

# **Saarekekäyttöraatkaisut – simulointien kaikki tulokset: D-F -osiot**

Lasse Peltonen

lasse.peltonen@tuni.fi

## Tämä kalvosarja sisältää kaikki simulointitarkastelut osioista D-F

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

## **D: Mikroverkon sisäiset viat ja asiakkaiden oman tuotannon vaikutus suojaukseen**

# D-1: Mikroverkon sisäiset viat ja asiakkaiden oman tuotannon vaikutus suojaukseen

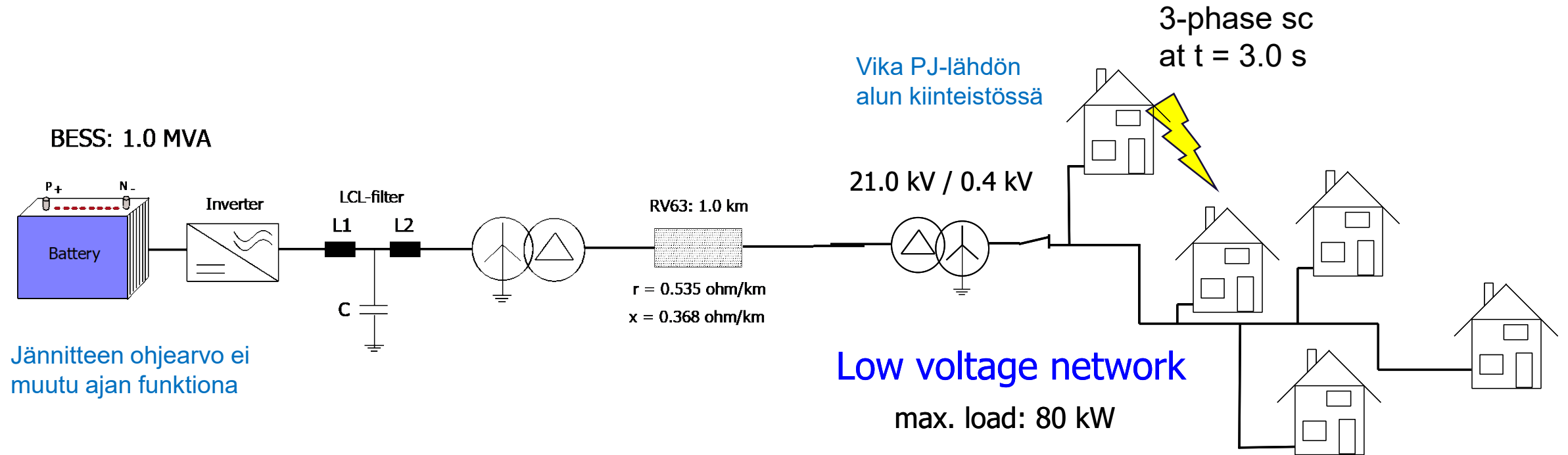
Tarkasteluiden perusteet:

- Vertaillaan vasteita, jossa saarekkeessa ollessa mikroverkkoon tulee vika tilanteissa, joissa mikroverkossa on:
  - BESS ja kuormitukset
  - BESS, kuormitukset ja yksi PV
- Havainnollistetaan asiakkaiden oman tuotannon vaikutuksia suojauksen käyttäytymiseen

Lähtökohdat:

- BESS syöttää jakeluverkkoa, jossa asiakkailla ei ole / on kW-kokoluokan PV:tä
- BESS kytkeytyy oman muuntajansa kautta jakeluverkkoon
- BESS:n ja pienjänniteverkon välissä on keskijänniteverkko
- Jakeluverkon huippukuormitus on 80 kW
- Jakeluverkossa sijaitseva PV (10 kW) on kiinteistön sähköverkossa: PV:n pätöteho on  $P_N$  10 kW ja näennäisteho on  $S_N$  15 kVA
- PV:t osallistuvat jännitteensäätöön
- PV:n viivästettyjen suojausten aikaraja on 200 ms → PV:t ehtivät syöttämään vikavirtaa
- Kiinteistö, jossa PV:n lisäksi kuivuri (10 kW:n kuorma), on mallinnettu kahtena lähtönä pääkeskukselta
  - Lisäksi 3 sulaketta ja 1 johdonsuojakatkaisija

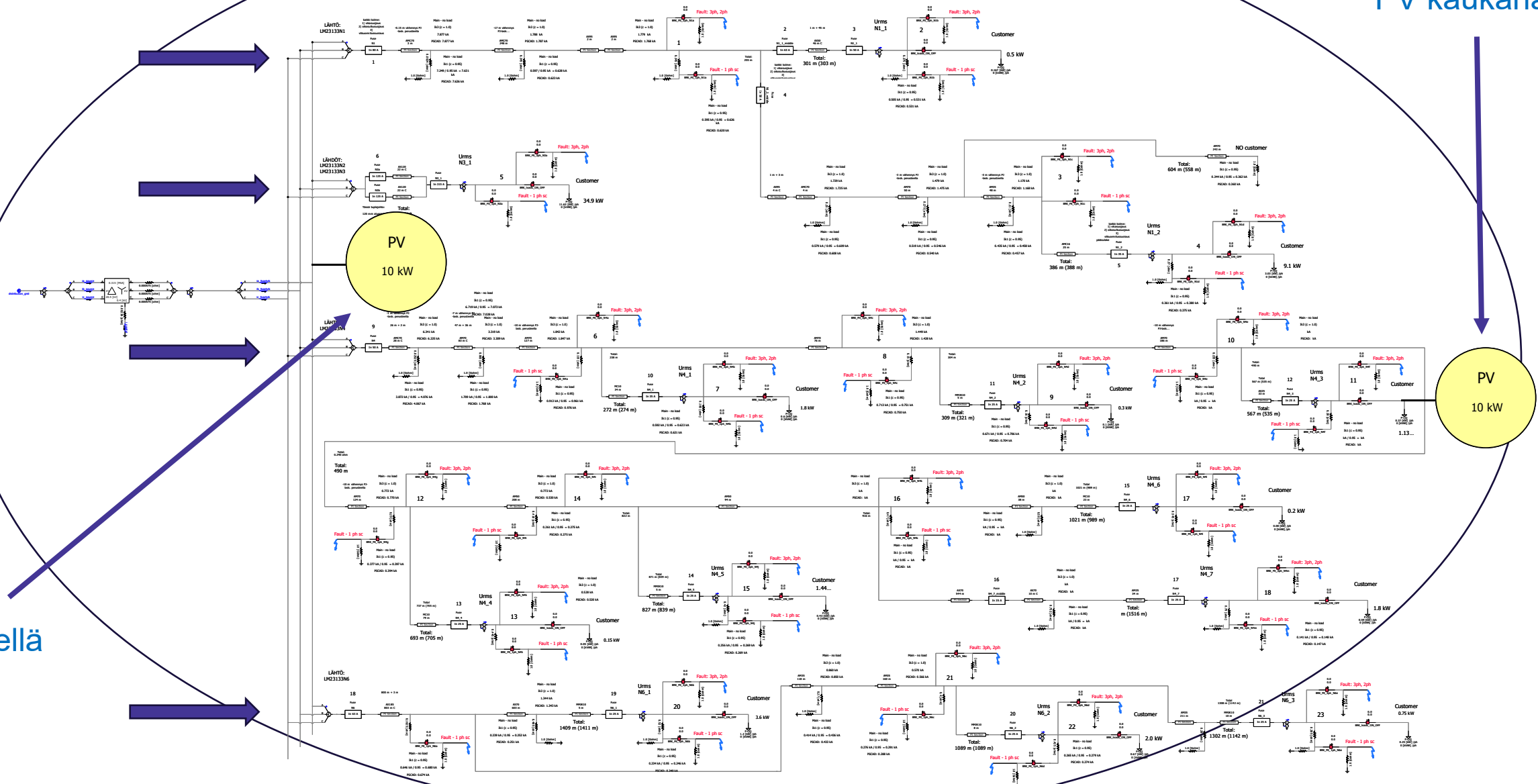
## Vika kiinteistön sisällä – ei PV:tä



# PJ-verkko

4 lähtöä:

PV kaukana

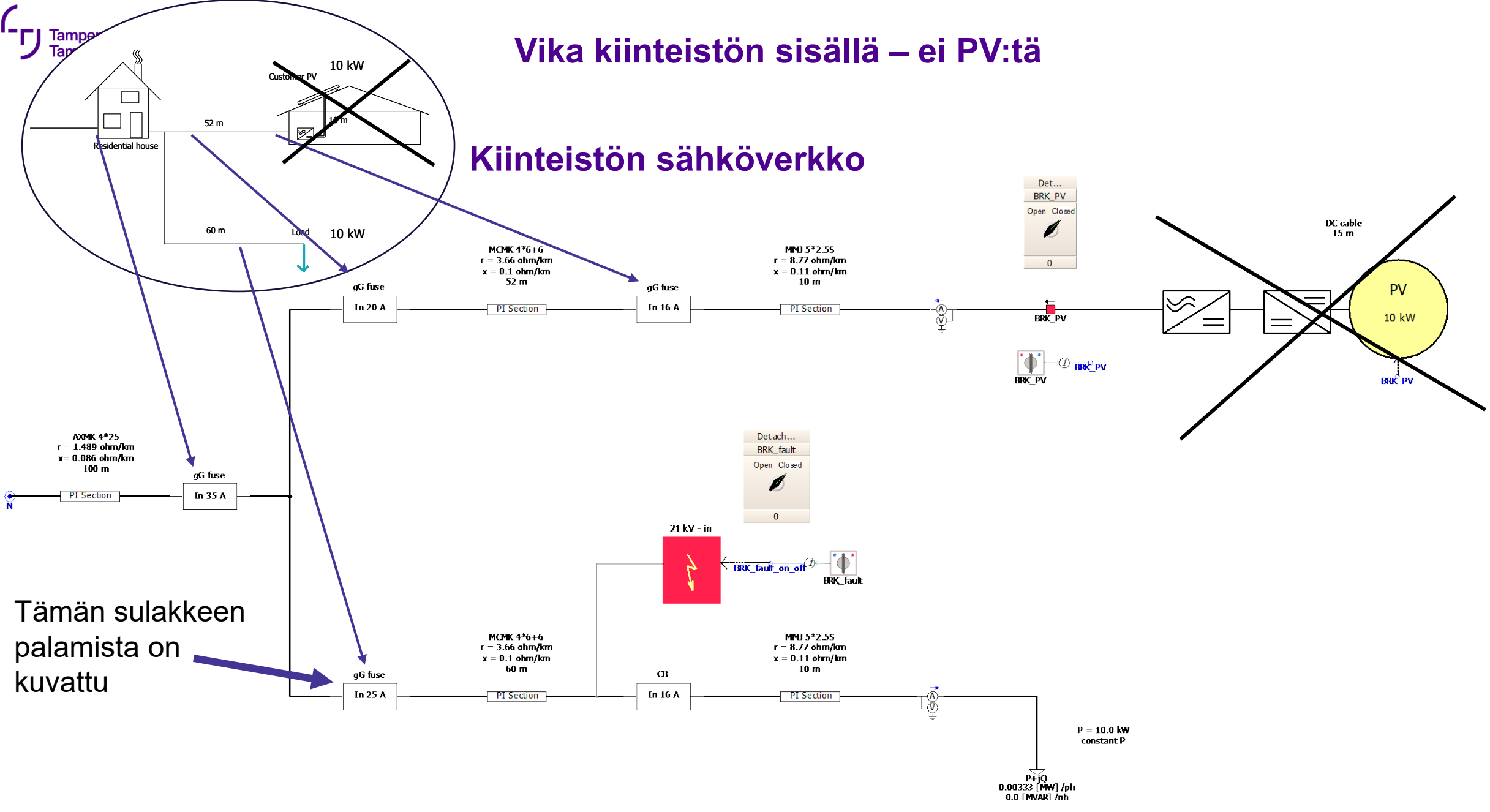


PV lähellä

PV 10 kW

# Vika kiinteistön sisällä – ei PV:tä

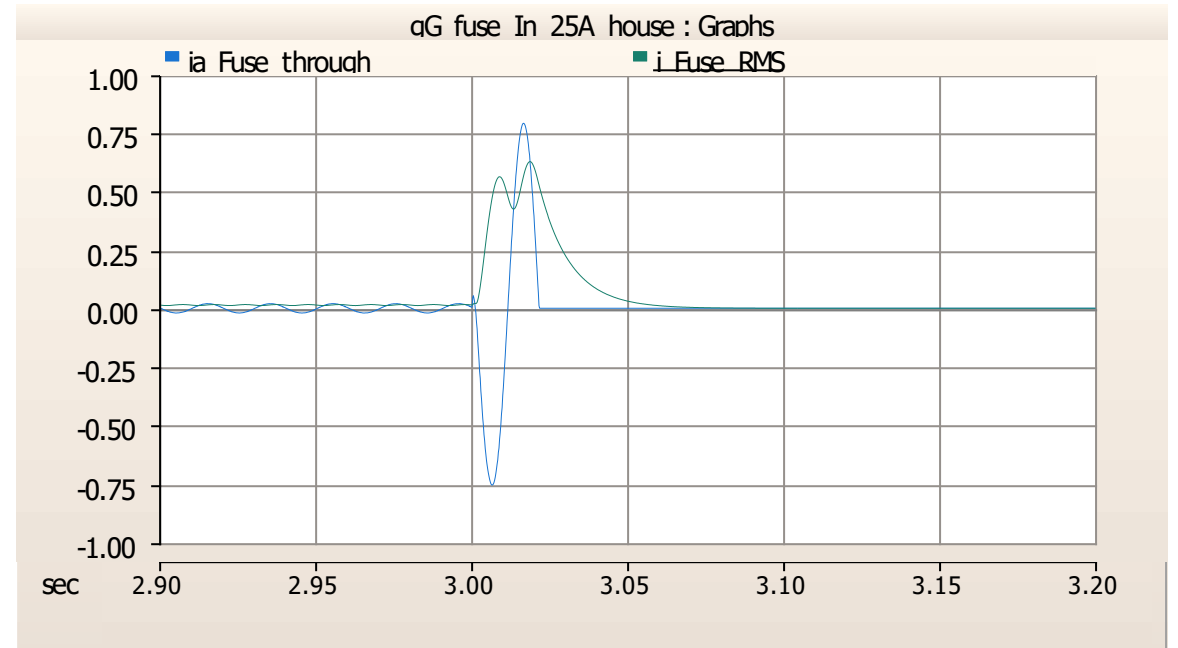
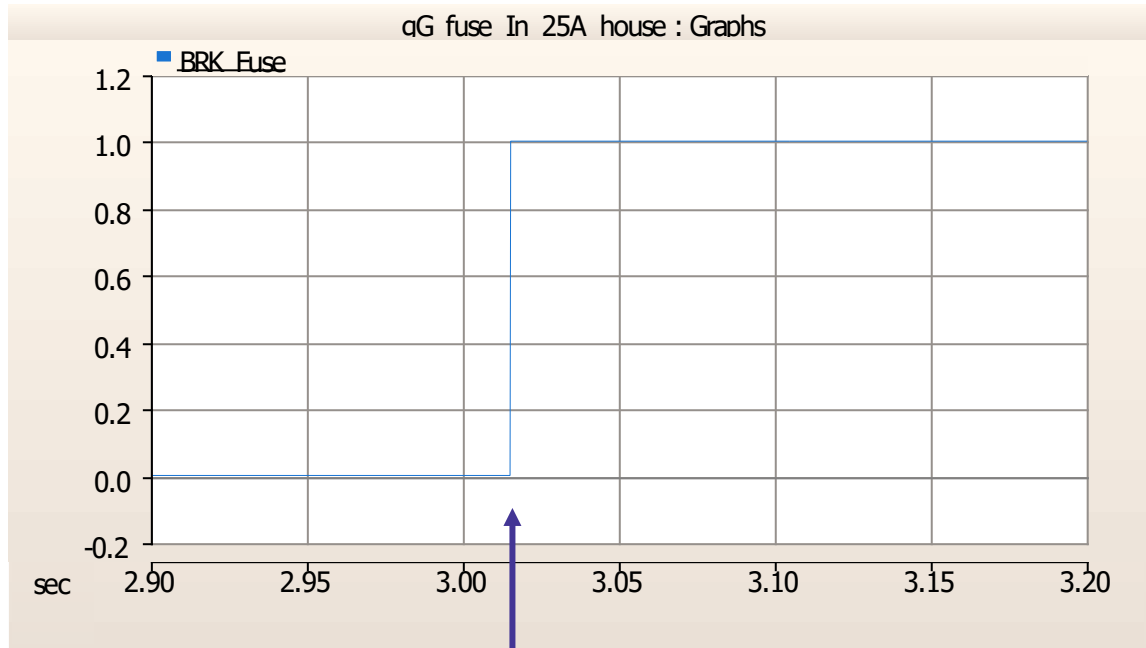
## Kiinteistön sähköverkko



Tämän sulakkeen palamista on kuvattu

$P = 10.0\ \text{kW}$   
constant P  
 $P_i Q$   
0.00333 [MW] /ph  
0.0 [MWARI] /oh

## Vika kiinteistön sisällä – ei PV:tä



Sulake palaa, kun muutos  
0 → 1 tapahtuu

Sulakkeet on mallinnettu  
virta-aika käyrin



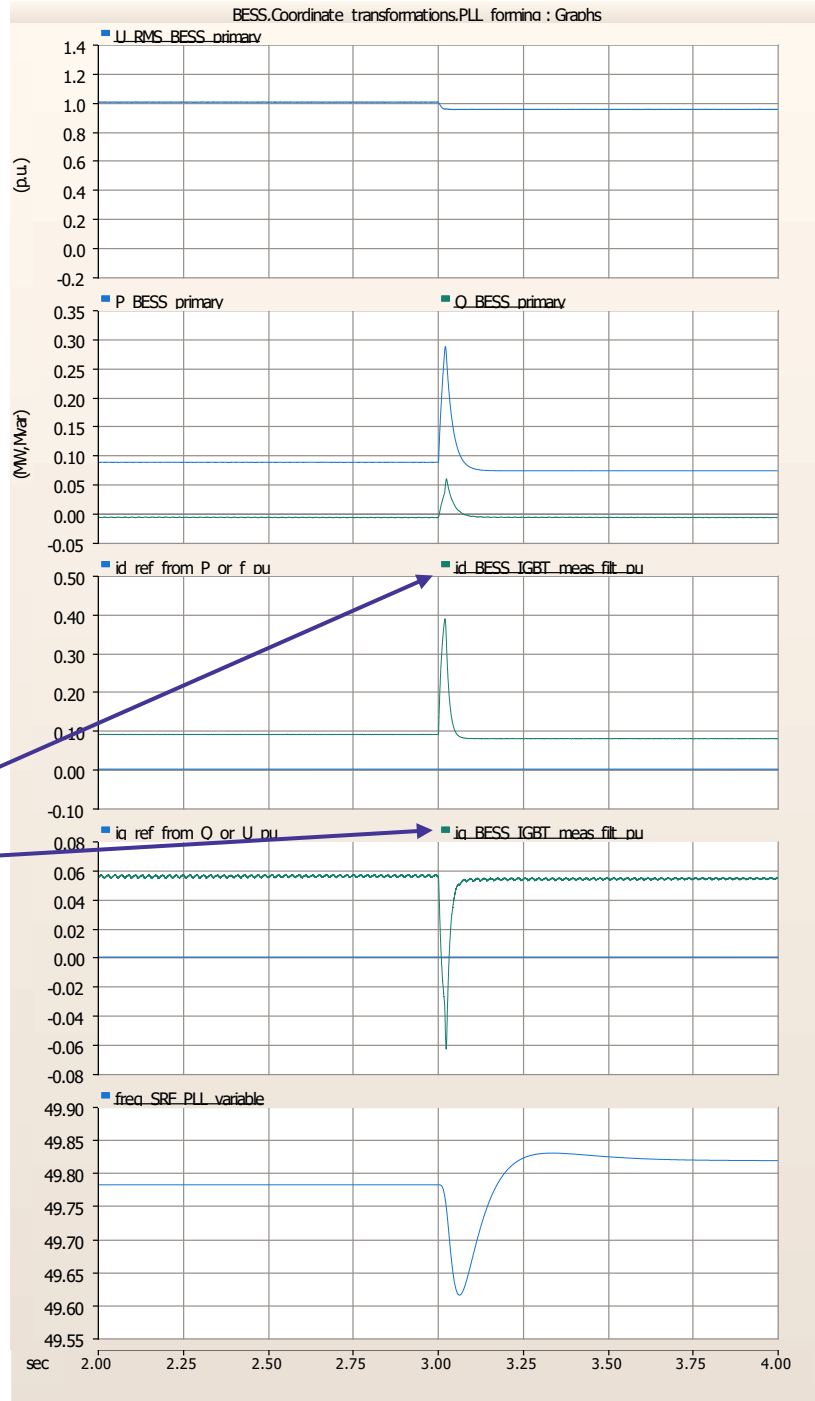
# BESS

Jännite

Päto- ja loisteho

Mitatut id- ja iq-virrat

Taajuusreferenssi BESS:n signaaligeneraattorilta



Jännite

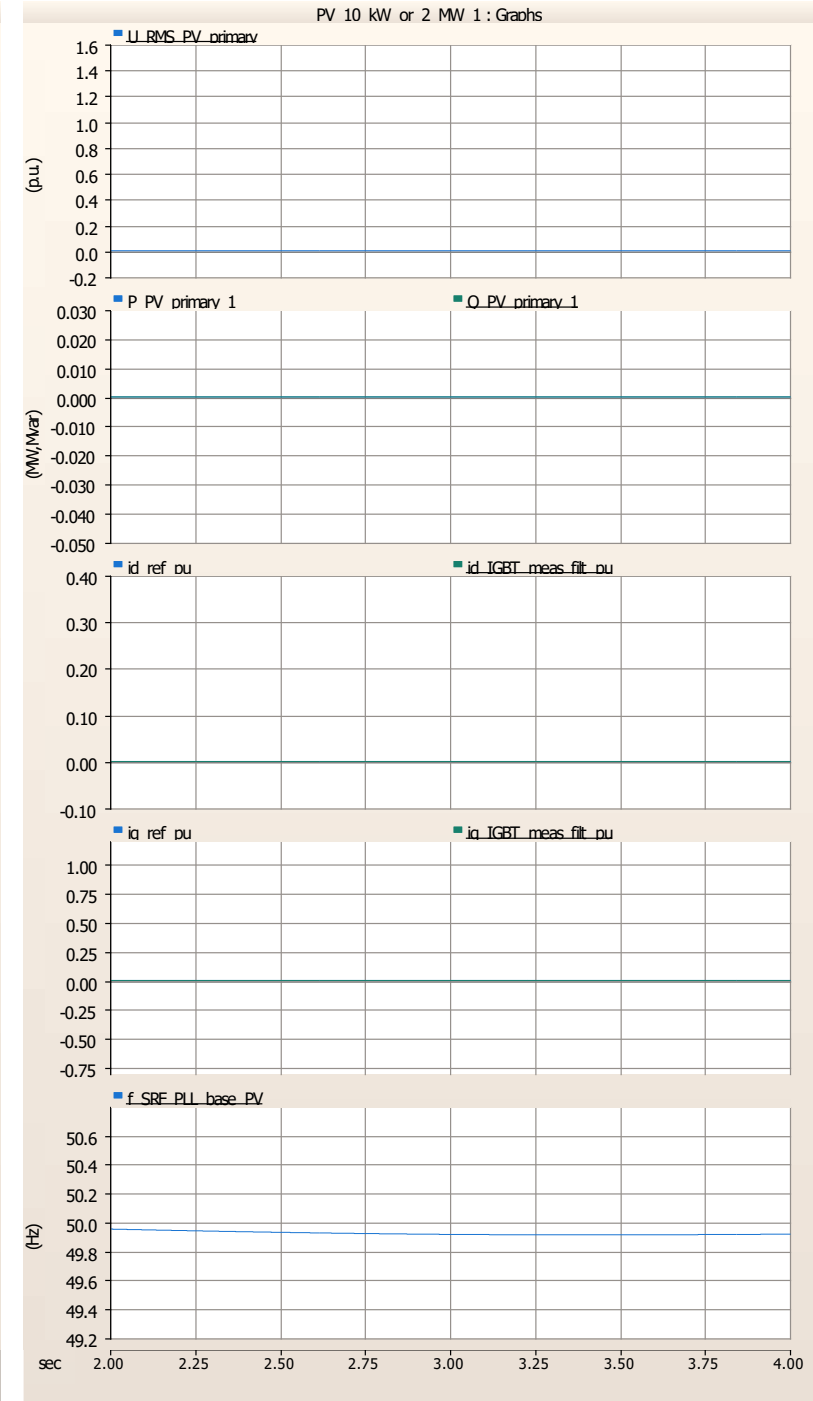
# PV 1

Päto- ja loisteho

Ei PV:tä verkossa

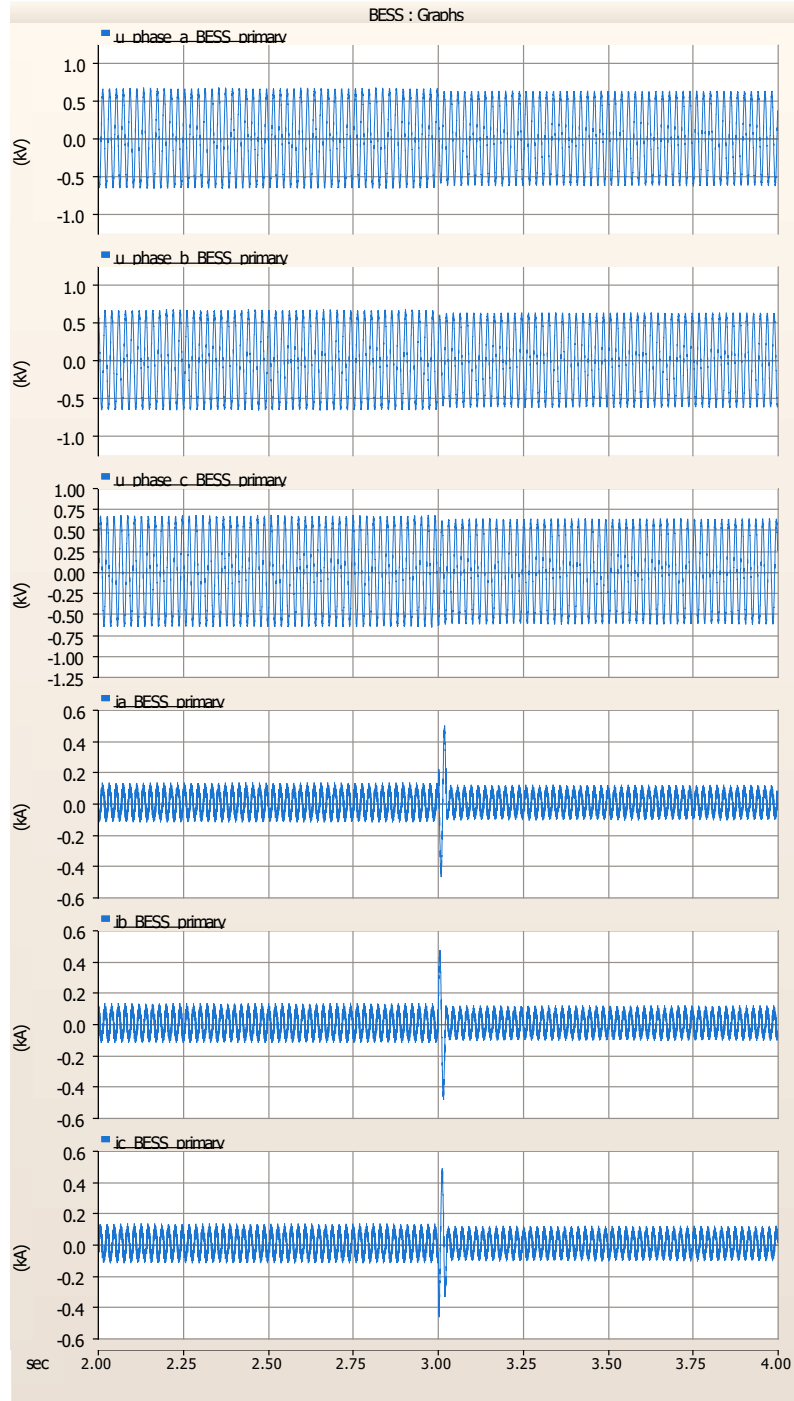
Referenssi- ja mitatut id- ja iq-virrat

Mitattu taajuus (PLL)



# BESS

Vaihejännitteet



Vaihevirrat



Vaihejännitteet

# PV 1

Vaihevirrat

Ei PV:tä verkossa

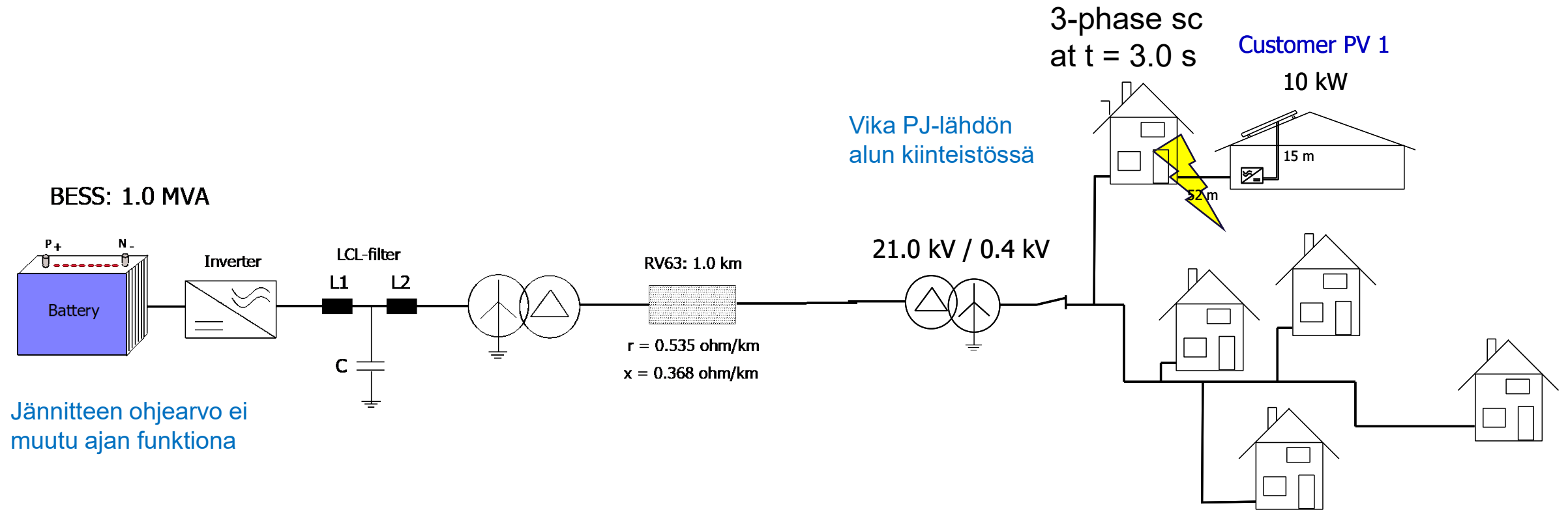
DC-jännite

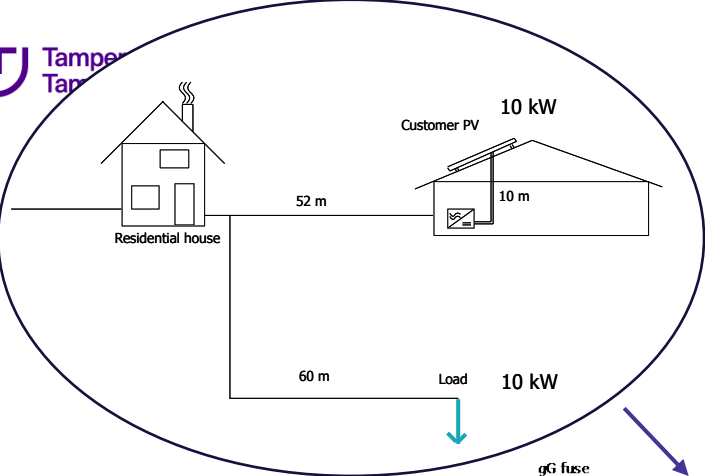
DC-virta

PV:n jännite

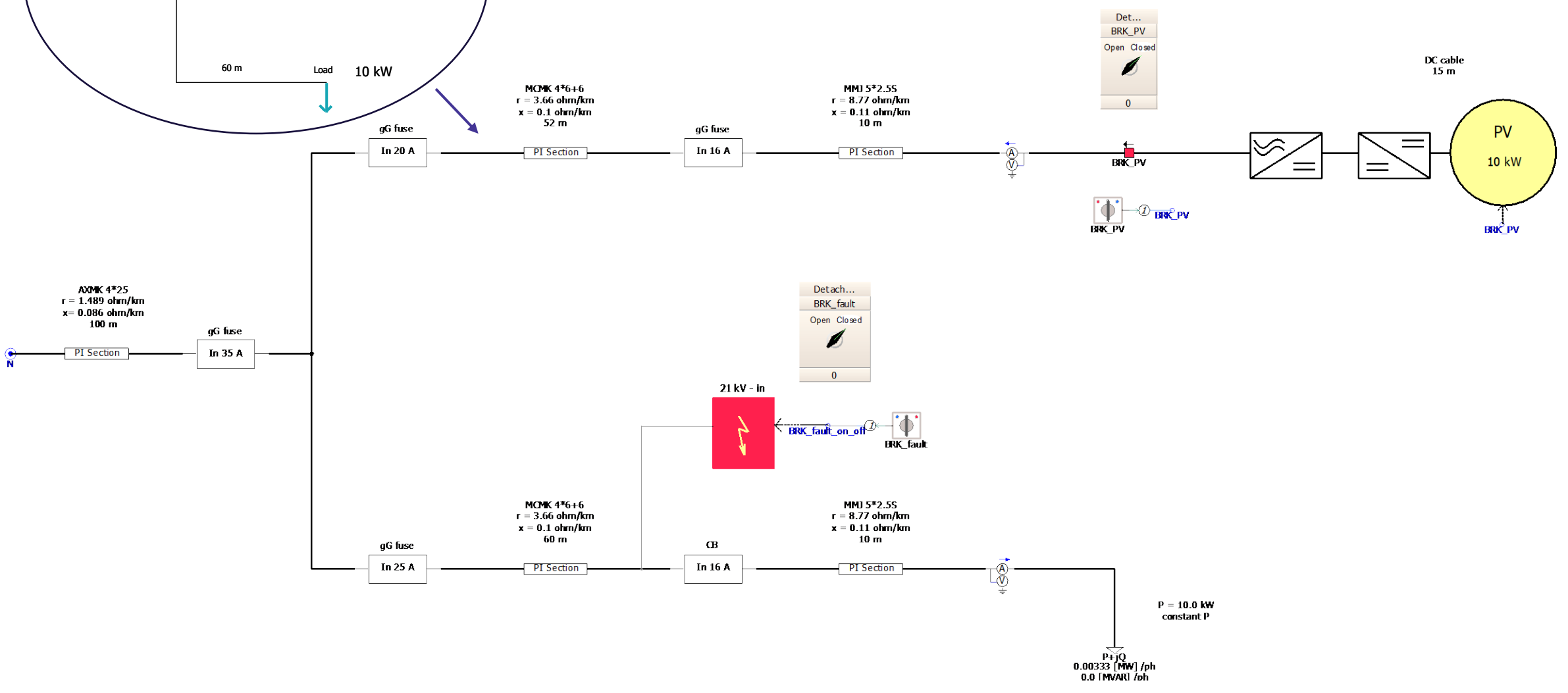
PV:n virta

## Vika kiinteistön sisällä – 1 PV lähellä

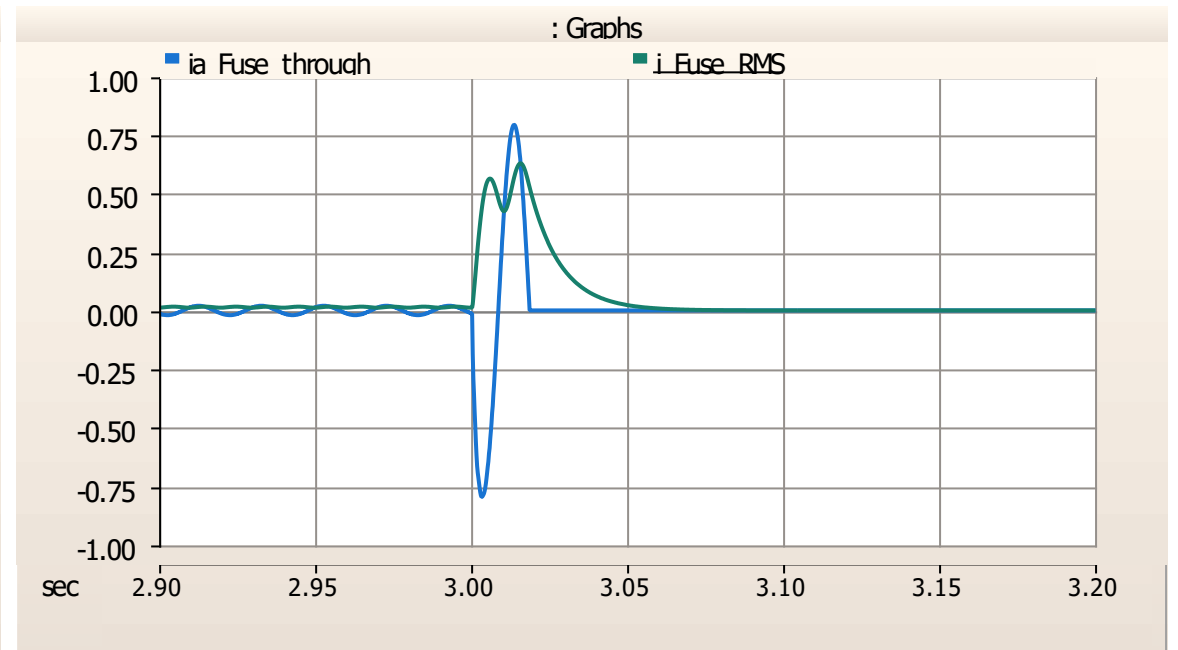
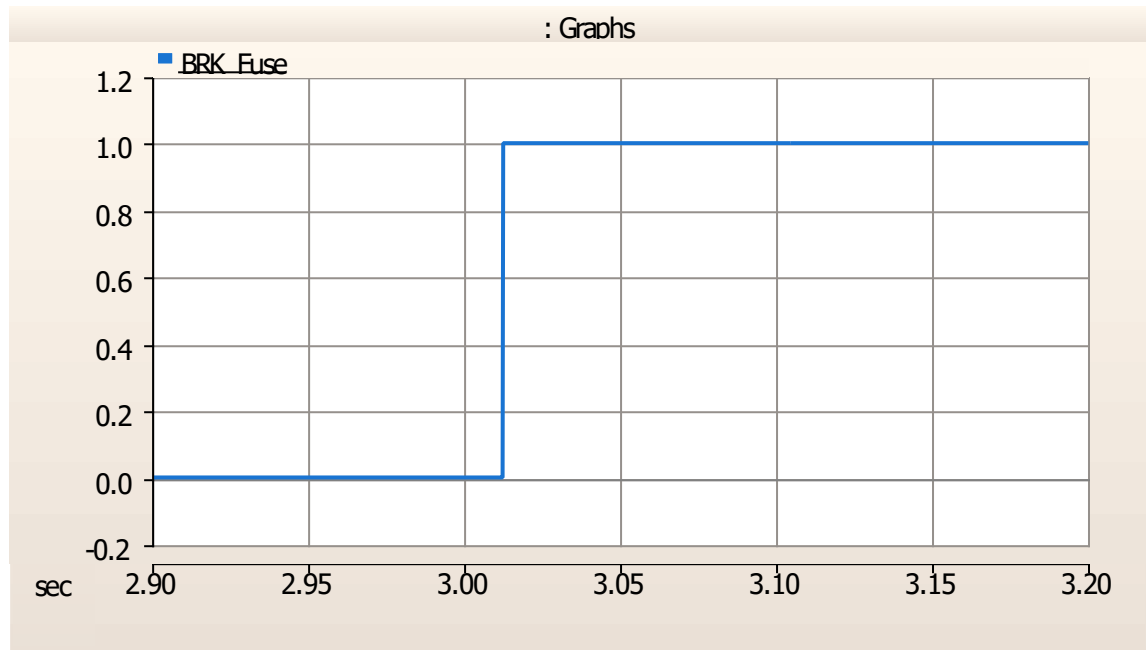




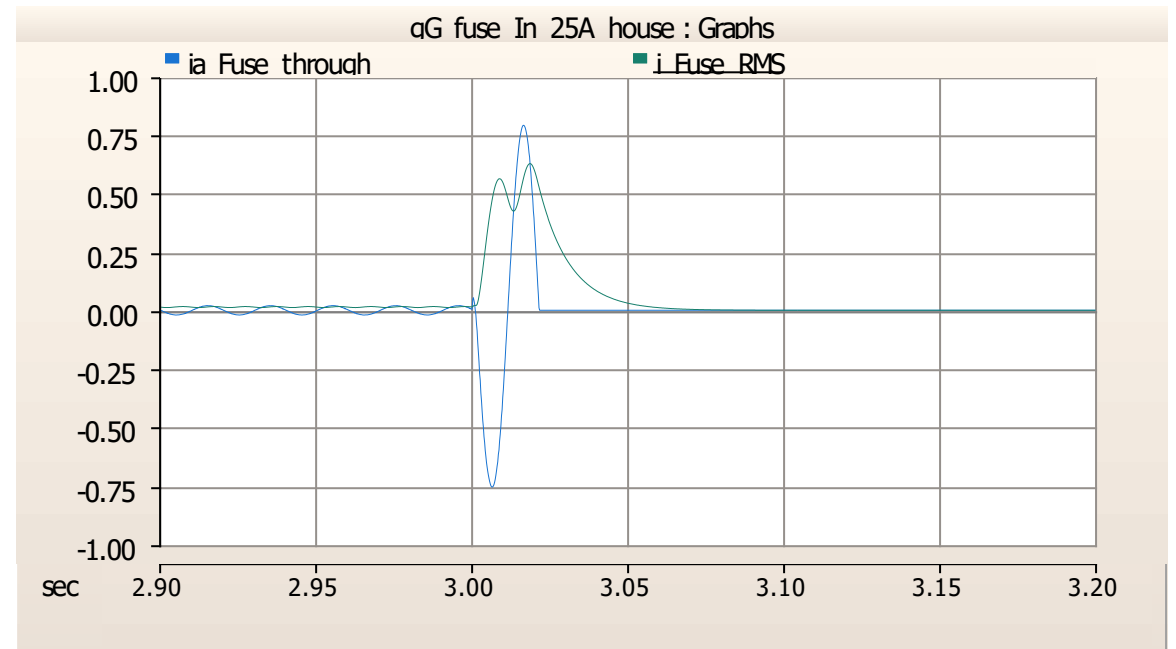
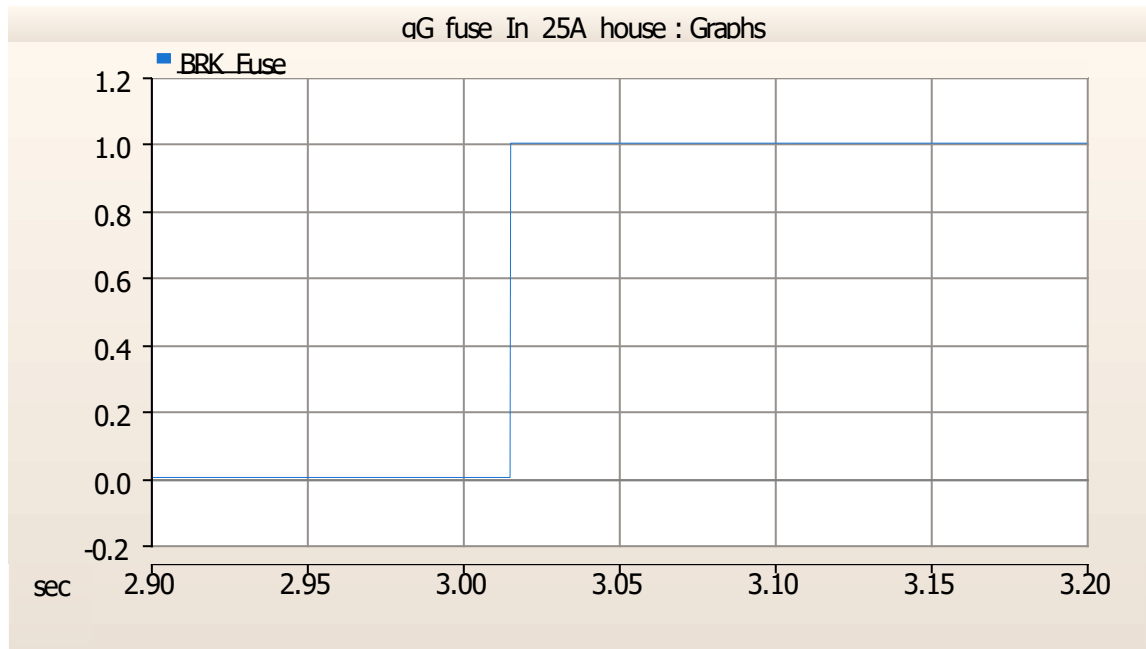
# Vika kiinteistön sisällä – 1 PV lähellä



## Vika kiinteistön sisällä – 1 PV lähellä



## Vika kiinteistön sisällä – ei PV:tä

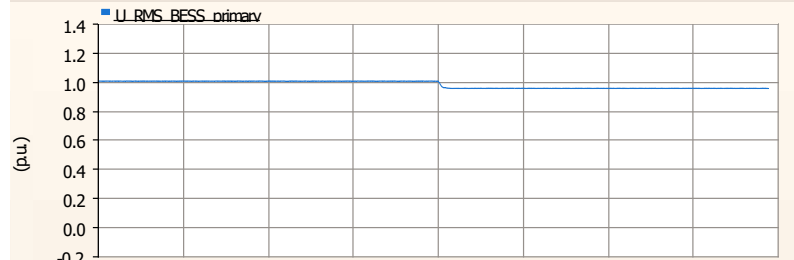


Vertailu tilanteeseen, jossa ei PV:tä  
→ lyhyt sulakkeen palamisajan kasvu  
nähtävissä

# BESS

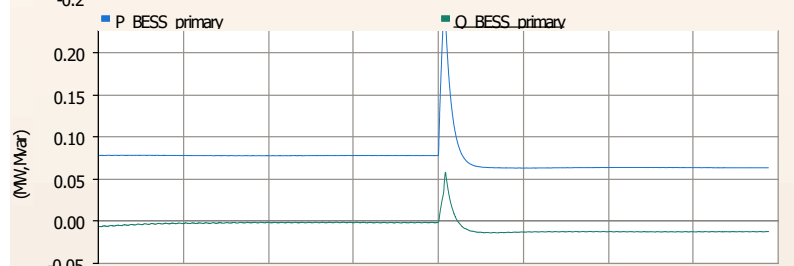
Jännite

(p.u.)

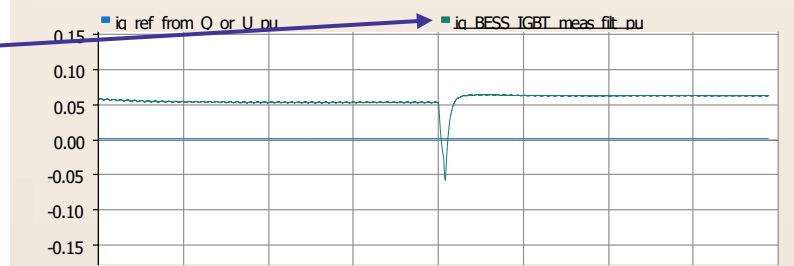
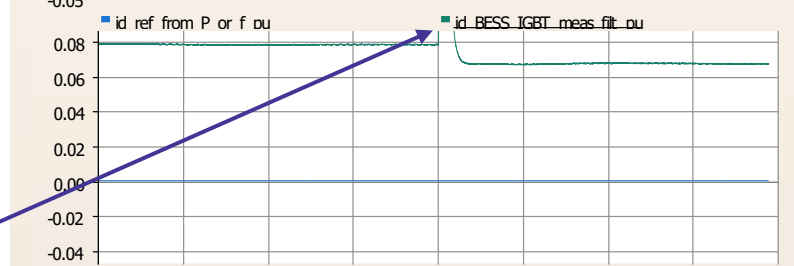


Päto- ja loisteho

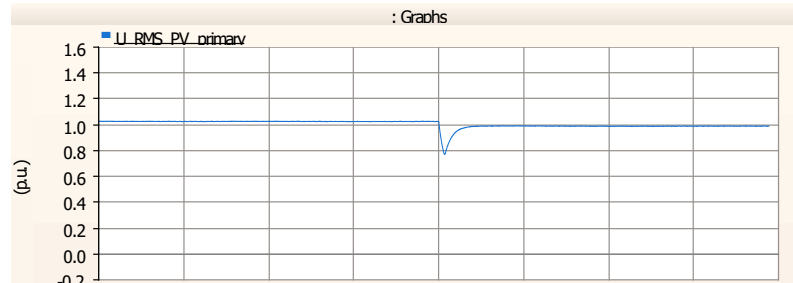
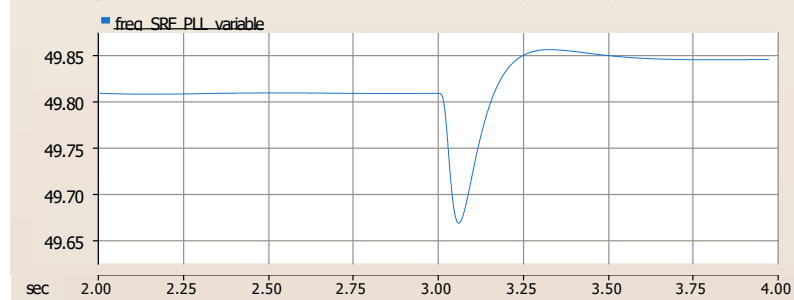
(MW/MVar)



Mitatut id- ja iq-virrat

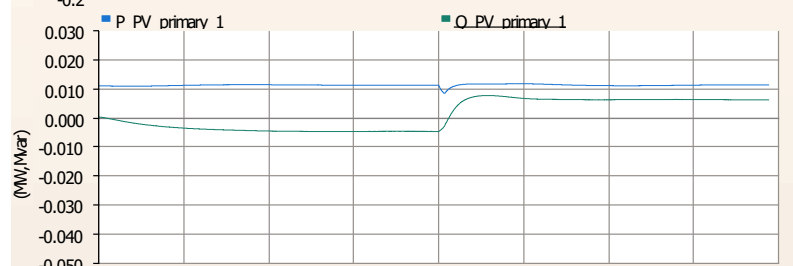


Taajuusreferenssi BESS:n signaaligeneraattorilta

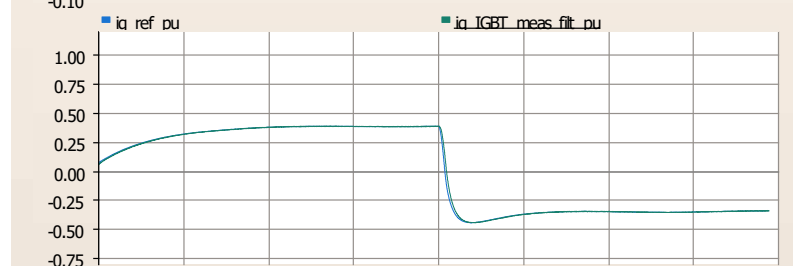
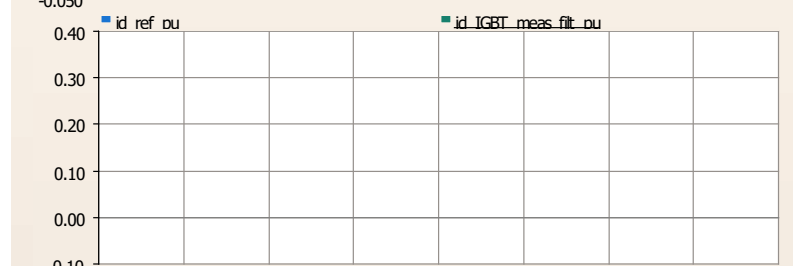


Jännite

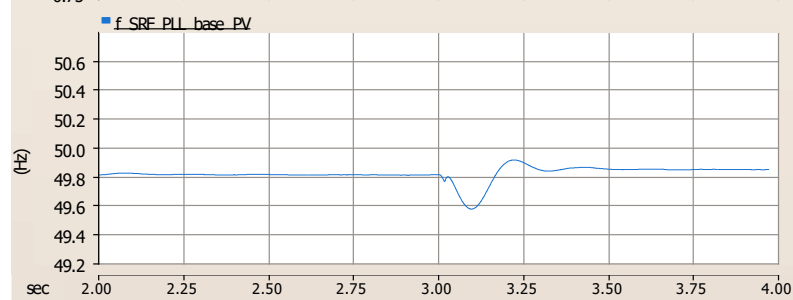
# PV 1



Päto- ja loisteho



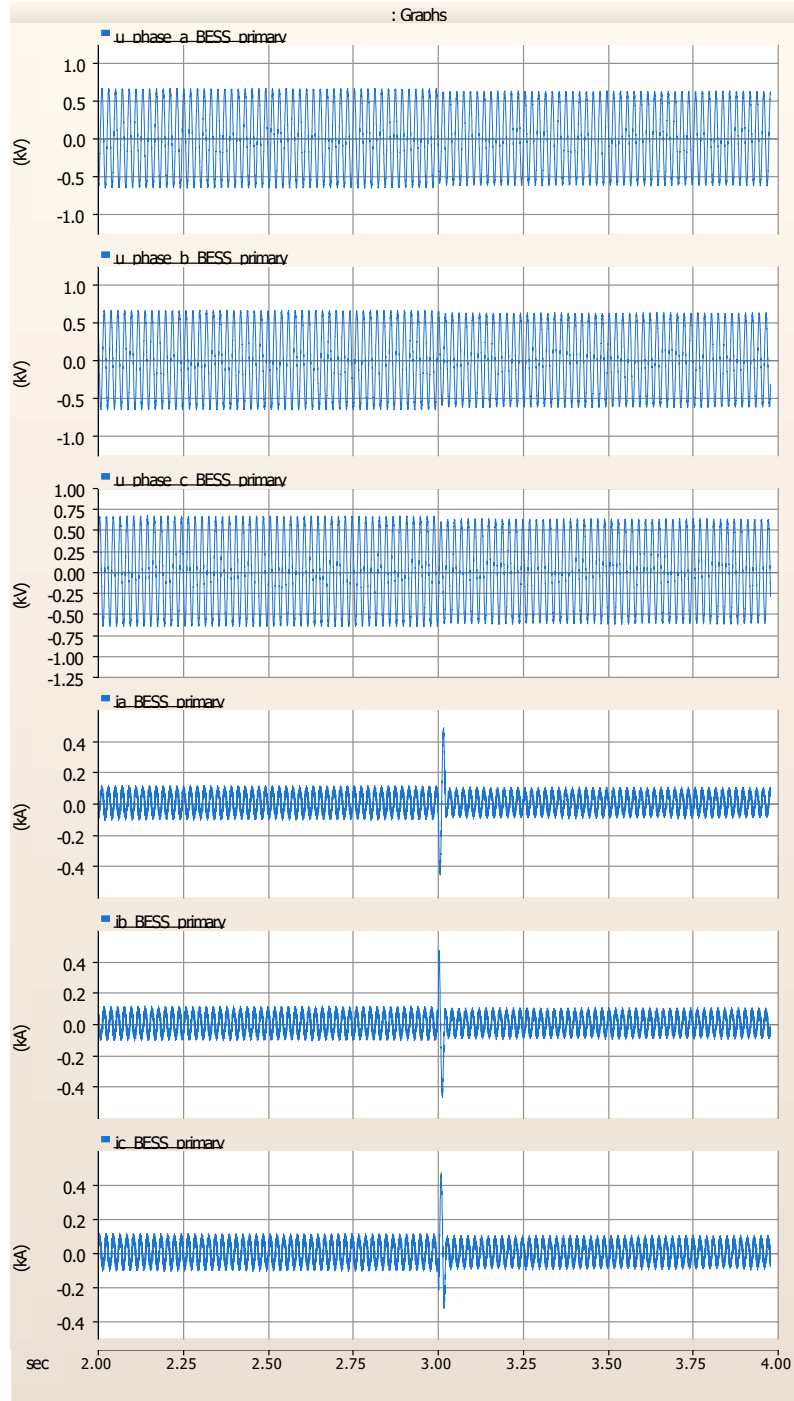
Referenssi- ja mitatut id- ja iq-virrat



Mitattu taajuus (PLL)

# BESS

Vaihejännitteet



Vaihevirrat

Vaihejännitteet

# PV 1

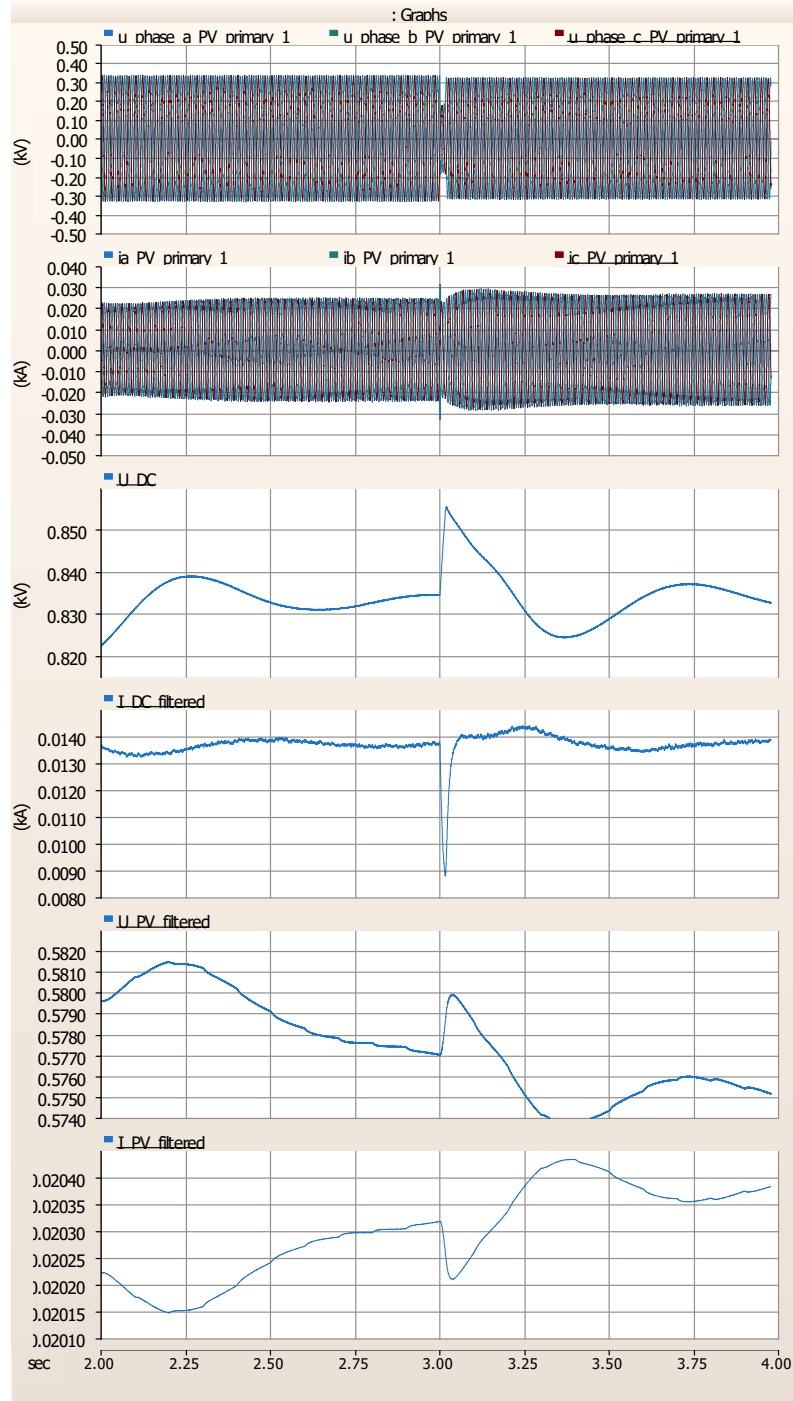
Vaihevirrat

DC-jännite

DC-virta

PV:n jännite

PV:n virta





# D-1: Mikroverkon sisäiset viat ja asiakkaiden oman tuotannon vaikutus suojaukseen

- BESS:n koon ollessa hallitseva PV:n näennäistehoon verrattuna (BESS: 1 MVA, PV 15 kVA), ei PV vaikuta (nopeuta) juurikaan sulakkeen palamista etenkin, kun vika sijaitsee heti jakeluverkon alussa
  - Periaatetasolla (millisekunteja) sulakkeen palamisajan nopeutuminen voidaan havaita
- Mitä kauempana jakeluverkossa vika on, sitä suurempi on PV:n suhteellinen vaikutus suojaukseen toimintaan
- Simuloinneissa on esitetty muutamia esimerkkiskenaarioita
  
- Mallintamalla:
  - Mikroverkko ja...
  - ..kiinteistön sisäinen verkko
  - PV:n suojaukset
  - Sulakkeiden ja johdonsuojakatkoisijoiden ominaiskäyrät
- Voidaan varsin tarkasti tutkia mm. suojauksen selektiivisyyden toteutumista eri käyttötilanteissa

## D-2: Mikroverkon sisäiset viat ja asiakkaiden oman tuotannon vaikutus suojaukseen: vain BESS, PJ-verkko ja PV:t

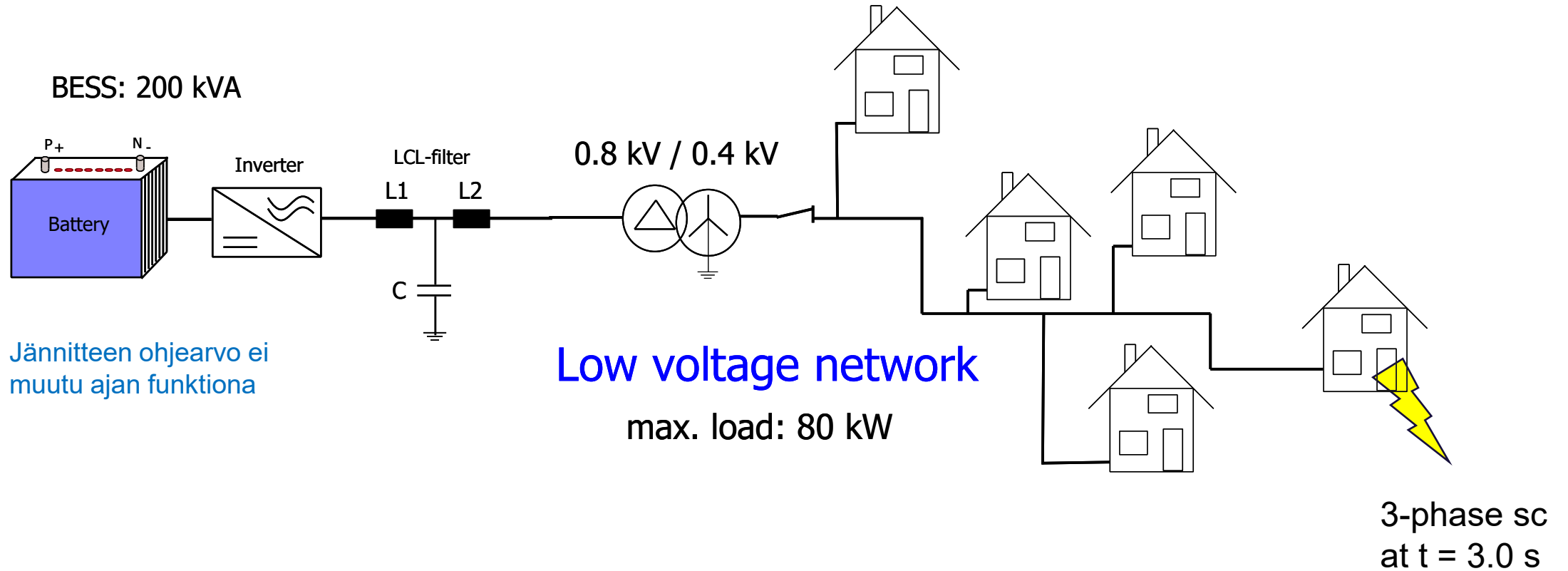
Tarkasteluiden perusteet:

- Vertaillaan vasteita, jossa kokonaan pienjännitesaarekkeessa ollessa mikroverkkoon tulee 3-vaiheinen vika tilanteissa, joissa mikroverkossa on:
  1. BESS ja kuormitukset
  2. BESS, kuormitukset ja yksi PV
  3. BESS, kuormitukset ja 2 PV:tä
- Havainnollistetaan asiakkaiden oman tuotannon vaikutuksista suojaukseen

Lähtökohdat:

- BESS (200 kVA) syöttää suoraan jakeluverkkoa (ei KJ-verkkoa välissä), jossa asiakkailla ei ole / on kW-kokoluokan PV:tä (1-2 kpl)
- Jakeluverkon huippukuormitus on 80 kW
- Jakeluverkossa sijaitsevat PV:t ovat kiinteistön sähköverkossa: yhden PV pätöteho on  $P_N$  10 kW ja näennäisteho on  $S_N$  15 kVA
- Vian jälkeen PV:t osallistuvat jännitteensäätöön
- PV:n viivästettyjen suojausten aikaraja on 200 ms → PV:t ehtivät syöttämään vikavirtaa
- Kiinteistö, jossa PV:n lisäksi kuivuri (10 kW:n kuorma), on mallinnettu kahtena lähtönä pääkeskukselta
  - Lisäksi 3 sulaketta ja 1 johdonsuojakatkaisija

