

KONTROL BERBASIS SYNCHRONVERTER DAN MODEL PREDIKTIF UNTUK MULTI-PORT AUTONOMOUS RECONFIGURABLE SOLAR PLANTS

Aditya Galih Setyaji¹, Dendy Kurniawan², Edy Siswanto³

¹ Program Studi Teknik Informatika Universitas Sains dan Teknologi Komputer
Jl. Majapahit 605 Semarang, telp : (024)-6723456, e-mail: galih.research@gmail.com

² Program Studi Sistem Komputer Universitas Sains dan Teknologi Komputer
Jl. Majapahit 605 Semarang, telp : (024)-6723456, e-mail: dendy@stekom.ac.id

³ Program Studi Komputerisasi Akuntansi Universitas Sains dan Teknologi Komputer
Jl. Majapahit 605 Semarang, telp : (024)-6723456, e-mail: edy@stekom.ac.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 April 2023

Received in revised form 24 April 2023

Accepted 8 Mei 2023

Available online 15 Mei 2023

ABSTRACT

This research presents the synchronverter algorithm and control architecture of the Multi-port Autonomous Reconfigurable Solar (MA_RS) system to provide support to the ac network under various events on the network and presents a model-based predictive control (MB_PC) control algorithm for the MA_RS system to provide support to the MA_RS system. ac network when a frequency change is detected in the network. The main objective of this study is to propose an advanced control scheme based on the predictive control model (MB_PC) that can provide frequency support during unexpected frequencies. In this study, a detailed implementation of a synchronverter-based control algorithm for the MA_RS system is presented. The proposed control algorithm and control architecture of the MA_RS system were evaluated through simulation on the PSCAD/EMTDC simulation platform to show performance under various operating conditions and evaluated in the Opal-RT alluring simulation model which can also be used to perform hardware-control-in-the-control tests. circle (c-HIL). Advanced model-based predictive control (MB_PC) algorithm to provide frequency support to new integrated photovoltaic (PV) topologies, battery-based energy storage systems (ESS), and high-voltage direct current (HV_DC) systems called multi-port autonomous reconfigurable solar (MA_RS) is proposed. The proposed control algorithm for frequency support is based on synchronverter based control. Simulation of the MA_RS-HV_DC system with the control of the proposed strategy was simulated and validated for MA_RS connected to a low short circuit ratio (SCR) network in a

PSCAD/EMTDC simulation environment. The results of this study indicate that the MA_RS system with SG-based control provides better voltage support by injecting more reactive power control into the system during balanced phase faults compared to the VSG-based method. For the response voltage, the SG based control method is better than the VSG based control method for the different SCR conditions tested. MB_PC based control based on synchronverter based control algorithm. The proposed control algorithm and control architecture of the MA_RS system were evaluated on the MA_RS system in the

PSCAD/EMTDC simulation environment. The simulation results show an increase in nadir frequency and a steady state frequency provided by the Multi-port Autonomous Reconfigurable Solar (MA_RS) system via MB_PC control. In future research, advanced control methods are required to provide stable operation under unbalanced faults.

Keywords: Synchronverter, Photovoltaic, energy storage system, solar system, Reconfigurable Solar..

Abstrak

Penelitian ini menyajikan algoritma synchronverter dan arsitektur kontrol sistem Multi-port Autonomous Reconfigurable Solar (MA_RS) untuk memberikan dukungan ke jaringan ac di bawah berbagai peristiwa di jaringan dan menyajikan algoritma kontrol berbasis model-based predictive control (MB_PC) untuk sistem MA_RS untuk memberikan dukungan ke jaringan ac ketika perubahan frekuensi diamati di jaringan. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengusulkan skema kontrol lanjutan berbasis model-based predictive control (MB_PC) yang dapat memberikan dukungan frekuensi selama penyimpangan frekuensi yang tidak terduga. Dalam penelitian ini, implementasi rinci dari algoritma kontrol berbasis synchronverter untuk sistem MA_RS disajikan. Algoritme kontrol yang diusulkan dan arsitektur kontrol sistem MA_RS dievaluasi melalui simulasi pada platform simulasi PSCAD/EMTDC untuk menampilkan kinerja dalam berbagai kondisi operasi dan dievaluasi dalam model simulasi luring Opal-RT yang juga dapat digunakan untuk melakukan uji kontrol-perangkat keras-in-the-loop (c-HIL). Algoritme model-based predictive control (MB_PC) canggih untuk memberikan dukungan frekuensi ke topologi baru photovoltaic (PV) terintegrasi, energy storage system berbasis baterai (ESS), dan high-voltage direct current (HV_DC) sistem yang disebut multi-port autonomous reconfigurable solar (MA_RS) diusulkan. Algoritme kontrol yang diusulkan untuk dukungan frekuensi didasarkan pada kontrol berbasis synchronverter. Simulasi sistem MA_RS-HV_DC dengan strategi kontrol yang diusulkan disimulasikan dan divalidasi untuk MA_RS yang terhubung ke jaringan rasio hubung singkat (SCR) rendah di lingkungan simulasi PSCAD/EMTDC. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem MA_RS dengan kontrol berbasis SG memberikan dukungan voltase yang lebih baik dengan menyuntikkan lebih banyak daya reaktif ke dalam sistem selama gangguan fase seimbang dibandingkan dengan metode kontrol berbasis VSG. Untuk respon tegangan, metode kontrol berbasis SG lebih baik daripada metode kontrol berbasis VSG untuk kondisi SCR berbeda yang diuji. Kontrol berbasis MB_PC didasarkan pada algoritma kontrol berbasis synchronverter. Algoritme kontrol yang diusulkan dan arsitektur kontrol sistem MA_RS dievaluasi pada sistem MA_RS pada lingkungan simulasi PSCAD/EMTDC. Hasil simulasi menampilkan peningkatan nadir frekuensi dan kondisi tunak frekuensi yang disediakan oleh sistem Multi-port Autonomous Reconfigurable Solar (MA_RS) melalui kontrol MB_PC. Dalam penelitian dimasa depan, metode kontrol lanjutan diperlukan untuk menyediakan operasi yang stabil di bawah kesalahan yang tidak seimbang.

Keywords: Synchronverter, Photovoltaic, energy storage system, solar system, Reconfigurable Solar.

1. PENDAHULUAN

Seiring dengan meningkatnya penetrasi pembangkit listrik berbasis power electronic (PE), inersia sistem jaringan listrik berkurang sehingga menghasilkan tantangan stabilitas baru [1]. Inverter pembentuk jaringan yang menghubungkan sistem photovoltaic (PV) ke jaringan dan energy storage system (ESS) cenderung memainkan peran penting dalam mengatasi masalah stabilitas ini. Selain itu, tautan arus searah tegangan tinggi (HV_DC) yang menggunakan sistem tersebut juga akan memungkinkan untuk mentransfer daya dari pembangkit listrik PV yang berlokasi jauh dan untuk meningkatkan stabilitas jaringan. Dengan meningkatnya penetrasi PV, pengembangan terpisah dari PV dan energy storage system yang terhubung ke jaringan transmisi alternating-current (ac) dan link high-voltage direct current (HV_DC) merupakan salah satu solusi untuk operasi jaringan yang stabil. Oleh

karena itu, sebuah konsep terintegrasi untuk integrasi PV dan energy storage system ke jaringan ac transmisi dan tautan high-voltage direct current (HV_DC) yang disebut sistem Multi-Port Autonomous Reconfigurable Solar (MA_RS) diusulkan. Penelitian ini berfokus pada pemodelan, kontrol, dan penerapan sistem Multi-Port Autonomous Reconfigurable Sola. Metode kontrol pembentukan grid lanjutan untuk Multi-Port Autonomous Reconfigurable Solar menggunakan metode kontrol tradisional dan prediktif diusulkan dan dibandingkan dengan metode kontrol grid following. Pengontrol pembentuk grid adalah pengontrol yang mengatur tegangan terminal sesaat konverter berbasis power electronic (PE) tanpa phase-locked loop (PLL) dan dapat hidup berdampingan dengan sumber daya pembentuk grid, mengikuti grid, dan sinkron lainnya dalam arus alternatif yang sama (ac) grid. Pengontrol berikut grid adalah pengontrol yang memperkirakan sudut sesaat dari tegangan terminal konverter berbasis power electronic dengan bantuan phase-locked loop dan menggunakan loop kontrol arus untuk mengatur arus ac yang diinjeksikan ke dalam grid ac. Selain itu, sistem Multi-port Autonomous Reconfigurable Solar diusulkan sebagai solusi potensial untuk mengurangi masalah penghentian sementara yang terlihat pada sistem berbasis PE. Solusi yang diusulkan dibandingkan dengan pendekatan tradisional dan dimodifikasi.

Ada peningkatan minat dalam perencanaan sistem transmisi alternating-current/direct curent (ac-dc) tegangan tinggi campuran (atau sistem transmisi hybrid) (Chinthavali et al., (2017)), karena keuntungan yang disediakan oleh modular multilevel converters (MMCs) (Barbosa et al., (2015)). Pengembangan terintegrasi sistem photovoltaic (PV) dan sistem battery-based energy storage systems (ESSs) sedang dieksplorasi dengan kecepatan yang lebih tinggi daripada sebelumnya karena manfaat tekno-ekonomi yang terkait. Mengikuti perkembangan ini, penelitian tentang integrasi PV dan energy storage system ke high-voltage direct current (HV_DC) menjadi terkenal akhir-akhir ini. Di area ini, pengembangan terintegrasi PV dan energy storage system yang terhubung ke jaringan transmisi arus bolak-balik (ac) dan sistem high-voltage direct current melalui multi-port autonomous reconfigurable solar plant (MA_RS) disajikan dalam penelitian ini. Salah satu kekhawatiran dengan peningkatan penetrasi sistem elektronika daya di jaringan adalah penurunan kemampuan jaringan untuk pulih dari gangguan tegangan atau frekuensi. Fungsi kontrol lanjutan dalam sistem elektronika daya dan penggunaan sistem hybrid ac-dc dapat meningkatkan stabilitas jaringan listrik. Di depan ini, penelitian ini menyajikan algoritma kontrol synchronverter-based (SG-based) dalam sistem Multi-Port Autonomous Reconfigurable Solar (MA_RS) yang dapat meningkatkan kemampuan grid untuk merespons gangguan tegangan atau frekuensi. Algoritma kontrol dapat memberikan dukungan frekuensi selama kejadian di grid yang menyebabkan gangguan frekuensi. Selain dukungan frekuensi, algoritme kontrol yang diusulkan memberikan dukungan voltase jika terjadi gangguan seimbang, dan memastikan tidak terjadi pemadaman layanan. Biasanya, pemadaman layanan dapat diamati di pembangkit PV atau energy storage system tradisional karena penurunan/peningkatan voltase atau frekuensi yang bervariasi selama kejadian ini. Arsitektur kontrol hirarkis sistem Multi-port Autonomous Reconfigurable Solar (MA_RS) disajikan dalam penelitian ini yang dapat mendukung algoritma kontrol berbasis synchronverter.

