

ANALISIS STABILITAS TRANSIEN SISTEM TENAGA 3-BUS AKIBAT GANGGUAN HUBUNG SINGKAT TIGA FASA

TRANSIENT STABILITY ANALYSIS OF A 3-BUS POWER SYSTEM DUE TO THREE-PHASE SHORT-CIRCUIT FAULT

¹Jihad Taufan Bintang*, ¹Dian Budhi Santoso, ¹Reni Rahmadewi, ²Vita Efelina

¹Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang

⁴Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Singaperbangsa Karawang

*¹jihadtopan11@gmail.com, ¹dian.budhi@staff.unsika.ac.id, ¹reni.rahmadewi@ft.unsika.ac.id, ²vita.efelina@staff.unsika.ac.id

INFO ARTIKEL

Diterima: 25 Mei 2026

Direvisi: 22 Juni 2026

Disetujui: 10 Juli 2026

Kata Kunci:

Sistem Tenaga Listrik; ETAP; Hubung Singkat Tiga Fasa; Stabilitas Transien; Waktu Pembersihan Kritis; Sudut Rotor

ABSTRAK

Stabilitas transien merupakan salah satu aspek penting dari sistem tenaga listrik untuk menjaga sinkronisasi generator setelah terjadi gangguan parah. Studi ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik stabilitas transien dari sistem tenaga listrik 3-bus di bawah gangguan hubung singkat tiga fasa di Bus 3 menggunakan Program Analisis Transien Listrik (ETAP). Metode penelitian dilakukan melalui pendekatan berbasis simulasi yang melibatkan analisis aliran beban, simulasi gangguan hubung singkat tiga fasa, analisis respons sudut rotor, analisis respons kecepatan rotor, dan perhitungan waktu pembersihan kritis (CCT) menggunakan pendekatan kriteria luas yang sama. Hasil simulasi menunjukkan bahwa arus gangguan meningkat hingga 136,78 kA dan menyebabkan tegangan di Bus 3 turun menjadi 0 kV, sementara Bus 1 dan Bus 2 mengalami penurunan tegangan yang signifikan. Respons relatif sudut daya menunjukkan osilasi divergen yang mengindikasikan hilangnya sinkronisasi, yang diperkuat oleh penyimpangan kecepatan rotor dari kecepatan sinkron 1500 rpm. Selanjutnya, nilai CCT yang dihitung adalah 0,0524 s, menunjukkan bahwa sistem proteksi harus mengatasi gangguan dalam waktu yang sangat singkat untuk menjaga stabilitas rotor. Oleh karena itu, sistem tenaga 3-bus yang diteliti memiliki margin stabilitas transien yang relatif kecil di bawah kondisi gangguan yang diterapkan.

ABSTRACT

Transient stability is one of the important aspects of electric power systems to maintain generator synchronization after severe disturbances occur. This study aims to analyze the transient stability characteristics of a 3-bus electric power system under a three-phase short-circuit fault at Bus 3 using the Electrical Transient Analyzer Program (ETAP). The research method was conducted through a simulation-based approach involving load flow analysis, three-phase short-circuit fault simulation, rotor angle response analysis, rotor speed response analysis, and critical clearing time (CCT) calculation using the equal area criterion approach. The simulation results indicate that the fault current increased up to 136.78 kA and caused the voltage at Bus 3 to drop to 0 kV, while Bus 1 and Bus 2 experienced significant voltage decreases. The power angle relative response showed divergent oscillations indicating loss of synchronism, which was reinforced by rotor speed deviations from the synchronous speed of 1500 rpm. Furthermore, the calculated CCT value was 0.0524 s, indicating that the protection system must clear the fault within a very short time to maintain rotor stability. Therefore, the studied 3-bus power system has a relatively small transient stability margin under the applied fault condition.

Keywords:

Electric Power System; ETAP; Three-Phase Short-Circuit; Transient Stability; Critical Clearing Time; Rotor Angle

*Corresponding author: jihadtopan11@gmail.com

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat menuntut sistem tenaga listrik untuk beroperasi secara andal, efisien, dan stabil pada berbagai kondisi operasi. Sistem tenaga listrik modern terdiri atas jaringan pembangkit, transmisi, dan distribusi yang saling terhubung untuk melakukan pertukaran daya listrik secara kontinu. Karena sifat interkoneksi tersebut, gangguan yang terjadi pada satu titik dapat memengaruhi kestabilan keseluruhan sistem. Oleh karena itu, menjaga kestabilan sistem tenaga listrik menjadi aspek yang sangat penting untuk menjamin kontinuitas dan keamanan penyaluran energi listrik [1].

Salah satu gangguan yang paling kritis pada sistem tenaga listrik adalah gangguan hubung singkat tiga fasa. Jenis gangguan ini dianggap sebagai salah satu kondisi operasi paling berat karena menghasilkan arus gangguan yang sangat besar, penurunan tegangan yang signifikan, serta perubahan kondisi operasi generator sinkron secara mendadak. Gangguan yang berat dapat mengganggu keseimbangan antara daya mekanik masukan dan daya listrik keluaran generator sehingga menyebabkan ketidakstabilan dinamika rotor dan sinkronisasi sistem [2].

