UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Multi-Domain Stability Assessment under Inverter-Based Resources Penetration
Kimi Aushaf Panggabean, Rian Fatah Mochamad, S.T., M.Eng., Ph.D. ; Husni Rois Ali, S.T., M.Eng., Ph.D., DIC., SM
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

INTISARI

Transisi sistem tenaga menuju pembangkitan energi terbarukan mendorong peningkatan penetrasi *inverter-based resource* (IBR) yang secara bertahap menggantikan peran pembangkit sinkron konvensional. Pergeseran ini mengubah karakteristik dinamis sistem tenaga karena menurunkan kontribusi inersia sinkron, kekuatan hubung singkat, serta mekanisme redaman yang sebelumnya disediakan oleh mesin sinkron. Kondisi tersebut memperkuat keterkaitan antardomain stabilitas, sehingga kondisi yang memenuhi kriteria stabilitas pada satu domain belum tentu menunjukkan keamanan sistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, penelitian ini menyusun kerangka asesmen stabilitas multidomain untuk mengevaluasi dampak peningkatan penetrasi IBR terhadap empat domain stabilitas secara simultan, yaitu stabilitas *small-signal* yang direpresentasikan oleh *damping ratio*, stabilitas transien oleh *critical clearing time* (CCT), stabilitas tegangan oleh *loadability index* berdasarkan analisis *continuation power flow* (CPF), serta stabilitas frekuensi oleh *rate of change of frequency* (RoCoF). Simulasi dilakukan pada sistem uji *two-area* Kundur yang dimodifikasi menggunakan DIgSILENT PowerFactory 2024, dengan penetrasi IBR dimodelkan melalui penggantian bertahap kontribusi generator sinkron G2 oleh WECC Type-3 WTG pada enam tingkat penetrasi, yaitu 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, dan 100%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan penetrasi IBR memberikan dampak yang berbeda pada setiap domain stabilitas. *Damping ratio* moda inter-area yang dipantau meningkat dari 3,03% menjadi 6,46% atau sebesar 112,91%, yang menunjukkan redistribusi kontribusi moda setelah berkurangnya peran *electromechanical* G2. Sebaliknya, CCT menurun dari 0,765 s menjadi 0,302 s atau sebesar 60,52%, sehingga stabilitas transien menjadi domain dengan penurunan margin paling signifikan. Pada domain stabilitas tegangan, *loadability index* di Bus 11 hanya menurun sebesar 0,61%, yang menunjukkan bahwa margin stabilitas tegangan relatif tetap terjaga pada skenario yang dikaji. Sementara itu, RoCoF meningkat dari 0,144 Hz/s menjadi 0,160 Hz/s atau sebesar 11,38%, sejalan dengan berkurangnya inersia sinkron ekuivalen sistem. Sintesis multidomain melalui visualisasi *radar chart* menunjukkan bahwa penetrasi IBR tidak menghasilkan peningkatan atau penurunan stabilitas secara seragam, melainkan mendistribusikan ulang margin stabilitas antardomain. Stabilitas transien dan stabilitas frekuensi menjadi domain yang paling sensitif terhadap penggantian generator sinkron oleh IBR. Dengan demikian, asesmen stabilitas multidomain diperlukan untuk memperoleh gambaran yang lebih utuh mengenai respons dinamis sistem tenaga pada kondisi penetrasi IBR tinggi.

Kata kunci : Inverter-Based Resource Penetration, Asesmen Stabilitas Multidomain, Critical Clearing Time, Rate of Change of Frequency, Damping Ratio

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Multi-Domain Stability Assessment under Inverter-Based Resources Penetration
Kimi Aushaf Panggabean, Rian Fatah Mochamad, S.T., M.Eng., Ph.D. ; Husni Rois Ali, S.T., M.Eng., Ph.D., DIC., SM
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ABSTRACT

The global transition toward renewable generation has driven a rapid and sustained increase in inverter-based resource (IBR) penetration, which progressively displaces conventional synchronous generation and fundamentally alters the dynamic structure of modern power systems by simultaneously reducing system inertia, short-circuit strength, and synchronous damping. This structural shift tightens the coupling among stability domains and introduces potential trade-offs, where conditions that appear acceptable in one domain may mask deteriorating margins in another, rendering single-domain assessments insufficient for characterizing overall system security. To address this limitation, this study proposes a multi-domain stability assessment framework that simultaneously evaluates four stability domains under a consistent system configuration and disturbance scenario design: small-signal stability represented by damping ratio, transient stability represented by critical clearing time (CCT), voltage stability represented by the loadability index derived from continuation power flow (CPF) analysis, and frequency stability represented by the rate of change of frequency (RoCoF). All simulations are conducted on a modified Kundur two-area test system in DIgSILENT PowerFactory 2024, where IBR penetration is modeled as the gradual replacement of synchronous generator G2 by a WECC Type-3 wind-turbine generator (WTG) across six penetration levels from 0% to 100% G2 replacement in 20% increments. The results demonstrate that the impact of increasing IBR penetration is domain-dependent rather than uniform. The damping ratio of the tracked inter-area mode improves from 3.03% to 6.46% (+112.91%) as the weakly damped synchronous contribution of G2 is progressively removed. In contrast, the CCT decreases from 0.765 s to 0.302 s (-60.52%), representing the most severe degradation observed. The loadability index evaluated at the critical bus (Bus 11) decreases by only 0.61%, indicating that the voltage stability margin remains relatively preserved across the penetration range. Meanwhile, the RoCoF increases from 0.144 Hz/s to 0.160 Hz/s (+11.38%), consistent with the reduction in equivalent synchronous inertia. Cross-domain synthesis using radar chart visualization confirms that IBR penetration redistributes stability margins across domains rather than producing uniform improvement or degradation, with transient and frequency stability emerging as the most critically affected domains, demonstrating that integrated multi-domain assessment is essential for accurately characterizing system dynamics under high IBR penetration.

Keywords : Inverter-Based Resource Penetration, Multi-Domain Stability Assessment, Critical Clearing Time, Rate of Change of Frequency, Damping Ratio