Studi simulasi untuk mengevaluasi kinerja arsitektur kontrol Multi-port Autonomous Reconfigurable Solar (MA_RS) yang diusulkan dan algoritma synchronverter (Weiss et al., (2011); Sheng et al., (2014); Molinas et al., (2017); Amin et al., (2016)) di bawah berbagai kasus uji dan kondisi operasi ekstrim dilakukan pada perangkat lunak simulasi PSCAD. Algoritma yang diusulkan dibandingkan dengan kontrol Virtual Synchronous Generator (VSG) (Tonkoski et al., (2017); Visscher et al., (2009)) metode kontrol dan manfaat dari skema kontrol yang diusulkan dibandingkan dengan metode kontrol berbasis Virtual Synchronous Generator disajikan. Perbandingan tersebut secara khusus ditunjukkan untuk koneksi sistem MA_RS ke jaringan yang lemah dan inersia rendah, yang diharapkan tumbuh dengan peningkatan penetrasi sumber daya berbasis elektronika daya di jaringan. Algoritme kontrol dievaluasi dalam simulasi offline Opal-RT, dan model yang dikembangkan dapat digunakan untuk melakukan simulasi perangkat control hardware-in-the-loop (c-HIL) kontrol di masa mendatang.

Salah satu perhatian dengan sistem berbasis elektronika daya dengan integrasi energi terbarukan adalah pengurangan inersia keseluruhan jaringan. Hal ini karena sistem berbasis elektronika daya tidak memiliki inersia fisik dibandingkan dengan sistem tenaga konvensional. Memperkuat sistem dengan inersia secara virtual melalui metode kontrol lanjutan adalah salah satu solusi untuk menstabilkan jaringan dalam kasus kejadian terkait frekuensi. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengusulkan skema kontrol lanjutan berbasis model-based predictive control (MB_PC) yang dapat memberikan dukungan frekuensi selama penyimpangan frekuensi yang tidak terduga. Dibandingkan

dengan metode kontrol konvensional, model-based predictive control dipilih untuk dukungan frekuensi karena kelebihanannya yang melekat seperti penyertaan kendala, prediksi keadaan sistem, dan kinerja dinamis yang lebih baik (Cortes et al., (2012)). Metode kontrol berbasis MB_PC yang diusulkan adalah bagian dari sistem berbasis sumber daya elektronik daya baru yang disebut Multiport Autonomous Reconfigurable Solar Plants (MA_RS). Sistem MA_RS adalah pengembangan terintegrasi untuk energy storage system (ESS) photovoltaic (PV) dan berbasis baterai energy storage system (ESS) yang terhubung ke jaringan transmisi alternating current (ac) dan high-voltage direct current (HV_DC) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1a.

Arsitektur kontrol sistem MA_RS bersifat hierarkis dan sangat kompleks. Ini terdiri dari tiga lapisan dengan fungsi yang berbeda. Pertama, pengontrol tingkat atas (L-1) menggabungkan kontrol daya aktif, kontrol daya reaktif, kontrol frekuensi berbasis model-based predictive control (MB_PC), kontrol tegangan sisi ac, dan kontrol tegangan sisi dc (direct current). Kedua, pengontrol tingkat menengah (L-2) terdiri dari kontrol penyeimbang tegangan kapasitor dan kontrol daya kumulatif energy storage system (ESS) dan PV. Terakhir, kontrol tingkat rendah (L-3) terdiri dari kontrol maximum power point tracking (MPPT) untuk sub modules (SM) PV dan kontrol state of charge (SoC) untuk energy storage system (ESS) Sub Modules. Dalam penelitian ini, diusulkan metode kontrol berbasis model-based predictive control (MB_PC) untuk dukungan frekuensi pada kontroler L-1. Synchronverters meniru properti generator sinkron dalam memberikan dukungan frekuensi dan dukungan tegangan. Model frekuensi dan tegangan yang digunakan dalam fungsi objektif metode kontrol berbasis MB_PC dimodelkan berdasarkan generator sinkron model. Masalah pengoptimalan yang diusulkan memecahkan frekuensi sudut (ω_{sg}). Arsitektur kontrol yang diusulkan diuji pada model sistem Multiport Autonomous Reconfigurable Solar tiga fase fidelitas tinggi tingkat lanjut yang memanfaatkan algoritma simulasi ultra cepat yang terhubung ke model grid ac orde tereduksi. Keefektifan algoritma kontrol yang diusulkan diuji dan dievaluasi untuk kasus uji yang berbeda di lingkungan simulasi PSCAD/EMTDC.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Model Sistem MA_RS

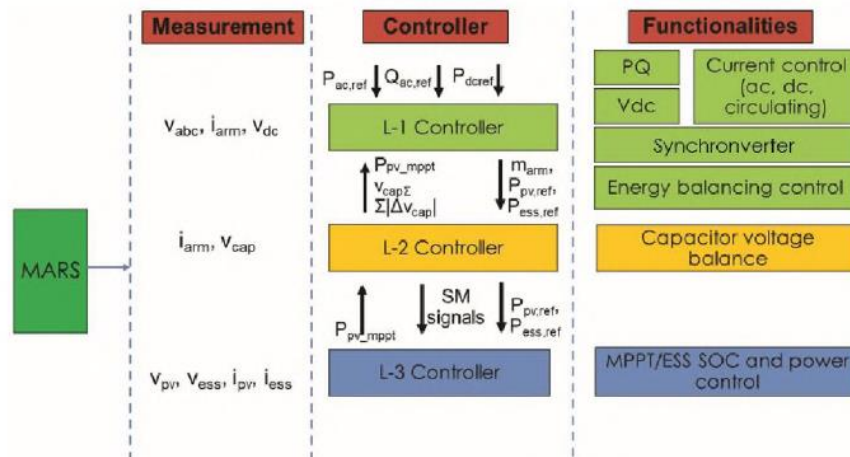
Ikhtisar arsitektur sistem Multi-port Autonomous Reconfigurable Solar (MA_RS) ditunjukkan pada Gambar 1a. Secara total memiliki enam lengan, dengan masing-masing lengan dibagi menjadi submodul normal N_{norm} (SM), N_{pv} PV-SM_s, dan N_{ess} energy storage system (ESS)-SMs. SMs normal didasarkan pada setengah jembatan, yang juga merupakan front-end dari PV dan energy storage system (ESS-SMs). Sistem PV di PV-SM terhubung ke front-end melalui konverter dc-dc uni-directional. Sistem energy storage system (ESS) dalam energy storage system (ESS)-SMs terhubung ke front-end melalui konverter dc-dc dua arah. Pemodelan matematika didasarkan pada metode yang mirip dengan pemodelan matematika modular multilevel converters (MMC) yang dijelaskan dalam. Simulasi sistem MA_RS pada platform simulasi tradisional sangat memakan waktu dan mahal secara komputasi. Oleh karena itu sangat penting untuk menggunakan model canggih dan algoritma simulasi cepat untuk menguji arsitektur kontrol sistem MA_RS. Model sistem MA_RS yang dikembangkan diwakili oleh differential algebraic equations (DAEs) dan dipisahkan berdasarkan kekakuan numerik yang ada di bagian differential algebraic equations. Sistem terpisah kemudian didiskritisasi berdasarkan sifat kekakuan yang terkait untuk mengurangi kompleksitas komputasi yang dipaksakan. Ringkasan lengkap dari algoritma simulasi untuk mensimulasikan sistem MA_RS diilustrasikan pada Gambar 2.

Arsitektur Kontrol Hierarki MA_RS

Sistem kontrol MA_RS, ditunjukkan pada Gambar 3, terdiri dari: (i) pengontrol L-1, (ii) pengontrol L-2, dan pengontrol (iii) L-3. Fungsionalitas pengontrol L-1 mencakup dukungan tegangan dan frekuensi ke jaringan, kontrol daya aktif dan reaktif, kontrol tegangan dc-link, kontrol arus sisi ac-/dc, dan keseimbangan energi antara berbagai jenis

SMs (PV, energy storage system (ESS), dan biasa). Dukungan tegangan dan frekuensi pada pengontrol L-1 didasarkan pada algoritma kontrol berbasis SG yang menentukan sudut rotor (θ_{sg}), frekuensi sudut (ω_{sg}), dan sistem MA_RS tegangan keluaran tiga e_{abc} . Pengontrol L-1 juga menentukan perintah daya referensi dari PV dan energy storage system (ESS) dalam sistem MA_RS ($P_{pv,ref}$ dan $P_{ess,ref}$). Perintah daya referensi dari PV dan energy storage system (ESS) bergantung pada perintah pengiriman daya ($P_{ac,ref}$, $P_{dc,ref}$, dan $Q_{ac,ref}$), persyaratan daya dari kontrol berbasis SG, daya PV maksimum yang tersedia ($P_{pv,mppt}$), dan peringkat SM energy storage system ($P_{ess,rating}$). Referensi daya aktif dan reaktif di sisi ac sistem MA_RS adalah jumlah dari perintah pengiriman yang sesuai dan kebutuhan daya yang sesuai dari kontrol berbasis SG. Berdasarkan θ_{sg} , ω_{sg} , dan e_{abc} yang ditentukan, kontrol arus qd dari arus sisi ac dihitung untuk menghasilkan indeks modulasi m_{abc} .

Kontrol penyeimbang energi menghasilkan arus sirkulasi referensi dalam kaki fase yang dikendalikan oleh kontrol arus sirkulasi untuk menghasilkan $m_{circ,abc}$. Kontrol arus sirkulasi meliputi harmonik ke-1, ke-2, dan ke-4 yang dikontrol menggunakan transformasi qd berdasarkan (Chinthavali., (2016)). Sementara harmonik ke-1 dikontrol berdasarkan referensi kontrol keseimbangan energi yang dihasilkan, harmonik ke-2 dan ke-4 dikontrol ke nol. Indeks modulasi $m_{circ,abc}$, dan m_{abc} digabungkan untuk menghasilkan indeks modulasi lengan $m_{abc}^{p,n}$ berdasarkan (Chinthavali., (2016)). Pengontrol L-1 mengirimkan indeks modulasi masing-masing lengan, daya referensi PV, dan daya referensi energy storage system ke pengontrol L-2. Pengontrol L-2 mempertahankan tegangan kapasitor dan juga menghasilkan sinyal switching untuk jembatan setengah front-end dari semua SM berdasarkan (Chinthavali., (2016)). Pengontrol L-3 mengontrol daya dari PV dan energy storage system SM, mengontrol arus konverter dc-dc, dan mengirimkan perintah peralihan ke konverter dc-dc.



Gambar 3. Arsitektur Control MA_RS

Algoritma Kontrol Berbasis Synchronverter (SG)

Algoritma kontrol berbasis SG yang diimplementasikan dalam sistem kontrol sistem MA_RS ditunjukkan pada Gambar 4. Algoritma ini terdiri dari loop gubernur, loop inersia, loop daya reaktif, loop daya aktif, dan loop kontrol arus. Model governor adalah konstanta waktu T_D dengan gain D_{pi} . Konstanta waktu T_D dari delay governor digunakan untuk meniru delay respons mekanis pengatur fisik generator sinkron. Istilah D_{pi} adalah

frekuensi - koefisien droop daya. Batas atas daya aktif (P_{max}) adalah daya maksimum yang tersedia pada saat itu yang dapat digunakan (yaitu penjumlahan dari $P_{dc,ref}$, $P_{pv,moot}$, and $P_{ess,rating}$). Batas bawah daya aktif (P_{min}) adalah daya minimum yang tersedia pada saat itu yang dapat digunakan (yaitu penjumlahan dari $P_{dc,ref}$ dan $P_{ess,rating}$ (digunakan untuk pengisian daya)).

