

Madani: Jurnal Ilmiah Multidisiplin
Volume 4, Nomor 2, March 2026, P. 7-19
E-ISSN: 2986-6340
Licensed by CC BY-SA 4.0
DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18646708>

Penerapan Sistem *Synchron CBE* (*Close Before Excitations*) Pada Diesel Generator Konvensional

¹Mohammad Suharto, ²Iwa Garniwa Mulyana K

Institut Teknologi PLN Jakarta, Indonesia
 email: msuharto2310082@itpln.ac.id

Abstrak

Artikel ini menganalisis kinerja sistem sinkronisasi generator set (genset) menggunakan metode dead bus *Close Before Excitation* (CBE) dibandingkan dengan metode live bus, serta mengevaluasi respons dinamis genset melalui pengujian block load, tuning PID, dan burning test. Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode sinkronisasi dead bus CBE menghasilkan waktu sinkronisasi rata-rata sekitar 9 detik, lebih cepat dibandingkan metode live bus yang memerlukan waktu sekitar 18 detik, sehingga diperoleh peningkatan efisiensi waktu sebesar $\pm 50\%$. Peningkatan ini secara langsung berdampak pada keandalan sistem catu daya cadangan serta mengurangi ketergantungan terhadap kapasitas baterai Uninterruptible Power Supply (UPS). Pengujian block load menunjukkan bahwa genset mampu menerima beban 0–50% dengan respons tegangan dan frekuensi yang stabil serta memenuhi ketentuan ISO 8528-5. Pada pengujian block load 0–100%, teramati penurunan tegangan hingga –19% dan penurunan frekuensi sebesar –9% dengan waktu pemulihan sekitar 5,5 detik, yang diklasifikasikan sebagai conditional pass sesuai standar. Hasil tuning PID pada Digital Automatic Voltage Regulator (DAVR) dan governor terbukti mampu memperbaiki respons transien, menurunkan besarnya penurunan tegangan, serta meningkatkan stabilitas sistem selama proses sinkronisasi dan penerimaan beban mendadak. Selain itu, hasil burning test menunjukkan bahwa genset dapat beroperasi secara kontinu pada beban tinggi dengan parameter tegangan, frekuensi, dan termal yang stabil tanpa terjadinya gangguan proteksi. Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa penerapan sinkronisasi dead bus CBE yang didukung oleh tuning PID yang tepat mampu meningkatkan kecepatan respons, stabilitas, dan keandalan genset sebagai sumber daya listrik cadangan untuk beban kritis.

Keywords: *Generator Set; Sinkronisasi Dead Bus; Close Before Excitation (CBE); Digital Automatic Voltage Regulator (DAVR); Tuning PID*

Abstract

This article analyzes the performance of generator set (genset) synchronization systems using the Dead Bus Close Before Excitation (CBE) method compared to the live bus method, and evaluates the dynamic response of gensets through block load testing, PID tuning, and burning tests. The test results show that the Dead Bus CBE synchronization method achieves an average synchronization time of approximately 9 seconds, faster than the live bus method, which requires about 18 seconds, resulting in a time efficiency improvement of $\pm 50\%$. This improvement directly impacts the reliability of the backup power system and reduces dependence on Uninterruptible Power Supply (UPS) battery capacity. Block load testing shows that the genset can handle 0–50% load with stable voltage and frequency responses, meeting the requirements of ISO 8528-5. In the 0–100% block load test, a voltage drop of up to –19% and a frequency decrease of –9% were observed, with a recovery time of approximately 5.5 seconds, classified as a conditional pass according to the standard. PID tuning results on the Digital Automatic Voltage Regulator (DAVR) and governor were proven to improve transient response, reduce voltage drop magnitude, and enhance system stability during synchronization and sudden load acceptance. Additionally, the burning test results indicate that the genset can operate continuously under high load with stable voltage, frequency, and thermal parameters without triggering protection faults. Overall, this study demonstrates that implementing Dead Bus CBE synchronization supported by proper PID tuning can improve the response speed, stability, and reliability of gensets as backup power sources for critical loads.

Keywords: *Generator Set; Dead Bus Synchronization; Close Before Excitation (CBE); Digital Automatic Voltage Regulator (DAVR); PID Tuning*

Article Info

Received date: 12 February 2026

Revised date: 15 February 2026

Accepted date: 15 February 2026

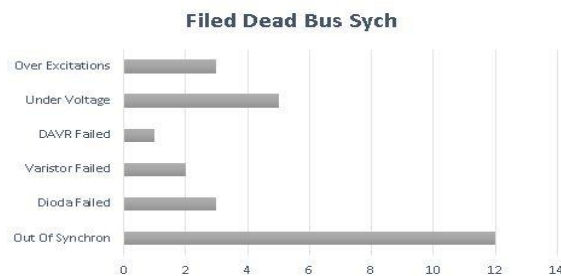
PENDAHULUAN

Ketersediaan pasokan energi listrik yang andal merupakan faktor krusial dalam menunjang operasional sektor industri, komersial, dan fasilitas publik. Namun, suplai listrik dari jaringan utama