Stabilitas transien merupakan kemampuan sistem tenaga listrik untuk mempertahankan sinkronisasi segera setelah mengalami gangguan besar, seperti gangguan saluran transmisi, pelepasan generator secara tiba-tiba, maupun kejadian hubung singkat. Pada kondisi transien, generator sinkron mengalami osilasi sudut rotor akibat ketidakseimbangan torsi elektromagnetik secara mendadak. Apabila gangguan tidak dihilangkan dalam waktu yang dapat diterima, generator dapat kehilangan sinkronisasi yang berpotensi menyebabkan kegagalan berantai (cascading failure) dan pemadaman sistem dalam skala besar [3].

Beberapa penelitian telah mengkaji perilaku dinamis generator sinkron selama gangguan transien menggunakan pendekatan berbasis simulasi. Penelitian menunjukkan bahwa respons sudut rotor memiliki peran penting dalam menentukan kemampuan sistem mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar. Selain itu, konstanta inersia generator dan waktu pemutusan gangguan juga menjadi parameter penting dalam mempertahankan stabilitas transien sistem tenaga listrik [4]. Penelitian berbasis Electrical Transient Analyzer Program (ETAP) telah digunakan untuk mengevaluasi karakteristik stabilitas transien sistem tenaga listrik pada berbagai kondisi gangguan [5]. Kajian lain juga menunjukkan bahwa pendekatan simulasi dapat digunakan untuk mengevaluasi respons dinamis generator sinkron selama kondisi transien secara lebih efektif [6].

Namun, penelitian yang berfokus pada karakteristik stabilitas transien serta analisis Critical Clearing Time (CCT) pada sistem tenaga listrik sederhana 3-bus akibat gangguan hubung singkat tiga fasa menggunakan simulasi ETAP masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik stabilitas transien pada sistem tenaga listrik 3-bus akibat gangguan hubung singkat tiga fasa menggunakan perangkat lunak ETAP dan perhitungan analitis berbasis metode Equal Area Criterion. Analisis difokuskan pada respons sudut rotor,

karakteristik kecepatan rotor, perilaku sinkronisasi pascagangguan, serta nilai Critical Clearing Time (CCT). Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai perilaku stabilitas transien serta mendukung pengembangan strategi proteksi yang lebih andal pada sistem tenaga listrik interkoneksi.

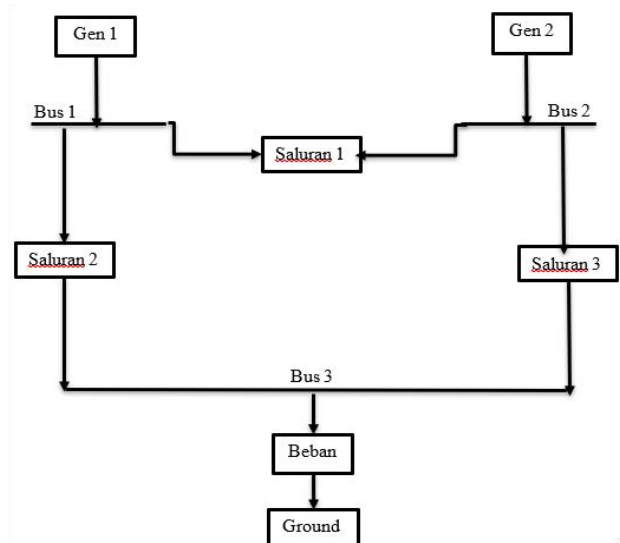
II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen berbasis simulasi untuk mengevaluasi karakteristik stabilitas transien pada sistem tenaga listrik 3-bus akibat gangguan hubung singkat tiga fasa. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak *Electrical Transient Analyzer Program* (ETAP) untuk mensimulasikan perilaku sistem selama gangguan transien dan mengamati respons dinamis generator sinkron [7].

Sistem yang diteliti terdiri atas dua generator sinkron, tiga bus transmisi dengan tegangan operasi 230 kV, serta beban sebesar 98,489 MVA yang terhubung pada Bus 3. Gangguan hubung singkat tiga fasa diterapkan pada Bus 3 pada $t = 1,0$ s untuk mengevaluasi karakteristik stabilitas sistem pada kondisi gangguan berat.

A. Konfigurasi Sistem

Sistem tenaga listrik yang diteliti terdiri atas tiga bus yang saling terhubung, dua generator sinkron, dan satu pusat beban. Bus 1 berfungsi sebagai swing bus yang terhubung dengan Generator 1, Bus 2 sebagai PV bus yang terhubung dengan Generator 2, sedangkan Bus 3 berfungsi sebagai PQ bus yang terhubung dengan beban sistem [8]. Seluruh sistem beroperasi pada tegangan nominal 230 kV dengan basis daya 100 MVA. Konfigurasi sistem tenaga listrik 3-bus yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

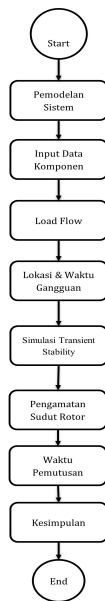


Gambar 1 Diagram satu garis sistem tenaga listrik 3-bus

B. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian meliputi pemodelan sistem, penginputan parameter komponen, analisis load flow, simulasi gangguan, evaluasi stabilitas transien, pengamatan

respons sudut rotor, serta analisis *Critical Clearing Time* (CCT). Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian stabilitas transien

C. Pemodelan dan Skenario Simulasi

Sebelum analisis transien dilakukan, studi *load flow* digunakan untuk menentukan kondisi operasi awal (*steady-state*) sistem. Analisis ini bertujuan memperoleh profil tegangan pada setiap bus, aliran daya pada saluran transmisi, serta pembagian daya antar generator sebagai kondisi awal sebelum simulasi gangguan diterapkan [9].

