

Komparasi Nilai *Critical Clearing Time* Dengan *Time Domain Simulation* Pada Jaringan IEEE 9 Bus

Hasbi Dicky Baihaqi

Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya
*baihaqihabidicky@gmail.com

Abstrak—Kestabilan sudut rotor pada sistem tenaga listrik perlu diperhatikan agar sistem tetap sinkron setelah terjadi gangguan. Gangguan harus dihilangkan seminimnya sampai pada batas pemutusan waktu kritis atau *critical clearing time* (CCT). Ketika waktu pemutusan melebihi CCT, mengakibatkan sistem mengalami ketidakstabilan yang dapat memperburuk kondisi sistem. Pada penelitian ini akan menggunakan model jaringan IEEE 9 bus untuk mencari nilai CCT dengan gangguan di tengah saluran 3 dan 5 dengan metode *time domain simulation* (TDS). CCT terlebih dahulu didapatkan melalui perhitungan, kemudian sebagai komparasi, dilakukan simulasi ETAP dengan analisis transien dan simulasi melalui Matlab. Hasil menunjukkan nilai CCT pada gangguan di tengah saluran 3 dari hasil perhitungan yaitu 1,25 detik, simulasi ETAP 1,23 detik dan Matlab sebesar 1,186 detik. Pada gangguan di tengah saluran 5, nilai CCT secara perhitungan yaitu 1,248 detik, simulasi ETAP 1,29 detik, dan Matlab sebesar 1,3 detik. Dari hasil ini, nilai CCT hasil perhitungan mirip dengan simulasi pada ETAP. Sedangkan nilai CCT melalui simulasi ETAP dan Matlab hanya berbeda 0,044 detik pada saluran 3 dan 0,01 detik pada saluran 5. Perbaikan nilai CCT diterapkan dengan pengaturan *governor* melalui variasi nilai *droop*. Hasil menunjukkan nilai CCT pada gangguan di tengah saluran 3 menjadi 1,263 atau meningkat 0,033 detik dan gangguan di tengah saluran 5 menjadi 1,319 detik atau meningkat 0,029 detik.

Kata Kunci—*Critical Clearing Time*, IEEE 9 Bus, Kestabilan Sudut Rotor, Komparasi CCT, *Time Domain Simulation*

DOI: 10.22441/jte.2026.v17i3.001

I. PENDAHULUAN

Kestabilan sistem tenaga listrik dapat diartikan sebagai kemampuan sebuah sistem dalam menjaga performanya (kembali ke keadaan stabil) setelah terjadinya gangguan. Secara umum kestabilan sistem tenaga listrik terbagi menjadi 3 yaitu kestabilan sudut rotor, kestabilan frekuensi, dan kestabilan tegangan.

Kestabilan sudut rotor berkaitan dengan kemampuan mempertahankan sinkronisasi ketika adanya gangguan serta berkaitan dengan isolasi elektromagnetis. Beberapa generator yang terhubung dalam sistem kelistrikan diharapkan selalu dalam keadaan sinkron yang ditandai memiliki sudut daya yang tidak lebih dari 180°. Apabila suatu sistem tenaga listrik memiliki sudut daya melebihi 180°, fenomena yang terjadi adalah hilangnya sinkronisasi yang membuat sistem menjadi tidak stabil.

Kestabilan transien merupakan bagian dari kestabilan sudut rotor, yang mana pada kestabilan ini menjaga sistem untuk tetap sinkron terhadap gangguan transien yang besar seperti gangguan

yang tiba-tiba (kegagalan), pemadaman tiba-tiba, penambahan atau perubahan beban [1]. Sebuah sistem yang mengalami gangguan, seperti adanya hubung singkat akan membuat sistem menjadi tidak stabil. Sebelum sistem tidak stabil, diperlukan alat pemutus seperti *circuit breaker* (CB) untuk menghilangkan gangguan. Nantinya dalam pencegahan ini akan berkaitan dengan *critical clearing angle* (CCA) dan *critical clearing time* (CCT). Oleh karena itu, analisis CCT pada suatu sistem tenaga listrik menjadi penting agar sistem tetap stabil dan mencegah gangguan yang lebih luas

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk menentukan nilai CCT menggunakan pemodelan jaringan IEEE 9 bus. Penelitian [2][3][4] menerapkan gangguan di saluran yang dekat dengan bus dan penelitian [5] menerapkan gangguan di bus. Metode yang digunakan untuk menentukan CCT yaitu *time domain simulation* (TDS) dengan persamaan ayunan menggunakan runge kutta orde 4 pada [2], runge kutta orde 5 [3], dan metode *critical trajectory* [4].

Lebih lanjut, nilai CCT dapat ditingkatkan dengan berbagai cara seperti dengan penambahan *superconducting fault current limiter* dan *super capacitor* [4]. Selanjutnya penelitian [5] menerapkan *distributed energy resources* agar tegangan menjadi stabil dan juga meningkatkan nilai CCT. Selain itu dengan perubahan reaktansi saluran juga dapat meningkatkan nilai CCT sebagaimana pada [6]. Efek dari *damping* juga terbukti dapat meningkatkan nilai CCT seperti pada [7].

Pada penelitian ini, akan menggunakan pemodelan jaringan IEEE 9 bus dengan gangguan yang terletak di tengah saluran. Pencarian nilai CCT akan menggunakan TDS yang nantinya akan disertakan komparasi pencarian nilai CCA dan CCT berdasarkan perhitungan dan simulasi menggunakan ETAP dan Matlab. Selanjutnya untuk meningkatkan nilai CCT akan dilakukan pengaturan *governor* melalui variasi nilai *droop* pada generator dengan simulasi ETAP.

II. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini akan menentukan nilai CCA dan CCT dengan pemodelan jaringan IEEE 9 bus. Penentuan tersebut berdasarkan hasil perhitungan serta dilakukan perbandingan dengan simulasi menggunakan ETAP dan Matlab. Simulasi ETAP dilakukan dengan analisis transien yang merupakan salah satu fitur pada *software* tersebut. Melalui ETAP juga dilakukan simulasi peningkatan nilai CCT sehingga terdapat pengaturan tambahan di sisi generator. Sedangkan pada Matlab menggunakan pendekatan *power flow* kemudian analisis stabilitas.

A. Persamaan Ayunan

Dalam kondisi normal, stator dan rotor dipisahkan melalui sudut yang bernama *power angle* atau *torque angle*. Ketika terjadi gangguan pada sistem, rotor akan mengalami percepatan atau perlambatan jika dibandingkan dengan stator yang berada pada posisi yang tetap. Akibat dari percepatan maupun perlambatan tersebut akan menimbulkan pergerakan relatif yang juga disebut *swing equation*. Adapun persamaan *swing equation* sebagai berikut.