# Vika kiinteistön sisällä, pienempi BESS suoraan PJ-verkossa – ei PV:tä

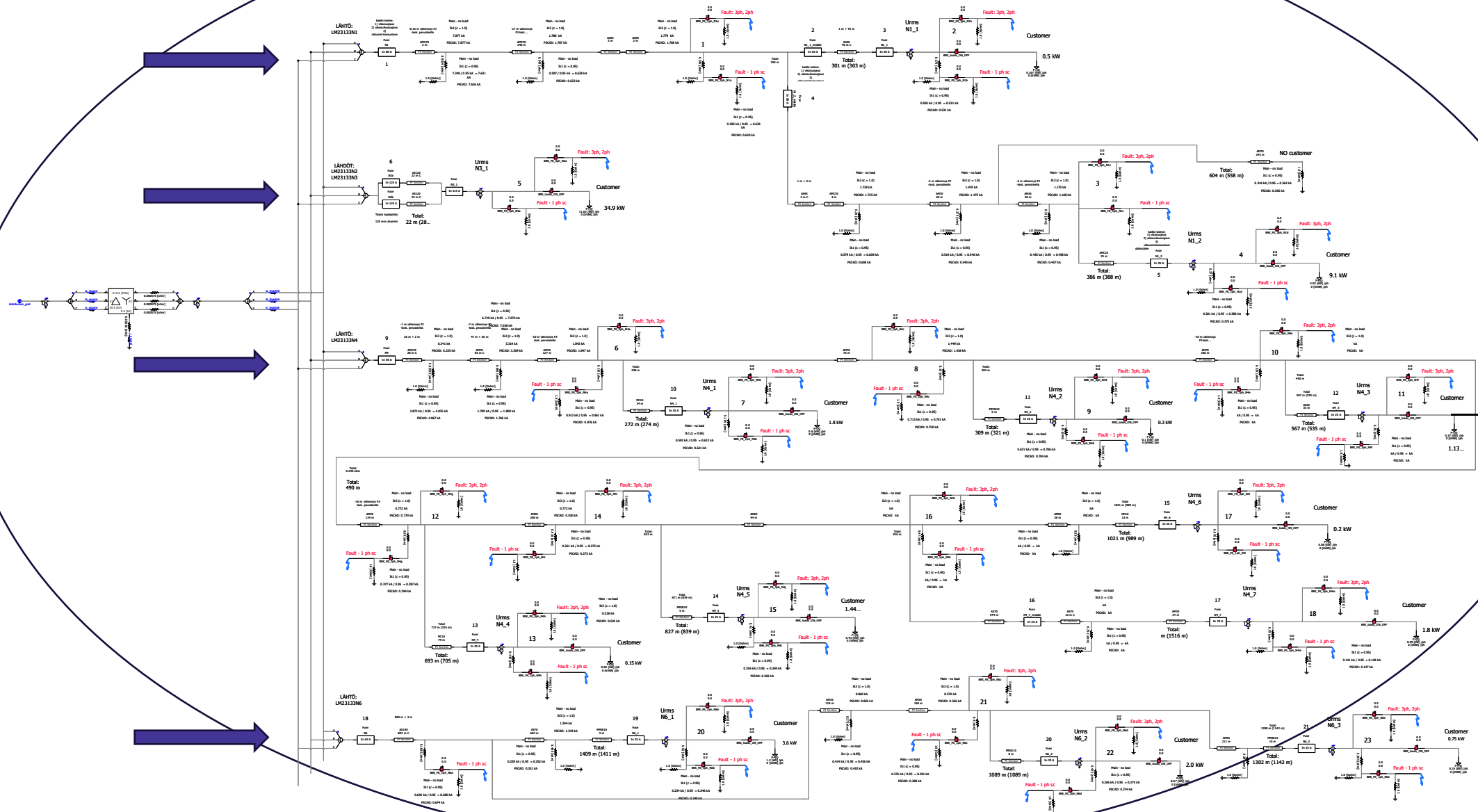


# PJ-verkko

4 lähtöä:

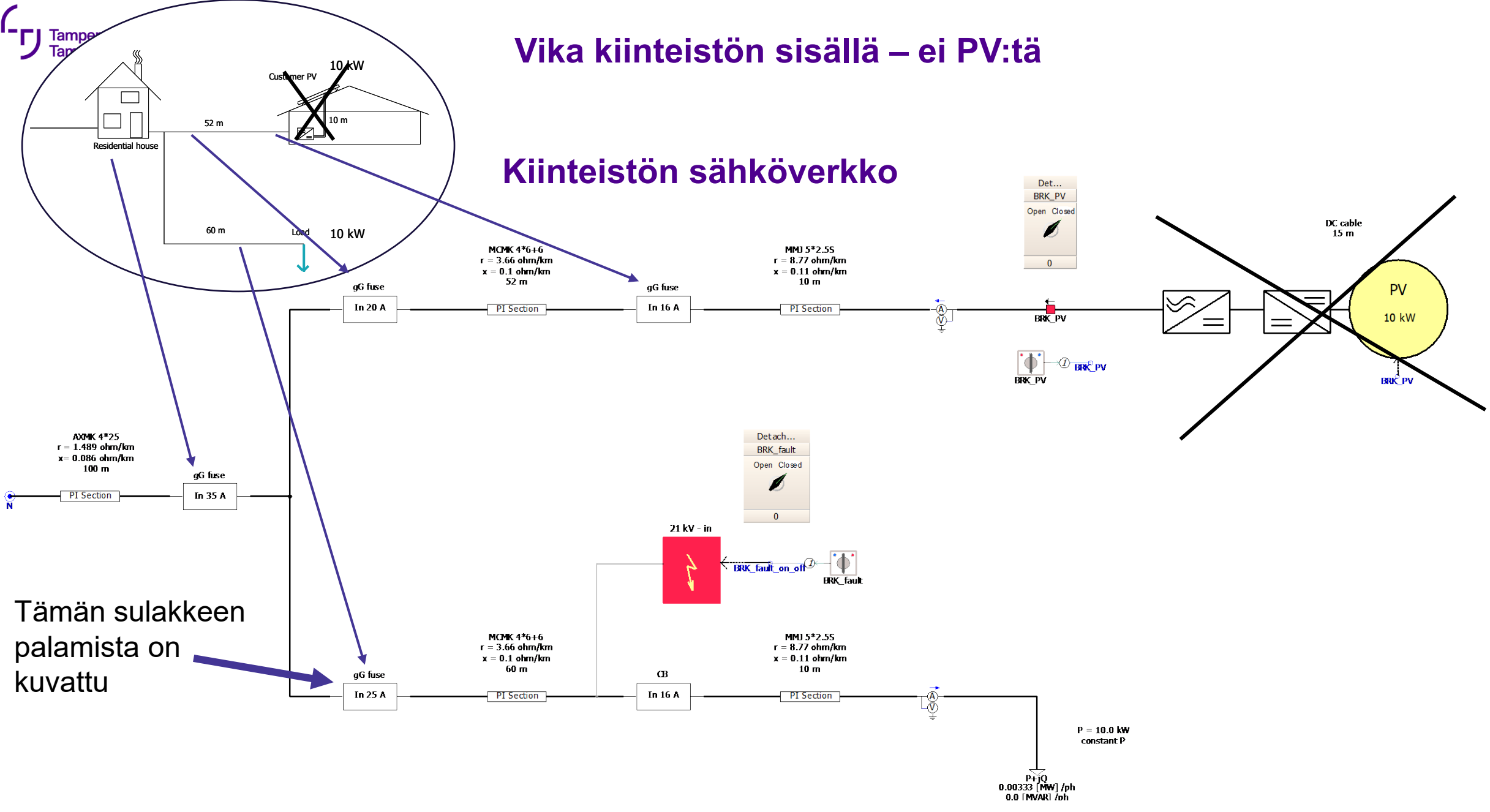
PV

PV  
10 kW

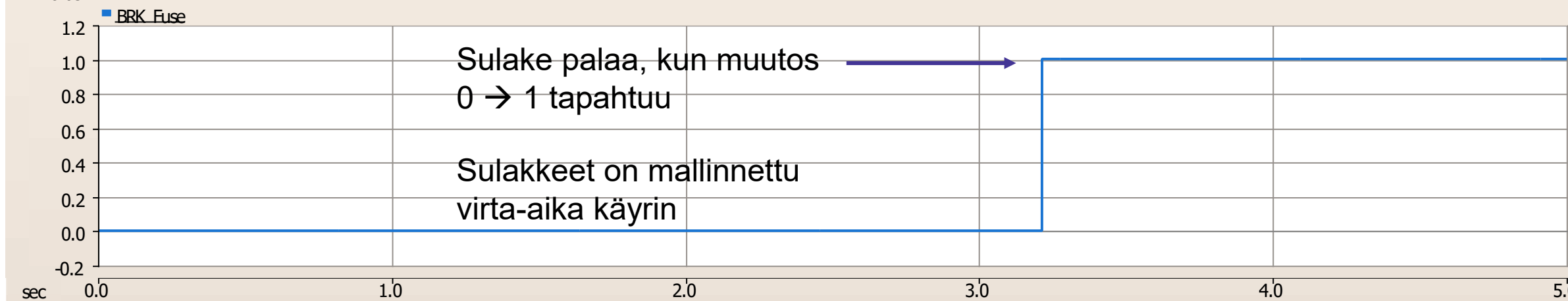
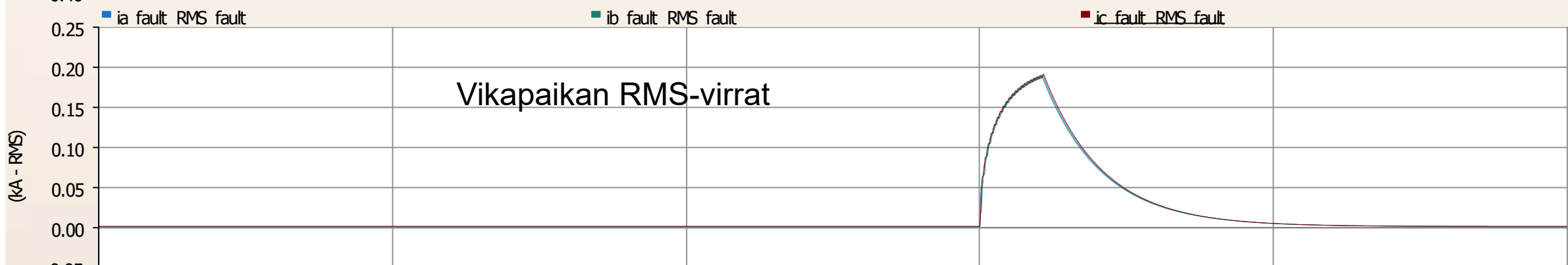


# Vika kiinteistön sisällä – ei PV:tä

## Kiinteistön sähköverkko

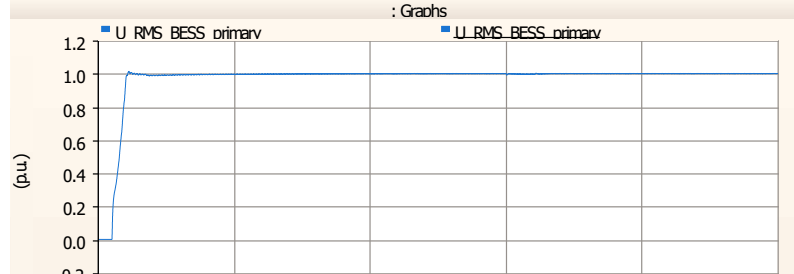


Tämän sulakkeen palamista on kuvattu

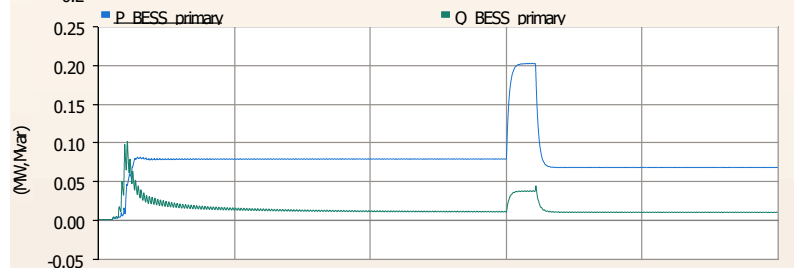


# BESS

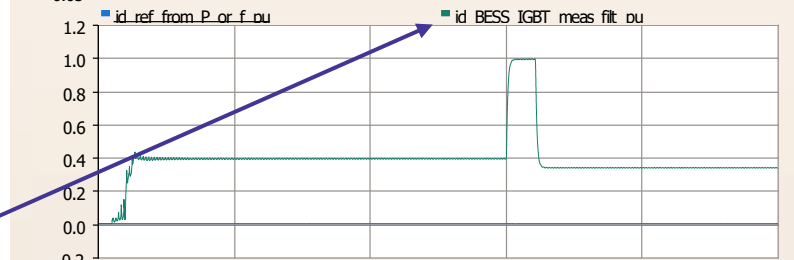
Jännite



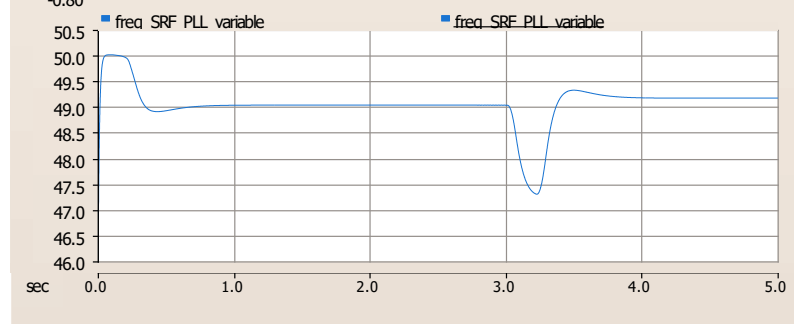
Päto- ja loisteho



Mitatut id- ja iq-virrat

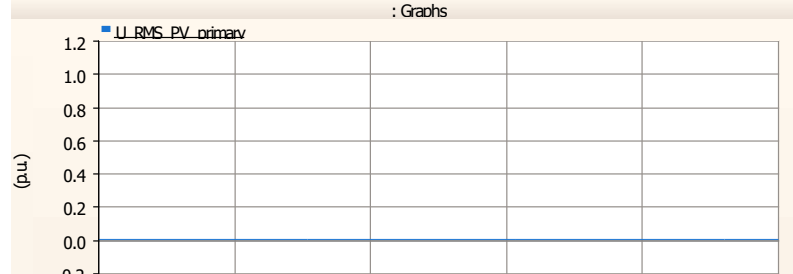


Taajuusreferenssi BESS:n signaaligeneraattorilta

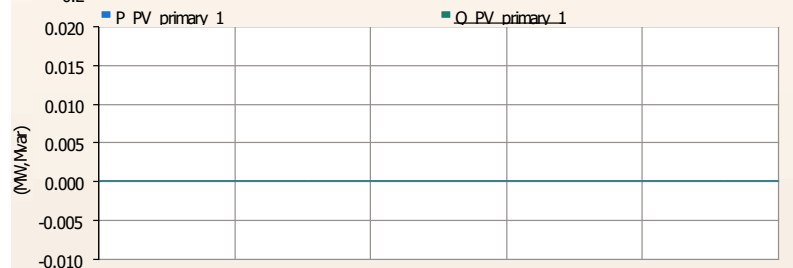


Jännite

# PV 1

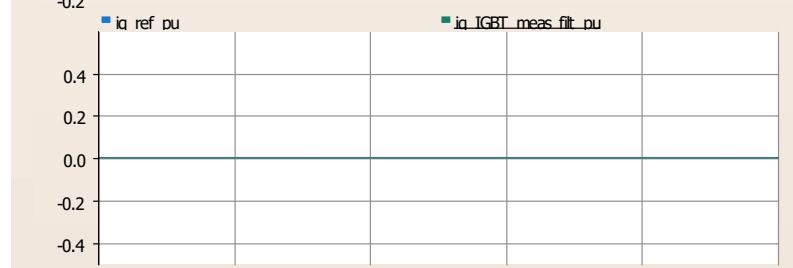
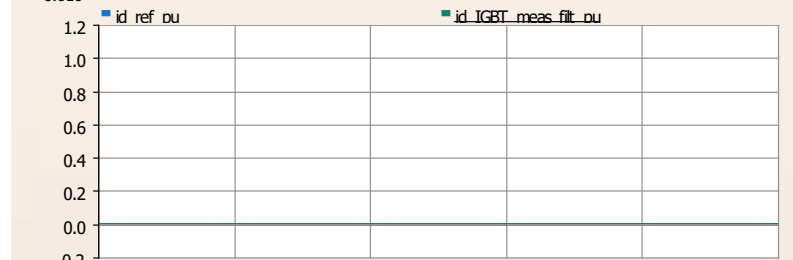


Päto- ja loisteho

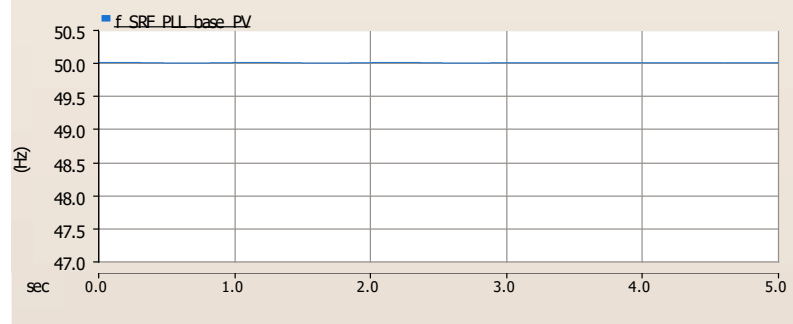


Ei PV:tä verkossa

Referenssi- ja mitatut id- ja iq-virrat

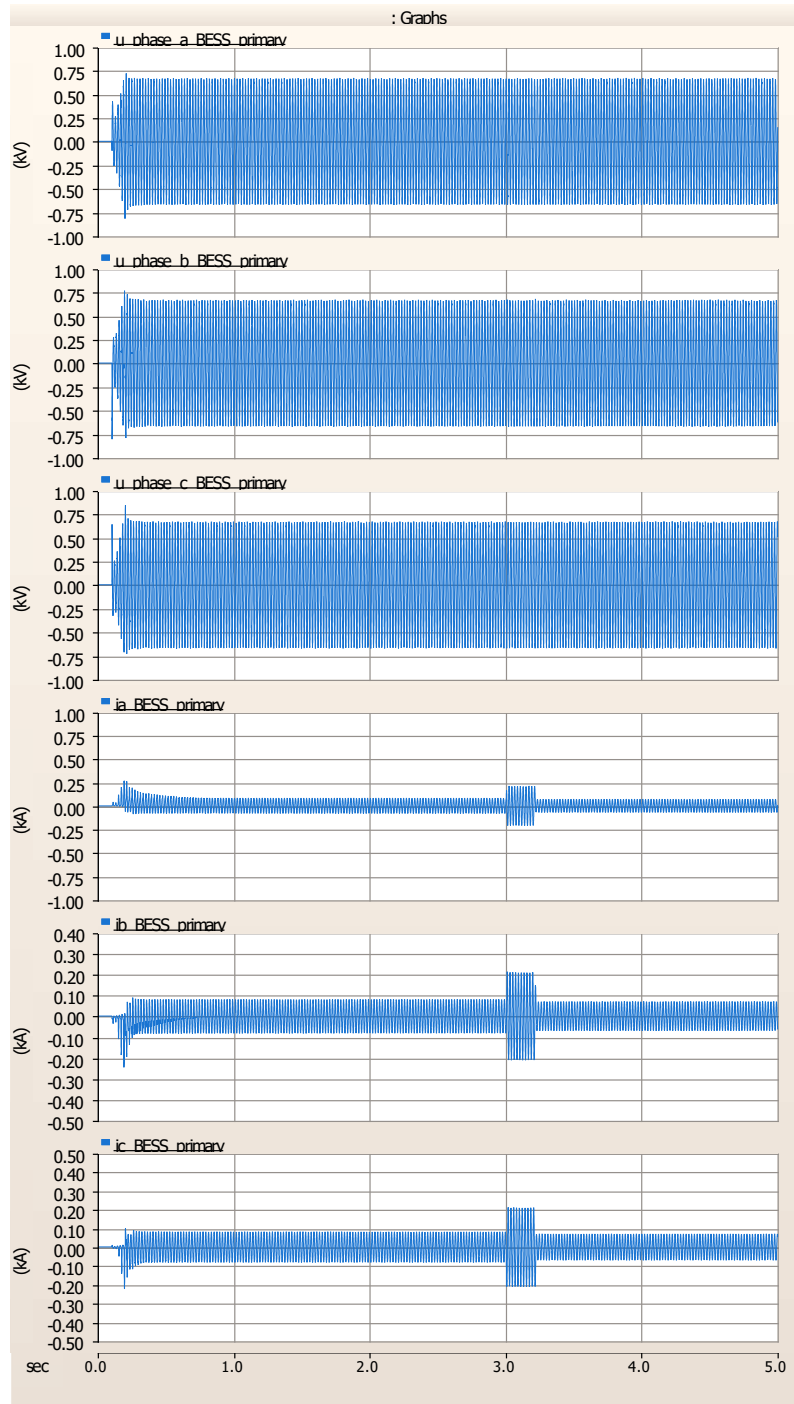


Mitattu taajuus (PLL)



# BESS

Vaihejännitteet



Vaihevirrat

Vaihejännitteet

# PV 1

Vaihevirrat

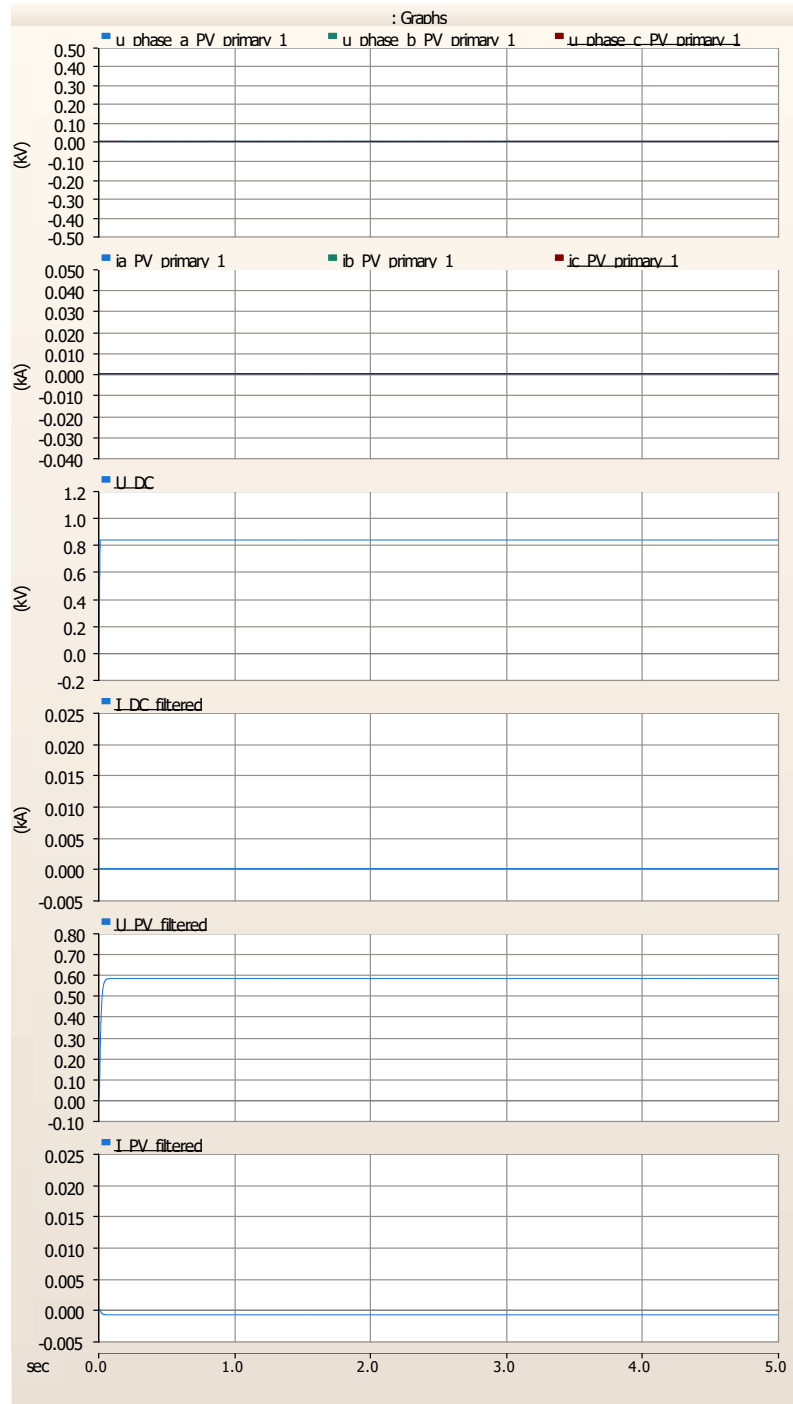
Ei PV:tä verkossa

DC-jännite

DC-virta

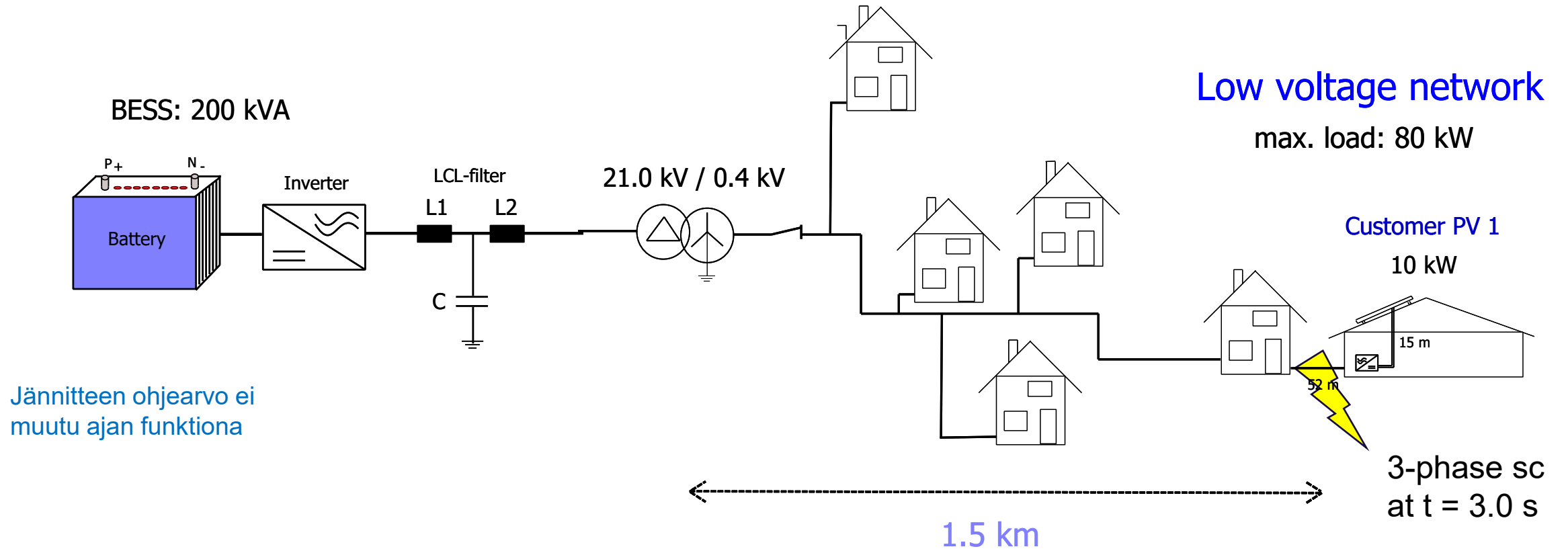
PV:n jännite

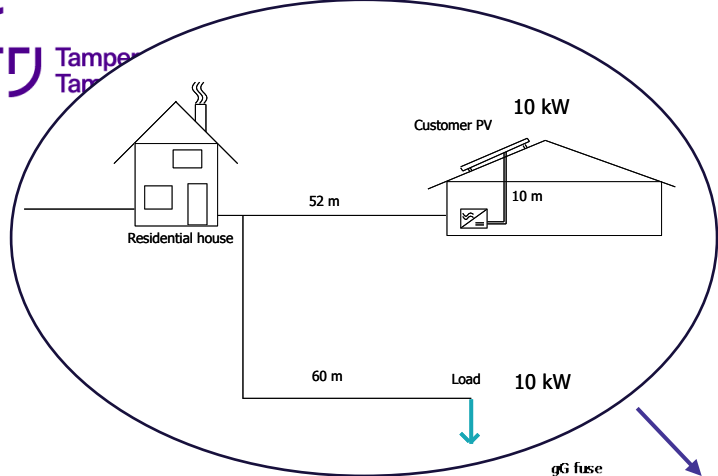
PV:n virta



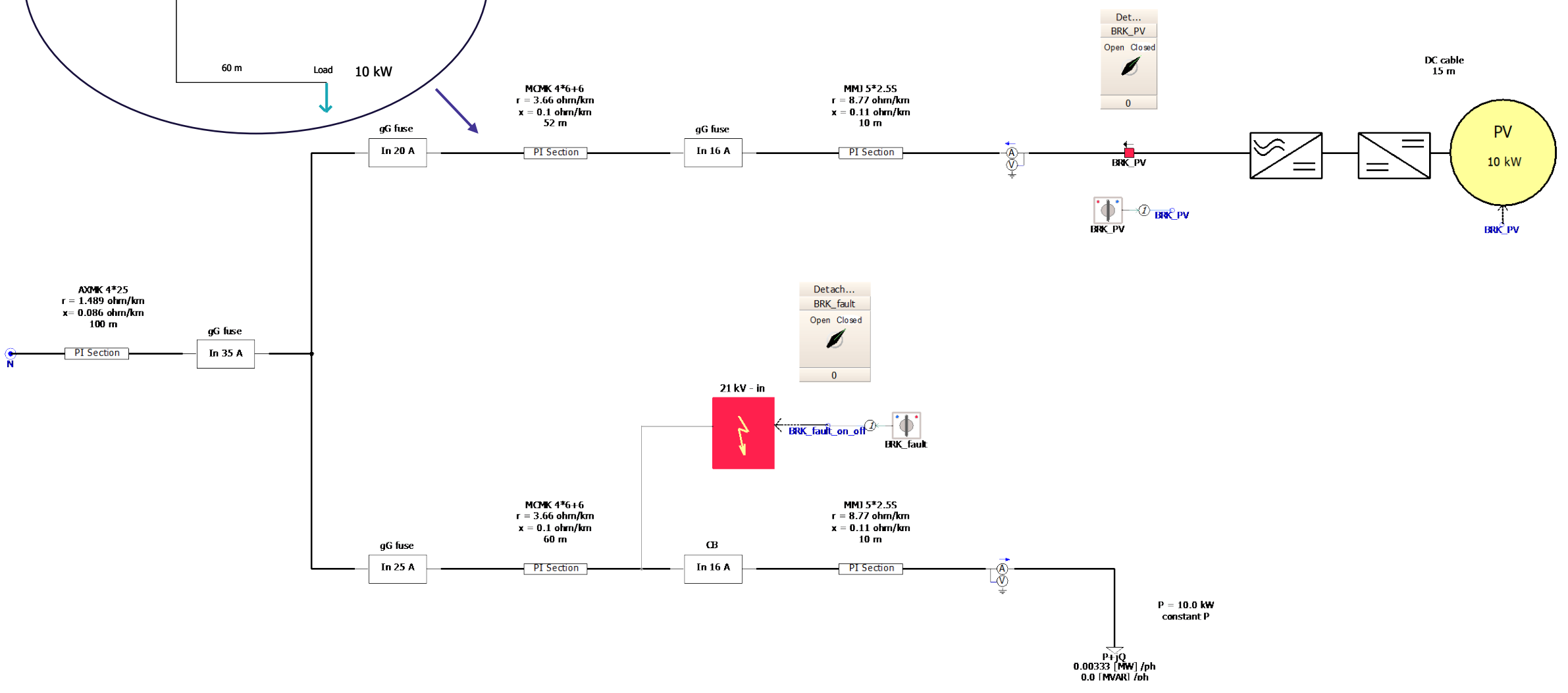


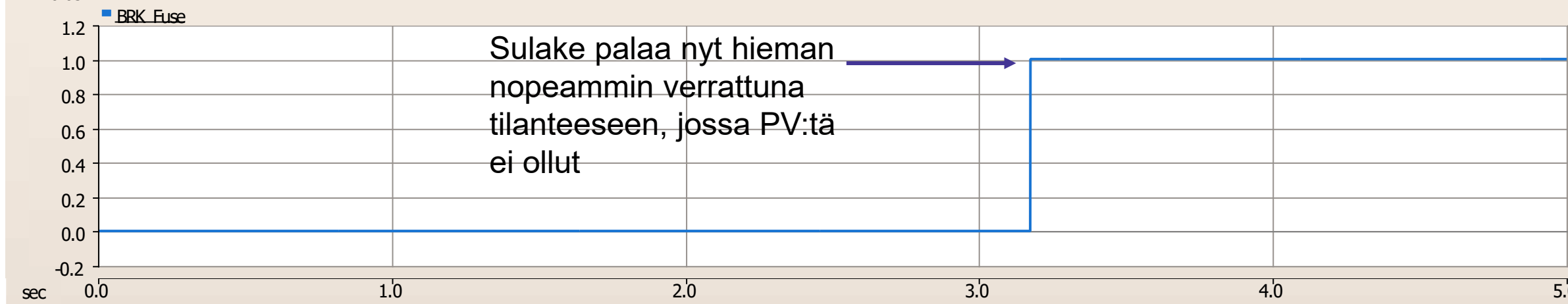
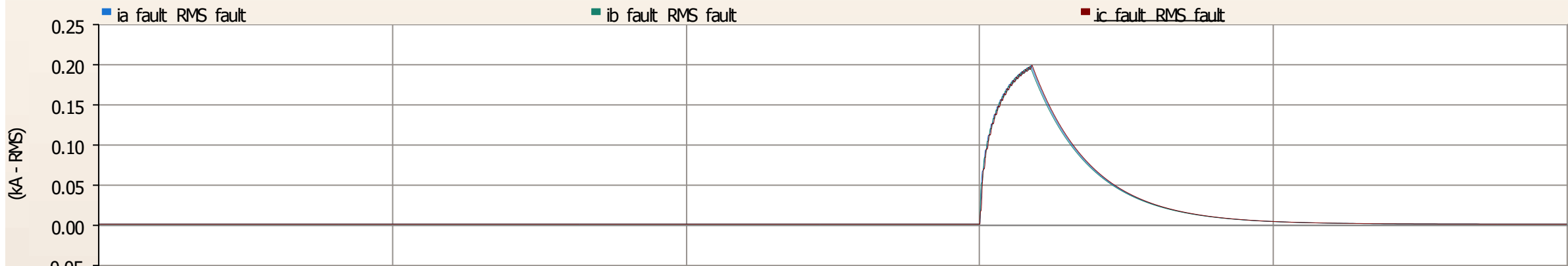
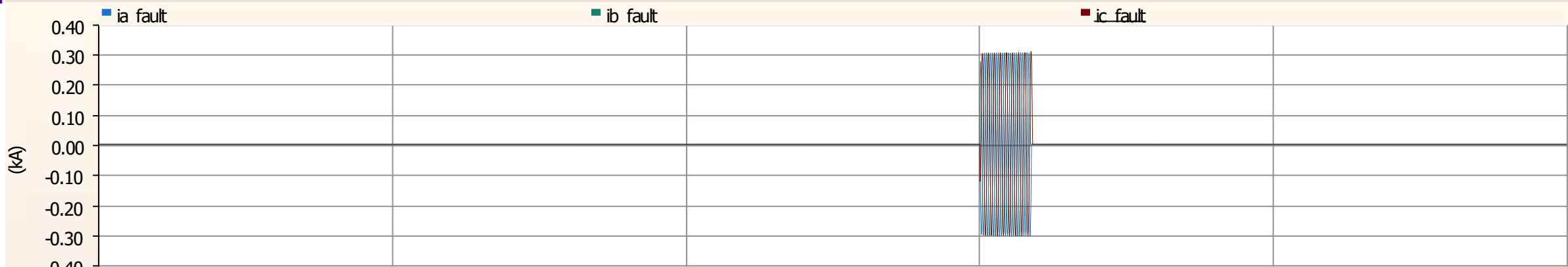
# Vika kiinteistön sisällä, pienempi BESS suoraan PJ-verkossa – 1 PV kaukana





# Vika kiinteistön sisällä – 1 PV kaukana

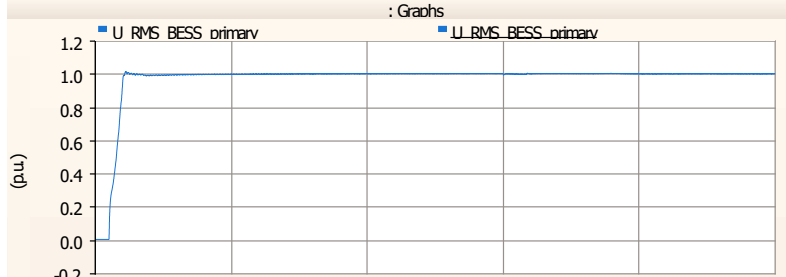




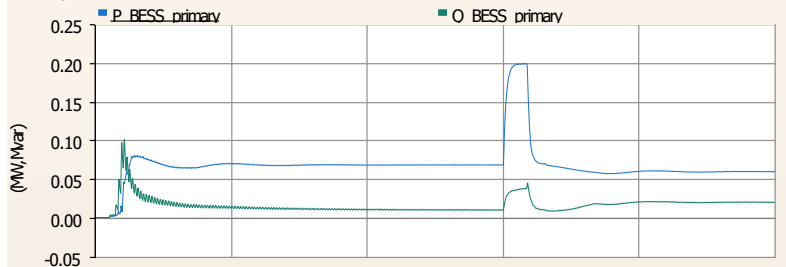
Sulake palaa nyt hieman nopeammin verrattuna tilanteeseen, jossa PV:tä ei ollut

# BESS

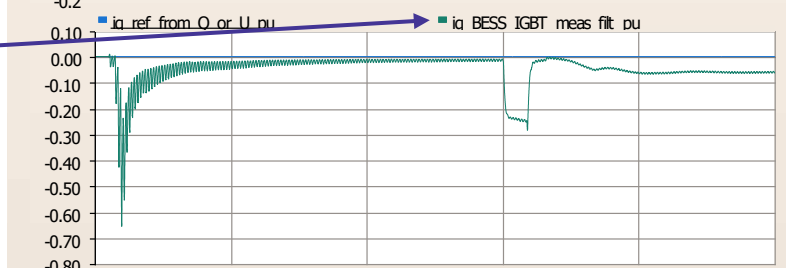
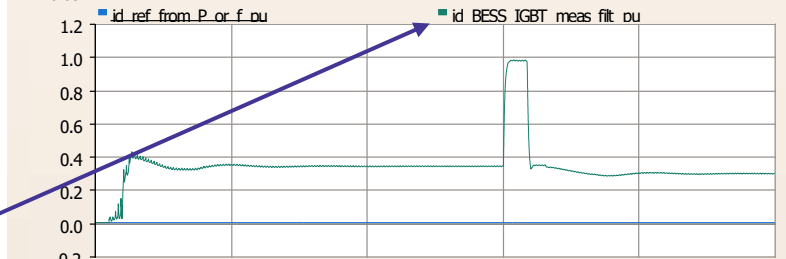
Jännite



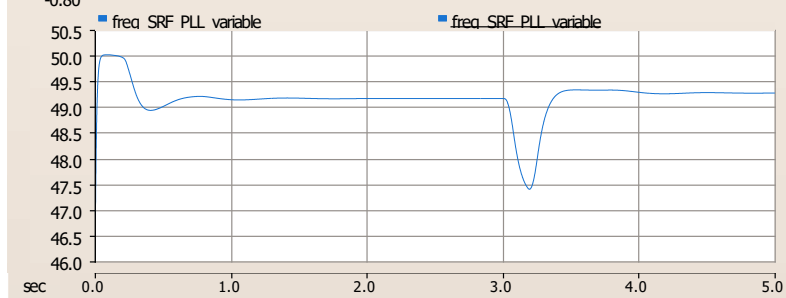
Päto- ja loisteho



Mitatut id- ja iq-virrat

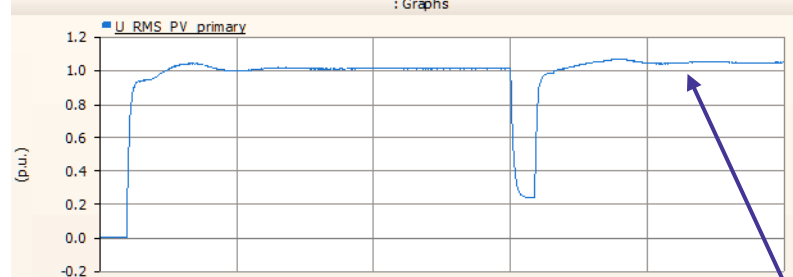


Taajuusreferenssi BESS:n signaaligeneraattorilta

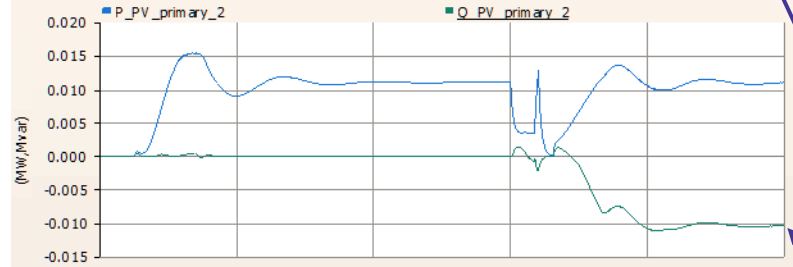


# PV 1

Jännite

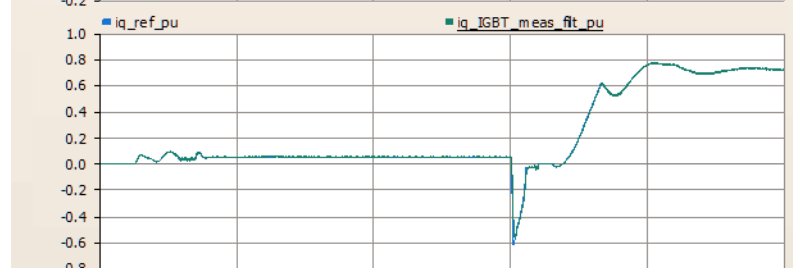
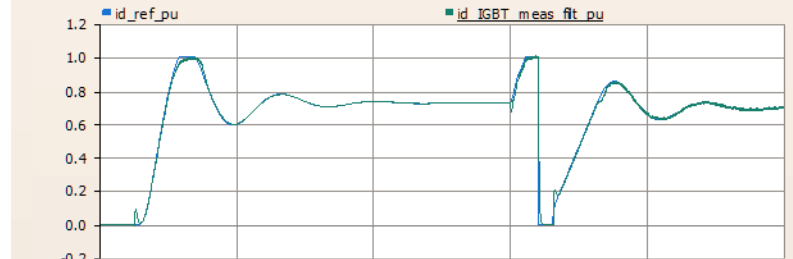


Päto- ja loisteho

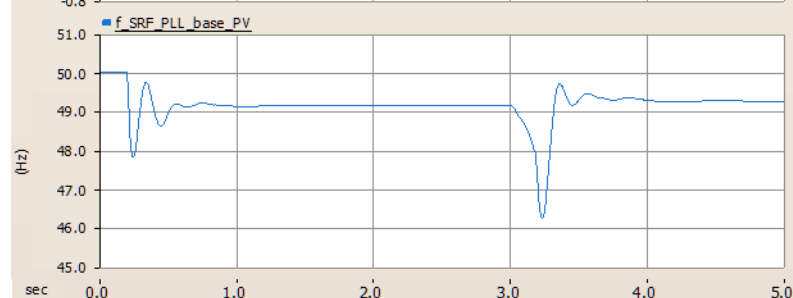


PV:n pätoehon tuotanto nostaa jännitettä, jolloin PV:n jännitteensäätö ottaa loistehoa pienentääkseen jännitettä

Referenssi- ja mitatut id- ja iq-virrat

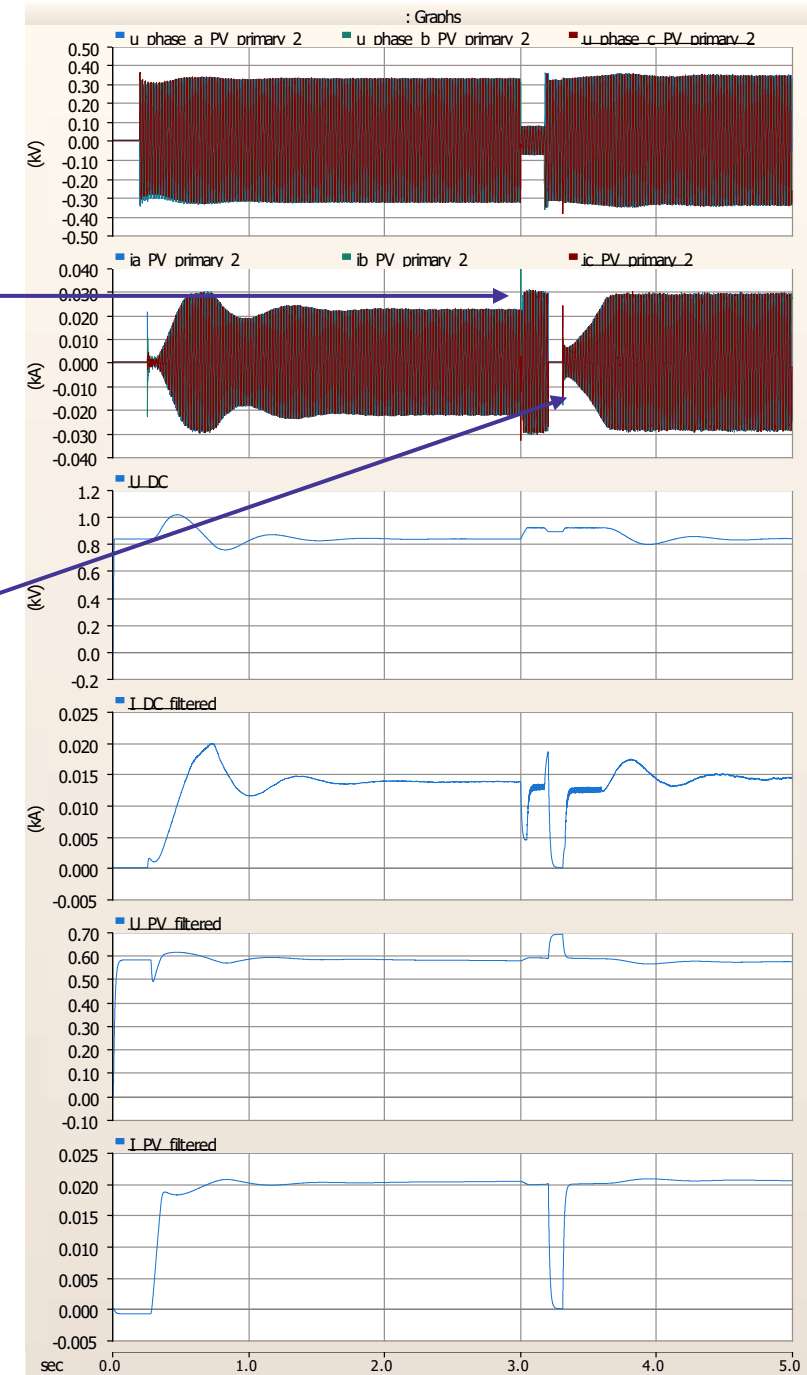


Mitattu taajuus (PLL)



PV syöttää 200 ms:a vikavirtaa  
ennen kuin alijännitesuojaus  
irrottaa PV:n verkosta

PV kytkeytyy takaisin verkkoon, kun  
jännite on ollut 100 ms yli raja-arvon  
(0.9 p.u.)



Vaihejännitteet

PV 1

Vaihevirrat

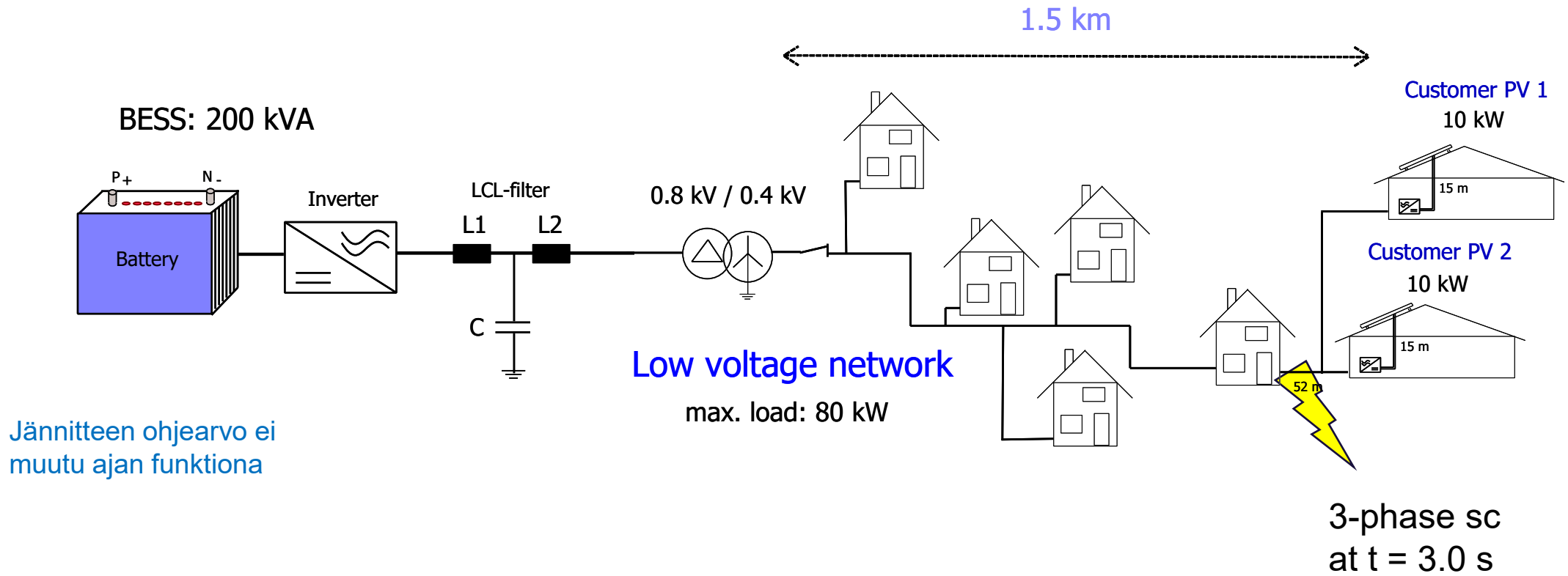
DC-jännite

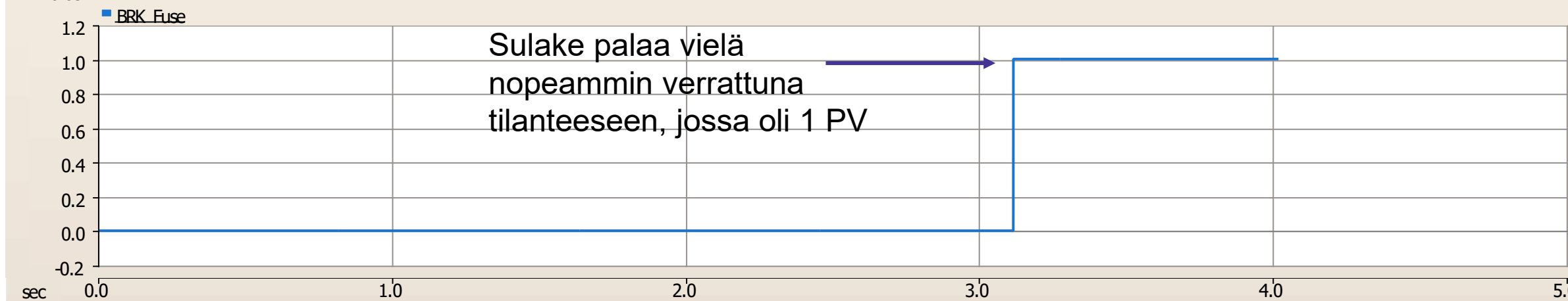
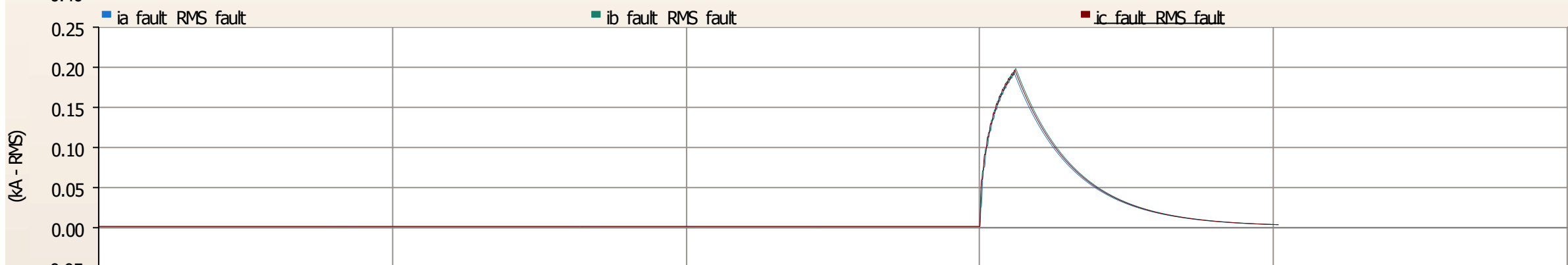
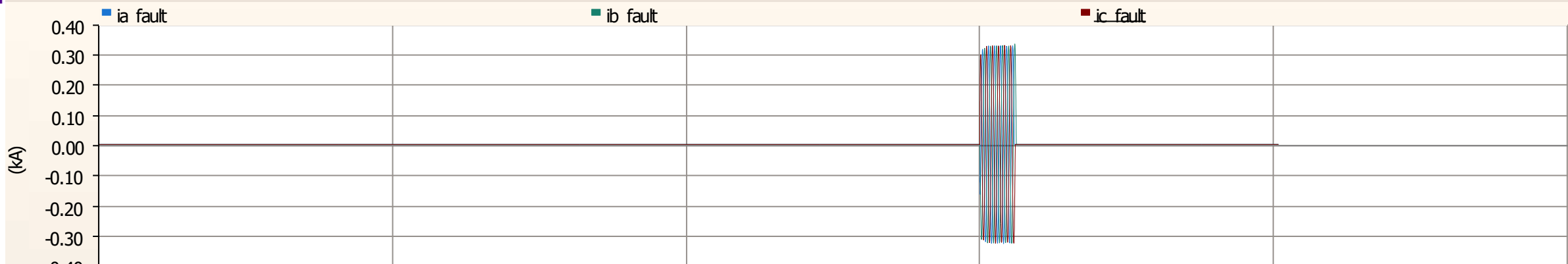
DC-virta

PV:n jännite

PV:n virta

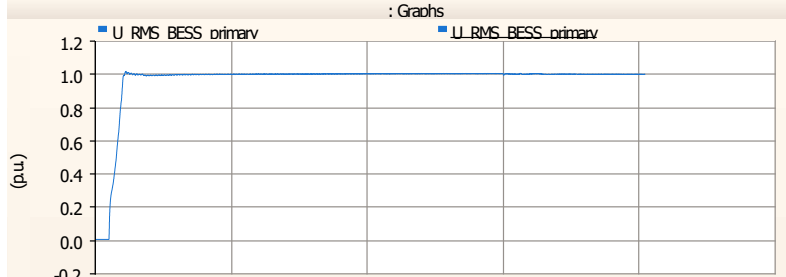
# Vika kiinteistön sisällä, pienempi BESS suoraan PJ-verkossa – 2 PV:tä kaukana



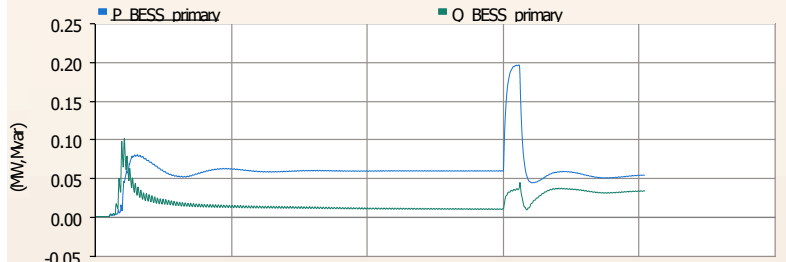


# BESS

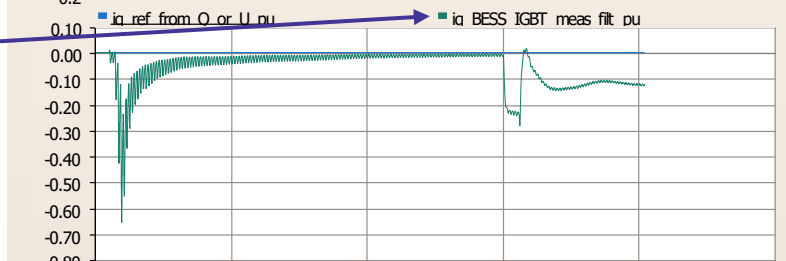
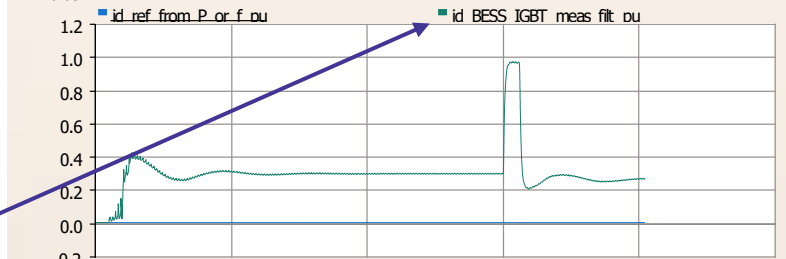
Jännite



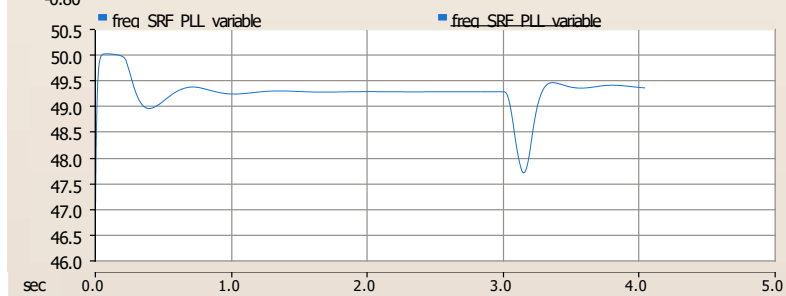
Päätö- ja loisteho



Mitatut id- ja iq-virrat



Taajuusreferenssi BESS:n signaaligeneraattorilta

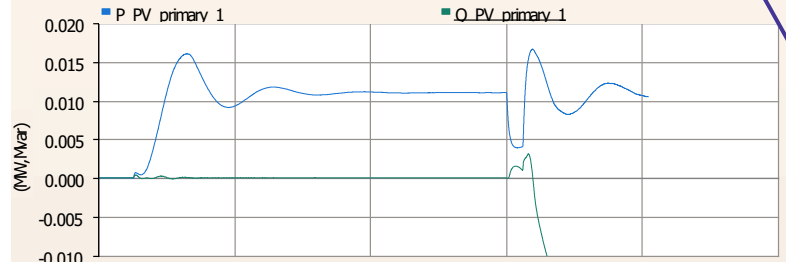


# PV 1

Jännite

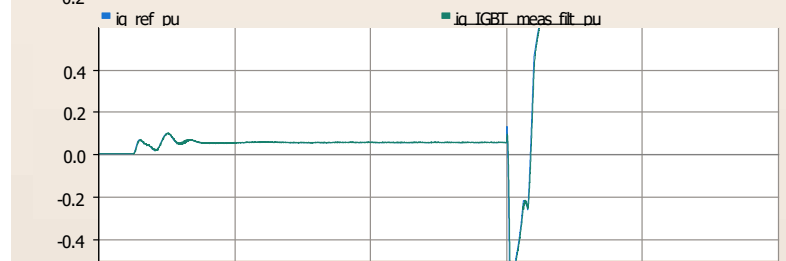
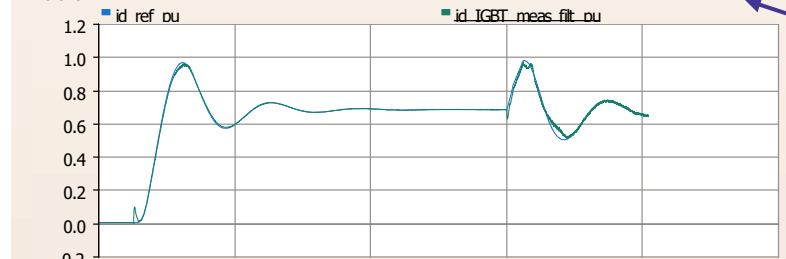


Päätö- ja loisteho

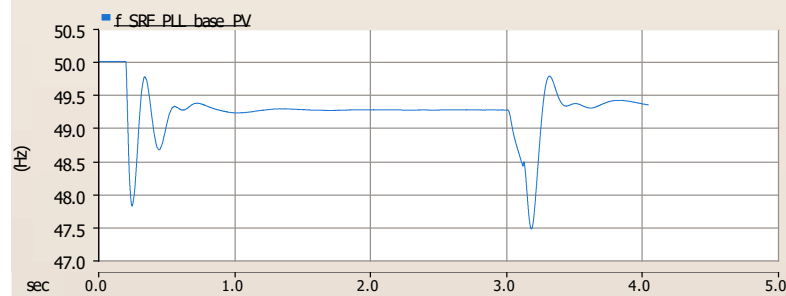


PV:n päätötehon tuotanto nostaa jännitettä, jolloin PV:n jännitteensäätö ottaa loistehoa pienentääkseen jännitettä

Referenssi- ja mitatut id- ja iq-virrat

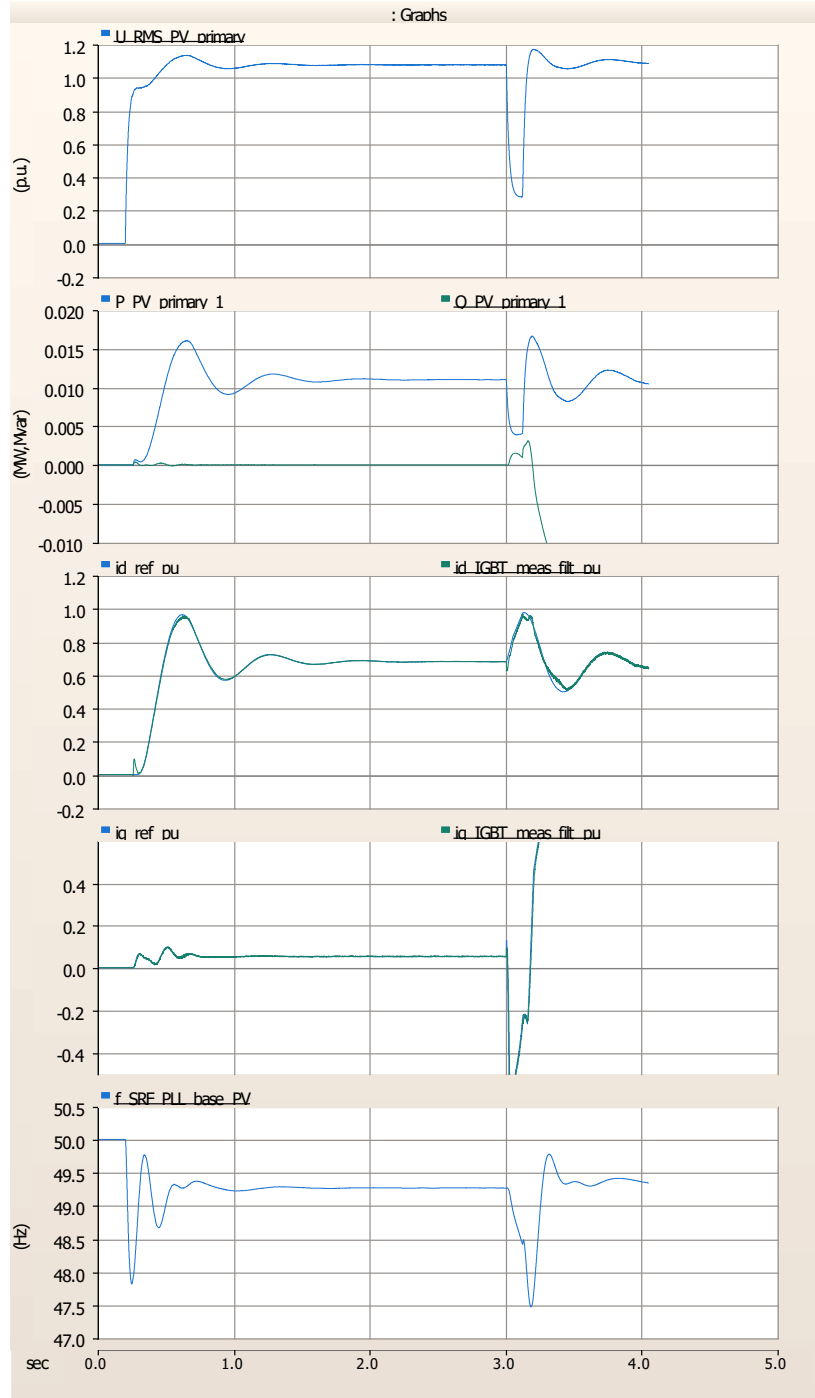


Mitattu taajuus (PLL)