Tabel I menunjukkan parameter bus dan pembebanan sistem tenaga listrik 3-bus yang digunakan dalam pemodelan ETAP. Sistem terdiri atas *swing bus*, *PV bus*, dan *PQ bus* untuk merepresentasikan karakteristik operasi sistem tenaga listrik secara umum.

TABEL I
PARAMETER BUS DAN BEBAN SISTEM

BUS	JENIS BUS	TEGANGAN NOMINAL	KETERANGAN
BUS 1	<i>SLACK</i>	230 kV	TERHUBUNG KE GENERATOR 1 (100 MW)
BUS 2	<i>PV</i>	230 kV	TERHUBUNG KE GENERATOR 2 (50 MW)
BUS 3	<i>PQ</i>	230 kV	TERHUBUNG KE BEBAN 98,489 MVA

Karakteristik generator sinkron yang digunakan pada simulasi ditunjukkan pada Tabel II. Parameter generator meliputi daya terpasang, tegangan nominal, reaktansi sinkron, reaktansi transien, dan konstanta inersia yang memengaruhi respons rotor selama kondisi transien.

TABEL II
PARAMETER GENERATOR SISTEM

PARAMETER	GENERATOR 1	GENERATOR 2
DAYA TERPASANG	100 MVA	50 MVA
TEGANGAN NOMINAL	230 kV	230 kV
X_d	0,10 PU	0,10 PU
X_q	0,20 PU	0,25 PU
X'_d	0,05 PU	0,05 PU
X'_q	0,10 PU	0,15 PU
KONSTANTA INERSIA (H)	5 s	4 s

Tabel III menunjukkan parameter saluran transmisi yang digunakan pada sistem tenaga listrik 3-bus. Seluruh saluran dimodelkan menggunakan parameter resistansi (R), reaktansi (X), dan admitansi (Y) dalam satuan *per-unit* (pu).

TABEL III
PARAMETER SALURAN TRANSMISI

SALURAN	KONEKSI BUS	R (PU)	X (PU)	Y (PU)
SALURAN 1	BUS 1 – BUS 2	0,02	0,06	0,03
SALURAN 2	BUS 2 – BUS 3	0,06	0,18	0,09
SALURAN 3	BUS 1 – BUS 3	0,08	0,24	0,12

Gangguan hubung singkat tiga fasa diterapkan pada Bus 3 pada $t = 1,0$ s untuk mengevaluasi respons sistem pada kondisi gangguan berat. Kondisi ini dipilih karena gangguan tiga fasa merupakan salah satu jenis gangguan paling kritis pada sistem tenaga listrik akibat besarnya arus gangguan dan penurunan tegangan yang signifikan [10].

Respons dinamis rotor generator sinkron selama kondisi transien dianalisis menggunakan persamaan *swing* sebagai berikut:

$$\ddot{\delta} = \left(\frac{\omega_0}{2H} \right) (P_m - P_e) \quad (1)$$

Transfer daya listrik antara generator dan bus pada kondisi transien ditentukan menggunakan hubungan power-angle sebagai berikut:

$$P_e = \left(\frac{E'V}{X_{eq}} \right) \sin \delta \quad (2)$$

Konstanta inersia ekuivalen sistem dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$H_{eq} = \frac{H_1 S_1 + H_2 S_2}{S_{total}} \quad (3)$$

Nilai *Critical Clearing Time* (CCT), yang menunjukkan batas maksimum waktu pemutusan gangguan sebelum sistem kehilangan sinkronisasi, dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$t_{crit} = \sqrt{\frac{2\Delta\delta}{\ddot{\delta}}} \quad (4)$$

Parameter hasil simulasi berupa respons sudut rotor, perubahan kecepatan rotor, arus gangguan, profil tegangan, dan nilai *Critical Clearing Time* (CCT) digunakan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mempertahankan sinkronisasi setelah gangguan dihilangkan [11]

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kondisi Awal Sistem Berdasarkan Load Flow

Analisis load flow dilakukan untuk memperoleh kondisi operasi awal (steady-state) sistem sebelum diterapkan gangguan hubung singkat tiga fasa. Proses iterasi dilakukan hingga mencapai kondisi konvergen untuk mengetahui profil tegangan pada setiap bus, distribusi daya, serta karakteristik aliran daya pada sistem tenaga listrik 3-bus.

Tabel IV menunjukkan hasil analisis load flow berupa magnitudo dan sudut tegangan pada masing-masing bus setelah sistem mencapai kondisi konvergen.

TABEL IV
HASIL ANALISIS LOAD FLOW

BUS	JENIS BUS	MAGNITUDO TEGANGAN (PU)	SUDUT TEGANGAN (°)
BUS 1	SLACK	1,000000	0,00000
BUS 2	PV	0,993659	-0,33687
BUS 3	PQ	0,914844	-5,17304

Berdasarkan Tabel IV, Bus 1 memiliki profil tegangan sebesar 1,000 pu dengan sudut 0° karena berfungsi sebagai slack bus yang menjaga kestabilan tegangan sistem. Bus 2 menunjukkan tegangan sebesar 0,993659 pu dengan sudut -0,33687° akibat beroperasi sebagai PV bus yang mempertahankan tegangan konstan selama proses penyaluran daya aktif.