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (1)$$

Di mana,

M adalah momentum sudut rotor

δ_m adalah pergeseran sudut rotor dalam satuan radian terhadap sumbu yang berputar

P_m adalah daya mekanik

P_e adalah daya elektrik

B. Kurva Sudut Daya

Daya yang ditransmisikan dipengaruhi oleh nilai reaktansi dan besar sudut antara dua tegangan (E') dan (V), sehingga memenuhi (2). Sebelumnya, tegangan (E') didapatkan dari tegangan terminal (V) yang dijumlahkan dengan perkalian antara nilai imajiner dari reaktansi dengan arus generator sebelum gangguan (I) sebagaimana (3). Sementara nilai (I) didapatkan sesuai (4).

$$P_e = \frac{E' \cdot V}{X} \sin \delta \quad (2)$$

$$E' = V + jX \cdot I \quad (3)$$

$$I = \frac{P_e - jQ}{V} \quad (4)$$

Di mana,

P_e adalah daya aktif

E' adalah tegangan internal reaktansi

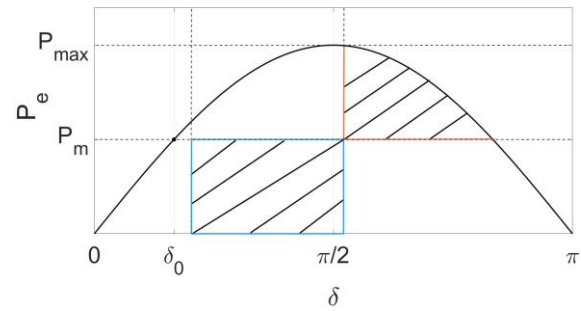
V adalah tegangan terminal generator

X adalah reaktansi saluran

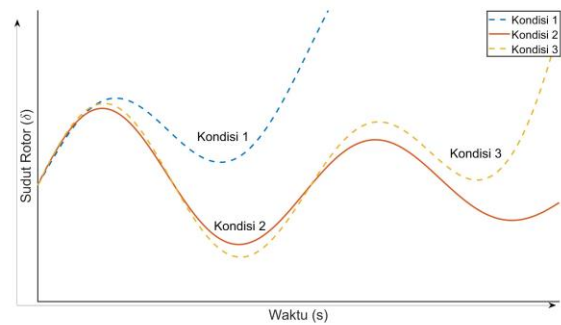
I adalah arus generator sebelum gangguan

Q adalah daya reaktif

Keadaan kurva sudut dan daya akan berubah tatkala kondisi sebelum gangguan, saat gangguan, dan setelah gangguan. Ketika terjadi gangguan, daya P_e akan berkurang dan menyebabkan kondisi $P_m > P_e$, yang menyebabkan sudut rotor akan mengalami percepatan dan bertambah besar. Misal pada sudut 90° gangguan dihilangkan, nilai P_e akan mengalami



Gambar 1. Kurva Sudut VS Daya



Gambar 2. Kondisi Stabil dan Tidak Stabil

kenaikan yang berakibat $P_m < P_e$ sehingga sudut rotor mengalami perlambatan. Ketika $P_m = P_e$ sistem kembali stabil. Gambar 1 menjelaskan hubungan antara P_e dengan δ .

Sebagai ilustrasi, terdapat 3 kondisi keadaan sudut rotor setelah penanganan gangguan [8]. Kondisi 1 ketika sudut rotor meningkat dan sistem tidak mampu menangani sehingga kehilangan sinkronisasi. Kondisi 2, terjadi peningkatan sudut rotor kemudian dilakukan penanganan gangguan, sistem mampu mengembalikan kondisi sinkronisasi. Terakhir kondisi 3 yaitu awalnya sistem sempat untuk stabil, namun ayunan berikutnya lepas sinkronisasi dan menjadi tidak stabil. Ilustrasi ini dapat dilihat pada Gambar 2.

C. Critical Clearing Angle dan Critical Clearing Time

Penanganan terhadap sistem yang mengalami gangguan diperlukan agar sistem dapat kembali ke kondisi stabil. CCA merupakan batas sudut suatu sistem dikatakan stabil. Apabila nilai CCA sudah diketahui maka nilai CCT dapat dicari. Adapun rumus untuk mendapatkan nilai CCA yaitu

$$\delta_k = \cos^{-1} \left(\frac{P_{e \text{ base}}}{P_{max} \sin \delta} (\delta_{max} - \delta_0) + \cos \delta_{max} \right) \quad (5)$$

Di mana,

δ_k adalah nilai CCA

P_e adalah daya aktif dalam pu

$P_{max} \sin \delta$ adalah daya aktif dengan pergeseran sudut

δ_{max} adalah sudut daya maksimum

δ_0 adalah sudut kestabilan sistem

CCT dapat ditemukan dengan

$$T_k = \sqrt{\frac{2H(\delta_k - \delta_0)}{\pi \cdot f \cdot P_m}} \quad (6)$$

Di mana,

T_k adalah nilai CCT dalam detik

H adalah inersia

f adalah frekuensi sistem

P_m adalah daya mekanik saat titik kestabilan

D. Pendekatan Analisis Stabilitas Transien

Terdapat dua jenis pendekatan analisis stabilitas transien, yaitu berupa metode *indirect* melalui *time domain simulation* (TDS), maupun dengan metode *direct* [3]. Pendekatan melalui TDS menggunakan penyelesaian numerik persamaan diferensial *non-linear* yaitu dengan memperhatikan kurva sudut rotor terhadap waktu. TDS biasanya menampilkan sistem saat terjadi gangguan dan setelah terjadinya gangguan. Selain itu secara praktis TDS dapat dilakukan dengan cara *trial and error* [7].

Pendekatan kedua dengan metode *direct* yaitu tidak dilakukan pendekatan penyelesaian numerik, melainkan secara langsung menggunakan *energy function* (Lyapunov) yang berkaitan dengan energi kinetik dan energi potensial. Lyapunov diimplementasikan pada sistem setelah terjadinya gangguan, di mana dalam memuat fungsi ini, sistem perlu dikonversi dalam persamaan diferensial orde satu dan penentuan batas daerah kestabilan [9].

Pada penelitian ini akan menggunakan metode *indirect*, di mana pencarian nilai CCA dan CCT dilakukan melakukan perhitungan kemudian dibuktikan melalui simulasi dengan ETAP dan Matlab.

E. Study Case dan Diagram Alir Penelitian

Study case untuk menghitung nilai CCA dan CCT pada makalah ini menggunakan jaringan IEEE 9 bus. Adapun gangguan yang diterapkan pada jaringan tersebut adalah gangguan 3 fasa yang terjadi di tengah-tengah saluran 3 dan 5 serta generator 1 akan bertindak sebagai *slack bus*.