Sedangkan representasi kontrol governor dalam domain Laplace, implementasi dilakukan dalam domain waktu dengan mendiskritisasi (1) menggunakan metode forward-Euler. Loop inersia, loop daya aktif, dan loop daya reaktif didasarkan pada konsep synchronverter yang dirinci dalam (Weiss et al., (2011)). Torsi elektromagnetik T_e , tegangan keluaran tiga fase sistem MA_RS e_{abc} , dan daya reaktif Q diberikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} T_e &= M_f i_f \langle i, (\cos(\theta)) \rangle, \\ e_{abc} &= \dot{\theta} M_f i_f (\cos(\theta)), \\ Q &= \dot{\theta} M_f i_f \langle i, (\sin(\theta)) \rangle, \end{aligned}$$

Dimana factor $i, \cos(\theta)$, dan $\sin(\theta)$. Generator referensi arus menghitung arus referensi bingkai qd berdasarkan persamaan rangkaian yang memanfaatkan perbedaan antara tegangan e_{abc} dan ac-side voltage v_s . Persamaan rangkaian diskrit yang digunakan untuk menghitung kerangka arus referensi abc diberikan dalam (5) dan adalah didiskritisasi menggunakan metode backward-Euler. Dari kerangka arus referensi abc yang dihitung, kerangka arus referensi qd dihitung berdasarkan transformasi Park's yang diberikan dalam (Pekarek et al., (2013)):

$$\begin{aligned} i_a[k] &= \frac{i_a[k-1] + \frac{h}{L_s + L_o/2} \times (e_a[k] - v_a[k])}{\left(1 + h \times \frac{R_s + R_o/2}{L_s + L_o/2}\right)} \\ i_b[k] &= \frac{i_b[k-1] + \frac{h}{L_s + L_o/2} \times (e_b[k] - v_b[k])}{\left(1 + h \times \frac{R_s + R_o/2}{L_s + L_o/2}\right)} \\ i_c[k] &= \frac{i_c[k-1] + \frac{h}{L_s + L_o/2} \times (e_c[k] - v_c[k])}{\left(1 + h \times \frac{R_s + R_o/2}{L_s + L_o/2}\right)} \end{aligned}$$

di mana L_o dan R_o adalah induktansi lengan dan resistansi lengan; L_s dan R_s masing-masing adalah induktansi grid dan resistansi grid; dan h adalah langkah waktu simulasi. Karena kontrol berbasis SG terutama diimplementasikan sebagai implementasi sumber tegangan, ia tidak memiliki proteksi batas arus berlebih. Oleh karena itu, pembatas arus disediakan untuk membatasi arus berlebih dalam sistem. Pengontrol arus yang dipisahkan terdiri dari kontrol qd dari arus sisi ac yang menghasilkan indeks modulasi yang diperlukan. Theta (θ_{sg}) yang dihitung dari kontrol SG-based digunakan dalam kontrol arus sirkulasi dan kontrol arus qd .

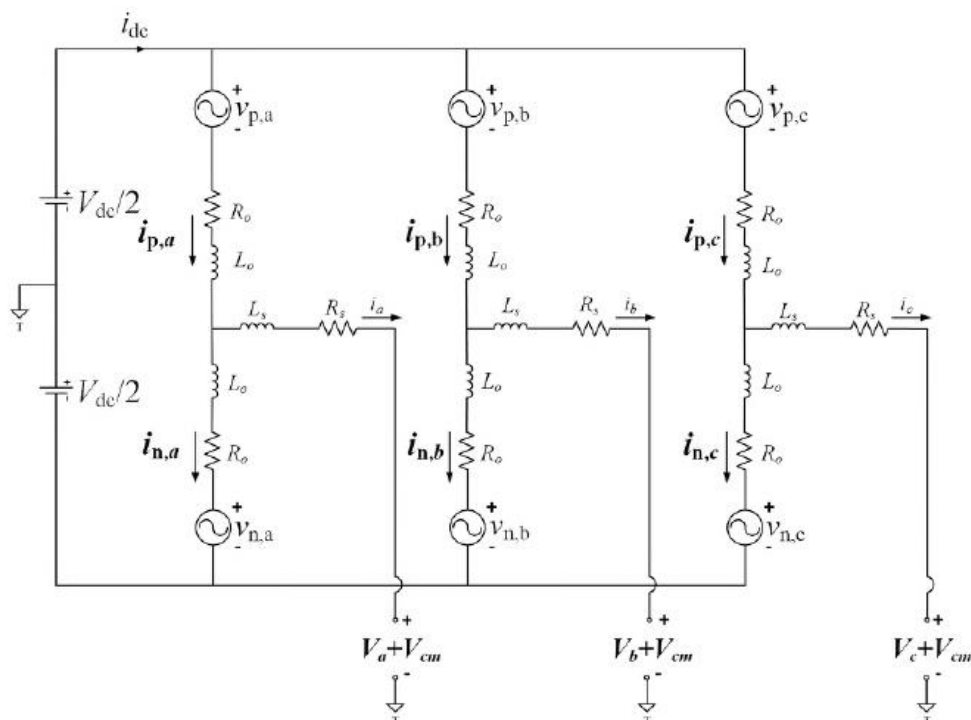
Kontrol Prediktif Model

Diagram blok untuk kontrol synchronverter berbasis model-based predictive control (MB_PC) ditunjukkan pada Gambar 4. Ini termasuk model dinamis untuk memperkirakan dan memprediksi status sistem, fungsi tujuan untuk menerjemahkan tujuan kontrol menjadi nilai biaya skalar, dan masalah pengoptimalan untuk meminimalkan fungsi tujuan. Ide kontrol synchronverter berbasis MB_PC adalah untuk menghasilkan nilai ω_{sg} yang optimal dengan meminimalkan fungsi tujuan.

Formulasi Model

Model Dinamis Internal MA_RS-HV_DC.

Diagram garis tunggal dari sistem MA_RS yang terhubung ke jaringan ditunjukkan pada Gambar 5. Sistem MA_RS adalah sistem tiga fase dengan total enam lengan yang mengintegrasikan PV dan energy storage system menggunakan elektronika daya dan dapat terhubung ke HV_DC dan tegangan tinggi. -transmisi tegangan jaringan ac. Setiap lengan terdiri dari SMs normal, PV, dan energy storage system -SMs bersama dengan induktansi lengan (L_o) dan tahanan lengan (R_o). Sistem PV di setiap PV-SM terhubung ke SM melalui konverter dc-dc terisolasi atau non-terisolasi. Sistem energy storage system di setiap energy storage system -SM terhubung melalui konverter dc-dc dua arah. Setiap fase konverter dihubungkan dengan jaringan utilitas melalui cabang seri RL (R_s dan L_s). Model waktu kontinu dinamis dan model waktu diskrit sistem MA_RS dikembangkan berdasarkan diskritisasi model waktu kontinu. Model diskrit yang dikembangkan digunakan dalam implementasi digital dari metode MB_PC. Skema model urutan tereduksi ekivalen dari sistem MA_RS diilustrasikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Skema model tereduksi MA_RS

Model waktu kontinu dinamis sistem MA_RS yang ditunjukkan pada Gambar 7 diberikan oleh (1) dan diperoleh dengan menambahkan (1a) dan (1b) dengan asumsi, (i) tegangan

kapasitor SM seimbang; dan (ii) voltase mode umum (v_{cm} dan v_{cm1}). Model waktu diskrit dari sistem MA_RS diperoleh dengan mendiskritkan (1) menggunakan metode forward-Euler

Model Frekuensi Berbasis Synchronverter

Model frekuensi didasarkan pada model synchronverter. Synchronverters meniru sifat generator sinkron dalam memberikan dukungan frekuensi dan dukungan tegangan selama peristiwa grid yang menyebabkan penyimpangan frekuensi atau tegangan (Weiss et al., (2011)). Blok kontrol berbasis synchronverter (SG-based) diturunkan menggunakan model matematis dari generator sinkron rotoRepresentasi waktu diskrit dari torsi elektromagnetik (T_e), e_y , dan daya reaktif (Q) diberikan dalamr bulat tiga fasa (Weiss et al., (2011)) dan ditunjukkan pada Gambar 7.

$$\begin{aligned} T_e[k] &= M_f i_f[k] (i_a[k] \cos(\theta_{sg}[k]) \\ &\quad + i_b[k] \cos(\theta_{sg}[k] - 2\pi/3) + i_c[k] \cos(\theta_{sg}[k] - 4\pi/3)) \\ e_a[k] &= \omega_{sg}[k] M_f i_f[k] \cos(\theta_{sg}[k]) \\ e_b[k] &= \omega_{sg}[k] M_f i_f[k] \cos(\theta_{sg}[k] - 2\pi/3) \\ e_c[k] &= \omega_{sg}[k] M_f i_f[k] i_a[k] \sin(\theta_{sg}[k] - 4\pi/3) \\ Q[k] &= -\omega_{sg}[k] M_f i_f[k] i_a[k] \sin(\theta_{sg}[k]) + i_b[k] \sin(\theta_{sg}[k] - 2\pi/3 + i_c[k] \sin(\theta_{sg}[k] \\ &\quad - 4\pi/3) \end{aligned}$$

dimana $M_f i_f$ pada (4) adalah input kontrol ke synchronverter (Weiss et al., (2011)). Dari Gambar 7, sudut rotor (θ_{sg}) dapat dihitung dengan

$$\theta_{sg}[k] = \theta_{sg}[k-1] + h\omega_{sg}[k-1]$$

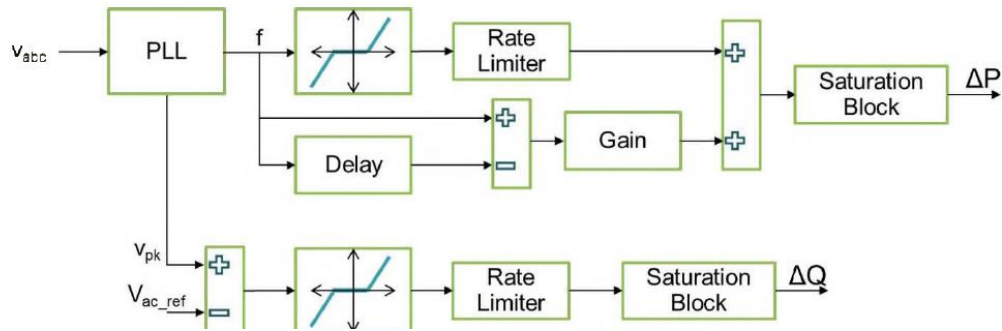
Dinamika frekuensi sistem diwakili oleh model waktu diskrit yang diwakili oleh

$$\omega_{sg}[k] = \omega_{sg}[k-1] \left(1 - \frac{hD_p}{J} \right) + \frac{h}{J} (T_m[k] - T_e[k] - D_p(\omega_n[k]))$$

dimana J adalah momen inersia, T_m adalah torsi mekanik, D_p adalah faktor redaman, dan ω_n adalah frekuensi sudut acuan .

