Kajian Literatur Kritis dan Kerangka Model Dinamis Interkoneksi Supergrid Indonesia pada Kondisi Rapid Continuous Change

Fina Farhana

Universitas Negeri Malang, Jl. Semarang No.5, Sumbersari, Kota Malang, Jawa Timur 65145, Indonesia
*fina.farhana@gmail.com**
** corresponding author*

ARTICLE INFO

Article history
Received Jan 2, 2026
Received Jan 7, 2026
Revised Jan 14, 2026
Accepted Jan 25, 2026

Kata kunci
Supergrid Indonesia
Jaringan Hibrida AC/DC
HVDC
Grid Lemah
Dukungan Frekuensi Adaptif
Pembatas Arus Konverter

ABSTRAK

Rencana supergrid antarpulau Indonesia menuntut keterhubungan antara perencanaan ekspansi jangka panjang dan keamanan dinamis jaringan hybrid AC/DC yang heterogen. Penelitian ini bertujuan memetakan state of the art, merumuskan celah riset yang dapat dilacak, dan mengusulkan kerangka pemodelan yang dapat diuji untuk jaringan tersebut pada kondisi operasi yang berubah cepat dan terus-menerus. Kajian naratif kritis dengan pemilihan purposif diterapkan pada 14 artikel jurnal terindeks Scopus terbitan 2023–2025 mengenai perencanaan interkoneksi, HVDC pada jaringan lemah, kendali frekuensi adaptif, pembatasan arus konverter, dan koordinasi kendali–proteksi. Setiap artikel diekstraksi menggunakan formulir terstruktur dan disintesis lintas-studi. Hasil menunjukkan bahwa studi perencanaan terutama mengoptimalkan kapasitas dan biaya, sedangkan studi kendali divalidasi pada sistem uji generik dengan kekuatan jaringan dan mode operasi tetap. Enam kandidat celah riset teridentifikasi, yaitu keterkaitan perencanaan–keamanan dinamis, adaptasi yang mempertahankan kestabilan, kendali adaptif sadar-kendala, koordinasi kendali–proteksi–pemulihan, ketahanan komunikasi, dan model dinamis Indonesia yang reprodusibel. Prioritas tertinggi diberikan pada adaptasi yang tetap stabil ketika short-circuit ratio berubah dan dukungan frekuensi yang mematuhi batas arus konverter, tegangan DC, laju perubahan daya, dan energi. Artikel ini mengusulkan model diferensial–aljabar terswitch, fungsi objektif multi-tujuan ternormalisasi, himpunan kendala, pengendali pembanding, dan delapan skenario validasi. Kerangka ini menjadi agenda riset yang dapat dilacak bagi perencana sistem dan peneliti kendali, sedangkan klaim kinerjanya masih berupa hipotesis yang perlu dibuktikan melalui simulasi transien elektromagnetik.

Kata kunci: Supergrid Indonesia; Jaringan Hybrid AC/DC; HVDC; Jaringan Lemah; Dukungan Frekuensi Adaptif; Pembatasan Arus Konverter

I. Pendahuluan

Indonesia merupakan negara kepulauan dengan sistem ketenagalistrikan yang terfragmentasi, sedangkan potensi energi baru terbarukan (EBT) banyak berada jauh dari pusat beban. Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2025–2034 menargetkan porsi EBT sebesar 36% pada 2034 dan memperkuat infrastruktur transmisi serta interkoneksi antarpulau, dengan rencana pembangunan transmisi lebih dari 47.000 kilometer sirkuit (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2025). Interkoneksi berskala ini menjadi prasyarat pemanfaatan EBT, tetapi sekaligus menghadirkan persoalan keamanan dinamis baru: banyak sistem pulau berstatus *weak grid*, inersia ekuivalen menurun seiring naiknya pembangkit berbasis konverter, dan perilaku konverter dibatasi oleh kemampuan arus serta tegangan sisi DC (Hatziargyriou dkk., 2021; Irnawan dkk., 2025). Dengan demikian, interkoneksi yang optimal dari sisi biaya dan kapasitas tidak otomatis aman ketika jaringan mengalami gangguan cepat atau perubahan kekuatan sistem.