Alur penelitian dimulai dari penentuan lokasi gangguan. Selanjutnya melakukan perhitungan sebagaimana yang terdapat pada [1][10] terhadap gangguan tersebut. Setelah hasil perhitungan nilai CCA dan CCT didapatkan, nilai tersebut akan dilakukan pengecekan melalui simulasi baik Matlab maupun ETAP yang terlebih dahulu disesuaikan dengan parameter jaringan IEEE 9 bus. Apabila hasil perhitungan nilai CCA dan CCT belum tepat, maka dilakukan *trial and error* untuk mencari nilai CCA dan CCT yang kemudian disimulasikan kembali. Selanjutnya uji peningkatan nilai CCT diterapkan dengan pengaturan *governor* dengan variasi nilai *droop* menggunakan simulasi ETAP. Terakhir, berupa analisis hasil

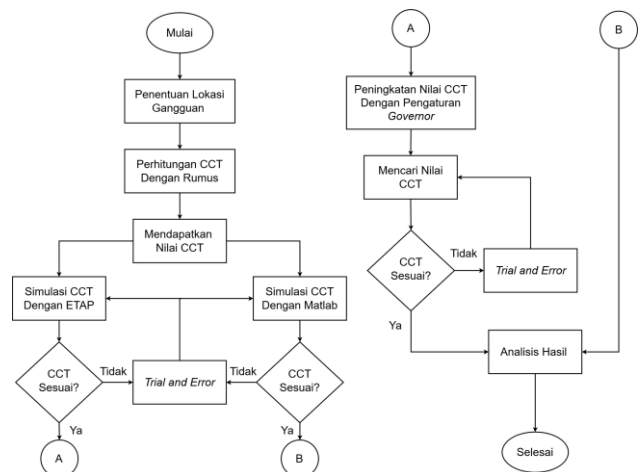
penelitian dengan membandingkan perhitungan dengan simulasi. Berikut untuk diagram alir penelitian dapat dilihat pada Gambar 3 dan parameter jaringan IEEE 9 bus pada tabel 1-3 serta hasil *load flow*.

F. Penyelesaian Gangguan Saluran Pada Software

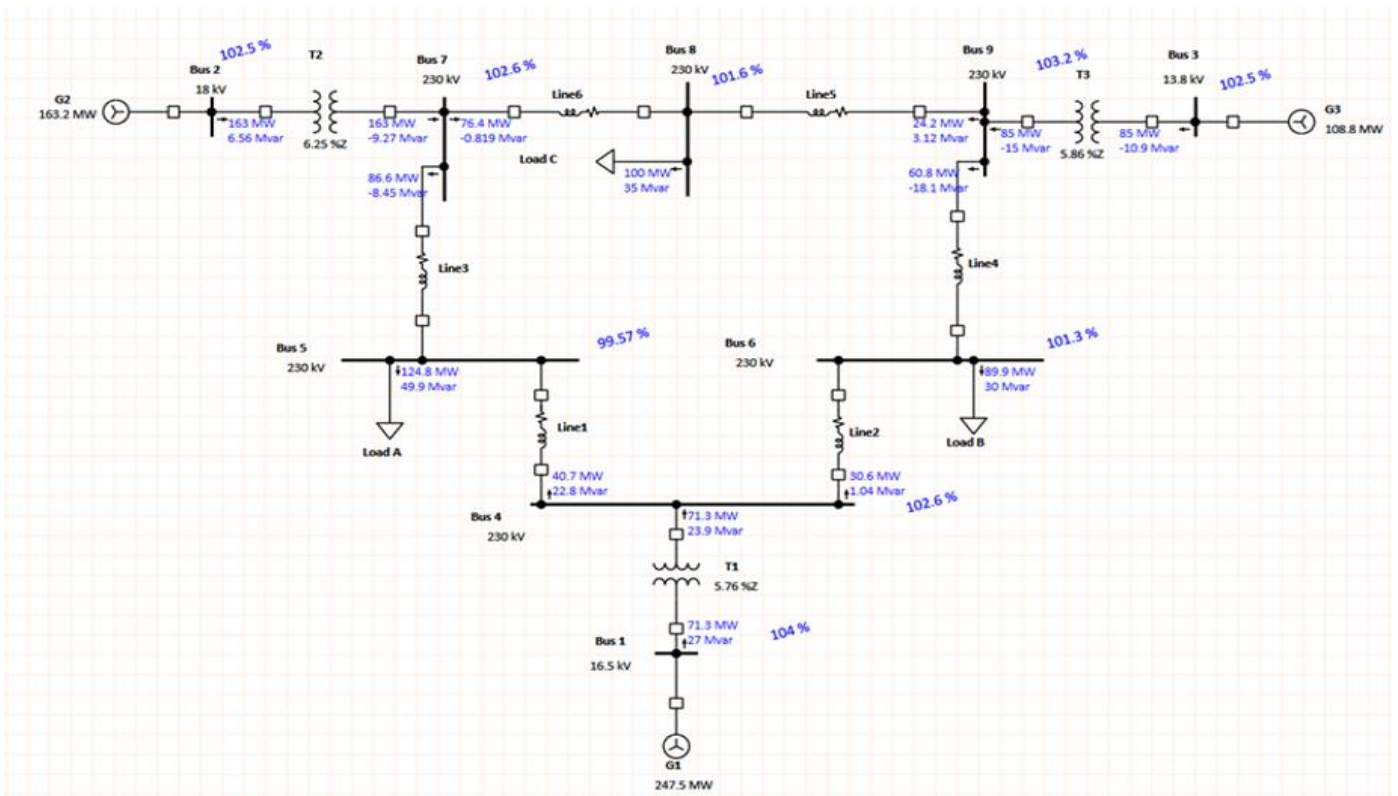
Pemodelan jaringan IEEE 9 bus dilakukan melalui software ETAP dan Matlab. Pada *software* ETAP, dilakukan uji transien dengan menentukan terlebih dahulu jenis gangguan yakni gangguan pada tengah saluran 3 yang berarti gangguan yang terjadi sebesar 50% serta waktu saat gangguan muncul yakni detik ke-1. Kemudian gangguan akan dihilangkan dengan membuka CB pada saluran 5-7 dan mengamati perbedaan sudut daya antara generator 2 dan generator 3 dengan sudut daya generator 1 sebagai referensi. Begitu juga dengan gangguan di tengah saluran 5 yang dihilangkan dengan membuka CB yang menghubungkan bus 8-9.