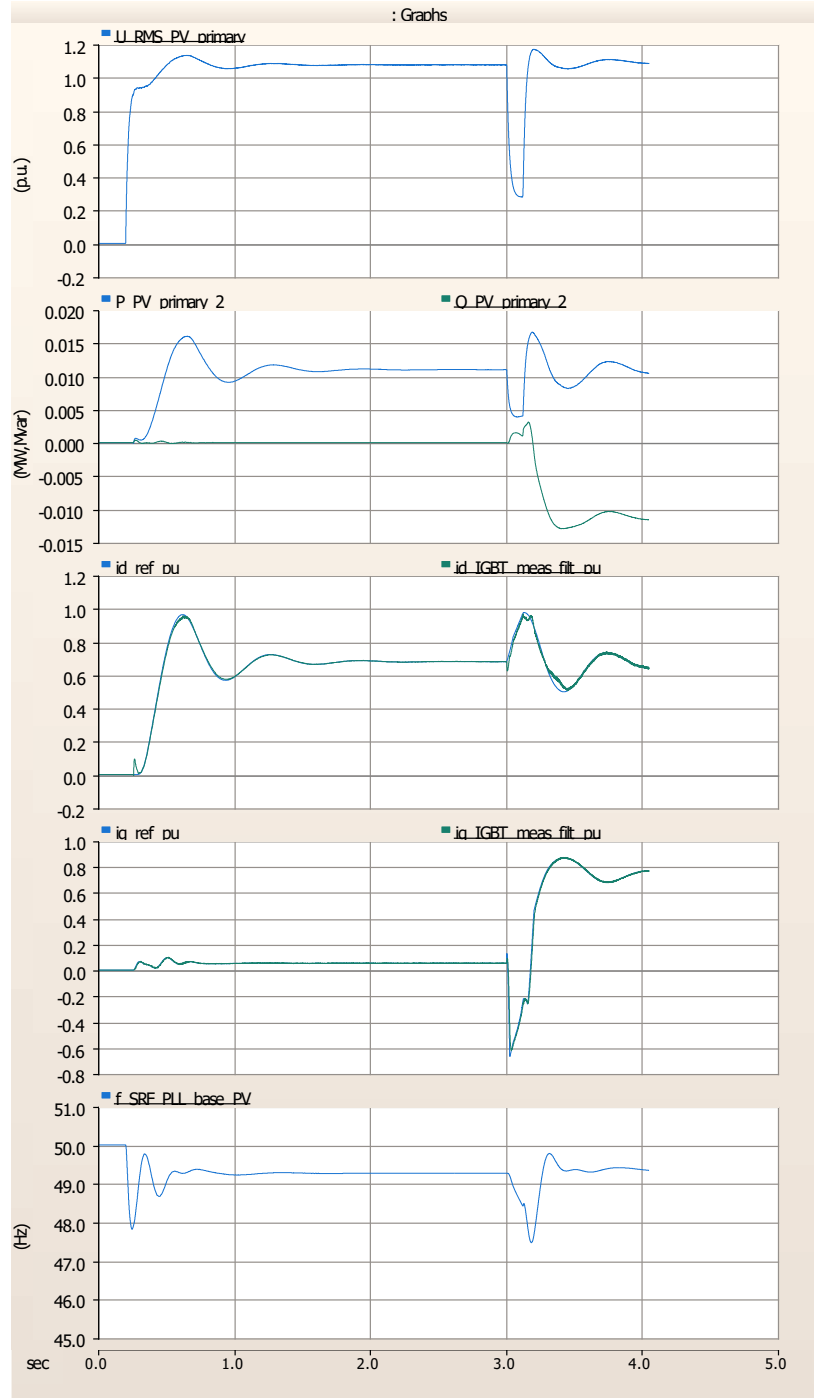




# PV 1



# PV 2



Jännite

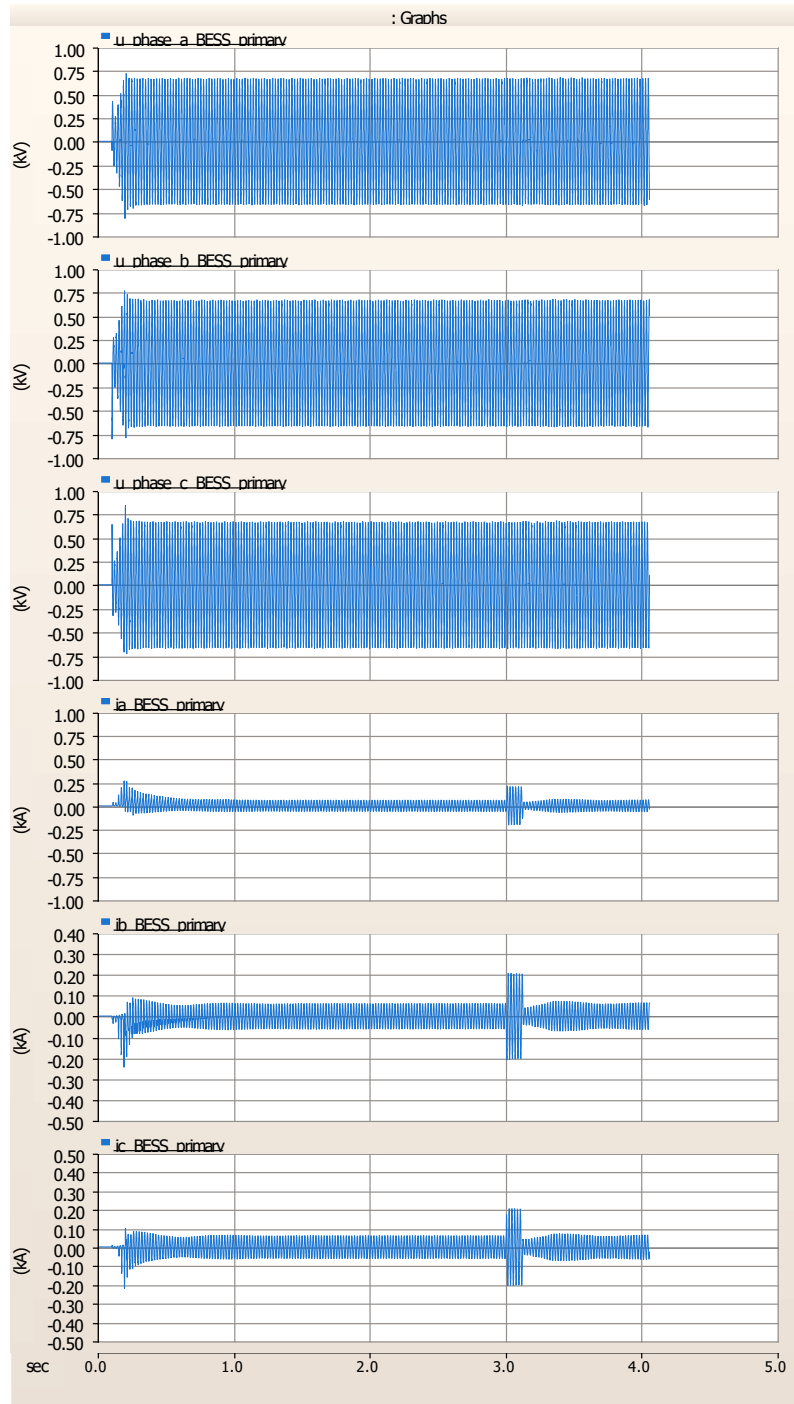
Päto- ja loisteho

Referenssi- ja mitatut id- ja iq- virrat

Mitattu taajuus (PLL)

# BESS

Vaihejännitteet



Vaihevirrat

Vaihejännitteet

# PV 1

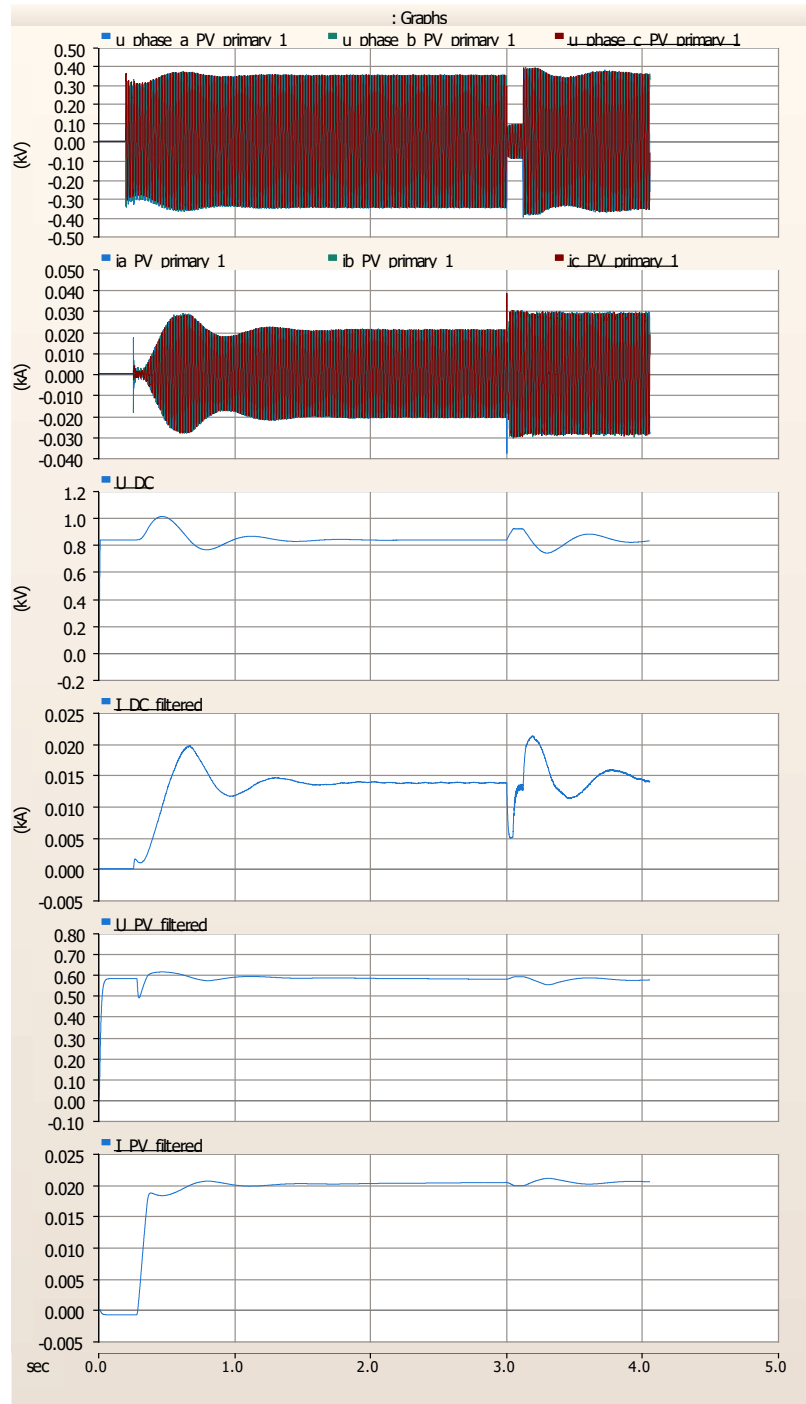
Vaihevirrat

DC-jännite

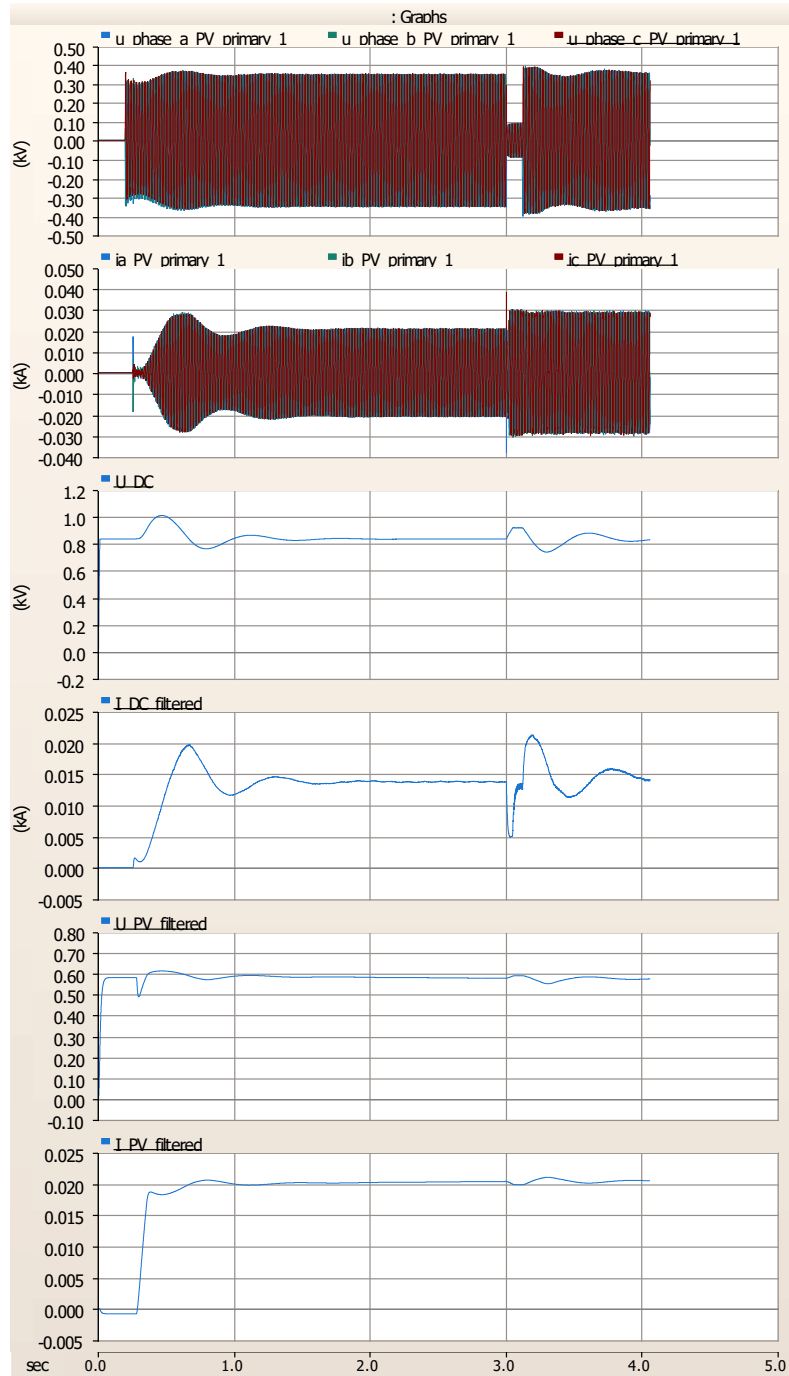
DC-virta

PV:n jännite

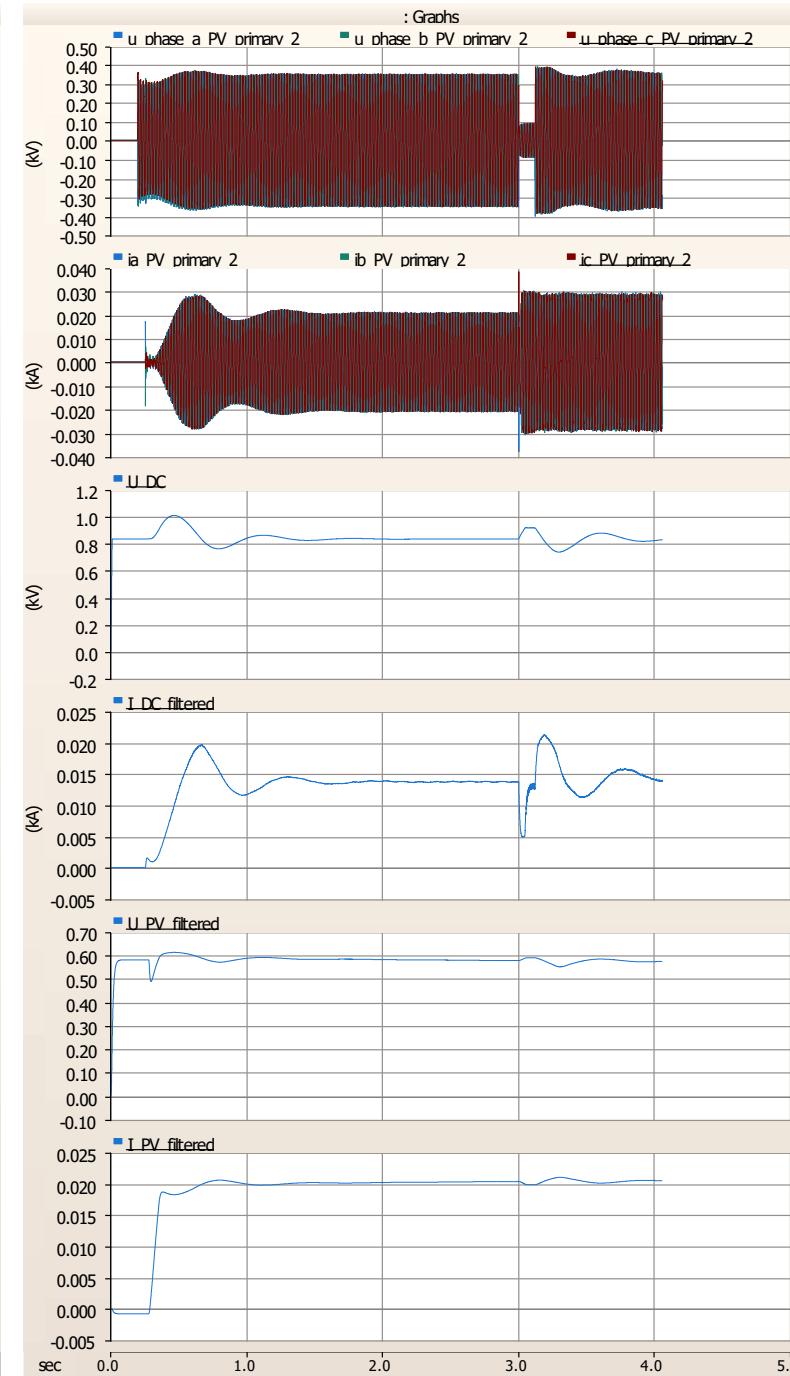
PV:n virta



# PV 1



# PV 2



Vaihejännitteet

Vaihevirrat

DC-jännite

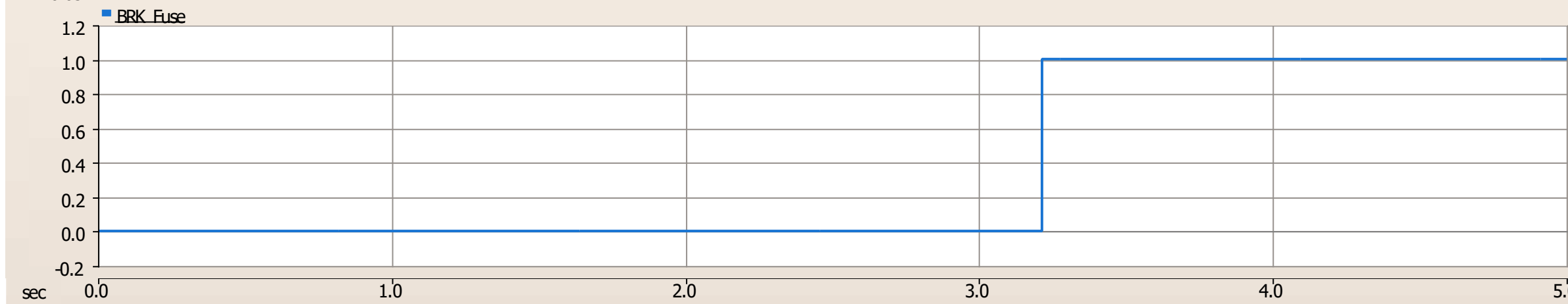
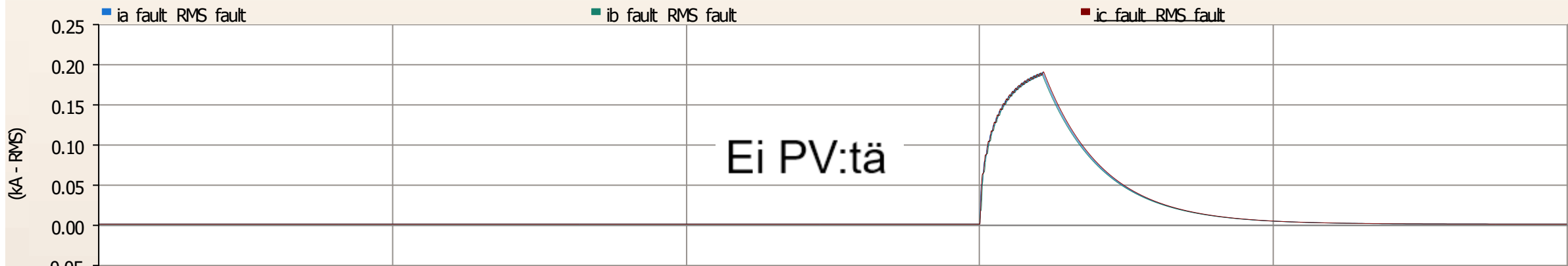
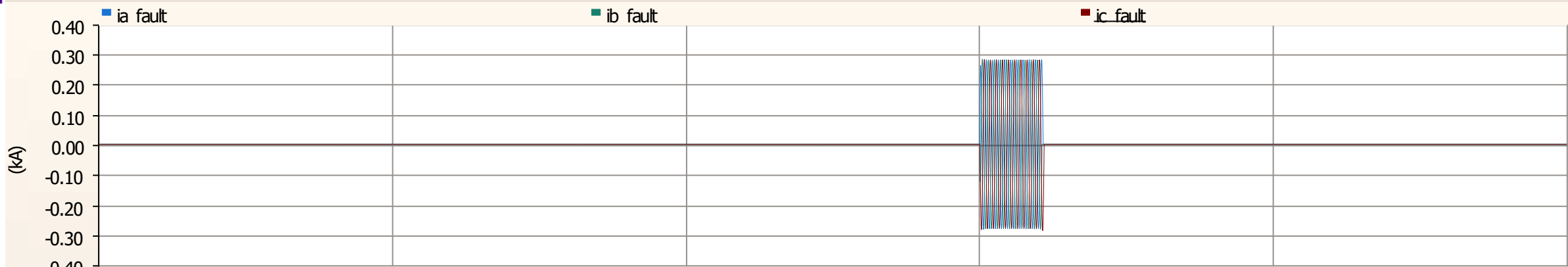
DC-virta

PV:n jännite

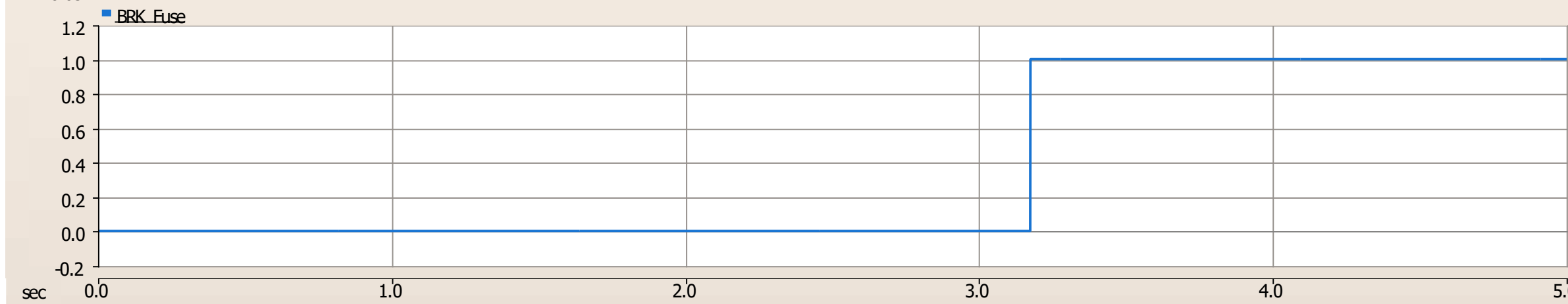
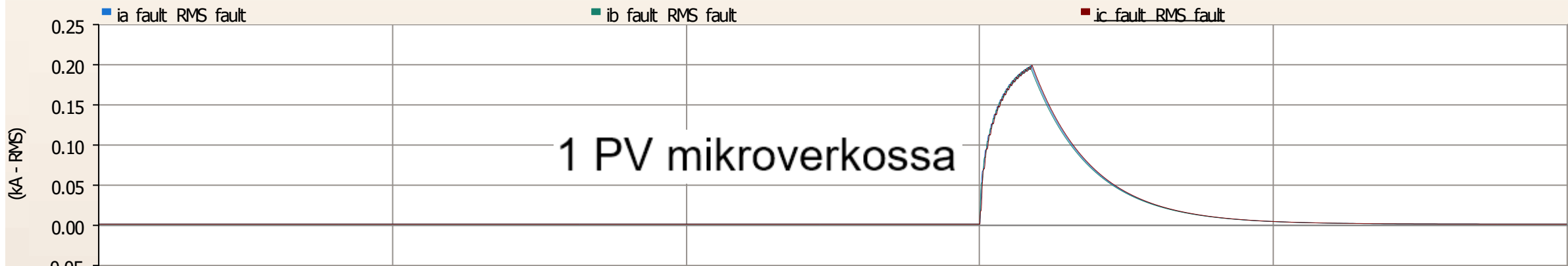
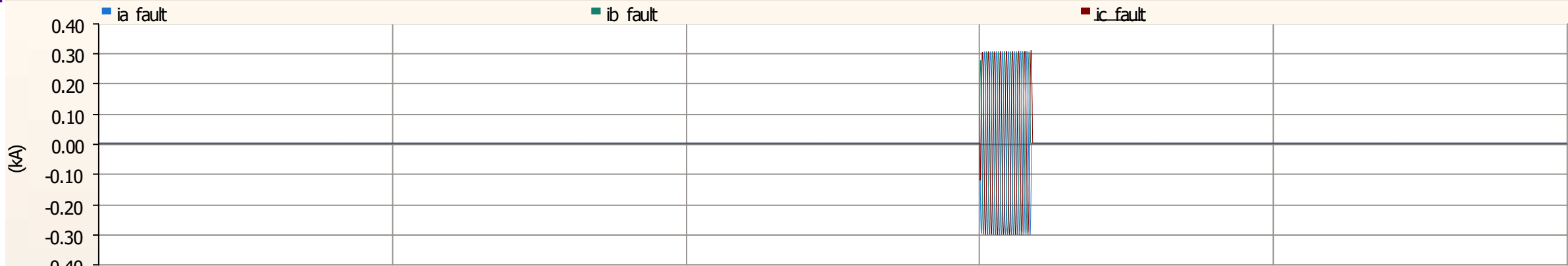
PV:n virta

## 2. Vika kiinteistön sisällä, pienempi BESS suoraan PJ-verkossa

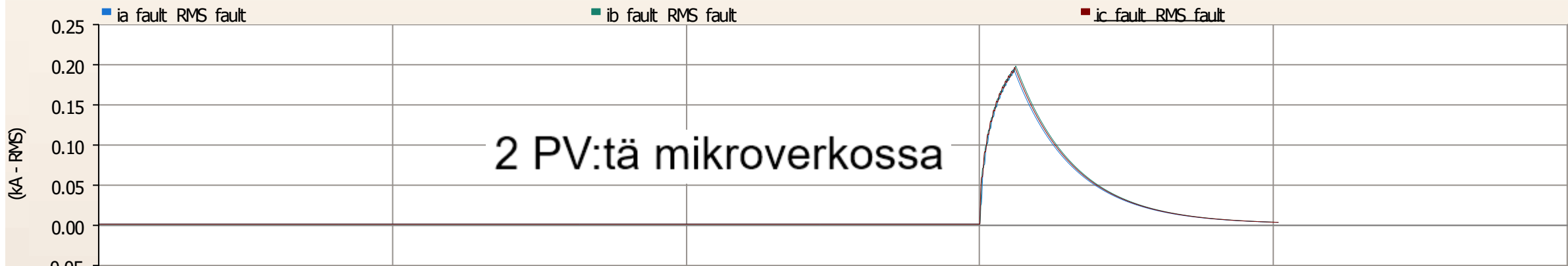
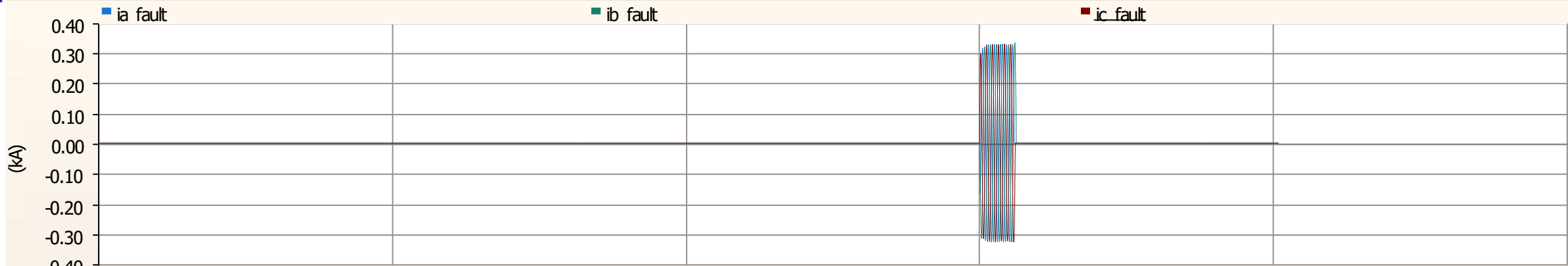
- Seuraavat kolme kalvoa näyttävät miten asiakkaiden oma tuotanto (PV, 10 kW, 15 kVA) vaikuttaa suojaukseen:
  1. Ei PV:tä
  2. 1 PV mikroverkossa
  3. 2 PV:tä mikroverkossa
- Alla olevista vertailukuvaajista nähdään, että nyt PV:n vaikutus suojauksen toimintaan on suurempi, kuin D-1 -skenaarioissa



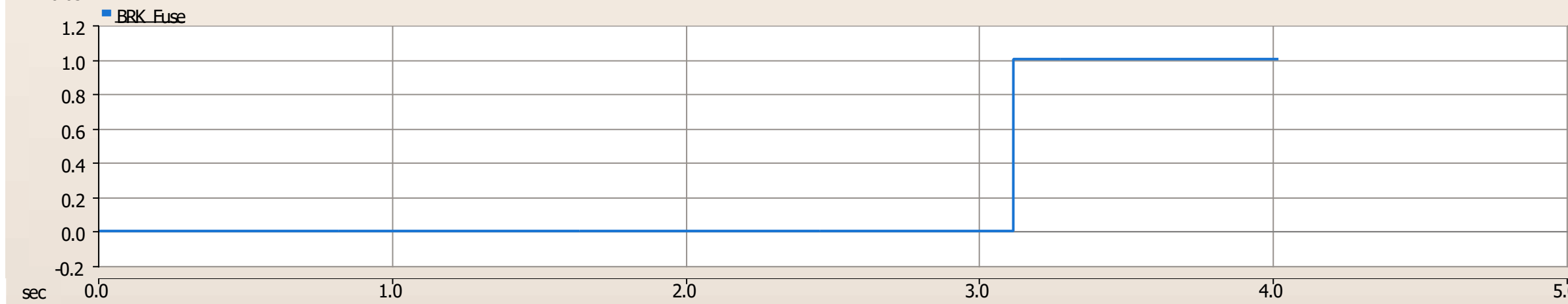
sec 0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0



sec 0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0



2 PV:tä mikroverkossa



sec 0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0

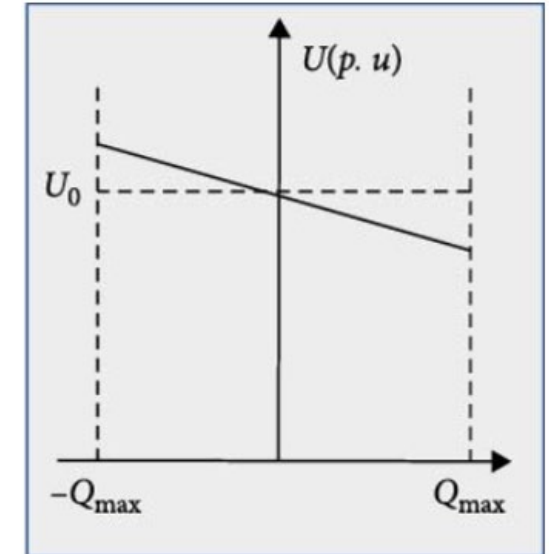
**E: Kahden lähekkäin olevan, MW-kokoluokan, PV:n osallistuminen jännitteensäätöön**



# E: Kahden lähekkäin olevan, MW-kokoluokan, PV:n osallistuminen jännitteensäätöön



- Projektin aikana on ollut puhetta jakeluverkossa sijaitsevien PV:n osallistumisesta jännitteensäätöön
- Jatkossa PV:n täytyy jakeluverkossa osallistua jännitteensäätöön Q/U-droop –periaatteella
- On mahdollista, että toisiaan lähellä olevien PV:n jännitteensäätäjät reagoivat keskenään siten, että:
  - Jännitteen amplitudi värähtelee liikaa
  - Yliaallot lisääntyvät
  - Taajuudenmittauksesta tulee vaikeampaa ja epäluotettavampaa
  - Tuotantoyksiköiden irtikytketyksiä
- Miten määritellään mikä on lähellä tai mikä on kaukana? Tästä tuskin on selvää kriteeriä tai rajaa.
  - Tapauskohtaista, koska tilanteessa on monta muuttujaa:
    - Paljon PV:tä eri valmistajilta → vasteet erilaisia
    - Kuormituksen suuruus ja dynamiikka voivat vaihdella
    - Yliaaltopitoisuus voi vaihdella
    - Etäisyydet vaihtelevat jne.
  - Mahdollisten jänniteongelmien ilmaantuessa ja kokemuksen myötä voi olla mahdollista löytää etukäteen kriittisiä kohteita
  - Jakeluverkkoyhtiön on kuitenkin jälkikäteen hyvin vaikeaa ja työlästä pyrkiä muuttamaan vaihtosuuntaajien parametreja



# E: Kahden lähekkäin olevan, MW-kokoluokan, PV:n osallistuminen jännitteensäätöön



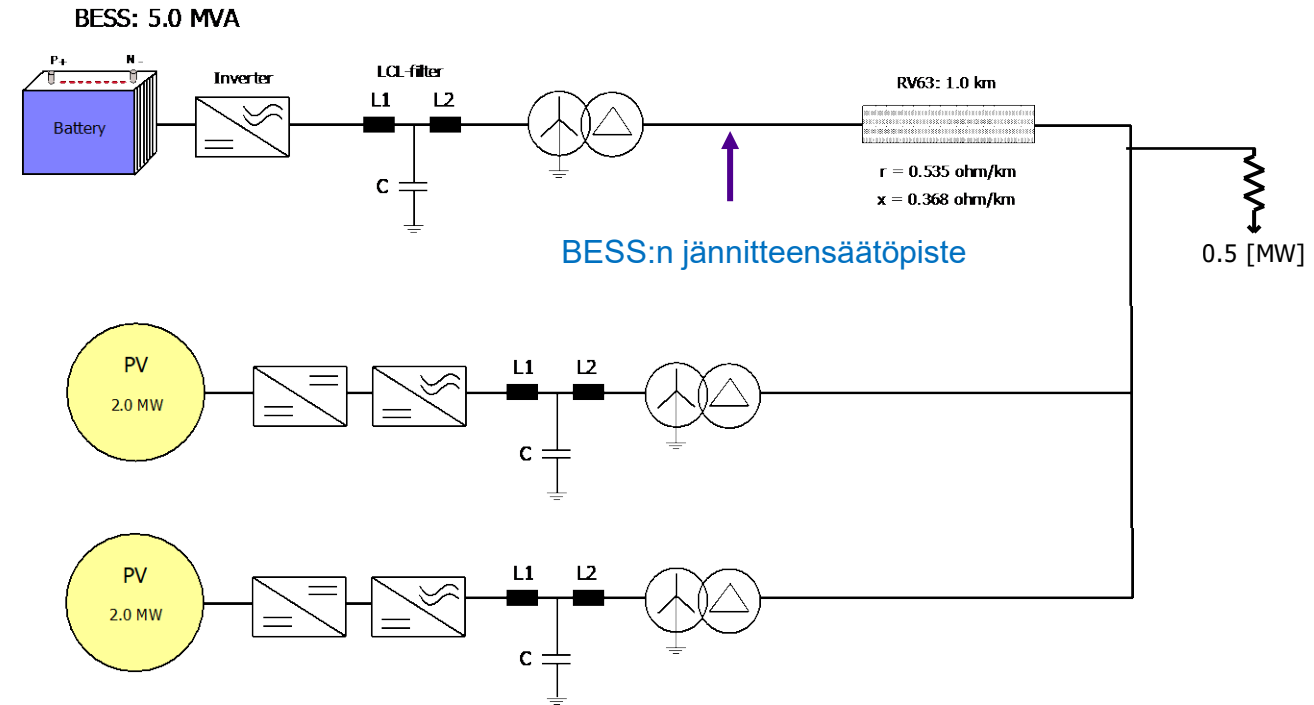
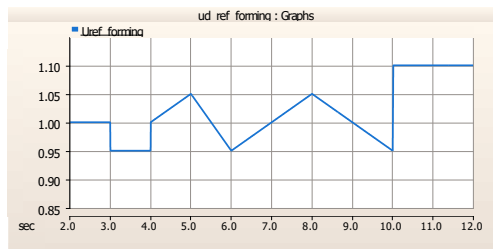
- Kompaktissa mikroverkossa käydään esimerkkisimulointien avulla eri käyttötilanteita läpi, joissa peruseriaatteena on:
  - BESS (5.0 MVA) muodostaa mikroverkon (grid-forming) ja syöttää passiivista (resistanssi) kuormaa, jonka suuruus on 0.5 MW
  - 2 PV:tä, jossa yhden PV:n teho on 2.0 MVA, tuottavat pätötehoa ja säätävät liitäntäpisteidensä jännitettä Q/U-droop –periaatteella
  - Jännitteen vaihtelut suoritettiin muuttamalla BESS:n referenssijännitettä
    - BESS:n jännitteensäätö suoritettiin jännitteen vaihtuiden toteuttamisen (säätö seurasi referenssijännitetason muutoksia)
    - Simulointiteknisesti suoraviivaisempi tapa verrattuna siihen, että verkossa kuormituksia kytkeytyy päälle ja pois jne., joiden avulla oltaisiin saatu mikroverkkoon jännitevaihteluita
    - Tässä menetetään mahdollisuus tutkia BESS:n ja PV:den välistä dynamiikkaa, mutta muuttujien rajoittamisen vuoksi on otettu tämä lähestymistapa
- Tarkoituksena on tutkia miten eri sähköisten parametrien muuttaminen vaikuttaa PV:n jännitteensäätöön
  - Syntykö tilanteita, joissa kahden (sähköisesti) lähekkäin olevien PV:n jännitteen droop-säätö aiheuttaa odottamatonta / ei-toivottua värähtelyä?
  - Värähtelyt voivat näkyä jännitteessä tai taajuudessa tai molemmissa.

# E: Kahden lähekkäin olevan, MW-kokoluokan, PV:n osallistuminen jännitteensäätöön



- Ei ulkoista verkkoa / taustaverkkoa missään vaiheessa, vaan kompakti mikroverkko, jossa BESS:n lisäksi on kaksi PV-järjestelmää
  - BESS muodostaa mikroverkon (black start), johon PV:t tahdistuvat
  - PV:t kytkeytyvät verkkoon, kun verkon jännite on yli 0.95 p.u. PV:n täytyy mitata jännitettä ja taajuutta luonnollisesti katkaisijoidensa yläjännitepuolelta / verkon puolelta
  - Kun tasapainotila on saavutettu, niin BESS:n jännitereferenssiä muutetaan ajan funktiona
  - Verkossa 0.5 MW:n resistanssikuorma

- PV:t säätelevät jännitettä droopilla. Oletuksena droop on 0.05 (p.u.)
- PV:n vaihtosuuntaajan nimellisteho on ylimitoitettu (vrt. todellinen PV-järjestelmä), jotta nähdään jännitteensäädön vaikutukset selvemmin
- BESS:llä päätötehoon pohjautuva taajuusdroop siten, että kun BESS ei syötä eikä ota verkosta päätötehoa, niin taajuusohje on 50.0 Hz
  - droop-kerroin 0.05 p.u.
- BESS:llä on loistehoon pohjautuva jännitedroop siten, että kun BESS ei syötä eikä ota verkosta loistehoa, niin RMS-jänniteohje on 1.0 p.u.
  - droop-kerroin 0.05 p.u.
- BESS:n jännitteen ohjearvoa muutetaan 0.95 p.u.:n ja 1.10 p.u.:n välillä ajan funktiona:



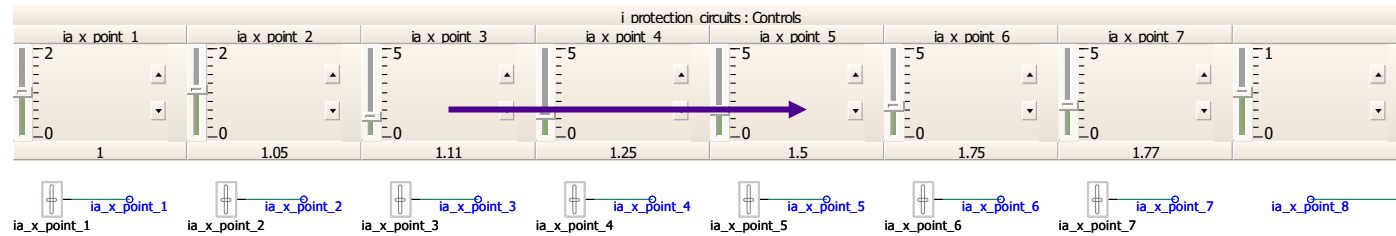
# E: Kahden lähekkäin olevan, MW-kokoluokan, PV:n osallistuminen jännitteensäätöön

Suojaustoiminnoista:

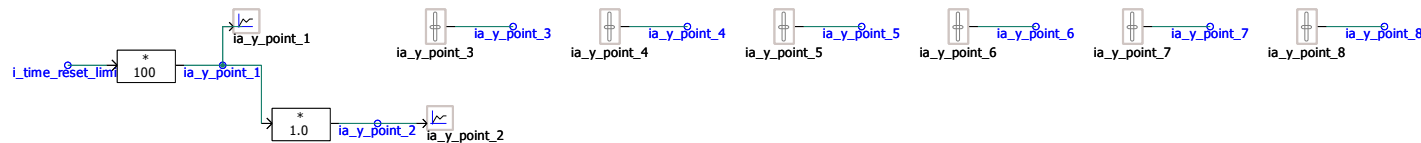
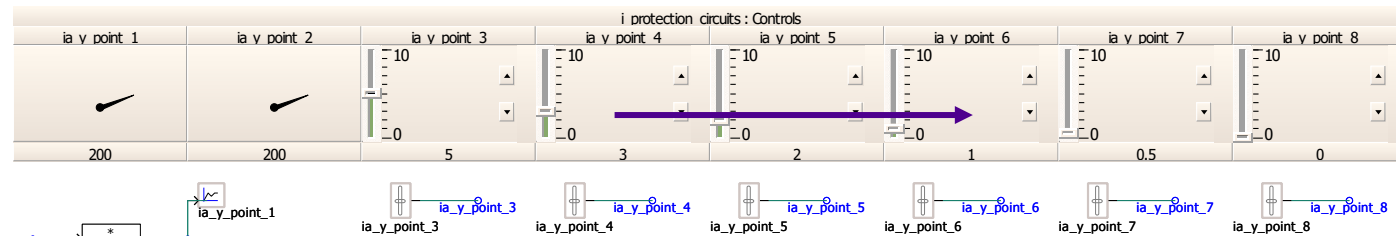
- Simuloinneissa BESS:llä on ylivirtasuojaus aktivoituneena, mutta eivät jännite- ja taajuussuojat
  - Tarkoitus on tarkastella etenkin PV:n vasteita
- PV:llä on simuloinneissa hetkellinen (ei lisättyä viivettä) ja hidastettu suojaus jännitteen ja taajuuden suhteen
  - Yo. hetkellinen suojaustoiminto pois joissakin tapauksissa (maininta tästä ko. skenaarioissa)

BESS:n ylivirtasuojauksen periaate:

Virtaraja pu-arvona



Aika (s), kuinka pitkään BESS voi syöttää X:n suuruista (vika)virtaa

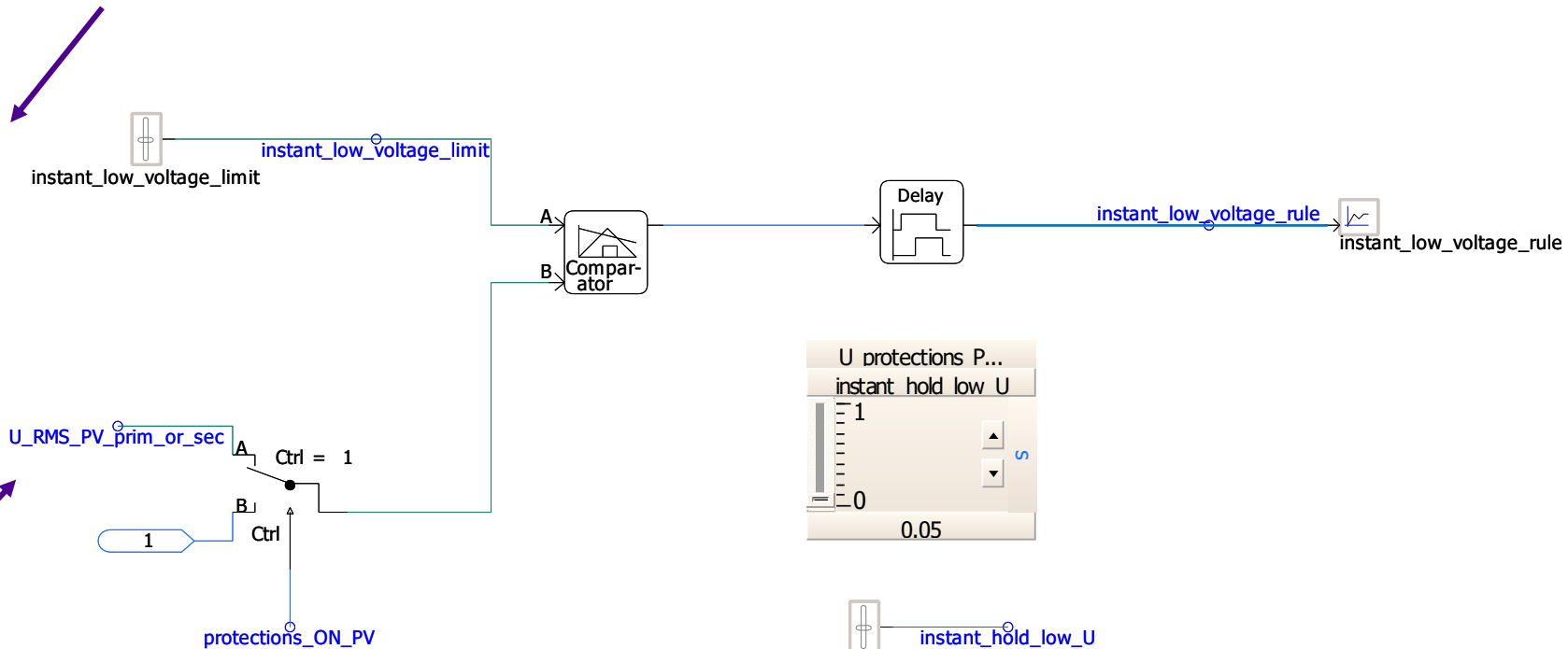
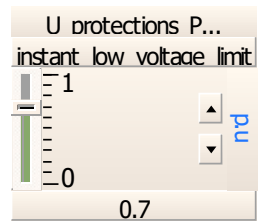


...niin sallittu ylivirta-aika pienenee

# E: Kahden lähekkäin olevan, MW-kokoluokan, PV:n osallistuminen jännitteensäätöön

- PV:n hetkellisen suojauksen periaate alijännitteelle (ja sama periaate ylijännitteelle ja ali-/ylitaajuudelle)

## Hetkellinen alijänniteraja

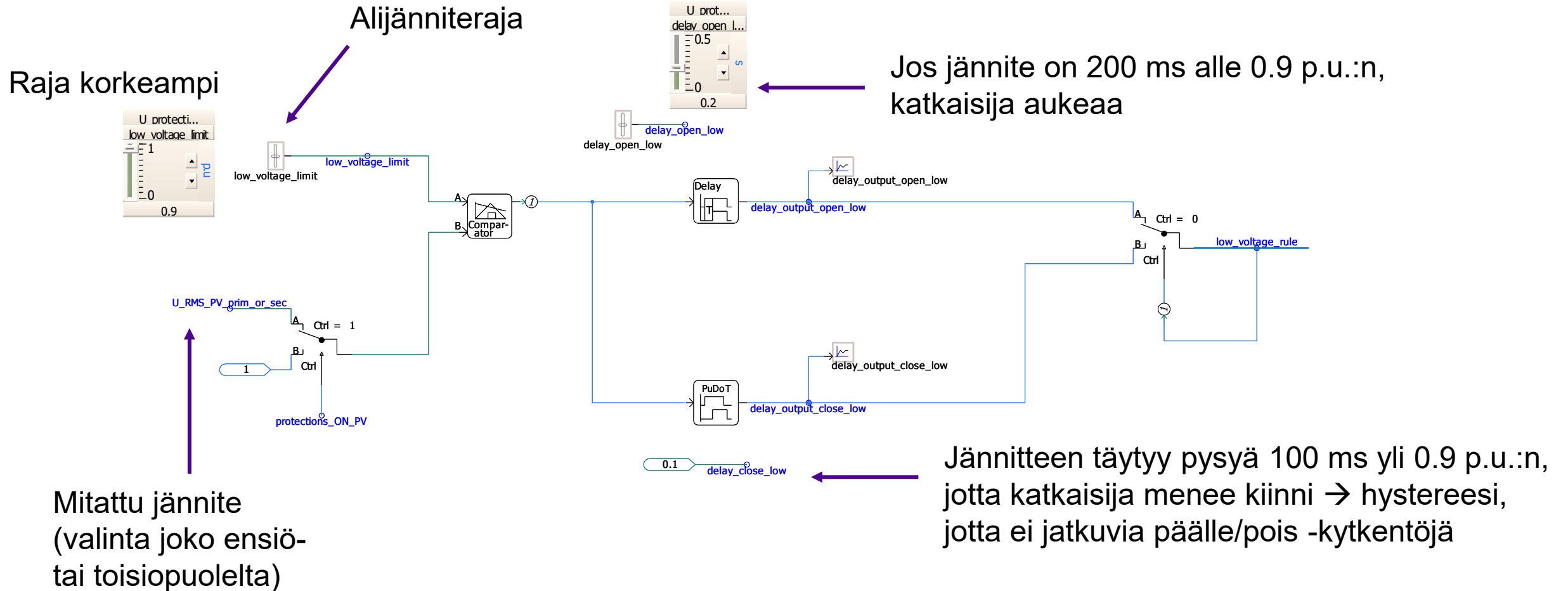


Mitattu jännite  
(valinta joko ensiö-  
tai toisiopuolelta)

”Viive” (50 ms) → Koska mikään  
ei tapahdu heti

# E: Kahden lähekkäin olevan, MW-kokoluokan, PV:n osallistuminen jännitteensäätöön

- PV:n viivästetyn suojauksen periaate alijännitteelle (ja sama periaate ylijännitteelle ja ali-/ylitaajuudelle)



# E: Kahden lähekkäin olevan, MW-kokoluokan, PV:n osallistuminen jännitteensäätöön

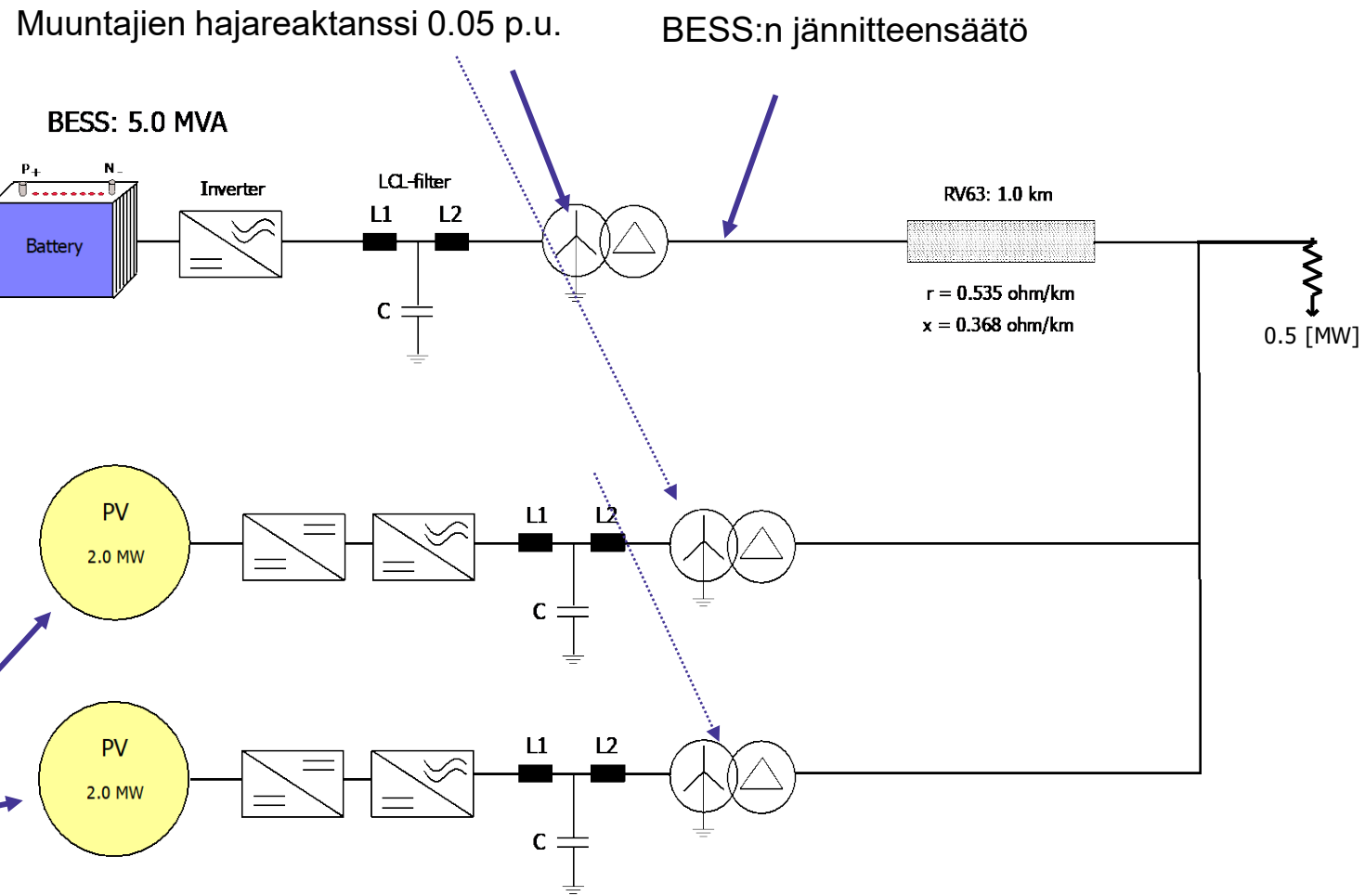


## Tarkasteluskenaariot

0. PV:llä ei Q/U-droop aktivoituneina, vaan vakioloistehosäätö ( $Q_{ref} = 0$ )
1. Perustilanne
2. Taajuusohjeen muuttuminen  $U_{ref}$  lisäksi
3. Ei johtoa (impedanssia) BESS:n ja PV:n välillä
4. Lähtökohtaisesti värähtelyherkin tapaus, jossa ei tahtigeneraattoria
5. Lähtökohtaisesti värähtelyherkin tapaus, jossa on tahtigeneraattori
6. Perustilanne (1), jossa 3-vaiheinen vika ajan hetkellä  $t = 6.0$  s
7. Perustilanne (1), jossa 3-vaiheinen vika, mutta PV:n suojaukset eivät ole aktiivisia
8. Perustilanne (1), jossa alemman PV:n PLL on hidas

# E: Kahden lähekkäin olevan PV:n osallistuminen jännitteensäätöön

## 0. PV:t eivät ole Q-U droop -moodissa



- Identtiset säätöparametrit
- Jännite- ja taajuussuojaukset ovat aktivoituneina



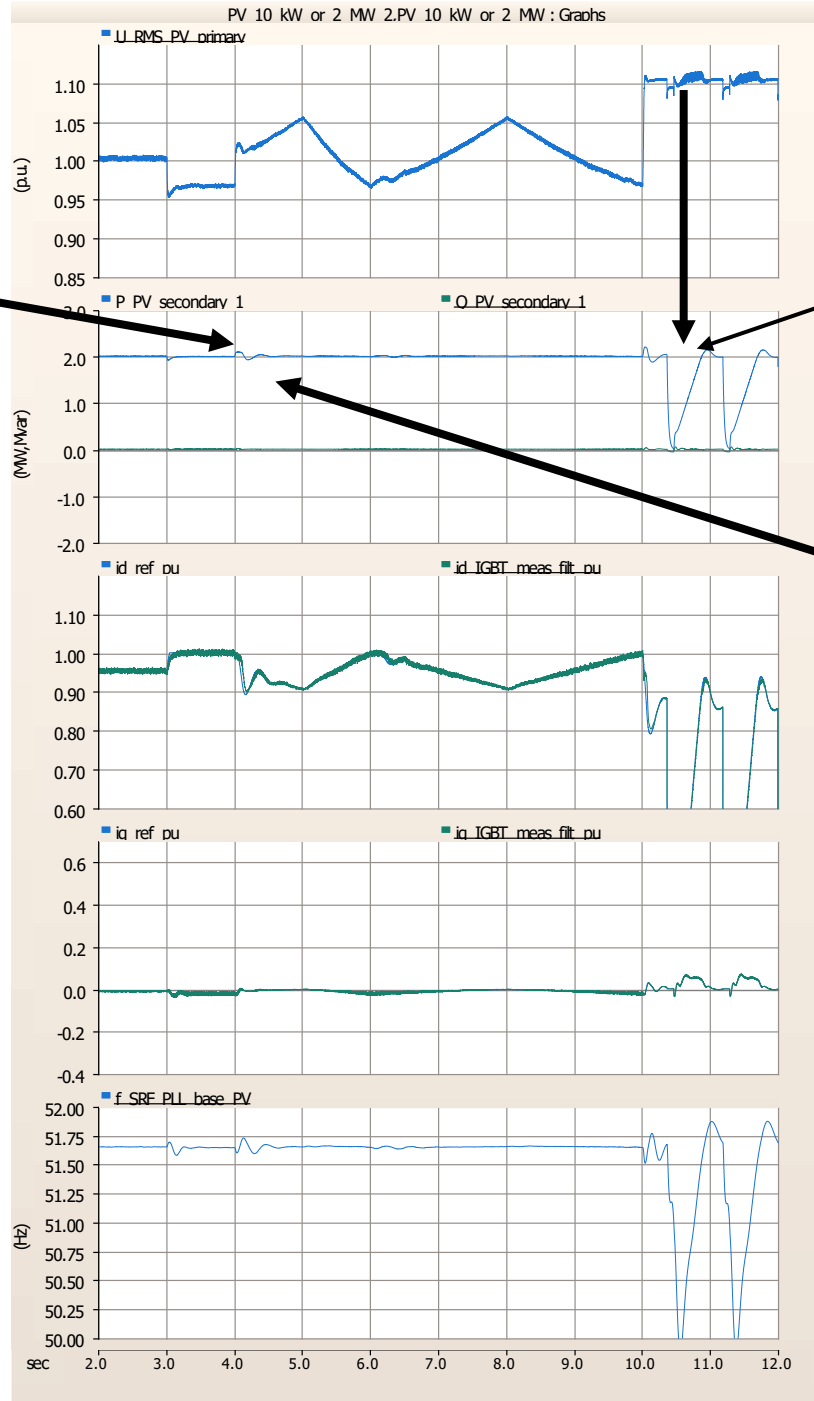
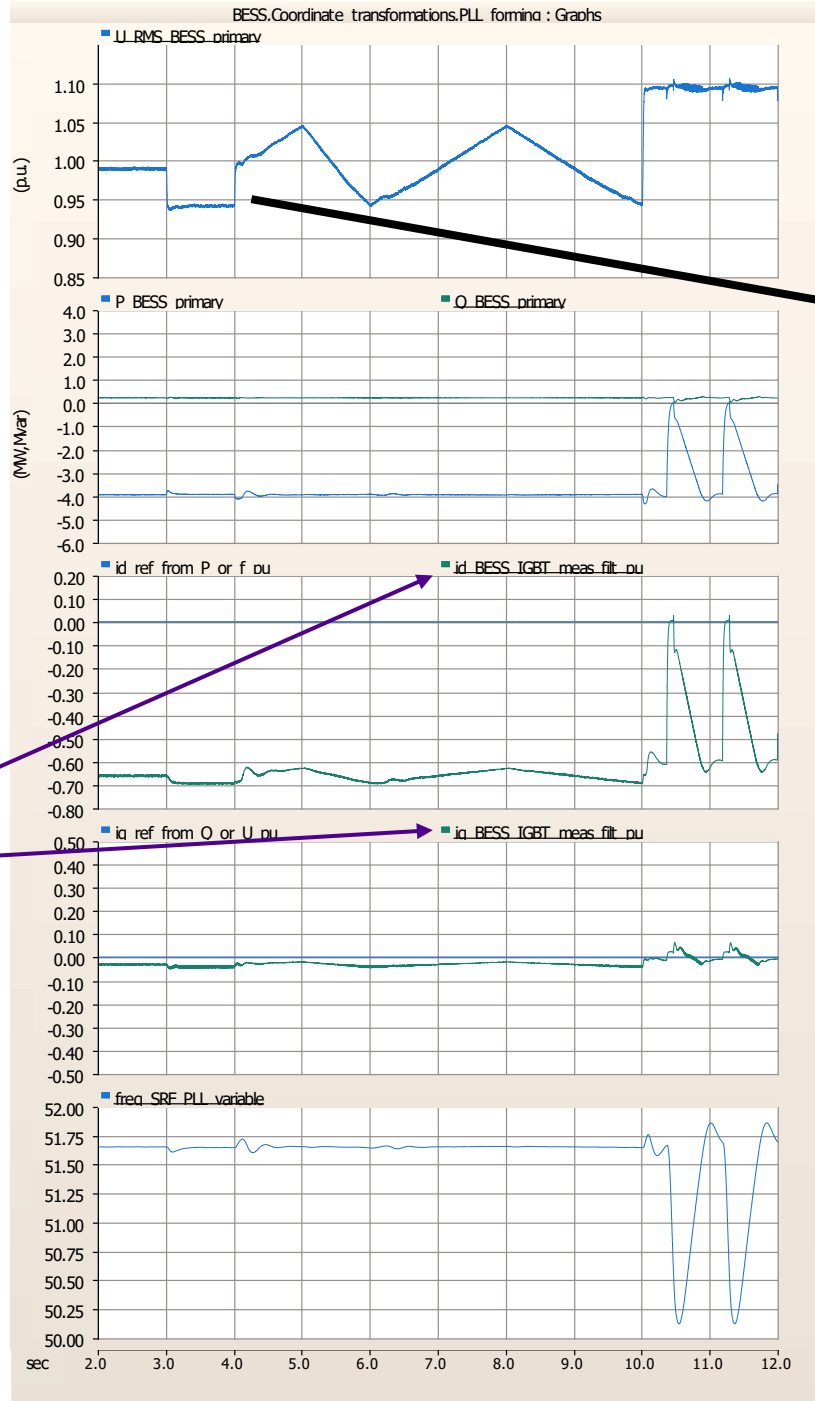
# BESS