Kajian perencanaan telah memberikan landasan kuantitatif yang penting. Sarjiya dkk. (2023) mengembangkan model *generation expansion planning* sumber terbuka untuk Sulawesi yang terdiri atas dua sistem belum terhubung dan menunjukkan bahwa opsi interkoneksi mendukung pencapaian target EBT. Amiruddin dkk. (2024) menggunakan PLEXOS dan menunjukkan bahwa super grid nasional dapat menurunkan biaya pembangkitan rata-rata dari sekitar USD 98/MWh menjadi USD 91/MWh serta mendukung pangsa EBT 62% pada 2050. Kekuatan kedua studi terletak pada cakupan wilayah dan transparansi skenario; namun, keduanya menggunakan representasi keseimbangan energi dan jaringan tersederhana sehingga belum dapat menilai dinamika berskala milidetik hingga detik. Zhou dkk. (2023) telah membuktikan bahwa kendala kestabilan transien berbasis persamaan diferensial–aljabar dan kriteria N-k dapat dimasukkan ke dalam perencanaan transmisi, tetapi formulasinya berfokus pada sistem

AC dan belum memuat batas konverter HVDC. Irnawan dkk. (2025) mengulas teknologi HVDC untuk interkoneksi jaringan lemah dan menegaskan keunggulan VSC-HVDC pada kasus Indonesia, meskipun kajiannya berhenti pada penilaian teknologi dan belum sampai pada hukum kendali adaptif.

Pada ranah kendali, berbagai strategi telah dilaporkan berhasil memperbaiki respons frekuensi dan tegangan DC: koordinasi pengendali frekuensi HVDC pada jaringan asinkron multiarea (Lei dkk., 2025), kendali MMC-HVDC multi-skala waktu untuk dukungan frekuensi dan penekanan tegangan lebih DC (Jiang dkk., 2025), kendali konsensus berbasis tingkat gangguan tanpa komunikasi (Li, Wei, dkk., 2025), kendali adaptif-robust pada MTDC berbasis VSC (Li, Salem, dkk., 2025), serta *adaptive virtual inertia* yang mempertimbangkan kestabilan tegangan DC (Astereki dkk., 2025). Kontribusi studi-studi tersebut nyata, tetapi umumnya diuji pada kekuatan jaringan tetap, satu jenis gangguan, dan batas perangkat yang diperlakukan sebagai saturasi setelah aksi kendali dihitung. Padahal, Baeckeland dkk. (2024) dan Desai dkk. (2024) menunjukkan bahwa pembatasan arus mengubah secara mendasar kestabilan perangkat, kestabilan transien, kerja proteksi, dan pemulihan pascagangguan. Akibatnya, aksi adaptif yang dirancang tanpa memperhitungkan batas tersebut berisiko tidak dapat dieksekusi tepat ketika paling dibutuhkan.

Celah utama yang diangkat artikel ini bukanlah ketiadaan kendali adaptif, melainkan belum tersedianya kerangka yang menjamin aksi adaptif tetap stabil sekaligus layak (*feasible*) ketika kekuatan jaringan, mode konverter, topologi, dan cadangan energi berubah cepat secara berurutan. Kondisi ini disebut sebagai *Rapid Continuous Change* (RCC). Gagasan kebaruan dibangun di atas dua landasan teori yang mapan, yaitu teori kestabilan sistem terswitch yang memberikan syarat kestabilan lintas-mode melalui fungsi Lyapunov majemuk dan batas waktu tinggal (*dwell time*) (Liberzon, 2003), serta kendali sadar-kendala berbasis *control barrier function* yang menjaga trajektori tetap berada dalam himpunan aman (Ames dkk., 2019). Integrasi keduanya pada jaringan hybrid AC/DC antarpulau memberikan dasar deduktif bagi rumusan celah riset dan model yang diusulkan.

Berdasarkan uraian tersebut, artikel ini menjawab tiga pertanyaan penelitian: (RQ1) apa capaian dan batasan literatur mutakhir mengenai interkoneksi supergrid dan kendali jaringan hybrid AC/DC; (RQ2) celah riset apa yang dapat dilacak secara eksplisit ke literatur tersebut; dan (RQ3) bagaimana kerangka pemodelan dan validasi yang dapat diuji untuk supergrid Indonesia pada kondisi RCC. Kontribusi artikel berupa pemetaan state of the art yang kritis, matriks celah riset yang dapat dilacak, definisi operasional RCC, serta formulasi model, kendala, dan desain validasi sebagai agenda penelitian lanjutan.

II. Metode

A. Desain Kajian dan Kriteria Seleksi Literatur

Penelitian ini menggunakan desain *critical narrative review* dengan pemilihan literatur secara purposif. Kriteria inklusi meliputi: (a) artikel jurnal *peer-reviewed* yang memiliki DOI dan terindeks Scopus; (b) terbit pada 2023–2025; (c) membahas sedikitnya satu dari lima tema, yaitu perencanaan supergrid Indonesia, interkoneksi HVDC pada jaringan lemah, koordinasi frekuensi dan kendali adaptif, pembatasan arus konverter, atau koordinasi kendali–proteksi; dan (d) melaporkan model, metode, dan cara validasi secara eksplisit. Makalah konferensi, artikel tanpa validasi, dan publikasi nonilmiah dikecualikan. Seleksi menghasilkan 14 artikel yang dikodekan P01–P14: P01 Sarjiya dkk. (2023), P02 Amiruddin dkk. (2024), P03 Irnawan dkk. (2025), P04 Zhou dkk. (2023), P05 Lei dkk. (2025), P06 Jiang dkk. (2025), P07 Li, Wei, dkk. (2025), P08 Li, Salem, dkk. (2025), P09 Astereki dkk. (2025), P10 Baeckeland dkk. (2024), P11 Desai dkk. (2024), P12 Xue dkk. (2025), P13 Lim dkk. (2024), dan P14 Shufian dkk. (2025). Artikel P01–P13 merupakan sumber inti, sedangkan P14 berfungsi sebagai pembanding pelengkap karena berfokus pada integrasi angin lepas pantai.