Study case untuk meningkatkan nilai CCT dengan pengaturan *governor* dilakukan melalui ETAP. Penelitian [11] menerapkan jenis *governor* ST3 untuk studi kestabilan frekuensi menggunakan jaringan IEEE 30 bus. Untuk itu pada penelitian ini akan menggunakan jenis *governor* ST3 dengan pengaturan nilai parameter melalui *sample data* dan melakukan variasi nilai *droop*. Pengaturan ini dilakukan untuk generator 2 dan generator 3 pada gangguan tengah saluran 3 dan 5.

Pada simulasi Matlab, setelah dilakukan *power flow* yaitu menentukan lokasi gangguan 50% pada saluran 3 yang menghubungkan bus 5-7 begitu juga pada tengah saluran 5 yang menghubungkan bus 8-9. Nilai MVA base yang digunakan pada Matlab yakni 100, yang mana nilai ini berbeda dari ETAP, sehingga untuk nilai inersia pada generator perlu disesuaikan. Perbedaan selanjutnya ialah pemodelan generator, pada Matlab nilai reaktansi yang digunakan yaitu hanya *direct axis transient* (X'_d) sedangkan pemodelan pada ETAP mengikuti standar *equivalent* yang mencakup (X'_d), *direct axis synchronous reactance* (X_d), *direct axis synchronous reactance machine base* (X_{du}), *armature leakage reactance* (X_L), *quadrature axis synchronous reactance* (X_{qu}), *quadrature axis transient synchronous reactance* (X'_q), *direct axis transient open circuit* (T'_{do}).



Gambar 3. Diagram Alir



Gambar 4. Hasil Load Flow Jaringan IEEE 9 Bus

Tabel 1. Data Tegangan dan Jenis Bus

Bus	Tegangan (pu)	Jenis Bus
1	1,04	Slack Bus
2	1,025	PV Bus
3	1,025	PV Bus
4	1,026	PQ Bus
5	0,996	PQ Bus
6	1,013	PQ Bus
7	1,026	PQ Bus
8	1,016	PQ Bus
9	1,032	PQ Bus

Tabel 2. Data pembangkitan dan Beban

Bus	Pembangkitan		Beban	
	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)
1	71,3	23,9	0	0
2	163	6,56	0	0
3	85	-10,9	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	125	50
6	0	0	90	30

Bus	Pembangkitan		Beban	
	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)	Daya Aktif (MW)	Daya Reaktif (MVAR)
7	0	0	0	0
8	0	0	100	35
9	0	0	0	0

Tabel 3. Data Saluran, Impedansi, dan Suseptansi

Saluran		Impedansi Z		Suseptansi B/2 (pu)
Dari Bus (pu)	Ke Bus (pu)	Resistansi (pu)	Reaktansi (pu)	
1	4	0	0,0576	0
2	7	0	0,0625	0
3	9	0	0,0586	0
4	5	0,01	0,0085	0,088
4	6	0,017	0,0920	0,0790
5	7	0,032	0,1610	0,1530
6	9	0,039	0,1700	0,1790
7	8	0,0085	0,0720	0,0745
8	9	0,0119	0,1008	0,1045

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini akan memuat 2 pembahasan, yaitu studi kasus gangguan pada tengah saluran 3 dan saluran 5 serta studi kasus gangguan pada tengah saluran 3 dan saluran 5 dengan peningkatan nilai CCT menggunakan pengaturan *governor*.

A. Perhitungan Nilai CCA dan CCT

1) Hasil CCA dan CCT pada gangguan di tengah saluran 3 dengan perhitungan

$$\begin{aligned} H &= 3,33 \\ X'_d &= 0,23 \\ P_e &= 163 \text{ MW} \\ Q &= 6,562 \text{ Mvar} \\ V &= 18 \text{ kV} \\ MVA \text{ base} &= 192 \\ KV \text{ base} &= 18 \text{ kV} \end{aligned}$$

Trafo

$$Z = 0,0625$$

$$\frac{X}{R} = 1000$$

$$MVA = 100$$

$$X = j6,25\%$$

$$R = 0,006\%$$

$$Z_{base} = \frac{V^2}{MVA \text{ Gen}} = \frac{18^2}{100} = 3,24 \Omega$$

$$Z_{base} = \frac{V^2}{MVA \text{ Gen}} = \frac{230^2}{100} = 529 \Omega$$

$$P_{e \text{ base}} = \frac{163}{192} = 0,849 \text{ pu}$$

$$Q_{base} = \frac{6,562}{192} = 0,034 \text{ pu}$$

$$Z_{base \text{ trafo}} = 0,0625 \times \left(\frac{18}{18}\right)^2 \times \frac{192}{100} = 0,12 \text{ pu}$$

$$X_T = 0,0625 \times \left(\frac{18}{18}\right)^2 \times \frac{192}{100} = 0,12 \text{ pu}$$

Saluran 3

$$Z_3 = 0,032 + j0,161 (0,31)$$

$$Z_3 = (0,164 \angle 78,769)(0,31) = 0,05 \angle 78,769$$

$$Z_3 = \frac{0,05 \angle 78,769}{z \text{ base}} = \frac{0,05 \angle 78,769}{1,6875}$$

$$Z_3 = 0,03 \angle 78,769$$

$$Z_3 = 5,843 \times 10^{-3} + j0,03$$

$$XL_1 = jZ_1 \times \left(\frac{V \text{ primer}}{V \text{ sekunder}}\right)^2 \times \left(\frac{MVA \text{ gen}}{MVA \text{ trafo}}\right)^2$$

$$XL_1 = 0,03 \times \left(\frac{18}{230}\right)^2 = 1,837 \times 10^{-4}$$

Gangguan di saluran 3;

$$X = X'_d + X_T + XL_1$$

$$X = 0,23 + 0,12 + 1,837 \times 10^{-4} = 0,35$$

Tegangan internal transien

$$I = \frac{P_e - jQ}{V} = \frac{0,849 - j0,034}{1}$$

$$E' = V + jX_1 I = 1 + (j0,35)(0,849 - j0,034)$$

$$E' = 1 + (0,35 \angle 90^\circ)(0,849 \angle -2,29^\circ)$$

$$E' = 1 + (0,297 \angle 87,71^\circ)$$

$$E' = 1 + (0,012 + j0,3)$$

$$E' = 1,012 + j0,297$$

$$E' = 1,055 \angle 16,356^\circ$$

$$P_{max} \sin \delta = \frac{E' V}{X \text{ sebelum}} = \frac{(1,05)(1)}{0,35} = 3 \sin \delta$$

$$3 \sin \delta = 0,85$$

$$\sin \delta = \frac{0,849}{3} = 0,283^\circ$$

$$\delta_0 = \sin^{-1} 0,283^\circ = 16,44^\circ = 0,287 \text{ rad}$$

$$\delta_{max} = 180^\circ - 16,44^\circ = 163,56^\circ = 2,855 \text{ rad}$$

Mencari CCA melalui (5)

$$\cos \delta_k = \frac{P_{e \text{ base}}}{P_{max} \sin \delta} (\delta_{max} - \delta_0) + \cos \delta_{max}$$

$$\cos \delta_k = \frac{0,849}{3} (2,855 \text{ rad} - 0,287 \text{ rad}) + \cos 163,56 \text{ rad}$$

$$\cos \delta_k = 0,727 + (-0,959) = -0,232 \text{ rad}$$

$$\delta_k = \cos^{-1} -0,232 \text{ rad} = 1,8 \text{ rad} = 103,41^\circ$$

Mencari nilai CCT melalui (6)

$$T_k = \sqrt{\frac{2H(\delta_k - \delta_0)}{\pi \cdot f \cdot P_e}} = \sqrt{\frac{2(3,33)(1,8 - 0,287)}{\pi \cdot 60 \cdot 0,849}} = 0,25$$