tidak selalu stabil dan berpotensi mengalami gangguan seperti blackout atau pemadaman mendadak. Untuk menjamin kontinuitas pasokan listrik pada kondisi tersebut, generator set (genset) digunakan sebagai sumber daya cadangan yang mampu menyediakan energi listrik secara mandiri ketika pasokan utama terhenti [1]. Pada sistem kelistrikan yang melibatkan lebih dari satu unit genset, diperlukan mekanisme sinkronisasi agar seluruh unit dapat beroperasi secara selaras. Sinkronisasi merupakan proses penyamaan parameter listrik, meliputi tegangan, frekuensi, urutan fasa, dan sudut fasa, sebelum genset dihubungkan ke busbar yang sama. Proses ini bertujuan untuk menjamin pembagian beban yang seimbang, menjaga stabilitas sistem, serta mencegah gangguan pada peralatan dan jaringan distribusi [2]. Keandalan sistem dead bus synchronizing sangat dipengaruhi oleh kinerja electronic governor sebagai pengatur kecepatan mesin dan Automatic Voltage Regulator (AVR) sebagai pengendali tegangan. Penggunaan Electronic Digital Governor dan Digital Automatic Voltage Regulator (DAVR) memungkinkan pengaturan parameter yang lebih presisi, respons yang cepat terhadap perubahan beban, serta koordinasi antar genset yang lebih efisien [5].

Implementasi sistem dead bus synchronizing menjadi sangat penting karena kegagalan sinkronisasi dapat menimbulkan lonjakan arus (inrush current), ketidakseimbangan beban, hingga kerusakan peralatan listrik. Oleh karena itu, diperlukan analisis menyeluruh terhadap prinsip kerja, konfigurasi, dan kinerja sistem sinkronisasi guna memastikan operasi yang aman dan andal pada kondisi nyata [6]. Beberapa studi menunjukkan bahwa penerapan metode Close Before Excitation (CBE) pada sistem dead bus mampu mempercepat proses pemulihan daya dan mengurangi dampak transien pada peralatan listrik berskala besar [7].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis kinerja sistem sinkronisasi dead bus dengan metode CBE pada genset konvensional. Kajian ini menitikberatkan pada peran electronic governor dan DAVR, termasuk pengendalian PID, dalam menjaga kestabilan frekuensi dan tegangan selama proses sinkronisasi, sehingga sistem mampu beroperasi secara otomatis, cepat, dan andal pada kondisi blackout



Gambar 1 Diagram temuan kegagalan synchron CBE

Gambar 1 menunjukkan distribusi penyebab kegagalan sinkronisasi dead bus berdasarkan hasil inspeksi

Berikut Tabel 1, gangguan yang terjadi pada saat proses sinkronisasi berjalan, ada beberapa titik gangguan di sisi alternator .

No	Jenis Gangguan	Frekuensi Kejadian	Keterangan Singkat
1	Over Excitations	3 kejadian	AVR Memberikan input ke Exciter Arus dan Voltage melebihi batas setpoint
2	Under Voltage	5 kejadian	Terjadi penurunan nominal tegangan signifikan dari batas Normal setpoint karena beban berlebih

3	DAVR Filed (Electrical Ttrip)	1 kejadian	Gangguan Electrical Trip di AVR Short circuit davr memutus system excitations
4	Varistor Faild	2 kejadian	Terjadi Perubahan medan magnet yang sangat signifikan melebihi batas reverse Power
5	Diode Exciter Faild	3 kejadian	Terjadi Perubahan medan magnet yang sangat signifikan melebihi batas reverse Power yang sangat berlebih
6	Out Of Synchron	12 kejadian	Terjadi perbedaan sudut phase antara generator synchron

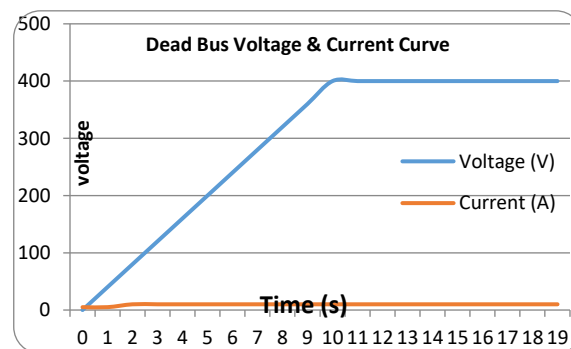
TINJAUAN PUSTAKA

Kajian Pustaka Relevan Generator Set

Generator set (genset) merupakan perangkat yang berfungsi menghasilkan energi listrik melalui konversi energi mekanik menjadi energi listrik. Secara umum, genset terdiri dari engine sebagai penggerak mula yang menghasilkan tenaga putar melalui proses pembakaran bahan bakar dan alternator yang mengubah energi mekanik tersebut menjadi energi listrik melalui prinsip induksi elektromagnetik [8]. Genset digunakan sebagai sumber listrik cadangan ketika pasokan dari jaringan utama terhenti, serta sebagai sumber daya utama pada lokasi yang tidak terjangkau jaringan listrik. Pada sistem kelistrikan industri dan fasilitas kritis, beberapa unit genset dapat dioperasikan secara paralel untuk memenuhi kebutuhan daya yang lebih besar sekaligus meningkatkan keandalan sistem [9]. Kinerja genset sangat dipengaruhi oleh kestabilan kecepatan putar mesin dan kestabilan medan magnet alternator, sehingga keberadaan governor dan voltage regulator menjadi faktor utama dalam menjaga kualitas tegangan dan frekuensi, khususnya pada sistem operasi paralel [10].