Jännite

Päto- ja loisteho

Mitatut id- ja iq-virrat

Taajuusreferenssi BESS:n signaaligeneraattorilta



Jännite

# PV 1

Ylijännitesuojaus aktivoituu kaksi kertaa

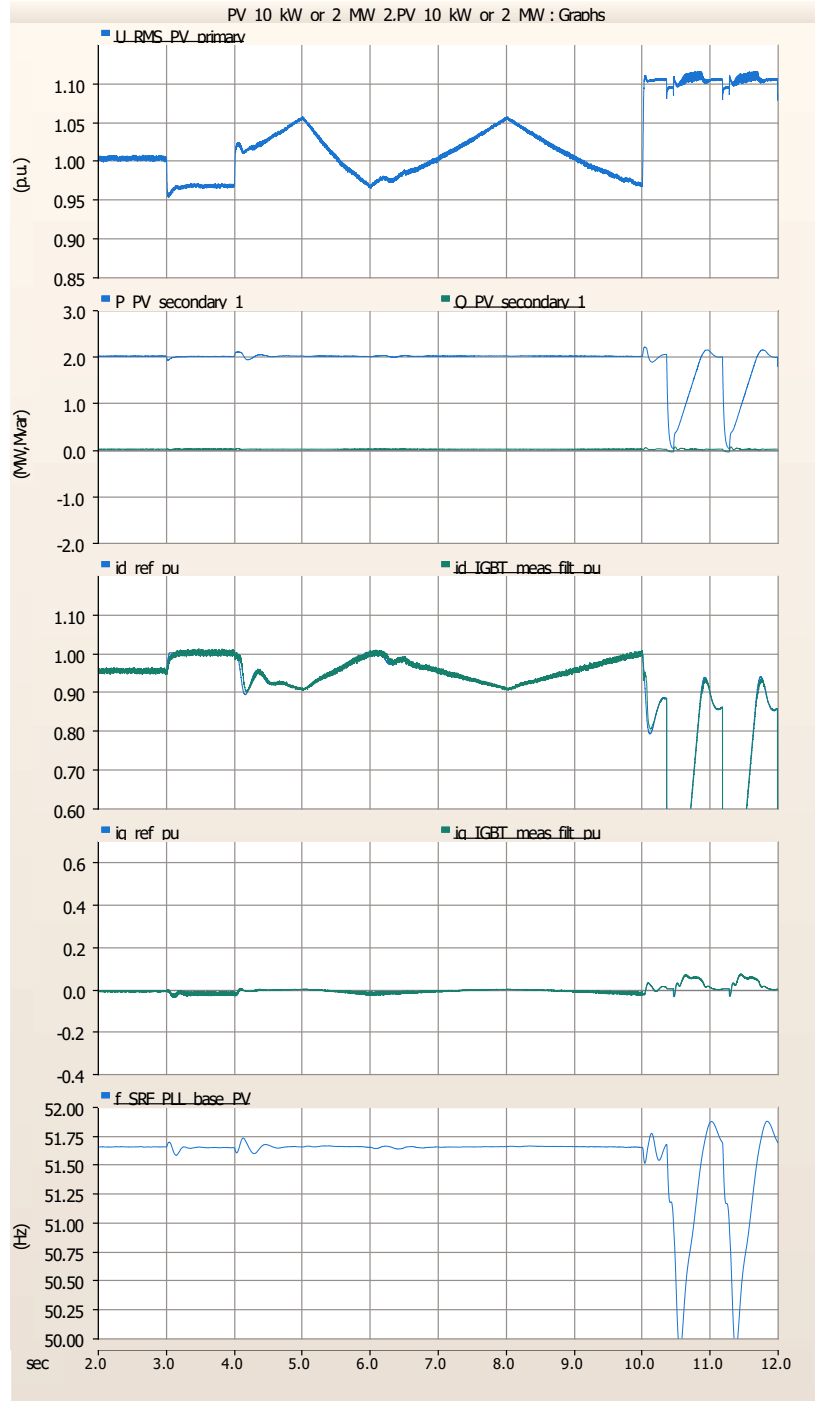
Päto- ja loisteho

Pientä päto- ja loistehon värähtelyä

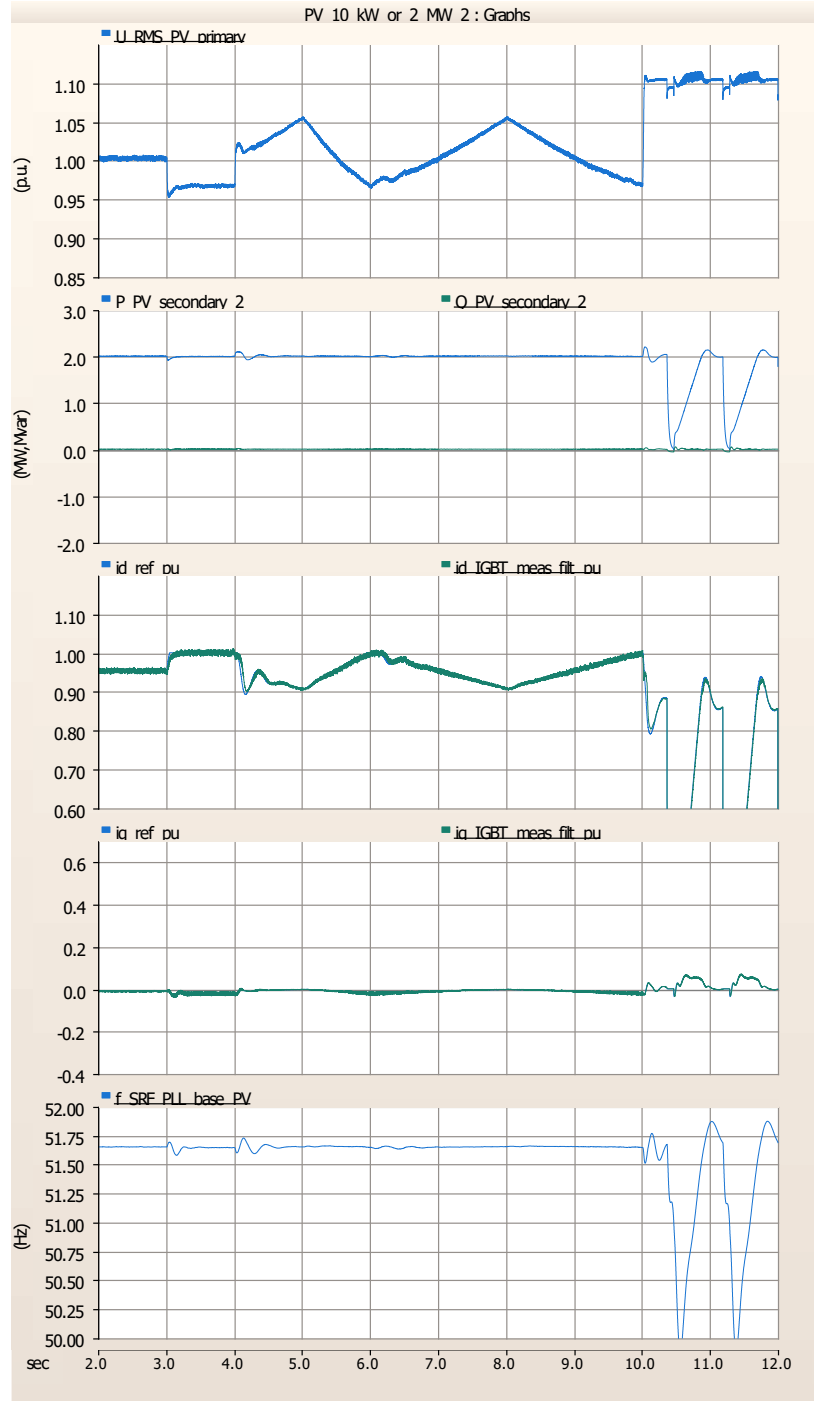
Referenssi- ja mitatut id- ja iq-virrat

Mitattu taajuus (PLL)

# PV 1



# PV 2



Jännite

Päto- ja loisteho

Referenssi- ja mitatut id- ja iq- virrat

Mitattu taajuus (PLL)

# E: Kahden lähekkäin olevan PV:n osallistuminen jännitteensäätöön

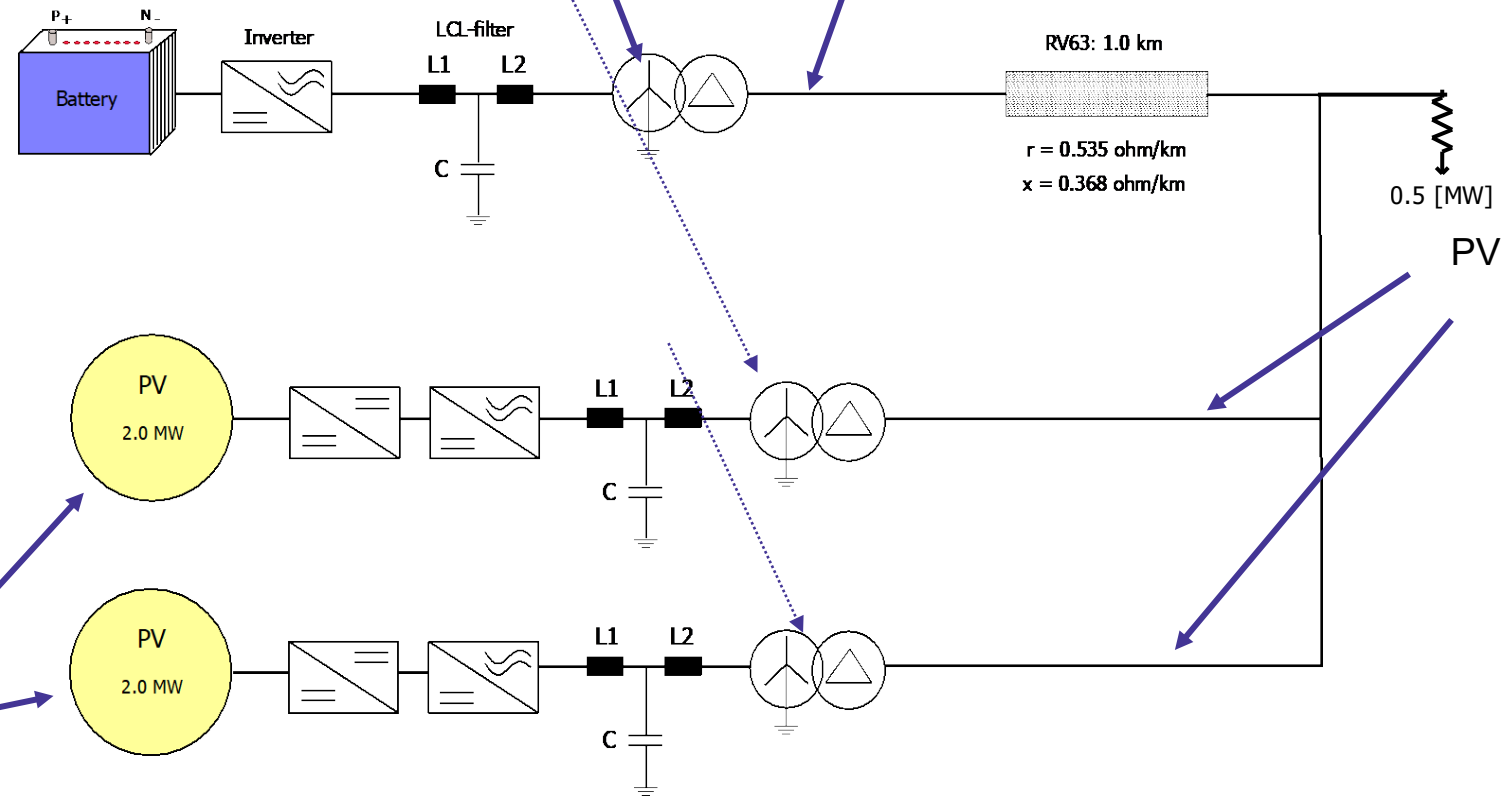
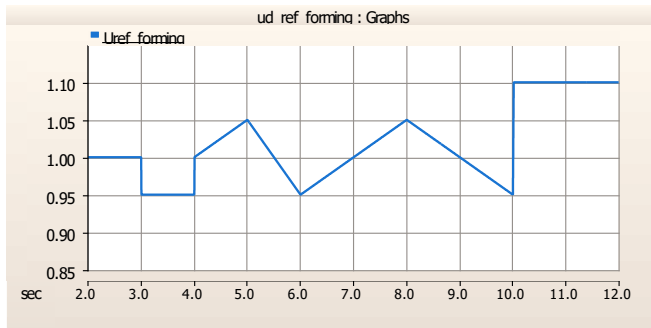
## 1. Perustilanne

Muuntajien hajareaktanssi 0.05 p.u.

BESS:n jännitteensäätö

BESS: 5.0 MVA

Jännitteen ohjearvo muuttuu ajan funktiona



PV:n jännitteensäätö

- Identtiset säätöparametrit
- Jännite- ja taajuussuojaukset ovat aktivoituneina

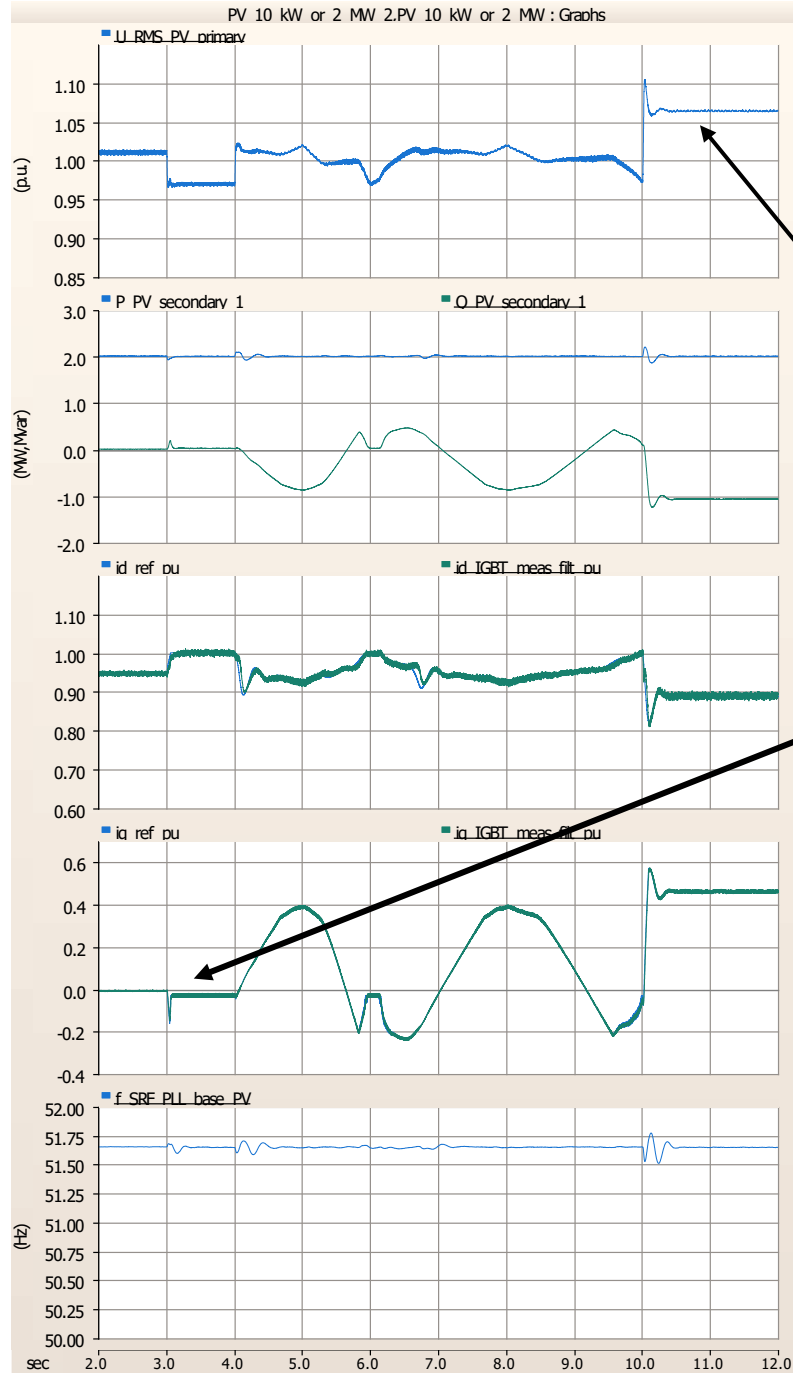
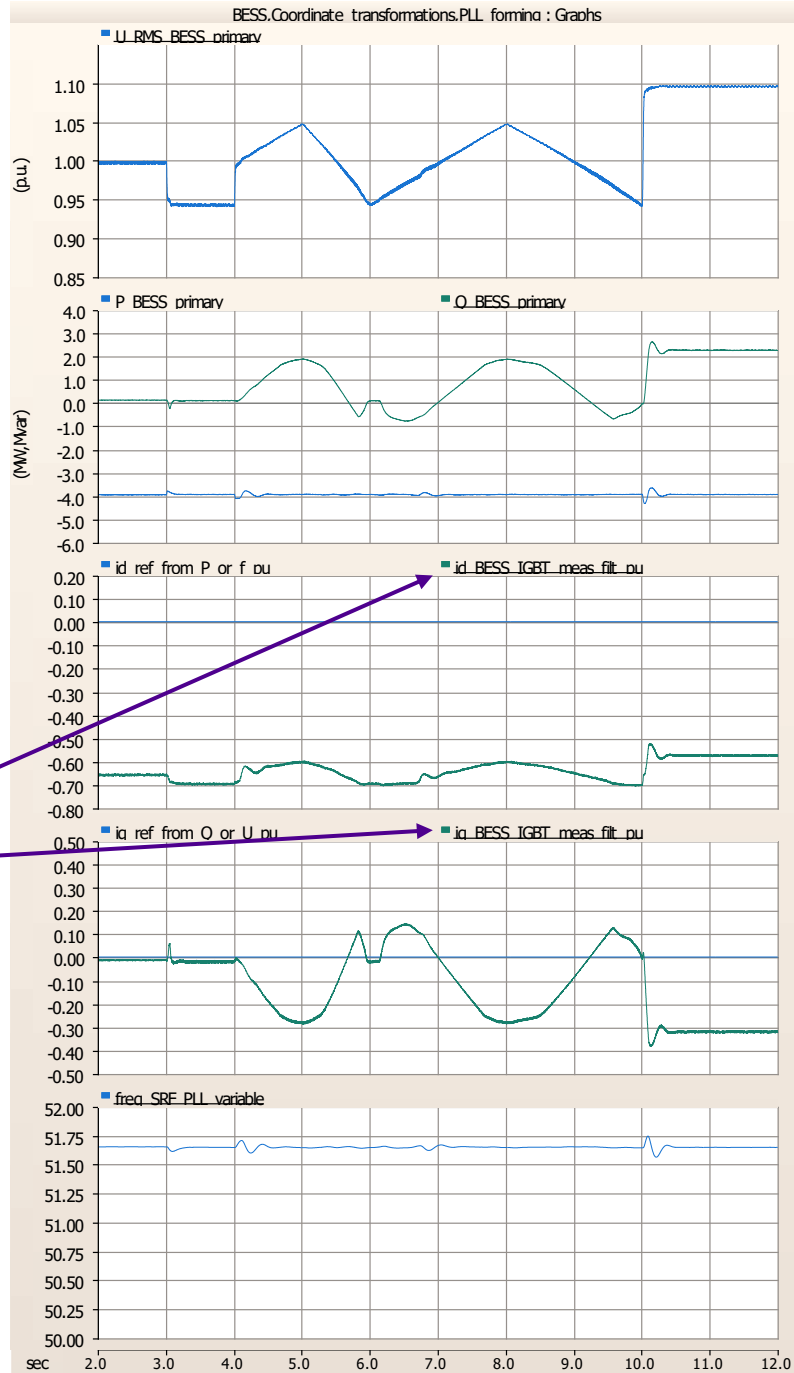
# BESS

Jännite

Päto- ja loisteho

Mitatut id- ja iq-virrat

Taajuusreferenssi BESS:n signaaligeneraattorilta



Jännite

# PV 1

Ylijännitesuojaus ei aktivoidu, koska jännite pysyy alle 1.1 p.u.:n PV:n osallistuessa jännitteensäätöön

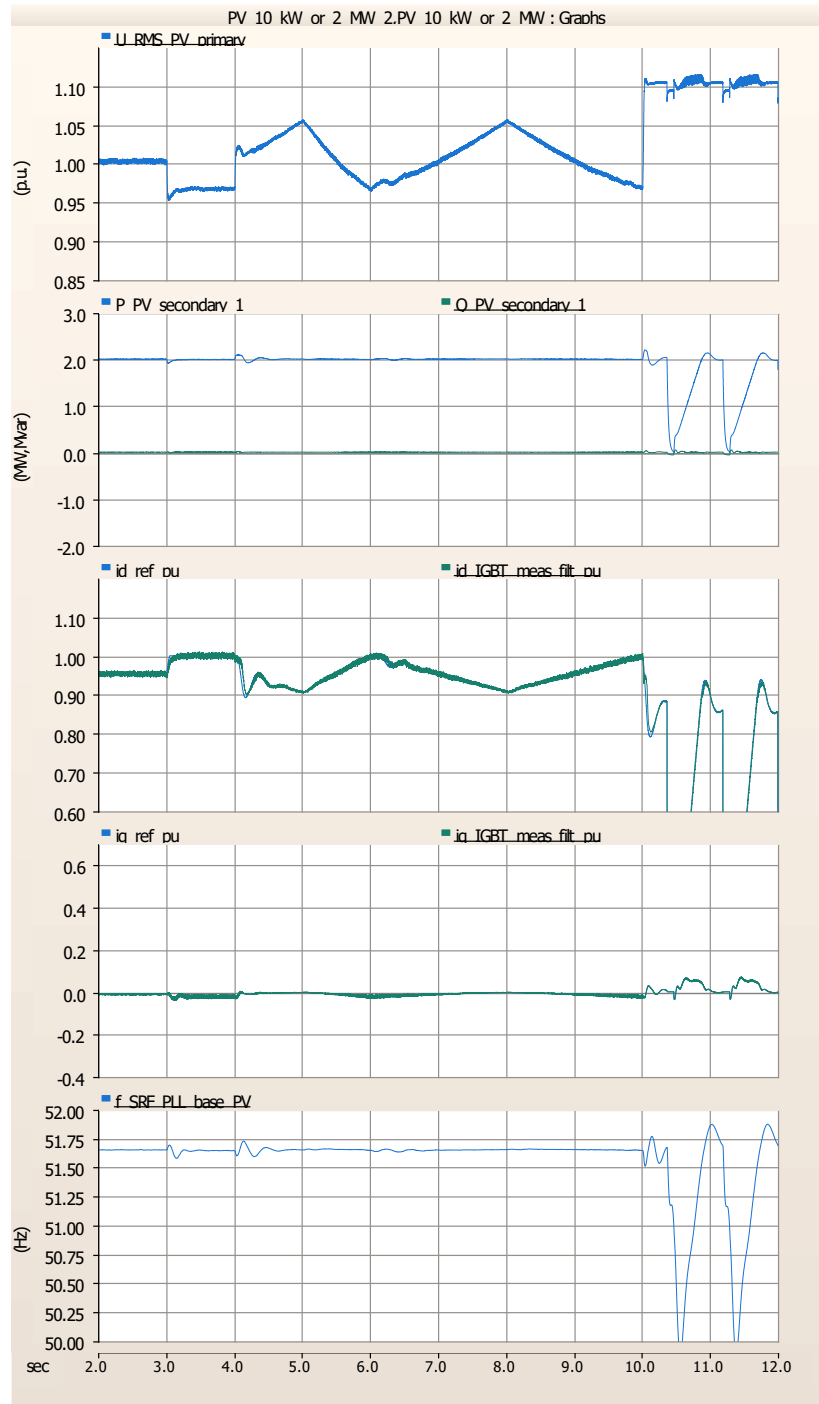
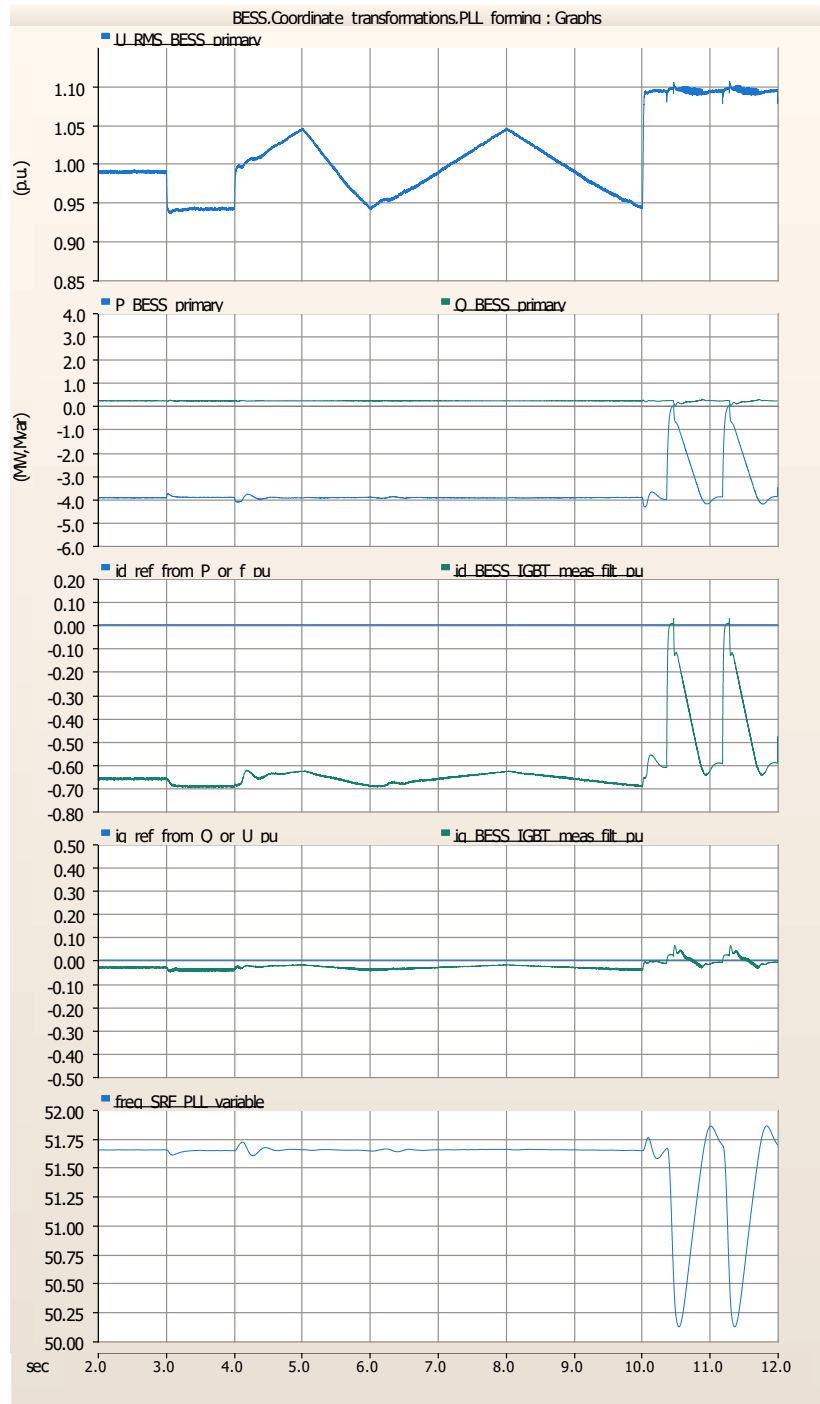
Jännitteensäätö kytkeytyy päälle: t = 3.0 s

Referenssi- ja mitatut id- ja iq-virrat

Mitattu taajuus (PLL)

# BESS

Vertailu edelliseen,  
jossa ei ollut  
jännitteensäätöä



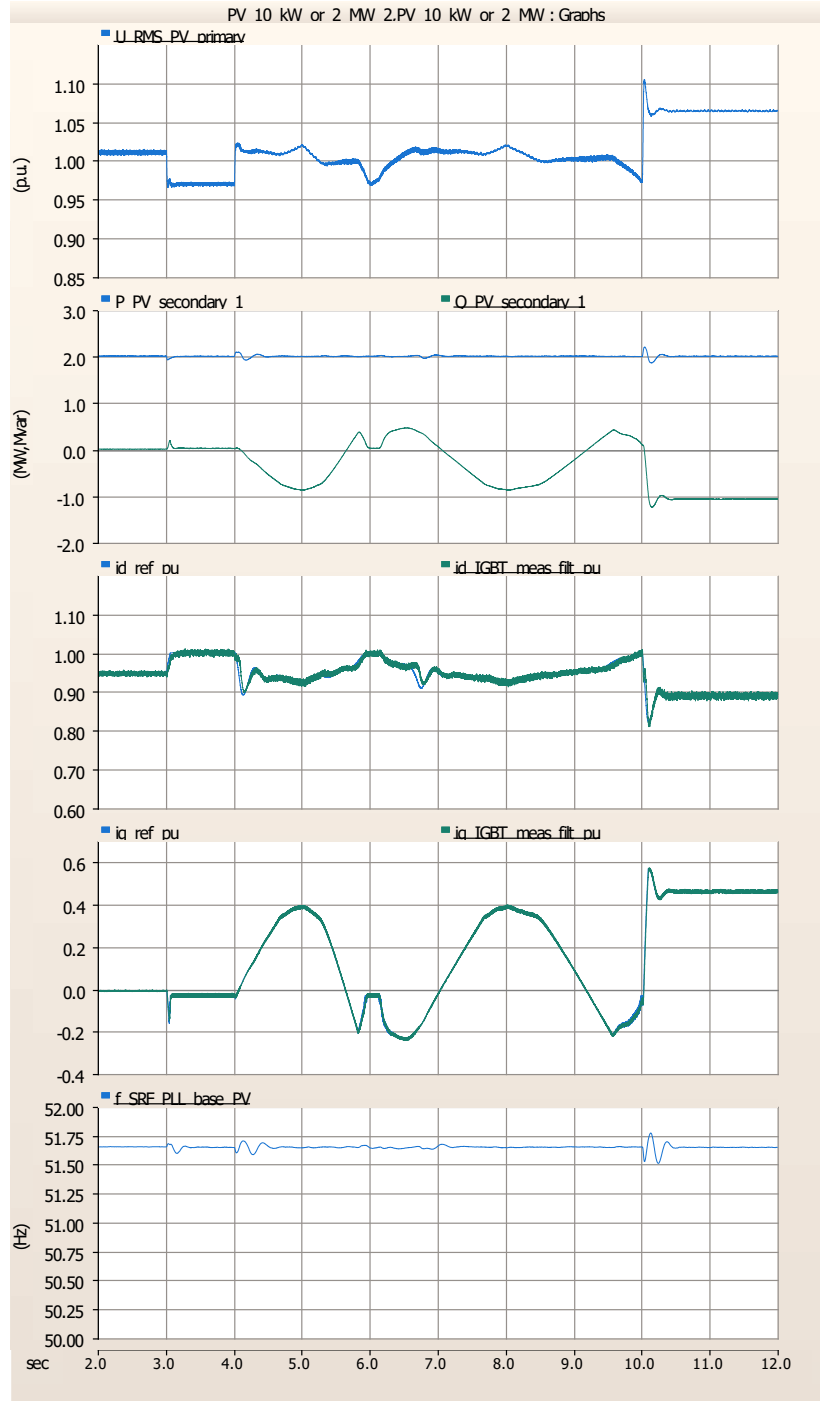
Jännite PV 1

Päto- ja loisteho

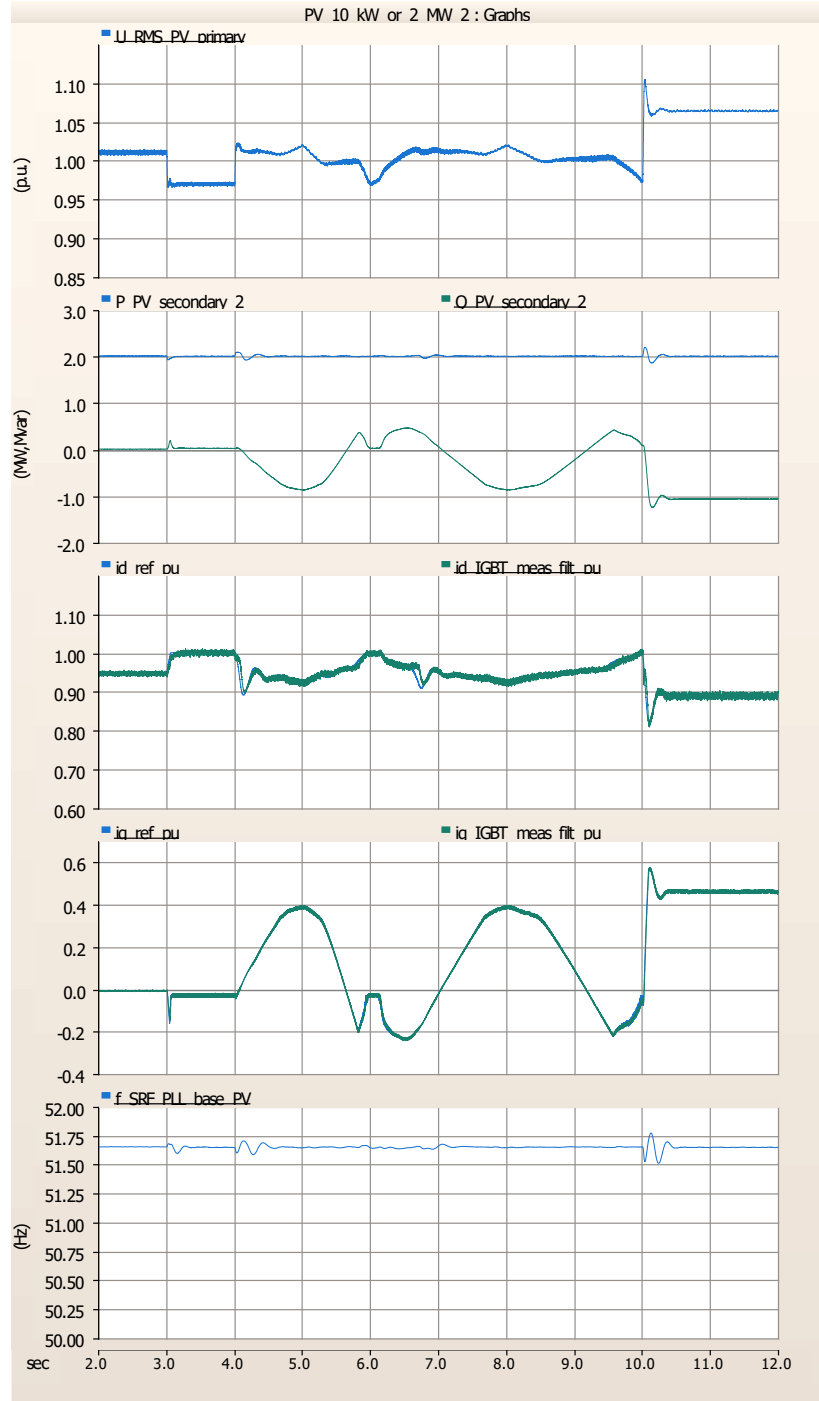
Referenssi- ja mitatut id- ja iq- virrat

Mitattu taajuus (PLL)

# PV 1



# PV 2



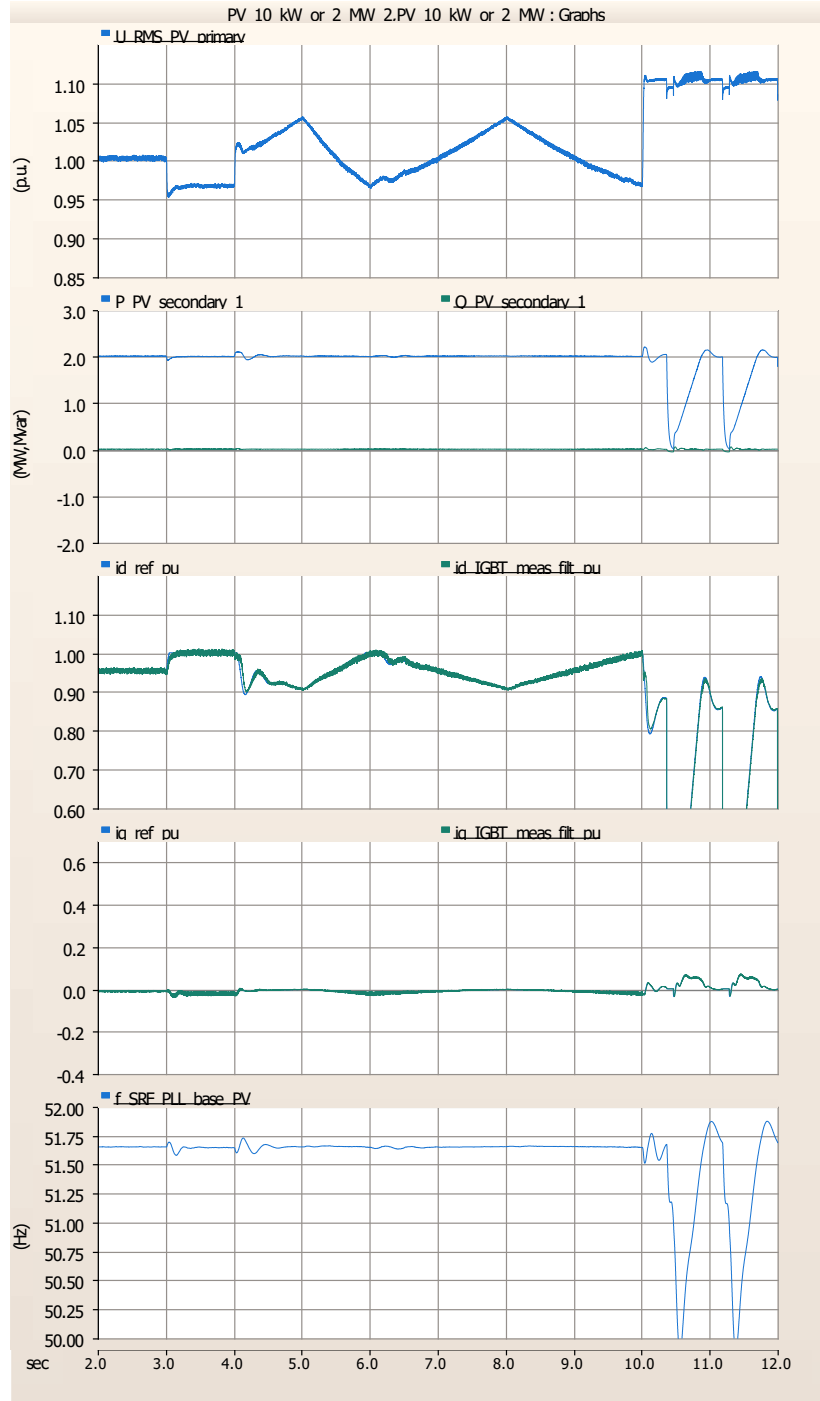
Jännite

Päto- ja loisteho

Referenssi- ja mitatut id- ja iq- virrat

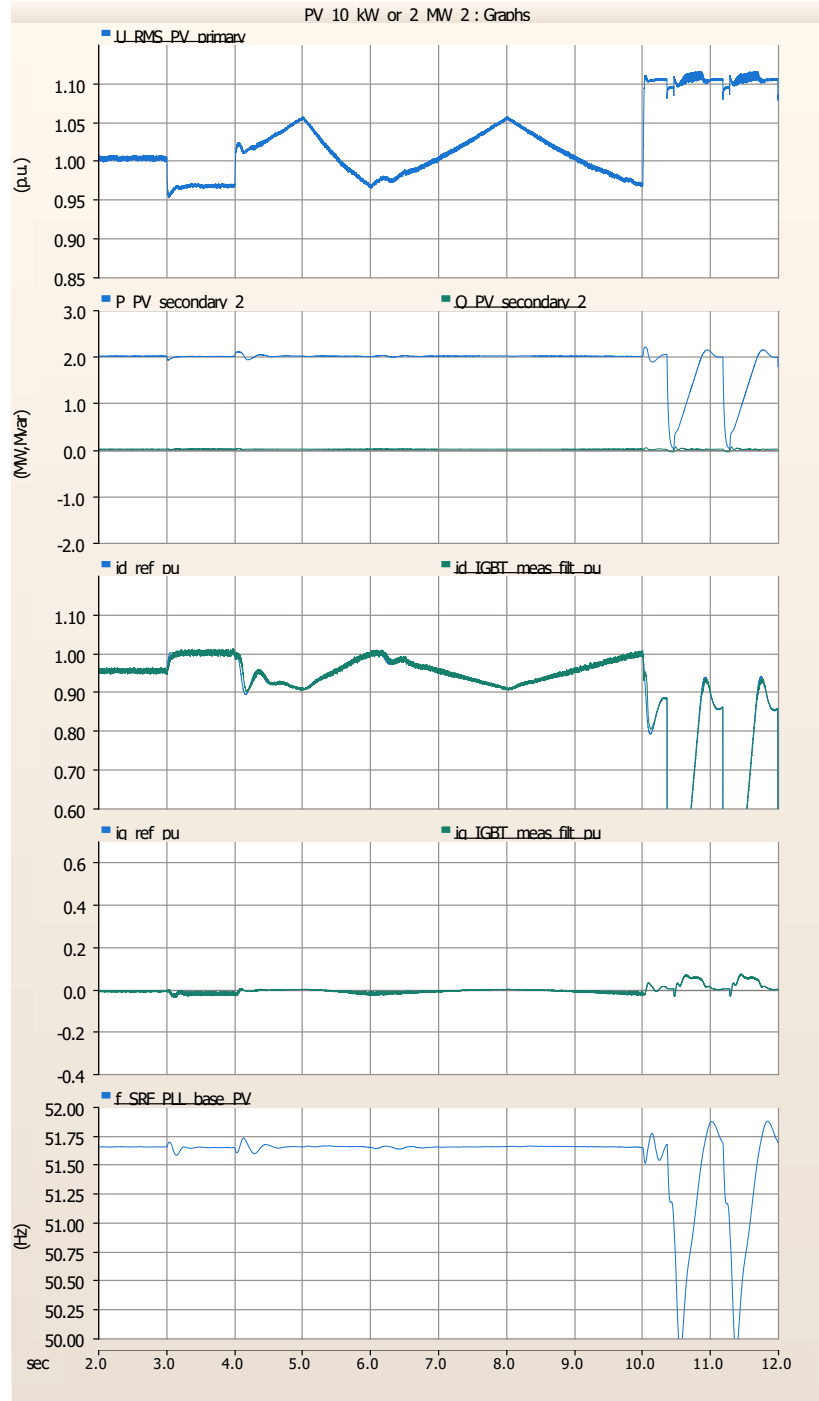
Mitattu taajuus (PLL)

# PV 1



Vertailu edelliseen, jossa oli jännitteensäätö

# PV 2



Jännite

Päto- ja loisteho

Referenssi- ja mitatut id- ja iq- virrat

Mitattu taajuus (PLL)

# Johtopäätökset: 1. Perustilanne

- Oletettuja tuloksia
- Malli on ”oikein”, koska kaksi identtistä PV:tä säätävät samoin → lähes samat vasteet
- PV:n jännitteensäätö erityisesti askelmaisissa jännitemuutoksissa aiheuttaa (vain) pientä värähtelyä PV:n pätötehoon
- PV:n jännitteensäätö pitää tässä jännitteen alle 1.1 p.u.:n → ei PV:n irtikytkentöjä



## 2. Taajuusohjeen muuttuminen jänniteohjeen lisäksi

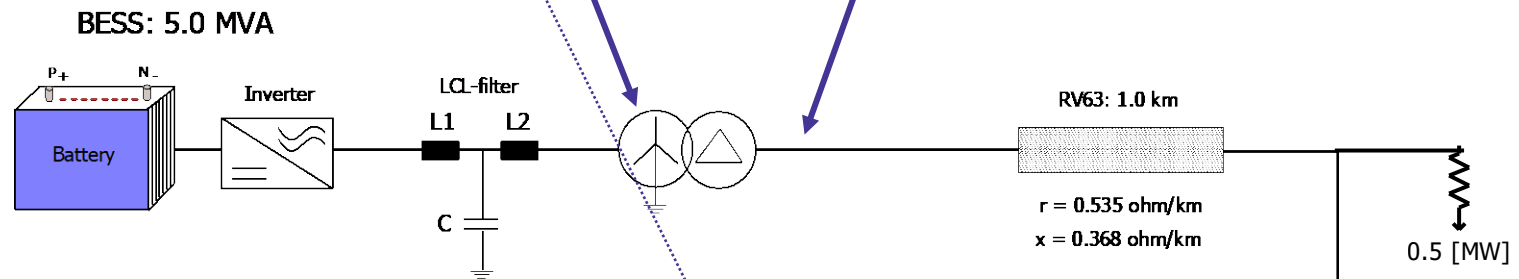
Jännitteen ohjearvo muuttuu ajan funktiona

Myös taajuusohje muuttuu ajan funktiona

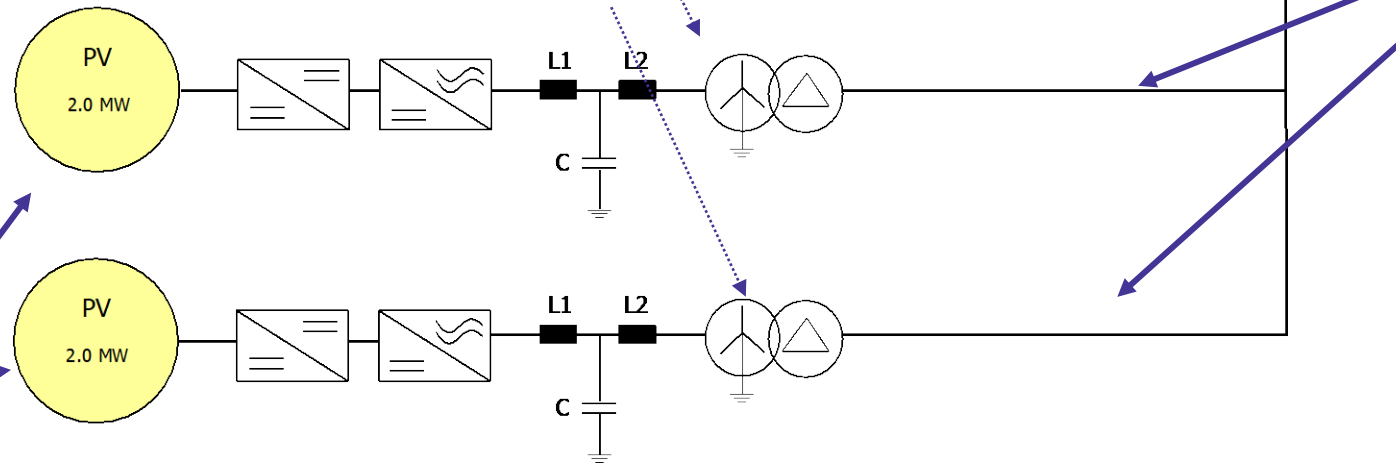
- Identtiset säätöparametrit
- Jännite- ja taajuussuojaukset ovat aktivoituneina

Muuntajien hajareaktanssi 0.05 p.u.

BESS:n jänniteensäätö



PV:n jänniteensäätö

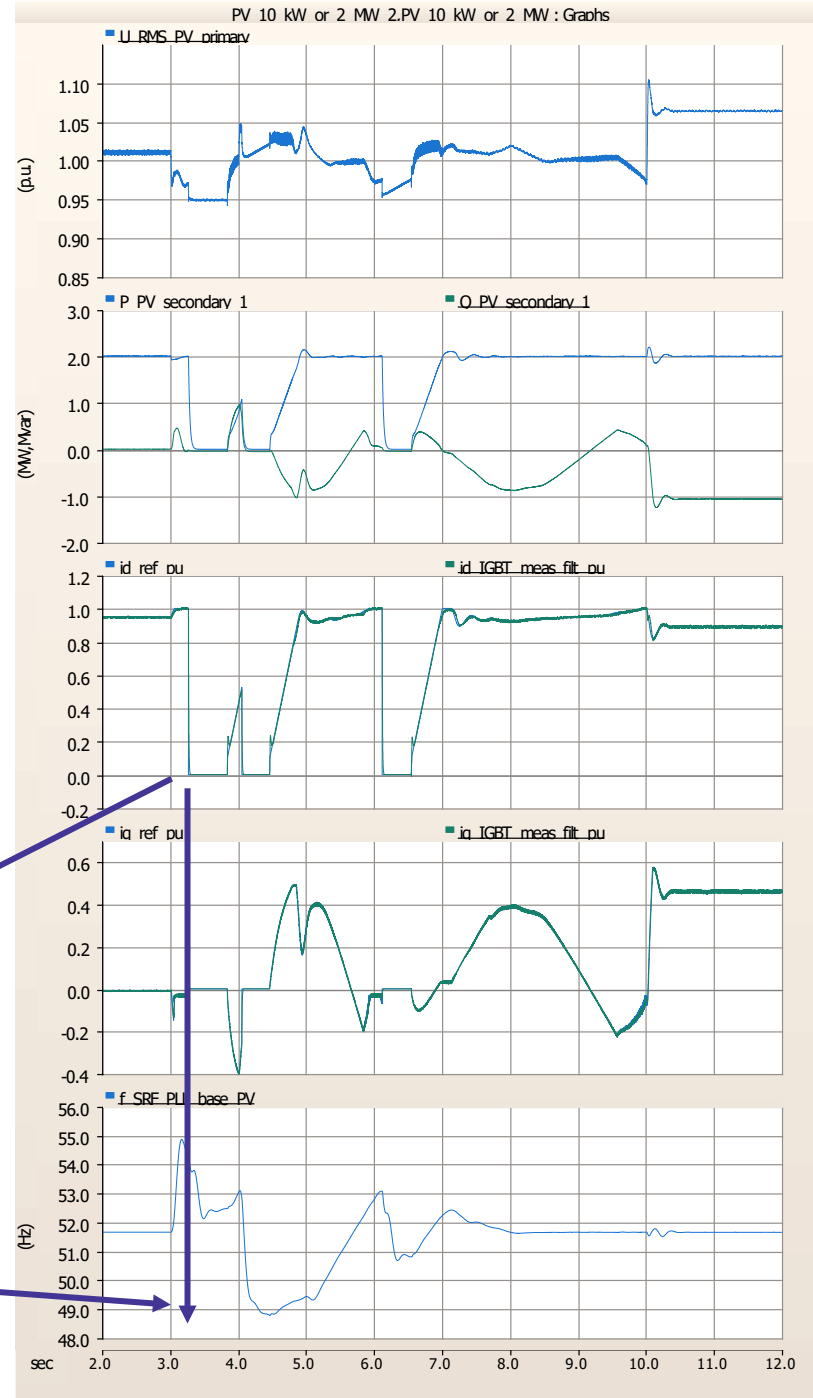
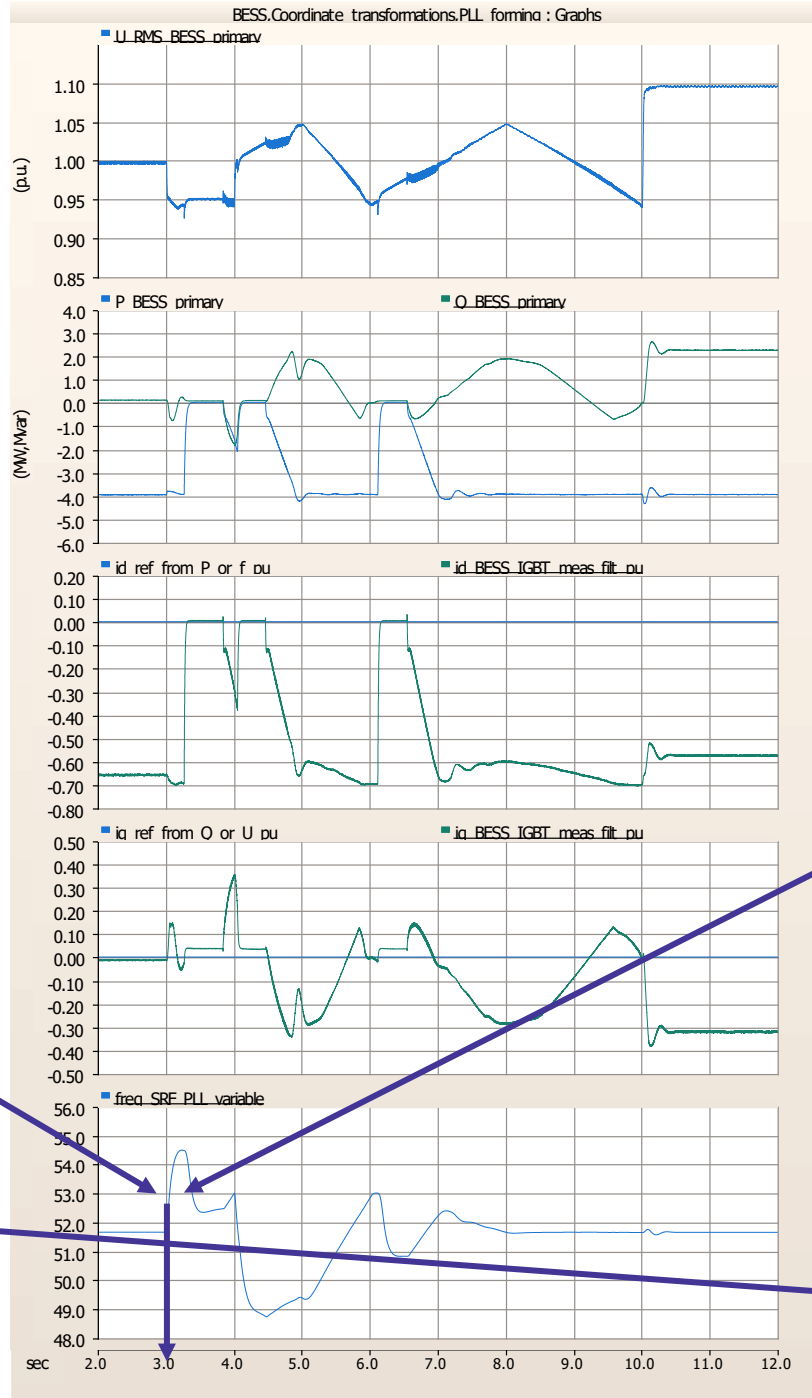


➤ Viivästetty ylitaajuusraja:  
1.05 p.u. → 52.5 Hz

➤ Viive suojauksen aktivoitumiseen:  
200 ms

➤ PV:t irtikytketyvät ylitaajuuden johdosta kaksi kertaa

Noin 3 sekunnin kohdalla mikroverkon taajuus nousee yli 52.5 Hz → Tästä 200 ms:n jälkeen PV irtikytketty (suojauksen viive on 200 ms taajuuden pysyessä ylitaajuusalueella)



Jännite

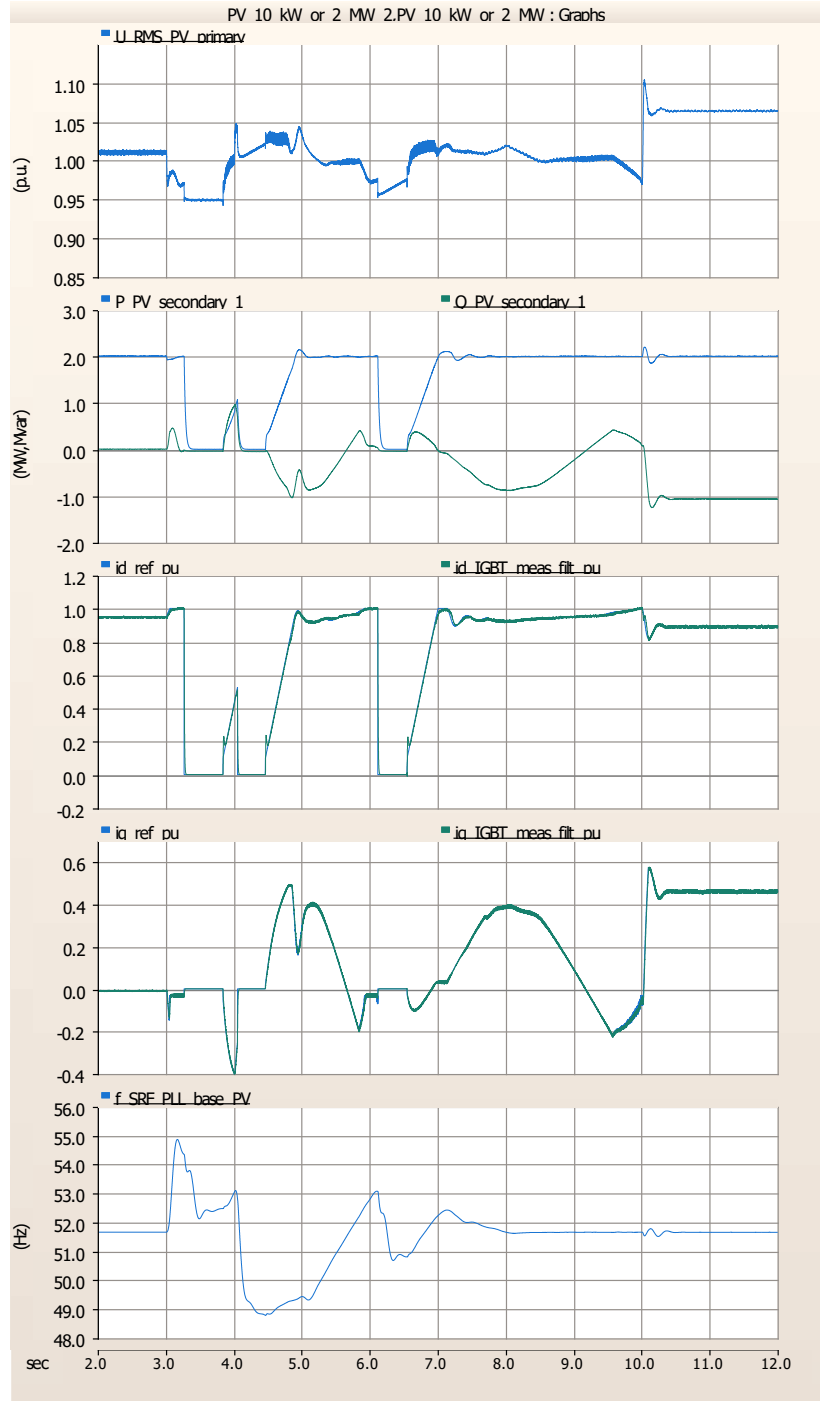
PV 1

Päto- ja loisteho

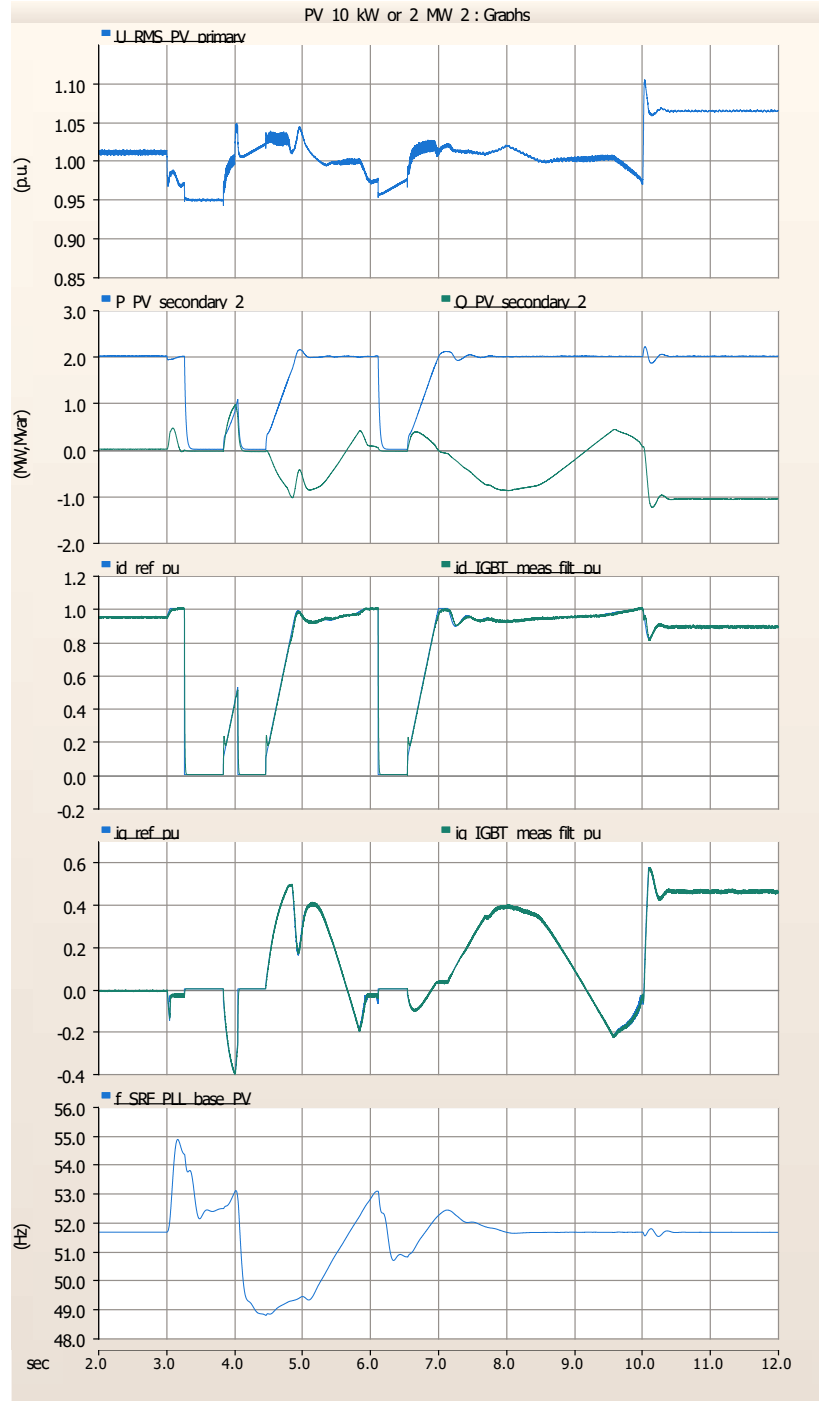
Referenssi- ja mitatut id- ja iq- virrat

Mitattu taajuus (PLL)

# PV 1



# PV 2



Jännite

Päto- ja loisteho

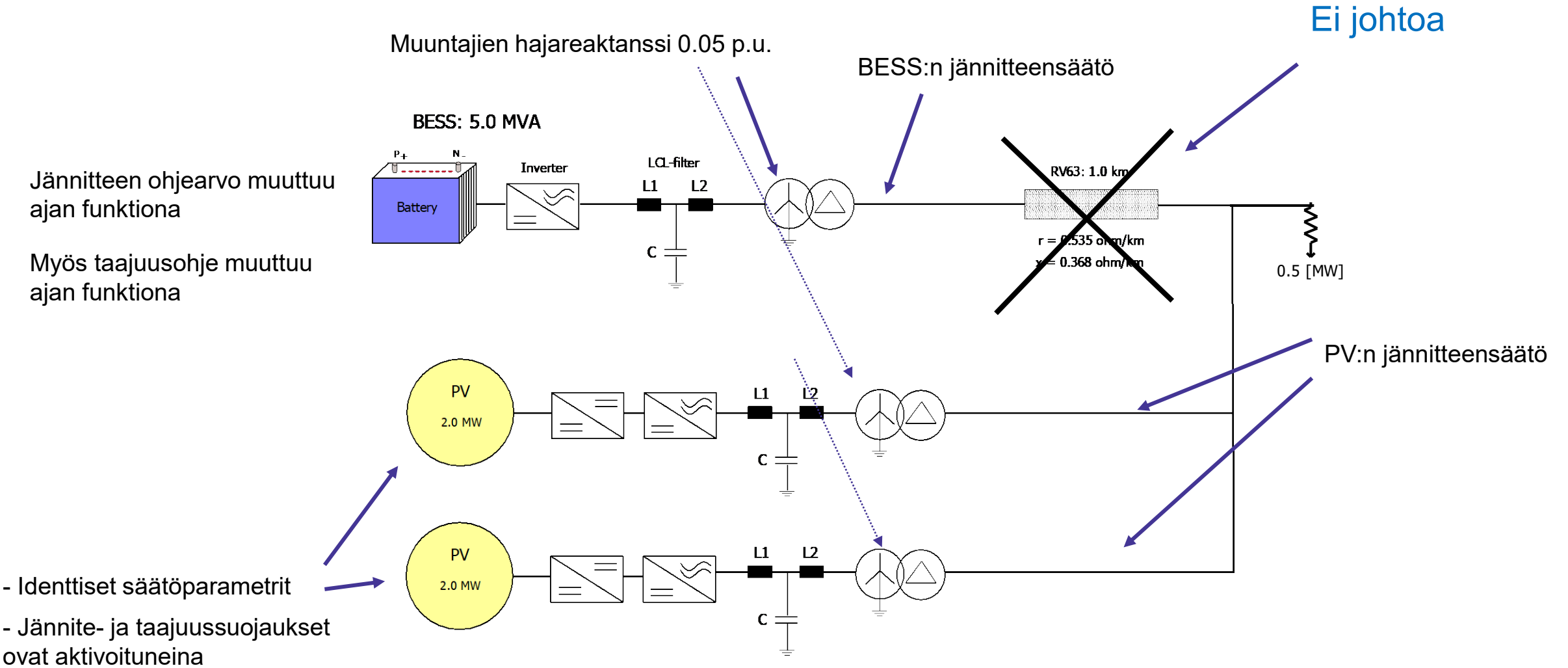
Referenssi- ja mitatut id- ja iq- virrat

Mitattu taajuus (PLL)

