

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka Relevan Generator Set

Generator Set (Genset) adalah suatu perangkat yang berfungsi untuk menghasilkan energi listrik melalui proses konversi energi mekanik menjadi energi listrik. Genset terdiri dari dua komponen utama, yaitu engine sebagai penggerak mula (*prime mover*) dan alternator sebagai pembangkit listrik. Engine berfungsi menghasilkan tenaga putar dengan membakar bahan bakar, sedangkan alternator mengubah energi mekanik tersebut menjadi energi listrik melalui induksi elektromagnetik. [8].

Genset digunakan sebagai sumber listrik cadangan ketika suplai dari jaringan utama (PLN) terhenti, serta sebagai sumber daya utama pada lokasi yang tidak memiliki jaringan listrik. Pada sistem kelistrikan industri atau fasilitas penting, beberapa unit genset dapat dioperasikan secara paralel untuk memenuhi kebutuhan daya yang lebih besar dan meningkatkan keandalan sistem. [9].

Kinerja genset sangat dipengaruhi oleh kestabilan kecepatan putar mesin dan kestabilan medan magnet pada alternator. Oleh karena itu, sistem pengatur kecepatan (*governor*) dan pengatur tegangan (*voltage regulator*) menjadi komponen penting dalam menjaga kualitas daya listrik yang dihasilkan, terutama pada sistem yang melibatkan lebih dari satu unit genset. [10].

2.2 Prinsip Kerja Generator Set

Prinsip kerja genset berdasarkan hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik, yaitu ketika konduktor berputar dalam medan magnet, maka akan timbul gaya gerak listrik (GGL) pada konduktor tersebut. Engine menghasilkan putaran mekanik yang diteruskan ke rotor alternator melalui kopling. Rotor yang berputar di dalam medan magnet stator menghasilkan tegangan bolak-balik (AC) pada lilitan stator. Tegangan yang dihasilkan kemudian diatur oleh Automatic Voltage Regulator (AVR) agar tetap stabil sesuai nilai nominal yang dibutuhkan, sementara kecepatan putaran engine dikendalikan oleh governor untuk menjaga frekuensi sistem tetap konstan (misalnya 50 Hz untuk sistem Indonesia)

2.3 Sistem Sinkronisasi Genset

Sinkronisasi (*synchronizing*) adalah proses menyamakan parameter listrik antara dua

atau lebih generator sebelum dihubungkan ke busbar yang sama. Parameter utama yang harus disamakan meliputi:

1. Tegangan (Voltage)
2. Frekuensi (Frequency)
3. Urutan fase (Phase sequence)
4. Sudut fasa (Phase angle)

Sinkronisasi diperlukan untuk mencegah terjadinya arus kejut (*inrush current*), torsi kejut pada poros mesin, serta gangguan kestabilan sistem. Pada aplikasi multi-genset, sistem sinkronisasi berfungsi untuk memastikan pembagian beban aktif dan reaktif berjalan secara proporsional dan stabil. Tujuan sinkronisasi adalah agar transfer daya antar genset dapat berjalan seimbang tanpa menimbulkan arus sirkulasi yang berlebihan. Sinkronisasi dilakukan automatic di system control GCP (Generator Control Panel) menggunakan alat base microprocessor Easygen 3500xt secara otomatis dengan sistem auto synchronizer yang dikendalikan secara digital

2.4 Sistem Dead Bus Synchronizing

Sistem dead bus synchronizing digunakan ketika seluruh busbar dalam kondisi tidak bertegangan (dead), biasanya setelah terjadi blackout total. Dalam sistem ini, salah satu genset akan diaktifkan terlebih dahulu sebagai genset utama (master generator) untuk menyalakan busbar. Setelah parameter tegangan dan frekuensi stabil, unit genset lainnya akan disinkronkan secara otomatis ke busbar menggunakan sistem kontrol digital.

Kelebihan sistem dead bus synchronizing antara lain:

- 1) Dapat menghidupkan sistem kelistrikan secara otomatis setelah blackout tanpa operator manual.
- 2) Mempercepat waktu pemulihan daya (restoration time).
- 3) Menjamin keseragaman tegangan dan frekuensi antar genset.
- 4) Meminimalkan risiko arus lonjakan (*inrush current*) saat penyalaan.

Namun, sistem ini sangat bergantung pada keandalan governor dan AVR dalam membangun tegangan dan frekuensi awal secara stabil.

2.5 Close Before Excitations (CBE)

Close Before Excitation (CBE) merupakan metode penyambungan generator ke busbar pada kondisi medan eksitasi belum aktif atau masih sangat rendah. Pada sistem

dead bus, metode CBE memungkinkan pemutus tenaga (*circuit breaker*) generator ditutup terlebih dahulu, kemudian sistem eksitasi diaktifkan secara terkontrol oleh AVR.