Kajian ini tidak dimaksudkan sebagai *systematic literature review* berprotokol PRISMA dan tidak mengklaim mencakup seluruh publikasi pada bidang ini. Desain purposif dipilih karena tujuan kajian adalah menelusuri secara mendalam keterkaitan antara perencanaan, kendali, dan batas perangkat, bukan mengukur sebaran publikasi. Konsekuensinya, rumusan celah riset dibatasi pada cakupan korpus dan dibahas lebih lanjut pada subbagian III.F.

B. Prosedur Analisis dan Sintesis

Setiap artikel diekstraksi menggunakan formulir baku yang memuat tujuan, objek atau sistem uji, jenis konverter, metode, cara validasi (perangkat lunak dan benchmark), hasil utama, serta keterbatasan yang dinyatakan penulis. Keabsahan ekstraksi dijaga dengan memeriksa ulang setiap entri terhadap naskah lengkap artikel dan metadata penerbit. Perumusan celah dilakukan melalui lima tahap: identifikasi kontribusi terdahulu, pengenalan batas model dan pengujian, penilaian dampak teknis batas tersebut, formulasi persoalan yang belum terjawab, dan penentuan cara pembuktiannya. Celah kemudian dibedakan menjadi celah eksplisit (dinyatakan penulis artikel), celah metodologis (berdasarkan cakupan model), dan celah sintesis (muncul dari perbandingan lintas-artikel).

Prioritas setiap celah ditetapkan secara kualitatif berdasarkan tiga kriteria: (1) dampak teknis terhadap keamanan dinamis supergrid antarpulau; (2) jumlah artikel dalam korpus yang menjadi landasannya; dan (3) kelayakan pengujiannya melalui simulasi. Celah yang memenuhi ketiga kriteria secara kuat diberi prioritas sangat tinggi, sedangkan celah yang bergantung pada ketersediaan model atau data baru diberi prioritas tinggi bersyarat. Pengelompokan literatur ditunjukkan pada Tabel 1.

Table 1. Pengelompokan literatur dan fokus evaluasi

Kelompok	Artikel	Fokus evaluasi
Perencanaan dan konteks Indonesia	P01–P04	Optimasi sistem energi, interkoneksi weak-to-weak, dan keamanan dinamis perencanaan.
Kendali adaptif dan frekuensi	P05–P09	Koordinasi HVDC, dukungan frekuensi, virtual inertia, dan keseimbangan tegangan DC.
Proteksi, batas fisik, resiliensi	P10–P14	Current limiting, proteksi MTDC, malfungsi konverter, dan gangguan majemuk.

III. Hasil dan Pembahasan

A. Pemetaan State of the Art Supergrid Indonesia

Sintesis memperlihatkan bahwa ketiga kelompok literatur bekerja pada skala waktu dan keluaran yang berbeda (Tabel 1). Kelompok perencanaan (P01–P04) menilai interkoneksi dari sisi biaya, kapasitas, dan kecukupan energi pada resolusi jam hingga tahun. Zhou dkk. (2023) telah mengintegrasikan kendala kestabilan transien dalam ekspansi transmisi, sehingga gagasan menghubungkan perencanaan dan keamanan dinamis bukan hal yang sepenuhnya baru. Kontribusi yang masih terbuka adalah representasi konverter HVDC, heterogenitas kekuatan jaringan antarpulau, dan mode kendali yang berubah, yang belum dimuat dalam studi perencanaan Indonesia (Sarjiya dkk., 2023; Amiruddin dkk., 2024). Dalam klasifikasi kestabilan mutakhir, fenomena tersebut termasuk kestabilan yang digerakkan konverter (*converter-driven stability*), kategori yang ditambahkan khusus untuk sistem dengan dominasi konverter (Hatziargyriou dkk., 2021).

Pada kelompok kendali (P05–P09), sebagian besar studi menggunakan VSC/MMC-HVDC atau MTDC berbasis VSC (Jiang dkk., 2025; Li, Salem, dkk., 2025; Astereki dkk., 2025), sedangkan koordinasi pada jaringan asinkron multiarea (Lei dkk., 2025) relevan karena interkoneksi antarpulau melalui HVDC secara alami bersifat asinkron. Li, Wei, dkk. (2025) mengubah parameter kendali berdasarkan besar gangguan yang diidentifikasi tanpa komunikasi, sebuah pendekatan yang menarik bagi wilayah dengan infrastruktur komunikasi terbatas. Namun, keempat pendekatan adaptif tersebut belum menyatakan domain kestabilan ketika SCR dan mode berubah di tengah respons transien. Oleh karena itu, adaptasi atau koordinasi saja tidak dapat dijadikan klaim kebaruan; kebaruan perlu terletak pada syarat kestabilan dan kelayakan yang eksplisit.