Sementara itu, Bus 3 mengalami penurunan tegangan menjadi 0,914844 pu dengan sudut -5,17304° karena berfungsi sebagai PQ bus yang menerima pembebanan sebesar 90 MW + j40 Mvar. Penurunan tegangan pada Bus 3 menunjukkan pengaruh pembebanan terhadap profil tegangan sistem sebelum kondisi gangguan diterapkan.

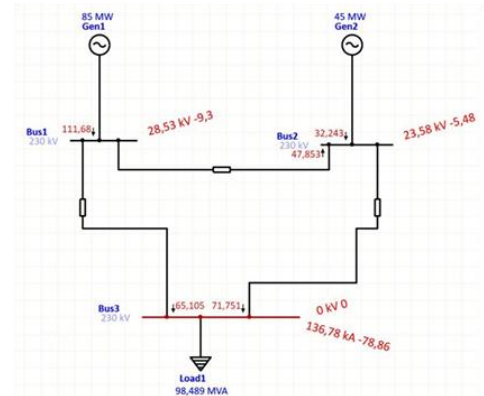
Kondisi operasi awal hasil load flow ini digunakan sebagai acuan sebelum dilakukan simulasi gangguan hubung singkat tiga fasa pada Bus 3 untuk mengevaluasi karakteristik stabilitas transien sistem.

B. Respons Sistem terhadap Gangguan Hubung Singkat Tiga Fasa

1. Kondisi Sistem Saat Gangguan

Simulasi gangguan hubung singkat tiga fasa diterapkan pada Bus 3 pada waktu $t = 1,0$ s untuk

mengevaluasi respons sistem tenaga listrik terhadap kondisi gangguan berat. Gangguan tiga fasa dipilih karena merupakan salah satu kondisi paling kritis dalam sistem tenaga listrik akibat menghasilkan arus gangguan yang sangat besar serta menyebabkan penurunan tegangan secara signifikan.



Gambar 3. Kondisi sistem saat gangguan hubung singkat tiga fasa pada Bus 3

Berdasarkan Gambar 3, saat gangguan tiga fasa terjadi pada Bus 3, sistem mengalami perubahan operasi secara drastis yang ditandai dengan meningkatnya arus gangguan hingga mencapai 136,78 kA. Besarnya arus ini terjadi akibat terbentuknya jalur impedansi sangat rendah menuju titik gangguan sehingga kedua generator memberikan kontribusi arus yang besar ke lokasi fault. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa Bus 3 merupakan titik paling kritis pada sistem karena menjadi pusat akumulasi energi listrik sesaat selama gangguan berlangsung.

Gangguan juga menyebabkan tegangan pada Bus 3 turun hingga mencapai 0 kV yang mengindikasikan terjadinya kolaps tegangan (*voltage collapse*) pada lokasi gangguan. Selain itu, tegangan pada Bus 1 dan Bus 2 ikut mengalami penurunan signifikan menjadi masing-masing sekitar 111,68 kV dan 32,24 kV. Penurunan tegangan pada kedua bus menunjukkan bahwa efek gangguan tidak hanya bersifat lokal pada titik fault, tetapi juga menyebar ke seluruh jaringan akibat perubahan distribusi aliran daya dan peningkatan arus sistem.

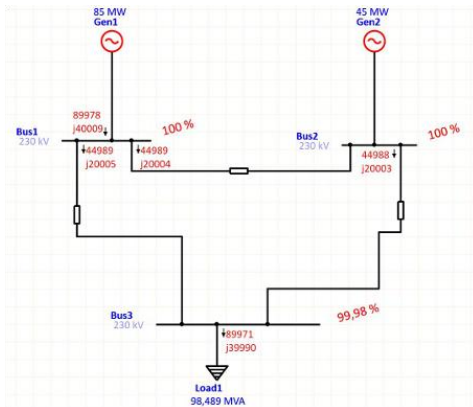
Dari perspektif stabilitas transien, kondisi ini menyebabkan daya listrik keluaran generator (*electrical power output*) mengalami penurunan secara tiba-tiba, sementara daya mekanik masukan dari turbin relatif tetap. Ketidakseimbangan antara daya mekanik dan daya listrik tersebut menghasilkan percepatan rotor generator yang ditunjukkan oleh peningkatan sudut rotor selama periode gangguan. Apabila gangguan berlangsung terlalu lama, energi percepatan rotor dapat meningkat secara berlebihan sehingga menyebabkan generator kehilangan sinkronisasi (*loss of synchronism*).

Dengan demikian, hasil simulasi menunjukkan bahwa gangguan tiga fasa pada Bus 3 memberikan pengaruh signifikan terhadap kestabilan sistem tenaga listrik. Besarnya arus gangguan dan kolaps tegangan yang terjadi menjadi indikator bahwa sistem membutuhkan waktu

pemutusan gangguan yang cepat agar kestabilan transien tetap dapat dipertahankan.