Kontrol Berbasis Generator Sinkron Virtual

Metode SG-based yang diusulkan dibandingkan dengan kontrol berbasis VSG (Tonkoski et al., (2017)). Pengontrol L-1 menggunakan metode kontrol berbasis VSG untuk menentukan perintah daya aktif dan reaktif berdasarkan voltase ac-side terukur dari sistem MA_RS (v_{abc}). Tegangan sisi ac dari sistem MA_RS diproses oleh phase-locked loop (PLL) untuk menentukan nilai puncak dan frekuensi tegangan (v_{pk} dan f). Nilai puncak dan frekuensi masing-masing digunakan untuk menentukan komponen tambahan yang akan ditambahkan ke perintah daya aktif dan reaktif yang dikirimkan. Pengontrol dirangkum dalam Gambar 8.



Gambar 8. Kontrol berbasis VSG

Fungsi Objektif

Fungsi objektif berdasarkan model waktu diskrit diberikan oleh:

$$\begin{aligned} & \min_x J(x) \\ & s.t \quad e[k+1] = \omega_{sg}[k+1] M_f i_f[k] (\cos(\theta_{sg}[\widetilde{k+1}])) \\ & \theta_{sg}[k+1] = \theta_{sg}[k] + h\omega_{sg}[k] \\ & T_e[k+2] = M_f i_f[k] < i[k+2], (\cos(\theta_{sg}[\widetilde{k-2}])) >; \\ & T_m[k+2] = \frac{P_{ac,ref}[k+2]}{\omega_n[k+1]}; \end{aligned}$$

Dimana x dan $J(x)$ diberikan oleh

$$\begin{aligned} x &= (\omega_{sg}[k+1])^T \\ J(x) &= J_1(x) + J_2(x) \end{aligned}$$

Dimana

$$\begin{aligned} J_1(x) &= \lambda_1 (T_e[k+2] - T_m[k+2])^2 \\ J_2(x) &= \lambda_2 (\omega_n[k+1] - \omega_{sg}[k+1])^2 \end{aligned}$$

di mana λ_1 , dan λ_2 adalah bobot dari fungsi biaya; $P_{ac,ref}$ adalah perintah pengiriman daya sisi ac; dan vektor \mathbf{i} , $\cos(\theta)$, dan $\sin(\theta)$ didefinisikan dalam (Weiss et al., (2011)).

Kontrol Torque

Definisi fungsi biaya kuadrat untuk kontrol torsi diberikan oleh $J_1(x)$. T_e dihitung menggunakan (4a) dan diprediksi pada saat $(k+2)^{th}$. T_e dikontrol untuk mengatur daya aktif dalam sistem selama ekskursi frekuensi. Setiap kali beban listrik dalam sistem bertambah atau berkurang (setara dengan pembangkitan listrik berkurang atau bertambah), frekuensi sistem berkurang atau bertambah. Dalam hal ini, T_e bertambah atau berkurang sesuai dengan perubahan frekuensi sistem. Untuk mengkompensasi peningkatan atau penurunan T_e , daya aktif optimal diinjeksikan ke dalam sistem berdasarkan deviasi ω_{sg} terhadap ω_n .

Kontrol Frekuensi Sudut

Fungsi biaya kuadrat untuk kontrol frekuensi sudut diberikan oleh $J_2(x)$. Kontrol frekuensi sudut meniru properti droop frekuensi dari generator sinkron. ω_{sg} pada instan ke $[k + 1]^{\text{th}}$ diperoleh berdasarkan pengoptimalan ($T_e - T_m$) pada instan ke $[k + 2]^{\text{th}}$.

HASIL SIMULASI & VALIDASI

Implementasi Metode Pengendalian Yang Diusulkan

i_j dan v_j diukur dari model grid ac yang digunakan dalam simulasi pada saat $[k]$ ke-. Setelah i_j diukur pada saat $[k]$, menggunakan model dinamis dalam (3) i_j pada saat $[k + 1]^{\text{st}}$ diperkirakan. Karena variasi v_j lebih lambat dibandingkan dengan dinamika sistem MA_RS, dalam implementasi ini v_j pada saat $[k + 1]^{\text{st}}$ diasumsikan sebagai sama dengan v_j pada saat ke- $[k]$. Q_{sg} pada $[k + 1]^{\text{st}}$ diperkirakan berdasarkan (3). Kemudian, T_e pada saat $[k + 2]^{\text{th}}$ diprediksi menggunakan (4a). Keadaan yang diprediksi dimasukkan ke dalam fungsi biaya $J(x)$ dan kemudian diminimalkan menggunakan optimasi tanpa kendala untuk mendapatkan nilai optimal $\omega_{sg}[k + 1]$. Dalam memprediksi T_e pada saat $[k + 2]^{\text{th}}$, tebakan awal untuk ω_{sg} pada saat $[k + 1]^{\text{st}}$ adalah ω_{sg} pada saat $[k]^{\text{th}}$. Berdasarkan nilai optimal, e dan j diperbarui dan arus referensi bingkai qd ($i_{qd,ref}$), fase, dan indeks modulasi lengan (m_j dan m_j^*) dihasilkan yang dikirim ke pengontrol L-2 dalam sistem MA_RS berdasarkan decoupled implementasi pengontrol saat ini dirinci dalam.

Optimasi Tak Terbatas

Fungsi biaya $J(x)$ diminimalkan menggunakan metode Newton yang dijelaskan dalam (Zak et al., (2004)). Pesan $\omega_{sg}[k + 1]$ pada setiap langkah waktu dihitung dengan rumus rekursif berikut untuk iterasi $(n + 1)^{\text{st}}$ yang diberikan

$$x[k + 1]^{(n+1)} = x[k + 1]^{(n)} - F(x[k + 1]^{(n)})^{-1} g[k + 1]^{(n)}$$

Dimana

$$F(x[k + 1]^{(n)}) = \left[\frac{\partial g[k + 1]^{(n)}}{\partial x[k + 1]} \right]; g[k + 1]^{(n)} = \left[\frac{\partial J(x[k + 1]^{(n)})}{\partial x[k + 1]} \right];$$

Sistem Pengujian

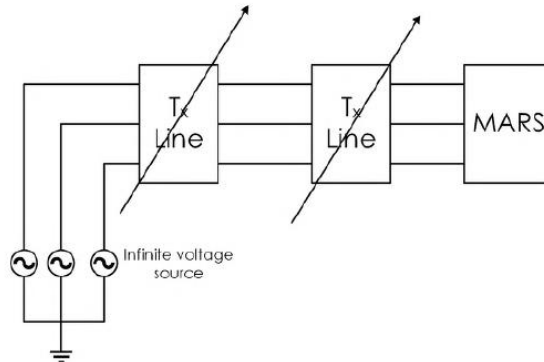
Dengan asumsi 150 kW, 1 kV PV, dan energy storage system SM, jumlah SM_s per lengan adalah 111 PV, 37 energy storage system, dan 81 SM_s Normal. Ukuran PV dan energy storage system SM_s ditentukan berdasarkan penggunaan perangkat SiC 200 A, 3,3 kV dalam konverter dc-dc. Jumlah total SM_s per lengan ditentukan oleh tegangan dc-link di lokasi pemasangan dan berdasarkan gardu HV_DC yang terpasang (dalam proyek Kabel TransBay).

Use Cases Untuk Sistem MA_RS Dengan Model Grid-Ac

Grid ac di WECC dimodelkan berdasarkan WSEIG1 untuk secara akurat mewakili data frekuensi yang tersedia. Model sistem MA_RS komprehensif yang dikembangkan diuji untuk berbagai kondisi jaringan short circuit ratio (SCR) rendah dan kondisi inersia rendah. Sistem MA_RS berdasarkan metode kontrol tradisional sangat rentan terhadap kondisi jaringan yang lemah karena alasan berikut (WECC, (2014)):

1. Sistem MA_RS tidak memiliki inersia karena tidak ada massa yang berputar.
2. Kontrol elektronik bergantung pada referensi tegangan stabil dari jaringan untuk menyediakan daya aktif dan reaktif.

3. Saat sistem menjadi lebih lemah, spesifikasi kontrol dapat memengaruhi perilaku sistem.



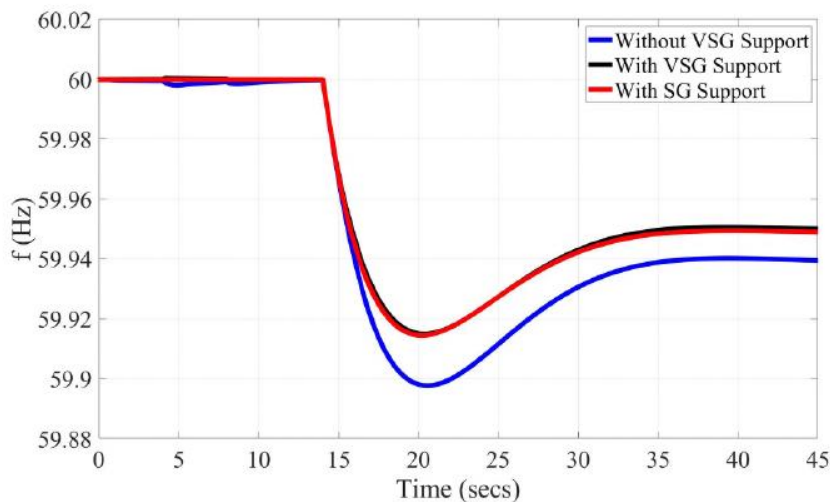
Gambar 9. Penyiapan model simulasi untuk Tes SCR rendah

Untuk mengatasi masalah ini, kontrol lanjutan yang diusulkan dirancang untuk memastikan keberhasilan pengoperasian sistem MA_RS dalam sistem yang lebih lemah ini. Untuk menguji kinerja pengontrol yang diusulkan, sistem MA_RS diuji selama SCR berbeda dan kondisi inersia rendah. Ada banyak metode untuk mengukur kekuatan sistem. Salah satu cara untuk menentukan kekuatan sistem suatu sistem tenaga adalah dengan SCR, karena pengukuran kekuatan sistem berkaitan dengan impedansi ekuivalen yang dilihat dari terminal sistem MA_RS ke sistem tenaga. Oleh karena itu untuk meniru jaringan penetrasi terbarukan yang tinggi dengan SCR rendah, panjang saluran transmisi antara sistem MA_RS dan sistem jaringan ac bervariasi. Prosedur disimulasikan dalam PSCAD dan pengaturan simulasi ditunjukkan pada Gambar . Panjang saluran transmisi untuk SCR yang berbeda ditabulasikan pada Tabel 1.

