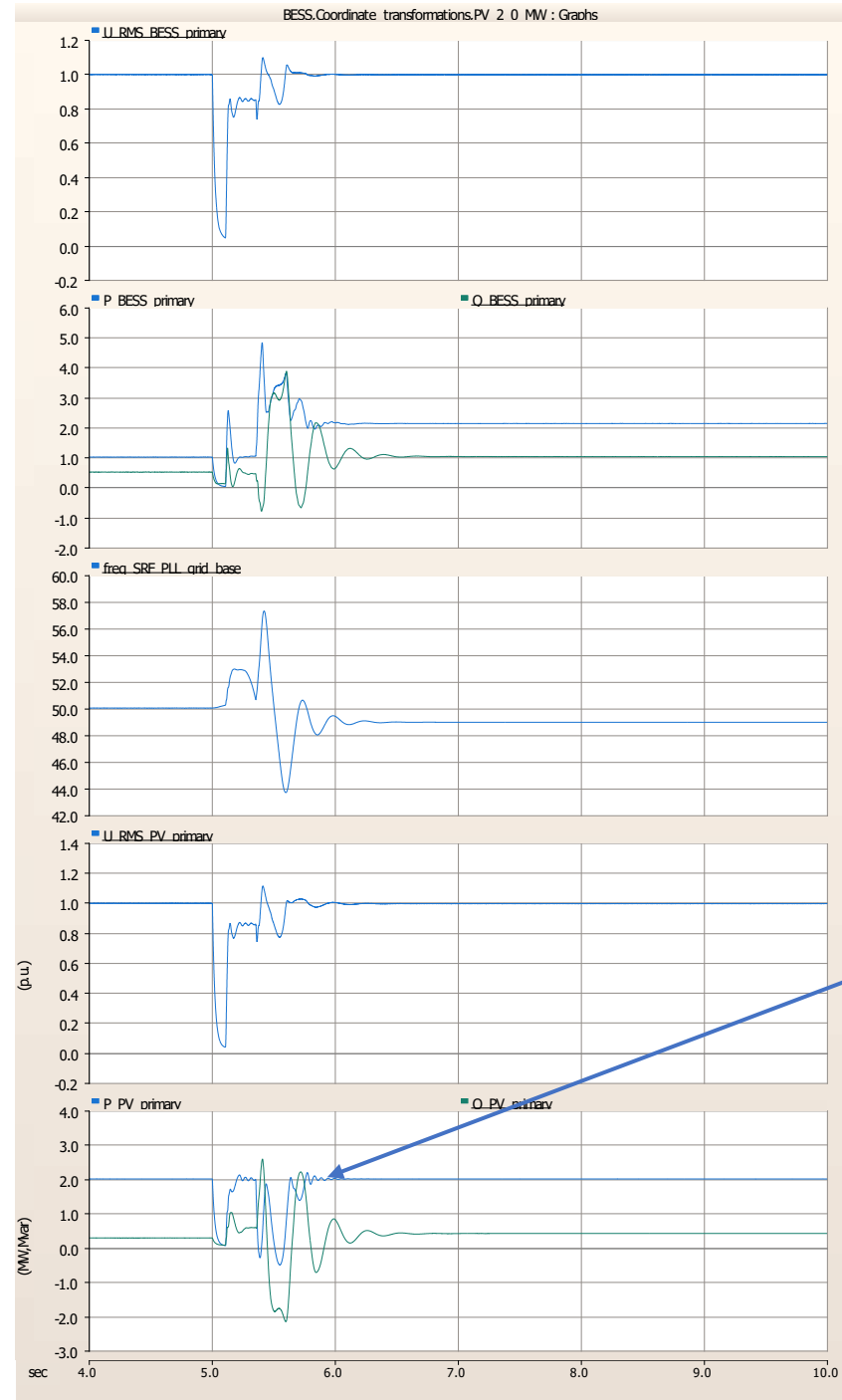
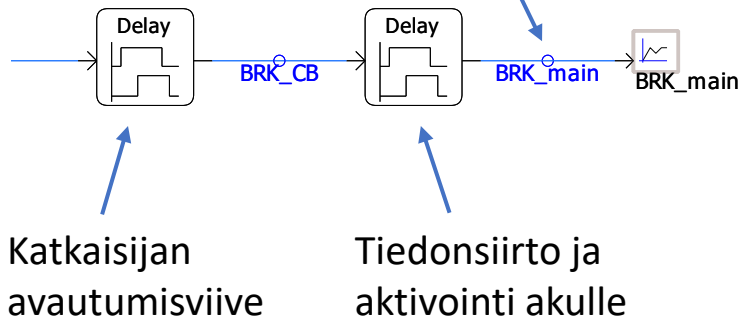
- Tiedonsiirtoviiveen aikana verkossa ei ole Grid-Forming –yksikköä
- BESS tahdistuu omiin virtoihinsa

PV:n ”heikko vaste”

2) Saarekoituminen: BESS (4.0 MVA) & PV (2.5 MVA)

- Droopit (5 %) jokaisessa tuotantoyksikössä (PV:ssä vain U/Q)
- delay CB: 100 ms
- delay communication: 250 ms