2. Kondisi Sistem Pascagangguan

Setelah gangguan hubung singkat tiga fasa pada Bus 3 berhasil dihilangkan, sistem tenaga listrik mulai mengalami proses pemulihan menuju kondisi operasi normal. Pemutusan gangguan menyebabkan jalur impedansi rendah yang sebelumnya terbentuk pada titik fault terisolasi sehingga aliran daya kembali tersalurkan ke sistem.



Gambar 4. Kondisi sistem setelah gangguan hubung singkat berhasil dihilangkan

Berdasarkan Gambar 4, sistem menunjukkan proses pemulihan yang ditandai dengan kembalinya profil tegangan mendekati kondisi nominal sebesar 100% pada Bus 1 dan Bus 2, serta sekitar 99,98% pada Bus 3. Hal ini menunjukkan bahwa setelah gangguan dibersihkan, sistem kembali mampu mempertahankan kestabilan tegangan dan melanjutkan proses penyaluran daya menuju pusat beban.

Dari sisi distribusi daya, Generator 1 dan Generator 2 tetap menyuplai daya masing-masing sebesar 85 MW dan 45 MW ke sistem. Nilai aliran daya pada jaringan juga menunjukkan kestabilan pascagangguan, dengan daya pada Bus 1 sebesar $89,978 + j40,009$, Bus 2 sebesar $44,988 + j20,003$, dan Bus 3 sebesar $89,971 + j39,990$. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem kembali mendekati kondisi operasi normal setelah pemutusan gangguan dilakukan.

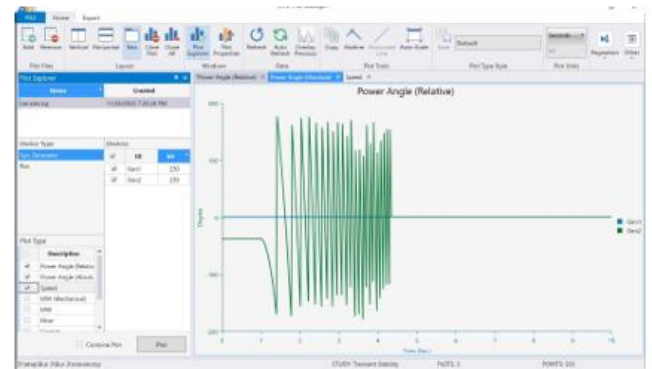
Meskipun profil tegangan dan distribusi daya menunjukkan proses pemulihan, kestabilan transien sistem belum dapat disimpulkan hanya berdasarkan kondisi pascagangguan. Evaluasi terhadap respons sudut rotor tetap diperlukan untuk menentukan apakah generator masih mampu mempertahankan sinkronisasi setelah mengalami gangguan besar. Oleh karena itu, analisis dilanjutkan pada respons sudut rotor generator selama kondisi transien.

C. Respons Sudut Rotor

1. Power Angle Relative

Respons sudut rotor relatif digunakan untuk mengevaluasi kemampuan generator sinkron dalam mempertahankan sinkronisasi selama dan setelah gangguan hubung singkat tiga fasa terjadi. Perubahan sudut rotor mencerminkan keseimbangan antara daya mekanik

masuk dan daya listrik keluaran generator selama kondisi transien.



Gambar 5. Respons sudut rotor relatif generator selama kondisi transien

Berdasarkan Gambar 5, sebelum gangguan diterapkan ($t < 1,0$ s), sudut rotor kedua generator berada pada kondisi relatif stabil dan konstan, yang menunjukkan bahwa sistem beroperasi dalam keadaan sinkron. Kondisi ini mengindikasikan adanya keseimbangan antara daya mekanik masukan dan daya listrik keluaran generator sehingga tidak terjadi perubahan sudut rotor yang signifikan.

Ketika gangguan hubung singkat tiga fasa diterapkan pada Bus 3, sudut rotor mengalami perubahan secara signifikan. Salah satu generator menunjukkan deviasi sudut ke arah negatif, sedangkan generator lainnya mengalami peningkatan sudut ke arah positif. Kondisi ini menunjukkan terjadinya ketidakseimbangan daya akibat penurunan torsi elektromagnetik generator selama gangguan berlangsung. Penurunan impedansi sistem secara tiba-tiba menyebabkan daya listrik keluaran generator menurun, sementara daya mekanik masukan tetap relatif konstan sehingga rotor mengalami percepatan.

Setelah gangguan dihilangkan, respons sudut rotor tidak kembali menuju titik keseimbangan, melainkan menunjukkan pola osilasi besar dengan amplitudo yang semakin meningkat hingga mendekati $\pm 180^\circ$. Pola osilasi yang tidak mereda (*divergent oscillation*) mengindikasikan bahwa sistem kehilangan kemampuan sinkronisasi antar generator. Fenomena ini menunjukkan bahwa sistem tidak mampu mempertahankan kestabilan transien setelah mengalami gangguan besar pada Bus 3.