Penerapan CBE bertujuan untuk:

1. Mengurangi lonjakan arus transien saat penutupan breaker
2. Menghindari tegangan lebih (*overvoltage*) pada busbar
3. Meningkatkan keandalan sinkronisasi pada kondisi darurat

Metode ini umum diterapkan pada sistem genset modern yang telah menggunakan Digital AVR dan kontrol logika sinkronisasi terintegrasi.

2.6 Electronic Governor

Governor adalah sistem pengatur kecepatan engine pada genset. Fungsinya menjaga agar putaran mesin tetap stabil meskipun terjadi perubahan beban. Pada genset modern, digunakan Electronic Digital Governor, yang bekerja berdasarkan sensor kecepatan (*magnetic pickup sensor*) dan aktuator elektronik untuk mengatur suplai bahan bakar ke engine.

Prinsip kerja governor digital adalah mendeteksi perubahan frekuensi atau kecepatan mesin, kemudian mengatur jumlah bahan bakar yang masuk agar kecepatan kembali ke nilai nominal. Keunggulan governor digital dibanding mekanik antara lain:

- Respon lebih cepat terhadap perubahan beban.
- Pengaturan frekuensi lebih presisi.
- Komunikasi mudah dengan sistem kontrol (PLC, ECU, atau modul sinkronisasi)

Contoh perangkat yang sering digunakan dalam sistem industri adalah Woodward ProAct Governor, yang memiliki kontrol digital terintegrasi dan dapat dikonfigurasi untuk sistem paralel maupun dead bus synchronizing.

2.7 Digital Automatic Voltage Regulator (DAVR)

Digital AVR (DAVR) adalah perangkat pengatur tegangan keluaran generator secara otomatis. DAVR mengatur arus eksitasi pada rotor untuk mempertahankan tegangan output sesuai dengan nilai yang diinginkan, meskipun terjadi perubahan beban.

Fungsi utama DAVR adalah:

- Menstabilkan tegangan output generator.
- Menyesuaikan daya reaktif antar genset saat paralel.
- Mencegah fluktuasi tegangan yang dapat merusak peralatan listrik.

Keunggulan sistem digital dibanding analog terletak pada kecepatan respon, kestabilan jangka panjang, dan kemampuan komunikasi dengan sistem kontrol utama melalui protokol digital.

2.8 Sistem Pararel dan Sinkronisasi Otomatis

Dalam sistem pararel, dua atau lebih genset dioperasikan bersama untuk memasok beban yang lebih besar. Agar sistem berjalan stabil, dibutuhkan perangkat sinkronisasi otomatis yang mengatur frequency matching, voltage matching, dan phase matching.

Sistem ini dikendalikan oleh modul kontrol otomatis seperti Woodward EasyGen atau DeepSea Synchronizing Controller, yang terintegrasi dengan governor dan AVR. Dengan teknologi ini, seluruh proses sinkronisasi dapat dilakukan secara otomatis tanpa intervensi manual

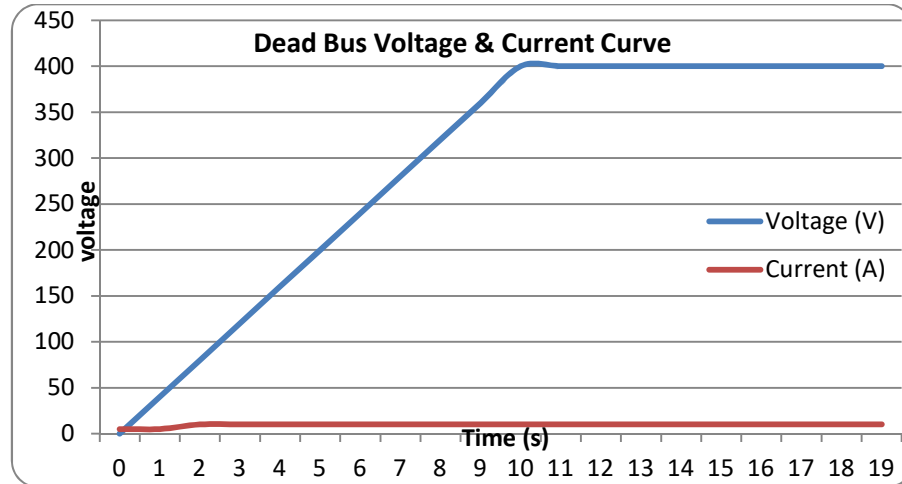
2.9 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan sistem sinkronisasi genset antara lain:

- 1) Prasetyo (2020) melakukan analisis kinerja sistem sinkronisasi otomatis menggunakan EasyGen Controller dan menemukan bahwa waktu sinkronisasi dapat dikurangi hingga 30% dibandingkan metode manual.
- 2) Rahman (2021) meneliti pengaruh penggunaan digital governor terhadap kestabilan frekuensi pada sistem genset paralel, dan hasilnya menunjukkan deviasi frekuensi berkurang hingga $\pm 0,1$ Hz.
- 3) Wijaya (2022) mengkaji penerapan dead bus synchronizing system pada instalasi industri dan membuktikan bahwa sistem ini mampu mempercepat waktu pemulihan daya listrik hingga kurang dari 10 detik setelah blackout.

Penelitian-penelitian tersebut menjadi dasar untuk pengembangan studi ini, khususnya

dalam mengoptimalkan sistem dead bus synchronizing menggunakan electronic governor dan digital AVR agar proses sinkronisasi berjalan cepat, stabil, dan efisien.



Gambar 2.1 Kurva Tegangan dan Arus pada Proses Sinkronisasi Dead Bus

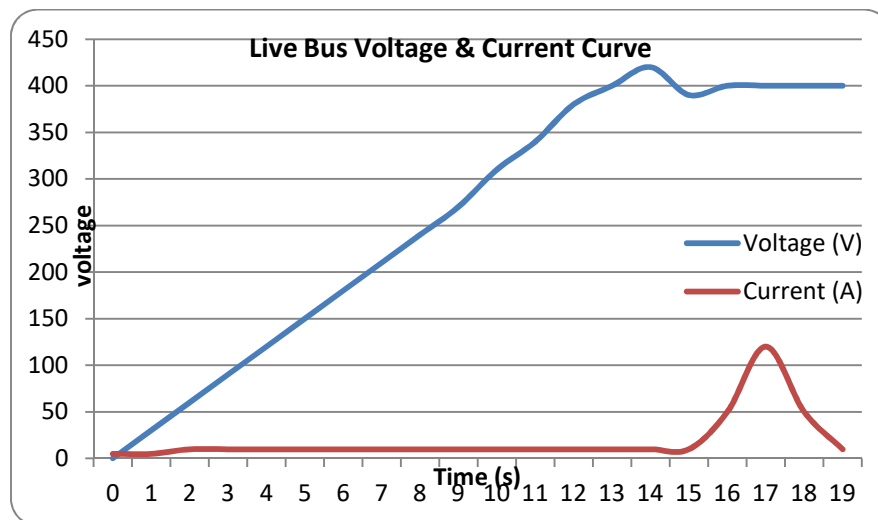
Gambar 2.1 memperlihatkan kurva tegangan (V) dan arus (A) selama proses sinkronisasi dead bus pada generator. Pada kondisi awal, busbar berada dalam keadaan tanpa tegangan, sehingga tegangan generator meningkat secara bertahap seiring dengan aktivasi sistem eksitasi setelah generator circuit breaker (GCB) ditutup sesuai metode Close Before Excitation (CBE)[17]. Kurva tegangan menunjukkan kenaikan yang linier hingga mencapai nilai nominal sekitar 400 V, kemudian stabil tanpa adanya lonjakan (overshoot) yang signifikan.

Menunjukkan konsep **CBE (Close Before Excitation)**:

- Tegangan naik bertahap (*soft voltage build-up*)
- Arus transien sangat kecil
- blackout recovery & EDG

Kurva yang ditampilkan:

- Voltage vs Time
- Current vs Time
- Tanpa inrush current saat CB close



Gambar 2.2 Kurva Tegangan dan Arus pada Proses Sinkronisasi Live Bus

Gambar 2.2 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.

Berbeda dengan sinkronisasi dead bus, kurva arus pada metode live bus menunjukkan lonjakan arus transien yang cukup signifikan pada saat penutupan GCB. Lonjakan ini mengindikasikan adanya inrush current akibat perbedaan sudut fasa dan frekuensi yang masih tersisa meskipun berada dalam batas toleransi sinkronisasi. Setelah proses sinkronisasi selesai, arus kembali menurun dan sistem mencapai kondisi stabil.

Secara keseluruhan, Gambar 2.2 memperlihatkan bahwa sinkronisasi live bus memiliki respon transien yang lebih besar dibandingkan metode dead bus, baik dari sisi fluktuasi tegangan maupun lonjakan arus. Kondisi ini menyebabkan stres elektrik pada peralatan relatif lebih tinggi dan menjelaskan mengapa metode live bus memerlukan logika kontrol yang lebih kompleks serta waktu sinkronisasi yang lebih lama.