## Johtopäätökset: 2. Taajuusohjeen muuttuminen jänniteohjeen lisäksi

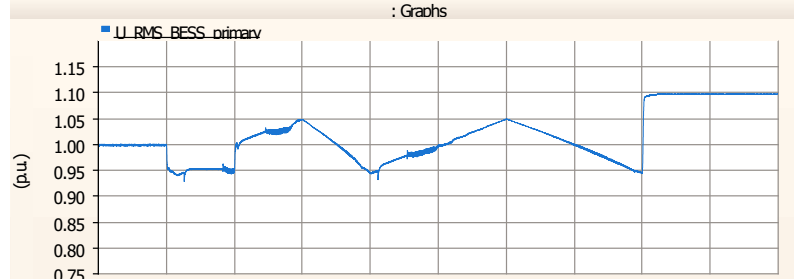
- Kun ollaan suojausrajojen sisällä, niin PV:t pystyvät pitämään hyvin pätötehon vakiona ja säätämään jännitettä, vaikka verkon jännite ja taajuus muuttuvat
- Suojauksen toiminta ok → PV:t irtikytkeytyvät kaksi kertaa ylitaajuuden johdosta
- Kun (tässä esimerkissä) mitattu taajuus on suojausrajojen sisällä, niin PV:t kytkeytyvät verkkoon, jolloin:
  - pätöteho asettuu nopeasti arvoon, joka oli ennen irtikytkeytymistä
  - molemmat PV:t pystyvät säätämään jännitettä hyvin...
    - ...tai ehkä tarkemmin/realistisemmin: loistehot eivät värähtele vaan seuraavat hyvin referenssiarvojaan

### 3. Ei johtoa (impedanssia) BESS:n ja PV:n välillä

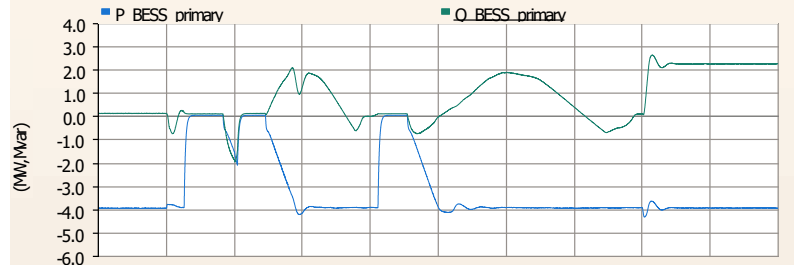


# BESS

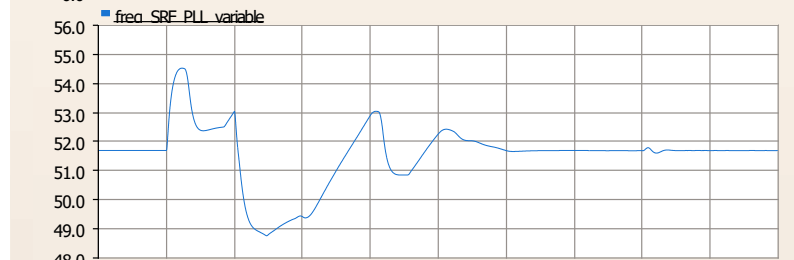
Jännite



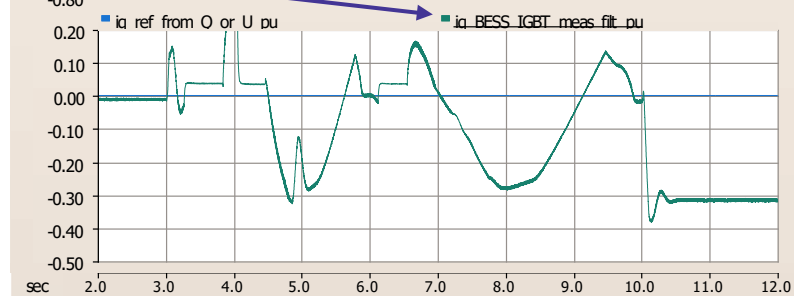
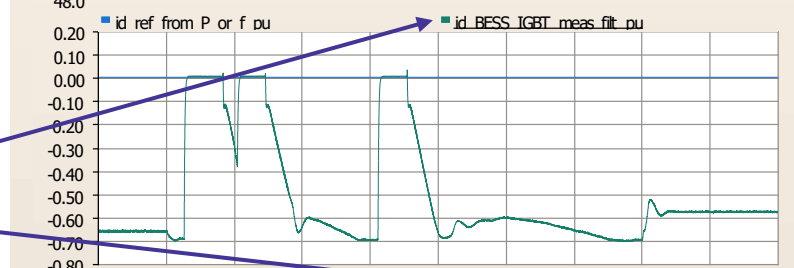
Päto- ja loisteho



Taajuusreferenssi BESS:n signaaligeneraattorilta

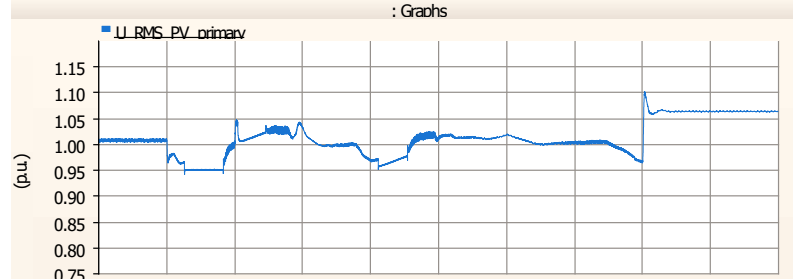


Mitatut id- ja iq-virrat

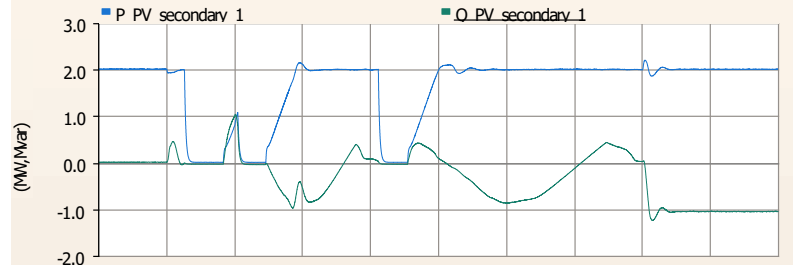


# PV 1

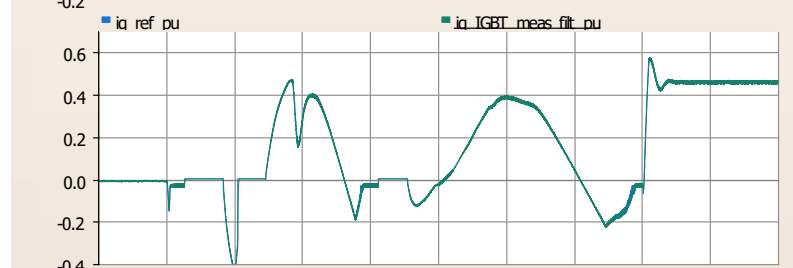
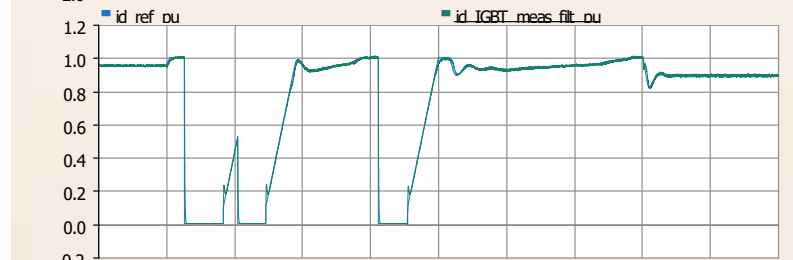
Jännite



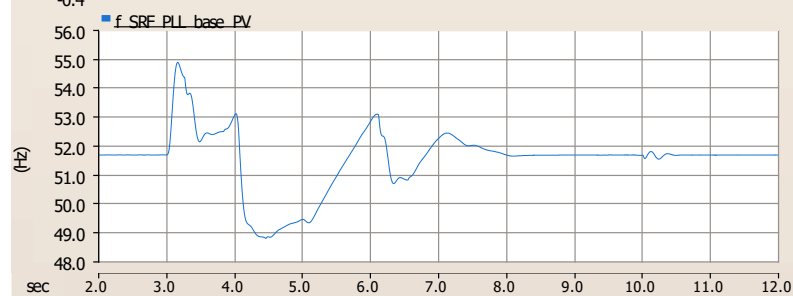
Päto- ja loisteho



Referenssi- ja mitatut id- ja iq-virrat



Mitattu taajuus (PLL)

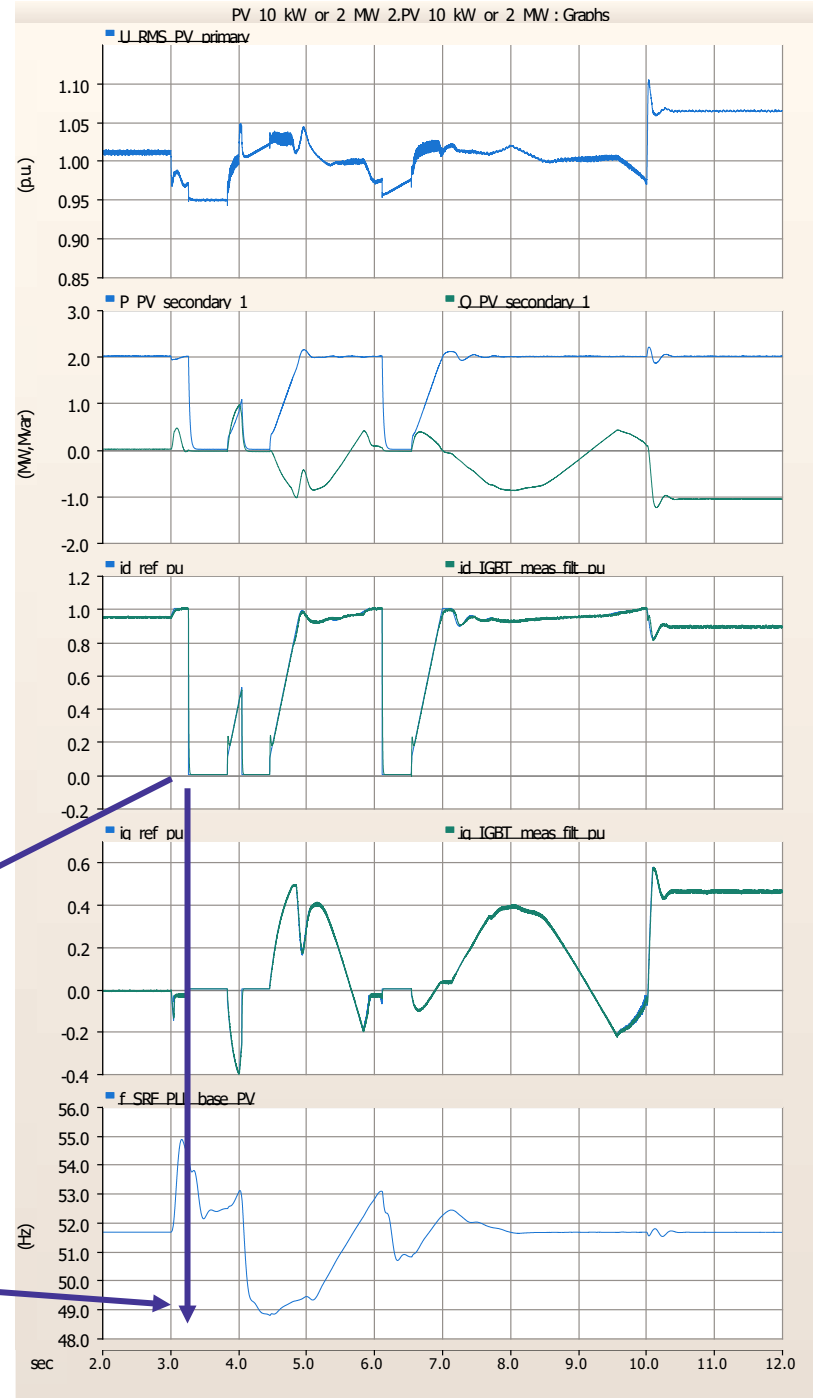
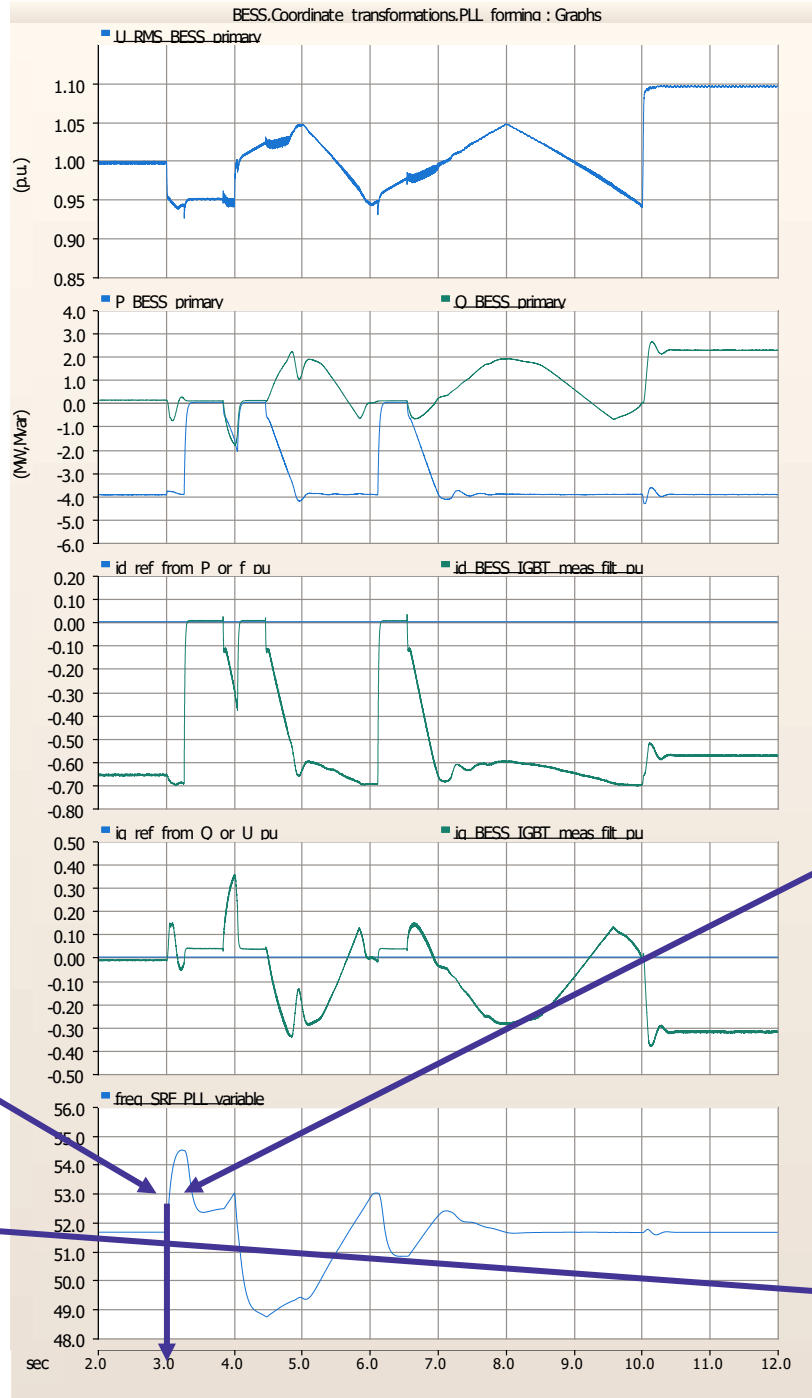


➤ Viivästetty ylitaajuusraja:  
1.05 p.u. → 52.5 Hz

➤ Viive suojauksen aktivoitumiseen:  
200 ms

➤ PV:t irtikytketyvät ylitaajuuden johdosta kaksi kertaa

Noin 3 sekunnin kohdalla mikroverkon taajuus nousee yli 52.5 Hz → Tästä 200 ms:n jälkeen PV irtikytketty (suojauksen viive on 200 ms taajuuden pysyessä ylitaajuusalueella)



Jännite

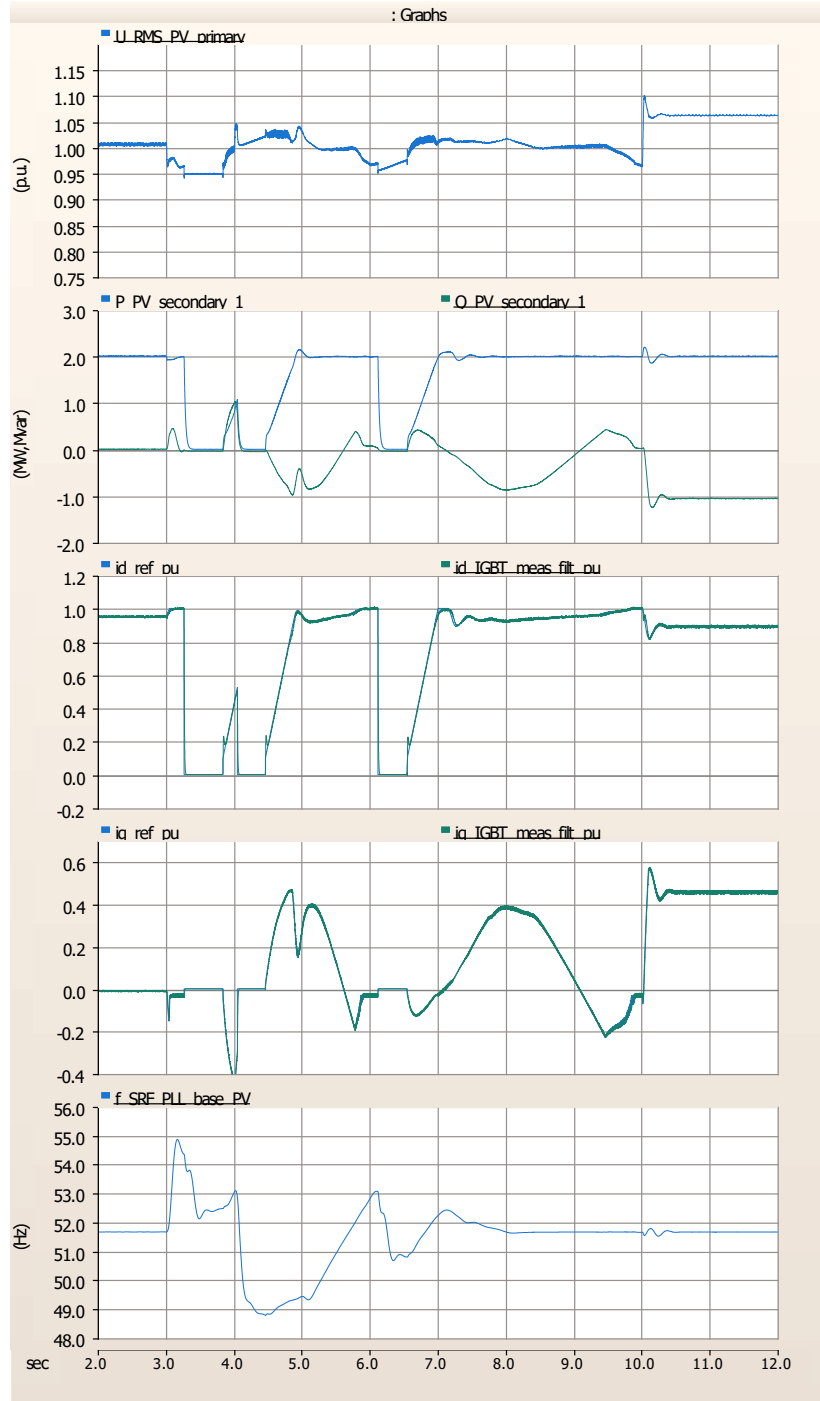
PV 1

Päto- ja loisteho

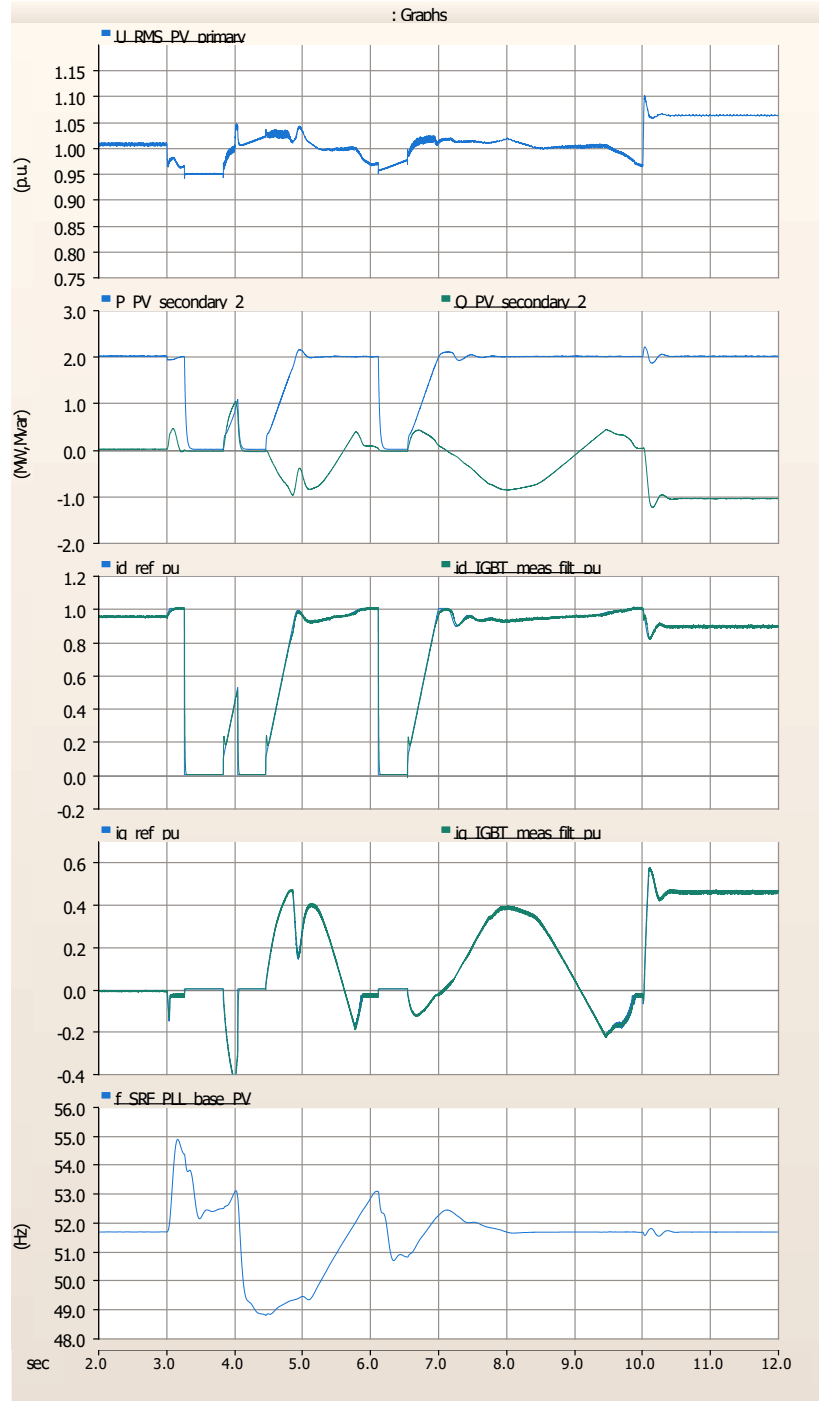
Referenssi- ja mitatut id- ja iq- virrat

Mitattu taajuus (PLL)

# PV 1



# PV 2



Jännite

Päto- ja  
loisteho

Referenssi- ja  
mitatut id- ja iq-  
virrat

Mitattu taajuus  
(PLL)



## Johtopäätökset: 3. Ei johtoa (impedanssia) BESS:n ja PV:n välillä

- Johdon pois ottaminen ei tuonut mainittavia eroja
  - Ei siis vaikuta olevan värähtelyherkempi, vaikka säätävät PV:t ovat sähköisesti lähempänä BESS:iä
  - Ehkä hieman yllättävä tulos

## 4. Lähtökohtaisesti värähtelyherkin tapaus, jossa ei tahtigeneraattoria

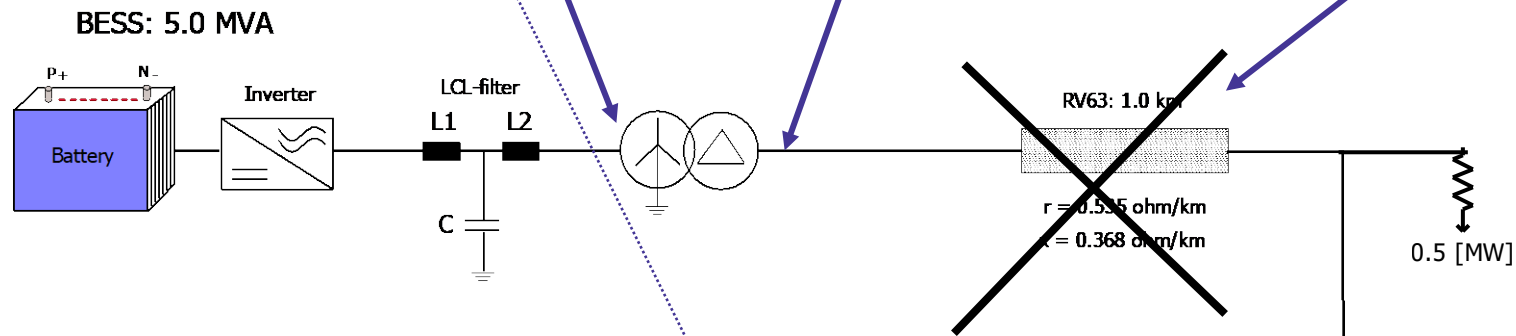
Ei johtoa

Muuntajien hajareaktanssi 0.001 p.u.

BESS:n jännitteensäätö

Jännitteen ohjearvo muuttuu ajan funktiona

Myös taajuusohje muuttuu ajan funktiona

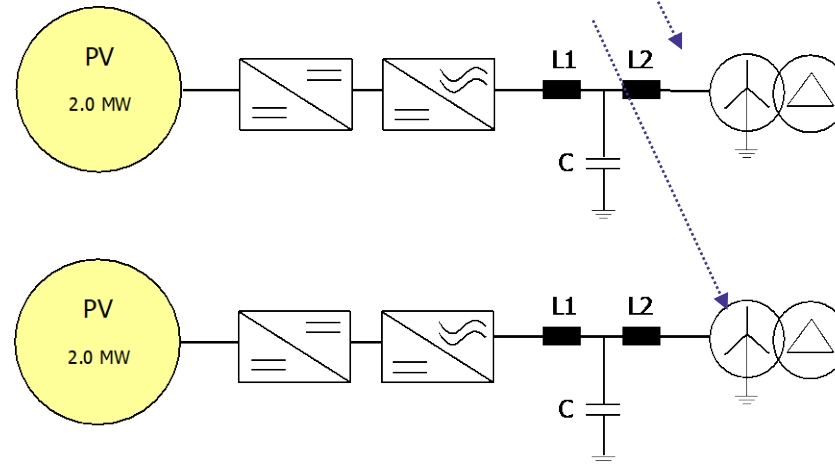


PV:n jännitteensäätö

Nopeampi P- ja Q-säätö

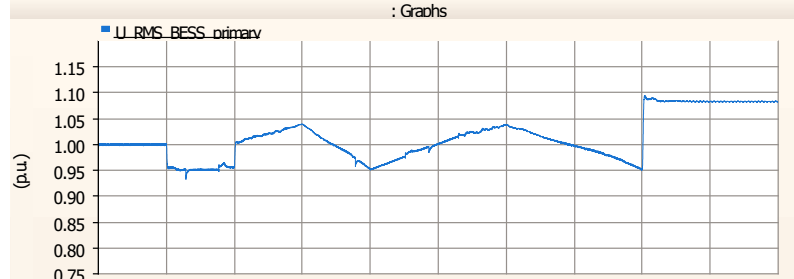
- Jännite- ja taajuussuojaukset ovat aktivoituneina

Hitaampi P- ja Q-säätö

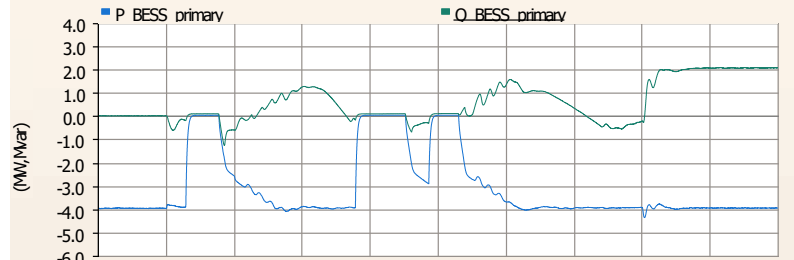


# BESS

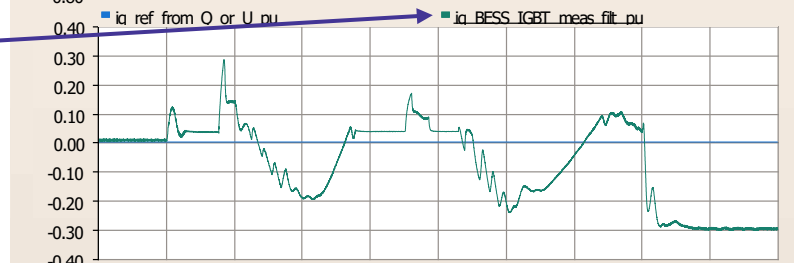
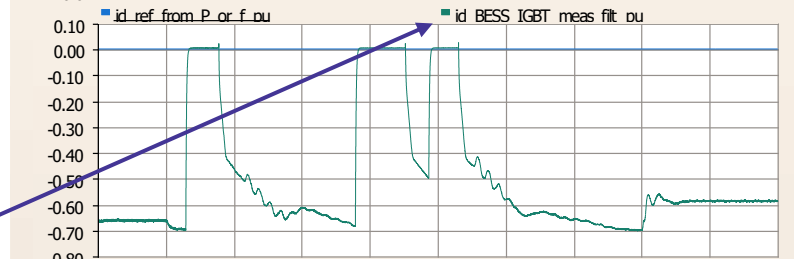
Jännite



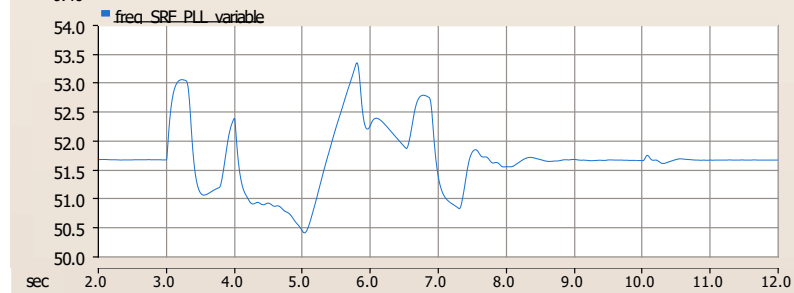
Päto- ja loisteho



Mitatut id- ja iq-virrat

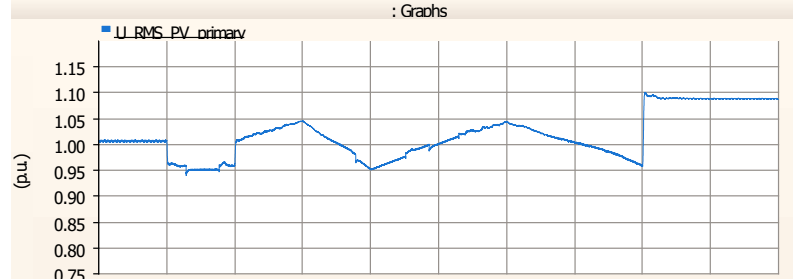


Taajuusreferenssi BESS:n signaaligeneraattorilta

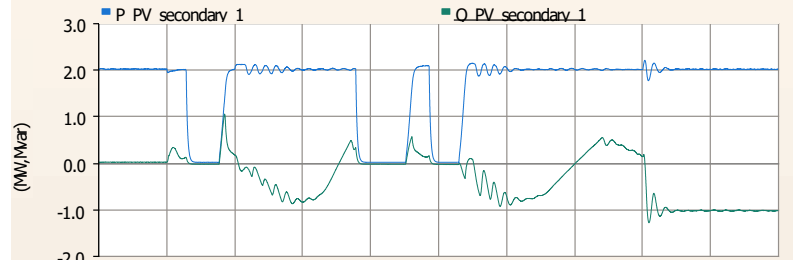


# PV 1

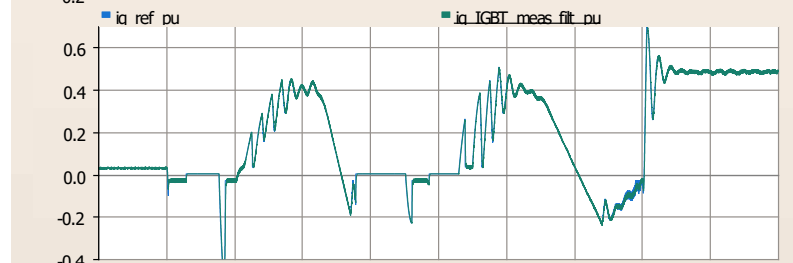
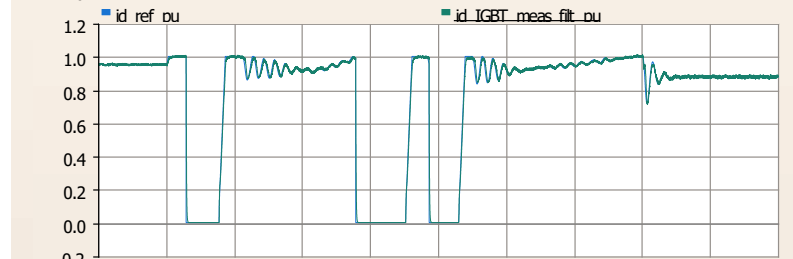
Jännite



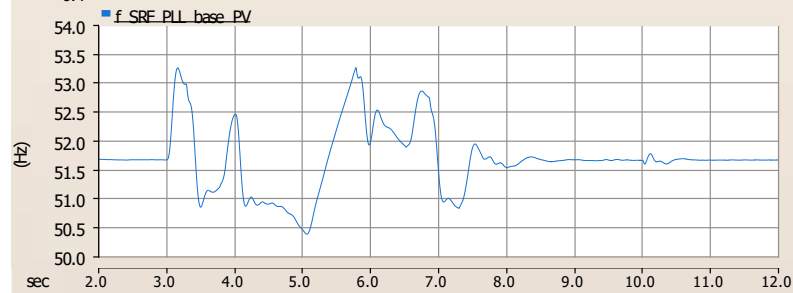
Päto- ja loisteho

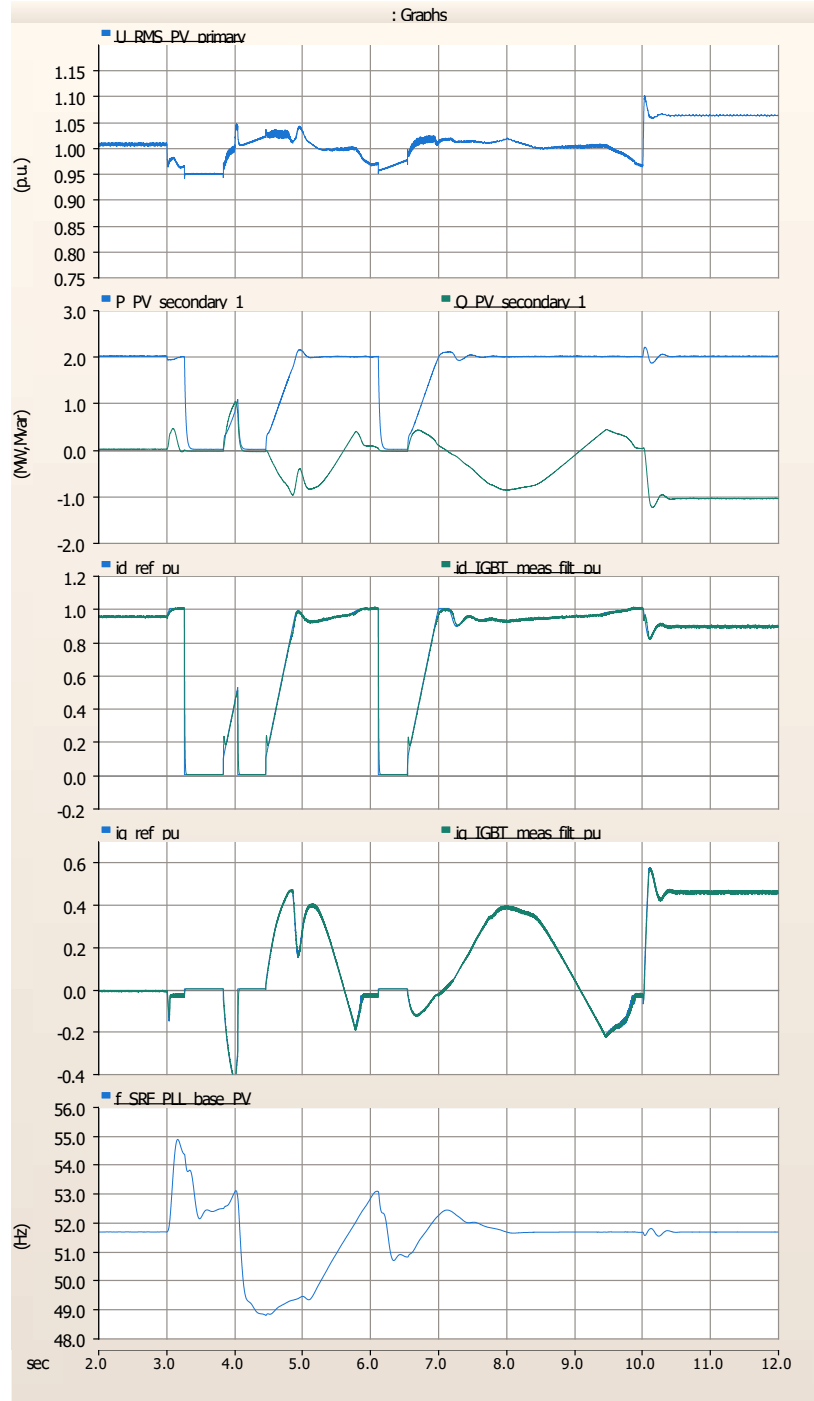
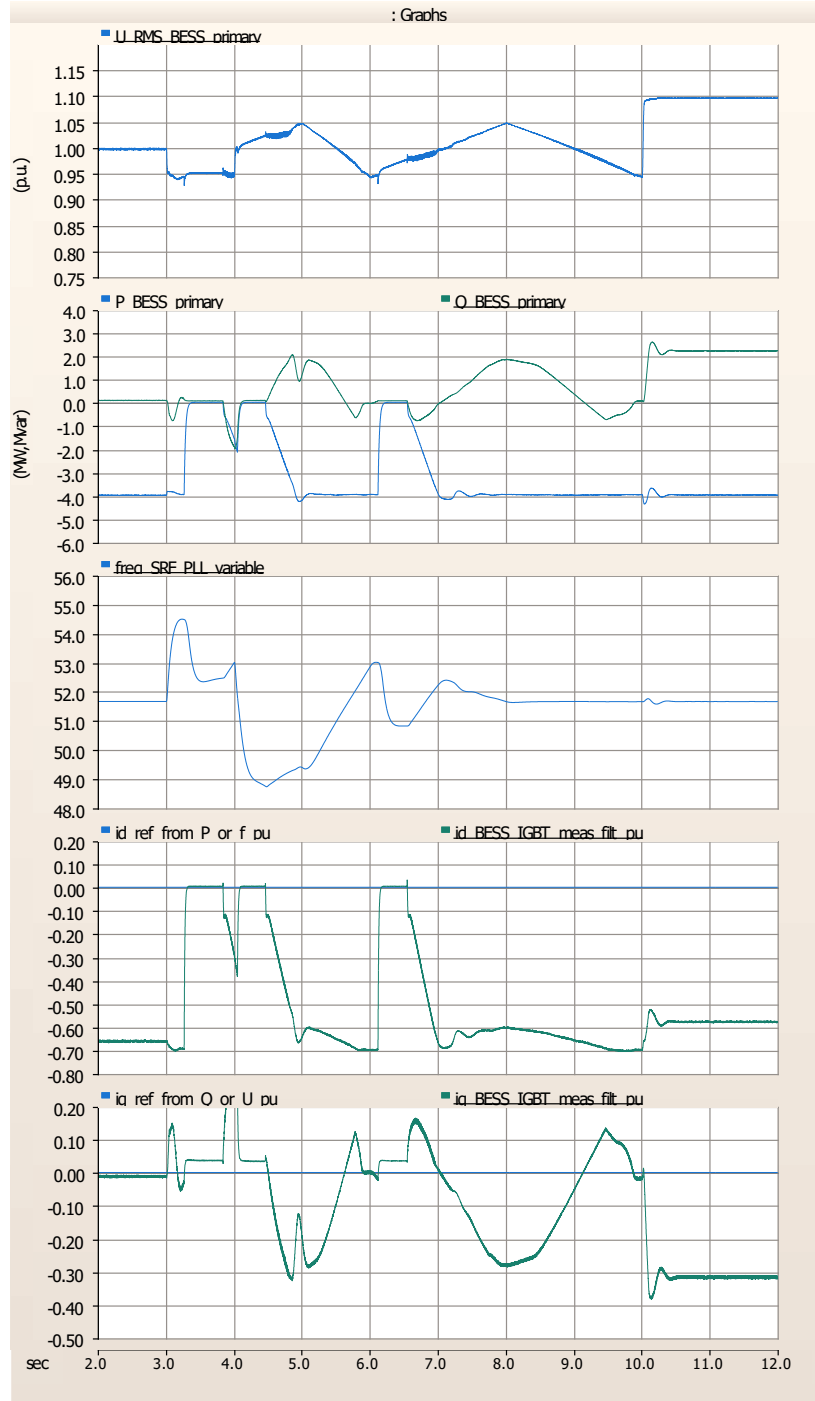


Referenssi- ja mitatut id- ja iq-virrat



Mitattu taajuus (PLL)





Jännite

PV 1

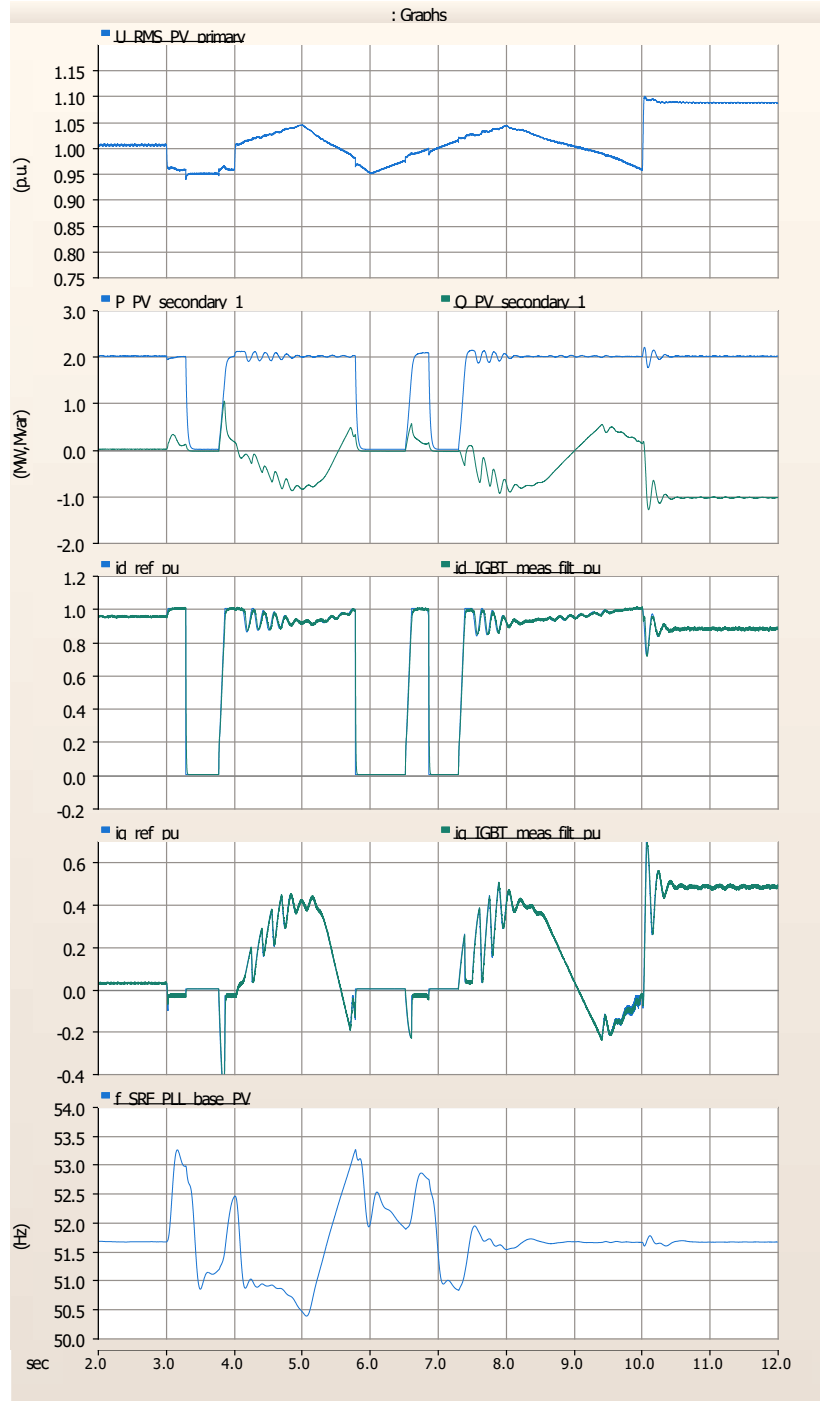
Päto- ja loisteho

Referenssi- ja mitatut id- ja iq- virrat

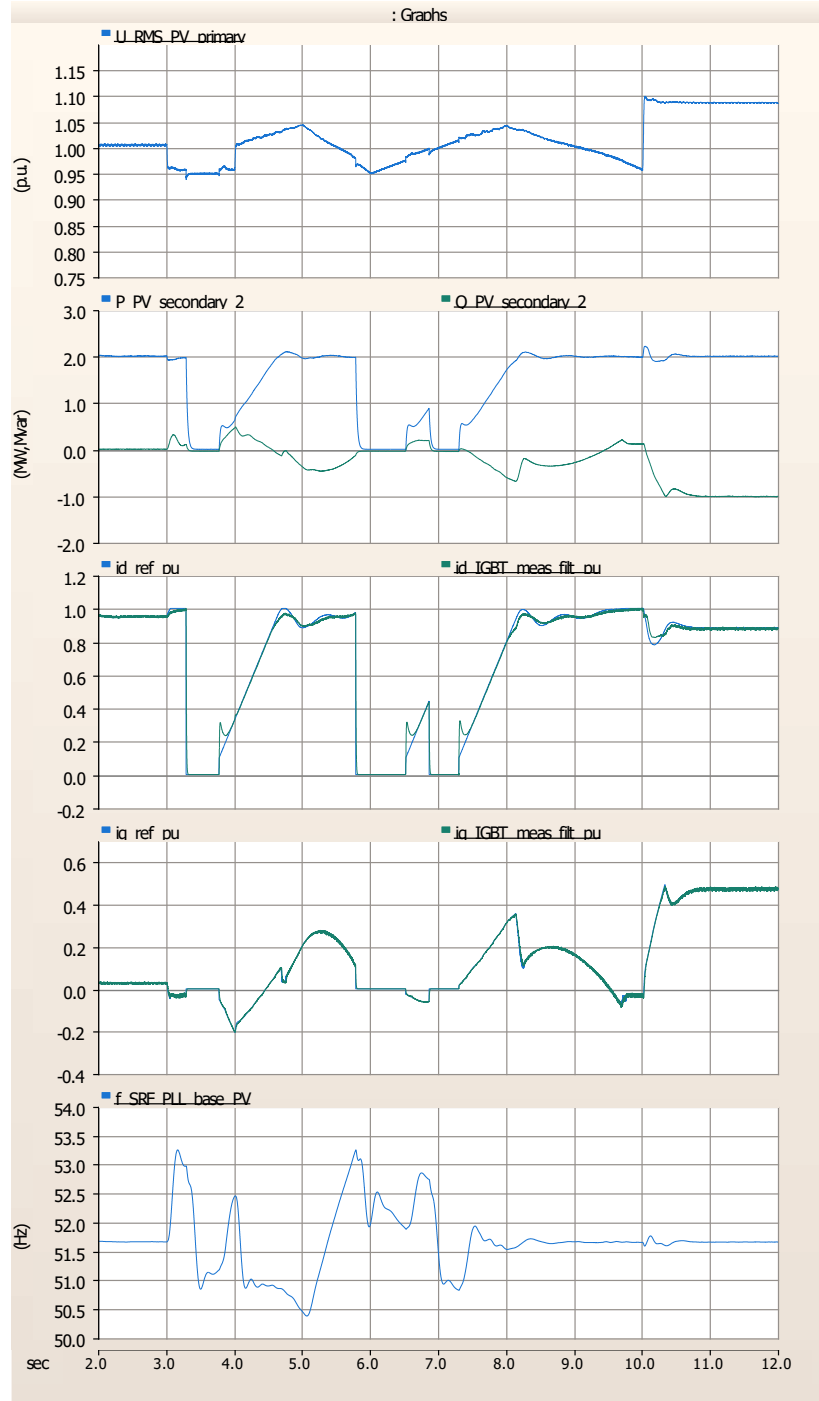
Mitattu taajuus (PLL)

Vertailu edelliseen, jossa ei johtoa

# PV 1



# PV 2



Jännite

Päto- ja loisteho

Referenssi- ja mitatut id- ja iq- virrat

Mitattu taajuus (PLL)

## Johtopäätökset: 4. Värähtelyherkin tapaus, jossa ei tahtigeneraattoria

- Nopeuttamalla säätöä (tässä ylempi PV) saadaan ylemmän PV:n vasteisiin toki värähtelyjä
- Silti alemman PV:n säätö pystyy pitämään ko. PV:n pätö- ja loistehot hyvin hallinnassa ilman mainittavia värähtelyjä

## 5. Lähtökohtaisesti värähtelyherkin tapaus, jossa on tahtigeneraattori

Muuntajien hajareaktanssi 0.001 p.u.

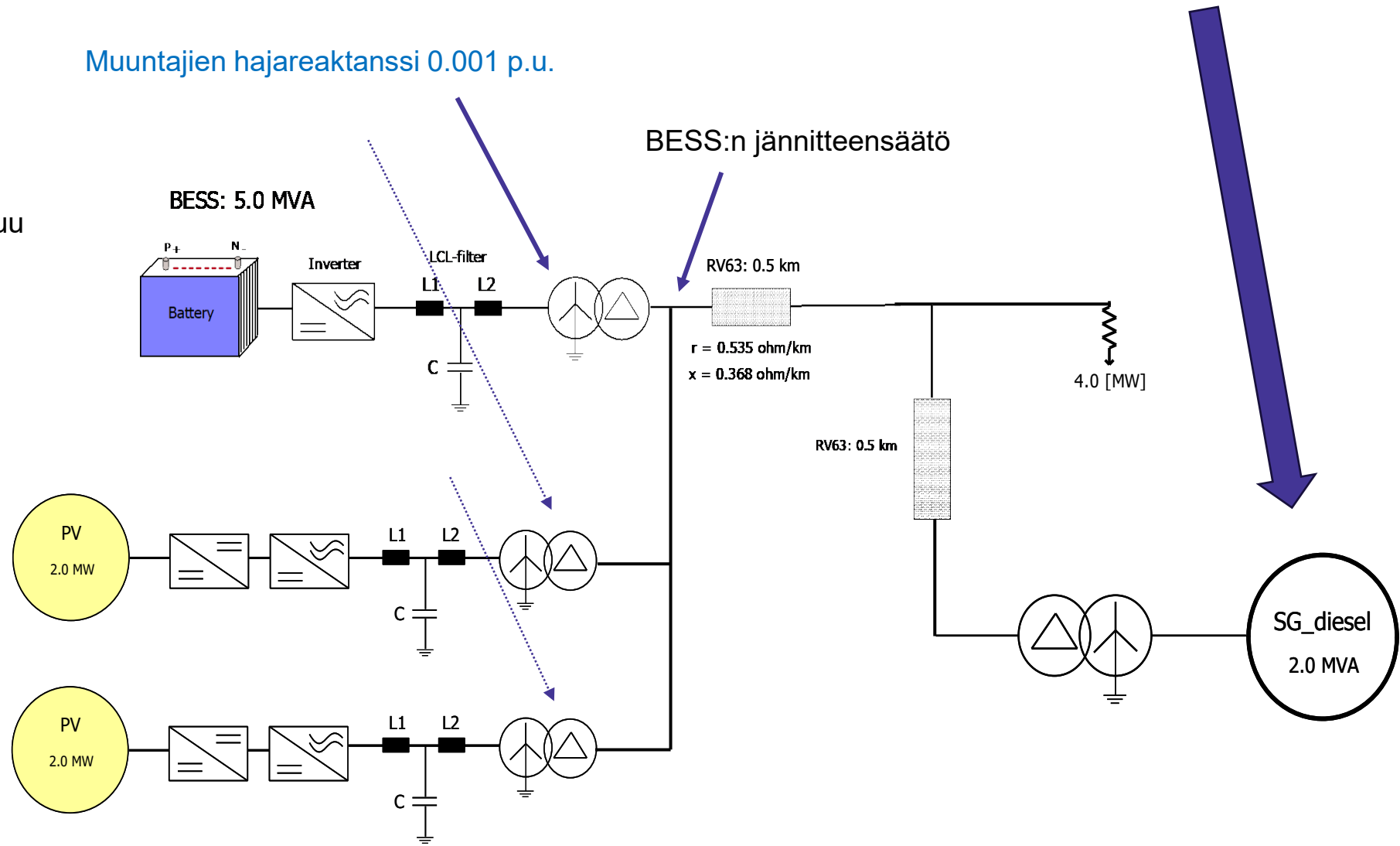
Jännitteen ohjearvo muuttuu ajan funktiona

Myös taajuusohje muuttuu ajan funktiona

Nopeampi P- ja Q-säätö

- Jännite- ja taajuussuojaukset ovat aktivoituneina

Hitaampi P- ja Q-säätö



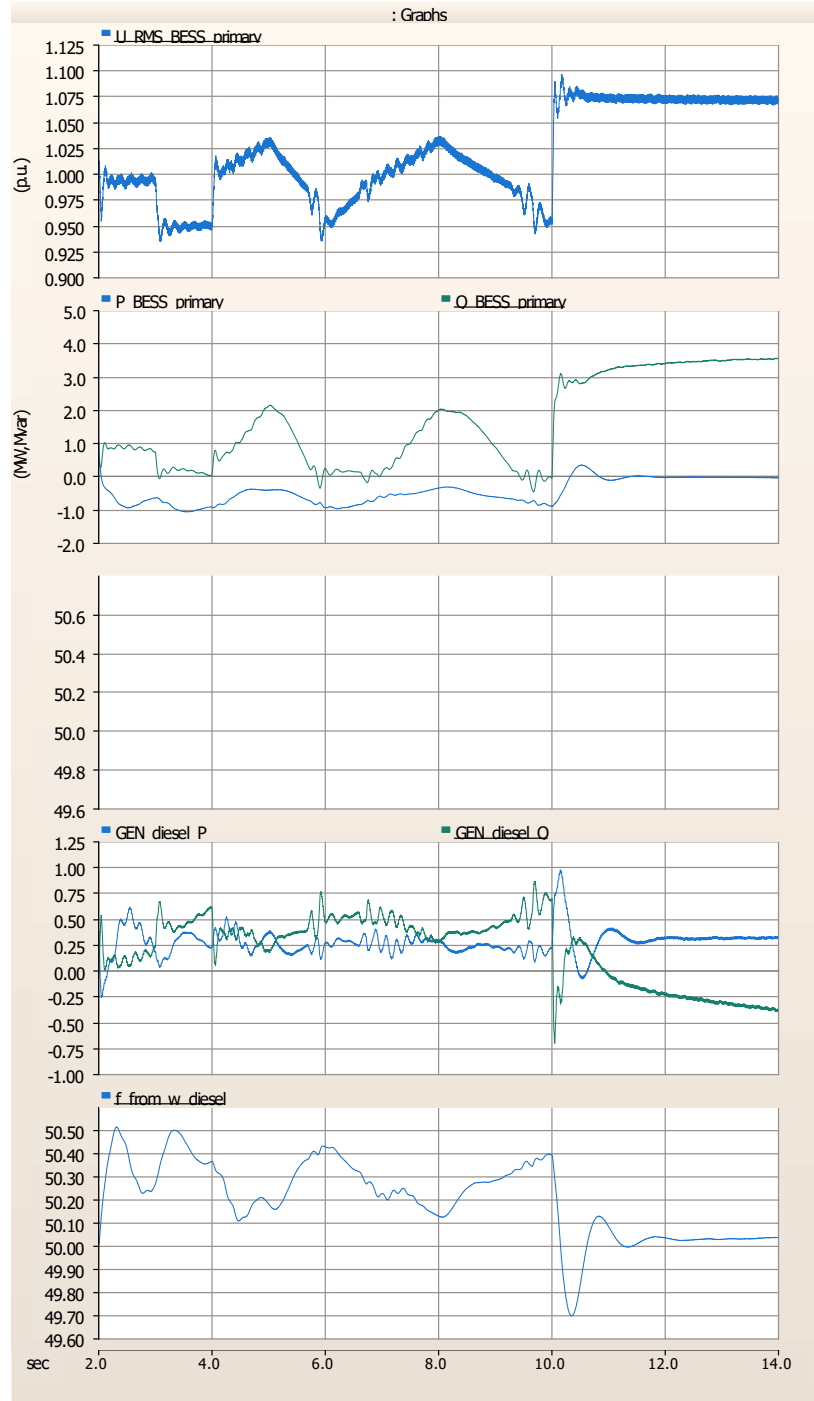
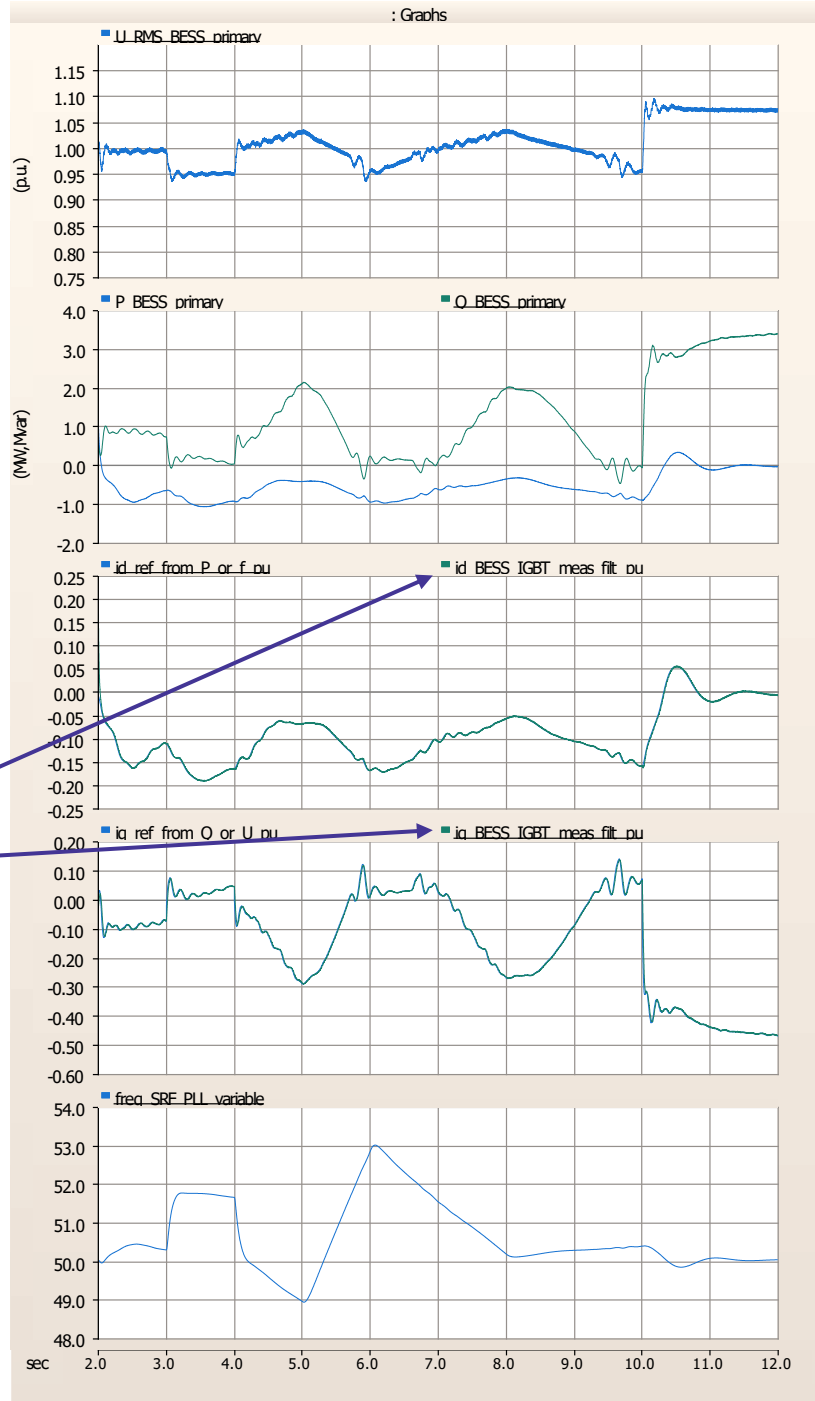
# BESS

Jännite

Päto- ja loisteho

Mitatut id- ja iq-virrat

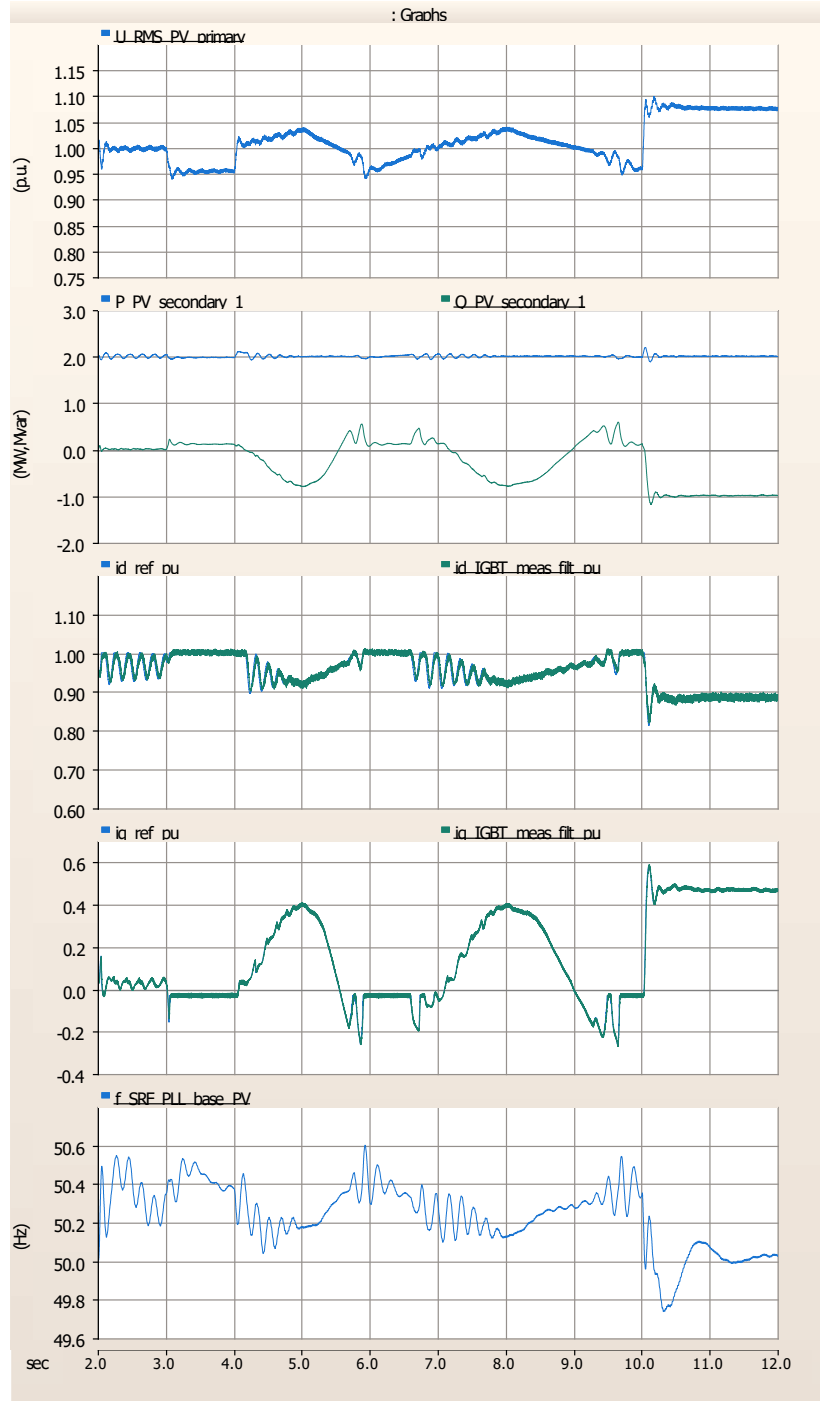
Taajuusreferenssi BESS:n signaaligeneraattorilta