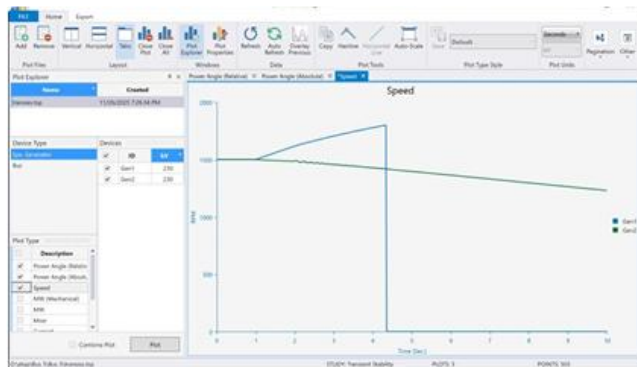
Selain itu, pola osilasi yang terus membesar menunjukkan bahwa waktu pemutusan gangguan (*critical clearing time*) yang diterapkan pada simulasi melebihi batas kestabilan sistem. Akibatnya, energi percepatan rotor meningkat secara berlebihan sehingga sudut rotor gagal kembali menuju kondisi sinkron. Dengan demikian, hasil simulasi *power angle relative* menunjukkan bahwa sistem mengalami kondisi *loss of synchronism* setelah gangguan diterapkan, sehingga diperlukan evaluasi lebih lanjut terhadap respons kecepatan rotor untuk memperkuat indikasi ketidakstabilan transien sistem.

Hasil ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa gangguan besar pada sistem tenaga listrik menyebabkan perubahan sudut rotor yang signifikan akibat ketidakseimbangan daya mekanik dan daya listrik generator. Penelitian oleh Murad dkk. [7] menjelaskan

bahwa respons sudut rotor menjadi indikator utama dalam menentukan kemampuan sistem mempertahankan sinkronisasi selama kondisi transien. Selain itu, hasil penelitian Gautam [6] menggunakan simulasi ETAP juga menunjukkan bahwa waktu pemutusan gangguan yang melebihi batas kestabilan dapat menyebabkan generator mengalami kehilangan sinkronisasi (*loss of synchronism*).

D. Respons Kecepatan Rotor

Respons kecepatan rotor digunakan untuk mengevaluasi perubahan kecepatan putar generator sinkron selama dan setelah terjadinya gangguan hubung singkat tiga fasa. Parameter ini menjadi indikator penting dalam menentukan kemampuan sistem mempertahankan sinkronisasi rotor pada kondisi transien



Gambar 6. Respons kecepatan rotor generator selama kondisi transien

Berdasarkan Gambar 6, sebelum gangguan diterapkan ($t < 1,0$ s), kedua generator menunjukkan kecepatan rotor yang relatif stabil pada kisaran 1500 rpm, yang menunjukkan bahwa sistem berada pada kondisi sinkron dan bekerja pada frekuensi nominal 50 Hz.

Ketika gangguan hubung singkat tiga fasa diterapkan pada Bus 3, respons kecepatan rotor kedua generator mulai mengalami penyimpangan yang signifikan. Generator 1 mengalami peningkatan kecepatan rotor hingga mendekati 1800 rpm, sedangkan Generator 2 menunjukkan penurunan kecepatan hingga mendekati 1200 rpm. Perbedaan respons ini menunjukkan terjadinya ketidakseimbangan torsi elektromagnetik pada masing-masing generator akibat perubahan distribusi daya selama gangguan berlangsung.

Perubahan kecepatan rotor yang semakin menjauh dari kondisi nominal menunjukkan bahwa kedua generator tidak mampu kembali menuju kecepatan sinkron setelah gangguan dihilangkan. Pola divergensi kecepatan rotor mengindikasikan bahwa sistem kehilangan kemampuan menjaga kestabilan dinamis antar generator. Kondisi ini memperkuat hasil analisis *power angle relative* sebelumnya yang menunjukkan terjadinya *loss of synchronism* pada sistem tenaga listrik 3-bus.

Selain itu, perbedaan kecepatan rotor antar generator menyebabkan sudut rotor relatif terus meningkat sehingga osilasi sistem tidak mengalami redaman (*undamped oscillation*). Dengan demikian, hasil respons kecepatan rotor menunjukkan bahwa sistem mengalami ketidakstabilan transien akibat waktu pemutusan gangguan yang melebihi batas kestabilan sistem.

E. Critical Clearing Time

Critical clearing time (CCT) merupakan waktu maksimum yang diperbolehkan bagi sistem proteksi untuk memutuskan gangguan sebelum sistem kehilangan sinkronisasi rotor. Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi batas kestabilan transien sistem tenaga listrik setelah mengalami gangguan hubung singkat tiga fasa.

Nilai CCT diperoleh menggunakan pendekatan *equal area criterion* berdasarkan hasil perhitungan parameter sistem, meliputi sudut awal rotor, sudut maksimum rotor, sudut kritis rotor, dan konstanta inersia ekuivalen sistem. Tabel V menunjukkan hasil perhitungan parameter utama dalam penentuan nilai *critical clearing time*.

TABEL V
HASIL PERHITUNGAN PARAMETER CCT

PARAMETER	NILAI
SUDUT AWAL ROTOR	9,39°
SUDUT MAKSIMUM ROTOR	12,96°
SUDUT KRITIS ROTOR	10,83°
KONSTANTA INERSIA EKUIVALEN	4,667 s
CRITICAL CLEARING TIME (CCT)	0,0524 s

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh sudut awal rotor sebesar 9,39° sebagai kondisi operasi awal sistem sebelum gangguan diterapkan. Setelah terjadi perubahan konfigurasi sistem akibat gangguan, sudut maksimum rotor meningkat menjadi 12,96°, sedangkan sudut kritis rotor diperoleh sebesar 10,83°. Nilai tersebut menunjukkan batas maksimum penyimpangan sudut rotor yang masih memungkinkan generator kembali menuju kondisi sinkron.

