

Strategi Kendali Daya Baterai-Superkapasitor Berbasis *Variable Time Constant* dengan Pendekatan Gradien

Ariq Kusuma Wardana^{*a)}, Imron Ridzki^{b)}, Arinalhaq Fatachul Aziiz^{a)}, Ricto Yudi Wicaksono^{c)}

(Received 6 April 2026 || Revised 28 Juni 2026 || Published 9 Juli 2026)

Abstract: Photovoltaic (PV) power generation is inherently intermittent, causing power fluctuations that can degrade DC-bus voltage stability and overall system performance. To address this issue, this study proposes an adaptive variable time constant (VTC) control strategy with a gradient-based approach for battery-supercapacitor power management in a stand-alone PV system. In the proposed method, the low-pass filter (LPF) frequency is adjusted adaptively according to the gradient of the total compensation current. A higher gradient increases the LPF frequency to improve transient response, while a lower gradient helps maintain stable operation and supports balanced power sharing between the battery and supercapacitor. The proposed strategy was evaluated in MATLAB/Simulink under two irradiation-change scenarios, namely undershoot (1000 to 750 W/m²) and overshoot (750 to 1000 W/m²), and compared with fixed time constant (FTC) methods. The results show that the proposed VTC strategy yields the lowest average DC-bus voltage deviation of 9.50%, compared with 9.66% for FTC minimum and 9.68% for FTC maximum. In addition, it maintains a low average supercapacitor state-of-charge deviation of 0.0150%, equal to FTC maximum and significantly lower than FTC minimum (0.1628%). These findings indicate that the proposed adaptive VTC strategy improves voltage regulation while maintaining effective battery-supercapacitor power sharing under dynamic PV operating conditions.

Keywords: battery, supercapacitor, hybrid energy storage system, variable time constant, gradient.

1. Pendahuluan

Perkembangan sistem tenaga listrik yang mengintegrasikan sumber energi terbarukan terus mengalami peningkatan. Salah satu teknologi yang berkembang pesat adalah tenaga surya atau solar *photovoltaic* (PV), karena memiliki potensi sumber energi yang melimpah, biaya investasi yang semakin terjangkau, serta instalasi yang relatif mudah diterapkan. Di Indonesia, pemanfaatan PV juga terus meningkat seiring dengan kebutuhan penyediaan energi yang lebih berkelanjutan. Namun, keluaran daya PV bersifat intermiten karena sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, seperti iradiasi matahari, temperatur, dan efek bayangan (*shading*), sehingga dapat menimbulkan fluktuasi daya terhadap waktu [1]. Fluktuasi ini berpotensi menurunkan kestabilan tegangan, kualitas daya, dan keandalan sistem, khususnya pada sistem PV *stand-alone*.

Di Indonesia, sistem PV *stand-alone* menyumbang sekitar 7,81% dari total kapasitas terpasang PV sebesar 717 MWp [2]. Pada konfigurasi ini, sistem penyimpanan energi diperlukan untuk mengakomodasi kondisi surplus maupun defisit daya akibat perubahan keluaran PV dan variasi beban. Salah satu teknologi penyimpanan energi yang umum digunakan adalah *Battery Energy Storage System* (BESS), karena memiliki kepadatan energi tinggi, biaya daya yang relatif rendah, serta karakteristik operasi yang sesuai untuk penyediaan energi jangka menengah hingga jangka panjang [3]. Meskipun demikian, kemampuan BESS dalam merespons perubahan daya yang cepat masih terbatas karena karakteristik respons dinamisnya yang moderat.

Untuk meningkatkan kemampuan respons transien pada sistem PV, BESS dapat dikombinasikan dengan *Supercapacitor Energy Storage System* (SCES) yang memiliki kepadatan daya tinggi, efisiensi tinggi, dan respons dinamis yang sangat cepat. Kombinasi BESS dan SCES dikenal sebagai *Hybrid Energy Storage System* (HESS), yang memungkinkan pembagian peran antara penyimpanan energi berkapasitas besar dan penyimpanan daya berrespons cepat [4],[5]. Dalam konfigurasi ini, BESS

umumnya digunakan untuk menyuplai komponen daya rata-rata atau perubahan daya berdurasi lebih lama, sedangkan SCES berperan dalam mengkompensasi fluktuasi daya cepat selama kondisi transien. Dengan demikian, HESS berpotensi meningkatkan fleksibilitas power sharing dan memperbaiki respons sistem pada kondisi dinamis.

Berbagai strategi kendali telah dikembangkan untuk mengatur pembagian daya pada HESS guna mendukung kestabilan tegangan, kualitas daya, dan keseimbangan daya pada sistem PV *stand-alone*. Salah satu pendekatan yang paling umum digunakan adalah metode berbasis *low-pass filter* (LPF), karena memiliki struktur yang sederhana, komputasi ringan, dan mudah diimplementasikan [6]-[8]. Selain itu, beberapa metode yang lebih kompleks juga telah dikembangkan, seperti *adaptive rate limiter*, *deadbeat control*, *model predictive control* (MPC), dan *power management algorithm* (PMA) [9]-[12]. Pada strategi berbasis LPF, pembagian daya antara BESS dan SCES ditentukan oleh nilai *time constant* atau frekuensi *cut-off filter*. Secara umum, frekuensi LPF yang lebih tinggi akan meningkatkan kontribusi BESS dan mempercepat respons sistem, sedangkan frekuensi LPF yang lebih rendah akan memperbesar peran SCES dalam meredam komponen daya transien.