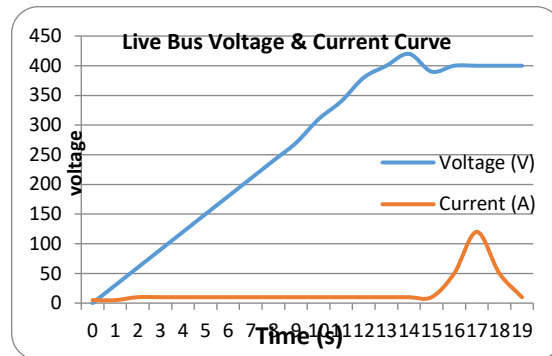
Sinkronisasi Dead bus dan live bus

Sinkronisasi (synchronizing) merupakan proses penyamaan parameter listrik antara dua atau lebih generator sebelum dihubungkan ke busbar yang sama. Parameter utama yang harus dipenuhi meliputi tegangan, frekuensi, urutan fasa, dan sudut fasa. Proses sinkronisasi diperlukan untuk mencegah terjadinya arus kejut (inrush current), torsi kejut pada poros mesin, serta gangguan kestabilan sistem kelistrikan. Pada sistem multi-genset, sinkronisasi berperan penting dalam menjamin pembagian beban aktif dan reaktif yang proporsional serta menjaga kestabilan operasi sistem. Tujuan utama sinkronisasi adalah memastikan transfer daya antar genset berlangsung seimbang tanpa menimbulkan arus sirkulasi yang berlebihan. Dalam penelitian ini, proses sinkronisasi dilakukan secara otomatis melalui Generator Control Panel (GCP) berbasis mikrokontroler Easygen 3500xt, yang dilengkapi dengan fungsi auto synchronizer dan dikendalikan secara digital.



Gambar 2 synchron CBE Close before excitations

Gambar 2. memperlihatkan kurva tegangan (V) dan arus (A) selama proses sinkronisasi dead bus pada generator. Pada kondisi awal, busbar berada dalam keadaan tanpa tegangan, sehingga tegangan generator meningkat secara bertahap seiring dengan aktivasi sistem eksitasi setelah generator circuit breaker (GCB) ditutup sesuai metode Close Before Excitation (CBE). Kurva tegangan menunjukkan kenaikan yang linier hingga mencapai nilai nominal sekitar 400 V, kemudian stabil tanpa adanya lonjakan (overshoot) yang signifikan.



Gambar 3 synchron Live Bus sistem

Gambar 3 menunjukkan kurva tegangan (V) dan arus (A) selama proses sinkronisasi live bus, di mana busbar sudah berada dalam kondisi bertegangan sebelum generator circuit breaker (GCB) ditutup. Kurva tegangan meningkat menuju nilai nominal sekitar 400 V, namun terlihat adanya fluktuasi dan sedikit overshoot pada saat mendekati titik sinkronisasi. Hal ini disebabkan oleh proses penyesuaian simultan antara tegangan, frekuensi, dan sudut fasa generator terhadap busbar yang sudah aktif Sinkronisasi generator adalah proses penyambungan generator ke busbar atau sistem tenaga dengan memenuhi kesesuaian parameter utama, yaitu tegangan, frekuensi, urutan fasa, dan sudut fasa. Sinkronisasi yang tidak tepat dapat menimbulkan inrush current, torsi kejutan, dan gangguan kestabilan sistem

Syarat sinkron :

1. TEGANGAN

$$\Delta V = \frac{V_g - V_b}{V_b} \times 100\% \leq \pm(5\%)$$

DENGAN V_g = TEGANGAN GENERATOR, V_b = TEGANGAN BUSBAR

2. FREKUENSI

$$\Delta f = f_g - f_b \leq \pm(0,5\text{Hz})$$

3. SUDUT FASE

$$[\Delta\phi] \leq \pm(10^\circ)$$

4. URUTAN FASE

$$R - S - T(\text{Harus Sama})$$

Teori Kendali PID

Pengendali system Proportional–Integral–Derivative (PID) merupakan metode kendali yang umum digunakan pada Automatic Voltage Regulator (AVR) untuk menjaga kestabilan tegangan keluaran generator[15]. Pengendali ini bekerja berdasarkan selisih antara nilai referensi tegangan (set point) dan tegangan aktual keluaran generator yang disebut sebagai sinyal galat (error). Secara matematis, sinyal kendali PID pada AVR dirumuskan sebagai

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

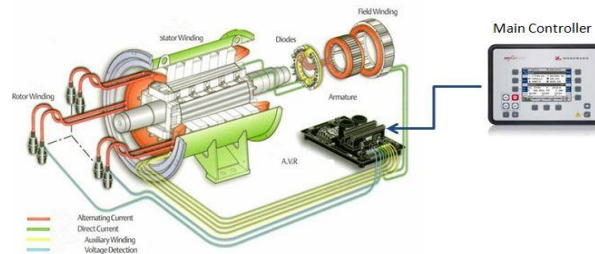
$$e(t) = V_{ref} - V_{actual}$$

K_p mempercepat respon

Ki menghilangkan steady-state error

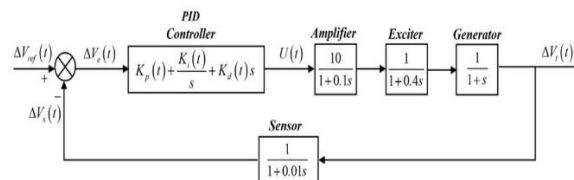
Kd meredam osilasi (hunting)

Sistem eksitasi generator dikendalikan oleh main controller yang dilengkapi dengan pengendalian berbasis PID tuning. Penerapan pengendalian ini bertujuan untuk meningkatkan kestabilan tegangan, khususnya selama proses sinkronisasi, sehingga respons tegangan menjadi lebih cepat, teredam, dan berada dalam batas yang dipersyaratkan.