Selain itu, konstanta inersia ekuivalen sistem diperoleh sebesar 4,667 s yang menunjukkan kemampuan gabungan generator dalam meredam perubahan dinamis selama kondisi transien. Berdasarkan hasil substitusi pada Persamaan (4), diperoleh nilai *critical clearing time* sebesar 0,0524 s atau sekitar 52,4 ms. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem proteksi harus mampu memutuskan gangguan dalam waktu kurang dari 52,4 ms agar kestabilan rotor tetap dapat dipertahankan.

Hasil ini konsisten dengan analisis *power angle relative* dan respons kecepatan rotor sebelumnya yang menunjukkan pola osilasi divergen serta penyimpangan kecepatan rotor dari kondisi sinkron. Dengan demikian, sistem tenaga listrik 3-bus pada skenario gangguan tiga fasa di Bus 3 memiliki margin kestabilan transien yang relatif kecil sehingga membutuhkan sistem proteksi dengan waktu operasi cepat untuk mencegah terjadinya *loss of synchronism*.

F. Implikasi Hasil Penelitian terhadap Sistem Proteksi

Hasil analisis stabilitas transien menunjukkan bahwa sistem tenaga listrik 3-bus memiliki sensitivitas tinggi terhadap gangguan hubung singkat tiga fasa pada Bus 3. Nilai *critical clearing time* (CCT) sebesar 0,0524 s menunjukkan bahwa sistem proteksi harus mampu mendeteksi dan memutuskan gangguan dalam waktu yang sangat singkat agar generator tetap mempertahankan sinkronisasi rotor. Apabila waktu pemutusan melebihi batas tersebut, sistem berpotensi mengalami *loss of synchronism* yang ditandai oleh osilasi sudut rotor yang

tidak mereda dan penyimpangan kecepatan rotor dari kondisi sinkron.

Dalam implementasi sistem tenaga listrik nyata, hasil ini menunjukkan pentingnya koordinasi perangkat proteksi seperti *circuit breaker*, rele arus lebih (*overcurrent relay*), dan rele jarak (*distance relay*) untuk memastikan gangguan dapat diisolasi sebelum melampaui batas kestabilan transien sistem. Kecepatan operasi rele proteksi menjadi parameter penting karena keterlambatan pemutusan dapat meningkatkan energi percepatan rotor dan menyebabkan gangguan menyebar ke bagian sistem lain.

Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem dengan margin stabilitas transien kecil membutuhkan strategi penguatan sistem, seperti peningkatan kapasitas inersia generator, penerapan *fast fault clearing*, maupun penggunaan sistem kendali tambahan untuk membantu mempertahankan kestabilan rotor selama gangguan besar. Dengan demikian, evaluasi nilai *critical clearing time* tidak hanya penting untuk analisis stabilitas, tetapi juga menjadi dasar dalam perancangan koordinasi sistem proteksi tenaga listrik yang andal.

G. Evaluasi Kestabilan Sistem Berdasarkan Respons Dinamis Generator

Evaluasi kestabilan sistem tenaga listrik tidak hanya ditentukan oleh profil tegangan pascagangguan, tetapi juga dipengaruhi oleh kemampuan generator mempertahankan keselarasan sudut rotor dan kecepatan sinkron selama kondisi transien. Berdasarkan hasil simulasi ETAP, sistem menunjukkan bahwa meskipun profil tegangan pada seluruh bus kembali mendekati kondisi nominal setelah gangguan dibersihkan, respons dinamis generator memperlihatkan indikasi ketidakstabilan transien yang cukup signifikan.

Hal ini ditunjukkan oleh respons *power angle relative* yang mengalami osilasi dengan amplitudo semakin besar (*divergent oscillation*) serta respons kecepatan rotor yang tidak kembali menuju nilai sinkron sebesar 1500 rpm. Generator 1 mengalami percepatan rotor, sedangkan Generator 2 mengalami perlambatan setelah gangguan berlangsung. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa keseimbangan daya mekanik dan daya elektromagnetik tidak berhasil dipulihkan secara optimal setelah proses *fault clearing* dilakukan.

Secara teoritis, sistem tenaga listrik dinyatakan stabil secara transien apabila sudut rotor generator mampu kembali menuju titik keseimbangan baru setelah mengalami gangguan besar. Namun pada penelitian ini, respons rotor menunjukkan kecenderungan divergen sehingga sistem tidak mampu mencapai kondisi sinkron kembali. Dengan demikian, meskipun tegangan sistem terlihat pulih pada kondisi pascagangguan, hasil evaluasi dinamis membuktikan bahwa kestabilan rotor tetap menjadi parameter utama dalam menentukan keamanan operasi sistem tenaga listrik.