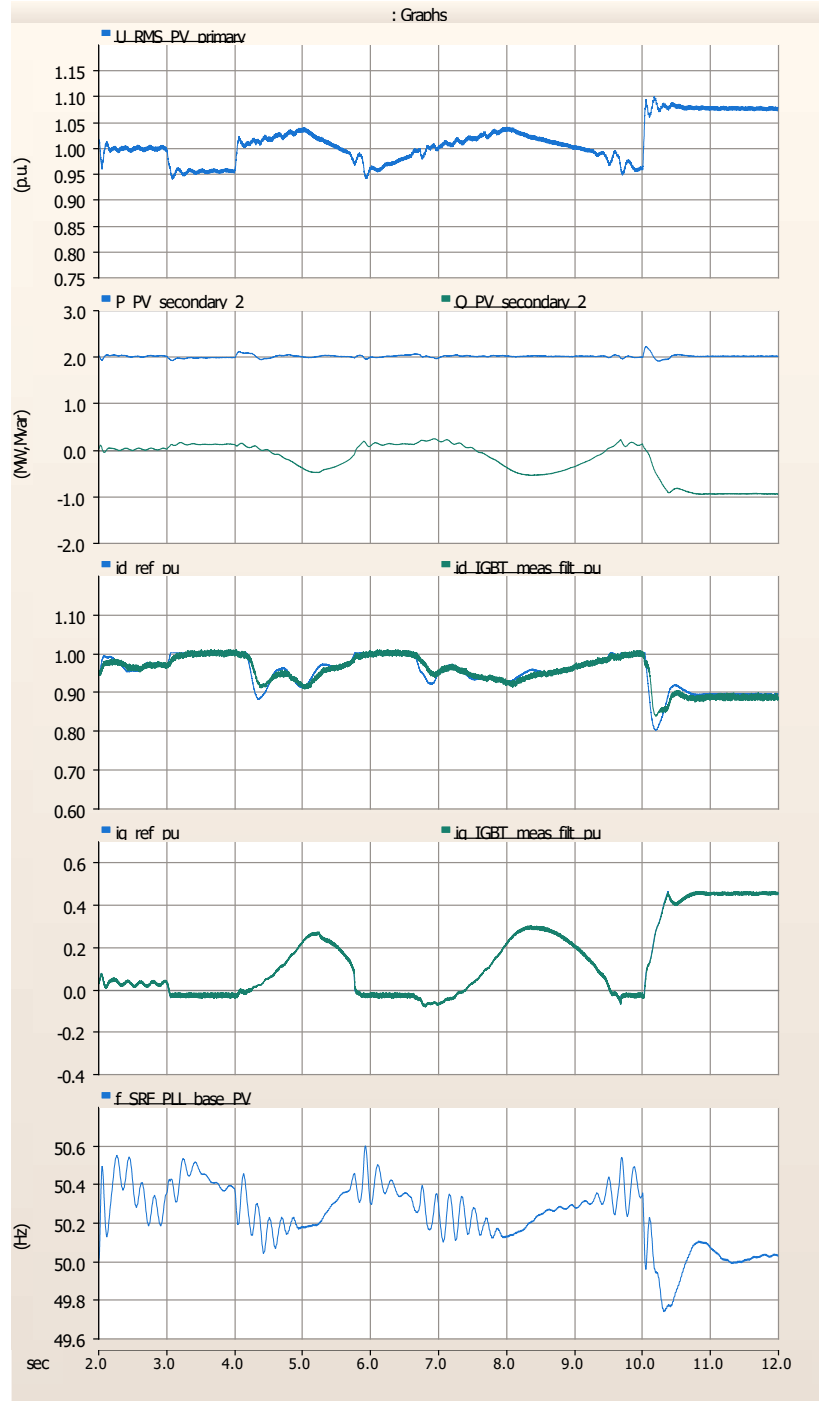
Tahtigeneraattorin vastee



# PV 1



# PV 2



Jännite

Päto- ja  
loisteho

Referenssi- ja  
mitatut id- ja iq-  
virrat

Mitattu taajuus  
(PLL)

## Johtopäätökset: 5. Värähtelyherkin tapaus, jossa on tahtigeneraattori

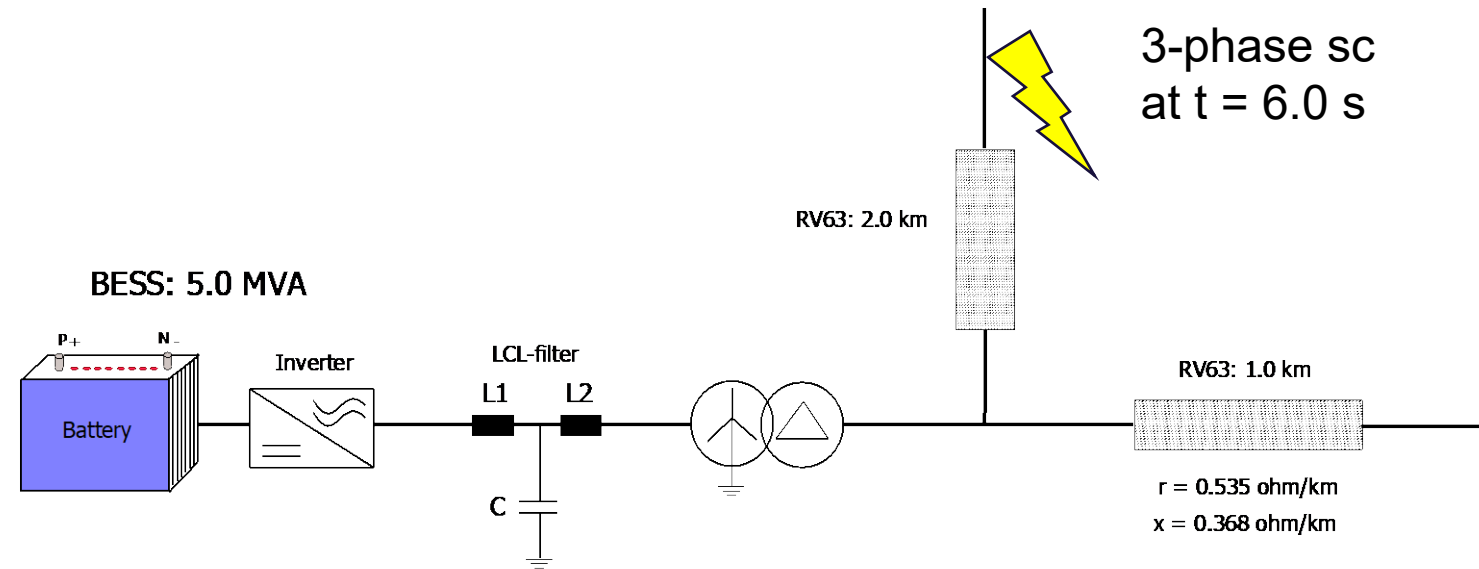
- Vaikka BESS yrittääkin muuttaa taajuutta nopeasti, tahtigeneraattorin roottorin hitausmassa estää / suodattaa näitä muutosyrityksiä suhteellisen tehokkaasti
- Siltikin kokonaisvasteet värähteleviä
  - Tämä odotettua etenkin, kun suhteutetaan tahtigeneraattorin koko (2.0 MV), BESS:n tehoon (5.0 MVA) ja kahteen PV:n tehoon (yht. 4.0 MW)

## 6. Perustilanne (1), jossa 3-vaiheinen vika: $t = 6.0$ s

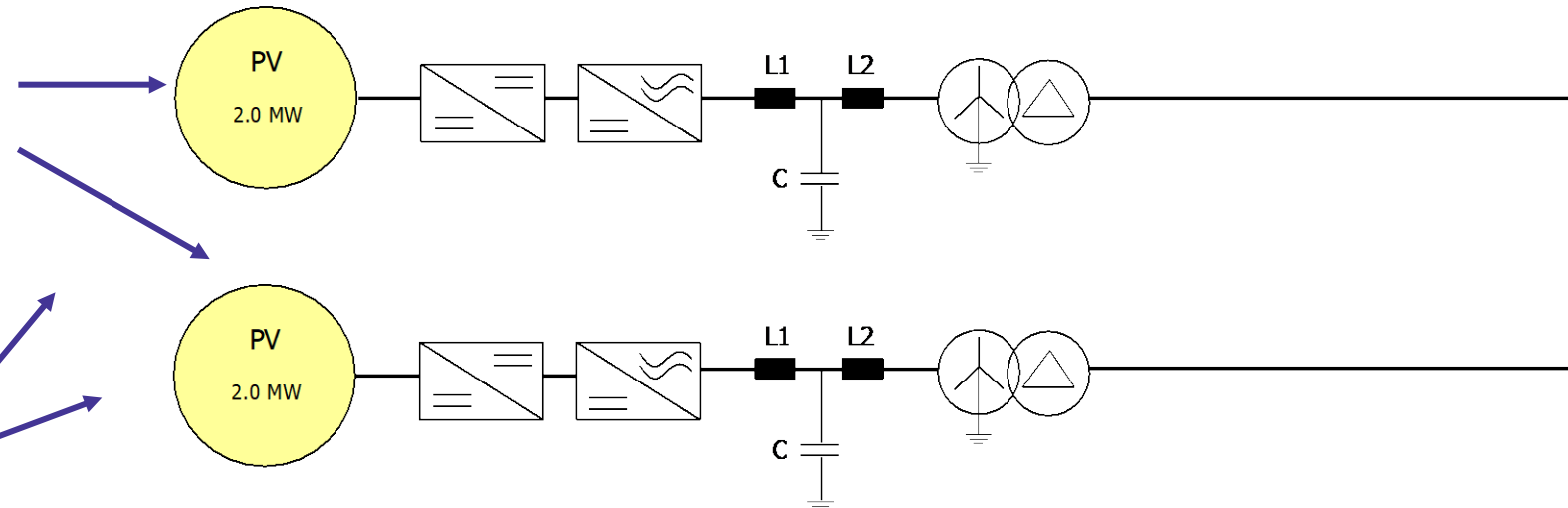
Jännitteen ohjearvo muuttuu ajan funktiona

Taajuusohje ei muutu

- Tarkastellaan vian ja jännitteen ohjearvovaihteluiden yhteisvaikutuksia



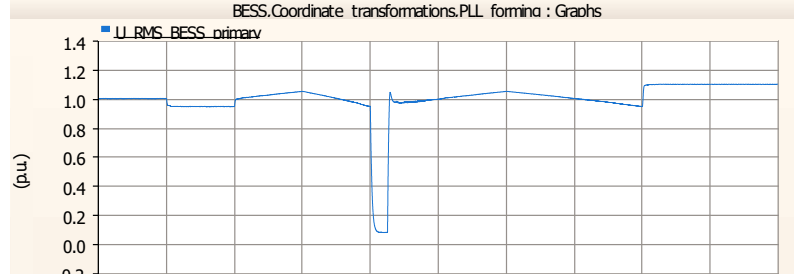
Jännite- ja taajuussuojaukset ovat aktivoituneina



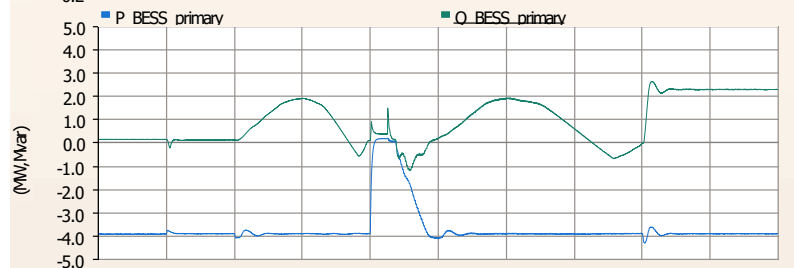
Identtiset säätöparametrit

# BESS

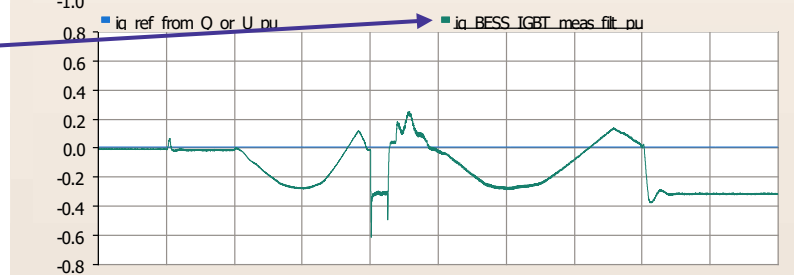
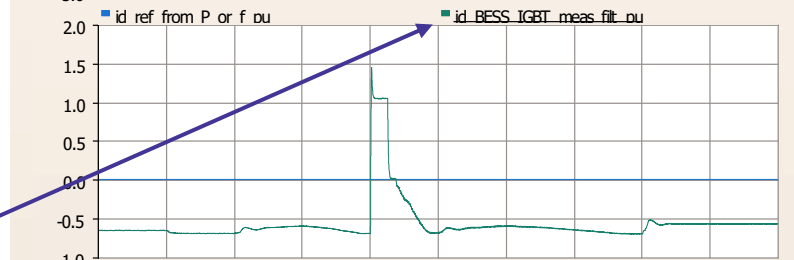
Jännite



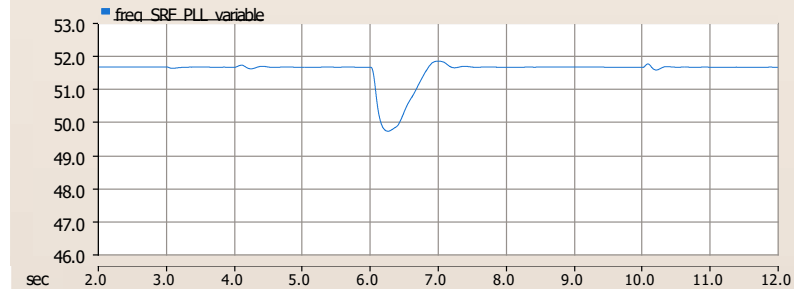
Päto- ja loisteho



Mitatut id- ja iq-virrat

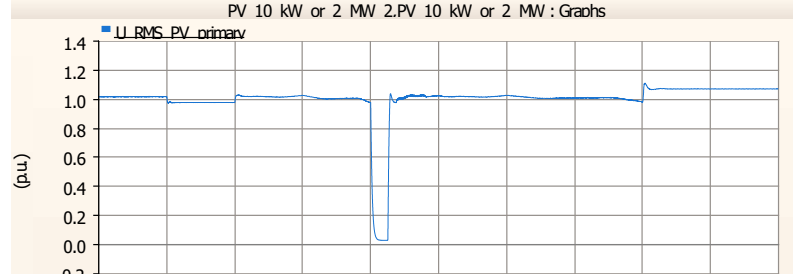


Taajuusreferenssi BESS:n signaaligeneraattorilta

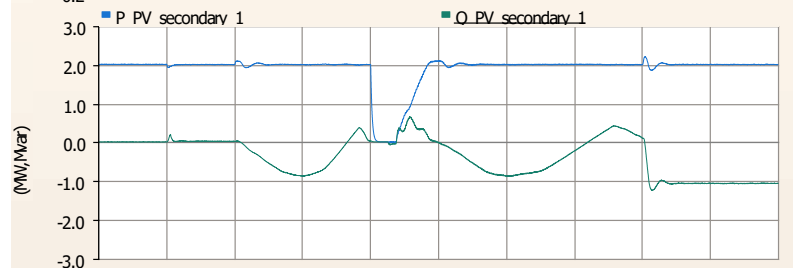


# PV 1

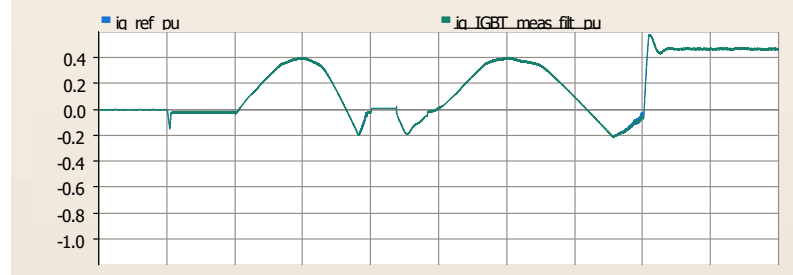
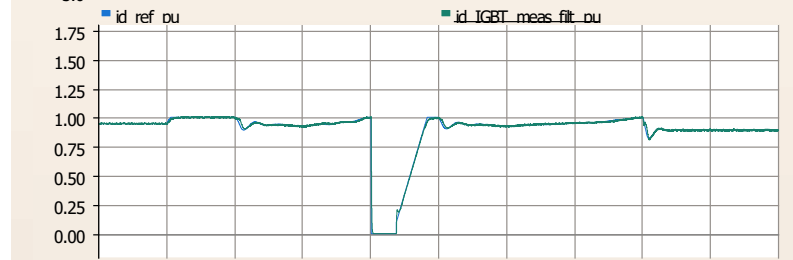
Jännite



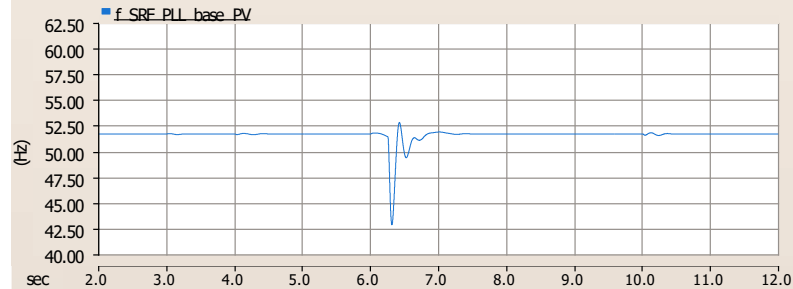
Päto- ja loisteho



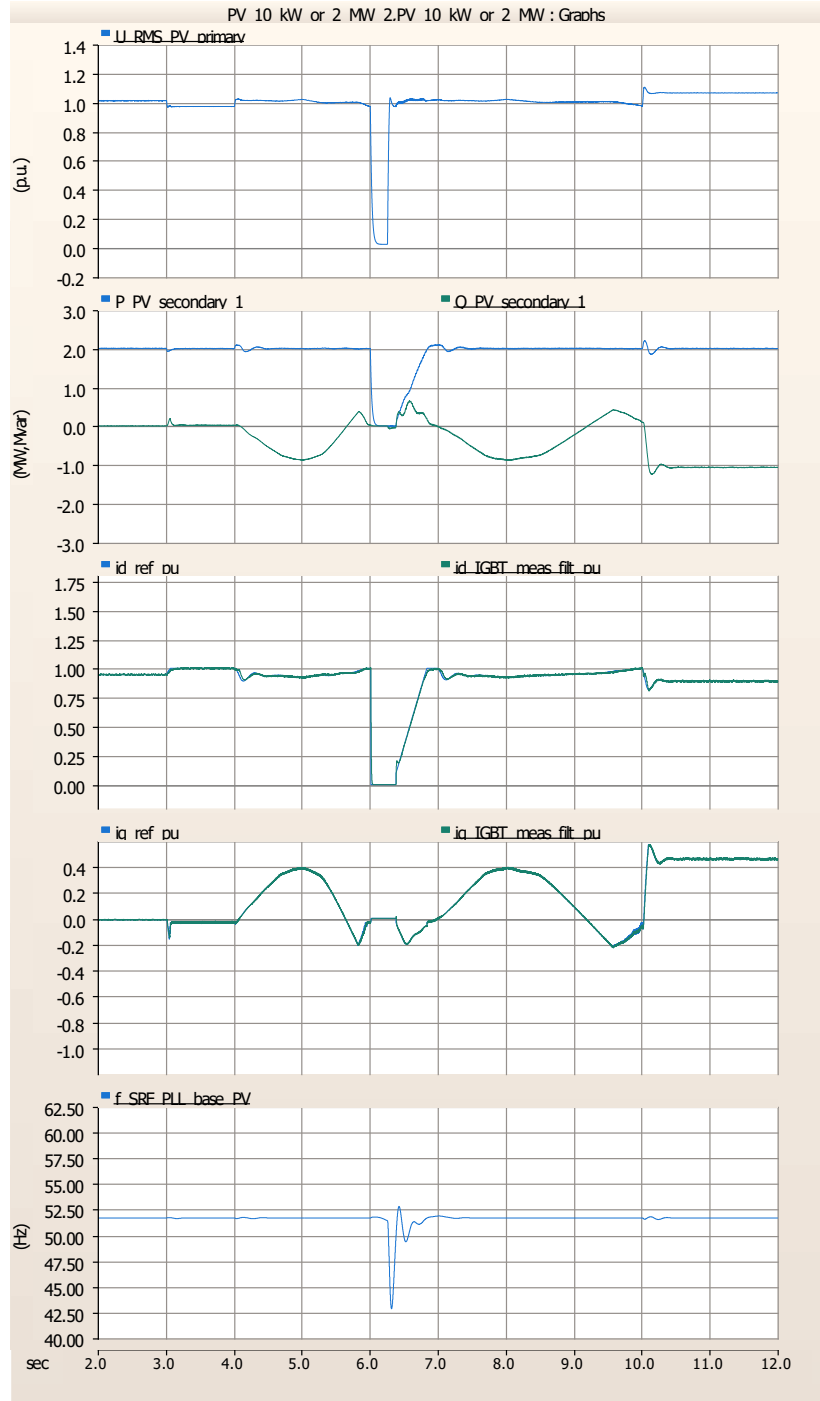
Referenssi- ja mitatut id- ja iq-virrat



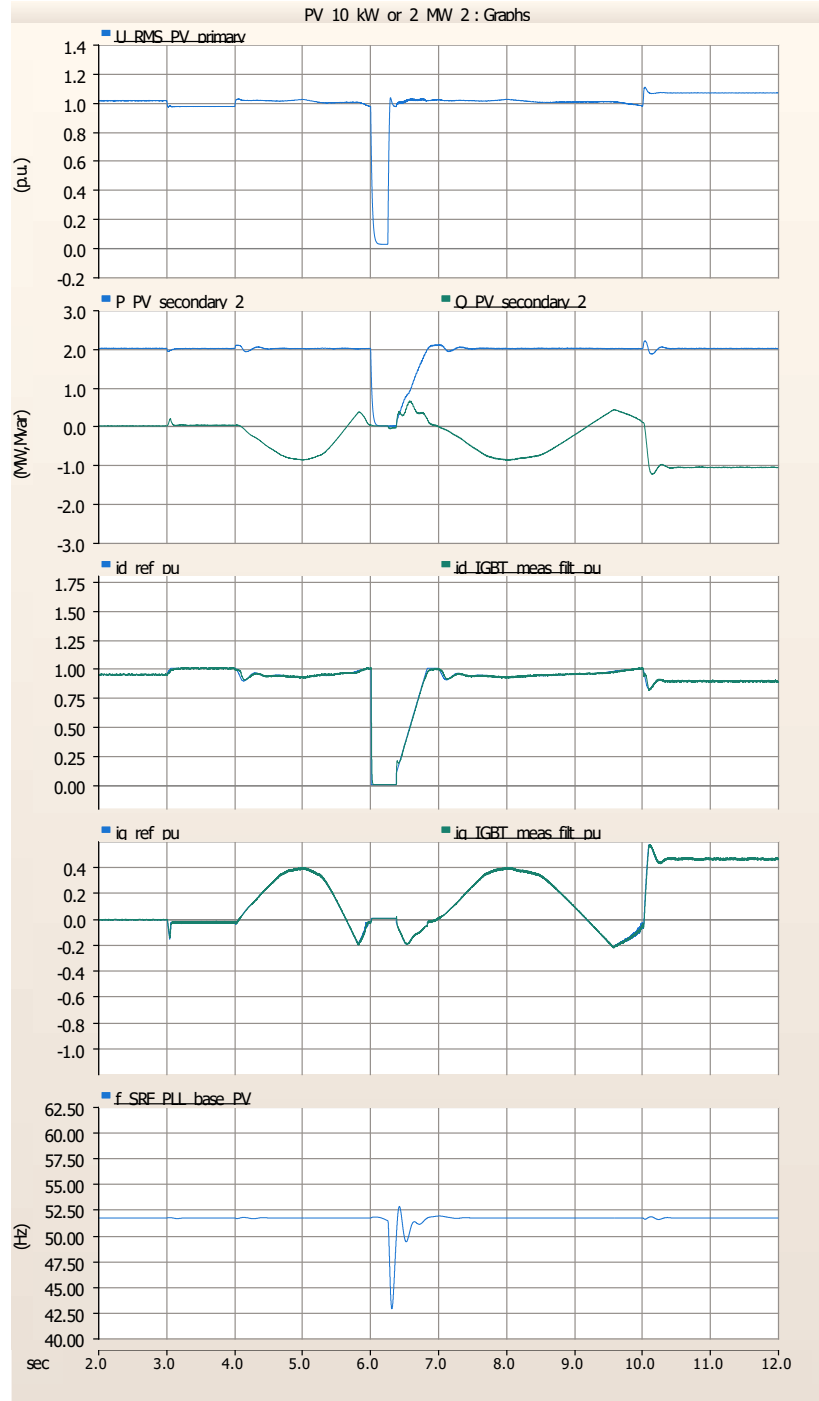
Mitattu taajuus (PLL)



# PV 1



# PV 2



Jännite

Päto- ja loisteho

Referenssi- ja mitatut id- ja iq- virrat

Mitattu taajuus (PLL)

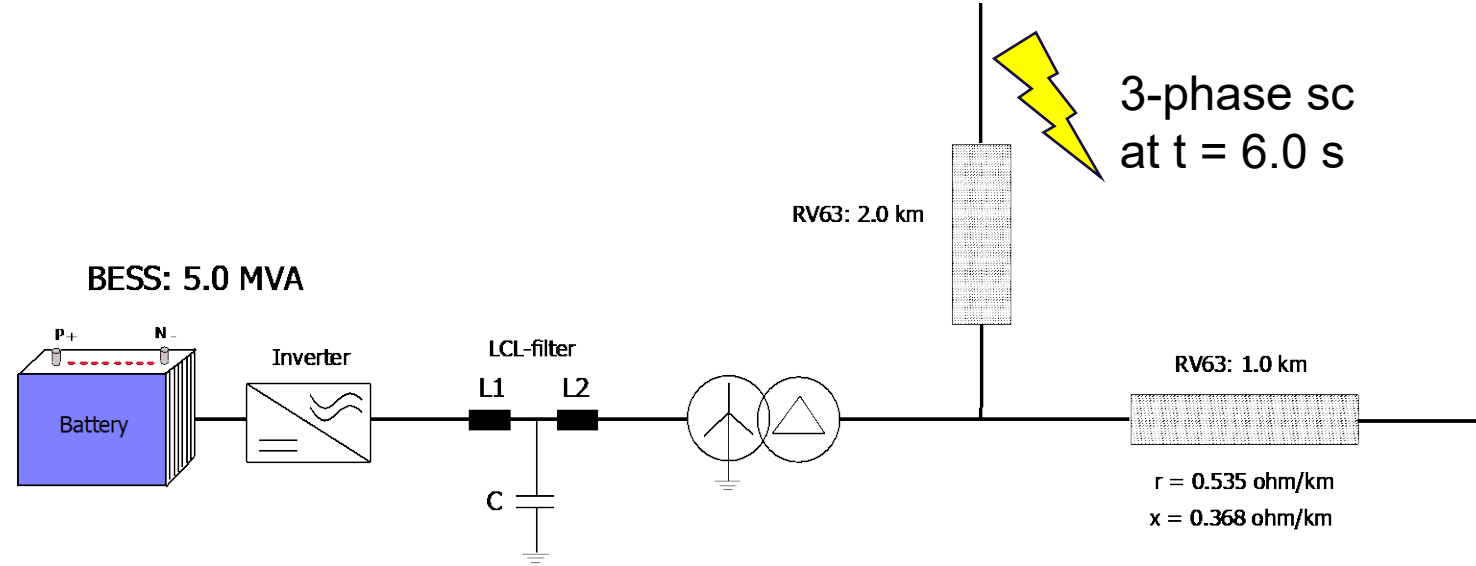
## Johtopäätökset: 6. Perustilanne (1), jossa 3-vaiheinen vika: $t = 6.0$ s

- PV:n toiminta on loogista ja vasteet ns. hyviä.
- Tämä tarkoittaa nopeaa viasta toipumista ja...
- ...osallistumista jännitteensäätöön heti vian jälkeen

## 7. Perustilanne (1), jossa 3-vaiheinen vika, mutta PV:n suojaukset eivät ole akt.

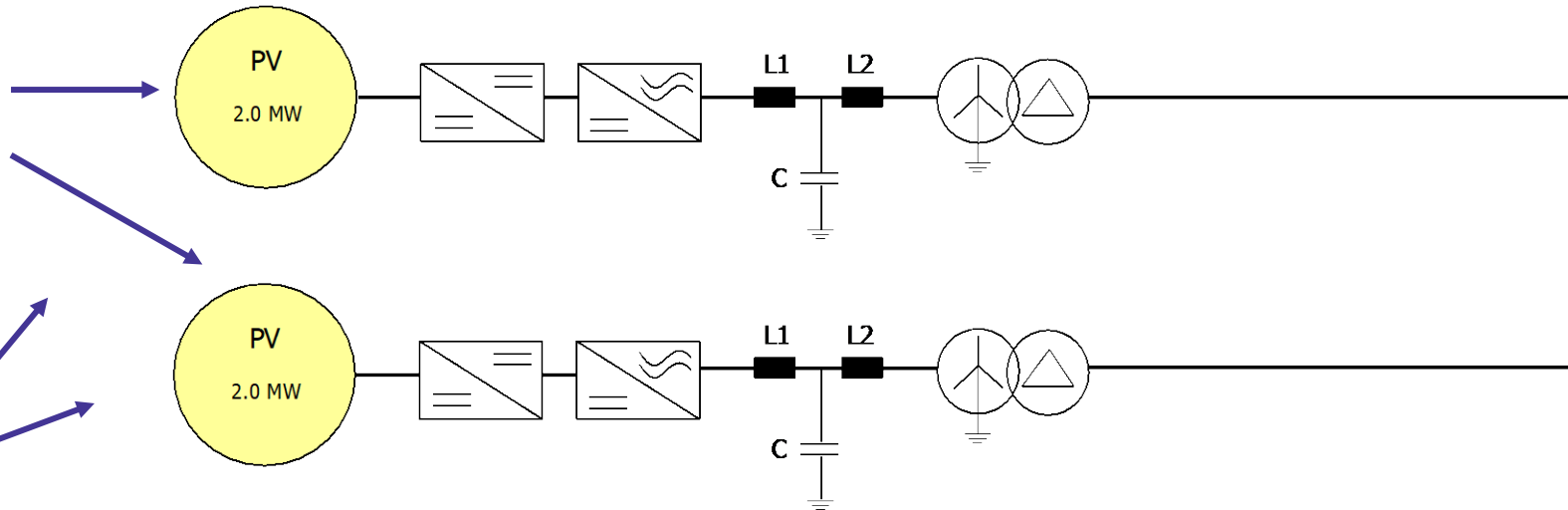
Jännitteen ohjearvo muuttuu ajan funktiona

Taajuusohje ei muutu



Jännite- ja taajuussuojaukset eivät ole aktivoituneina

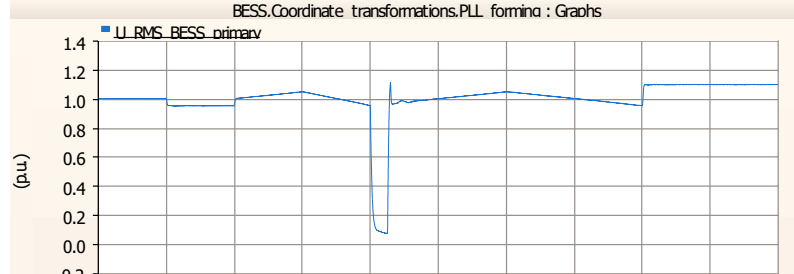
Identtiset säätöparametrit



# BESS

Jännite

(p.u.)



Päto- ja loisteho

(MW/MVar)

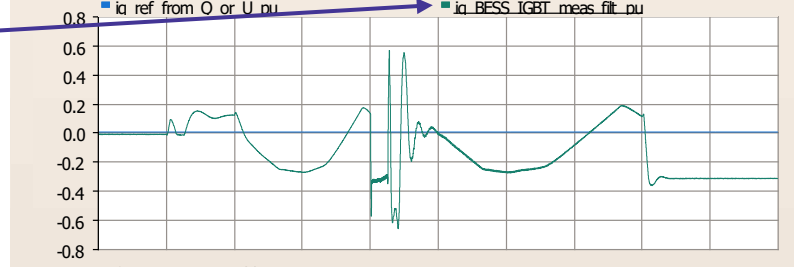


Mitatut id- ja iq-virrat

(p.u.)

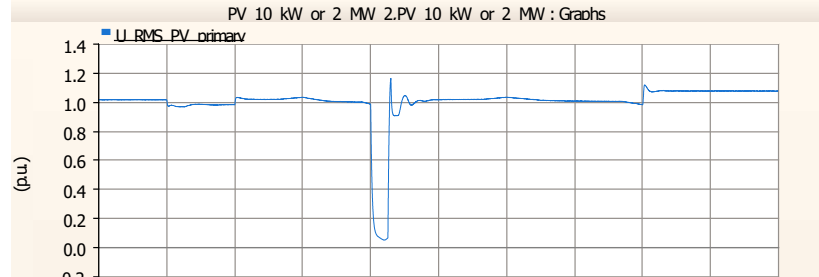
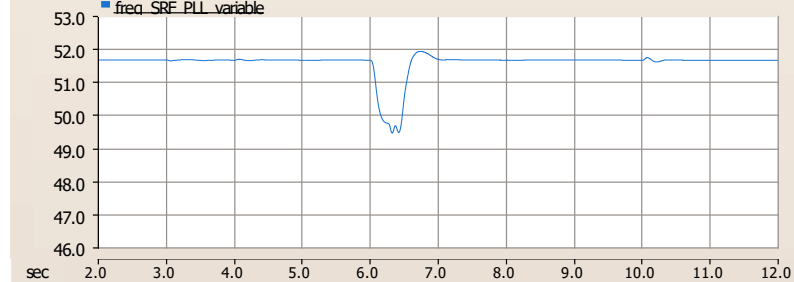


(p.u.)



Taajuusreferenssi BESS:n signaaligeneraattorilta

(Hz)



Jännite

# PV 1

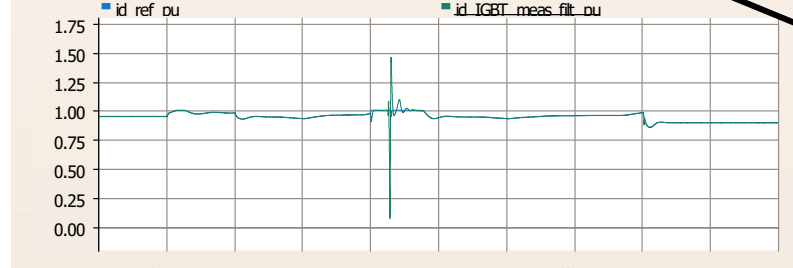
Päto- ja loisteho

(MW/MVar)

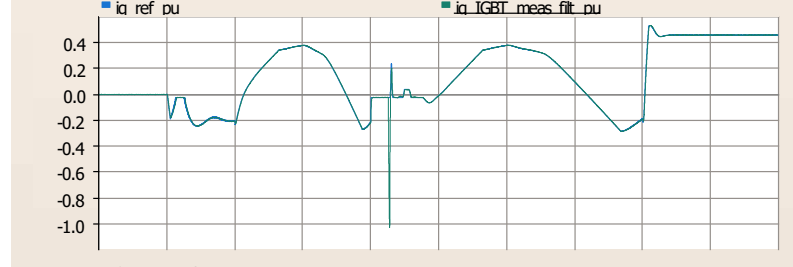


Referenssi- ja mitatut id- ja iq-virrat

(p.u.)

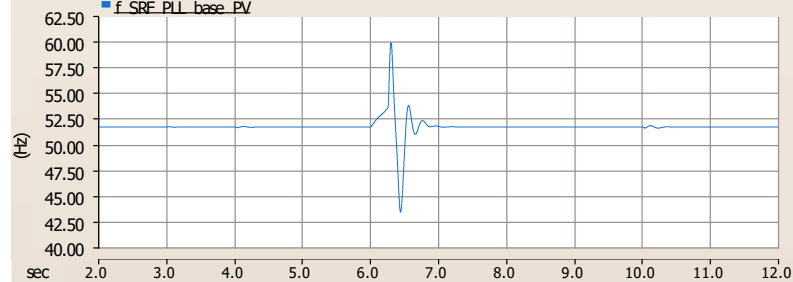


(p.u.)



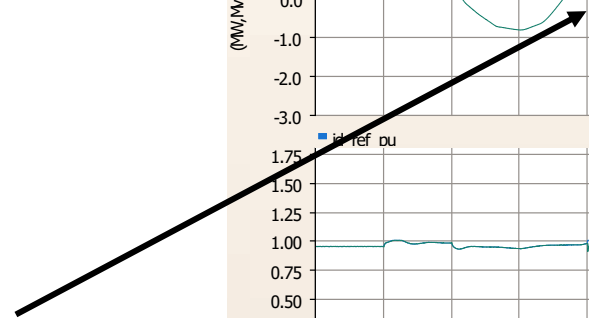
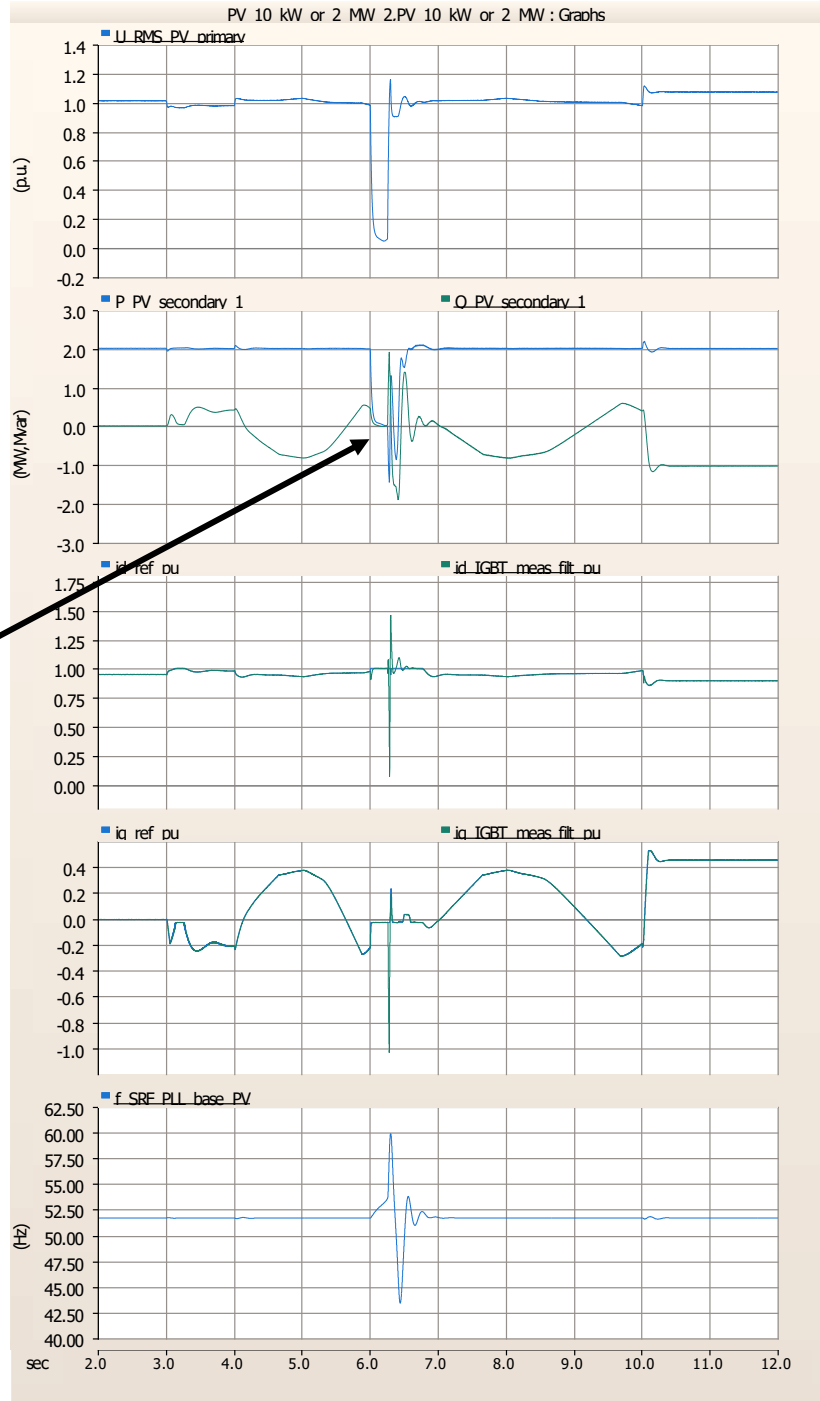
Mitattu taajuus (PLL)

(Hz)

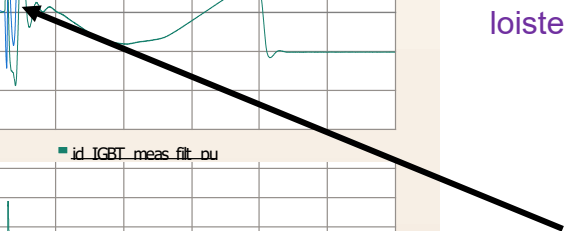
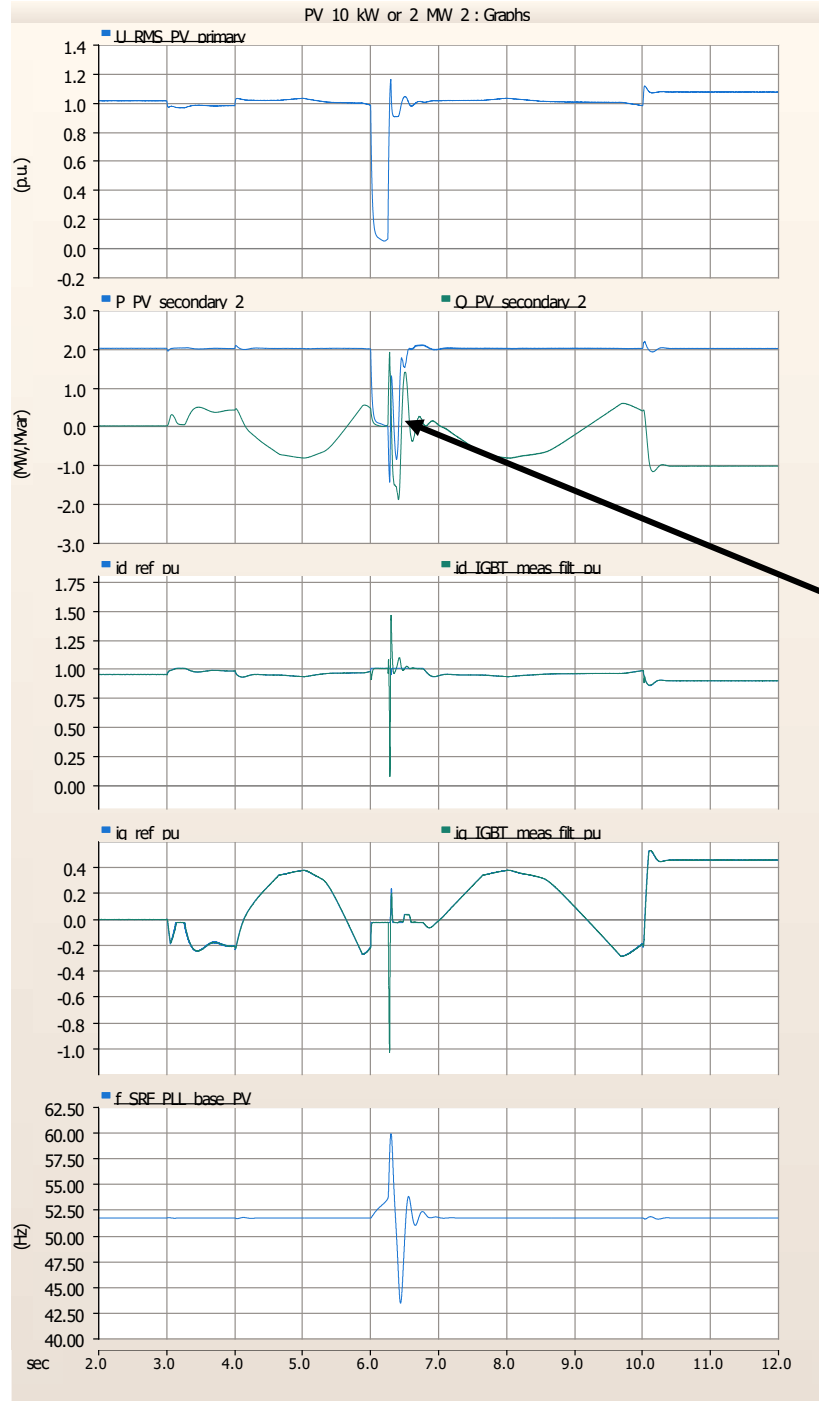




# PV 1



# PV 2

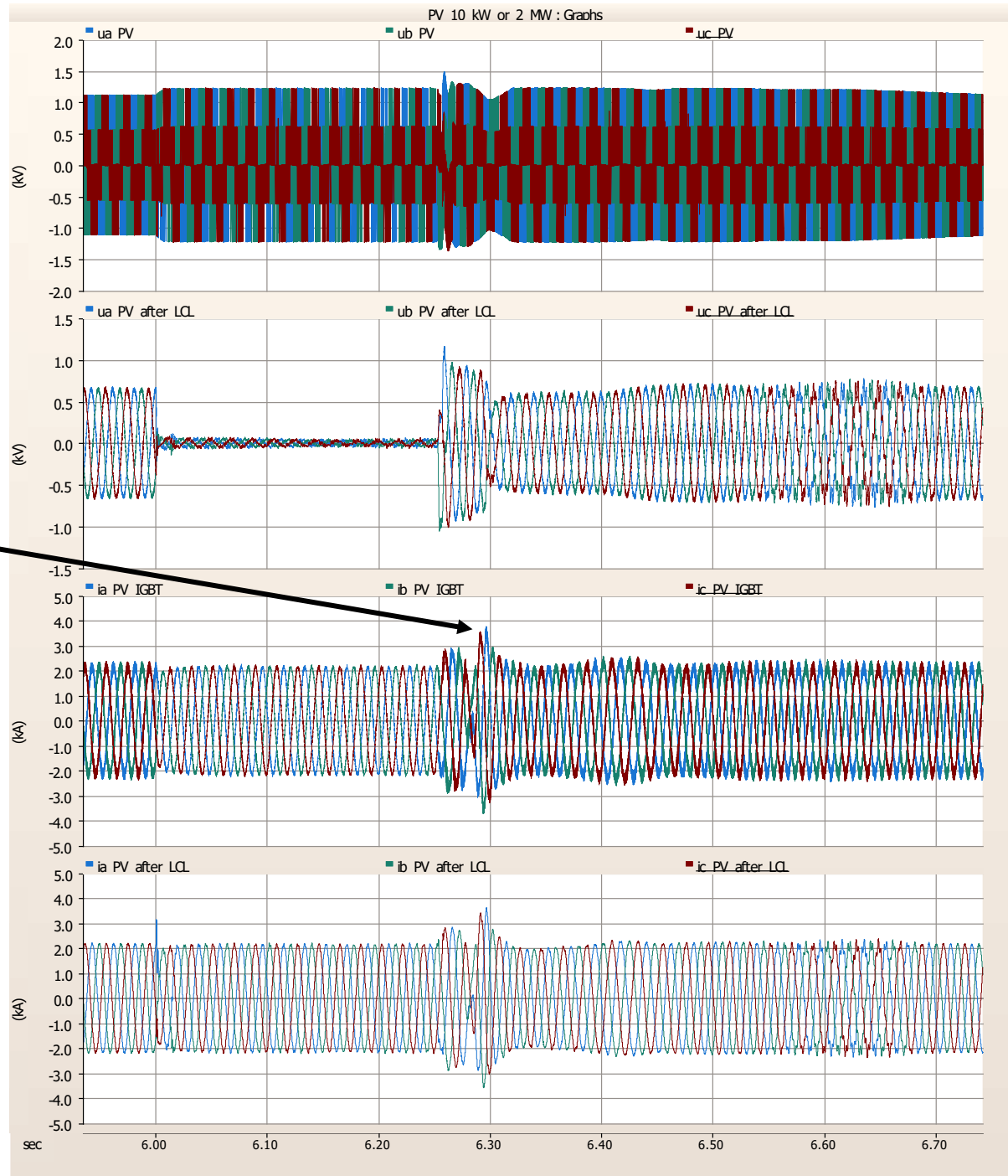


Jännite

Päto- ja loisteho

Referenssi- ja mitatut id- ja iq- virrat

Mitattu taajuus (PLL)

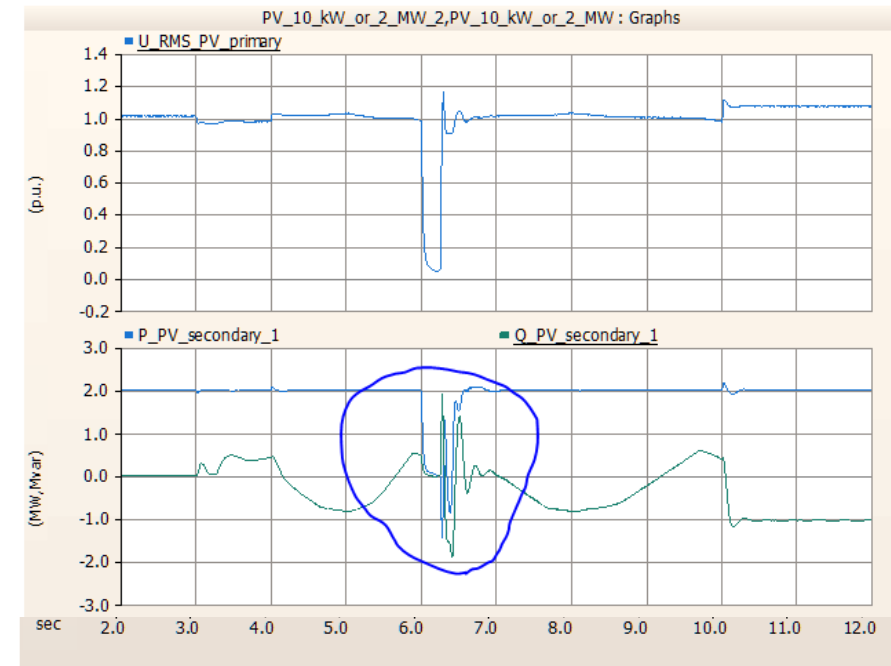
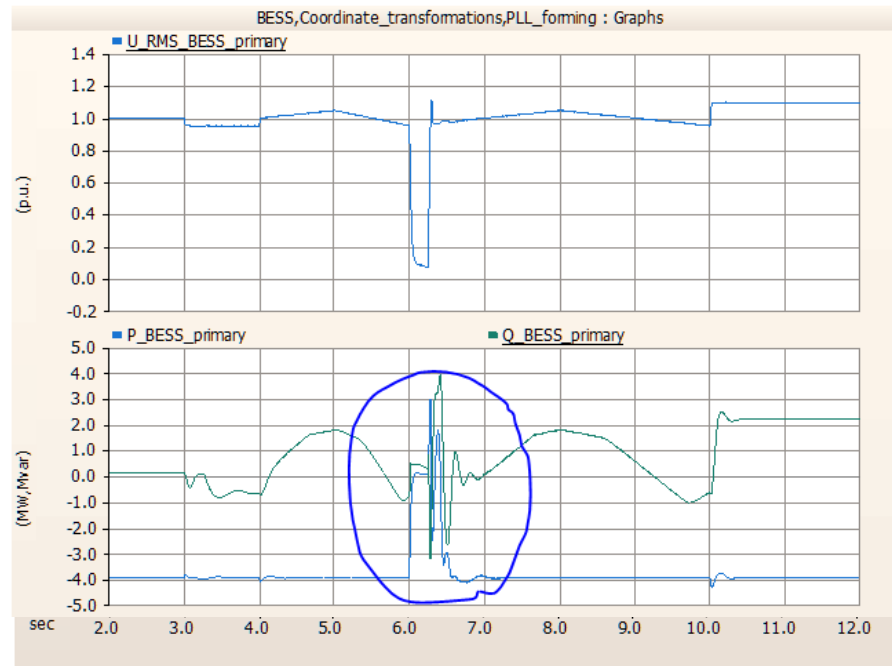


PV:n maksimivirta huomattavasti yli nimellishuippuarvon (2.1 kA) suojausten puuttuessa

→ Virta on lähes 4.0 kA, koska jännitteen romahtaessa saman tehon saavuttamiseksi virran täytyy kasvaa voimakkaasti

## Johtopäätökset: 7. Perustilanne (1), jossa 3-vaiheinen vika, mutta PV:n suojaukset eivät ole akt.

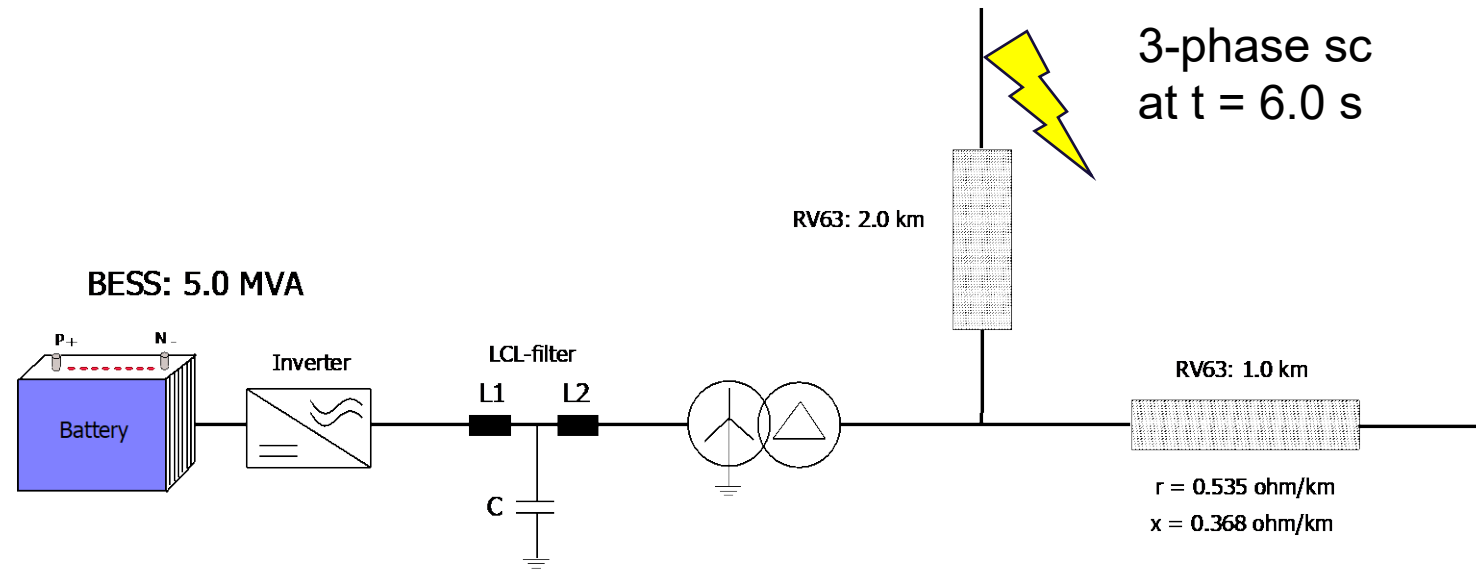
- PV:t eivät oikein "tiedä" mitä tehdä vian aikana...tai eivät pysty tekemään mitään (järkevää) syvässä jännitekuopassa
- Vaihelukko (PLL) seuraa taajuutta (jännitteen kulmaa) nopeasti häiriön (vian) jälkeen
- BESS pystyy seuraamaan hyvin nopeasti PV:n ulostulosuureiden (P, Q) voimakkaita vaihteluita myös vian aikana:



## 8. Perustilanne (1), jossa alemman PV:n PLL on hidas

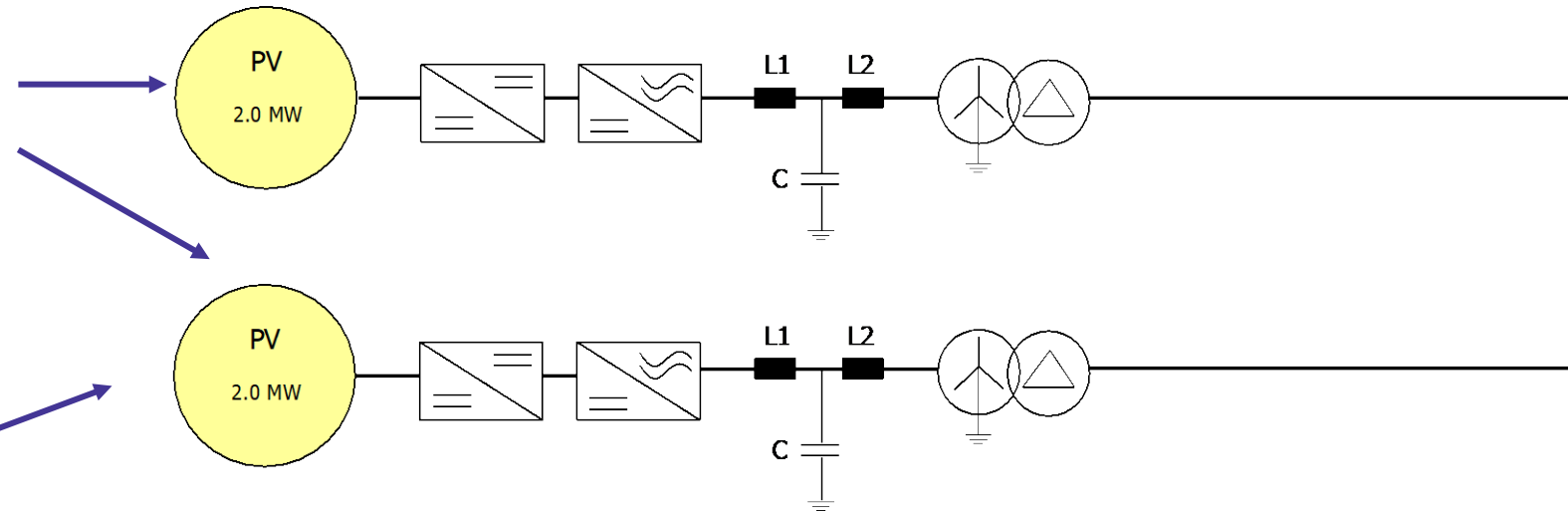
Jännitteen ohjearvo muuttuu ajan funktiona

Taajuusohje ei muutu



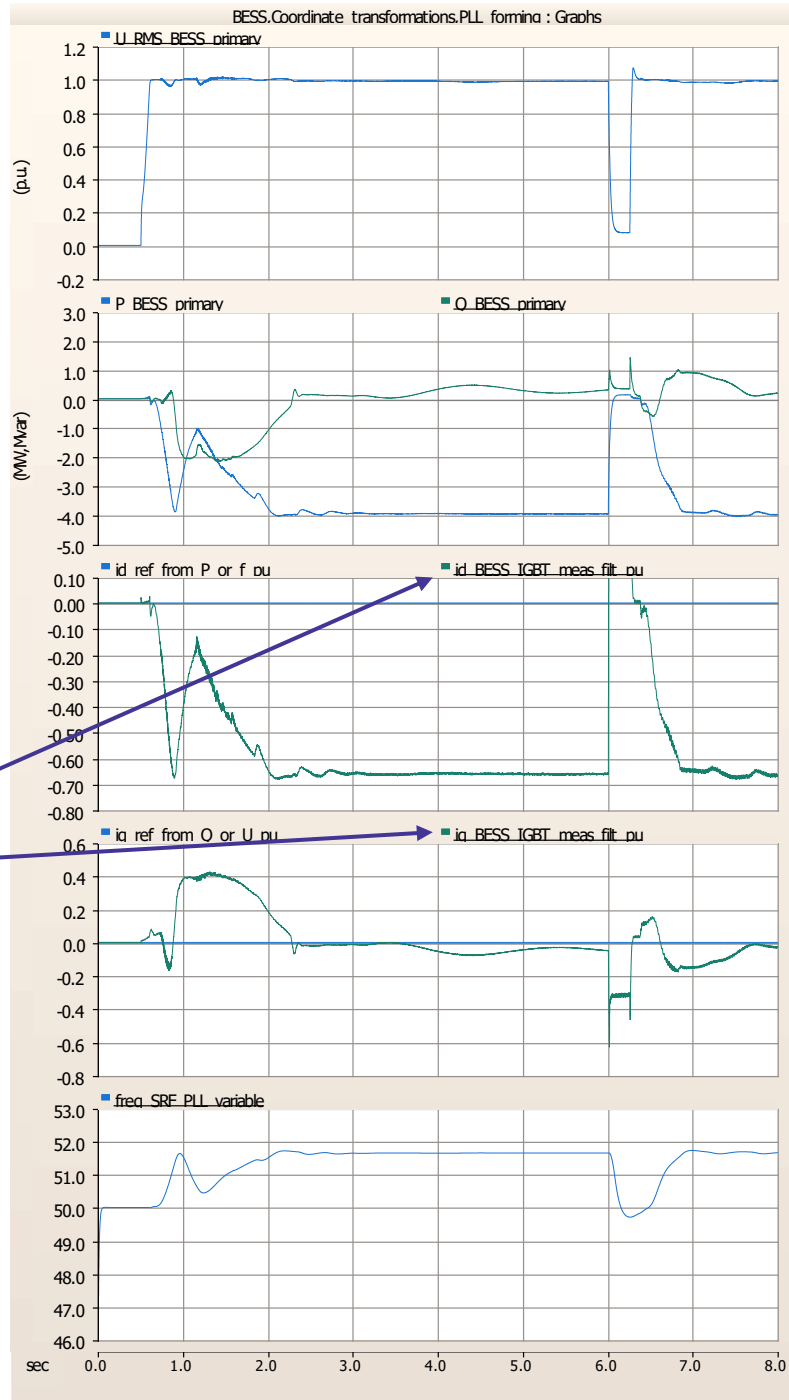
Jännite- ja taajuussuojaukset ovat aktivoituneina