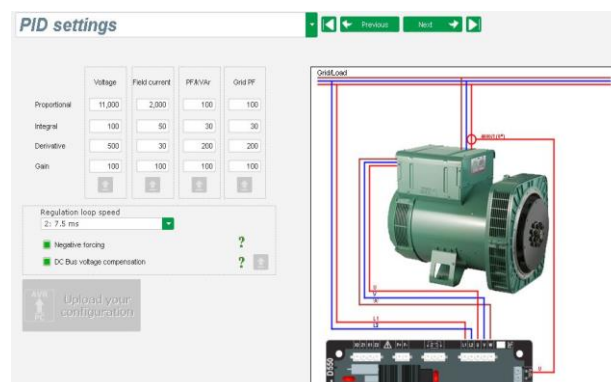


Gambar 4 AVR Sistem PID

Pada gambar 4, kondisi tertentu, ketika proses sinkronisasi live bus maupun dead bus generator mengalami peningkatan excitations secara tiba-tiba, tegangan eksitasi cenderung menurun. Kondisi ini dapat menyebabkan terjadinya osilasi yang cukup besar pada respons tegangan terminal generator [2]. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem pengendali pada Automatic Voltage Regulator (AVR) untuk mengatasi permasalahan tersebut. Dalam penelitian ini, sistem AVR dilengkapi dengan pengendali PID yang dimiliki tuning internal AVR Digital. yang berfungsi meningkatkan kestabilan tegangan dan meredam osilasi selama perubahan beban. Konsep sistem AVR dengan pengendali control PID, beserta rentang nilai parameter setpoint pengendalinya, dapat direpresentasikan dalam bentuk sistem kendali loop tertutup (closed-loop control system) sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5 dan 6



Gambar 5 diagram control PID Close loop



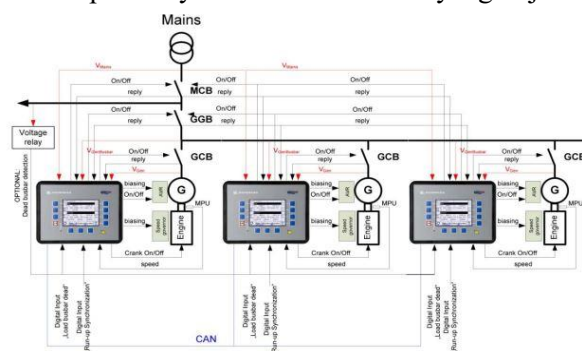
Gambar 6 AVR Sistem close loop PID DAVR

Close Before Excitation (CBE) merupakan metode sinkronisasi generator pada kondisi dead bus, di mana pemutus tenaga (circuit breaker) generator ditutup terlebih dahulu sebelum sistem eksitasi

diaktifkan.[6] Pada metode ini, generator dihubungkan ke busbar dalam keadaan belum bertegangan, kemudian tegangan dan frekuensi dibangun secara bertahap melalui proses eksitasi setelah breaker tertutup.[5] Penerapan sistem CBE bertujuan untuk mempercepat proses pemulihan daya, mengurangi arus kejutan (inrush current), serta meminimalkan tegangan transien yang dapat terjadi pada peralatan listrik saat sinkronisasi. Metode ini sangat efektif pada sistem pembangkit dengan beberapa unit generator, khususnya pada aplikasi sistem catu daya cadangan yang menuntut waktu pemulihan singkat, seperti pusat data, rumah sakit, dan fasilitas industri kritis.[4] Dalam sistem CBE, kestabilan proses sinkronisasi sangat bergantung pada kinerja electronic governor dan Automatic Voltage Regulator (AVR), termasuk pengendalian PID, yang berfungsi menjaga kenaikan tegangan dan frekuensi agar tetap berada dalam batas yang diizinkan. Dengan pengaturan parameter yang tepat dikendalikan system PID

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental untuk menganalisis kinerja sistem sinkronisasi dead bus Close Before Excitation (CBE) pada generator set (genset) diesel konvensional. Pengujian dilakukan secara langsung pada sistem genset yang dilengkapi dengan Electronic Digital Governor, Digital Automatic Voltage Regulator (DAVR), serta Generator Control Panel (GCP) berbasis mikrokontroler sistem sigel line diagram CBE Close before excitations system. Berikut ini singeline diagram CBE, menggunakan module synchronizing, support untuk proses synchronizing CBE, dilengkapi dengan system pengaturan PID dan Can Bus sistem governor maupun DAVR, agar proses synnhcron berjalan dengan baik tanpa adanya kendala kerusakan yang terjadi.



Gambar 7 Singeline diagram CBE system

Gambar 7 menunjukkan sistem single line diagram yang menggambarkan konfigurasi dan pengaturan sinkronisasi generator. Pada diagram tersebut terlihat bahwa proses sinkronisasi dikendalikan oleh modul kontrol utama, yang berfungsi mengatur parameter operasi generator sehingga proses sinkronisasi dapat berlangsung secara terkontrol dan andal.