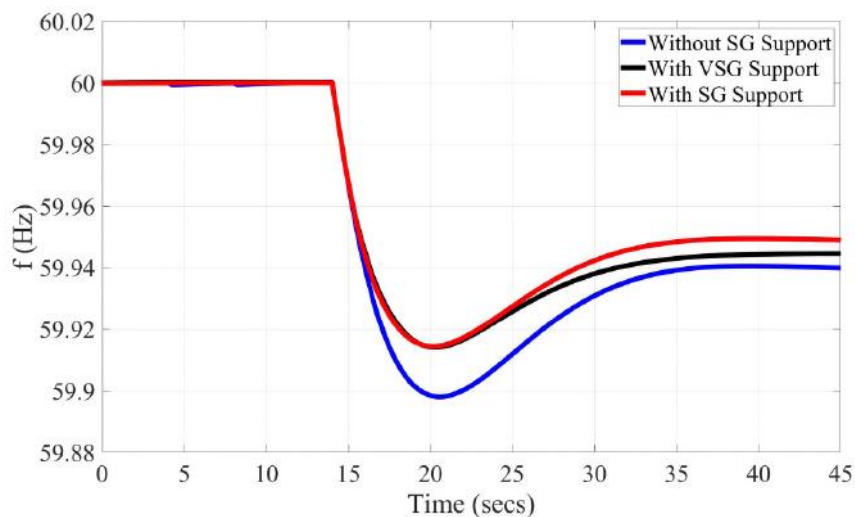
SCR	Resistance (Ω)	Inductance (H)	Line Length (km)
0.5	14.369	0.6715	861.5
2	3.5535	0.1661	198
4	1.7547	0.0820	87.65
10	0.6333	0.0296	18.85

Tabel 1. Rasio SCR untuk panjang garis yang berbeda

Dua Use Cases diidentifikasi dan diuji untuk kondisi operasi $P_{ac} = P_{dc} = 100$ MW untuk kasus SCR 0,5, 2, 4, dan 10. Yaitu: (a) 804,44 MW kehilangan pembangkitan pada $t = 14,0$ detik berdasarkan generator Haynes3 dalam grid WECC, dan (b) gangguan tiga fasa seimbang pada $t = 4$ detik dengan durasi 0,2 detik. Inersia sistem (H) dalam semua Use Cases ini adalah 23 detik.



Gambar 10. Respon Frekuensi Grid untuk LOG di WECC untuk SCR = 10

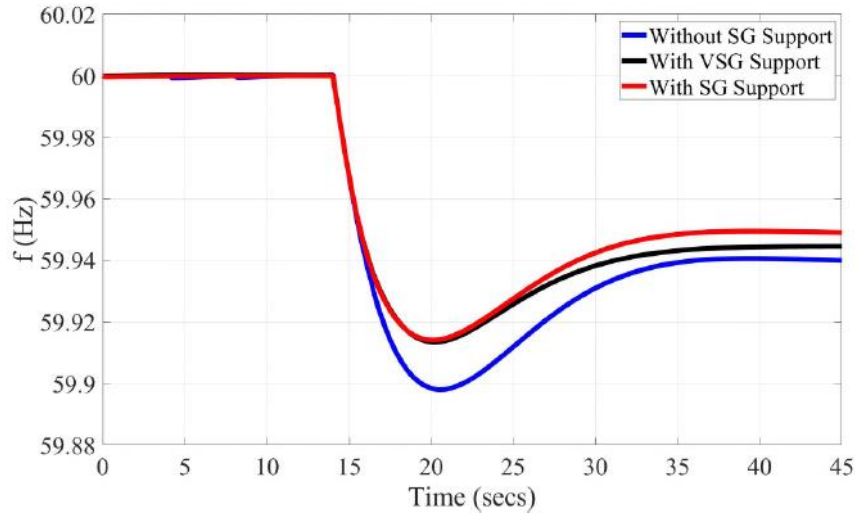


Gambar 11. Respon Frekuensi Grid untuk LOG di WECC untuk SCR = 4

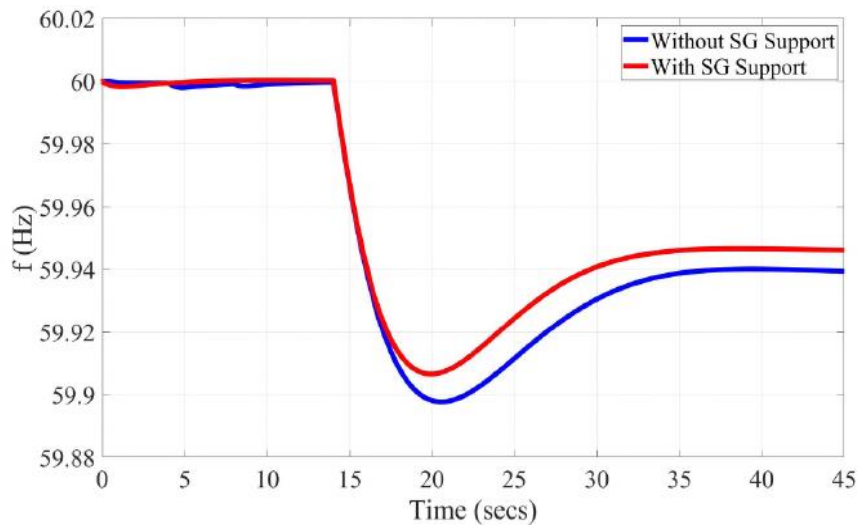
Use Cases 1: 804.44 Hilangnya Pembangkitan.

Suatu peristiwa 804,44 MW loss of generation (LOG) di WECC disimulasikan pada $t = 14$ detik. Respons frekuensi yang diukur untuk berbagai kasus SCR tanpa dukungan, dengan dukungan SG, dan dengan dukungan VSG dari sistem MA_RS ditunjukkan pada Gambar 10 - Gambar 13. Pada grid kuat dengan SCR yang lebih tinggi, dukungan frekuensi yang diberikan oleh sistem MA_RS melalui metode kontrol VSG lebih besar daripada dukungan frekuensi yang diberikan oleh sistem MA_RS melalui metode kontrol SG seperti yang diilustrasikan pada Gambar 7. Sebagai kekuatan dari sistem menurun dalam hal SCR, dukungan frekuensi yang diberikan oleh sistem MA_RS melalui metode kontrol SG-based lebih besar dibandingkan dengan dukungan frekuensi yang diberikan oleh sistem MA_RS melalui metode kontrol berbasis VSG. Fenomena ini dapat diamati pada Gambar 10 - Gambar 13. Hal ini karena metode kontrol berbasis VSG diimplementasikan dengan kontroler yang jauh lebih lambat. Metode kontrol berbasis VSG mencakup istilah turunan frekuensi dan pengukurannya melalui phase-locked loop sangat menantang di jaringan yang lemah. Pengoperasian kontrol berbasis VSG dengan pengontrol yang lebih cepat dapat menyebabkan osilasi yang dapat menyebabkan operasi

tidak stabil karena istilah frekuensi derivatif ini. Oleh karena itu, kontrol VSG harus dioperasikan dengan pengontrol yang lebih lambat. Masalah ini tidak terbukti dalam kontrol berbasis SG, karena metode ini tidak memiliki istilah phase-locked loop dan derivatif. Peningkatan frekuensi pada kondisi nadir dan steady state untuk setiap kondisi SCR dan untuk setiap jenis kontroler ditabulasikan pada Tabel 2.



Gambar 12. Respon Frekuensi Grid untuk LOG di WECC untuk SCR = 2



Gambar 13. Respon Frekuensi Grid untuk LOG di WECC untuk SCR = 0,5

SCR	Improvements			
	SG		VSG	
	nadir	steady state	nadir	steady state
0.5	8.69 %	11.00 %	UNSTABLE	
2	15.75 %	15.07 %	15.05 %	7.67 %
4	16.04 %	15.18 %	15.72 %	7.81 %
10	16.37 %	15.66 %	16.87 %	17.34 %

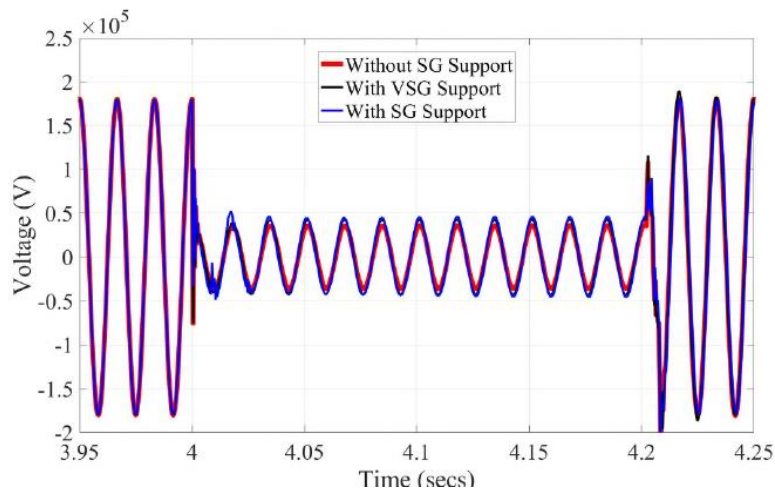
Tabel 2. Peningkatan respon frekuensi untuk SCR yang berbeda

Use Cases 2: Kesalahan 3-Fase

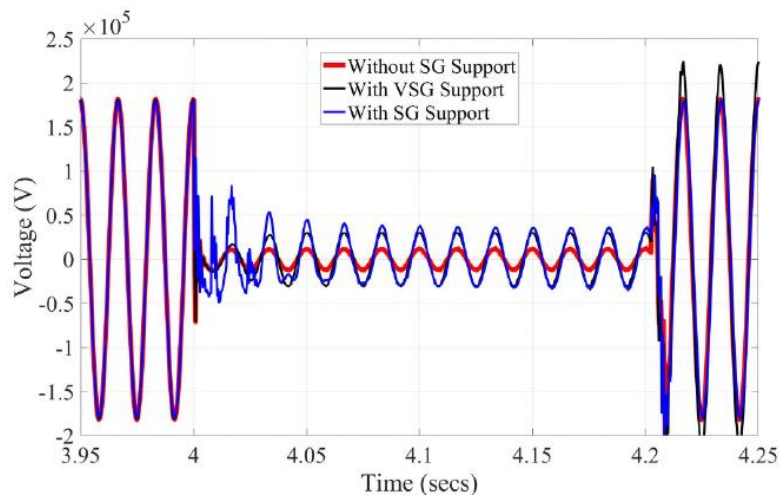
Gangguan 3 fasa disimulasikan pada saluran transmisi antara grid dan sistem MA_RS pada $t = 4,0$ detik dengan durasi gangguan 0,2 detik. Setelah 0,2 detik, kesalahan dibersihkan sendiri. Perbaikan profil tegangan fasa-a dengan bantuan dukungan VSG dan dukungan SG selama gangguan pada kondisi SCR yang berbeda ditunjukkan pada Gambar 11 - Gambar 13 dan ditabulasikan pada Tabel 3.