Meskipun mudah diterapkan, penggunaan *fixed time constant* (FTC) pada LPF memiliki keterbatasan ketika sistem beroperasi pada kondisi dinamis yang berubah-ubah. Nilai FTC yang rendah cenderung meningkatkan kontribusi SCES dalam merespons perubahan daya cepat, tetapi dapat memperlambat respons sistem secara keseluruhan dan meningkatkan fluktuasi daya pada sisi SCES. Sebaliknya, nilai FTC yang tinggi dapat mempercepat respons sistem dan meningkatkan kontribusi BESS, namun juga berpotensi meningkatkan beban dinamis pada baterai karena BESS harus merespons komponen daya berfrekuensi lebih tinggi. Dengan demikian, satu nilai FTC tunggal belum tentu mampu memberikan kompromi kinerja yang optimal pada berbagai kondisi transien sistem PV. Kondisi inilah yang menunjukkan perlunya strategi kendali yang lebih adaptif agar frekuensi LPF dapat menyesuaikan diri terhadap perubahan kondisi operasi.

*Korespondensi: ariq.kusuma@polinema.ac.id

a) Prodi Sistem Kelistrikan, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Kota Malang, Indonesia

b) Prodi Teknik Listrik, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Kota Malang, Indonesia

c) Prodi Teknik Komputer Kontrol, Politeknik Negeri Madiun, Kota Madiun, Indonesia

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan strategi kendali daya baterai-superkapasitor berbasis *variable time constant* (VTC) dengan pendekatan gradien pada sistem PV *stand-alone*. Pada metode yang diusulkan, frekuensi LPF tidak ditetapkan secara konstan, tetapi disesuaikan secara adaptif berdasarkan gradien arus kompensasi total HESS. Ketika gradien arus meningkat, frekuensi LPF dinaikkan untuk memperbaiki respons transien sistem; sebaliknya, ketika gradien arus menurun, frekuensi LPF diturunkan agar pembagian daya antara BESS dan SCES tetap seimbang serta operasi sistem tetap stabil.

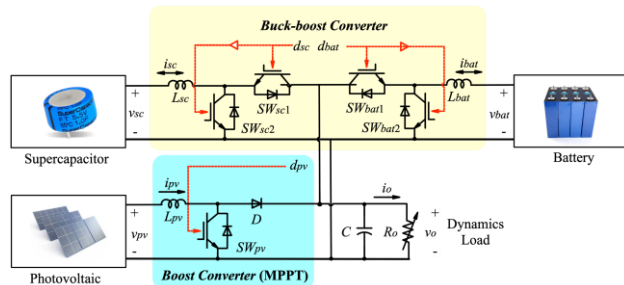
Kontribusi utama penelitian ini adalah: (1) merumuskan mekanisme VTC berbasis gradien untuk pengaturan frekuensi LPF pada HESS; (2) mengevaluasi pengaruh strategi yang diusulkan terhadap kestabilan tegangan DC bus dan deviasi *state-of-charge* (SoC) SCES pada kondisi perubahan iradiasi; serta (3) membandingkan kinerja metode usulan dengan metode FTC minimum dan FTC maksimum melalui simulasi MATLAB/Simulink. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah menganalisis efektivitas strategi VTC dalam meningkatkan kinerja pembagian daya baterai-superkapasitor pada sistem PV *stand-alone* di bawah kondisi operasi dinamis.

2. Metode

Bab ini menjelaskan metode penelitian yang digunakan, meliputi konfigurasi sistem PV *stand-alone*, perancangan frekuensi LPF, strategi kendali HESS, serta konfigurasi simulasi.

2.1 Konfigurasi Sistem PV *stand-alone*

Konfigurasi PV *stand-alone system* terdiri dari PV, HESS, beban, serta konverter elektronika daya, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.1. Gambar 2.1 menjelaskan bahwa daya yang dihasilkan oleh PV dialirkan ke konverter *boost* (MPPT) untuk melakukan *tracking* daya maksimum sekaligus menjaga kestabilan tegangan sistem. Algoritma MPPT yang digunakan adalah *Perturb & Observation* (P&O) karena memiliki alur sederhana serta mudah dimodelkan. Selanjutnya, keluaran dari MPPT dapat disalurkan langsung ke beban apabila kondisi sistem berada dalam keadaan seimbang (*power balance*), atau dialirkan menuju HESS ketika terjadi kondisi surplus maupun defisit daya. Konfigurasi HESS dihubungkan secara paralel aktif dan dilengkapi dengan konverter *bidirectional DC-DC* yang berfungsi untuk proses *charging* dan *discharging* sistem penyimpanan energi.