Gambar 8, Genset yang terpasang dengan kapasitas 2250kVA

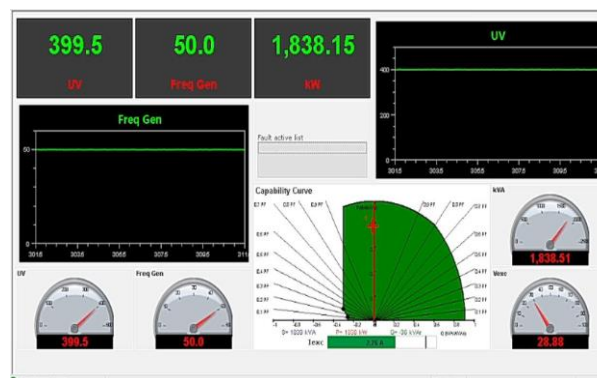
Gambar 8 menunjukkan generator set (genset) yang terinstal pada proyek dengan klasifikasi Tier III serta memiliki kinerja sesuai standar performance class G3. Tabel 2. Berikut data sheet spesifikasi generator yang digunakan

Berikut Tabel 2, Spesifikasi Genset type MGS 2300R kapasitas 2250kVA CP Rating, Critical Power, dengan output tegangan 400V, dan frequency 50hz, Duty Critical power 24 jam running Unlimited.

<i>Parameter</i>	Spesifikasi
<i>Model Genset</i>	Mitsubishi MGS2300R
<i>Frekuensi</i>	50 Hz
<i>Tegangan nominal</i>	380 V (3 fase, 4 kawat)
<i>Faktor daya (Power Factor)</i>	0,8 lagging
<i>Kecepatan putaran</i>	1500 rpm
<i>Sistem pendingin</i>	Closed loop dengan radiator integral
<i>Tipe pengendali</i>	Digital synchronizing controller dengan DAVR dan Electronic Governor

Konfigurasi Sistem

Sistem penelitian terdiri atas satu unit genset diesel yang terhubung ke busbar utama dalam kondisi dead bus. Sistem kontrol sinkronisasi diimplementasikan pada GCP dengan fungsi auto synchronizer, yang mengatur proses penutupan pemutus tenaga dan pengaktifan eksitasi berdasarkan metode CBE. Parameter operasi utama yang diamati meliputi tegangan, frekuensi, waktu sinkronisasi, serta respons transien sistem.



Gambar 9 konfigurasi parameter sistem generator

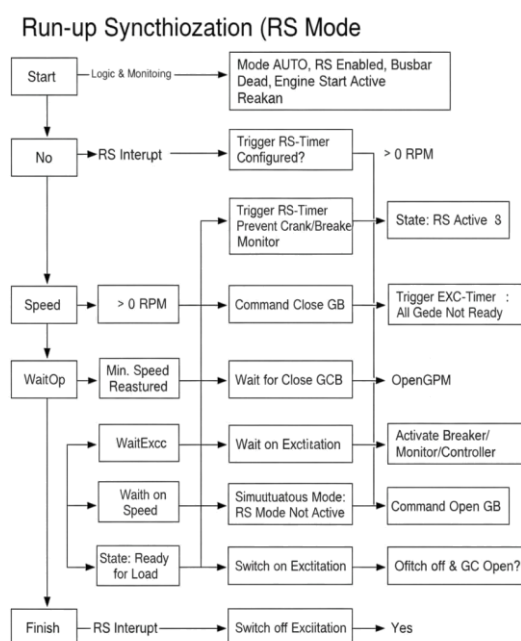
Prosedur Sinkronisasi CBE

Proses sinkronisasi dilakukan dengan menutup pemutus tenaga generator terlebih dahulu pada kondisi busbar tidak bertegangan, kemudian eksitasi diaktifkan untuk membangun tegangan dan frekuensi sistem secara bertahap. Pengendalian kecepatan dan tegangan selama proses ini dilakukan oleh electronic governor dan DAVR yang dilengkapi pengendali PID. Metode ini dibandingkan dengan sinkronisasi live bus untuk mengevaluasi perbedaan waktu sinkronisasi dan respons dinamis sistem.

Pengujian Kinerja Sistem

Pengujian kinerja genset dilakukan melalui beberapa skenario, yaitu:

- Pengujian waktu sinkronisasi, untuk membandingkan kecepatan sinkronisasi antara metode dead bus CBE dan live bus.
- Block load test, dengan variasi beban 0–50% dan 0–100% untuk mengevaluasi respons tegangan dan frekuensi terhadap perubahan beban mendadak.
- Tuning PID, dilakukan pada DAVR dan governor untuk memperoleh respons transien yang optimal serta meningkatkan stabilitas sistem.
- Burning test, untuk menilai keandalan operasi genset pada beban tinggi dalam jangka waktu tertentu.
- Parameter evaluasi Parameter evaluasi meliputi waktu sinkronisasi, voltage dip, frequency dip, serta waktu pemulihan (recovery time). Hasil pengujian dibandingkan dengan batasan kinerja yang ditetapkan dalam ISO 8528-5 guna menentukan tingkat kelayakan dan keandalan sistem.



Gambar 10 Flowchart sistem sinkron CBE

Gambar 10 menunjukkan model state machine untuk proses sinkronisasi Close Before Excitation (CBE), yang merupakan metode sinkronisasi generator dengan menaikkan kecepatan mesin dari kondisi berhenti hingga mencapai parameter sinkronisasi yang dipersyaratkan sebelum penyambungan ke busbar. Metode ini diterapkan untuk menjamin proses penyambungan generator yang aman dan stabil, baik pada operasi paralel dengan jaringan maupun pada sistem terisolasi.