Kokonaisviive akulle:
100 ms + 250 ms =
350 ms

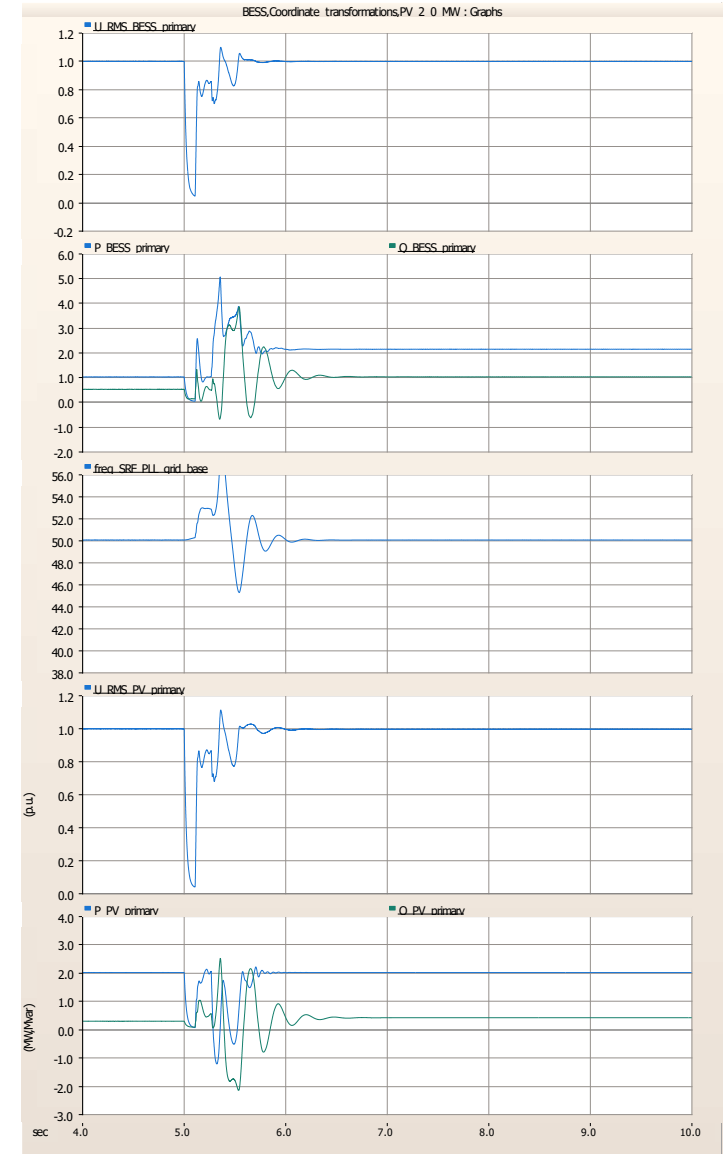
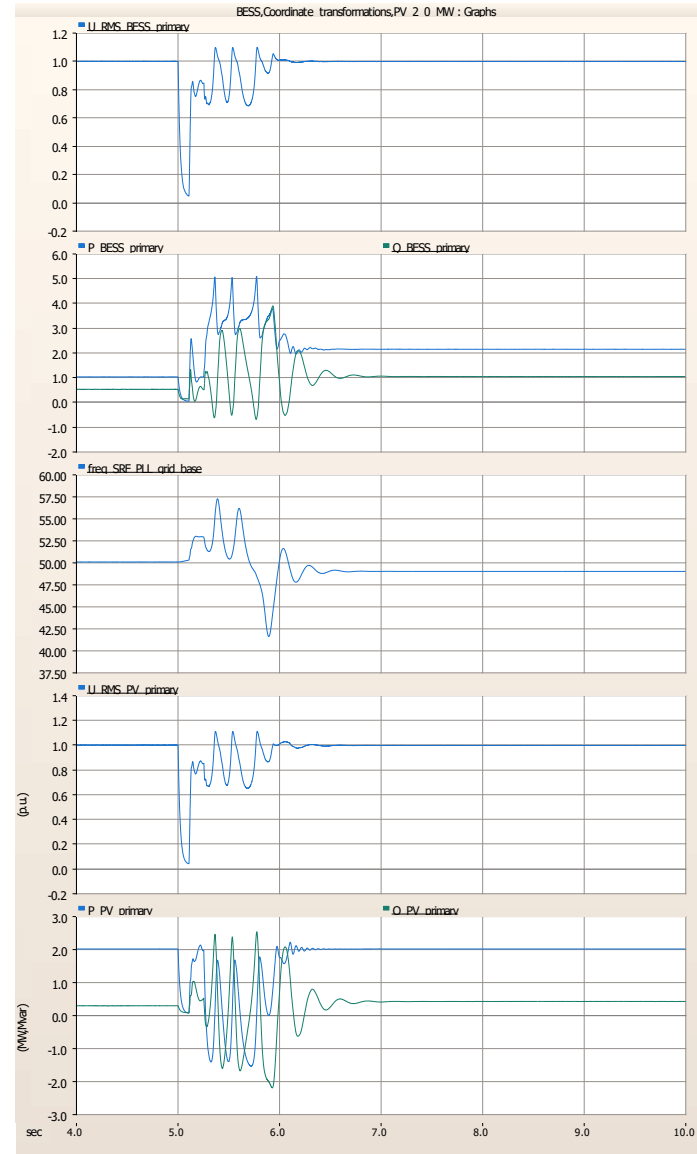
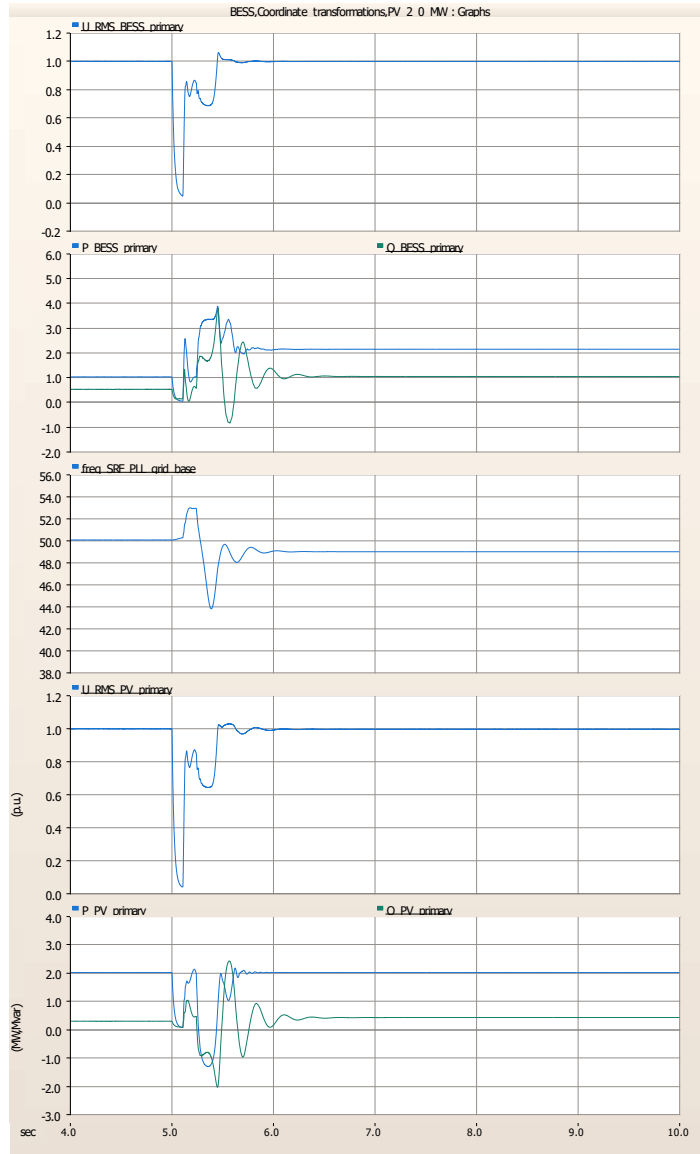