GAMBAR 2.1 KONFIGURASI PV STAND-ALONE SYSTEM DENGAN HESS

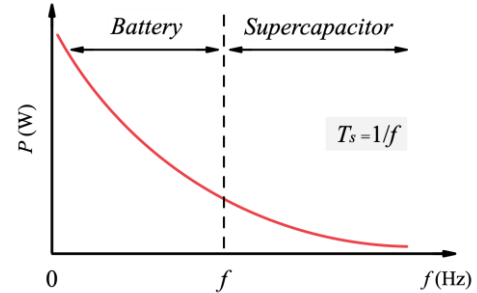
2.2 Perancangan Frekuensi LPF

Mengacu pada karakteristik dinamis dari BESS dan SCES yang memiliki profil kepadatan energi dan daya yang berbeda, penentuan frekuensi dilakukan berdasarkan kinerja kepadatan

daya (ρ_{power}) dan kepadatan energi (ρ_{energy}) pada konfigurasi HESS. Rasio antara kedua parameter tersebut digunakan sebagai acuan dalam menentukan rentang frekuensi yang diizinkan, sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (2-1) [13]

$$f_{LPF} = \frac{\rho_{power}}{\rho_{energy}} \quad (2-1)$$

Gambar 2.2 mengilustrasikan zona kerja ideal dalam pembagian peran antara BESS dan SCES berdasarkan frekuensi LPF. Rentang frekuensi LPF berfungsi untuk menentukan pembagian daya pada sistem HESS, di mana nilai nominal frekuensi LPF yang diperbolehkan berada pada kisaran 5–1.000 Hz [14].



GAMBAR 2.2 DIAGRAM SPEKTRUM FREKUENSI UNTUK HESS

2.3 Strategi Kendali HESS berbasis FTC

Perlu diperhatikan bahwa persamaan keseimbangan daya (*power balance*) merepresentasikan kondisi sistem ketika berada dalam keadaan setimbang. Hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2-2):

$$P_{load}(t) - P_{pv}(t) = P_{bat}(t) + P_{sc}(t) \quad (2-2)$$

Secara matematis, arus total kompensasi HESS (i_{tot}) diformulasikan sebagai berikut:

$$P_{bat}(t) + P_{sc}(t) = v_o(t) \cdot i_{tot}(t) \quad (2-3)$$

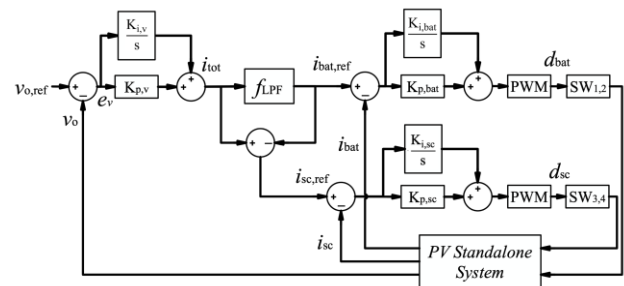
$$\frac{P_{bat}(t)}{v_o(t)} + \frac{P_{sc}(t)}{v_o(t)} = i_{tot}(t) \quad (2-4)$$

$$i_{bat,ref}(t) + i_{sc,ref}(t) = i_{tot}(t) \quad (2-5)$$

$$i_{bat,ref}(t) = f_{LPF} \cdot i_{tot}(t) \quad (2-6)$$

$$i_{sc,ref}(t) = i_{tot}(t) - i_{bat,ref}(t) \quad (2-7)$$

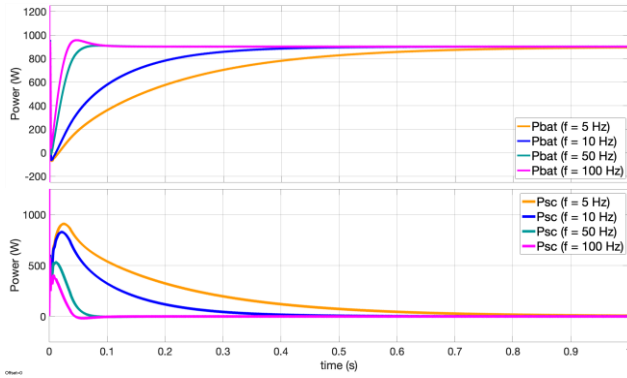
Skema kendali HESS berbasis FTC ditunjukkan pada Gambar 2.3.



GAMBAR 2.3 STRATEGI KENDALI HESS BERBASIS *FIX TIME CONSTANT* (FTC)

Proses pengendalian HESS diawali dengan menghitung deviasi antara tegangan aktual dan tegangan referensi, yang selanjutnya digunakan untuk menghasilkan arus kompensasi sesuai dengan Persamaan (2-5). Untuk mengalokasikan kinerja antara BESS dan SCES, tahap berikutnya dilakukan pembagian arus berdasarkan Persamaan (2-6) dan (2-7), sehingga diperoleh arus referensi masing-masing unit penyimpanan energi yang kemudian dikonversi menjadi sinyal *duty cycle*.

Gambar 2.4 memperlihatkan variasi respons daya BESS dan SCES terhadap perubahan frekuensi LPF. Dapat disimpulkan bahwa ketika nilai f_{LPF} berada pada kondisi minimum, peran dinamis SCES menjadi lebih dominan sehingga mengurangi kinerja BESS. Namun, kelemahan dari kondisi ini adalah waktu respons sistem menjadi lebih lambat, *ripple* daya meningkat, serta menghasilkan deviasi SoC SCES menjadi lebih besar. Sebaliknya, ketika f_{LPF} bernilai maksimum, BESS berperan lebih dominan dengan *transient response* yang lebih cepat, penurunan *power ripple*, serta deviasi SoC SCES yang lebih rendah. Namun kondisi ini meningkatkan beban dinamis pada baterai karena BESS harus merespons komponen daya berfrekuensi tinggi [9].