Hasil evaluasi ini memperlihatkan bahwa analisis stabilitas transien memerlukan kombinasi pengamatan terhadap profil tegangan, respons sudut rotor, respons kecepatan rotor, serta nilai *critical clearing time* secara terpadu. Oleh karena itu, koordinasi sistem proteksi dengan

waktu operasi cepat menjadi kebutuhan utama agar gangguan dapat diatasi sebelum menyebabkan hilangnya sinkronisasi generator.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis stabilitas transien sistem tenaga listrik 3-bus akibat gangguan hubung singkat tiga fasa pada Bus 3 menggunakan perangkat lunak *Electrical Transient Analyzer Program* (ETAP), dapat disimpulkan bahwa gangguan tiga fasa memberikan pengaruh signifikan terhadap kestabilan sistem tenaga listrik. Selama gangguan berlangsung, arus gangguan meningkat hingga mencapai 136,78 kA dan menyebabkan tegangan pada Bus 3 turun hingga 0 kV, sedangkan Bus 1 dan Bus 2 mengalami penurunan tegangan yang signifikan. Kondisi ini menunjukkan bahwa gangguan tiga fasa merupakan salah satu jenis gangguan paling kritis karena menghasilkan perubahan operasi sistem secara drastis.

Hasil analisis *power angle relative* menunjukkan bahwa sudut rotor mengalami osilasi besar dengan amplitudo yang terus meningkat (*divergent oscillation*) sehingga mengindikasikan terjadinya *loss of synchronism* antar generator setelah gangguan diterapkan. Hal tersebut diperkuat oleh respons kecepatan rotor yang menunjukkan penyimpangan signifikan dari kecepatan sinkron 1500 rpm, di mana Generator 1 mengalami percepatan hingga mendekati 1800 rpm dan Generator 2 mengalami perlambatan hingga mendekati 1200 rpm. Selain itu, hasil perhitungan *critical clearing time* (CCT) menunjukkan nilai sebesar 0,0524 s atau sekitar 52,4 ms, yang menunjukkan bahwa sistem proteksi harus mampu memutus gangguan dalam waktu yang sangat singkat agar kestabilan rotor tetap dapat dipertahankan.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena simulasi hanya dilakukan pada satu skenario gangguan hubung singkat tiga fasa di Bus 3 dengan konfigurasi sistem tenaga 3-bus sederhana. Selain itu, pengaruh variasi lokasi gangguan, waktu pemutusan, jenis gangguan lain, serta pengaruh sistem proteksi belum dianalisis secara mendalam. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan simulasi pada sistem tenaga yang lebih kompleks dengan mempertimbangkan berbagai jenis gangguan, koordinasi proteksi, dan penerapan metode pengendalian kestabilan untuk memperoleh analisis stabilitas transien yang lebih komprehensif.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Singaperbangsa Karawang atas dukungan akademik selama pelaksanaan penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, masukan, dan dukungan selama proses penelitian hingga penyusunan artikel ini.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] A. M. Saleh, V. István, M. A. Khan, M. Waseem, and A. N. A. Ahmed, "Power system stability in the era of energy transition: Importance, opportunities, challenges, and future directions," *Energy and Climate Management*, 2024, doi: 10.1016/j.ecmx.2024.100820.
- [2] Prabha S. Kundur and Om P. Malik, "Power_System_Stability_and_Control_Secon," Jun. 2022, Accessed: Jun. 03, 2026. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=WrqeEAAAQBAJ>
- [3] P. M. Anderson, A. A. Fouad, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, "Power System Control and Stability," 2023, Accessed: Jun. 03, 2026. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=8-xSAAAAMAAJ>
- [4] X. Wang, J. Liu, and Y. Chen, "Effect of fault clearing time on transient stability of interconnected power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 39, no. 1, pp. 511–520, 2024.
- [5] N. Gautam, "Transient Stability Analysis of Power System Using ETAP," vol. 5, Jun. 2023, Accessed: Jun. 03, 2026. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/384679856_Transient_Stability_Analysis_of_Power_System_Using_ETAP
- [6] N. S. F. M. Murad, M. N. Kamarudin, S. M. Rozali, and M. I. Zakaria, "Power system stability and control: a comprehensive review focusing on the rotor angle case," *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 13, no. 6, pp. 3897–3909, Dec. 2024, doi: 10.11591/eei.v13i6.8054.
- [7] M. Awais, W. Irfan, N. Zareen, and I. Ahmed, "Transient Stability Analysis of an HPR-1000 Power Plant using ETAP Software."
- [8] D. DISTRIBUSI JURUSAN TEKNIK ELEKTRO Yaman, T. Hasanuddin, R. Tri Fahlevi, J. Teknik Elektro, and P. Negeri Lhokseumawe, "PENGUJIAN DAYA BALIK PADA SINKRONISASI GENERATOR DENGAN SUMBER DAYA SANGAT BESAR (INFINITE BUS) SECARA OTOMATIS MENGGUNAKAN MULTIFUNCTION RELAY TIPE GCP-30 DI LABORATORIUM SISTEM PROTEKSI," 2022.
- [9] R. Isfihana, H. Suyono, and R. N. Hasanah, "EVALUASI KEANDALAN SISTEM DISTRIBUSI DENGAN CONSTRAINT STABILITAS SISTEM AKIBAT INJEKSI HYBRID DISTRIBUTED GENERATION," *Transmisi*, vol. 24, no. 1, pp. 1–8, Feb. 2022, doi: 10.14710/transmisi.24.1.1-8.
- [10] S. Lekhchine, T. Bahi, and I. Abadlia, "Dynamic response evaluation of synchronous generators under transient disturbances," vol. 11, no. 1, pp. 45–53, 2022.
- [11] T. P. Sari, R. Astungkara, A. Priyadi, and V. Lystianingrum, "Pengaruh Penambahan SCES terhadap Critical Clearing Time dengan Metode Critical Trajectory".