Pada mode kontrol GGB A, proses run-up synchronization dapat dilakukan ketika Generator Grid Breaker (GGB) dan mesin berada pada kondisi awal terbuka dan berhenti. Aktivasi proses dilakukan melalui sinyal perintah sinkronisasi. Dalam mode ini, apabila Main Circuit Breaker (MCB) tidak dibuka oleh sistem eksternal, sistem kontrol akan mempertahankan operasi paralel dengan jaringan. Setelah proses sinkronisasi selesai, pelepasan perintah start akan menyebabkan generator dibongkar bebannya dan seluruh breaker dibuka secara berurutan.

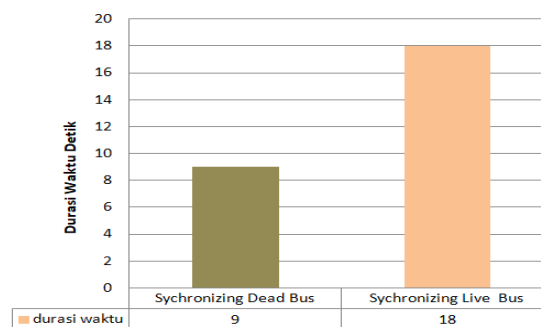
Sebaliknya, pada mode kontrol GGB B, run-up synchronization hanya dapat dilakukan apabila MCB dan GGB berada dalam kondisi terbuka. Mode ini dirancang untuk mencegah terjadinya sinkronisasi yang tidak diinginkan dengan jaringan. Jika MCB tidak dibuka dari sistem eksternal, proses sinkronisasi akan diblokir dan generator tidak diizinkan untuk melakukan start. Setelah sinkronisasi berhasil, generator dapat dihubungkan ke busbar beban mati (dead bus) secara terkendali. Pelepasan

perintah start pada mode ini juga mengakibatkan pembongkaran beban dan pembukaan breaker secara berurutan. Secara keseluruhan, penerapan run-up synchronization dengan pengaturan mode kontrol GGB yang tepat berperan penting dalam menjaga kestabilan sistem, mencegah kesalahan sinkronisasi, serta meningkatkan keandalan operasi generator baik pada sistem paralel maupun sistem terisolasi.

Metode Close Before Excitation (CBE) merupakan teknik sinkronisasi generator pada kondisi dead bus, di mana pemutus tenaga generator (GCB) ditutup terlebih dahulu sebelum sistem eksitasi diaktifkan. Pada metode ini, generator dihubungkan ke busbar dalam kondisi tidak bertegangan, kemudian tegangan dan frekuensi dibangun secara bertahap melalui aktivasi AVR. Pendekatan ini bertujuan untuk mempercepat pemulihan daya, mengurangi arus kejutan dan gangguan transien, serta meningkatkan keandalan sistem catu daya cadangan. Kestabilan proses CBE sangat dipengaruhi oleh kinerja electronic governor dan Digital Automatic Voltage Regulator (DAVR) yang dikendalikan secara digital.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil observasi menunjukkan bahwa metode sinkronisasi dead bus Close Before Excitation (CBE) membutuhkan waktu rata-rata sekitar 9 detik untuk proses sinkronisasi dan pengambilan alih beban (backup load). Sebagai perbandingan, metode sinkronisasi live bus memerlukan waktu rata-rata sekitar 18 detik. Dengan demikian, penerapan metode CBE mampu menghemat waktu sekitar 9 detik, atau setara dengan peningkatan efisiensi waktu sebesar $\pm 50\%$. Penghematan waktu ini memberikan keuntungan signifikan, terutama dalam mempercepat pemulihan suplai daya pada kondisi darurat. Selain itu, waktu backup yang lebih singkat juga berdampak pada berkurangnya ketergantungan terhadap battery bank Uninterruptible Power Supply (UPS), sehingga berpotensi menurunkan beban kerja dan kebutuhan pemeliharaan sistem UPS.



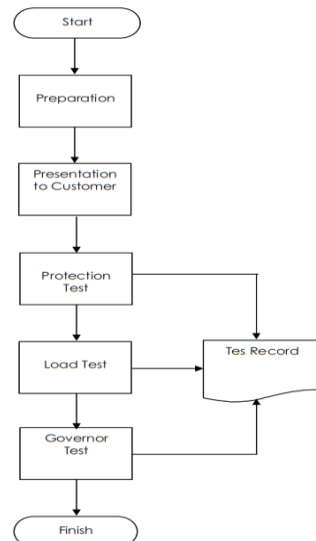
Gambar 10 durasi sinkron

Gambar 10 menunjukkan grafik perbandingan durasi sinkron antara dua metode yang di teliti di site Data Centre:

- Metode Dead Bus sinkron memerlukan waktu 9 detik
- Metode sinkron Live Bus memerlukan waktu 18 detik

Pengujian Block Load

Pengujian block load dilakukan, untuk mengevaluasi respons dinamis dan kemampuan transien genset dalam menerima pembebanan secara tiba-tiba, setelah mencapai kondisi ready to load. Pembebanan diterapkan secara bertahap dengan skenario kenaikan beban dari 0–50%, & 0–100% dari kapasitas nominal genset. Berikut flowchart gambar procedure test Block load