Jika gangguan terjadi pada detik ke 1 maka berdasarkan perhitungan CCT maka CB trip pada detik ke 1,25 atau lama gangguan 0,25 detik. Adapun nilai CCA yaitu 103,41°

2) Hasil CCA dan CCT pada gangguan di tengah saluran 5 dengan perhitungan

$$H = 2,35$$

$$X'_d = 0,232$$

$$P_e = 85 \text{ MW}$$

$$Q = -10,9 \text{ Mvar}$$

$$V = 13,8 \text{ kV}$$

$$MVA \text{ base} = 128$$

$$KV \text{ base} = 13,8 \text{ kV}$$

Trafo

$$Z = 0,0586$$

$$\frac{X}{R} = 1.000$$

$$MVA = 100$$

$$X = j5,86\%$$

$$R = 0,006\%$$

$$Z_{base} = \frac{V^2}{MVA \text{ Gen}} = \frac{13,8^2}{128} = 1,488 \Omega$$

$$Z_{base} = \frac{V^2}{MVA \text{ Gen}} = \frac{230^2}{128} = 413,28 \Omega$$

$$P_{e \text{ base}} = \frac{85}{128} = 0,664 \text{ pu}$$

$$Q_{base} = \frac{-10.9}{128} = -0,085 \text{ pu}$$

$$Z_{base \text{ trafo}} = 0,0586 \times \left(\frac{13,8}{13,8}\right)^2 \times \frac{128}{100} = 0,0586 \text{ pu}$$

$$X_T = 0,0586 \times \left(\frac{13,8}{13,8}\right)^2 \times \frac{128}{100} = 0,075 \text{ pu}$$

Saluran 5

$$Z_5 = 0,012 + j0,1 (0,31)$$

$$Z_5 = (0,1 \angle 83,157)(0,31) = 0,031 \angle 83,157$$

$$Z_5 = \frac{0,031 \angle 83,157}{z_{base}} = \frac{0,031 \angle 83,157}{1,488}$$

$$Z_5 = 0,02 \angle 83,157$$

$$Z_5 = 2,383 \times 10^{-3} + j0,019$$

$$XL_1 = jZ_1 \times \left(\frac{V_{primer}}{V_{sekunder}}\right)^2 \times \left(\frac{MVA_{gen}}{MVA_{gen}}\right)^2$$

$$XL_1 = 0,019 \times \left(\frac{13,8}{230}\right)^2 \times \left(\frac{128}{128}\right)^2$$

$$XL_1 = 6,84 \times 10^{-5}$$

Gangguan di saluran 5;

$$X = X'_d + X_T + XL_1$$

$$X = 0,232 + 0,075 + 6,84 \times 10^{-5} = 0,29$$

Tegangan internal transient

$$I = \frac{P_e - jQ}{V} = \frac{0,664 + j0,085}{1}$$

$$E' = V + jX_1 I = 1 + (j0,29)(0,664 + j0,085)$$

$$E' = 1 + (0,29 \angle 90^\circ)(0,669 \angle 7,29^\circ)$$

$$E' = 1 + (0,194 \angle 97,29^\circ)$$

$$E' = 1 + (-0,025 + j0,192)$$

$$E' = 0,975 + j0,192$$

$$E' = 0,994 \angle 11,14^\circ$$

$$P_{max} \sin \delta = \frac{E' V}{X_{sebelum}} = \frac{(0,994)(1)}{0,29} = 3,428 \sin \delta$$

$$3,428 \sin \delta = 0,85$$

$$\sin \delta = \frac{0,85}{3,428} = 0,248^\circ$$

$$\delta_0 = \sin^{-1} 0,248^\circ = 14,36^\circ = 0,25 \text{ rad}$$

$$\delta_{max} = 180^\circ - 14,36^\circ = 165,64^\circ = 2,892 \text{ rad}$$

Mencari CCA melalui (5)

$$\cos \delta_k = \frac{P_{e \text{ base}}}{P_{max} \sin \delta} (\delta_{max} - \delta_0) + \cos \delta_{max}$$

$$\cos \delta_k = \frac{0,85}{3,428} (2,892 \text{ rad} - 0,25 \text{ rad}) + \cos 165,64^\circ$$

$$\cos \delta_k = 0,655 + (-0,968) = -0,313 \text{ rad}$$

$$\delta_k = \cos^{-1} -0,313 \text{ rad} = 1,89 \text{ rad} = 108,24^\circ$$

Mencari nilai CCT melalui (6)

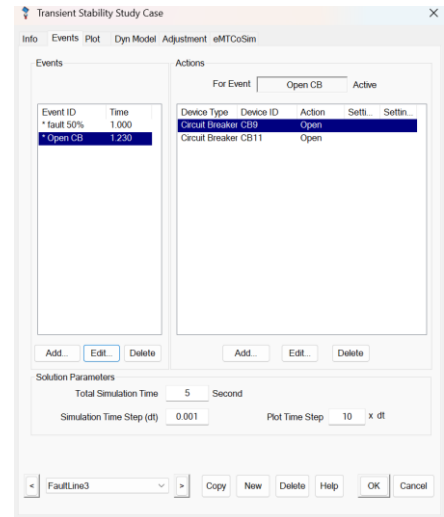
$$T_k = \sqrt{\frac{2H(\delta_k - \delta_0)}{\pi \cdot f \cdot P_e}} = \sqrt{\frac{2(2,35)(1,89 - 0,25)}{\pi \cdot 60 \cdot 0,664}} = 0,248$$

Jika gangguan terjadi pada detik ke 1 maka berdasarkan perhitungan CCT maka CB trip pada detik ke 1,248 atau lama gangguan 0,248 detik.