Tiedonsiirtoviiveet: 136 ms, 150 ms, 163 ms

Kokonaisviive akulle: 100 ms + 136 ms = 236 ms

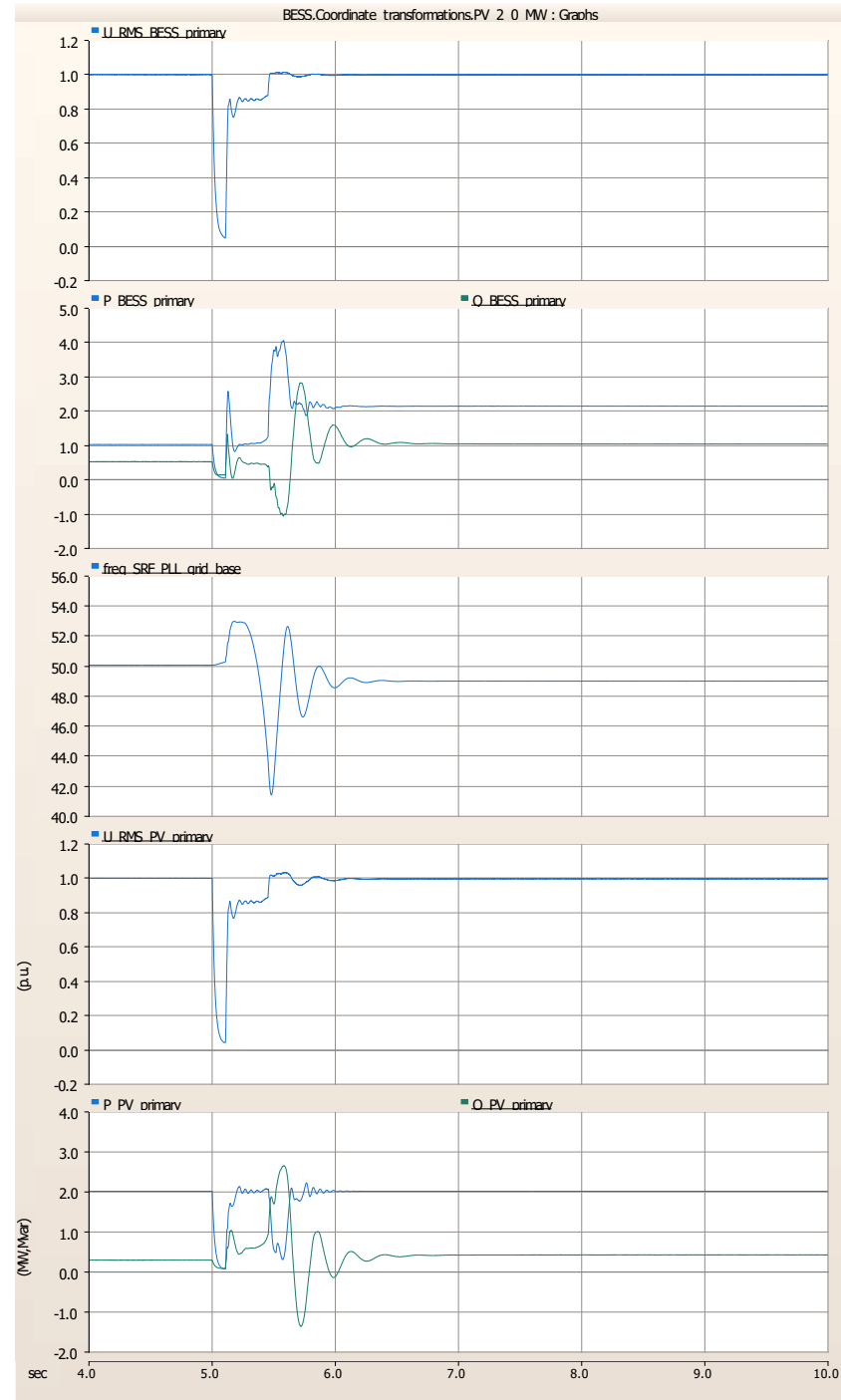
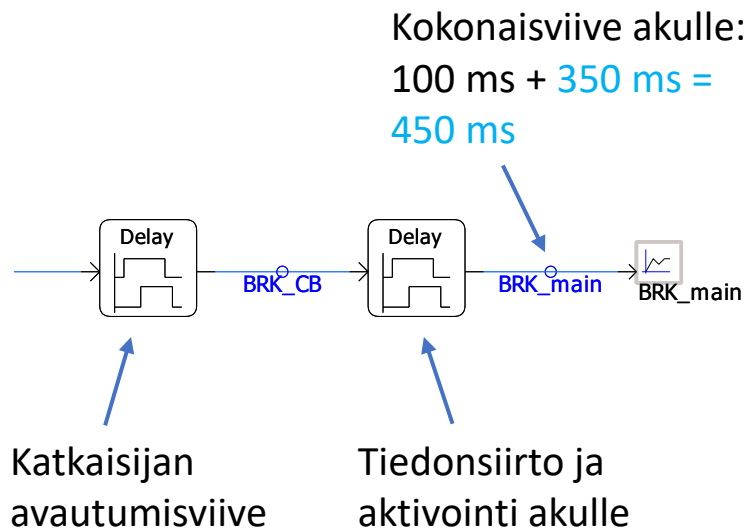
Kokonaisviive akulle: 100 ms + 150 ms = 250 ms