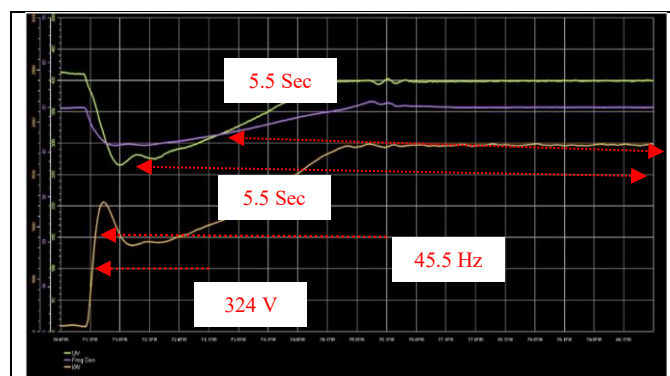


Gambar 12 Flowchart Bloack Load Test

Pengujian block load test mengacu pada standar NFPA 110 dengan penerapan pembebanan 0–100% dilakukan pada saat proses sinkronisasi generator. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan genset dalam menerima beban secara tiba-tiba serta memastikan bahwa tuning PID pada sistem pengendalian, khususnya Digital Automatic Voltage Regulator (DAVR) dan governor, telah bekerja dengan baik dan memenuhi persyaratan standar (standard requirements). Melalui pengujian ini dapat dianalisis respons transien sistem, termasuk kestabilan tegangan dan frekuensi, sehingga kinerja genset dinyatakan layak untuk dioperasikan pada kondisi darurat maupun beban kritis.

Tabel 3 test bloack load NFPA 110

No	STEP LOADING / UNLOADING				VOLTAGE DIP		RECOVERY TIME (SEC)	FREQUENCY DIP		RECOVERY TIME (SEC)
	FROM/TO		FROM/TO							
	% LOAD		EKW		VOLT	%		Hz	%	
T13	0	100	0	1800	324	- 19%	5.5	45.5	-9 %	5.5



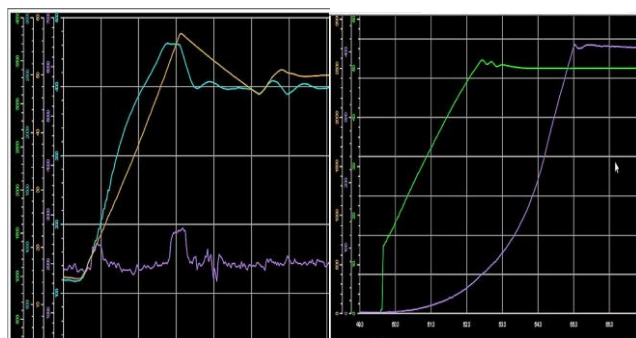
Gambar 13 Hasil pengetesan di data tabel NFPA 110

Tabel 4, Perbandingan system sinkron Live bus dan Dead Bus

Parameter Evaluasi	Sinkronisasi Dead Bus (CBE)	Sinkronisasi Live Bus
Kondisi Busbar Awal	Tidak bertegangan (<i>dead bus</i>)	Sudah bertegangan (<i>live bus</i>)
Metode Penutupan Breaker	GCB ditutup sebelum eksitasi (<i>Close Before Excitation</i>)	GCB ditutup setelah parameter sinkron terpenuhi
Kebutuhan Penyelarasan Sudut Fasa	Tidak diperlukan	Diperlukan ($\Delta\phi$ harus dalam batas toleransi)
Penyelarasan Tegangan & Frekuensi	Dilakukan setelah GCB tertutup	Dilakukan sebelum GCB tertutup
Kompleksitas Logika Kontrol	Relatif sederhana	Lebih kompleks
Risiko Inrush Current & Tegangan Transien	Sangat rendah	Relatif lebih tinggi
Rata-rata Waktu Sinkronisasi	9 detik	18 detik
Efisiensi Waktu	Lebih cepat ($\approx 50\%$)	Lebih lambat
Kesesuaian untuk Back-up Darurat	Sangat sesuai	Kurang optimal
Stres Elektrik pada Peralatan	Minimal	Lebih tinggi dibanding dead bus

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis perbandingan kedua metode sinkronisasi, sistem black start dengan metode Close Before Excitation (CBE) menunjukkan kinerja yang lebih cepat dan efisien dibandingkan metode sinkronisasi live bus. Pada metode CBE, proses penutupan pemutus tenaga dilakukan pada kondisi busbar tidak bertegangan, sehingga tidak diperlukan proses penyamaan sudut fasa dan tegangan sebelum penyambungan generator. Hal ini berdampak langsung pada percepatan waktu sinkronisasi dan pengambilan alih beban.

Berdasarkan hasil pengujian, sistem black start dengan sinkronisasi (CBE) menunjukkan kinerja yang lebih cepat dibandingkan metode live bus. Metode CBE mampu mengurangi waktu pengambilan alih beban hingga sekitar 50% karena tidak memerlukan proses penyelarasan sudut fasa sebelum penutupan pemutus tenaga. Perbedaan kinerja kedua metode tersebut ditunjukkan secara jelas pada grafik.



Gambar 14, grafik Dead Bus dan Live Bus

Berdasarkan hasil analisis grafik pengujian, metode sinkronisasi dead bus menunjukkan kinerja yang lebih cepat dan responsif dalam melakukan pengambilan alih beban dibandingkan metode sinkronisasi live bus. Pada metode dead bus, proses penutupan pemutus tenaga dilakukan pada kondisi busbar tidak bertegangan, sehingga tidak diperlukan tahapan penyalarsan sudut fasa dan tegangan seperti pada metode live bus. Kondisi ini secara langsung berkontribusi terhadap percepatan proses sinkronisasi dan pengambilan alih beban.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode dead bus mampu mengurangi waktu backup beban hingga sekitar 50% dibandingkan metode live bus. Pengurangan waktu ini memberikan efisiensi operasional yang signifikan, khususnya pada sistem catu daya darurat yang menuntut kecepatan pemulihan suplai listrik. Selain itu, waktu pemulihan yang lebih singkat juga berdampak pada penurunan ketergantungan terhadap sistem Uninterruptible Power Supply (UPS), sehingga dapat mengurangi beban kerja baterai dan meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan. Dengan demikian, metode sinkronisasi dead bus dinilai lebih efektif untuk diterapkan pada kondisi gangguan atau blackout, terutama pada instalasi kelistrikan dengan beban kritis yang memerlukan kontinuitas suplai daya listrik secara cepat dan stabil.