Temuan lintas-artikel bersifat saling menguatkan pada satu hal: dukungan frekuensi dan kestabilan tegangan DC merupakan tujuan yang saling tarik-menarik. Astereki dkk. (2025) dan Jiang dkk. (2025) sama-sama menunjukkan bahwa pelepasan energi sisi DC untuk dukungan frekuensi harus dibatasi agar tegangan DC tetap aman. Di sisi perangkat, Baeckeland dkk. (2024) dan Desai dkk. (2024) menunjukkan bahwa aktivasi *current limiter* mengubah dinamika dan pemulihan konverter grid-forming. Jika kedua temuan ini digabungkan, evaluasi kendali yang mengabaikan batas arus cenderung melebih-lebihkan kapasitas dukungan frekuensi yang benar-benar tersedia. Studi koordinasi kendali–proteksi, malfungsi konverter, dan gangguan majemuk (Xue dkk., 2025; Lim dkk., 2024; Shufian dkk., 2025) melengkapi gambaran tersebut, tetapi masih menguji peristiwa secara terpisah. Ruang kontribusi karenanya perlu didefinisikan pada hukum kendali, jaminan kestabilan, dan pemenuhan batas fisik dalam konfigurasi yang dinyatakan jelas.

B. Makna Operasional Rapid Continuous Change

Rapid Continuous Change (RCC) didefinisikan sebagai kondisi operasi ketika perubahan kontinu dan peristiwa diskret terjadi dalam jendela waktu yang sebanding dengan konstanta waktu kendali dan proteksi, sehingga sistem belum kembali ke keadaan tunak sebelum perubahan berikutnya terjadi. Perubahan kontinu mencakup variasi daya EBT, pergeseran beban, perubahan *short-circuit ratio* (SCR), dan inersia ekuivalen; peristiwa diskret mencakup trip saluran, *converter blocking*, aktivasi *current limiter*, isolasi gangguan, dan perpindahan mode kendali. Untuk keperluan pengujian, RCC dioperasionalkan melalui empat parameter: rentang SCR (mengacu pada klasifikasi umum SCR < 3 sebagai jaringan lemah dan SCR < 2 sebagai sangat lemah), laju perubahan daya atau SCR, selang waktu antarperistiwa, dan urutan mode yang dilalui. Nilai numerik keempat parameter ditetapkan pada setiap skenario uji (Tabel 3).

Kriteria keberhasilan dipetakan ke kelas kestabilan baku, yaitu kestabilan frekuensi, tegangan, sudut rotor, dan kestabilan yang digerakkan konverter (Hatziargyriou dkk., 2021), ditambah kestabilan tegangan DC dan kontinuitas penyaluran daya. Sasaran yang realistis adalah mempertahankan operasi dalam batas komponen, membatasi kehilangan beban, mencegah pemadaman meluas, dan mempercepat pemulihan setelah kontingensi.

C. Sintesis Enam Kandidat Research Gap

Matriks lintas-artikel menghasilkan enam kandidat celah A–F (Tabel 2). Gap B dan Gap C diberi prioritas sangat tinggi karena memenuhi ketiga kriteria prioritas: berdampak langsung pada keamanan dinamis interkoneksi lemah, didukung lima dan empat artikel, serta dapat diuji melalui simulasi tanpa data baru yang sulit diperoleh. Gap A dan Gap D diberi prioritas tinggi bersyarat karena bergantung pada model atau data sistem Indonesia; Gap E berprioritas sedang; sedangkan Gap F berfungsi sebagai basis validasi bagi seluruh celah lainnya.