Kokonaisviive akulle: 100 ms + 163 ms = 265 ms



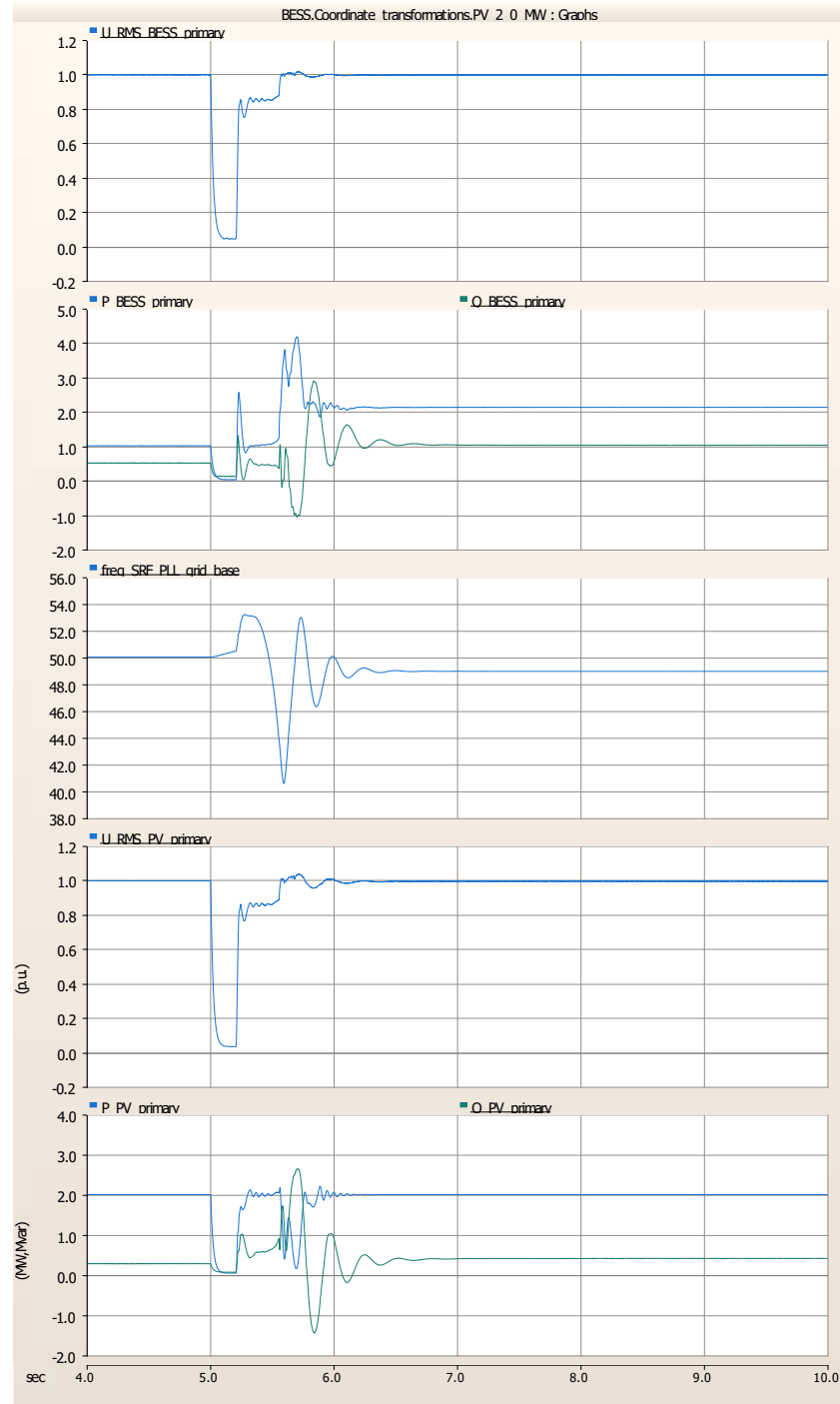
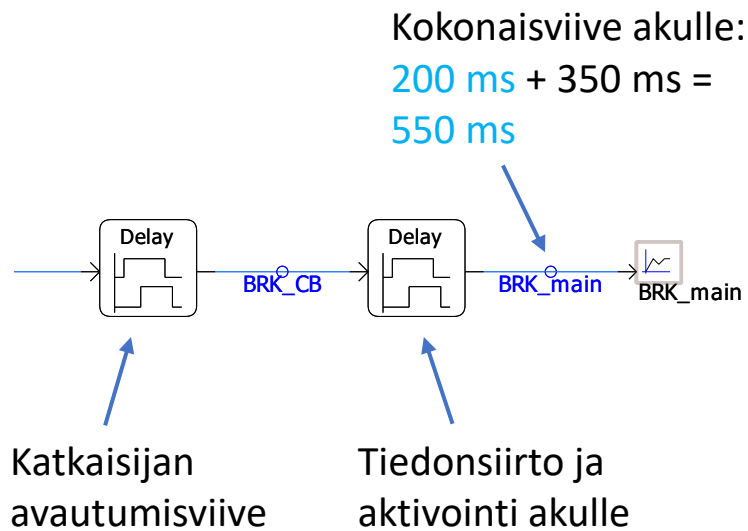
2) Saarekoituminen: BESS (4.0 MVA) & PV (2.5 MVA)

- Droopit (5 %) jokaisessa tuotantoyksikössä (PV:ssä vain U/Q)
- delay CB: 100 ms
- delay communication: 350 ms



2) Saarekoituminen: BESS (4.0 MVA) & PV (2.5 MVA)

- Droopit (5 %) jokaisessa tuotantoyksikössä (PV:ssä vain U/Q)
- delay CB: 200 ms
- delay communication: 350 ms