SCR	Improvements	
	SG	VSG
0.5	STABLE	UNSTABLE
2	21.25 %	17.21 %
4	14.16 %	10.98 %
10	6.81 %	5.33 %

Tabel 3. Peningkatan respon tegangan untuk SCR yang berbeda



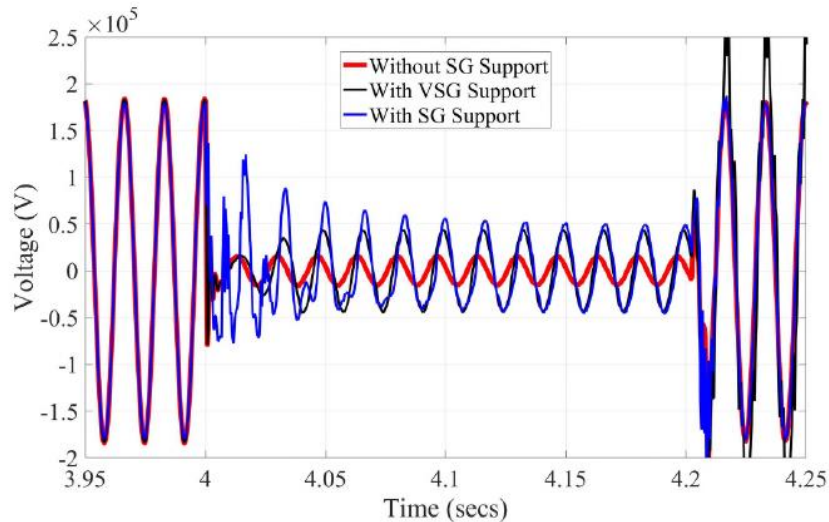
Gambar 14. Fasa-profil tegangan jaringan untuk gangguan 3 fasa untuk SCR = 10



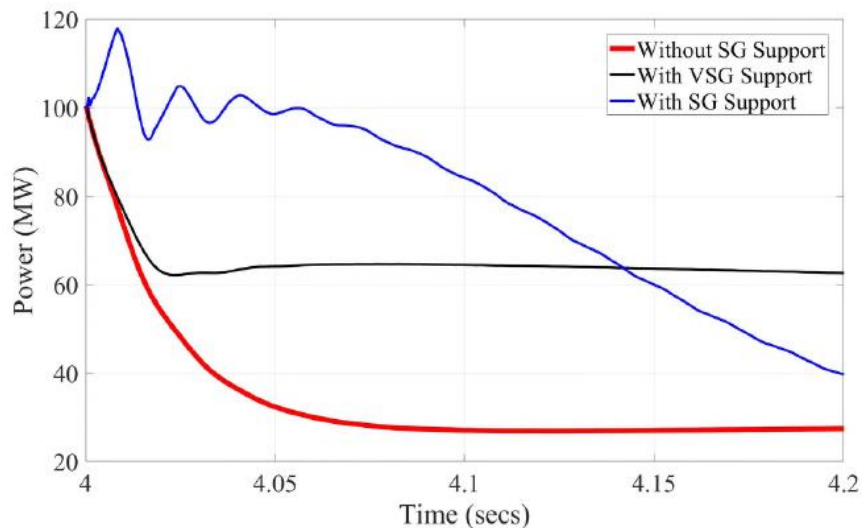
Gambar 15. Fasa-profil tegangan jaringan untuk gangguan 3 fasa untuk SCR = 4

Untuk kasus SCR yang berbeda, dukungan tegangan yang diberikan oleh sistem MA_RS melalui metode control berbasis SG lebih tinggi dibandingkan dengan dukungan tegangan yang diberikan oleh sistem MA_RS melalui metode control berbasis VSG. Namun, dalam kasus SCR= 10, daya aktif yang diberikan oleh metode control berbasis

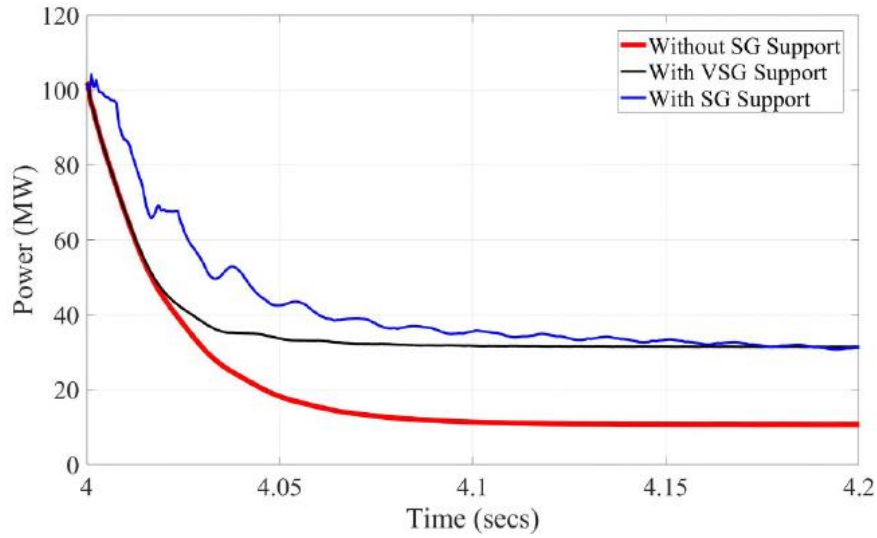
SG lebih kecil dari metode kontrol berbasis VSG seperti yang ditunjukkan pada Gambar 16. Kontroler yang lebih lambat digunakan dalam implementasi kontrol berbasis VSG karena pengukuran phase-locked loop sangat sensitif terhadap perubahan dalam grid. Hal ini menyebabkan perkiraan amplitudo tegangan puncak ac-side yang tidak akurat. Oleh karena itu, perolehan kontrol proporsional yang digunakan dalam pengontrol daya reaktif dikurangi untuk memastikan bahwa daya reaktif tambahan tidak terpengaruh oleh osilasi yang dimasukkan dalam tegangan puncak yang tidak akurat. Daya aktif dan daya reaktif yang disediakan oleh sistem MA_RS selama gangguan tanpa dukungan, dengan dukungan VSG, dan dukungan SG ditunjukkan pada Gambar 16 - Gambar 21.



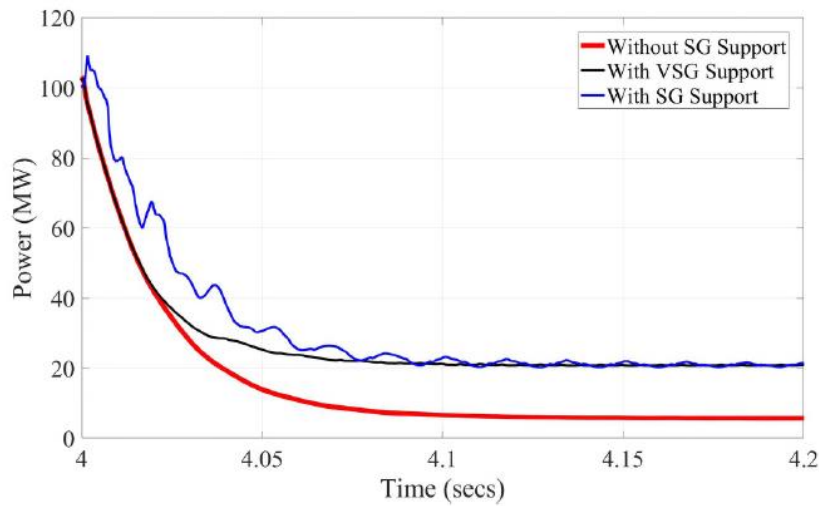
Gambar 16. Fasa-profil tegangan jaringan untuk gangguan 3 fasa untuk SCR = 2



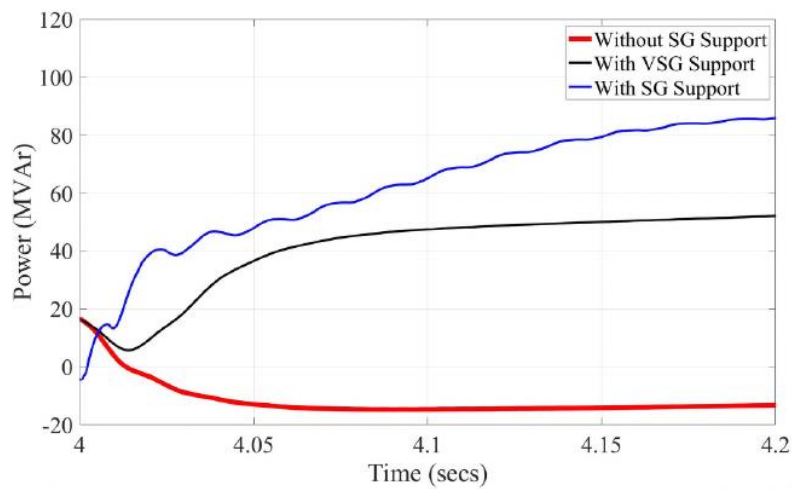
Gambar 17. Pendukung daya aktif selama gangguan 3 fasa untuk SCR = 10



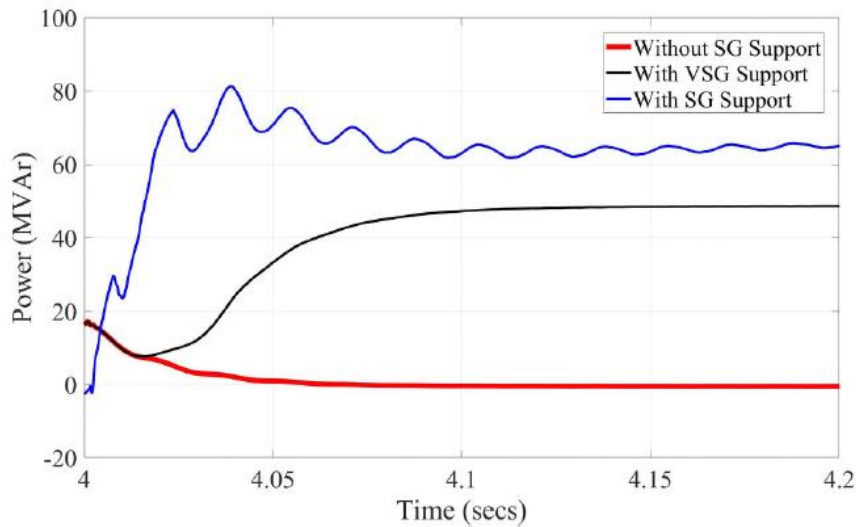
Gambar 18. Pendukung daya aktif selama gangguan 3 fasa untuk SCR = 4