Menunjukkan konsep **sinkronisasi ke bus aktif**:

- Tegangan bus sudah nominal
- Terjadi **inrush current** saat CB close
- Dipengaruhi sudut fasa, ΔV , dan Δf

Kurva yang ditampilkan:

- Voltage stabil
- Lonjakan arus sesaat (inrush)

Secara teori 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 kejut, dan gangguan kestabilan sistem.

A. Teori Sinkronisasi Generator

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 kejut, dan gangguan kestabilan sistem.

Syarat sinkronisasi:

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 Fasa

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

4. Urutan Fasa

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

B. Rumus Slip Frekuensi dan sudut fasa

Slip Frekuensi

$$f_{slip} = [f_g - f_b]$$

Perubahan Sudut Fasa

$$\frac{d(\Delta\varphi)}{dt} = 2\pi (f_g - f_b)$$

Rumus ini menjelaskan bahwa perbedaan frekuensi akan menyebabkan pergeseran sudut fasa secara kontinu.

C. Sinkronisasi Dead Bus (Close Before Excitation – CBE)

Pada dead bus, busbar tidak bertegangan, sehingga:

- Penyelarasan sudut fasa tidak diperlukan
- GCB ditutup sebelum eksitasi
- Tegangan dibangun setelah breaker tertutup

Secara Teoritis:

$$V_b = 0 \rightarrow \Delta\varphi \text{ tidak terdefiniskan}$$

Sehingga arus inrush minimum, karena

$$I_{inrush} = \frac{V_g - V_b}{X_s} \rightarrow \text{minimum}$$

Dengan X_s = reaktansi sinkron generator

D. Sinkronisasi Live Bus

Pada live bus, busbar sudah bertegangan sehingga seluruh parameter harus dipenuhi sebelum GCB ditutup

Arus Sinkronisasi (teoretis)

$$I_{Sync} = \frac{[V_g \angle \varphi_g - V_b \angle \varphi_b]}{X_s}$$

Semakin besar:

- ΔV
- $\Delta \omega$

E. Teori Inrush Current

Arus inrush pada sinkronisasi dipengaruhi oleh:

Dituliskan dalam rumus:

$$I_{inru} \propto \frac{\Delta v}{x_s} \text{ dan } I_{inrush} \propto \sin(\Delta \varphi)$$

F. Teori Kendali PID pada AVR

Pengendali PID pada Automatic Voltage Regulator (AVR) dirumuskan sebagai:

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

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

K_p mempercepat respon

K_i menghilangkan steady-state error

K_d meredam osilasi (hunting)

PID yang optimal akan:

- Mengurangi voltage dip
- Mempercepat recovery time
- Menjaga kestabilan saat block load

G. Kaitan dengan Standar (IEC / ISO)

Mengacu ISO 8528-5:

- Voltage dip $\leq 15\text{--}20\%$
- Frequency dip $\leq 10\%$
- Recovery time ≤ 5 s (atau marginal jika sedikit di atas)

Pengujian dan evaluasi kinerja generator set (genset) dalam penelitian ini mengacu pada standar internasional IEC dan ISO, khususnya ISO 8528-5, yang mengatur karakteristik performa genset pada kondisi operasi tunak (steady-state) dan transien. Standar ini digunakan sebagai acuan utama dalam menilai respons tegangan dan frekuensi saat terjadi perubahan beban mendadak maupun selama proses sinkronisasi.

Berdasarkan ISO 8528-5, batas toleransi yang diperkenankan untuk uji transien adalah penurunan tegangan (voltage dip) sebesar $\leq 15\text{--}20\%$, penurunan frekuensi (frequency dip) sebesar $\leq 10\%$, serta waktu pemulihan (recovery time) maksimum sekitar 5 detik, tergantung pada klasifikasi performa genset (kelas G2 atau G3). Parameter-parameter ini digunakan sebagai dasar evaluasi keberterimaan (pass, conditional pass, atau fail) hasil pengujian block load dan sinkronisasi.

Selain itu, standar IEC 60034 tentang mesin listrik berputar menjadi referensi dalam aspek keselamatan operasi generator, termasuk pembatasan arus transien, tegangan lebih, serta perlindungan terhadap stres termal dan elektromagnetik. Kepatuhan terhadap standar ini penting untuk memastikan bahwa proses sinkronisasi, baik dead bus maupun live bus, tidak menimbulkan dampak merugikan terhadap peralatan dan sistem kelistrikan yang terhubung.

Dengan mengacu pada standar IEC dan ISO tersebut, hasil penelitian ini dapat dievaluasi secara objektif dan terukur, serta memberikan jaminan bahwa kinerja genset yang diuji telah memenuhi persyaratan teknis dan keselamatan yang berlaku secara internasional.