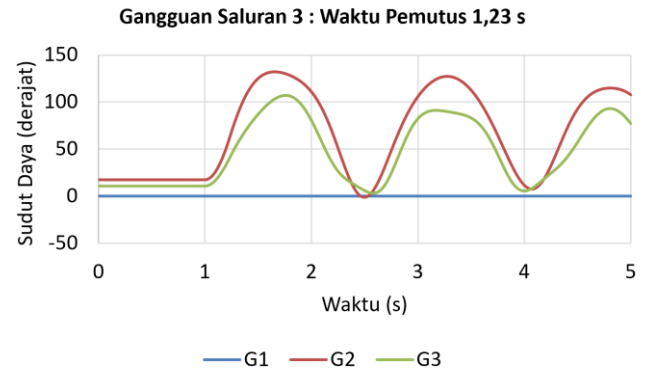
B. Hasil Simulasi CCA dan CCT dengan ETAP

1) Hasil CCA dan CCT pada gangguan di tengah saluran 3 dengan simulasi ETAP

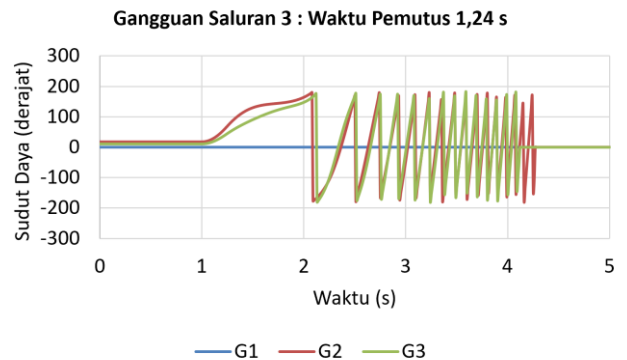
Melalui simulasi ETAP gangguan akan diatur terjadi pada detik ke-1 dan CB akan terbuka berdasarkan nilai CCT. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai CCT yang didapat berada pada detik ke 1,23 atau 0,23 setelah gangguan berlangsung dengan nilai CCA 132,2°. Ketika CB dibuka pada detik ke 1,24 atau lama gangguan 0,24 detik, hasilnya sistem menjadi tidak stabil, dengan nilai sudut berada pada 180°.



Gambar 5. Pengaturan Event Pada ETAP



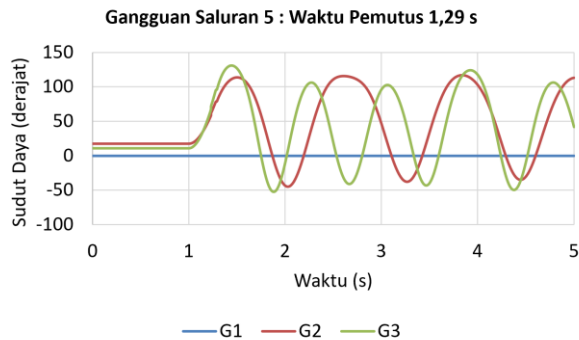
Gambar 6. Sistem Stabil Saat CCT 1,23 Detik



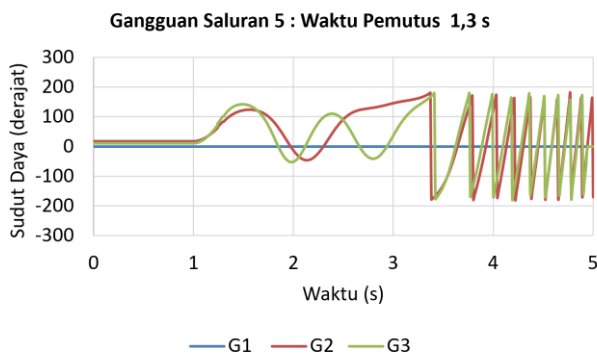
Gambar 7. Sistem Tidak Stabil Saat CCT 1,24 Detik

2) Hasil CCA dan CCT pada gangguan di tengah saluran 5 dengan simulasi ETAP

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai CCT yang didapat berada pada detik ke 1,29 atau 0,29 setelah gangguan berlangsung dengan nilai CCA 131° . Ketika CB dibuka pada detik ke 1,3 atau lama gangguan 0,3 detik, hasilnya sistem menjadi tidak stabil, dengan nilai sudut berada pada $179,8^\circ$.



Gambar 8. Sistem Stabil Saat CCT 1,29 Detik



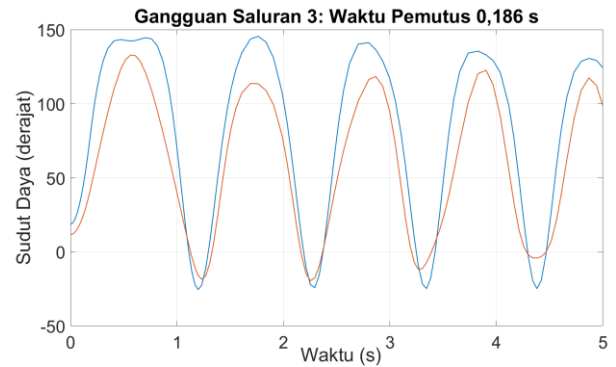
Gambar 9. Sistem Tidak Stabil Saat CCT 1,3 Detik

C. Hasil Simulasi CCT dengan Matlab

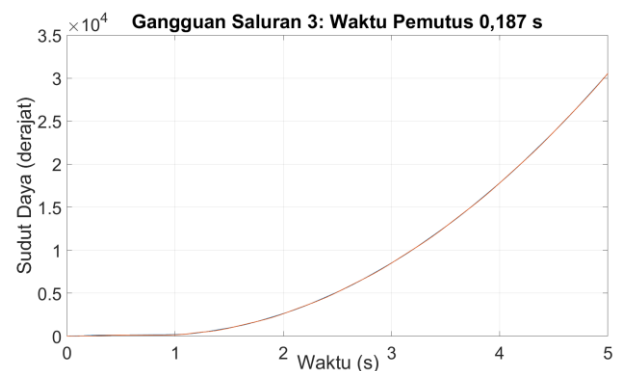
1) Hasil CCT pada gangguan di tengah saluran 3

Simulasi Matlab dijalankan terlebih dahulu dengan *power flow* newton-raphson yang sama dengan simulasi pada ETAP. Kemudian pada persamaan ayunan menggunakan *solver* 'ode 23' yang mengimplementasikan metode runge-kutta adaptif orde 2 dan 3. Nilai (X'_d) yang digunakan di Matlab yaitu 0,0608 untuk generator 1, generator 2 yaitu 0,1198, dan generator 3 yaitu 0,18125. Gangguan disimulasikan terjadi langsung pada detik ke 0, namun untuk menyeragamkan perbandingan dengan hasil nilai CCT pada perhitungan dan ETAP, maka nilai CCT hasil simulasi Matlab dilakukan penyesuaian.