Table 2. Matriks research gap, landasan, dan prioritas

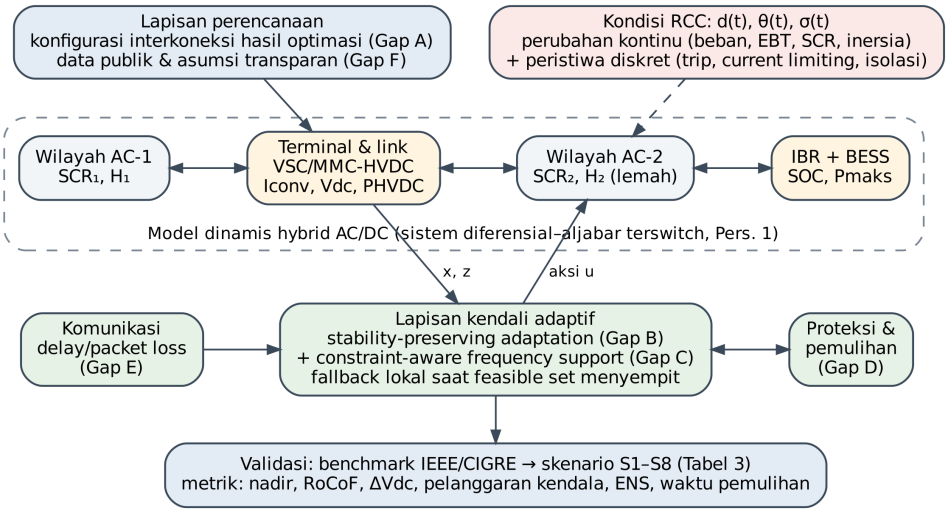
Gap	Landasan	Rumusan dan posisi
A. Planning–dynamic security	P01–P04	Menghubungkan konfigurasi interkoneksi hasil optimasi dengan kelayakan dinamis hybrid AC/DC; prioritas tinggi bersyarat adanya model/metode baru.
B. Stability-preserving adaptation	P03, P05, P06, P08, P09	Merumuskan adaptasi daring yang mempertahankan stabilitas di rentang SCR dan perubahan mode tertentu; prioritas sangat tinggi.
C. Constraint-aware adaptive control	P06, P09–P11	Menghitung dukungan frekuensi yang feasible di bawah batas arus, Vdc, ramp, dan energi; prioritas sangat tinggi.
D. Control–protection–recovery	P10, P12–P14	Menyelaraskan respons transien, isolasi gangguan, redispatch, dan pemulihan beban; prioritas tinggi bersyarat.
E. Communication resilience	P07, P08, P13	Menguji transisi aman dari mode koordinasi ke kendali lokal saat delay/packet loss; prioritas sedang.
F. Model dinamis Indonesia	P01–P03	Menyusun benchmark reprodusibel dengan asumsi dan data transparan; fungsi utama sebagai basis validasi.

Gap B penting karena satu penalaan parameter tidak selalu menjaga margin stabilitas saat SCR, inersia, dan topologi berubah di tengah respons transien. Gap C muncul karena dukungan daya yang diminta ketika frekuensi turun dapat tidak layak bila arus konverter mencapai batas, tegangan DC menyimpang, atau *state of charge* (SOC) penyimpanan tidak mencukupi. Keduanya perlu dipandang sebagai satu persoalan kendali: aksi yang stabil tetapi melanggar kemampuan perangkat tidak dapat diterapkan, sedangkan aksi yang layak tetapi tidak stabil juga tidak aman. Teknik penanganan kendala yang telah mapan, seperti *model predictive control*, *reference governor*, dan *control barrier function* (Ames dkk., 2019), menjadi titik tolak yang tepat; kontribusi yang diharapkan adalah penggabungannya dengan syarat kestabilan sistem terswitch (Liberzon, 2003) pada model hybrid AC/DC yang memuat batas konverter.

Dengan demikian, potensi kontribusi tidak terletak pada pengenalan kendali adaptif, koordinasi proteksi, atau kendali *saturation-aware* sebagai konsep baru, melainkan pada formulasi spesifik berupa syarat adaptasi yang mempertahankan kestabilan untuk himpunan mode terdefinisi dan mekanisme alokasi daya aman ketika himpunan layak menyempit.

D. Kerangka Model Dinamis Hybrid AC/DC

Kerangka yang diusulkan merepresentasikan beberapa wilayah AC dengan kekuatan jaringan dan inersia heterogen yang dihubungkan melalui terminal HVDC, serta memuat pembangkit berbasis konverter dan *battery energy storage system* (BESS). Struktur kerangka beserta keterkaitannya dengan Gap A–F ditunjukkan pada Gambar 1. Dinamika sistem dirumuskan sebagai sistem diferensial–aljabar terswitch pada Persamaan (1).



Gambar 1. Kerangka konseptual model dinamis supergrid hybrid AC/DC pada kondisi RCC

$$\dot{x}(t) = f_{\sigma(t)}(x, z, u, d, \theta); \quad 0 = g_{\sigma(t)}(x, z, u, d, \theta) \tag{1}$$

Pada Persamaan (1), x menyatakan state generator, konverter, pengendali, dan penyimpanan; z adalah variabel aljabar jaringan; u adalah aksi kendali dan referensi daya; d memuat gangguan dan variasi daya; θ adalah parameter operasi termasuk SCR dan inersia; sedangkan $\sigma(t) \in$ {normal, current limiting/fault ride-through, isolasi, pemulihan} menyatakan mode operasi. Perpindahan mode ditentukan oleh kondisi penjaga (*guard condition*), misalnya arus konverter mencapai Imax atau proteksi memerintahkan isolasi, dan dapat disertai pemetaan ulang state (*reset map*), misalnya reinisialisasi integrator pengendali. Wilayah operasi, kondisi penjaga, dan pemetaan ulang harus dinyatakan eksplisit agar pernyataan kestabilan memiliki domain berlaku.