GAMBAR 2.4 PROFIL DAYA HESS DENGAN VARIASI FTC

2.4 Formulasi Adaptif *Variable Time Constant* Berbasis Fungsi Linear Tangen

Kompensasi daya melalui pengendali PI pada loop pengendalian tegangan untuk menghasilkan arus kompensasi daya total. Parameter f_{avr} merupakan frekuensi *cut-off* LPF frekuensi rendah yang digunakan untuk mengekstraksi komponen arus rata-rata (i_{avr}) dari arus total. Sementara itu, f_h adalah frekuensi *cut-off* LPF frekuensi tinggi yang berfungsi untuk mengekstraksi komponen arus frekuensi tinggi (i_h). Parameter T_{s1} dan T_{s2} menyatakan konstanta waktu LPF orde pertama dan kedua yang berhubungan langsung dengan frekuensi *cut-off*, sedangkan T_{sh} merupakan konstanta waktu ekuivalen LPF pada jalur arus frekuensi tinggi yang merepresentasikan penyederhanaan LPF orde lebih tinggi menjadi LPF orde pertama.

Selanjutnya, frekuensi kompensasi ditentukan berdasarkan Persamaan (2-8)–(2-10) [15].

$$i_{avr}(s) = \frac{1}{T_{s1}s + 1} \cdot i_{tot}(s) \quad (2-8)$$

$$i_h(s) = i_{tot}(s) - i_{avr}(s) \quad (2-9)$$

$$i_h(s) = \frac{(T_{s2} - T_{s1}) \cdot s}{(T_{s1}s + 1)(T_{s2}s + 1)} \cdot i_{tot}(s) \quad (2-10)$$

Sedangkan penyesuaian frekuensi LPF dilakukan secara adaptif menggunakan fungsi linear tangen, sebagaimana dirumuskan pada Persamaan (2-11)–(2-13).

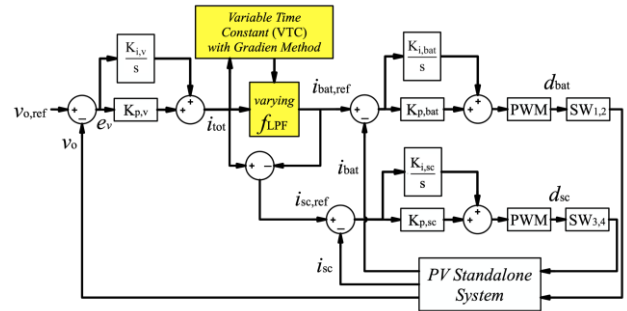
$$r = \frac{i_h(s)}{i_{tot}(s)} \quad (2-11)$$

$$m = \tanh(r) \quad (2-12)$$

$$0 \leq m \leq 1 \quad (2-13)$$

2.5 Strategi Kendali HESS berbasis VTC

Representasi diagram blok strategi kendali HESS yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 2.5. Skema kendali ini diharapkan mampu meningkatkan fleksibilitas pembagian daya antara BESS dan SCES serta memperbaiki respons transien sistem.



GAMBAR 2.5 STRATEGI KENDALI HESS BERBASIS *VARIABLE TIME CONSTANT* (VTC)

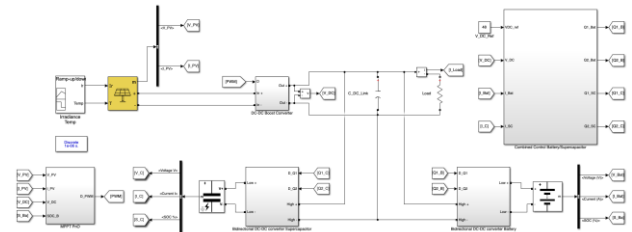
Terdapat dua formulasi untuk mendapatkan frekuensi kompensasi berbasis adaptif VTC, dimana perbedaan ini ditinjau dari kondisi iradiasi matahari, saat kondisi penurunan iradiasi PV (*undershoot*) maka berlaku Persamaan (2-14), sedangkan kondisi kenaikan iradiasi PV (*overshoot*) berlaku Persamaan (2-15):

$$f_{LPF} = f_{min} + ((1 - m)(f_{max} - f_{min})) \quad (2-14)$$

$$f_{LPF} = f_{max} + (m(f_{max} - f_{min})) \quad (2-15)$$

2.6 Konfigurasi Simulasi

Berikut merupakan rangkaian simulasi sistem PV-HESS-beban yang direalisasikan menggunakan *software* MATLAB-Simulink, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.6.



GAMBAR 2.6 RANGKAIAN PV-HESS-LOAD PADA *SOFTWARE* SIMULINK

Tabel 2.1 menunjukkan spesifikasi parameter simulasi yang digunakan dalam perancangan dan pengujian sistem PV-HESS-beban pada *software* MATLAB/Simulink.