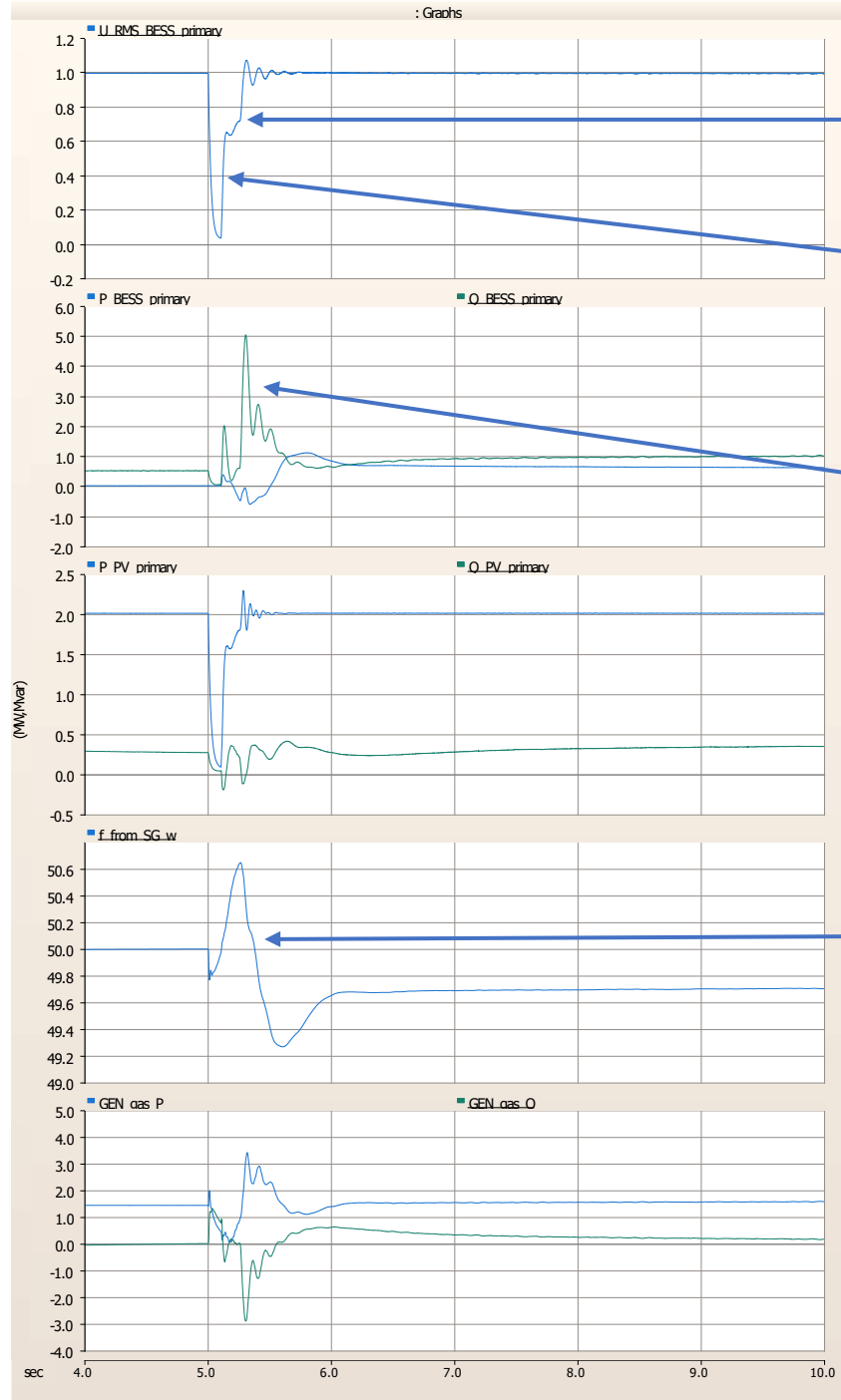
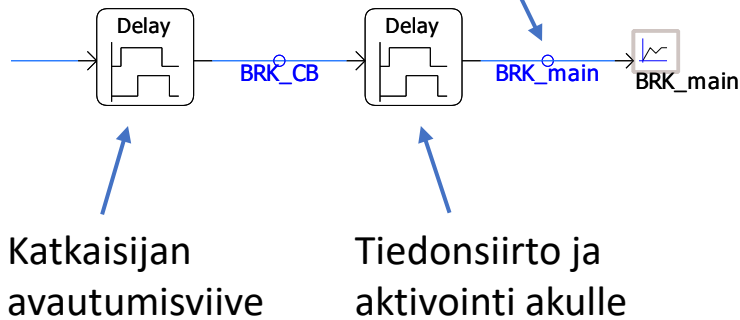
3. Saarekoituminen: BESS (4.0 MVA) & PV (2.5 MVA) ja SM (2.0 MVA)

- Droopit 5 %
- Viiveet muuttuvat

3. Saarekoituminen: BESS (4.0 MVA) & PV (2.5 MVA) ja SM (2.0 MVA)

- Droopit (5 %) jokaisessa tuotantoyksikössä (PV:ssä vain U/Q)
- delay CB: 100 ms
- delay communication: 150 ms

