

ANALISIS STABILITAS DAN PENENTUAN WAKTU PEMUTUSAN KRITIS PADA GENERATOR – GENERATOR DI PLTP DARAJAT DENGAN MEMPERHITUNGGAN RESPON EKSITASI DAN GOVERNOR

Rizal Fajar Abdurrahman^{*)}, Hermawan dan Mochammad Facta

Program Studi Sarjana Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}E-mail: rzl.abdurrahman@gmail.com

Abstrak

Critical Clearing Time (CCT) memiliki peran penting sebagai acuan dalam menentukan waktu operasi dari circuit breaker (CB). Jenis gangguan yang sangat berpengaruh terhadap kestabilan suatu sistem tenaga listrik adalah gangguan hubung singkat tiga fasa. Untuk menentukan CCT perlu dilakukan investigasi fenomena transien terutama untuk sudut rotor. Dalam pekerjaan ini, analisis sudut rotor dilakukan dengan mengamati perubahan sudut rotor ketika terjadi gangguan hubung singkat pada saluran transmisi yang terhubung ke generator. Pekerjaan tersebut mengambil Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) Darajat yang memiliki 2 unit generator. Masing-masing generator memiliki kapasitas yang berbeda dan bekerja secara terpisah satu sama lain tetapi saling terhubung ke jaringan. Pendekatan analisis dilakukan dengan mengambil pemodelan sistem One Machine Infinite Bus (OMIB). Dari hasil simulasi ETAP 12.6 CCT untuk generator 2GM berkisar antara 0,153 detik sampai dengan 0,168 detik tergantung dari kondisi respon AVR dan kontrol governor. Sedangkan untuk generator 3GM – G-101, CCT berkisar antara 0,313 detik hingga 0,898 detik. Rentang CCT tergantung pada respon AVR dan kontrol governor. Berdasarkan hasil tersebut maka direkomendasikan bahwa semakin dekat gangguan ke generator maka CCT harus semakin cepat. Untuk memastikan tercapai kestabilan, tindakan proteksi rele dan waktu operasi CB harus dipertimbangkan di bawah CCT setelah terjadi gangguan.

Kata kunci: waktu pemutusan kritis (CCT), circuit breaker (CB), analisis stabilitas transien, gangguan hubung singkat, one machine to infinite bus (OMIB), ETAP 12.6.

Abstract

Critical clearing time (CCT) has an important role as a reference in determining the operating time of the circuit breaker (CB). The type of fault that is very influential on the stability of an electric power system is a three-phase short-circuit fault. To determine CCT, it is necessary to make transients investigation phenomena especially for the rotor angle. In this work, an analysis of the rotor angle was carried out by observing changes in the rotor angle when there was a short circuit fault in the transmission line connected to the generator. The work takes Darajat Geothermal Power Plant (PLTP) which has 2 generator units. Each generator has a different capacity and works separately each other but they are interconnected to the grid. The analysis approach is implemented by taking One Machine Infinite Bus (OMIB) system modeling. From the ETAP 12.6 simulation results, the CCT for the 2GM generator is around 0.153 seconds to 0.168 seconds depending on the response conditions of the AVR and governor control. As for the 3GM – G-101 generator, the CCT ranges from 0.313 seconds to 0.898 seconds. The range of CCT depends on the response of the AVR and governor control. Based on results then it is recommended that the closer the fault to the generator is, the faster the CCT must be. To ensure the stability, relay protection action and CB operating time must be considered to below CCT after a fault occurs.

Keywords: critical clearing time (CCT), circuit breaker (CB), transient stability analysis, short circuit fault, one machine to infinite bus (OMIB), ETAP 12.6.

1. Pendahuluan

Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi atau biasa disebut PLTP merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang menggunakan generator termal sehingga masuk kedalam jenis pembangkit termal[1]. Salah satu kelebihan pembangkit termal ialah daya yang dihasilkan cukup besar tergantung dari kapasitas generator tersebut.

Pada PLTP Darajat terdapat 2 generator yang terhubung ke jaringan sistem interkoneksi 150 kV milik PLN[2] dan notabene antara antara generator unit 2 dan unit 3 tidak saling terhubung kerja secara paralel. Selain untuk memasok kebutuhan konsumen, PLTP darajat juga menggunakan sebagian daya untuk menjalankan *utilities* sebagai pendukung keberlangsungan sistem PLTP darajat dalam beroperasi.

PLTP Darajat memanfaatkan panas bumi sebagai energi primernya untuk menggerakkan turbin yang dihubungkan dengan generator melalui *governor* sehingga generator dapat menghasilkan tenaga listrik[3]. Salah satu kelemahan dari pembangkit termal ialah memerlukan waktu yang cukup lama untuk melakukan *start* awal pada generator tersebut. Sehingga hal tersebut menjadi salah satu alasan yang mendasar dalam merancang sebuah sistem proteksi tenaga listrik yang baik agar generator tersebut tidak lepas sinkron dari sistem[4].