Hidas PLL



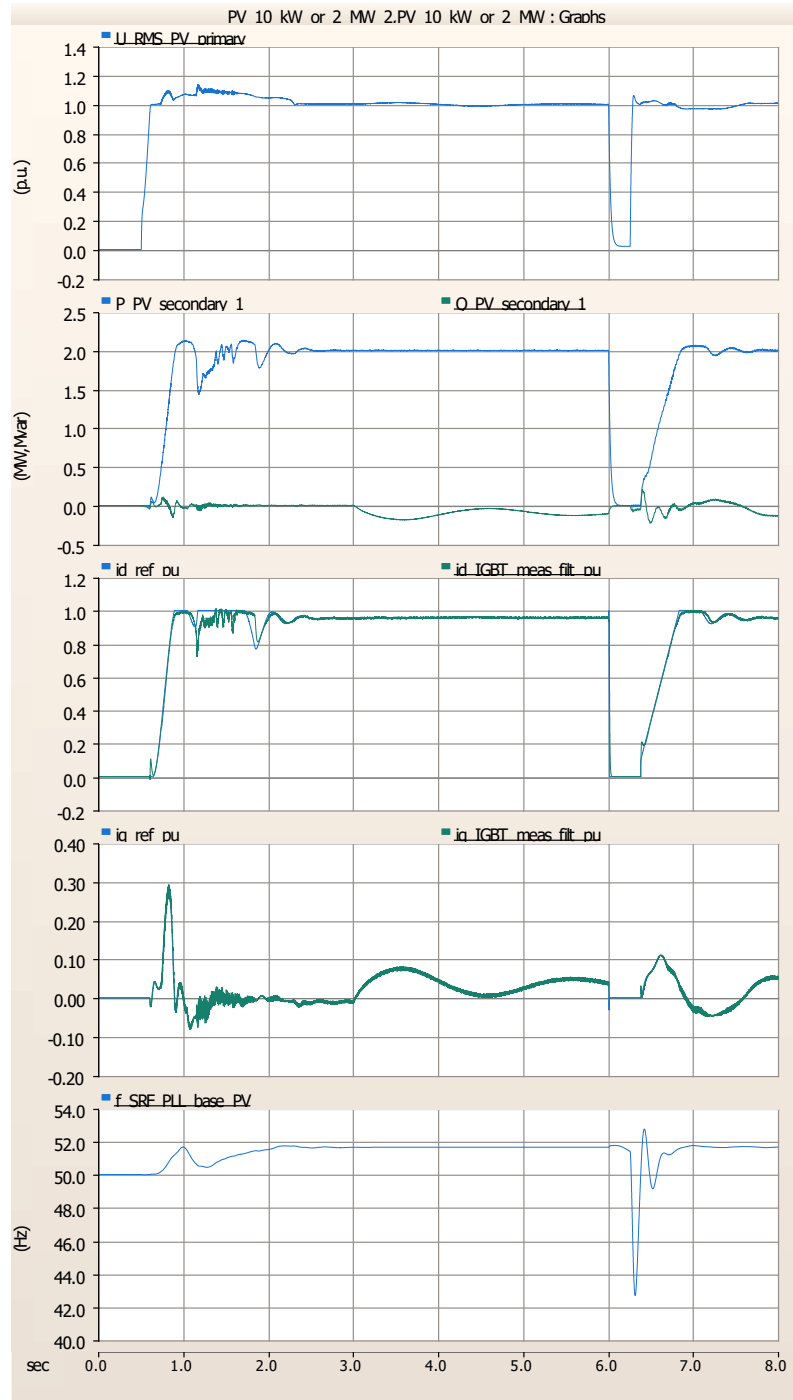
# BESS

Jännite



Mitatut id- ja iq-virrat

Taajuusreferenssi BESS:n signaaligeneraattorilta



Jännite

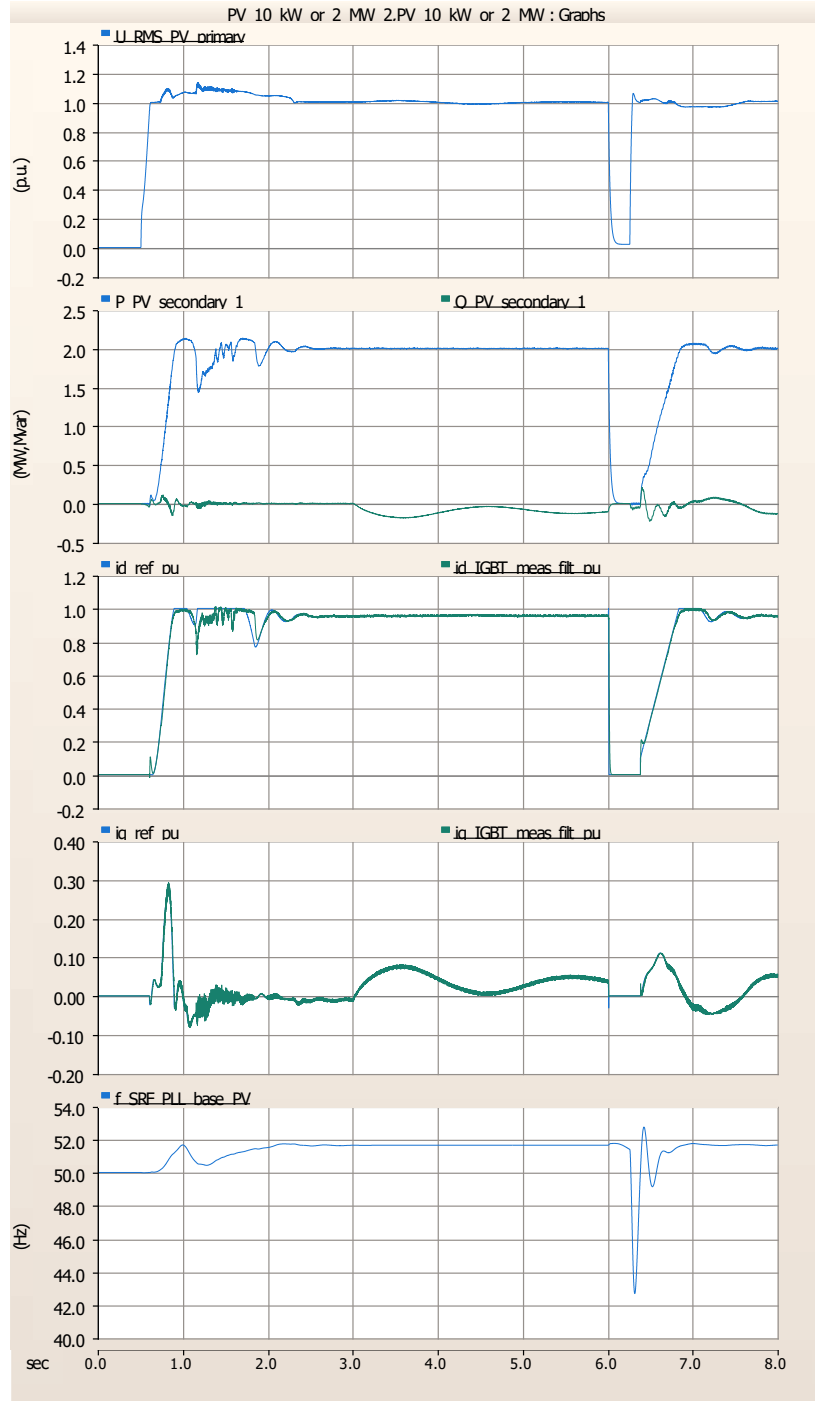
# PV 1

Pätö- ja loisteho

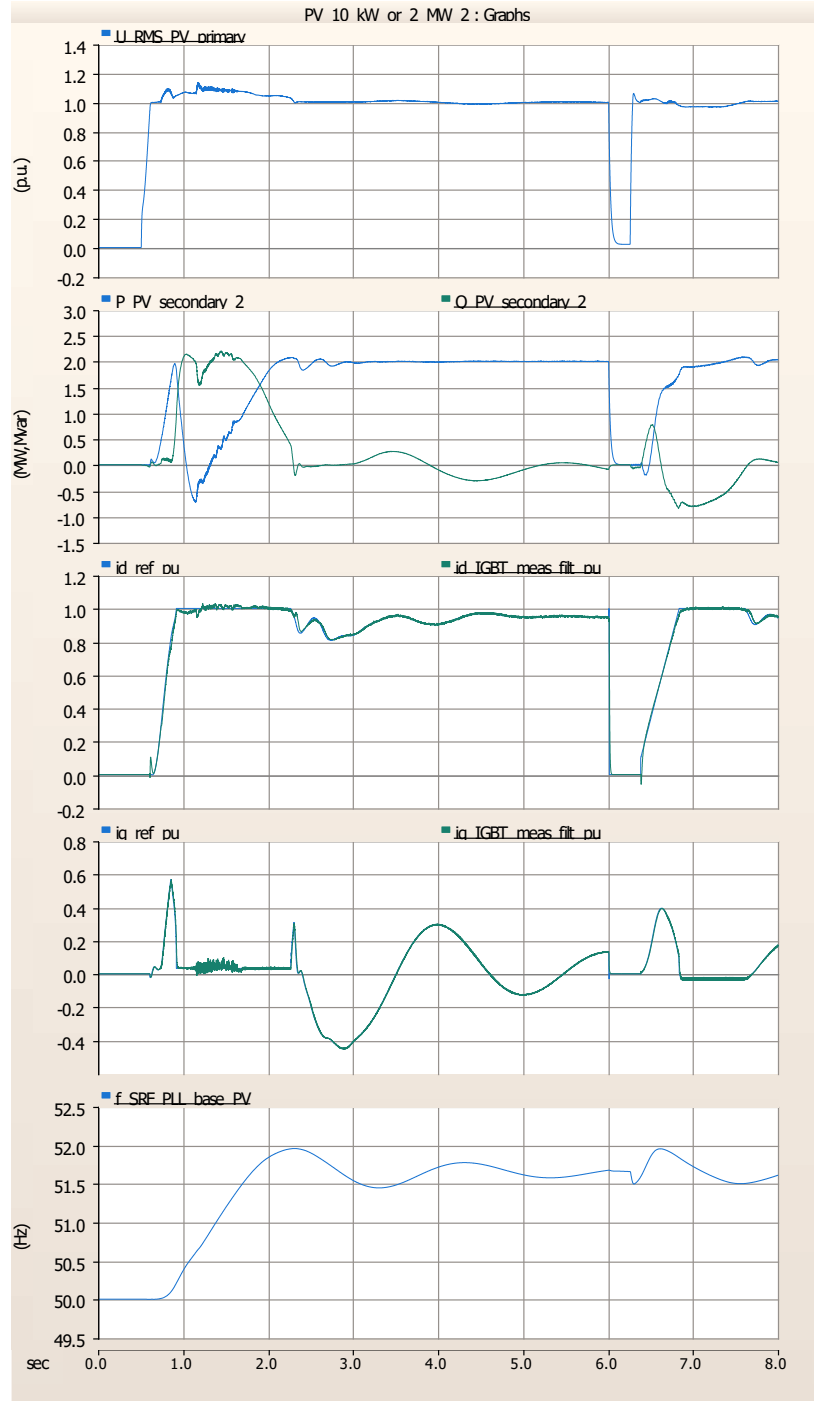
Referenssi- ja mitatut id- ja iq-virrat

Mitattu taajuus (PLL)

# PV 1



# PV 2



Jännite

Päto- ja loisteho

Referenssi- ja mitatut id- ja iq- virrat

Mitattu taajuus (PLL)

## Johtopäätökset: 8. Perustilanne (1), jossa alemman PV:n PLL on hidas

- Vaihelukon (PLL) toiminnan osin epästabili toiminta vaikuttaa kyseiseen, mutta myös viereiseen PV:n hyvin voimakkaasti
- Kuten aiemminkin on tullut esille, PLL:n toiminta on hyvin tärkeässä roolissa ajatellen vaihtosuuntaajien stabiiliutta / vasteita yleisesti

# Johtopäätökset skenaarioista 1 – 8 ja yleisiä huomioita

- Tarkasteluissa PV:n droop-jännitteensäädön vasteet olivat hyvin stabiileita useimmissa tarkasteluskenaarioissa
- Vaikka BESS ja PV:t olivat lähellä toisiaan, niin mainittavia droop-jännitteensäädöstä johtuvia värähtelyjä ”ei saatu aikaan”
- Vasta, kun toisen PV:n jännitteensäätöpiiriä nopeutettiin, niin huomattiin värähteleviä vasteita ko. PV:n vasteissa
  - Sen PV:n, jonka säätöparametreja ei muutettu, pystyi silti pitämään vasteet varsin tasaisina
- Hidas PLL toisen PV:n skenaariossa aiheutti voimakkaita värähtelyitä
  - Sen PV:n, jonka PLL:ää ei muutettu, vasteet kuitenkin muuttuivat selkeästi epästabiilimpaan/värähtelevämpään suuntaan
  - Korostaa PLL:n roolia
- Nyt PV:illä identtiset säätöpiirit, vain säätöparametreja muutettu → eri säätömenetelmiin perustuvien PV:n vasteet tuovat uuden muuttujan
- Verkossa myös muita jännitteensäätölaitteita (tahtikoneet, käämikytkimet, SVC:t, STATCOM:t...), joita näissä tarkasteluissa ei huomioitu
- Epäsymmetrinen kuormitus saattaa häiritä PV:n jännitteensäätöä → tätä ei tutkittu, koska vaatii säädön uudelleen suunnittelun
- Suuntaajakytketty kuormitus lähellä voi aiheuttaa häiritseviä yliaaltoja
- Lyhyt 50 ms:n viive hetkellisessä suojauksessa tarkoitti käytännössä sitä, että PV:t eivät ehtineet juurikaan syöttää vikavirtaa
  - PV:t irtikytketyivät nopeasti vian alkamisesta

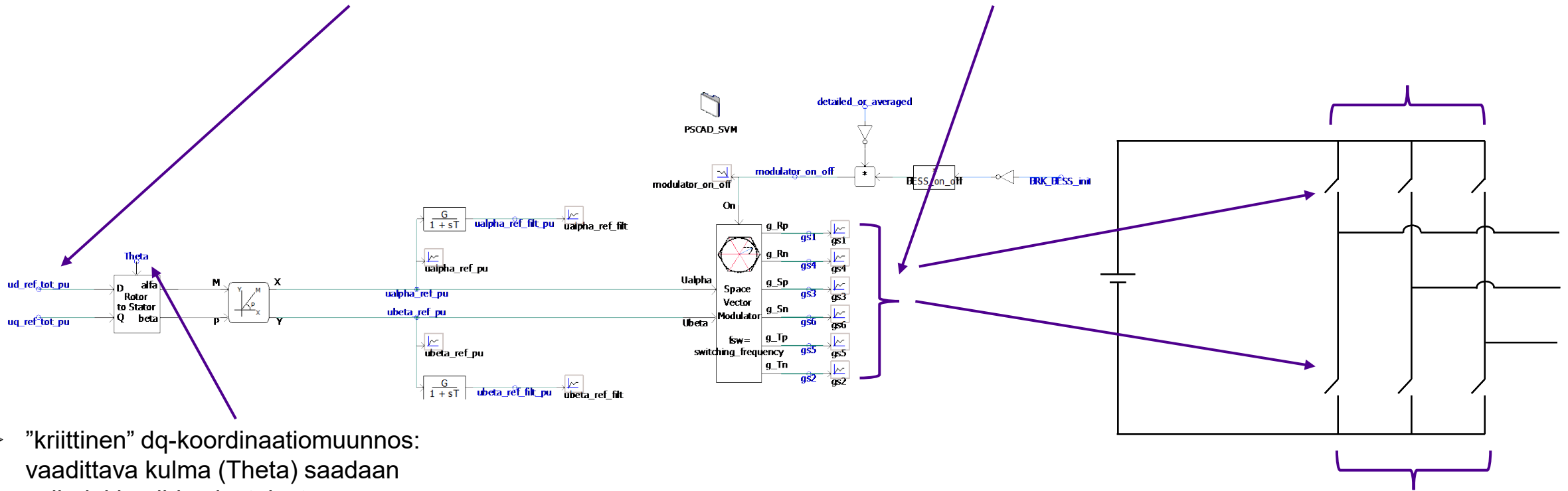


## E: EMT detailed vs averaged –mallinnuksen eroja

- Molemmat mallinnustavat pohjautuvat EMT-mallinnukseen
- IGBT:n korkea kytkentätaajuus (useita kHz) tarkoittaa, että simuloinnin aika-askeleen on oltava pieni (luokkaa 10 us)
  - Simulointi kestää usein pitkään
  - Tarkoitus on korvata vaihtosuuntaajan kaikki IGBT:t ohjatuilla jännite- tai virtalähteillä
  - Korvaamalla IGBT:t jännitelähteillä simuloinnin aika-askelta voidaan kasvattaa ilman, että tulosten tarkkuus kärsii merkittävästi
- Riippumatta simuloinnin aika-askeleesta: kun IGBT:t korvataan jännitelähteillä, niin kytkentätaajuiset ilmiöt menetetään väistämättä
- Jos tarkoitus on tutkia yksittäisen vaihtosuuntaajan tarkkoja vasteita esim. verkon vikatilanteissa, niin averaged-mallinnus ei ole välttämättä sopiva, koska:
  - Vaihtosuuntaajan säätöpiirit, kytkentätaajuiset tapahtumat ja verkon taajuusriippuvuus muodostavat mahdollisesti resonanssiipiirejä
    - Tällöin vaihtosuuntaajan säätö ja kokonaisvaste voi muuttua huomattavasti, jolloin voidaan tarvita erityisesti esim.:
      - Passiivista vaimennusta (vastukset suodattimissa)
      - Aktiivista vaimennusta (vaimennus on lisätty säätöpiireihin)
- Averaged-mallinnus voi olla hyvä vaihtoehto, kun on tarkoitus tutkia laajempaa verkkoa, jossa useita tuotantoyksiköitä
  - Tahtikoneita ja/tai...
  - Vaihtosuuntaajia

# E: EMT detailed vs averaged –mallinnuksen eroja

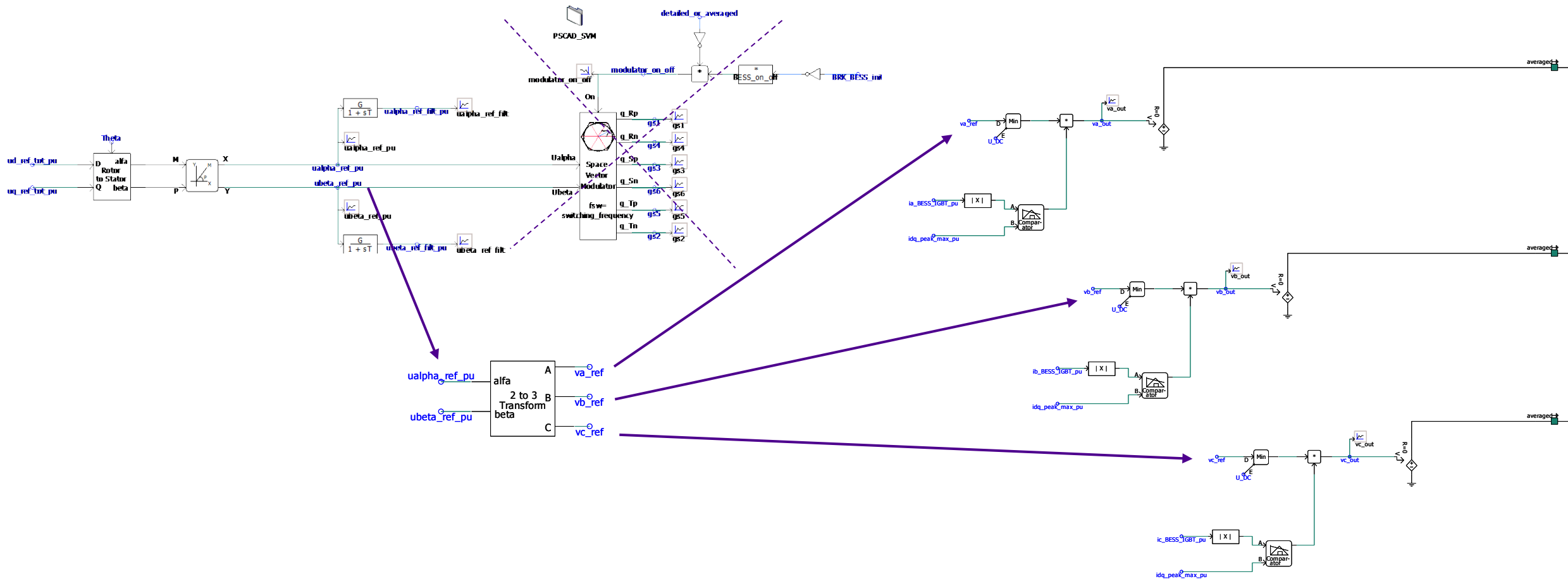
- Detailed-malleissa jännitereferenssivektoreiden avulla muodostetaan kytkentäpulsseja IGBT:ille



- ”kriittinen” dq-koordinaatiomuunnos: vaadittava kulma (Theta) saadaan vaihelukkopiirin ulostulosta
- Yllä on kuvattu säätöpiirien aivan ns. loppuosa, ts. myös sisin osa

# E: EMT detailed vs averaged –mallinnuksen eroja

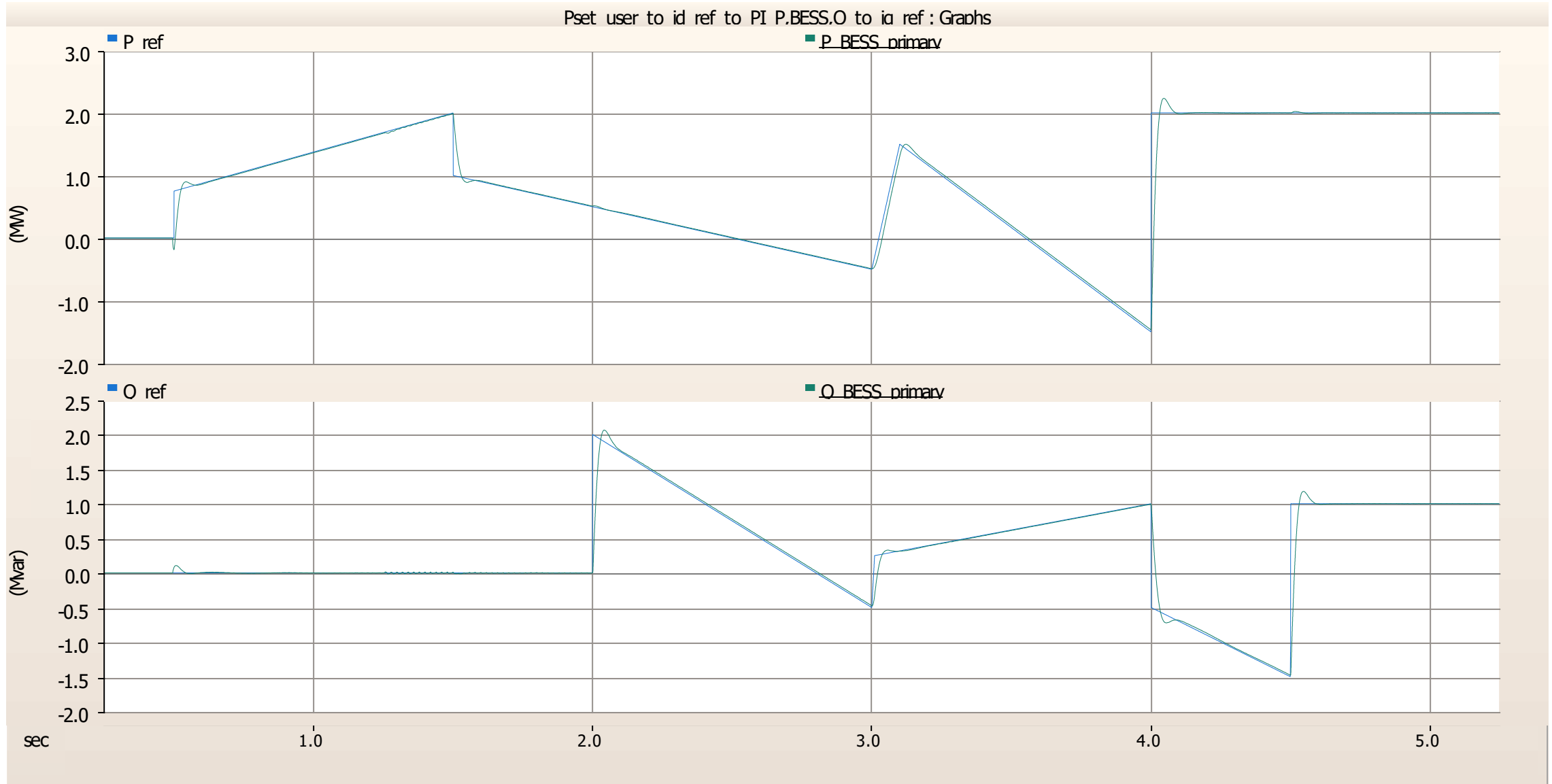
- Averaged-mallinnuksessa jännitteen ohjearvot muunnetaan dq-tasosta abc-tasoon eikä kytkentäpulsseja muodosteta
- Muuten säätöpiirien lohkot ovat identtiset



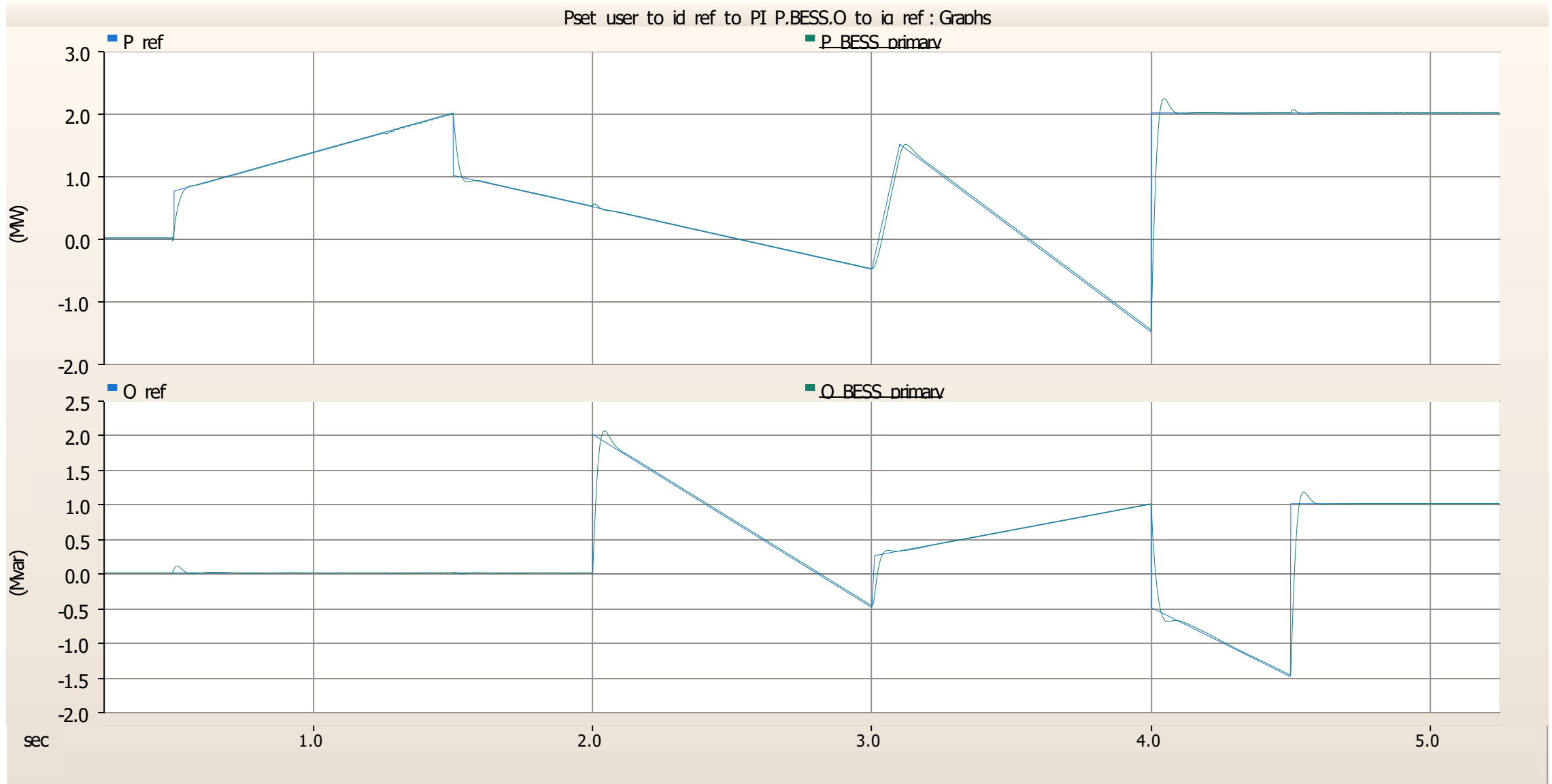
## E – 1: Detailed vs averaged –mallinnuksen eroja

- Seuraavilla kalvoilla yksi BESS syöttää pätö- ja loistehoa verkkoon ennalta määrättyjen teho-ohjeiden mukaisesti
- Verkossa ei muita tuotantoyksiköitä tai kuormia
  - Vertaillaan vain BESS:n tehovasteita, kun BESS mallinnetaan
    - Detailed-versiona 10 us simuloinnin aika-askeleella
    - Averaged-versiona, kun aika-askeleet ovat 10 us, 25 us, 50 us, 75 us ja 100 us
- Simuloinnin kokonaispituus on 5.25 s (PSCAD:ssä)

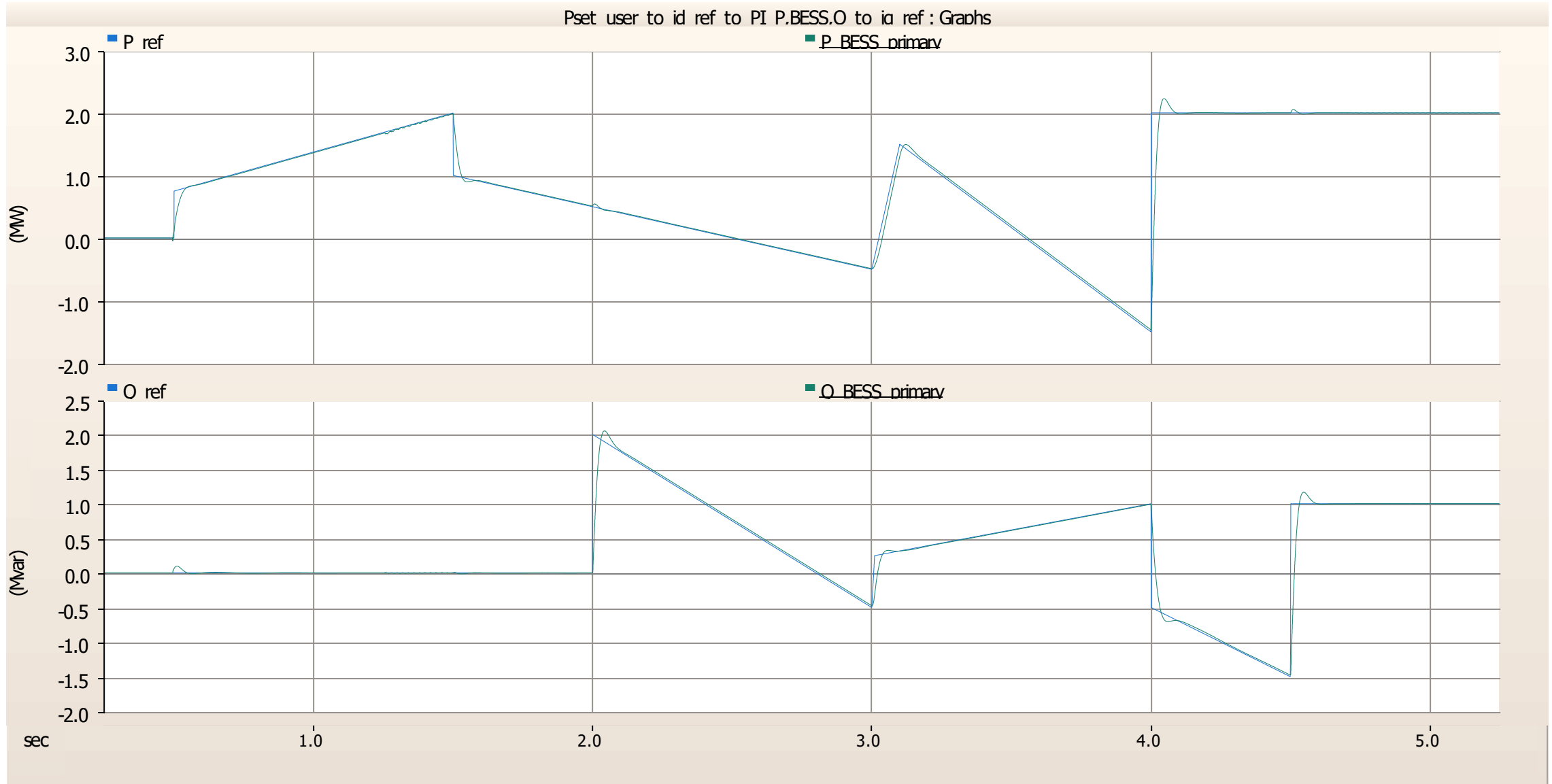
# Detailed, 1 BESS – 10 us: 3 min 46 s



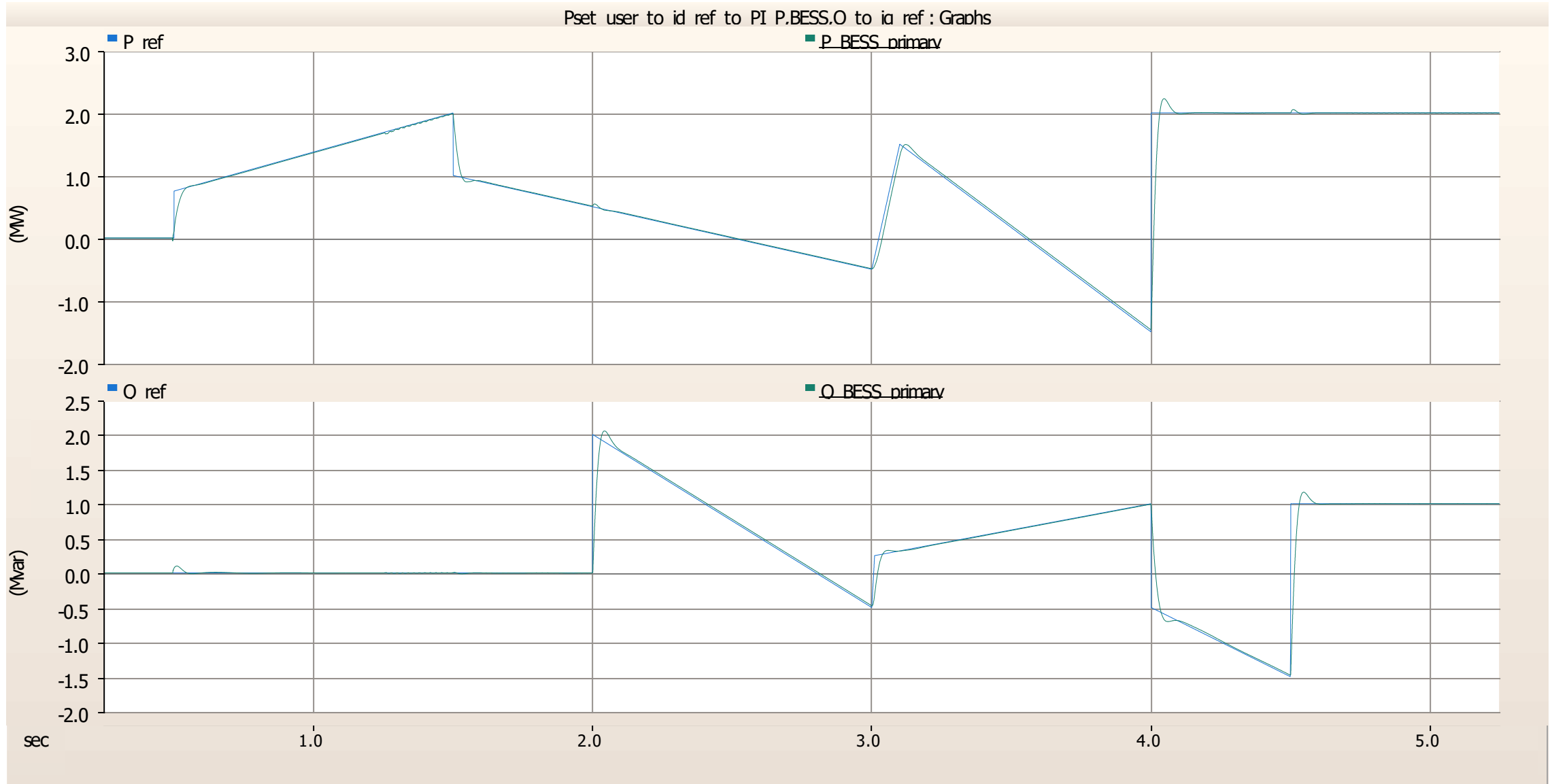
# Averaged, 1 BESS – 10 us: 1 min 27 s



# Averaged, 1 BESS – 25 us: 40 s

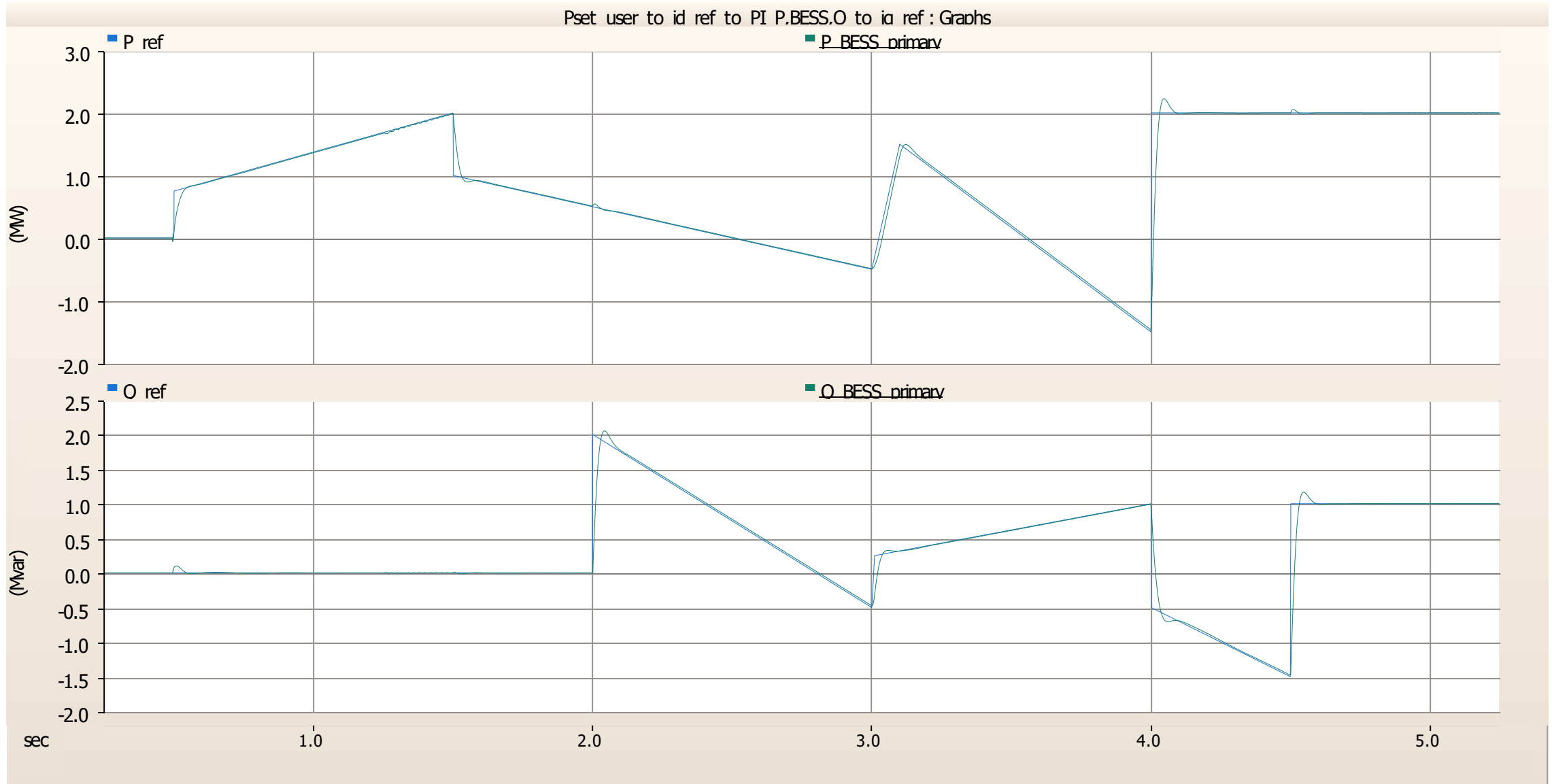


# Averaged, 1 BESS – 50 us: 21 s

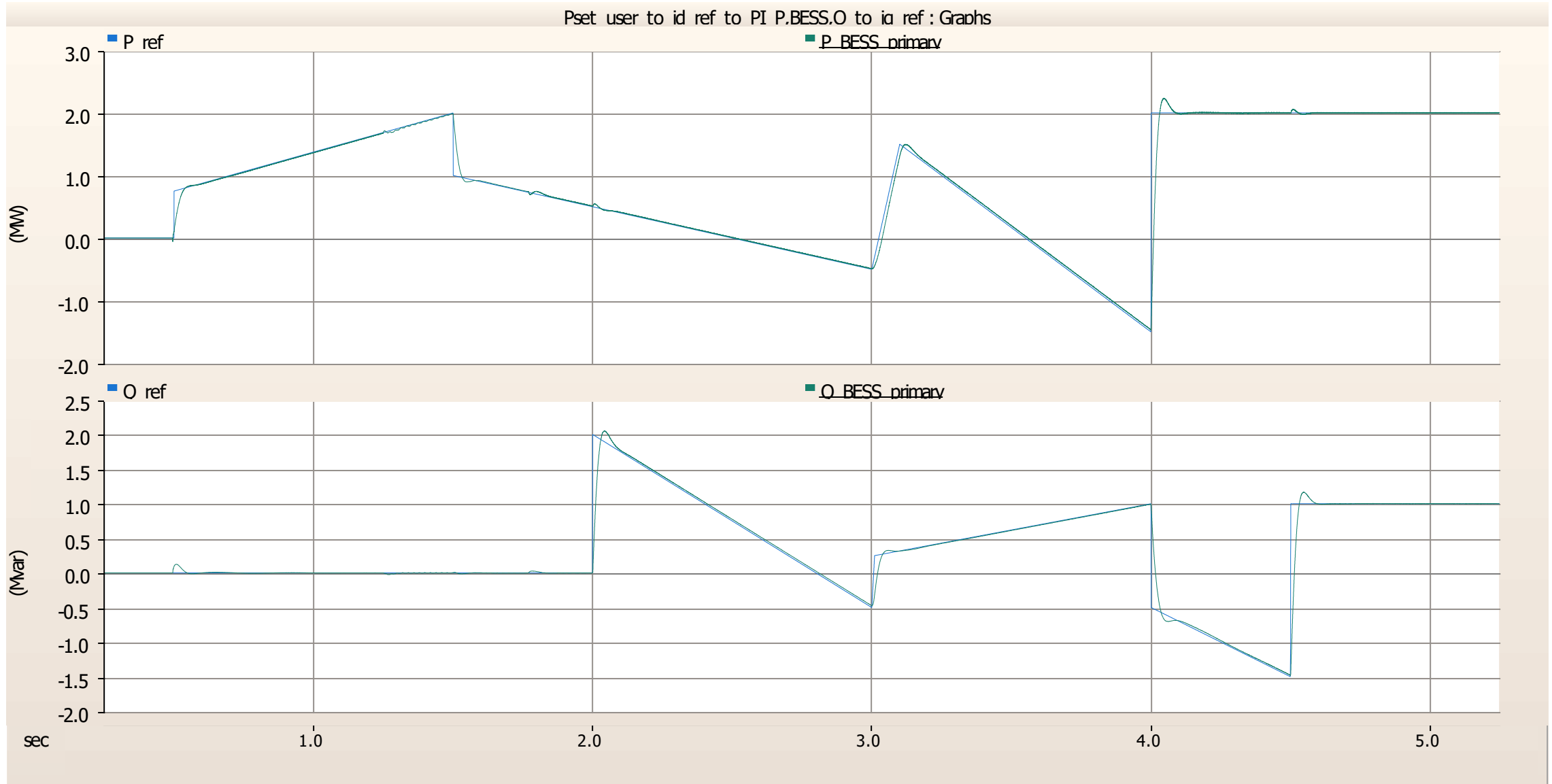




# Averaged, 1 BESS – 75 us: 13 s



# Averaged, 1 BESS – 100 us: 10 s



# E – 1: Detailed vs averaged –mallinnuksen eroja

## Johtopäätöksiä

- Samalla simuloinnin aika-askeleella (10 us) detailed- ja averaged-mallin vasteet ovat lähes identtiset
  - Tarkasteluissa oli kuitenkin vain yksi tuotantoyksikkö (BESS) taustaverkkoa vasten
- Simulointiajat (molemmat 10 us):
  - detailed 3 min 46 s
  - averaged 1 min 27 s
    - ero 2 min 19 s (todellista aikaa)
- 100 us aika-askeleella averaged-mallissa alkaa näkyä jo aika-askeleen suuruudesta johtuvaa ”ei-todellista” värähtelyä
- Pelkkiä ohjattuja jännite- ja virtalähteitä 100 us on täysin riittävä, mutta BESS:n mallissa on useita eri sisäkkäisiä säätöpiirejä, rajoituksia, laskutoimituksia, joten tarvittava simuloinnin aika-askel määräytyy mallinnustavan (detailed vs averaged) ja säätöpiirien monimutkaisuudesta
- Kokeilemalla ja aikaisemman kokemuksen perusteella on löydettävissä riittävän pieni aika-askel
- Aiempien averaged-mallien ajoissa (toinen projekti), joissa on ollut samoja tuotantoyksiköitä ja säätöpiirejä, aika-askel on ollut 25 us
  - Näissä tarkasteluissa on kuitenkin ollut useampi tuotantoyksikkö
  - Jos simuloinneissa on vain 1 BESS (averaged) ja taustaverkko, niin maksimiaika-askel luokkaa 50 us – mieluummin 25 us
  - Vian aikaiset vasteet on myös tarkasteltava, koska suurissa muutostilanteissa vasteiden ero todennäköisesti kasvaa

## E – 1: Detailed vs averaged –mallinnuksen eroja

- Alla on koottuna luettelo edellisten kalvojen tuloksista kuinka paljon todellista aikaa kuluu, kun yksi mallinnetaan yksi BESS detailed- ja averaged-tavoilla
  
- Simuloinnin kokonaispituus on 5.25 s (PSCAD:ssä)
  

  1. Detailed, simuloinnin aika-askel 10 us – oikea kulunut aika simulointiin: 3 min 46 s
  
  2. Averaged, simuloinnin aika-askel 10 us: 1 min 27 s
  
  3. Averaged, simuloinnin aika-askel 25 us: 40 s
  
  4. Averaged, simuloinnin aika-askel 50 us: 21 s
  
  5. Averaged, simuloinnin aika-askel 75 us: 13 s
  
  6. Averaged, simuloinnin aika-askel 100 us: 10 s

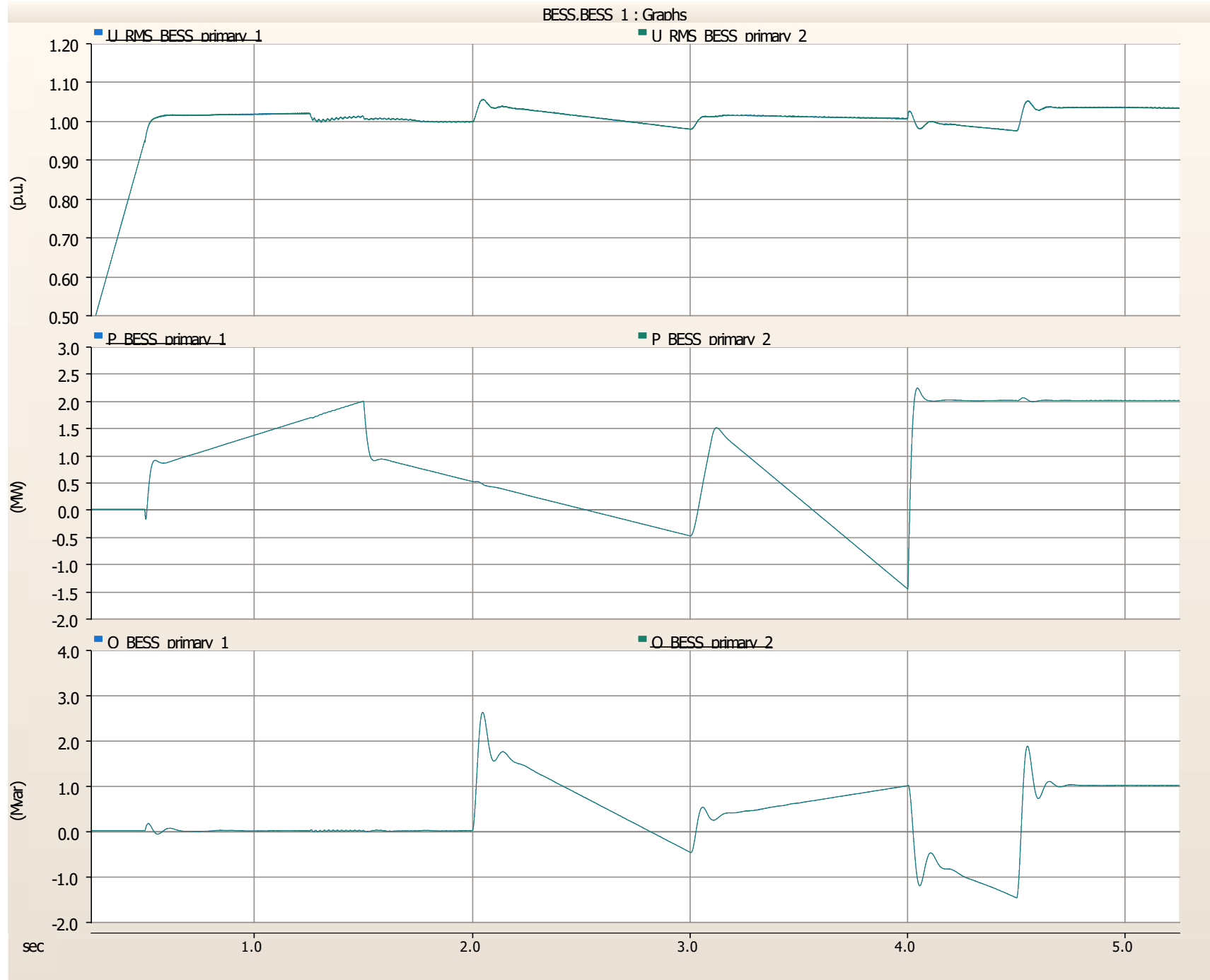
## E – 2: Detailed vs averaged –mallinnuksen eroja

- Seuraava aikavertailu koskee 2 identtistä BESS:iä, jotka syöttävät syöttää pätö- ja loistehoa verkkoon ennalta määrättyjen teho-ohjeiden mukaisesti
  - Sama toision liitännätpiste → yhtä kaukana taustaverkosta
  - Verkossa ei muita tuotantoyksiköitä tai kuormia
- Simuloinnin kokonaispituus on 5.25 s (PSCAD:ssä)
- Detailed, 2 BESS:iä, simuloinnin aika-askel 10 us – oikea kulunut aika simulointiin: 10 min 35 s
- Averaged, 2 BESS:iä, simuloinnin aika-askel 10 us – oikea kulunut aika simulointiin: 2 min 25 s
- Vertailuksi vielä yhden BESS:n simulointiin kuluneet ajat:
  - Detailed, 1 BESS, simuloinnin aika-askel 10 us – oikea kulunut aika simulointiin: 3 min 46 s
  - Averaged, 1 BESS, simuloinnin aika-askel 10 us – oikea kulunut aika simulointiin: 1 min 27 s
- Yhden tuotantoyksiköiden lisäys lisää ratkaistavien yhtälöryhmien määrä ”exponentiaalisesti” (matriisien koko kasvaa, joita transponoidaan, käännellään jne.)
  - Yhden tuotantoyksiköiden lisäys simulointiin kasvaa luokkaa ”exponentiaalisesti” – ei vain kaksinkertaiseksi

## E – 3 : Detailed vs averaged –mallinnuksen eroja

- Mikroverkko toimii muun verkon rinnalla normaalisti toimintapisteessä, jossa:
  - Kaksi BESS:iä syöttää taustaverkkoon pätö- ja loistehoa verkkoon ennalta määrättyjen teho-ohjeiden mukaisesti
  - Verkossa myös kaksi tahtikonetta: 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
- Vertaillaan BESS:ien tehovasteita silloin, kun kaikki tuotantoyksiköt ovat kytkettyinä taustaverkkoon
  - Kahdella BESS:llä on sama toision liitännätpiste
  - Ovat yhtä kaukana taustaverkosta

- BESS 1: detailed
- BESS 2: detailed
- Simuloinnin aika-askel: 10 us
- 2 tahtigeneraattoria

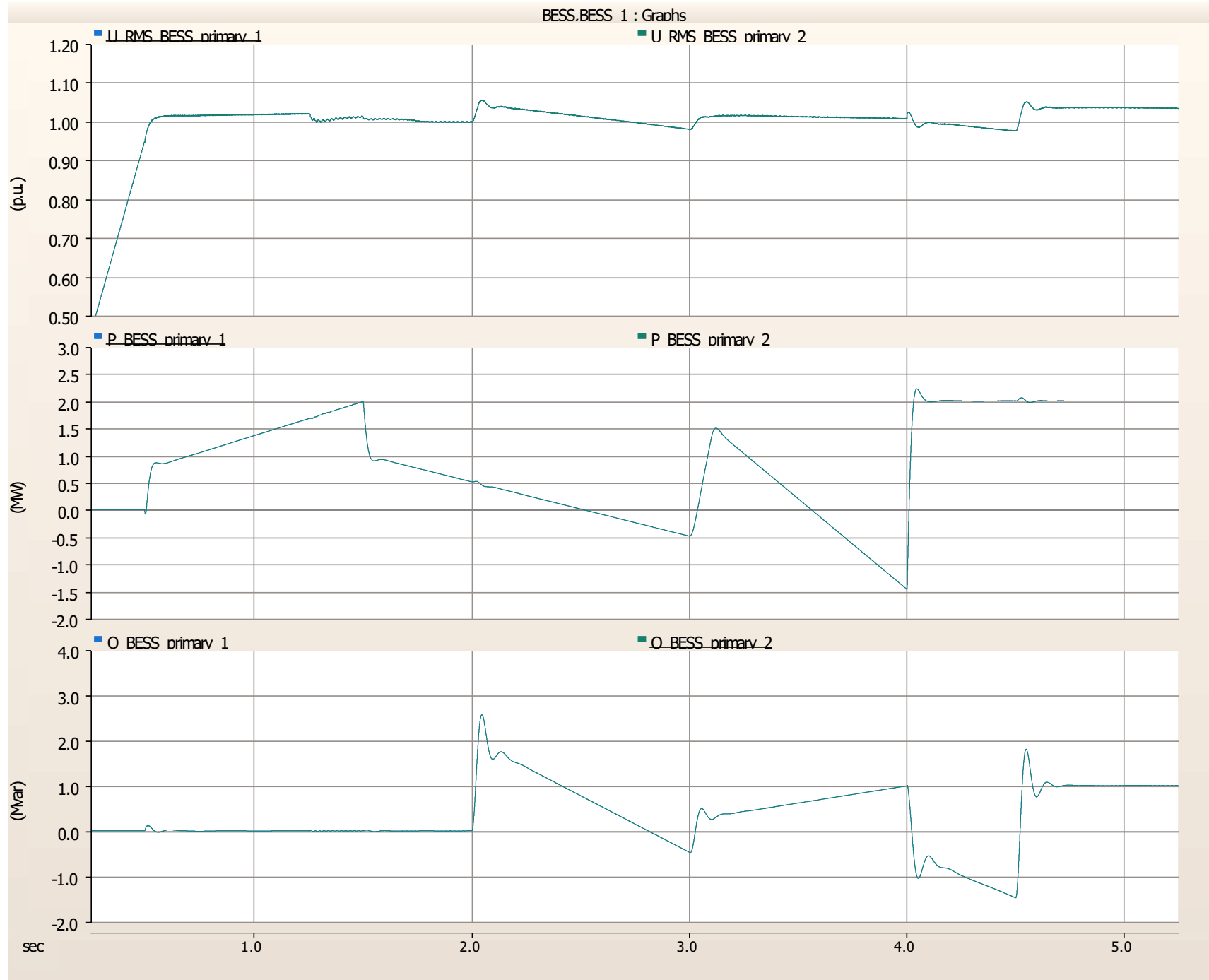


➤ Samat pätöteho-ohjeavot

➤ Samat loisteho-ohjeavot

i\_time\_protection: off

- BESS 1: averaged
- BESS 2: averaged
- Simuloinnin aika-askel: 10 us
- 2 tahtigeneraattoria



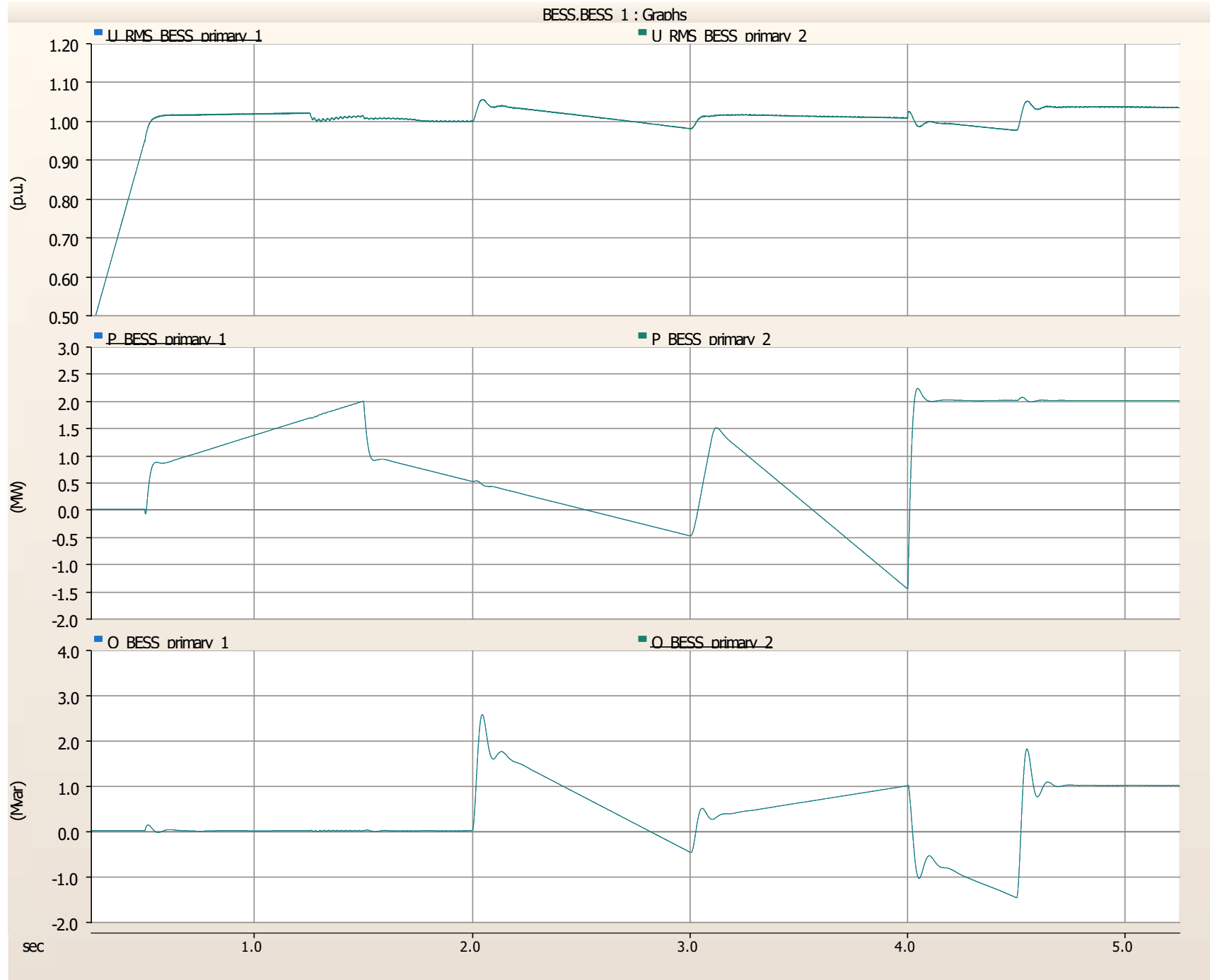
➤ Samat pätöteho-ohjeavot

➤ Samat loisteho-ohjeavot

i\_time\_protection: off



- BESS 1: averaged
- BESS 2: averaged
- Simuloinnin aika-askel: 25 us
- 2 tahtigeneraattoria

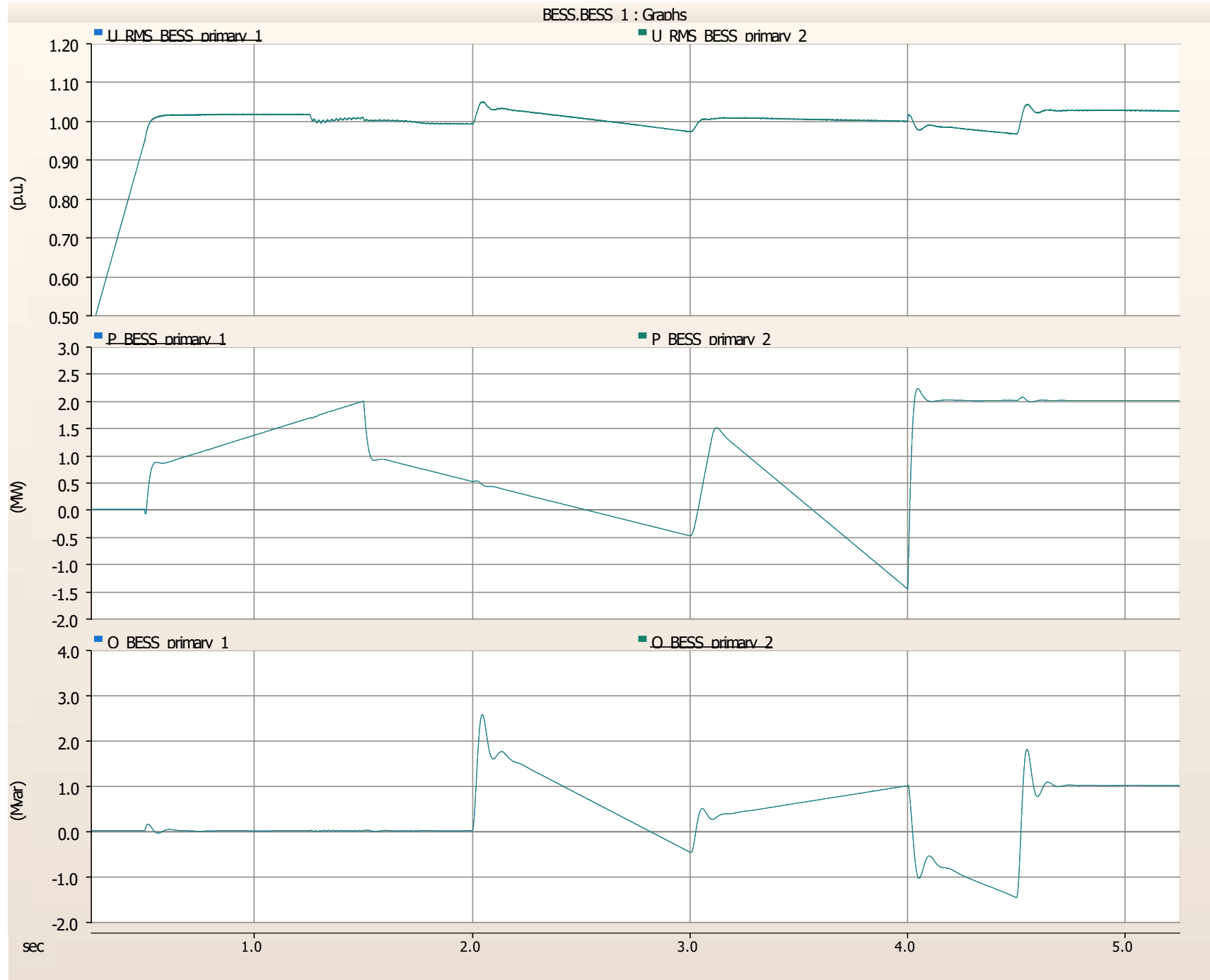


➤ Samat pätöteho-ohjeavot

➤ Samat loisteho-ohjeavot

i\_time\_protection: off

- BESS 1: averaged
- BESS 2: averaged
- Simuloinnin aika-askel: 50 us
- 2 tahtigeneraattoria

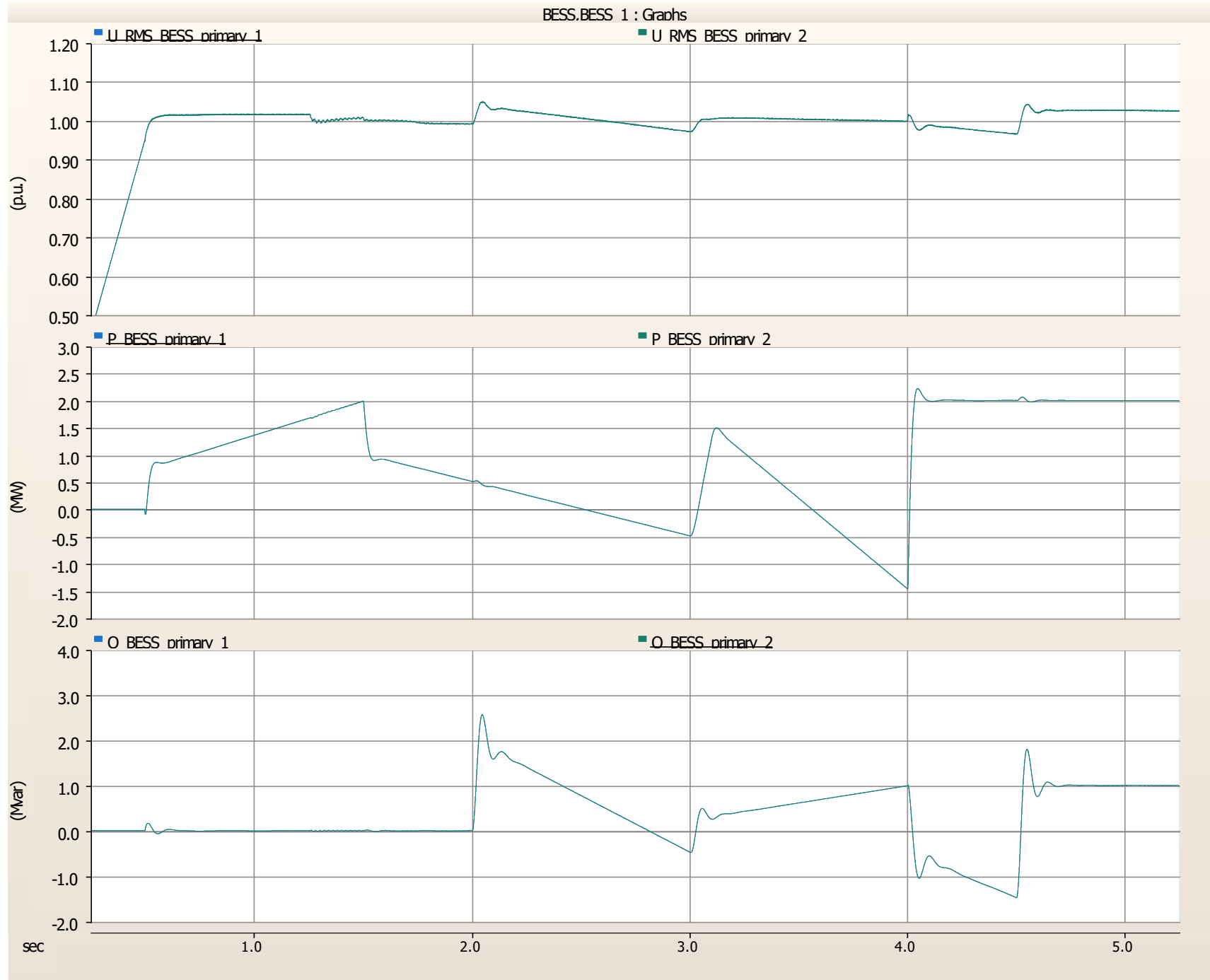


➤ Samat pätöteho-ohjeavot

➤ Samat loisteho-ohjeavot

i\_time\_protection: off

- BESS 1: averaged
- BESS 2: averaged
- Simuloinnin aika-askel: 75 us
- 2 tahtigeneraattoria