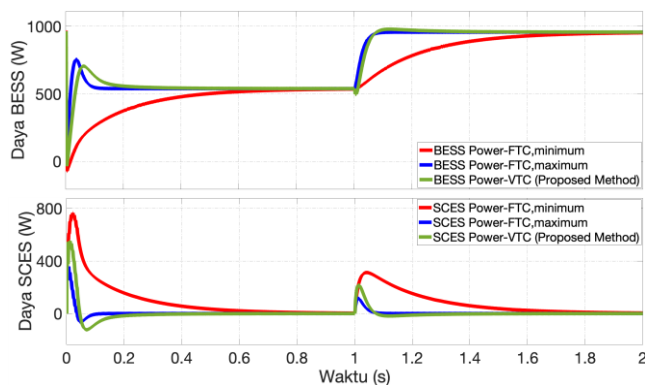
TABEL 2.1 SPESIFIKASI PARAMETER SIMULASI

Parameter	Spesifikasi
PV Array System	P_{pv} 2.400 Wp
	v_{pv} dan i_{pv} 17 V dan 7,1 A
	v_{DC} 48 V
BESS (Power Brick+ 24 V LiFePO4)	$v_{bat,nom}$ 24 V
	SoC_{bat} 50%
	Kapasitas BESS 50 Ah
SC (Maxwell BMOD0058-E016-C0)	$v_{bat,nom}$ 24 V
	SoC_{sc} 75%
	Kapasitas SCES 58 F
Konverter Boost (MPPT)	L_{in} , C_{in} , dan R_{in} 0,352 mH; 0,05 Ω ; 2.200 μ F
Konverter Bidirectional DC-DC	L_{bat} , C_{bat} , L_{sc} , C_{sc} , dan C_{DC-DC} 0,5 mH; 1 mH; 21 μ F; 43 μ F; dan 1,34 mF
Nominal beban	P_{Load} 2.000 W
Frekuensi LPF	f_{LPF} $5 \leq f_{LPF} \leq 100$ Hz
Voltage Controller	$K_{p,v}$ dan $K_{i,v}$ 0,45 dan 170
BESS Current Controller	$K_{p,bat}$ dan $K_{i,bat}$ 1 dan 45
SCES Current Controller	$K_{p,sc}$ dan $K_{i,sc}$ 2,25 dan 650

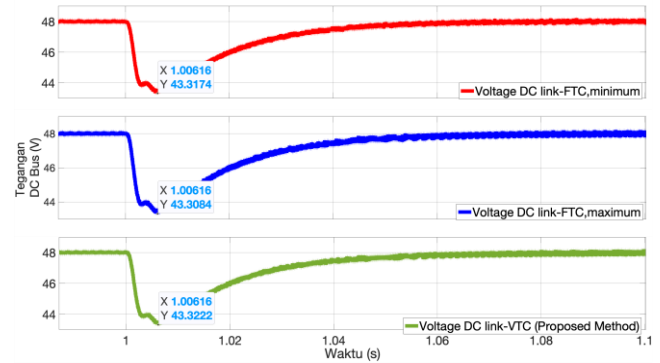
3. Hasil dan Pembahasan

Untuk mengevaluasi strategi kontrol yang diusulkan, dilakukan dua skenario simulasi perubahan iradiasi, yaitu kondisi *undershoot* dan *overshoot*. Simulasi yang pertama merepresentasikan kondisi *undershoot*, yaitu ketika terjadi penurunan iradiasi dari 1000 W/m² menjadi 750 W/m² dengan asumsi temperatur konstan. Pada kondisi ini, analisis difokuskan pada keseimbangan daya (*power balance*), besaran tegangan DC Bus (*DC bus voltage magnitude*), SoC superkapasitor SCES, serta respons frekuensi maupun gradiennya. Selanjutnya, simulasi kedua menggambarkan kondisi *overshoot*, yaitu peningkatan iradiasi dari 750 W/m² menjadi 1000 W/m² dengan asumsi temperatur tetap, dengan parameter analisis yang sama seperti pada skenario pertama.

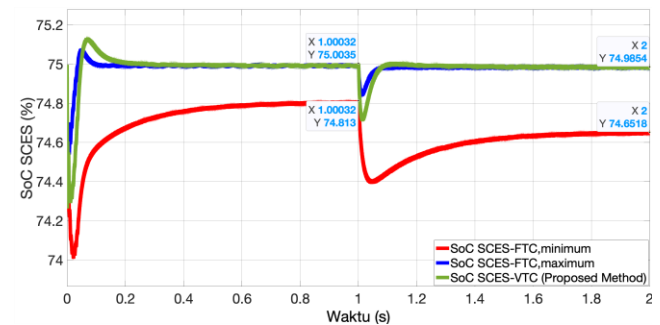
Berdasarkan Gambar 3.1, hasil simulasi metode VTC memperlihatkan bahwa respons daya BESS dan SCES mampu mencapai kondisi tunak sehingga keseimbangan daya dapat tercapai. Hasil simulasi menunjukkan bahwa keseimbangan daya sistem dapat dipertahankan.

**GAMBAR 3.1 GRAFIK POWER BALANCE PADA KONDISI UNDERSHOOT IRADIASI**

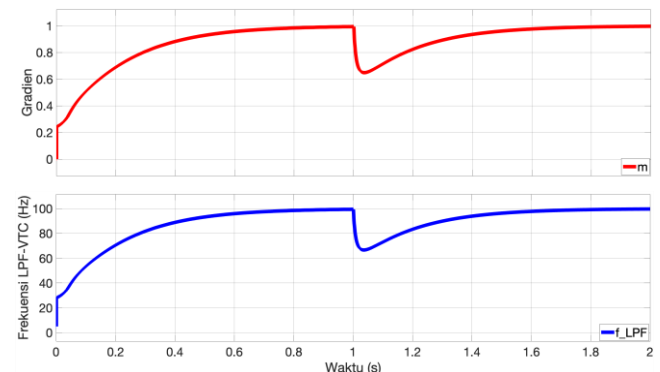
Gambar 3.2 menunjukkan bahwa metode VTC menghasilkan deviasi tegangan DC bus yang lebih rendah dibandingkan FTC minimum dan FTC maksimum, sehingga tegangan lebih cepat kembali menuju kondisi nominal setelah terjadi gangguan.