Hasil dari simulasi Matlab pada gangguan di tengah saluran 3 memiliki CCT sebesar 1,186 detik atau gangguan selama 0,186 detik. Dapat dilihat pada Gambar 10 bahwa sistem masih dikatakan stabil. Berbeda jika gangguan hingga detik ke 1,187, maka sistem dapat dikatakan tidak stabil, sebagaimana pada gambar Gambar 11.



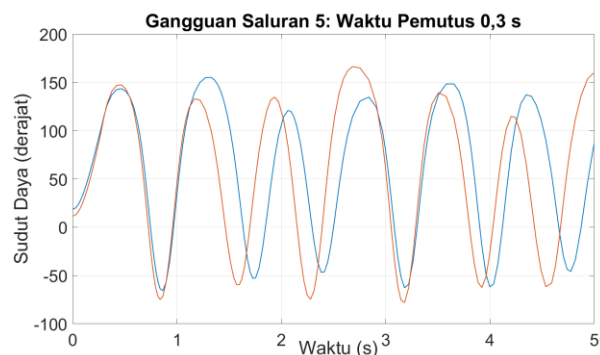
Gambar 10. Sistem Stabil Saat CCT 1,186 Detik



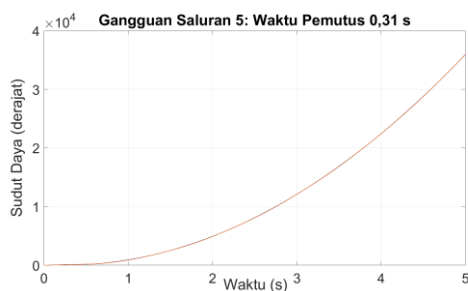
Gambar 11. Sistem Tidak Stabil Saat CCT 1,187 Detik

2) Hasil CCT pada gangguan di tengah saluran 5

Selanjutnya simulasi Matlab pada saluran 5 yang mengalami gangguan. CCT yang terhitung adalah 1,3 detik atau gangguan selama 0,3 detik. Dapat dilihat pada Gambar 12, bahwa sistem masih dikatakan stabil. Berbeda jika gangguan hingga detik ke 1,31, maka sistem dapat dikatakan tidak stabil, sebagaimana pada Gambar 13.



Gambar 12. Sistem Stabil Saat CCT 1,3 Detik



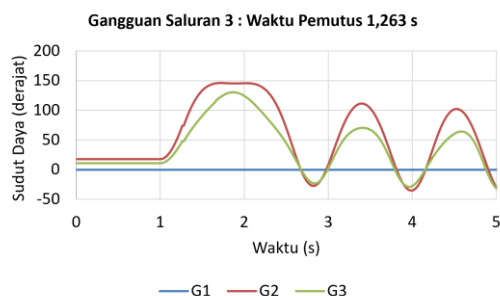
Gambar 13. Sistem Tidak Stabil Saat CCT 1,31 Detik

D. Peningkatan Nilai CCT Dengan Pengaturan Governor

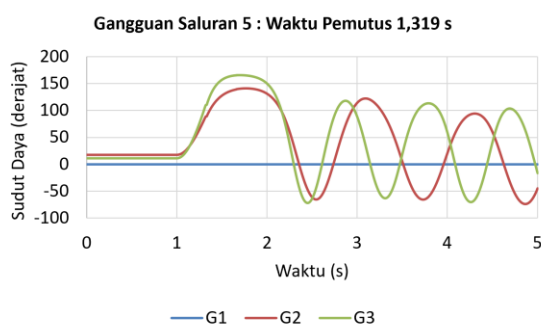
Pada bagian ini nilai CCT akan ditingkatkan melalui pengaturan *governor*. *Governor* yang digunakan adalah *governor* tipe ST3 dengan variasi nilai *droop* sebesar 3%, 4%, dan 5% pada generator 2 dan generator 3.

Hasil simulasi menunjukkan pada gangguan di tengah saluran 3, nilai CCT saat menggunakan nilai *droop* sebesar 3% memiliki CCT sebesar 1,263 detik dan menjadi tidak stabil ketika CB dibuka pada 1,264 detik. Ketika menggunakan nilai *droop* 4% maka nilai CCT sebesar 1,257 detik dan menjadi tidak stabil apabila CB dibuka pada 1,258 detik. Sedangkan ketika menggunakan nilai *droop* 5%, CCT bernilai 1,252 detik dan menjadi tidak stabil ketika CB dibuka saat 1,253 detik.

Selanjutnya untuk gangguan di tengah saluran 5 ketika *droop* bernilai 3% memiliki CCT sebesar 1,319 detik dan menjadi tidak stabil ketika CB dibuka pada 1,32 detik. Ketika menggunakan nilai *droop* 4% maka nilai CCT sebesar 1,316 detik dan menjadi tidak stabil apabila CB dibuka pada 1,317 detik. Sedangkan ketika menggunakan nilai *droop* 5%, CCT bernilai 1,314 detik dan menjadi tidak stabil ketika CB dibuka saat 1,315 detik.



Gambar 14. Sistem Stabil Saat CCT 1,263 Detik



Gambar 15. Sistem Stabil Saat CCT 1,319 Detik

E. Perbandingan Nilai CCT

Apabila diamati dari segi nilai CCT ketika gangguan di tengah saluran 3, nilai CCT yang didapat melalui perhitungan mendekati dengan nilai yang didapatkan melalui simulasi ETAP, yaitu masing-masing 1,25 detik dengan 1,23 detik. Sedangkan nilai CCT pada simulasi ETAP dan Matlab nilainya terdapat perbedaan 0,044 detik yaitu masing-masing 1,23 detik dengan 1,186 detik.

Pada kasus gangguan di tengah saluran 5, nilai yang didapat melalui perhitungan mendekati dengan nilai yang didapatkan melalui simulasi ETAP, yaitu masing-masing 1,248 detik dengan 1,29 detik. Sedangkan nilai CCT pada simulasi ETAP dan Matlab terdapat perbedaan 0,01 detik yaitu masing-masing 1,29 detik dengan 1,3 detik. Ringkasan perbandingan nilai CCT dapat dilihat pada Tabel 4.

Melalui simulasi ETAP dapat dilihat ketika nilai CCA pada generator 2 lebih dulu mendekati nilai sudut 180° (gangguan di saluran 3) atau $179,8^\circ$ (gangguan di saluran 5) terhadap generator 1, akan menyebabkan sistem menjadi tidak stabil.