SIMPULAN

Penelitian ini mengevaluasi kinerja sinkronisasi generator set menggunakan metode dead bus Close Before Excitation (CBE) dibandingkan dengan metode live bus pada sistem black start. Pengujian dilakukan pada genset diesel yang dilengkapi electronic digital governor dan Digital Automatic Voltage Regulator (DAVR) dengan pengendalian PID, melalui pengujian waktu sinkronisasi, block load, dan stabilitas tegangan–frekuensi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode CBE mampu mempercepat proses pengambilan alih beban dengan waktu sinkronisasi rata-rata ± 9 detik, sekitar 50% lebih cepat dibandingkan metode live bus (± 18 detik). Pada pengujian block load 0–100%, genset menunjukkan respons yang stabil dengan voltage dip -19% dan penurunan frekuensi -9% , yang masih memenuhi standar ISO 8528-5 kelas G2/G3, serta waktu pemulihan sekitar 5,5 detik. Penerapan tuning PID pada DAVR terbukti meningkatkan respons transien, menurunkan voltage dip, dan mempercepat pemulihan tegangan.

Secara keseluruhan, sinkronisasi dead bus CBE yang didukung pengendalian PID yang tepat terbukti meningkatkan kecepatan respons, stabilitas, dan keandalan genset sebagai sumber daya listrik cadangan untuk beban kritis.

REFERENCES

- [1] [1] Altinkaya, H. and Ekmekci, D. (2024) ‘Tuning of PID Controller in PLC-Based Automatic Voltage Regulator System Using Adaptive Artificial Bee Colony–Fuzzy Logic Algorithm’, *Electronics* (Switzerland), 13(24).
- [2] Mahmoud, R.A. and Elwakil, E.S. (2025) ‘Out-of-step detection for synchronous generators using electrical power analysis and Durbin Watson testing’, *Scientific Reports*, 15(1), pp. 1–33.
- [3] Gozdowiak, A. and Antal, M. (2025) ‘A Synchronization of Permanent Magnet Synchronous Generator Dedicated for Small and Medium Hydroelectric Plants’, *Energies*, 18(8).
- [4] Prasetyo, D.B. and Kiswantono, A. (2021) ‘Sinkronisasi Dan Monitoring Generator Dengan Pengendali Berbasis Arduino Mega 2560’, *Aisyah Journal of Informatics and Electrical Engineering*, 3(2), pp. 163–170.
- [5] Mahtani, K., Guerrero, J.M. and Platero, C.A. (2024) ‘Improved Instantaneous Current Value-Based Protection Methods for Faulty Synchronizations of Synchronous Generators’, *Electronics* (Switzerland), 13(23).
- [6] [Woodward, Option K27 - Run-up Synchronization, manual 37454b

- [7] [Deni Hendarto, J.S. (2014) ‘Penerapan Metode Dead Bus Untuk Sinkronisasi Genset Cadangan’, provided by Electronic Journals of UIKA Bogor, pp. 8–13.
- [8] Antono, D. and Khambali, M. (2013) ‘Penerapan Sinkronisasi Jaringan Listrik Tiga Fasa PLN dengan Generator Sinkron Menggunakan Trainer Power Sistem Simulation’, *Jtet*, 2(3), pp. 151–158.
- [9] Thompson, M.J., Ravikumar, K.G. and Laboratories, S.E. (2011) ‘New Developments in Generator Synchronizing Systems’, *Sel*, pp. 1–9.
- [10] [10] Warman, E. (2021) ‘Sinkronisasi Generator 635 Kva Dengan Generator 635 Kva Menggunakan Module Deep Sea’, *Jurnal Simetri Rekayasa*, 5035, pp. 187–195.
- [11] Scientific Report.Out - of- step detections for sychronouse generator using electrical power analysis and durbin watson testing 2025 15:20113
- [12] Suid, M.H. et al. (2024) ‘AVR System Improvement: Fast and Optimal Tuning PID Control Using Safe Experimentation Dynamics Algorithm’, 2024 International Conference on System Science and Engineering, ICSSE 2024, pp.
- [12] [29] Mahmoud, R. A. & Malik, O. P. Out-of-step detection of synchronous generators using dual computational techniques based on correlation and instantaneous powers. *IET Gener. Trans. Distrib.* 16, 2716–2746 (2022).
- [13] [30] S. Chatterjee and V. Mukherjee, “PID controller for automatic voltage regulator using teaching-learning based optimization technique,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 77, pp. 418– 429, 2016
- [14] [31] Z. L. Gaing, “A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 2, pp. 384–391, Jun. 2004.
- [15] [32] H. Gozde, “Robust 2DOF state-feedback PI-controller based on meta-heuristic optimization for automatic voltage regulation system,” *ISA Trans.*, vol. 98, pp. 26–36, Mar. 2020