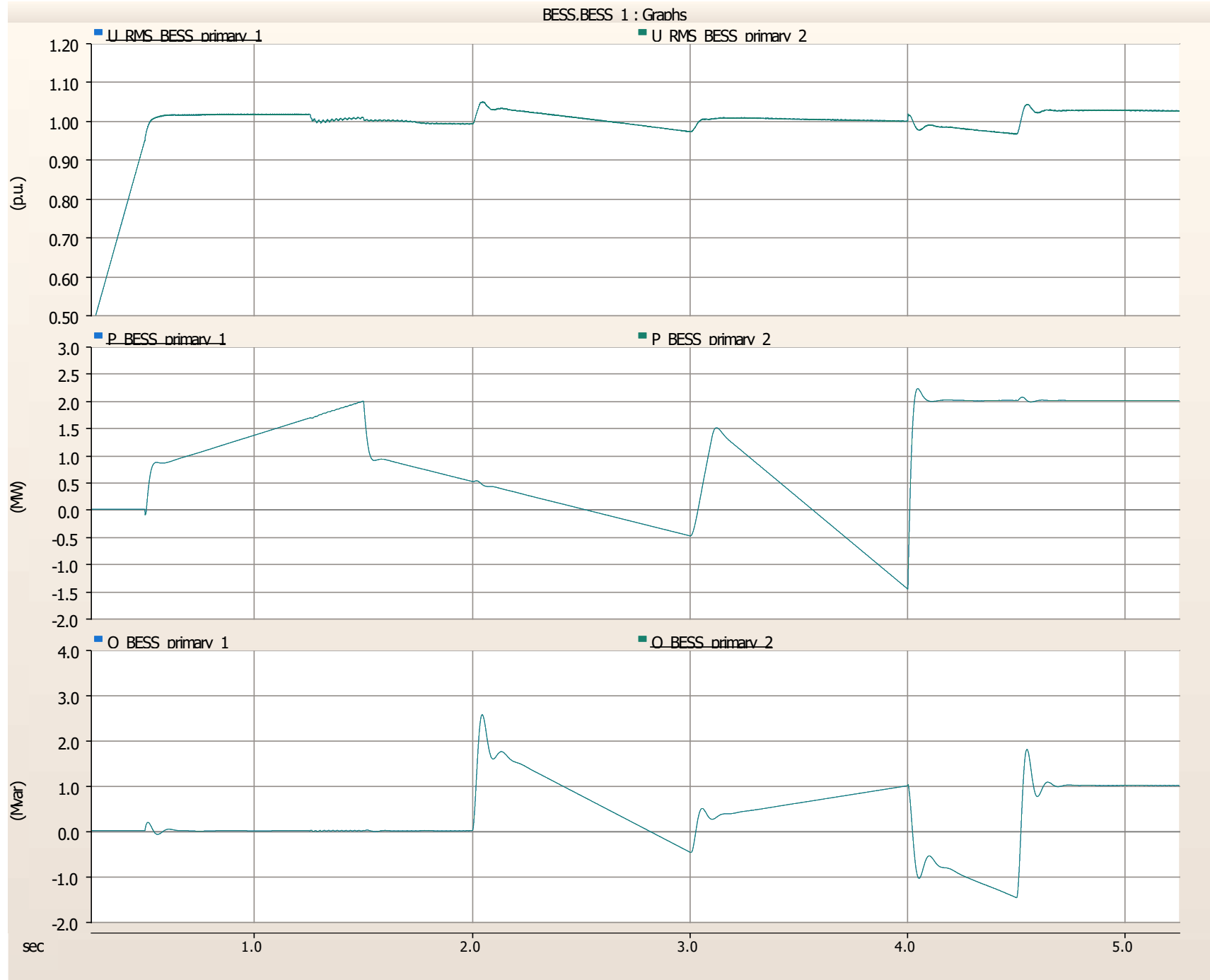


➤ Samat pätöteho-ohjeavot

➤ Samat loisteho-ohjeavot

i\_time\_protection: off

- BESS 1: averaged
- BESS 2: averaged
- Simuloinnin aika-askel: 100 us
- 2 tahtigeneraattoria



➤ Samat pätöteho-ohjeavot

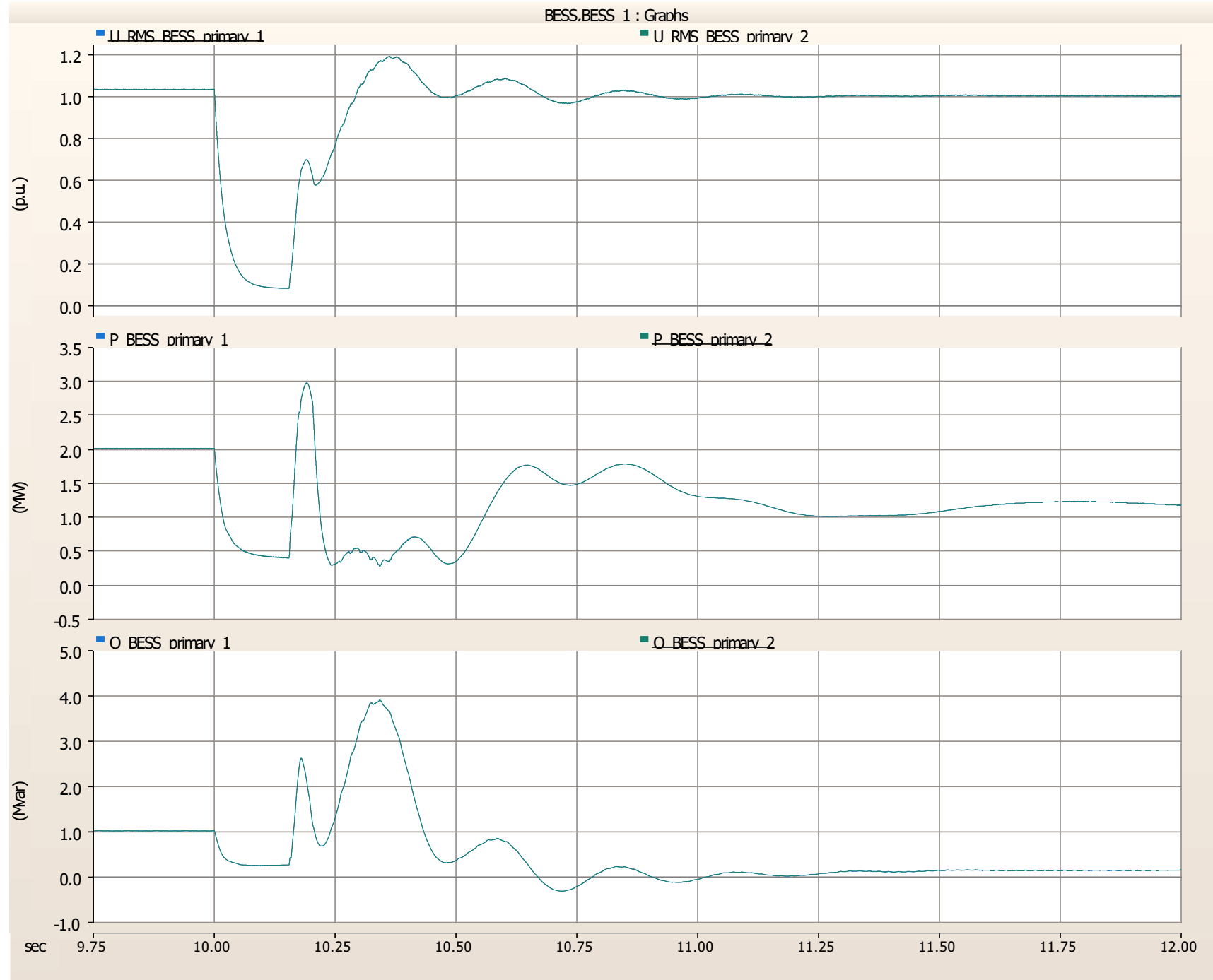
➤ Samat loisteho-ohjeavot

i\_time\_protection: off

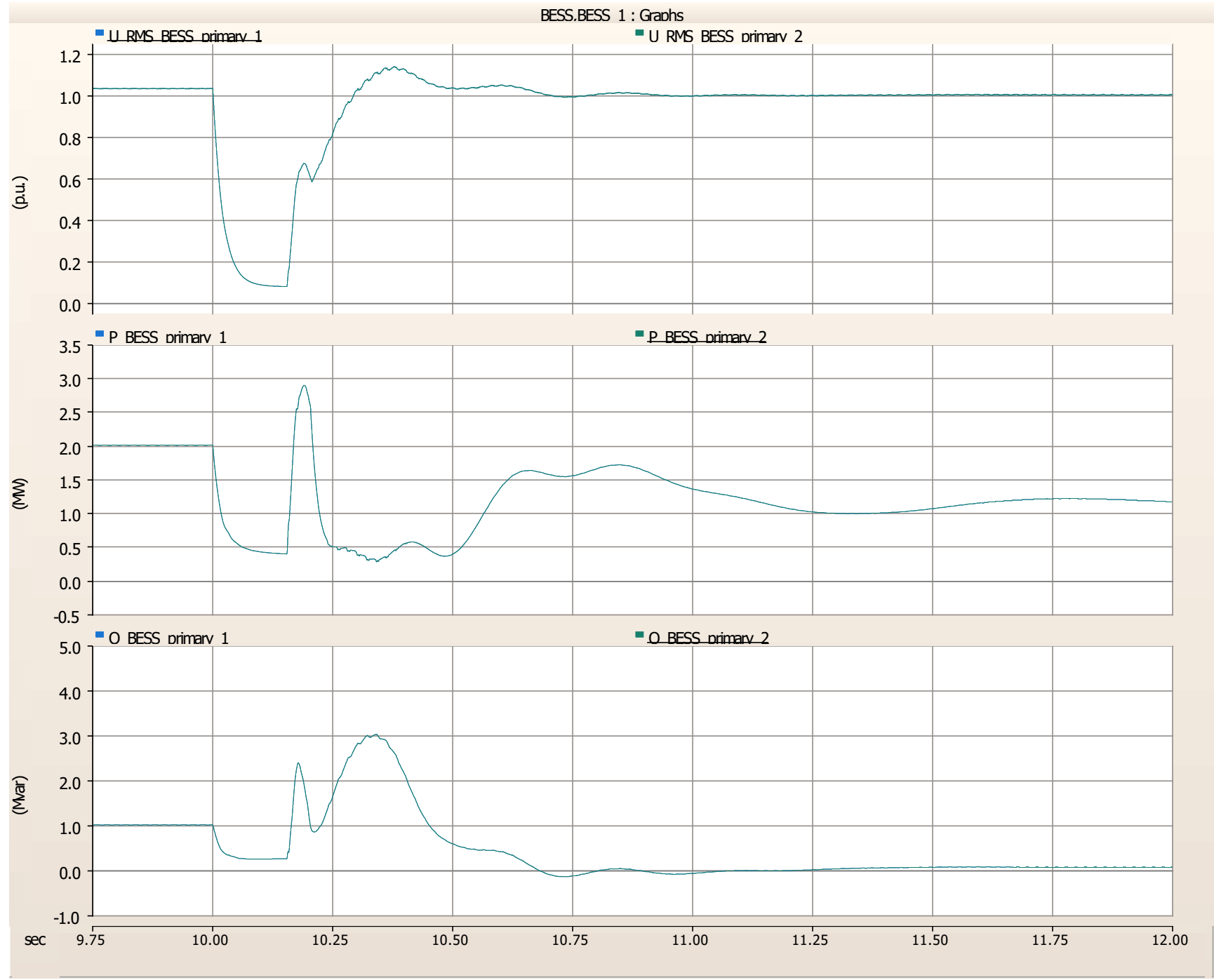
## E – 4: Detailed vs averaged –mallinnuksen eroja

- Tämä on sama tapahtumaketku, kuin A - 1a ilman PV:tä ja lisätyillä viiveillä
  
- 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
  - 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
  
- 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 liitännätpisteen (Point of Common Coupling, PCC) jännite laskee
  
- 5. Sitten, kun PCC RMS-jännite putoaa alle 0.85 p.u.:n, niin liitännätpisteessä 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
  
- 6. Katkaisijan avausviive on 150 ms ja BESS:n tiedonsiirtoviive on 50 ms
  - Saarekoituminen

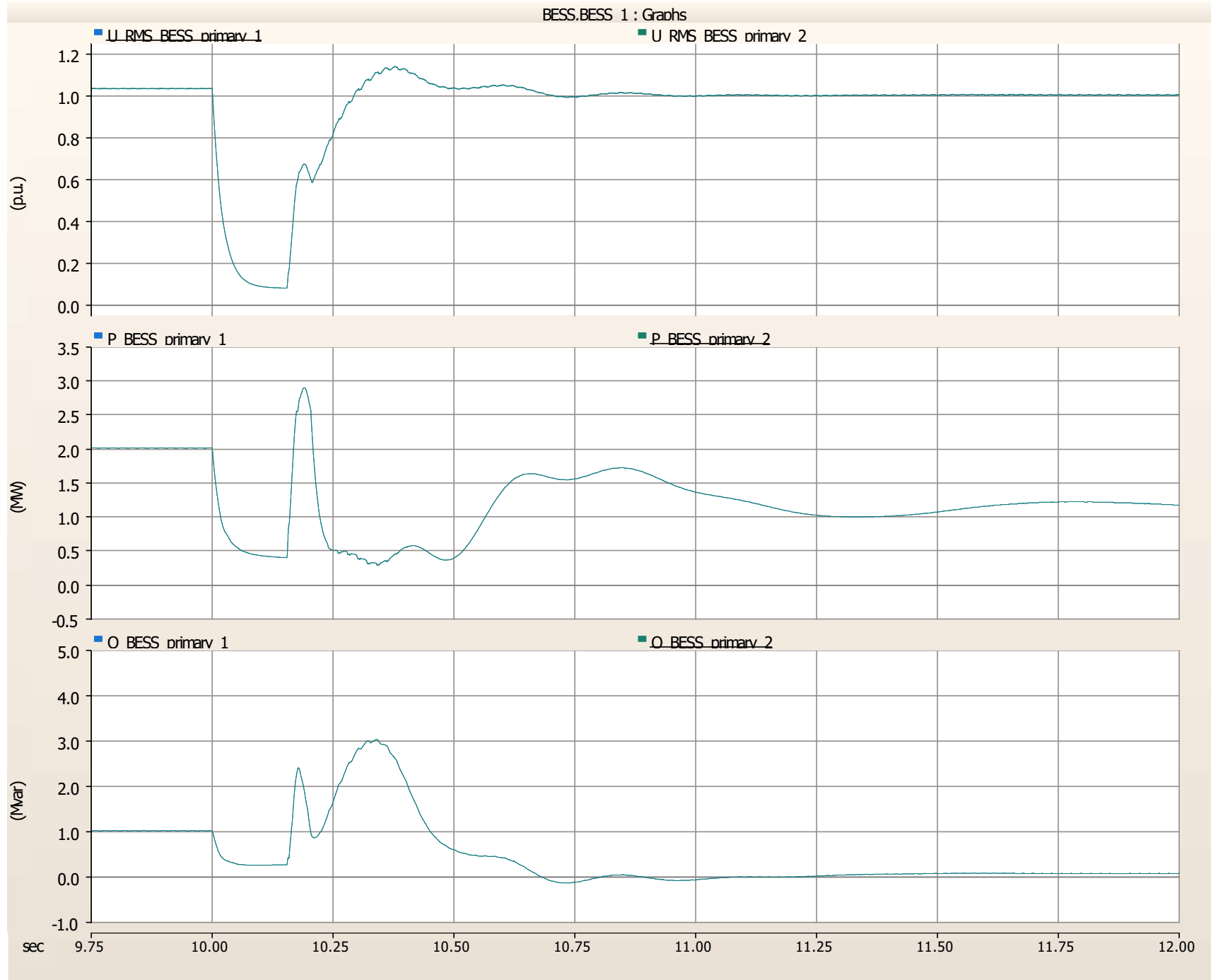
- BESS 1: detailed
- BESS 2: detailed
- Simuloinnin aika-askel: 10  $\mu$ s
- 2 tahtigeneraattoria
- PSCAD: 0...12 s
- 42 min 12 s
- 150 ms / 50 ms



- BESS 1: averaged
- BESS 2: averaged
- Simuloinnin aika-askel: 10  $\mu$ s
- 2 tahtigeneraattoria
- PSCAD: 0...12 s
- 9 min 22 s
- 150 ms / 50 ms

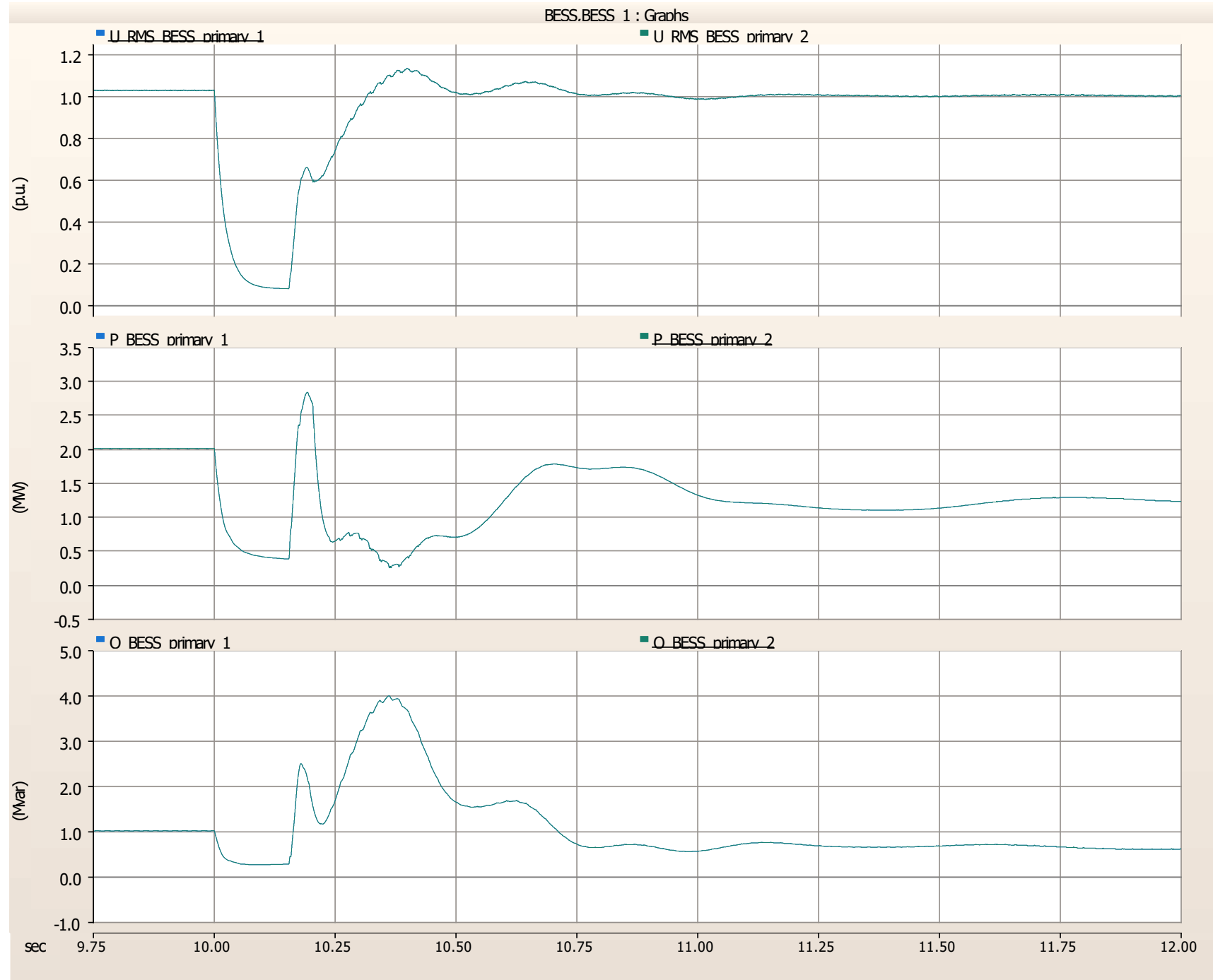


- BESS 1: averaged
- BESS 2: averaged
- Simuloinnin aika-askel: 25  $\mu$ s
- 2 tahtigeneraattoria
- PSCAD: 0...12 s
- 4 min 8 s
- 150 ms / 50 ms

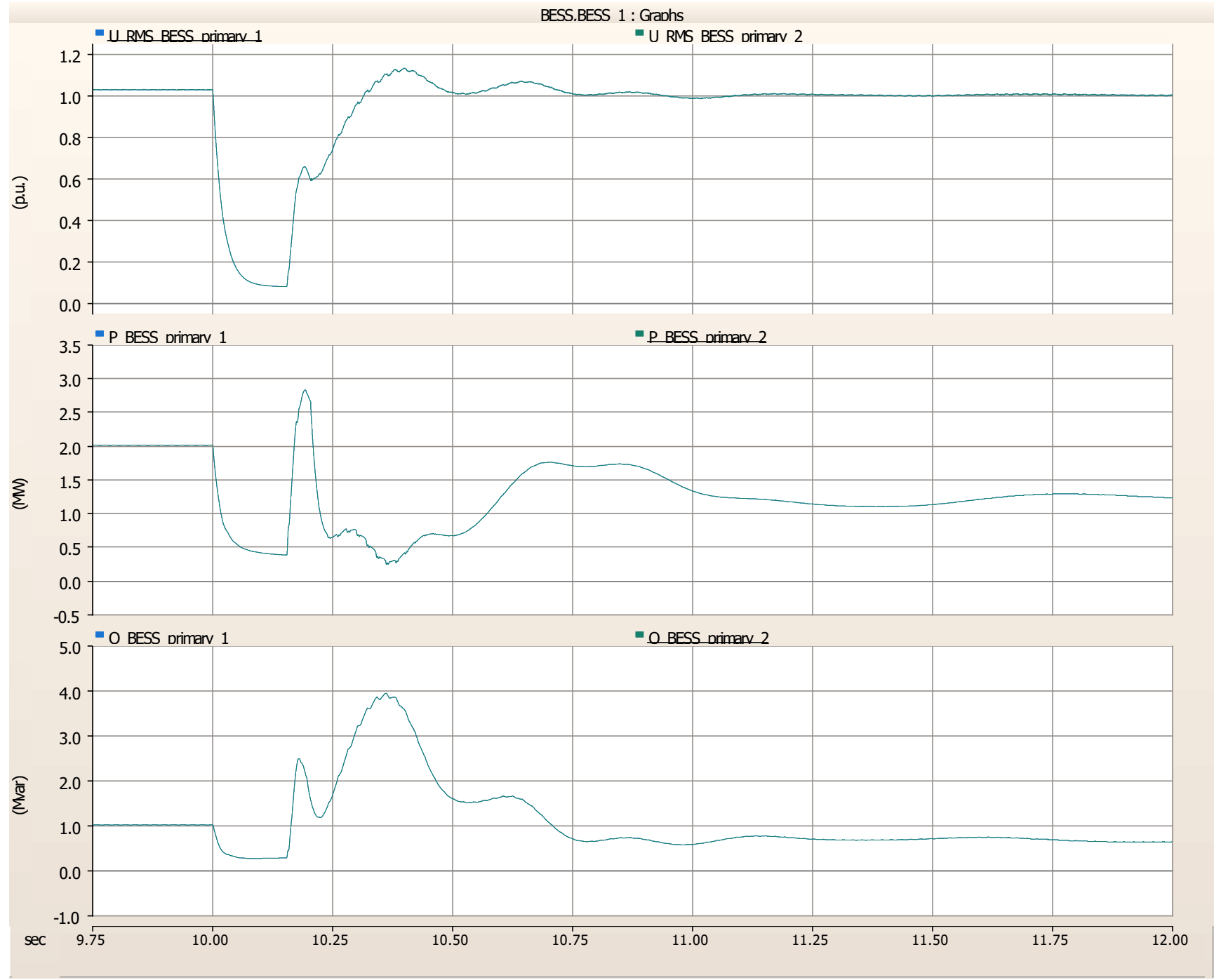




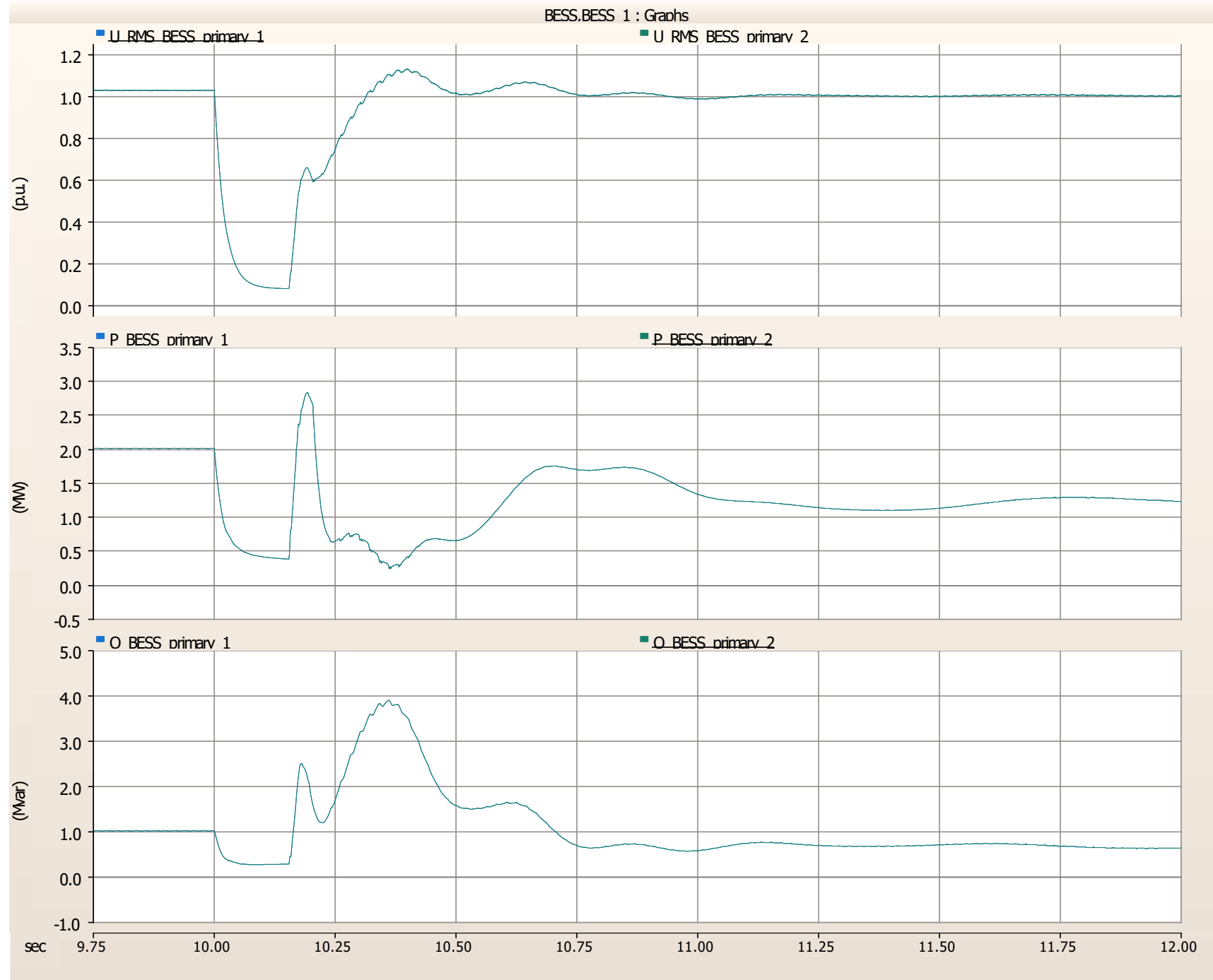
- BESS 1: averaged
- BESS 2: averaged
- Simuloinnin aika-askel: 50  $\mu$ s
- 2 tahtigeneraattoria
- PSCAD: 0...12 s
- 2 min 9 s
- 150 ms / 50 ms



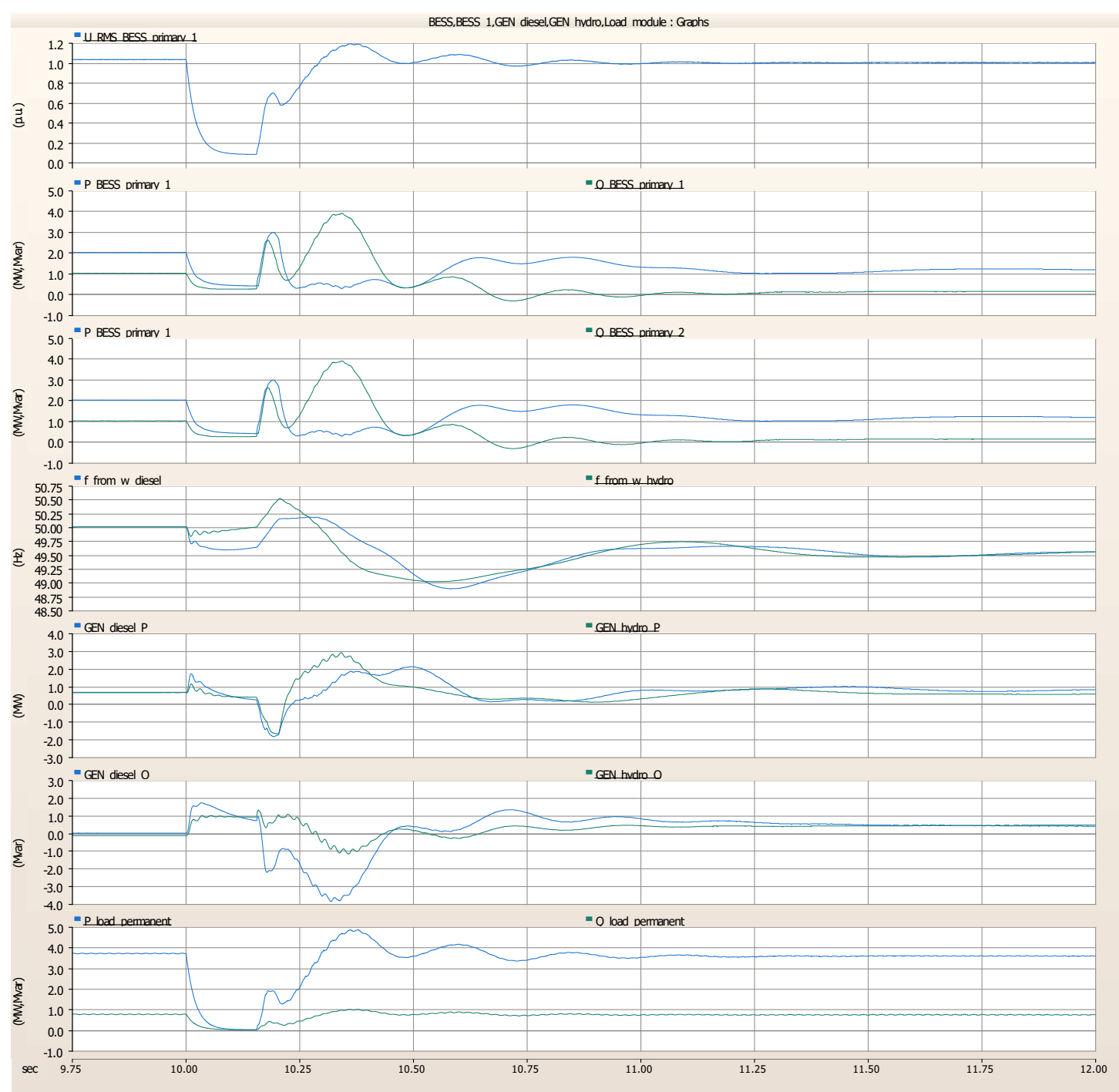
- BESS 1: averaged
- BESS 2: averaged
- Simuloinnin aika-askel: 75  $\mu$ s
- 2 tahtigeneraattoria
- PSCAD: 0...12 s
- 1 min 38 s
- 150 ms / 50 ms



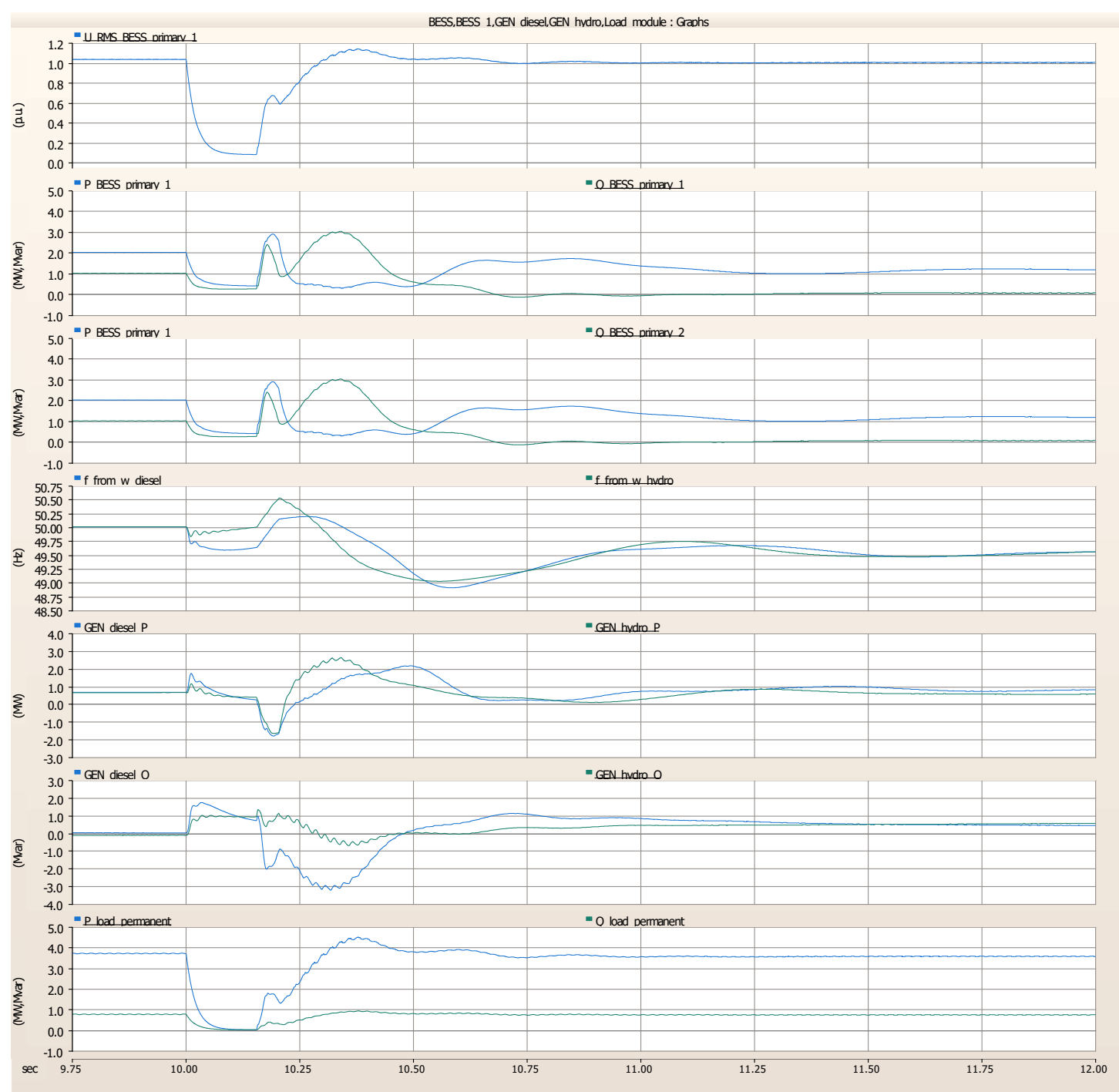
- BESS 1: averaged
- BESS 2: averaged
- Simuloinnin aika-askel: 100 us
- 2 tahtigeneraattoria
- PSCAD: 0...12 s
- 1 min 13 s
- 150 ms / 50 ms



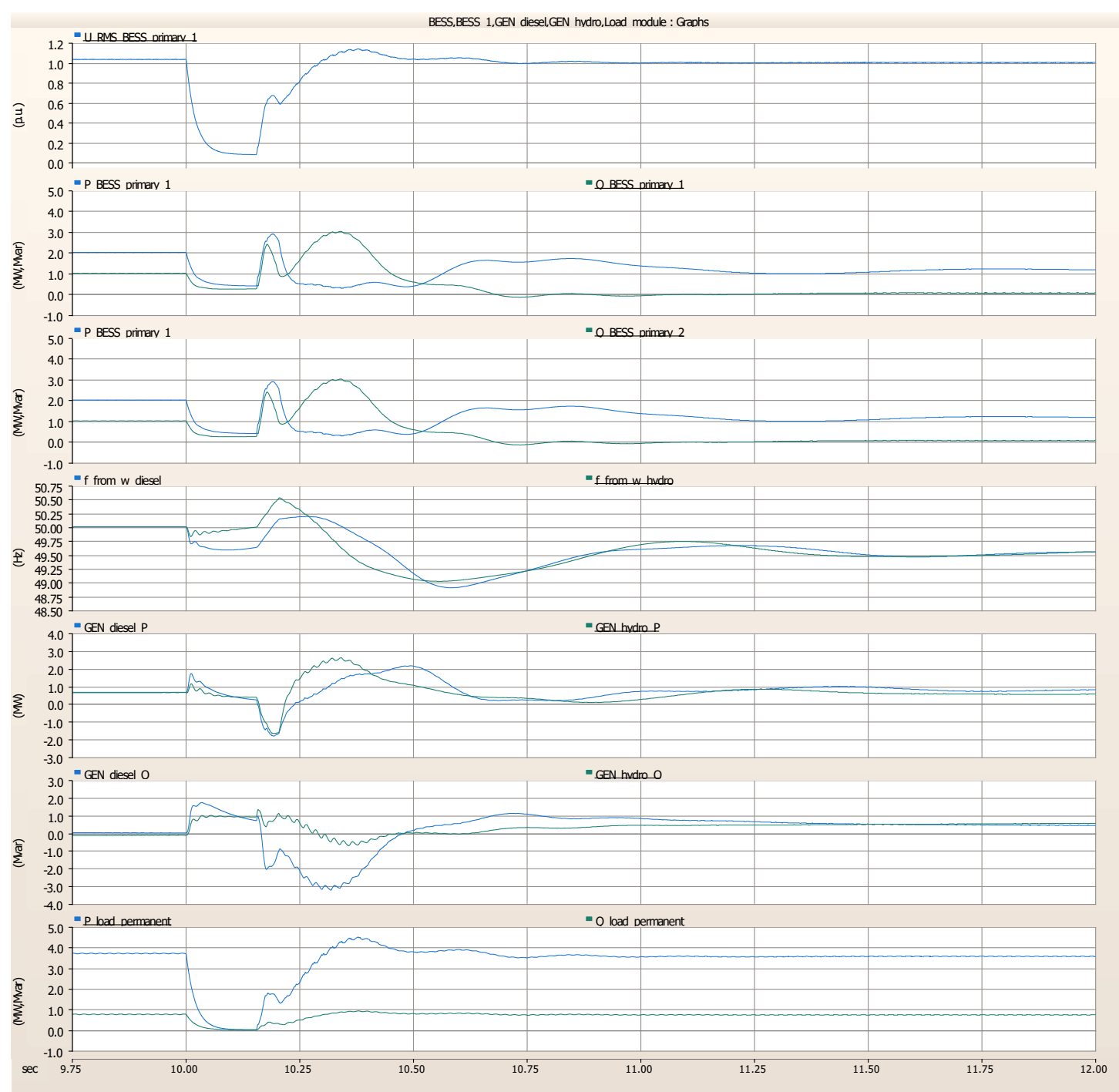
- BESS 1: detailed
- BESS 2: detailed
- Simuloinnin aika-askel: 10  $\mu$ s
- 2 tahtigeneraattoria
- PSCAD: 0...12 s
- 42 min 12 s
- 150 ms / 50 ms



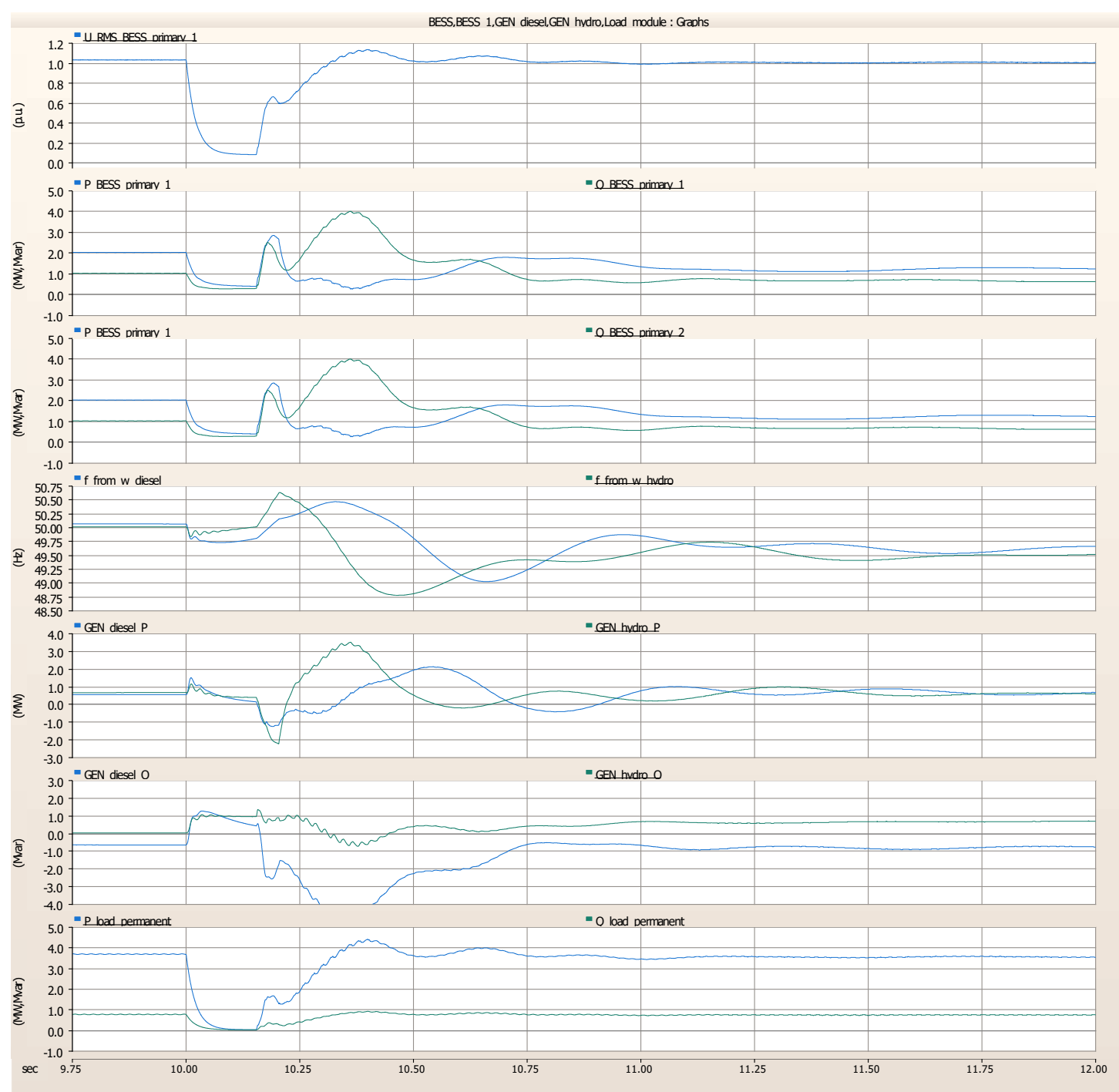
- BESS 1: averaged
- BESS 2: averaged
- Simuloinnin aika-askel: 10  $\mu$ s
- 2 tahtigeneraattoria
- PSCAD: 0...12 s
- 9 min 22 s
- 150 ms / 50 ms



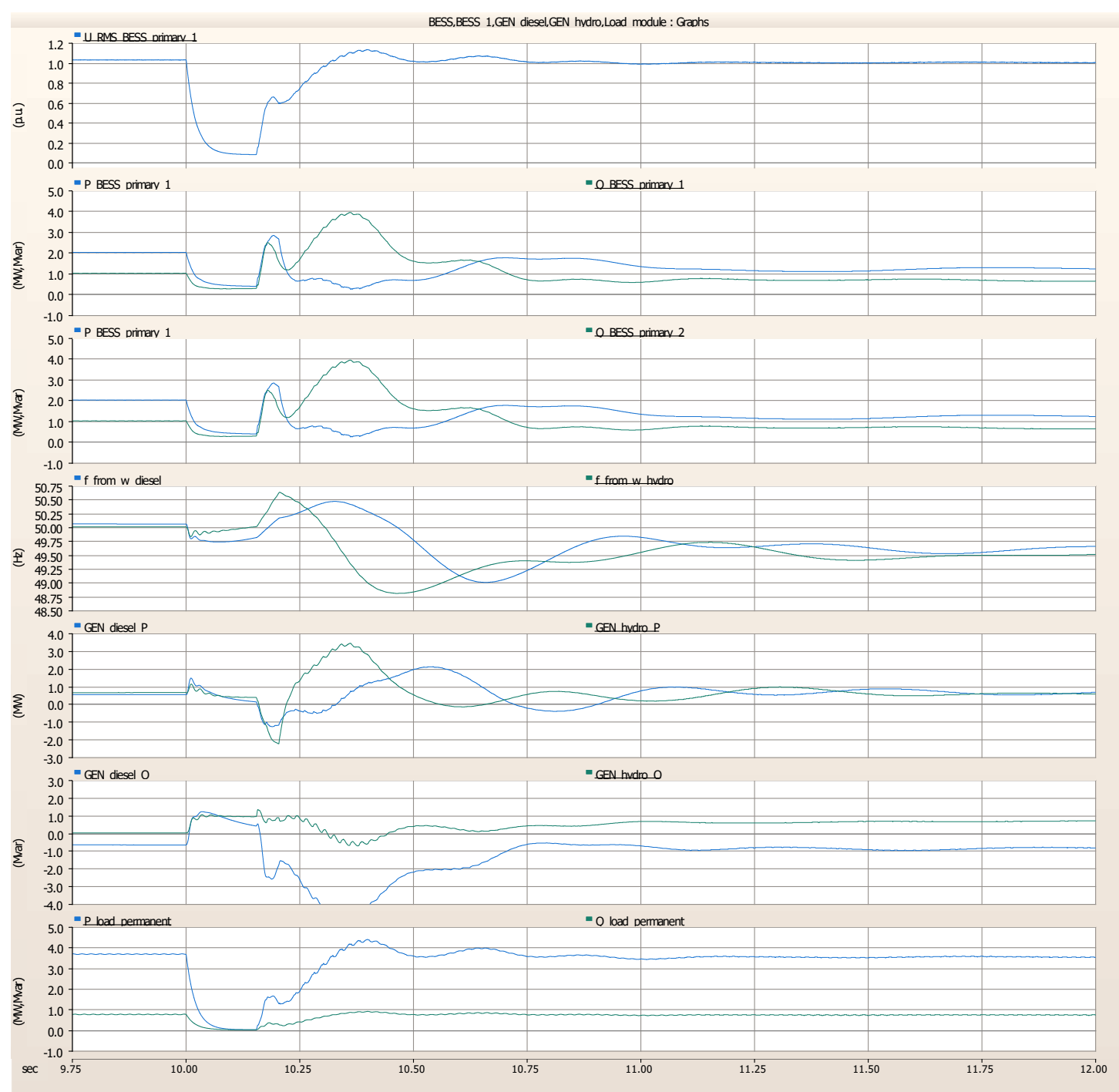
- BESS 1: averaged
- BESS 2: averaged
- Simuloinnin aika-askel: 25  $\mu$ s
- 2 tahtigeneraattoria
- PSCAD: 0...12 s
- 4 min 8 s
- 150 ms / 50 ms



- BESS 1: averaged
- BESS 2: averaged
- Simuloinnin aika-askel: 50  $\mu$ s
- 2 tahtigeneraattoria
- PSCAD: 0...15 s
- 2 min 9 s
- 150 ms / 50 ms

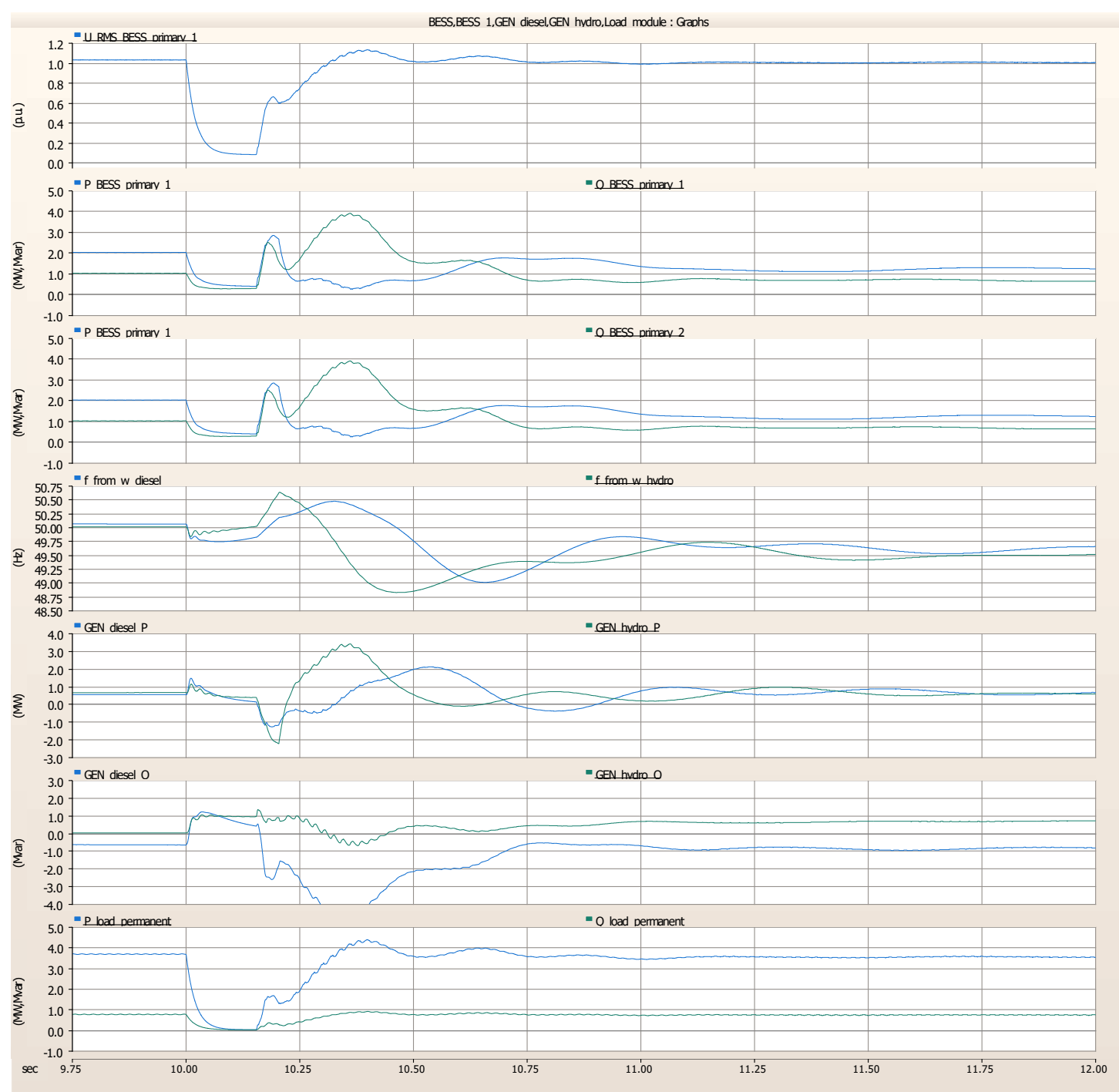


- BESS 1: averaged
- BESS 2: averaged
- Simuloinnin aika-askel: 75  $\mu$ s
- 2 tahtigeneraattoria
- PSCAD: 0...12 s
- 1 min 38 s
- 150 ms / 50 ms





- BESS 1: averaged
- BESS 2: averaged
- Simuloinnin aika-askel: 100 us
- 2 tahtigeneraattoria
- PSCAD: 0...12 s
- 1 min 13 s
- 150 ms / 50 ms



## E – 4: Detailed vs averaged –mallinnuksen eroja

### Johtopäätöksiä

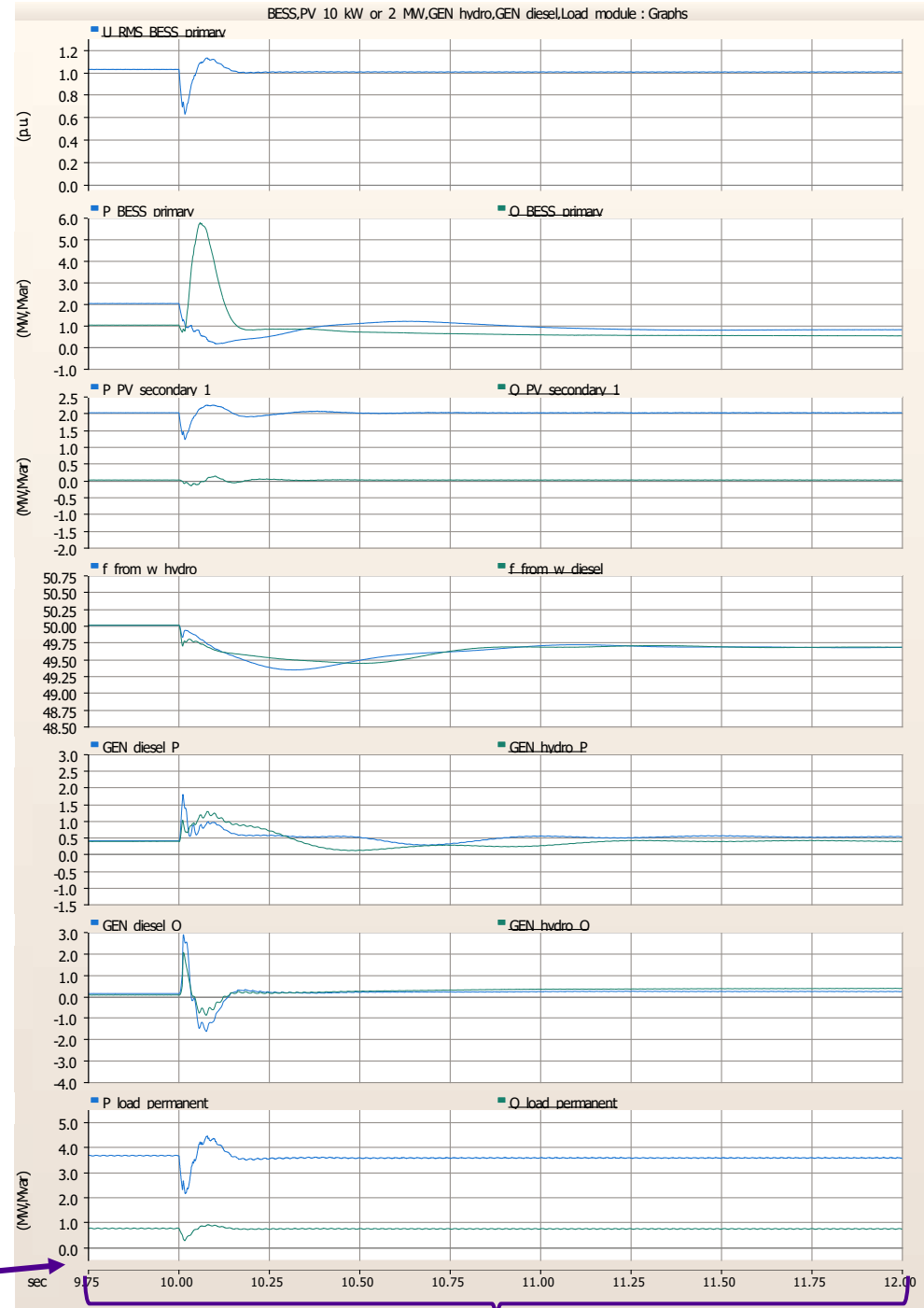
- E – 1 –tarkastelujen perusteella 75 us simuloinnin aika-askel olisi vielä riittävä averaged-mallinnuksen kohdalla tulosten pysyessä silti lähes samoina verrattuna 10 us:n detailed-mallinnukseen
- E – 4 –tarkastelut kuitenkin osoittavat, että suurissa muutostilanteissa (vika → saarekoituminen) pienet erot kertautuvat ja averaged-mallin vasteet 10 us aika-askeleella eroavat detailed-mallista erityisesti loistehon osalta merkittävästi
- E – 1 –tarkasteluissa averaged-versioiden välillä ei ollut suurta eroa aika-askelillä 10 us – 75 us
- E – 4 –tarkastelut osoittavat, että averaged-mallien vasteissa on selkeä muutos, kun aika-askelta kasvatetaan 25 us:sta 50 us:iin
- On syytä varmistua averaged-mallin tulosten oikeellisuudesta useissa eri käyttötilanteissa
  - Mitä nopeampi on tutkittava ilmiö, sitä varovaisemmin on tulkittava averaged-mallin tuloksia

## E – 5: Detailed vs averaged –mallinnuksen eroja

- Tämä on sama tapahtumaketju, kuin A – 1a

- Sama tapahtuma, kuin A – 1a
- BESS on mallinnettu averaged-periaatteella
- PV on mallinnettu detailed-versiona
- PV:n averaged-mallinnus ei ole niin suoraviivaista, kuin BESS:n johtuen siitä, että PV:ssä täytyy mallintaa 2 virtapiiria ennen verkkoa: paneeleiden DC-puoli ja vaihtosuuntaajan DC-puoli
  - Näitä piireja yhdistää hakkuri, jonka toiminta on myös "averaged" eli itse kytkinkomponenttia ei ole
- Kaksi tahtikonetta (täysin samat, kuin yksityiskohtaisessa mallissa)

Kuvaajat näyttävät reilu 2 sekunnin mittaisen ajanjakson

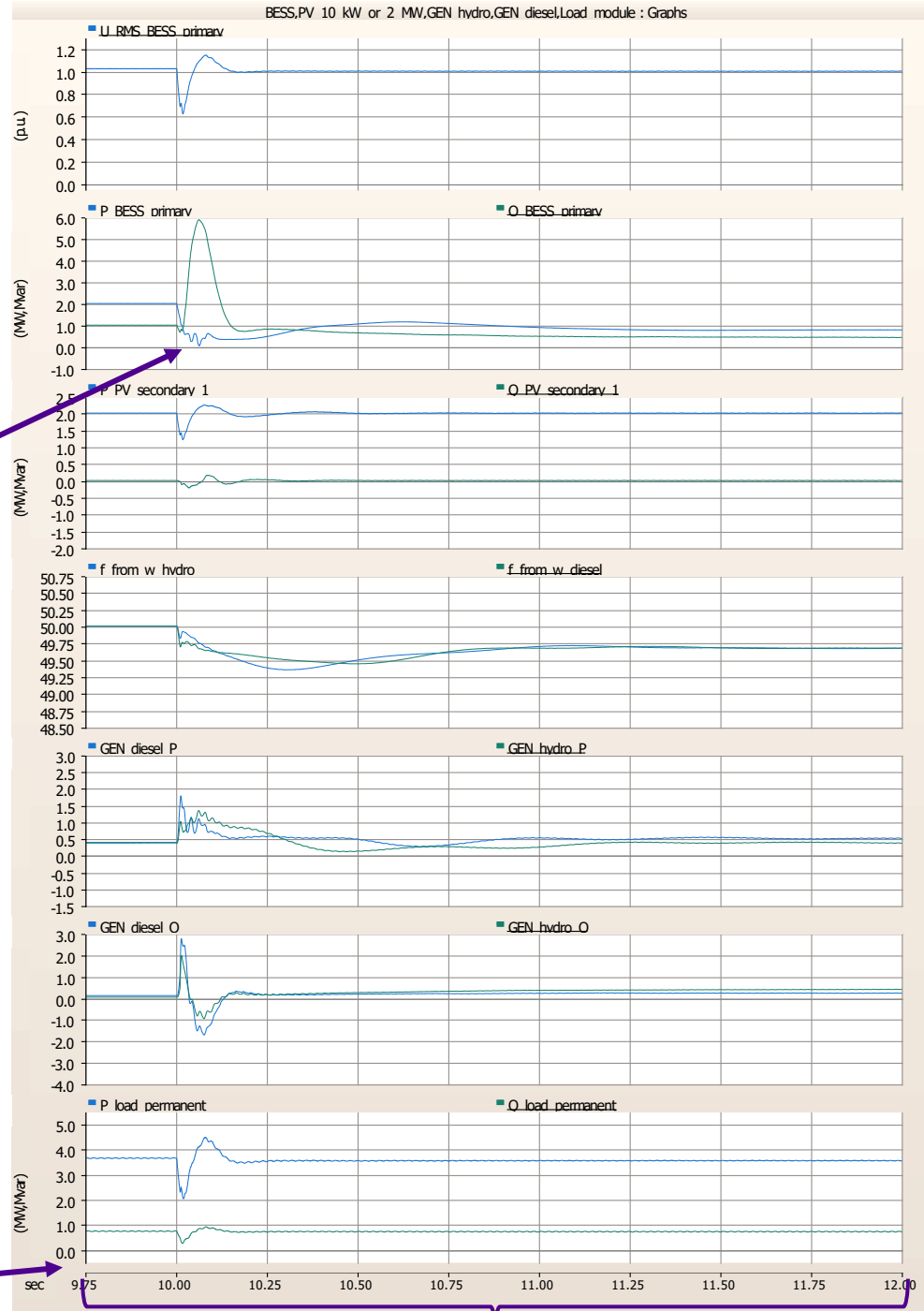


- ← BESS:n ensiöjännite
- ← BESS:n pätö- ja loisteho
- ← PV:n pätö- ja loisteho
- ← Tahtigeneraattoreiden pyörimisnopeudesta johdettu "taajuus"
- ← Tahtigeneraattoreiden pätötehot
- ← Tahtigeneraattoreiden loistehot
- ← Kuormituksen pätö- ja loistehot

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

- Tässä kalvolla detailed-mallin vastaavat tulokset
- Tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan
- Vian palautumisen aikana pätötehossa on selkein ero kahden eri mallinnustavan välillä
- Detailed-mallissa nähdään värähtelyjä, kun averaged-mallissa nämä värähtelyt ovat "suodattuneet"
- On huomattava myös, että PV:n loistehon vaste on muuttunut hieman, vaikka malli on sama → BESS:n vasteiden muutos heijastuu myös yksiköihin, joiden mallinnustapaan ei ole tehty muutoksia
- Tarkkaa syytä esim. BESS:n (pienille) pätötehomuutoksille on vaikea sanoa, mutta vaste-erot ovat loogiset ja oikeansuuntaiset

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

## E – 5: Detailed vs averaged –mallinnuksen eroja

### Johtopäätöksiä

- Nyt katkaisijan avautumisessa ja BESS:n toimintamoodin vaihtumisessa ei ole viiveitä
- Tulokset näyttäisivät, että verrattuna esim. E – 4 –osioon, jossa viiveiden johdosta muutostilanteet olivat suurempia, detailed- ja averaged-mallientulokset ovat nyt hyvin lähellä toisiaan
- PV:llä, joka on mallinnettu detailed-versiona, voi olla myös vaikutusta siihen, että averaged-tulokset ovat lähempänä detailed-mallia

## E: EMT-averaged vs RMS –mallinnuksen eroja

- EMT-pohjainen averaged-mallinnus ei ole sama asia kuin RMS-mallinnus
- Teoriassa EMT-pohjaisella averaged-mallinnuksella voidaan tarkastella hyvin paljon samoja asioita, kuin detailed-menetelmällä, kunhan tiedostaa, että averaged-mallinnustapa ei esim. vaihtosuuntaajien ollessa kyseessä ota huomioon kytkentätaajuisia ilmiöitä
  - Jos kytkentätaajuiset vaihtosuuntaajan vasteet osuvat verkon resonanssitaajuudelle tai lähelle sitä, vasteet eivät ole vertailukelpoisia
- Hieman yksinkertaisestaen voisi sanoa, että RMS-mallinnuksessa siirrytään verkon yhdestä tasapainopisteestä seuraavaan ilman transienttivaihetta
- Enää ei siis voida puhua mallien vasteiden eroista samalla tarkkuudella vertailtaessa EMT:n detailed- ja average-malleja, vaan RMS-mallit jättävät yksinkertaisesti monia ilmiöitä (mm. verkon dynamiikka) kokonaan tarkastelujen ulkopuolelle
- Etukäteen täytyy olla riittävä käsitys mitä voi RMS-työkaluilla voi mallintaa ja mitä ei
- Vaikka jotkut tapahtumat ovat yksiselitteisesti RMS-mallinnusohjelmien tarkastelumahdollisuuksien ulkopuolella (esim. verkon resonanssit, salamaniskun aiheuttamat ylijännitteet yms. monet nopeat sähkömagneettiset ilmiöt), voi raja ”mitä voi mallintaa, mitä ei” olla usein kuitenkin ”veteen piirretty viiva”, ja kokemuksen kautta vasta saa riittävästi ymmärrystä mallinnustapojen reunaehdoista
- EMT-mallinnusohjelmilla taas simuloinnin aika-askel määrää mallinnusten soveltuvuuden ja tarkkuuden (pääpiirteittäin)