Fungsi objektif pada Persamaan (2) meminimalkan deviasi frekuensi, deviasi tegangan DC, energi tak tersalurkan, dan intensitas aksi kendali. Agar besaran yang berbeda satuan dan skala waktu dapat dibandingkan, setiap suku dinormalisasi terhadap batas izin atau nilai acuannya. Indikator *expected energy not supplied* (EENS) yang lazim berhorizon tahunan diganti dengan *energy not supplied* (ENS) pada horizon T yang mencakup gangguan hingga pemulihan, sedangkan EENS dievaluasi terpisah pada tingkat perencanaan. Bobot w_1–w_4 ditentukan melalui analisis sensitivitas atau pendekatan Pareto.

$$\text{Min } J = w_1 \int_0^T (\Delta f/\Delta f_{max})^2 dt + w_2 \int_0^T (\Delta V_{dc}/\Delta V_{dc,max})^2 dt + w_3 \cdot \text{ENS}(T)/E_{ref} + w_4 \int_0^T u^T R u \, dt \tag{2}$$

Himpunan kendala pada Persamaan (3) meliputi batas magnitudo arus konverter, tegangan DC, SOC, transfer daya HVDC, dan laju perubahan daya. Batas arus dinyatakan sebagai magnitudo vektor arus agar prioritas arus aktif–reaktif selama gangguan dapat dirumuskan secara eksplisit, karena prioritas tersebut menentukan kapasitas dukungan frekuensi yang tersisa.

$$\sqrt{(I_d^2 + I_q^2)} \le I_{max}; \quad V_{dc,min} \le V_{dc} \le V_{dc,max}; \quad SOC_{min} \le SOC \le SOC_{max}; \\ |P_{HVDC}| \le P_{max}; \quad |dP_{HVDC}/dt| \le R_{max} \tag{3}$$

Hukum adaptasi yang dikembangkan perlu menetapkan urutan prioritas kendala, tindakan *fallback* lokal, dan kondisi ketika solusi optimal tidak tersedia. Formulasi ini merupakan usulan yang masih memerlukan pembuktian teoretis dan validasi numerik.

E. Desain Validasi dan Metrik Kinerja

Pengujian direkomendasikan dimulai dari rekonstruksi parameter dan topologi representatif berdasarkan data publik, dilanjutkan validasi aliran daya dan dinamika terhadap benchmark baku, misalnya sistem IEEE 39-bus termodifikasi untuk sisi AC dan CIGRE B4 DC grid test system untuk sisi DC. Simulasi fasor (RMS) dapat dilakukan menggunakan DIgSILENT PowerFactory atau MATLAB/Simulink, sedangkan skenario yang melibatkan pembatasan arus dan gangguan DC memerlukan simulasi transien elektromagnetik (EMT) seperti PSCAD/EMTDC. Setelah itu, stabilitas sinyal kecil, sensitivitas terhadap SCR, dan respons EMT dievaluasi sebelum kandidat kendali dibandingkan dengan *conventional droop*, koordinasi frekuensi HVDC (P05), kendali multi-skala waktu MMC-HVDC (P06), kendali adaptif-robust MTDC (P08), *adaptive virtual inertia* (P09), dan kendali *saturation-informed*

(P11). Perbandingan hanya sah apabila kondisi awal, batas perangkat, dan gangguan disetarakan. Skenario pengujian yang diusulkan disajikan pada Tabel 3.

Table 3. Skenario pengujian yang diusulkan

Kode	Skenario gangguan/variasi	Indikator evaluasi
S1	Perubahan beban step atau ramp	RoCoF, frequency nadir, settling time.
S2	Trip pembangkit	Dukungan frekuensi dan transfer daya.
S3*	Variasi SCR dan topologi AC	Margin kestabilan, sensitivitas respons, perubahan mode.
S4*	Fault AC disertai pembatasan arus	Puncak arus, durasi pelanggaran, Vdc.
S5	DC fault dan isolasi link	Waktu isolasi, alokasi ulang daya, stabilitas.
S6*	Gangguan beruntun/berdekatan	Transisi mode, kontinuitas suplai, fault recovery.
S7*	SOC rendah atau daya BESS terbatas	Kelayakan kendali dan safe fallback.
S8	Delay, packet loss, atau komunikasi putus	Kualitas transisi kendali lokal–terkoordinasi.

Keterangan: *S3, S4, S6, dan S7 merupakan paket skenario inti yang disarankan untuk menguji Gap B dan Gap C.