Kokonaisviive akulle:
 $100\text{ ms} + 150\text{ ms} = 250\text{ ms}$



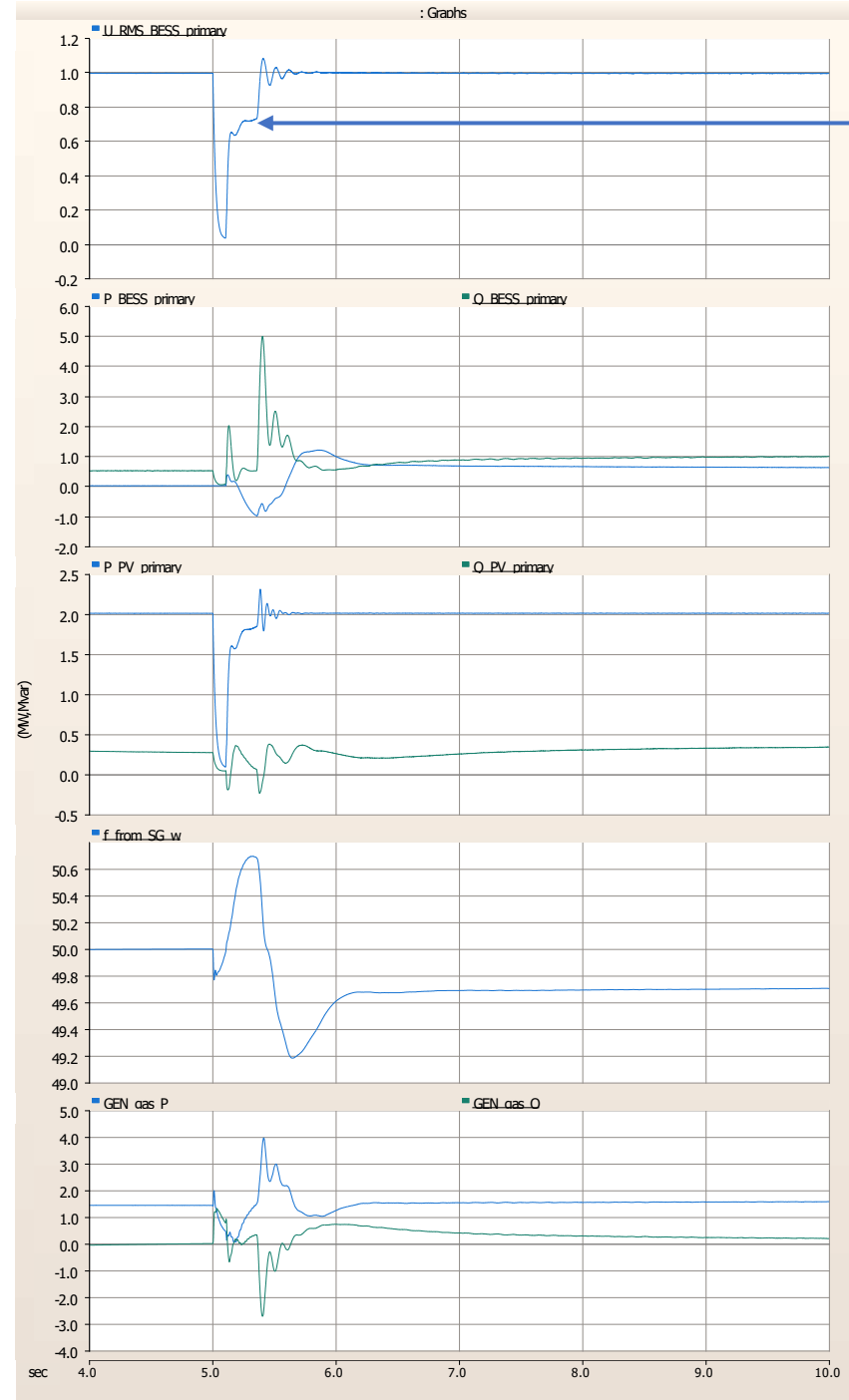
Tiedonsiirtoviive

Katkaisijan viive

Akku tukee jännitettä

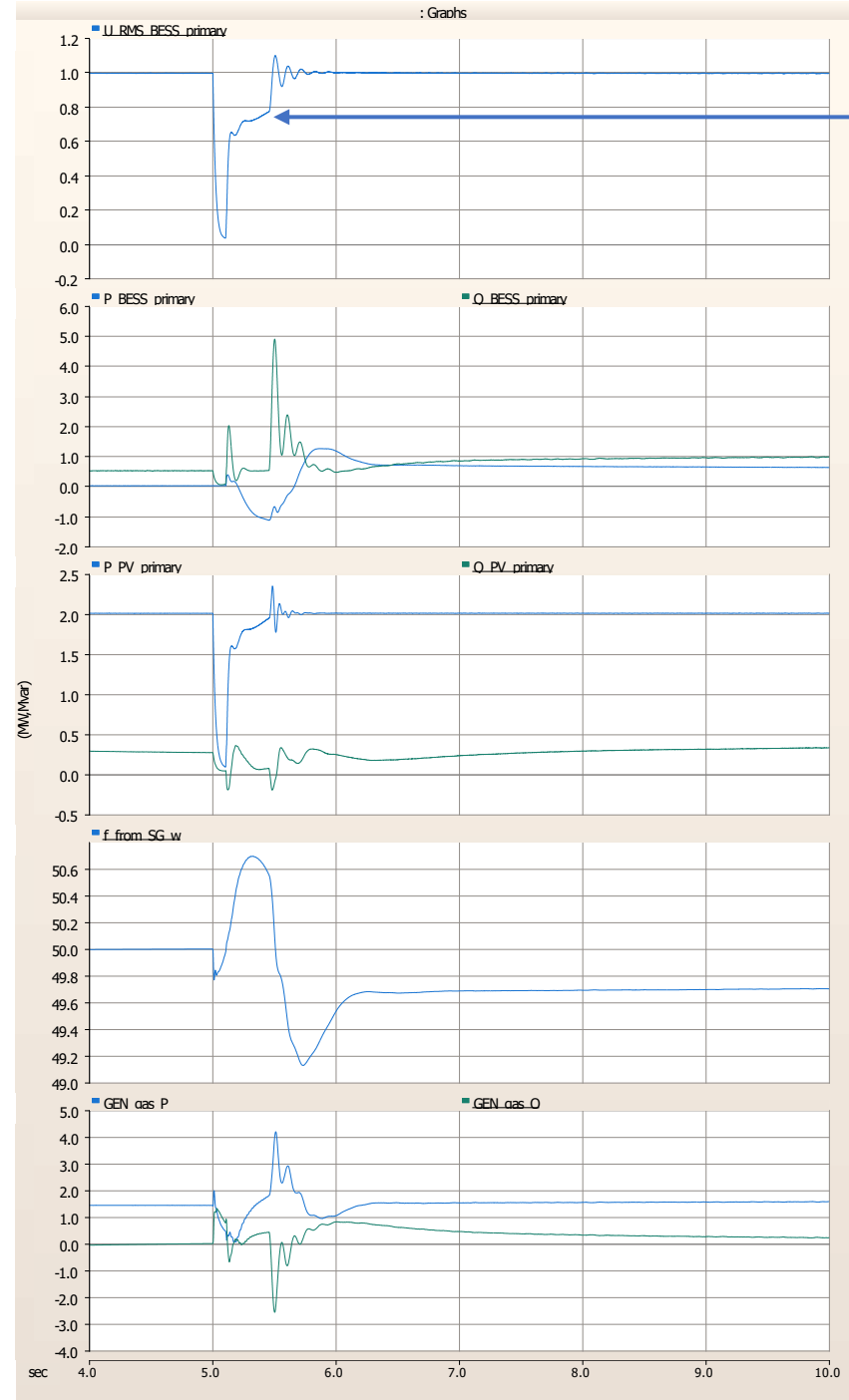
Suoraan SG:n pyörimisnopeudesta

- Saarekoituminen:
BESS (4.0 MVA) &
PV (2.5 MVA) ja
SM (2.0 MVA)
- Droopit jokaisessa
tuotantoyksikössä
(PV:ssä vain U/Q)
- delay CB: 100 ms
- delay communication:
250 ms