Gambar 19. Pendukung daya aktif selama gangguan 3 fasa untuk SCR = 2

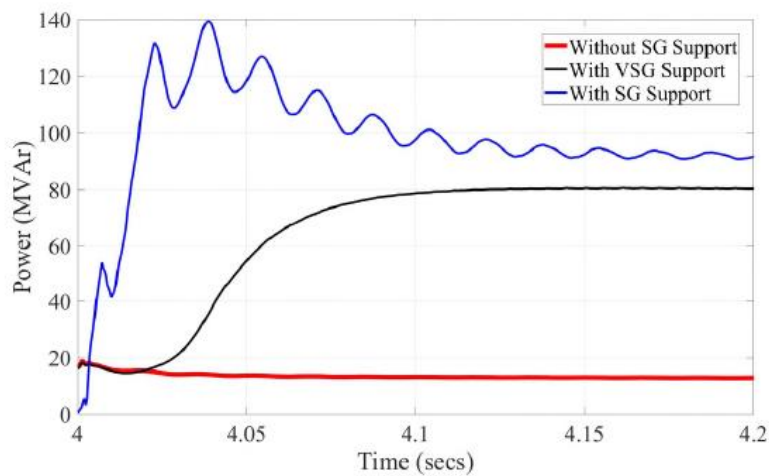


Gambar 20. Pendukung daya aktif selama gangguan 3 fasa untuk SCR = 10

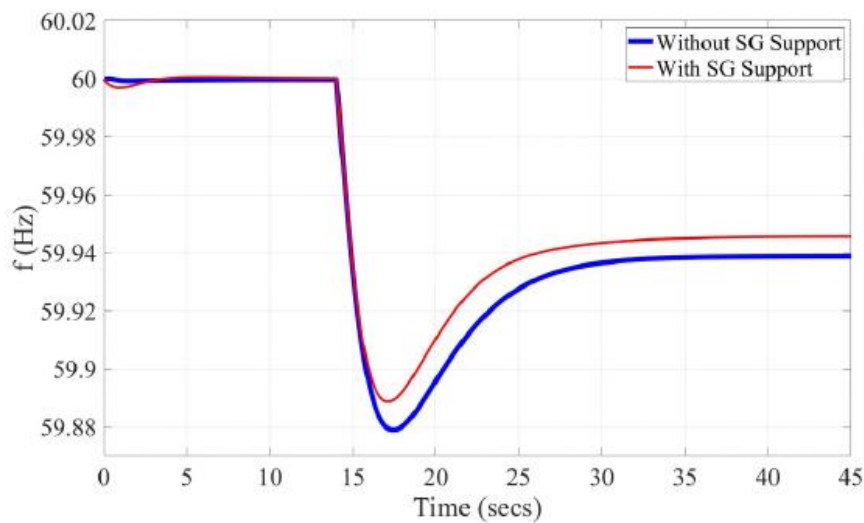


Gambar 21. Pendukung daya aktif selama gangguan 3 fasa untuk SCR = 4

Untuk kasus SCR 4, daya aktif yang diberikan oleh sistem MA_RS dengan metode kontrol SG-based lebih tinggi daripada daya aktif yang diberikan oleh metode control VSG hingga 4,15 detik dan menjadi sama dengan 4,2 s. Dari Gambar 18, untuk kasus SCR 2, daya aktif yang diberikan oleh sistem MA_RS dengan metode kontrol berbasis SG lebih tinggi dari daya aktif yang diberikan oleh metode kontrol berbasis VSG hingga empat ribu tujuh puluh lima detik dan menjadi sama dengan empat koma satu detik. Peningkatan profil tegangan untuk kasus SCR 2, 4, dan 10 dapat dikaitkan dengan profil daya reaktif yang sesuai. Dari Gambar 19 – Gambar 21 dapat dilihat bahwa daya reaktif yang diberikan oleh sistem MA_RS menggunakan metode kontrol berbasis SG lebih besar dari daya reaktif yang diberikan oleh sistem MA_RS menggunakan metode kontrol berbasis VSG. Untuk kasus SCR = 0,5, respon tegangan yang diberikan oleh metode kontrol berbasis VSG menghasilkan operasi yang tidak stabil sedangkan respon tegangan yang diberikan oleh metode kontrol berbasis SG menghasilkan operasi yang stabil. Ini karena interaksi antara phase-locked loop dan pengontrol berbasis VSG menghasilkan stabilitas masalah.



Gambar 22. Dukungan daya reaktif selama gangguan 3 fasa untuk SCR = 2



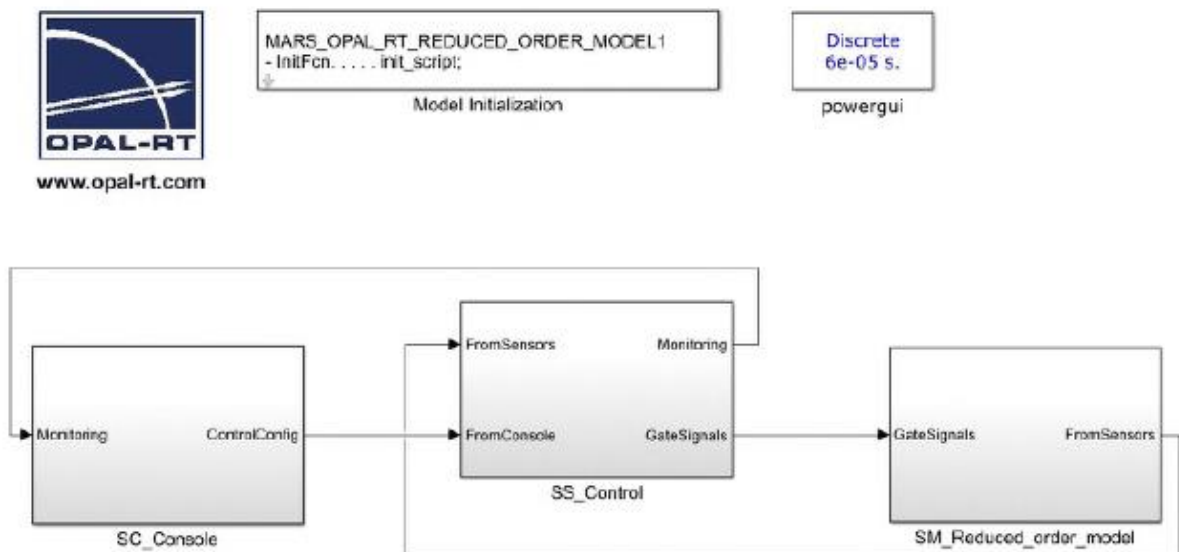
Gambar 24. Respons frekuensi grid untuk LOG di WECC untuk SCR = 0,5 dan H = 11 detik.

Use Cases 3: 804.44 Kehilangan Pembangkitan di Sistem SCR Rendah dan Inersia Rendah

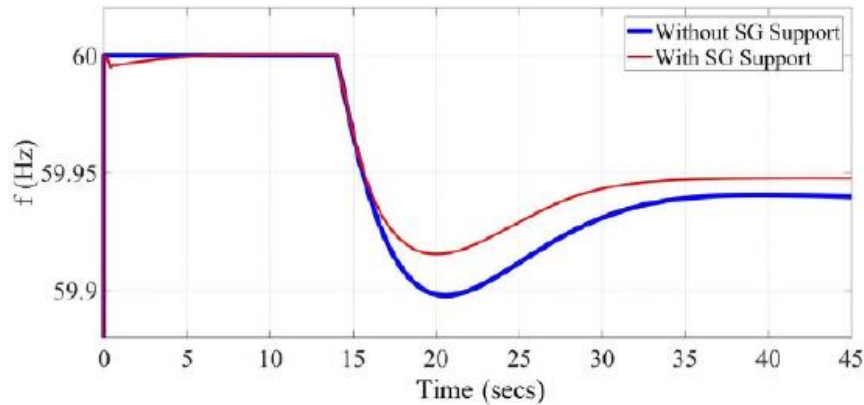
Untuk kondisi operasi $P_{ac} = P_{dc} = 100$ MW, SCR = 0.5, dan H = 11 detik, kejadian LOG diuji. Respon frekuensi grid untuk SCR = 0.5 dan H = 11 detik ditunjukkan pada Gambar 22. Peningkatan pada nadir frekuensi sebesar 8.10 percent dan peningkatan pada kondisi steady state sebesar 11.19 percent.

Simulasi Model Opal-Rt

Model OPAL RT terdiri dari sumber tegangan yang dikontrol frekuensi, 2 bagian jalur pi, pengontrol berbasis synchronverter, dan model urutan tereduksi dari sistem MA_RS. Modelnya ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 25. Model OPAL-RT



Gambar 26. Respon frekuensi grid untuk LOG di WECC untuk SCR=10 menggunakan model simulasi OPAL-R

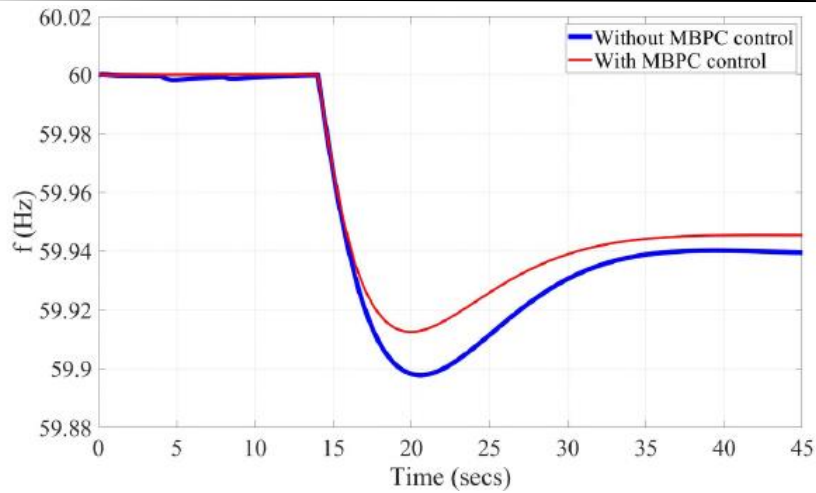
Bagian pi-line disetel setelah melepaskan model urutan tereduksi dan didasarkan pada hasil kontinjensi dari kesalahan line-to-line dalam model WECC 179-bus di PSCAD. Model grid ac dimodelkan sama dengan model yang digunakan di Simulasi PSCAD (yaitu WSEIG1). Respons frekuensi jaringan untuk Use Cases yang sama untuk kasus SCR = sepuluh ditunjukkan pada Gambar 26. Peningkatan pada nadir frekuensi adalah tujuh belas koma dua belas persen dan peningkatan pada kondisi stabil adalah tiga belas koma satu persen

Sistem Pengujian

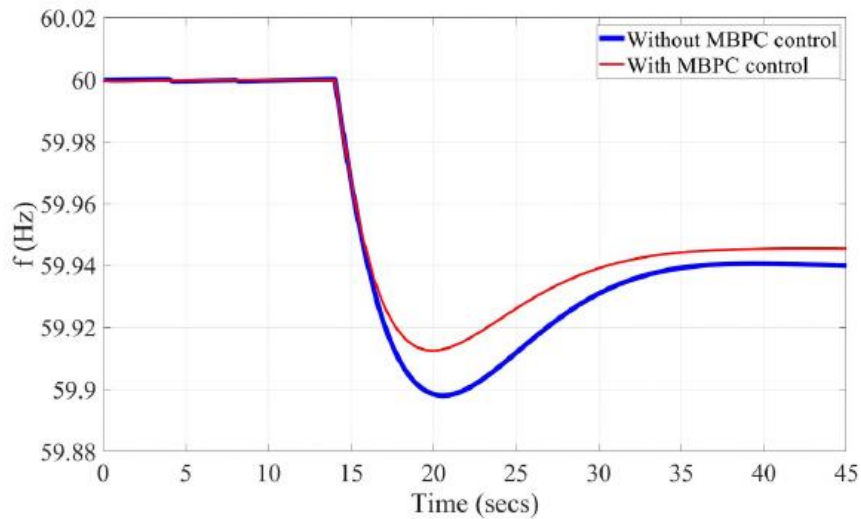
Ada seratus sebelas PV, tiga puluh tujuh energy storage system, dan delapan puluh satu SM normal per lengan dalam sistem pengujian ini. PV dan energy storage system diberi peringkat seratus lima puluh kilo watt, satu kilo volt. Ukuran PV dan energy storage system SM ditentukan berdasarkan penggunaan perangkat SiC dua ampere, tiga koma tiga kilo volt dalam konverter dc-dc. Jumlah total SM per lengan ditentukan oleh tegangan dc-link di lokasi dan berdasarkan gardu HV_DC yang terpasang.