Indikator utama meliputi nadir frekuensi, *rate of change of frequency* (RoCoF), deviasi dan pemulihan Vdc, puncak arus, margin stabilitas, jumlah dan durasi pelanggaran kendala, beban tersuplai, ENS, dan waktu pemulihan, dengan ambang lulus/gagal mengacu pada Aturan Jaringan (*Grid Code*) yang berlaku. Hipotesis yang diuji adalah bahwa adaptasi berbasis himpunan layak (i) mengurangi pelanggaran batas perangkat, (ii) memperluas wilayah operasi aman dibanding penguatan tetap pada domain SCR tertentu, dan (iii) memperbaiki kompromi kinerja frekuensi–tegangan DC dibanding pembanding bertujuan tunggal. Pembuktian dilakukan melalui simulasi Monte Carlo pada sejumlah realisasi parameter RCC dengan metrik dan kondisi awal yang sama untuk seluruh pengendali.

F. Keterbatasan dan Implikasi Pengembangan

Kajian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, korpus 14 artikel yang dipilih secara purposif memadai untuk analisis mendalam, tetapi belum mewakili seluruh literatur; perluasan melalui protokol sistematis dan penelusuran *prior art* yang lebih luas diperlukan sebelum celah riset dianggap konklusif. Kedua, data *single-line diagram*, parameter generator, dan detail HVDC Indonesia yang tersedia untuk publik masih terbatas, sehingga model representatif harus membedakan secara tegas parameter publik, asumsi, dan data yang belum terverifikasi. Ketiga, kerangka yang diusulkan belum diuji secara numerik; simulasi EMT, *real-time simulation*, atau *controller-hardware-in-the-loop* akan meningkatkan kredibilitas hasil apabila sarana dan model tersedia.

Konteks Indonesia juga memiliki kekhasan yang perlu diakomodasi pada penelitian lanjutan, antara lain rute kabel bawah laut yang panjang, paparan risiko seismik, pilihan antara LCC dan VSC dengan pertimbangan biaya, serta banyaknya sistem pulau yang lemah. Klaim bahwa suatu kendali menjamin suplai tanpa jeda untuk semua gangguan tidak realistis; setiap jaminan harus mencantumkan wilayah layak, batas pengukuran, model keterlambatan, dan jenis kontingensi yang dilibatkan. Dengan batasan tersebut, usulan ini dapat diturunkan menjadi penelitian kendali adaptif yang spesifik dan evaluasi resiliensi jaringan yang terukur.

IV. Kesimpulan

Kajian kritis terhadap 14 publikasi menunjukkan bahwa perencanaan supergrid Indonesia dan kendali jaringan hybrid AC/DC telah berkembang pesat, tetapi keduanya masih berjalan terpisah: studi perencanaan mengoptimalkan biaya dan kapasitas tanpa representasi dinamika konverter, sedangkan studi kendali diuji pada sistem generik dengan kekuatan jaringan dan mode tetap (RQ1). Dari enam celah yang dapat dilacak, integrasi adaptasi yang mempertahankan kestabilan pada kondisi SCR yang berubah dengan dukungan frekuensi yang mematuhi batas arus, tegangan DC, laju daya, dan energi merupakan arah riset paling layak (RQ2). Model diferensial–aljabar terswitch, fungsi objektif ternormalisasi, himpunan kendala, dan delapan skenario validasi yang diusulkan menjawab kebutuhan kerangka yang dapat diuji (RQ3).

Secara praktis, kerangka ini memberi perencana sistem dan regulator dasar untuk mensyaratkan evaluasi keamanan dinamis, termasuk batas konverter, sejak tahap perencanaan interkoneksi antarpulau. Keterbatasan utama kajian adalah ukuran korpus yang terbatas dan belum adanya pengujian numerik. Penelitian lanjutan disarankan untuk menyusun model dinamis Indonesia yang reprodusibel, menurunkan syarat kestabilan dan kelayakan pengendali secara formal, serta membuktikan kinerjanya melalui simulasi EMT pada skenario S3, S4, S6, dan S7.

Kontribusi Penulis

Fina Farhana merupakan penulis tunggal yang melakukan konseptualisasi, penelusuran dan analisis literatur, perumusan model, serta penulisan dan penyuntingan naskah. Penulis telah membaca dan menyetujui naskah akhir.

Pendanaan

Penelitian ini tidak menerima dukungan pendanaan.

Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak memiliki potensi konflik kepentingan terkait penelitian, kepengarangan, dan/atau publikasi artikel ini.

Pernyataan Etika dan Persetujuan

Penelitian ini merupakan kajian literatur yang tidak melibatkan partisipan manusia maupun hewan sehingga tidak memerlukan persetujuan etik.

Ketersediaan Data

Seluruh data yang dianalisis dalam kajian ini berasal dari publikasi yang tercantum dalam Daftar Rujukan. Formulir ekstraksi literatur dapat diperoleh dari penulis atas permintaan yang wajar.

Pernyataan Penggunaan AI

Penulis menyatakan tidak menggunakan kecerdasan buatan (AI) atau perangkat berbantuan AI dalam penyusunan naskah ini.