**GAMBAR 3.2 GRAFIK TEGANGAN DC BUS PADA KONDISI UNDERSHOOT IRADIASI**

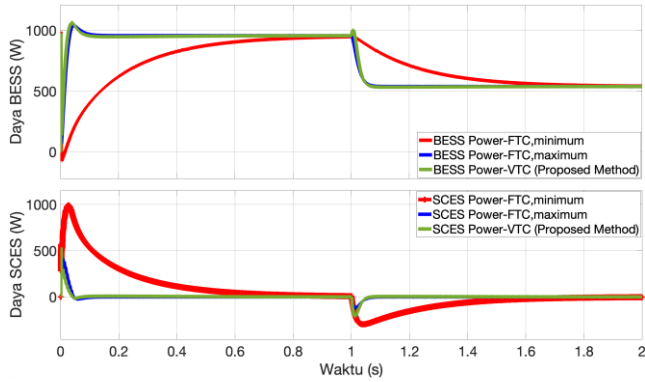
Pada kondisi *undershoot* (Gambar 3.3), metode VTC menghasilkan deviasi SoC SCES yang sebanding dengan metode FTC maksimum, di mana keduanya mampu mempertahankan deviasi yang rendah. Sebaliknya, metode FTC minimum menunjukkan deviasi dan fluktuasi SoC yang lebih tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa metode VTC mempertahankan deviasi SoC SCES yang lebih rendah dibandingkan metode FTC minimum.

**GAMBAR 3.3 GRAFIK SoC SCES PADA KONDISI UNDERSHOOT IRADIASI**

Dari Gambar 3.4, grafik frekuensi LPF dan gradien pada metode VTC menunjukkan adanya penyesuaian parameter saat kondisi *undershoot*, alhasil terjadi penurunan sesaat yang kemudian kembali menuju kondisi stabil. Hal ini menggambarkan respons sistem terhadap perubahan yang terjadi saat kondisi dinamis.

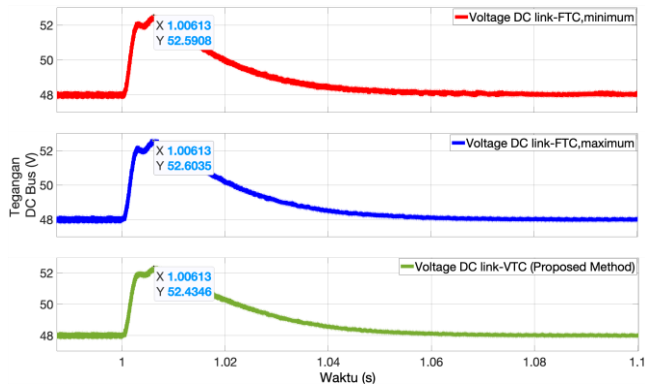
**GAMBAR 3.4 GRAFIK FREKUENSI LPF DAN GRADIEN UNTUK METODE VTC PADA KONDISI UNDERSHOOT IRADIASI**

Merujuk pada Gambar 3.5, Hasil simulasi menunjukkan bahwa keseimbangan daya sistem dapat dipertahankan selama kondisi *overshoot*.



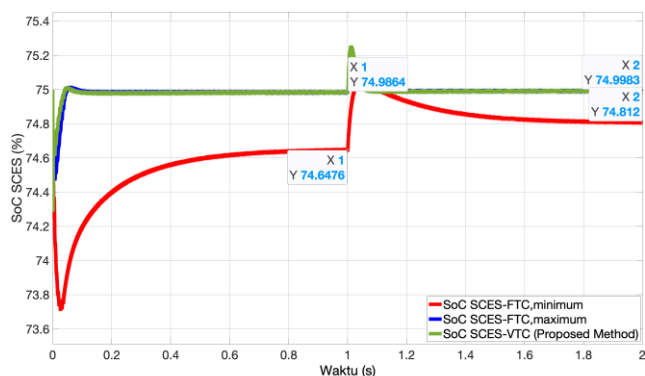
GAMBAR 3.5 GRAFIK POWER BALANCE PADA KONDISI OVERSHOOT IRADIASI

Pada kondisi *overshoot* (Gambar 3.6), metode VTC menghasilkan deviasi tegangan DC bus yang lebih rendah dibandingkan FTC minimum dan FTC maksimum, sehingga mampu mempertahankan kestabilan tegangan selama kondisi transien.