Tabel 4. Komparasi Nilai CCT Antara Perhitungan Dengan Simulasi

	Pendekatan	CCA		CCT	
		Stabil	Tidak Stabil	Stabil	Tidak Stabil
Saluran 3	Perhitungan	103,41°		1,25 detik	
	ETAP	132,2°	180°	1,23 detik	1,24 detik
	Matlab			1,186 detik	1,187 detik
Saluran 5	Perhitungan	108,24°		1,248 detik	
	ETAP	131°	179,8°	1,29 detik	1,3 detik
	Matlab			1,3 detik	1,31 detik

Tabel 5. Komparasi Nilai CCT Dengan Variasi *Droop*

	Pendekatan	CCA		CCT	
		Stabil	Tidak Stabil	Stabil	Tidak Stabil
Saluran 3	Tanpa <i>Droop</i>	132,2°	180°	1,23 detik	1,24 detik
	<i>Droop</i> 3%	145,7°	179,7°	1,263 detik	1,264 detik
	<i>Droop</i> 4%	153,8°	179,5°	1,257 detik	1,258 detik
	<i>Droop</i> 5%	142,5°	179,3°	1,252 detik	1,253 detik
Saluran 5	Tanpa <i>Droop</i>	131°	179,8°	1,29 detik	1,3 detik
	<i>Droop</i> 3%	165,3°	179,3°	1,319 detik	1,32 detik
	<i>Droop</i> 4%	163,4°	179,4°	1,316 detik	1,317 detik

	Pendekatan	CCA		CCT	
		Stabil	Tidak Stabil	Stabil	Tidak Stabil
	<i>Droop</i> 5%	161°	179,2°	1,314 detik	1,315 detik

Selanjutnya pada Tabel 5 membandingkan nilai CCT sebelum dan sesudah peningkatan melalui pengaturan *governor*. Nilai CCT yang dibandingkan adalah nilai CCT yang berasal dari simulasi ETAP. Pengaturan *governor* dengan generator beroperasi *droop* dapat meningkatkan nilai CCT yang mana pengaturan *droop* 3% memiliki CCT paling besar dibandingkan pengaturan *droop* sebesar 4% dan 5%.

Pada gangguan di tengah saluran 3, nilai CCT dengan *droop* 3% sebesar 1,263 detik yakni terjadi peningkatan sebesar 0,033 detik dengan nilai CCT tanpa pengaturan *droop*. Sedangkan pada gangguan di tengah saluran 5, nilai CCT dengan *droop* 3% sebesar 1,319 detik yakni terjadi peningkatan sebesar 0,029 detik dengan nilai CCT tanpa pengaturan *droop*.

Apabila diamati dari perbedaan sudut daya, pengaturan *droop* menyebabkan nilai CCA berkurang, seperti pada gangguan di saluran 3 yang semula CCA bernilai 180° terhadap generator 1 menjadi 179,7° ketika pengaturan *droop* sebesar 3%. Sedangkan pada gangguan saluran 5 nilai CCA 179,8° terhadap generator 1 menjadi 179,3° ketika pengaturan *droop* sebesar 3%.

IV. KESIMPULAN

Pada penelitian ini bertujuan untuk mencari nilai CCT pada jaringan IEEE 9 bus dengan generator 1 sebagai *slack bus* pada gangguan di tengah saluran 3 dan 5 dengan berbagai komparasi baik dari perhitungan, maupun simulasi ETAP dan Matlab. Hasil menunjukkan nilai CCT yang didapatkan melalui perhitungan, simulasi ETAP dan Matlab memiliki nilai yang mendekati.

Peningkatan nilai CCT dapat dilakukan dengan pengaturan *governor* pada generator 2 dan generator 3. Pengaturan dengan *droop* sebesar 3% memiliki nilai terbesar untuk meningkatkan nilai CCT.

Rekomendasi untuk pengerjaan selanjutnya dapat mencari nilai CCT dengan metode *critical trajectory* sebagai pembandingan dari metode TDS.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Saadat, *Power System Analysis*, 3rd ed. 2010.
- [2] F. I. L. Handini, "Analisis Nilai Critical Clearing Time Sistem Multi-Mesin Dengan Konsep One Machine Infinite Bus Menggunakan Metode Kriteria Sama Luas dan Runge Kutta Orde 4.," Skripsi, Universitas Jember, Jember, 2018.
- [3] V. Aprilia, "Analisis Gangguan 3 Fasa Pada Saluran Transmisi Terhadap Transient Stability Sistem Multimesin Menggunakan Metode Runge-Kutta Orde 5," Universitas Lampung, Lampung, 2016.
- [4] H. R. Adha, A. Priyadi, V. Lystianingrum, I. Hafidz, R. A. I. Mahendra, and N. Yorino, "Improvement of Critical Clearing Time by Combination of SFCL and SCES Using Critical Trajectory Method," in *2023 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications: Leveraging Intelligent Systems to Achieve Sustainable Development Goals, ISITIA 2023 - Proceeding*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023, pp. 546–551. doi: 10.1109/ISITIA59021.2023.10221006.
- [5] S. Acharya and M. Ramezani, "Transient stability assessment for generators and DER integration into the IEEE 9 Bus system," in *IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC), 2020.
- [6] P. Prasetyo, D. Despa, H. Gusmedi, and L. Hakim, "Analisis Perubahan Reaktansi Saluran Terhadap Transient Stability Of Multimachine Dengan Metode Runge Kutta Fehlberg," *Universitas Lampung*, 2016.
- [7] S. Atmaja, A. Priyadi, and T. Yuwono, "Perhitungan Critical Clearing Time Dengan Menggunakan Metode Time Domain Simulation," in *Prosiding Seminar Tugas Akhir Teknik Elektro FTI-ITS*, Surabaya, 2012.
- [8] R. Aqsa Izza Mahendra and D. Teknik Elektro, "Perbaikan Nilai Critical Clearing Time (Cct) Menggunakan Supercapacitor Energy Storage Pada Sistem Multi Machine Infinite Bus Dengan Metode Critical Trajectory," Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2020.
- [9] C. Cekdin and A. Rahman, "Simulasi Menentukan Sudut Daya Dan Waktu Pemutusan Kritis Untuk Kestabilan Sistem Tenaga Listrik Dengan Metode Lyapunov," *Jurnal Teliska*, vol. 5, no. 1, Jan. 2013.
- [10] R. F. Abdurrahman, Hermawan, and M. Facta, "Analisis Stabilitas dan Penentuan Waktu Pemutusan Kritis Pada Generator-Generator Di PLTP Darajat Dengan Memperhitungkan Respon Eksitasi Dan Governor," *Transient*, vol. 10, no. 3, Sep. 2021.
- [11] L. Gumilar and I. S. Islamey, "Frequency Stability Analysis in IEEE 30 Bus Power System Due to Large Load Addition," in *Proceedings - 2024 International of Seminar on Application for Technology of Information and Communication: Smart And Emerging Technology for a Better Life, iSemantic 2024*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2024, pp. 575–580. doi: 10.1109/iSemantic63362.2024.10762041.