Daftar Rujukan

Amiruddin, A., Dargaville, R., & Gawler, R. (2024). Optimal integration of renewable energy, energy storage, and Indonesia's super grid. *Energies, 17*(20), Article 5061. https://doi.org/10.3390/en17205061

Ames, A. D., Coogan, S., Egerstedt, M., Notomista, G., Sreenath, K., & Tabuada, P. (2019). Control barrier functions: Theory and applications. In *2019 18th European Control Conference (ECC)* (pp. 3420–3431). IEEE. https://doi.org/10.23919/ECC.2019.8796030

Astereki, A. A., Monadi, M., Seifossadat, S. G., Saffarian, A., & Rouzbehi, K. (2025). Adaptive virtual inertia for AC grids connected to MT-HVDC grid by considering DC voltage stability. *IET Renewable Power Generation, 19*, Article e70172. https://doi.org/10.1049/rpg2.70172

Baeckeland, N., Chatterjee, D., Lu, M., Johnson, B., & Seo, G.-S. (2024). Overcurrent limiting in grid-forming inverters: A comprehensive review and discussion. *IEEE Transactions on Power Electronics, 39*(11), 14493–14517. https://doi.org/10.1109/TPEL.2024.3430316

Desai, M. A., He, X., Huang, L., & Dörfler, F. (2024). Saturation-informed current-limiting control for grid-forming converters. *Electric Power Systems Research, 234*, Article 110746. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110746

Hatziargyriou, N., Milanović, J., Rahmann, C., Ajjarapu, V., Cañizares, C., Erlich, I., Hill, D., Hiskens, I., Kamwa, I., Pal, B., Pourbeik, P., Sanchez-Gasca, J., Stanković, A., Van Cutsem, T., Vittal, V., & Vournas, C. (2021). Definition and classification of power system stability – revisited & extended. *IEEE Transactions on Power Systems, 36*(4), 3271–3281. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3041774

Irnawan, R., Mochamad, R. F., da Silva, F. F., Zhang, Q., Sarjiya, Bak, C. L., & Haryadi, E. (2025). Review of HVDC technologies for weak grid interconnectors. *Electrical Engineering*, *107*, 4483–4501. https://doi.org/10.1007/s00202-024-02761-6

Jiang, S., Lu, D., Li, G., Xin, Y., Wang, L., & Zhang, M. (2025). A comprehensive coordinated control strategy of MMC-HVDC system for frequency support and DC overvoltage suppression. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 172*, Article 111201. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.111201

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2025). *FAQ RUPTL PLN 2025–2034*. Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan. https://gatrik.esdm.go.id/assets/uploads/download_index/files/daa0b-faq-ruptl-pln-2025-2034.pdf

Lei, J., Yang, R., Wu, W., Lu, W., & Mo, W. (2025). Coordinated control strategy for HVDC frequency controllers in multi-area asynchronous grid. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 167*, Article 110577. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110577

Li, C., Wei, H., He, P., Gao, J., & Zhang, Q. (2025). Frequency consensus control strategy for multi-terminal HVDC transmission system based on disturbance degree. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 170*, Article 110952. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110952

Li, G., Salem, M., Ben Hamad, K., Senjyu, T., & Ueda, S. (2025). Adaptive-robust control for frequency and voltage stability in multi-terminal DC wind energy systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 170*, Article 110957. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.110957

Liberzon, D. (2003). *Switching in systems and control*. Birkhäuser. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0017-8

Lim, J.-S., Kwon, D.-H., Yoon, Y. T., & Moon, S.-I. (2024). A coordinated control strategy of MT-HVDC grids to reduce real-time frequency deviations by considering malfunction of converter. *IEEE Access, 12*, 12356–12369. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3354376

Sarjiya, Putranto, L. M., Tumiran, Budi, R. F. S., Novitasari, D., & Deendarlianto. (2023). Generation expansion planning with a renewable energy target and interconnection option: A case study of the Sulawesi region, Indonesia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 183*, Article 113489. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113489

Shufian, A., Hossain, M. I., Anonto, H. Z., & Rohan, A. I. (2025). Enhancing stability in renewable energy transmission using multi-terminal HVDC systems with grid-forming controls for offshore and onshore wind integration. *Scientific Reports, 15*, Article 42028. https://doi.org/10.1038/s41598-025-10046-6

Xue, S., Zhang, H., Liu, B., Zhang, J., Yin, W., & Li, B. (2025). Multi-terminal flexible DC control and protection cooperation based on fault current limiting. *Electric Power Systems Research, 245*, Article 111650. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.111650

Zhou, J., Zhang, H., Cheng, H., Liu, D., Zhang, S., Li, G., & Zhang, X. (2023). Security-constrained transmission expansion planning with N-k security criterion and transient stability. *Electric Power Systems Research, 222*, Article 109505. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109505