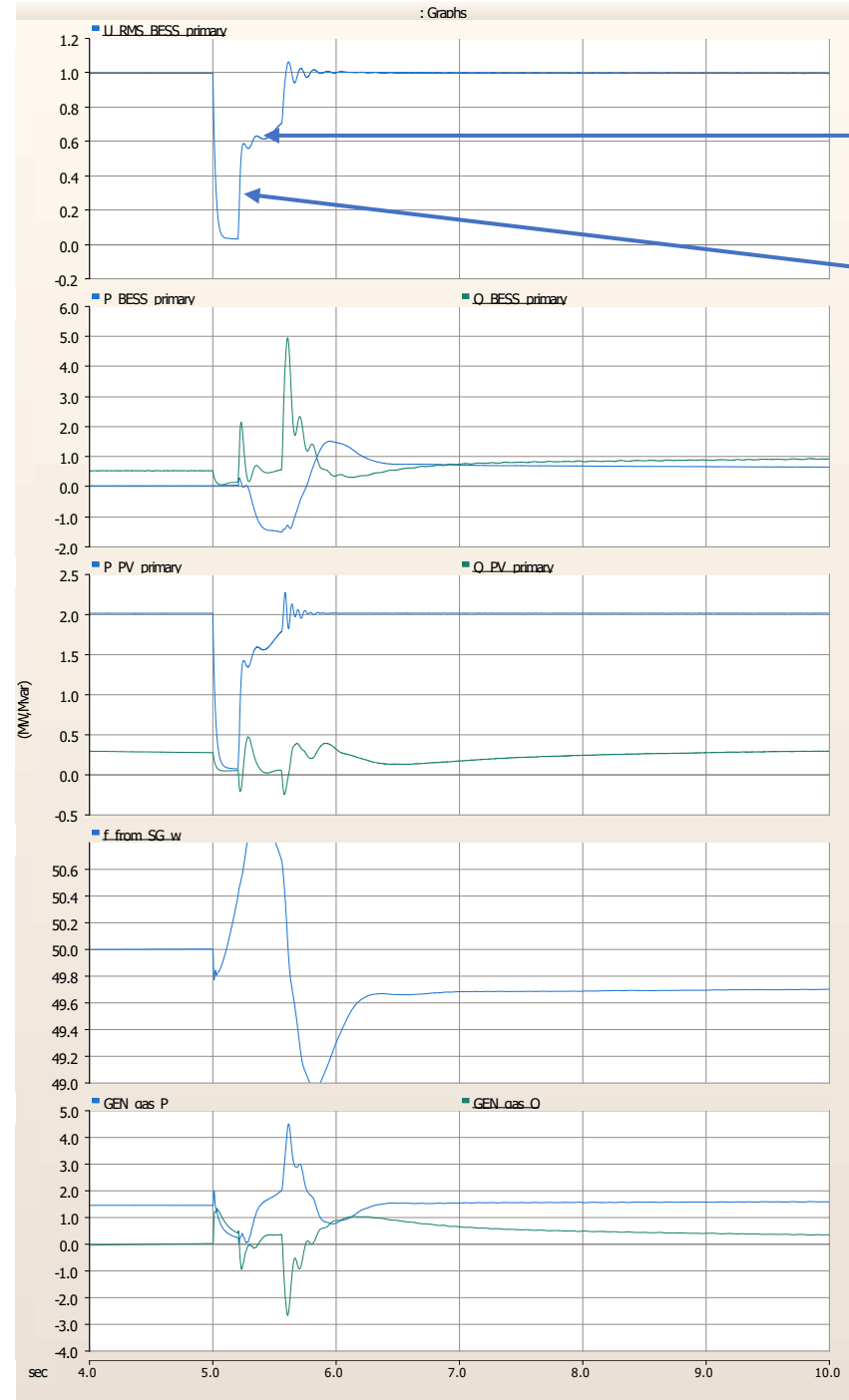
Tiedonsiirtoviive kasvaa

- Saarekoituminen:
BESS (4.0 MVA) &
PV (2.5 MVA) ja
SM (2.0 MVA)
- Droopit jokaisessa
tuotantoyksikössä
(PV:ssä vain U/Q)
- delay CB: 100 ms
- delay communication:
350 ms



Tiedonsiirtoviive kasvaa

- Saarekoituminen:
BESS (4.0 MVA) &
PV (2.5 MVA) ja
SM (2.0 MVA)
- Droopit jokaisessa
tuotantoyksikössä
(PV:ssä vain U/Q)
- delay CB: 200 ms
- delay communication:
350 ms



Tiedonsiirtoviive

Katkaisijan viive