GAMBAR 3.6 GRAFIK TEGANGAN DC BUS PADA KONDISI OVERSHOOT IRADIASI

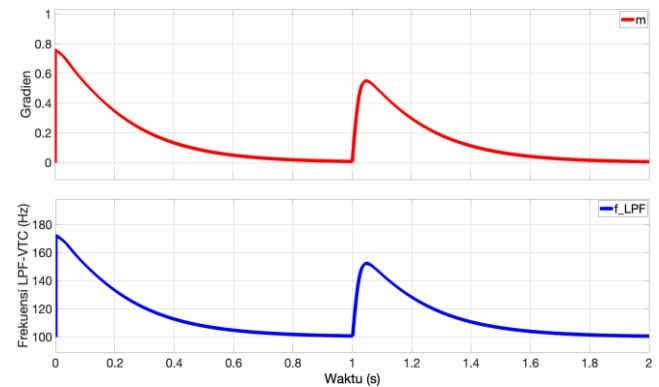
Pada kondisi *overshoot* (Gambar 3.7), metode VTC menunjukkan kinerja yang setara dengan FTC maksimum dengan deviasi SoC yang rendah, sedangkan FTC minimum memiliki deviasi dan fluktuasi lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa metode VTC mempertahankan deviasi SoC SCES yang rendah dan sebanding dengan FTC maksimum.



GAMBAR 3.7 GRAFIK SoC SCES PADA KONDISI OVERSHOOT IRADIASI

Mengacu pada Gambar 3.8, perubahan pada frekuensi LPF dan gradien dalam metode VTC memperlihatkan adanya adaptasi parameter saat terjadi *overshoot*. Kondisi ini ditandai dengan penurunan sementara yang kemudian kembali menuju keadaan stabil, sehingga mencerminkan kemampuan sistem dalam

merespons dinamika yang terjadi.



GAMBAR 3.8 GRAFIK FREKUENSI LPF DAN GRADIEN UNTUK METODE VTC PADA KONDISI OVERSHOOT IRADIASI

Nilai deviasi tegangan dihitung terhadap tegangan nominal 48 V. Tabel 3.1 menunjukkan bahwa pada kondisi *undershoot*, ketiga metode menghasilkan deviasi yang hampir sama, yaitu 9,76% (FTC minimum), 9,77% (FTC maksimum), dan 9,75% (VTC), sehingga perbedaannya tidak signifikan. Pada kondisi *overshoot*, metode VTC menghasilkan deviasi tegangan terendah sebesar 9,24%, lebih rendah dibandingkan FTC minimum (9,56%) dan FTC maksimum (9,59%), yang menunjukkan kemampuan VTC dalam mempertahankan kestabilan tegangan DC bus pada kondisi transien.

TABEL 3.1 PERBANDINGAN DEVIASI TEGANGAN DC BUS

Kondisi	FTC Minimum (%)	FTC Maksimum (%)	VTC (Proposed) (%)
<i>Undershoot</i>	9,76	9,77	9,75
<i>Overshoot</i>	9,56	9,59	9,24

Tabel 3.2 memperlihatkan bahwa metode VTC menghasilkan rata-rata deviasi tegangan yang lebih kecil dibandingkan metode FTC minimum dan maksimum. Hal ini menunjukkan bahwa VTC memiliki rata-rata deviasi tegangan yang lebih rendah.

TABEL 3.2 RATA-RATA DEVIASI TEGANGAN DC BUS

Metode	Rata-rata Deviasi (%)
FTC Minimum	9,66
FTC Maximum	9,68
VTC (Proposed)	9,50

Tabel 3.3 menunjukkan hasil perubahan kapasitas SCES dengan mengamati perubahan nilai SoC pada rentang waktu detik ke-1 hingga detik ke-2, sehingga dapat diketahui perubahan SoC selama terjadi perubahan kondisi sistem.

TABEL 3.3 PERBANDINGAN PERUBAHAN SoC SCES PADA INTERVAL WAKTU 1-2 DETIK

Kondisi	FTC Minimum (%)	FTC Maksimum (%)	VTC (Proposed) (%)
<i>Undershoot</i>	0,1612	0,0181	0,0181
<i>Overshoot</i>	0,1644	0,0119	0,0119

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa metode VTC menghasilkan deviasi SoC SCES yang sangat kecil dan sebanding dengan FTC maksimum, yaitu sebesar 0,0181% pada kondisi *undershoot* dan 0,0119% pada kondisi *overshoot*. Sebaliknya, metode FTC minimum menghasilkan deviasi yang lebih besar, yaitu sebesar 0,1612% dan 0,1644%. Hasil tersebut menunjukkan

bahwa metode VTC mampu mempertahankan perubahan SoC SCES yang lebih rendah dibandingkan FTC minimum.

Tabel 3.4 menunjukkan nilai rata-rata deviasi SoC SCES menunjukkan bahwa metode VTC memiliki nilai yang sama dengan metode FTC maksimum, yaitu sebesar 0,0150%, dan lebih rendah dibandingkan metode FTC minimum sebesar 0,1628%. Hal ini menunjukkan bahwa metode VTC mempertahankan deviasi SoC SCES yang rendah dan sebanding dengan FTC maksimum, serta lebih rendah dibandingkan FTC minimum.