Use Case Untuk MA_RS Dengan Model Grid-ac

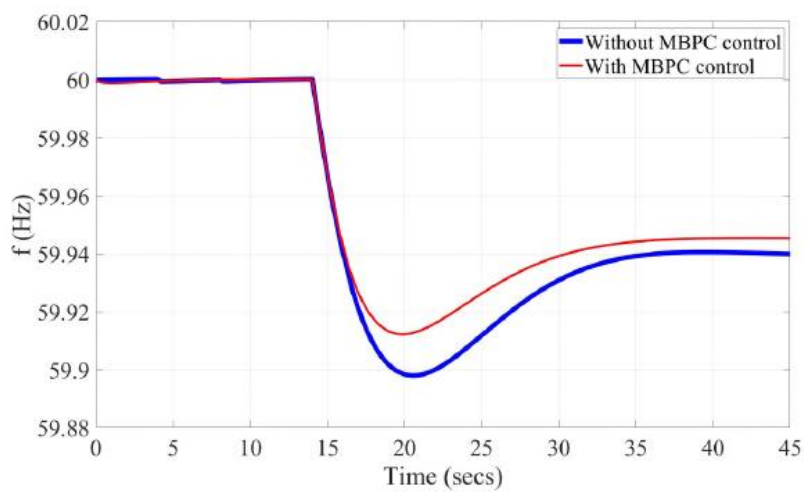
Model multi-tingkat sistem MA_RS dikembangkan. Model dinamis sistem MA_RS terhubung dengan model dinamis jaringan Western Interconnection (WI). Grid ac di WI dimodelkan berdasarkan WSEIG1 untuk secara akurat mewakili data frekuensi yang tersedia. Short circuit ratio (SCR) dari grid ac yang terhubung ke sistem MA_RS divariasikan untuk mengevaluasi kinerja sistem kontrol yang diusulkan dalam sistem MA_RS. Kondisi SCR yang berbeda diemulasikan berdasarkan variasi panjang saluran transmisi di lingkungan simulasi PSCAD untuk pengaturan simulasi PSCAD yang dirinci dalam. Use Cases berikut diidentifikasi dan diuji untuk kondisi pengoperasian $P_{ac} = P_{dc} = 100$ MW: 804,44 MW kehilangan pembangkitan pada $t = 14$ detik berdasarkan generator Haynes3 di jaringan WI. Peristiwa 804,44 MW loss of generation (LOG) di western electric coordinating (WECC) disimulasikan pada $t = 14$ detik. Respons frekuensi yang diukur untuk berbagai kasus SCR tanpa dukungan dan dengan dukungan berbasis model-based predictive control (MB_PC) dari sistem MA_RS ditunjukkan pada Gambar 27 - Gambar 30. Peningkatan frekuensi dalam keadaan nadir dan tunak untuk setiap kondisi SCR dan untuk setiap jenis pengontrol adalah ditabulasikan pada Tabel 4.



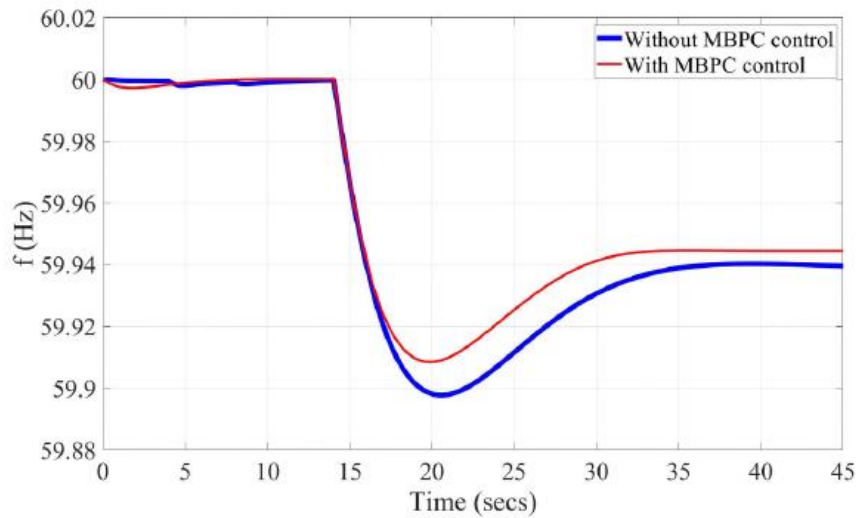
Gambar 27. Respon Frekuensi Grid untuk LOG di WECC untuk SCR = 10



Gambar 28. Respon Frekuensi Grid untuk LOG di WECC untuk SCR = 4



Gambar 29. Respon Frekuensi Grid untuk LOG di WECC untuk SCR = 2



Gambar 30. Respon Frekuensi Grid untuk LOG di WECC untuk SCR = 0,5

SCR	Improvements	
	MBPC-based method	
	nadir	steady state
0.5	8.29 %	6.04 %
2	13.96 %	9.10 %
4	14.19 %	9.19 %
10	14.53 %	9.73 %

Tabel 4. Peningkatan respon frekuensi untuk SCR yang berbeda

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menyajikan algoritma synchronverter dan arsitektur kontrol sistem Multi-port Autonomous Reconfigurable Solar (MA_RS) untuk memberikan dukungan ke jaringan ac di bawah berbagai peristiwa di jaringan dan menyajikan algoritma kontrol berbasis model-based predictive control (MB_PC) untuk sistem MA_RS untuk memberikan dukungan ke jaringan ac ketika perubahan frekuensi diamati di jaringan. Algoritma kontrol berbasis SG diusulkan untuk mendukung frekuensi dan tegangan jaringan ac selama gangguan pada jaringan. Selain itu, deskripsi singkat tentang arsitektur kontrol keseluruhan dari sistem MA_RS disajikan. Algoritme kontrol yang diusulkan dan arsitektur kontrol MA_RS dievaluasi dan divalidasi untuk sistem MA_RS dalam lingkungan simulasi PSCAD/EMTDC. Model simulasi offline OPAL-RT yang diperlukan untuk melakukan tes control hardware-in-the-loop (c-HIL) juga dikembangkan. Model yang dikembangkan dan algoritma kontrol yang diusulkan diuji untuk skenario grid yang berbeda. Untuk meringkas hasil, untuk sistem studi khusus yang dipertimbangkan dalam penelitian ini, sistem MA_RS dengan kontrol berbasis SG memberikan dukungan frekuensi yang lebih baik dalam hal nadir frekuensi yang lebih tinggi dan kondisi tunak frekuensi yang lebih tinggi selama ekskursi frekuensi dibandingkan dengan kontrol berbasis VSG metode. Juga sistem MA_RS dengan kontrol berbasis SG memberikan dukungan voltase yang lebih baik dengan menyuntikkan lebih banyak daya reaktif ke dalam sistem selama gangguan fase seimbang dibandingkan dengan metode kontrol berbasis VSG.

Poin penting yang dapat diambil dari upaya penelitian ini adalah bahwa untuk sistem studi khusus yang dipertimbangkan dalam penelitian ini, metode kontrol berbasis SG lebih stabil dan memberikan kinerja yang lebih baik dalam hal nadir frekuensi dan peningkatan kondisi tunak. Untuk respon tegangan, metode kontrol berbasis SG lebih baik daripada metode kontrol berbasis VSG untuk kondisi SCR berbeda yang diuji. Kontrol berbasis MB_PC didasarkan pada algoritma kontrol berbasis synchronverter. Algoritme kontrol yang diusulkan dan arsitektur kontrol sistem MA_RS dievaluasi pada sistem MA_RS pada lingkungan simulasi PSCAD/EMTDC. Hasil simulasi menampilkan peningkatan nadir frekuensi dan kondisi tunak frekuensi yang disediakan oleh sistem Multi-port Autonomous Reconfigurable Solar

(MA_RS) melalui kontrol MB_PC. Kinerja synchronverter selama kesalahan yang tidak seimbang adalah jalan penelitian yang belum dieksplorasi dan masih menimbulkan pertanyaan terbuka (Shen et al., (2017)). Salah satu tantangan utama selama kesalahan yang tidak seimbang adalah menangkap dinamika tegangan sisi ac yang berubah dengan cepat. Ketidakmampuan untuk menangkap dinamika tegangan sisi ac secara akurat menghasilkan arus jaringan sisi ac yang tidak wajar. Metode kontrol lanjutan diperlukan untuk menyediakan operasi yang stabil di bawah kesalahan yang tidak seimbang.

DAFTAR PUSTAKA

- E. K. P. Chong and S. H. Zak, *An Introduction to Optimization*. Wiley, 2004.
- H. Knaak, "Modular multilevel converters and HV_DC/FACTS: A success story," in Proc. 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 16.
- H. Knaak, "Modular multilevel converters and HV_DC/FACTS: A success story," in Proc. 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-6.
- J. Rodriguez and P. Cortes, *Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives*. Wiley-IEEE Press, 2012.
- M. Amin and M. Molinas, "Self-synchronisation of wind farm in MMC-based HV_DC system," in Proc. 2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), pp. 16.
- M. Amin, A. Rygg, and M. Molinas, "Self-synchronization of wind farm in an MMC- based HV_DC system: A stability investigation," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 32, no. 2, pp. 458-470, 2017.
- M. P. N. Van Wesenbeeck, S. W. H. De Haan, P. Varela, and K. Visscher, "Grid tied converter with virtual kinetic storage," in Proc. 2009 IEEE Bucharest PowerTech, pp. 1-7.
- P. Krause, O. Wasynczuk, S. Sudhoff, S. Norrga, and S. Pekarek, *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. Wiley-IEEE Press, 2013.
- Q. Zhong and G. Weiss, "Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 1259-1267, April 2011.
- Q. Zhong and G. Weiss, "Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 4, pp. 1259-1267, April 2011.
- Q. Zhong, P. Nguyen, Z. Ma, and W. Sheng, "Self-synchronized synchronverters: Inverters without a dedicated synchronization unit," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 2, pp. 617-630, 2014.
- S. Debnath and M. Chinthavali, "Control of MMC-HV_DC in low-inertia weak grids," in Proc. 2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), pp. 435-441.
- S. Debnath and M. Chinthavali, "MMC-HV_DC: Simulation and control system," in Proc. 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 1-8.
- S. Debnath, J. Qin, B. Bahrani, M. Saeedifard, and P. Barbosa, "Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, pp. 37-53, Jan 2015.
- U. Tamrakar, D. Shrestha, M. Maharjan, B. P. Bhattarai, T. M. Hansen, and R. Tonkoski, "Virtual inertia: Current trends and future directions," *Applied Sciences*, vol. 7, no. 7, p. 654, 2017.
- WECC Renewable Energy Modeling Task Force, "WECC Solar Plant Dynamic Modeling Guidelines," 2014.
- Z. Shuai, W. Huang, C. Shen, J. Ge, and Z. J. Shen, "Characteristics and restraining method of fast transient inrush fault currents in synchronverters," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 9, pp. 7487-7497, 2017.