TABEL 3.4 RATA-RATA DEVIASI SoC SCES

Metode	Rata-rata Deviasi (%)
FTC Minimum	0,1628
FTC Maximum	0,0150
VTC (<i>Proposed</i>)	0,0150

4. Kesimpulan

Penelitian ini mengusulkan strategi kendali daya baterai-superkapasitor berbasis adaptif VTC dengan pendekatan gradien untuk meningkatkan kemampuan *power sharing* pada sistem PV *stand-alone*. Strategi yang diusulkan menyesuaikan frekuensi LPF secara adaptif berdasarkan gradien arus kompensasi sehingga mampu menyesuaikan pembagian daya antara BESS dan SCES sesuai kondisi operasi dinamis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode VTC menghasilkan rata-rata deviasi tegangan DC bus terendah sebesar 9,50%, dibandingkan FTC minimum (9,66%) dan FTC maksimum (9,68%). Selain itu, metode VTC mempertahankan rata-rata deviasi SoC SCES sebesar 0,0150%, setara dengan FTC maksimum dan lebih rendah dibandingkan FTC minimum (0,1628%). Hasil tersebut menunjukkan bahwa strategi VTC mampu meningkatkan regulasi tegangan sekaligus mempertahankan pembagian daya yang efektif antara BESS dan SCES pada kondisi perubahan iradiasi. Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada implementasi *hardware-in-the-loop* maupun pengujian eksperimental untuk memvalidasi kinerja metode yang diusulkan pada sistem nyata.

Referensi

- [1] S. Shivashankar, S. Mekhilef, H. Mokhlis, and M. Karimi, "Mitigating methods of power fluctuation of photovoltaic (PV) sources – A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 1170–1184, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.059.
- [2] IESR, "Indonesia Solar Energy Outlook 2025," Institute for Essential Services Reform, Jakarta, 2024.
- [3] S. Sahoo and P. Timmann, "Energy Storage Technologies for Modern Power Systems: A Detailed Analysis of Functionalities, Potentials, and Impacts," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 49689–49729, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3274504.
- [4] K. Dissanayake and D. Kularatna-Abeywardana, "A review of supercapacitors: Materials, technology, challenges, and renewable energy applications," *J. Energy Storage*, vol. 96, p. 112563, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.112563.
- [5] N. K. Aryani, A. B. Al Fahri, and A. K. Wardana, "Optimal Placement and Sizing of Hybrid-Source Multi DVR using Genetic Algorithm for Voltage Sag Mitigation," in *2021 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICT-PEP)*, Sep. 2021, pp. 85–90. doi: 10.1109/ICT-PEP53949.2021.9601070.
- [6] U. Manandhar, N. R. Tummuru, S. K. Kollimalla, A. Ukil, G. H. Beng, and K. Chaudhari, "Validation of Faster Joint Control Strategy for Battery- and Supercapacitor-Based Energy Storage System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 4, pp. 3286–3295, Apr. 2018, doi: 10.1109/TIE.2017.2750622.
- [7] S. K. Kollimalla, M. K. Mishra, A. Ukil, and H. B. Gooi, "DC Grid Voltage Regulation Using New HESS Control Strategy," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 772–781, Apr. 2017, doi: 10.1109/TSTE.2016.2619759.
- [8] A. K. Wardana, Soedibyo, and V. L. B. Putri, "Optimization Control Strategy of Battery-Supercapacitor to Mitigate PV Power Fluctuation using Dynamic Programming Algorithm," in *2022 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, Jul. 2022, pp. 428–433. doi: 10.1109/ISITIA56226.2022.9855298.
- [9] S. K. Kollimalla, A. Ukil, H. B. Gooi, U. Manandhar, and N. R. Tummuru, "Optimization of Charge/Discharge Rates of a Battery Using a Two-Stage Rate-Limit Control," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 516–529, Apr. 2017, doi: 10.1109/TSTE.2016.2608968.
- [10] B. R. Ravada and N. R. Tummuru, "Control of a Supercapacitor-Battery-PV Based Stand-Alone DC-Microgrid," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 35, no. 3, pp. 1268–1277, Sep. 2020, doi: 10.1109/TEC.2020.2982425.
- [11] B. Wang, U. Manandhar, X. Zhang, H. B. Gooi, and A. Ukil, "Deadbeat Control for Hybrid Energy Storage Systems in DC Microgrids," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 1867–1877, Oct. 2019, doi: 10.1109/TSTE.2018.2873801.
- [12] J. I. Shuvo, Md. Badoruzzaman, S. T. I. Anik, S. Ahmad, T. Ahmed, and M. Karimi, "Hybrid energy storage power management system harnessing battery-supercapacitor synergy for grid-isolated DC microgrid," *J. Energy Storage*, vol. 119, p. 116170, May 2025, doi: 10.1016/j.est.2025.116170.
- [13] H.-A. Trinh, H. V. A. Truong, M. D. Pham, T. C. Do, H.-H. Lee, and K. K. Ahn, "Comprehensive Control Strategy and Verification for PEM Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Power Source," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.-Green Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 421–436, Mar. 2023, doi: 10.1007/s40684-022-00498-w.
- [14] M. Hamzeh, A. Ghazanfari, Y. A. -R. I. Mohamed, and Y. Karimi, "Modeling and Design of an Oscillatory Current-Sharing Control Strategy in DC Microgrids," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 11, pp. 6647–6657, Nov. 2015, doi: 10.1109/TIE.2015.2435703.
- [15] S. Palaloi, R. Delfianti, A. K. Wardana, A. Prastawa, A. Soeprijanto, and C. Harsito, "Enhancing Control Strategy Hybrid Energy Storage System for Improve Transient Response Using an Adaptive Low-Pass Filter in DC Microgrid," *Int. Rev. Model. Simul.*, vol. 18, no. 1, pp. 64–74, 2025.