Dalam melakukan perancangan sistem proteksi yang handal harus banyak memperhatikan berbagai kondisi terutama pada saat gangguan hubung singkat terjadi. Sehingga hal yang pertama dilakukan ialah harus melakukan studi analisis hubung singkat untuk mengetahui respon dan karakteristik dari generator tersebut[5].

Sebelum melangkah untuk menentukan perancangan sistem proteksi tenaga listrik pada PLTP Darajat, hal yang pertama sekali dilakukan ialah melakukan kajian stabilitas tenaga listrik. Hal ini penting dilakukan sebab agar kita dapat menentukan setting waktu pada rele proteksi[6].

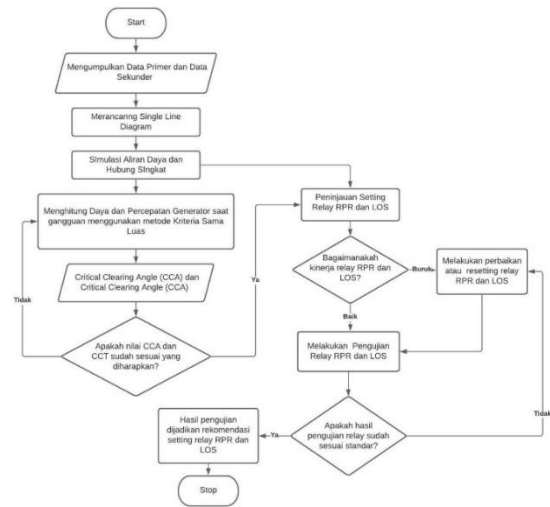
Stabilitas sistem tenaga listrik merupakan kemampuan dari sebuah sistem tenaga listrik untuk kembali dalam kondisi normal setelah mengalami gangguan baik gangguan dengan skala kecil maupun gangguan besar[7]. Menjaga stabilitas sistem sangat penting karena ketika sistem mengalami ketidakstabilan maka akan mengganggu proses penyediaan tenaga listrik dari pembangkit hingga ke konsumen.

Ketika terjadi gangguan besar terutama gangguan yang besar seperti gangguan 3 fasa pada saluran transmisi interkoneksi 150 kV sangat berdampak pada stabilitas transient sistem. Untuk melindungi sistem akibat dari keadaan transien, maka perlu digunakan rele pengaman untuk mendeteksi adanya gangguan dan men-*trigger* *Circuit Breaker* (CB) untuk melepas gangguan dari sistem[8]. *Setting* waktu pada rele pengaman haruslah tepat agar dapat menyelamatkan peralatan – peralatan penting terutama generator agar generator jangan sampai lepas sinkron. Maka dari itu diperlukan perhitungan dan analisis untuk menentukan waktu pemutusan kritis agar dalam menyeting waktu pada rele proteksi kurang dari waktu pemutusan kritis atau sama dengan waktu pemutusan kritis.

2. Metode

2.1. Langkah Penelitian

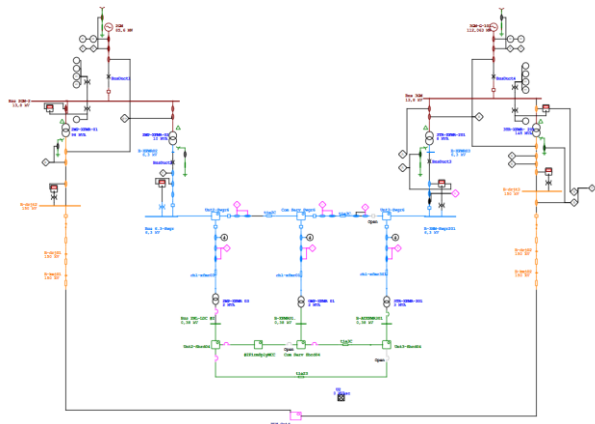
Tugas akhir ini dijalankan atas beberapa tahap penelitian. Diagram alir ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.2. Data Penelitian

2.2.1. Single Line Diagram



Gambar 2. Single line diagram PLTP Darajat menggunakan ETAP 12.6

2.2.2. Generator 2GM

A. Rating Generator

Tabel 1. Rating Generator

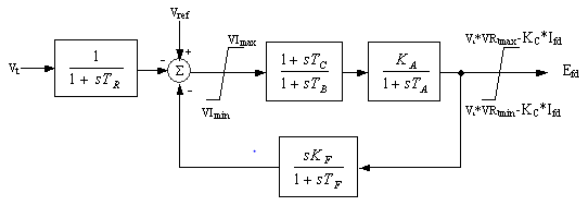
Parameter	Nilai
MW	85,6
kV	13,8
%PF	85
MVA	100,706
%Efficiency	95
Poles	2
RPM	3000

B. Rating Penggerak Mula

Tabel 2. Rating Penggerak mula

Kondisi	HP	MW
Continuous	114791	85,6
Peak	114791	85,6

C. Exciter



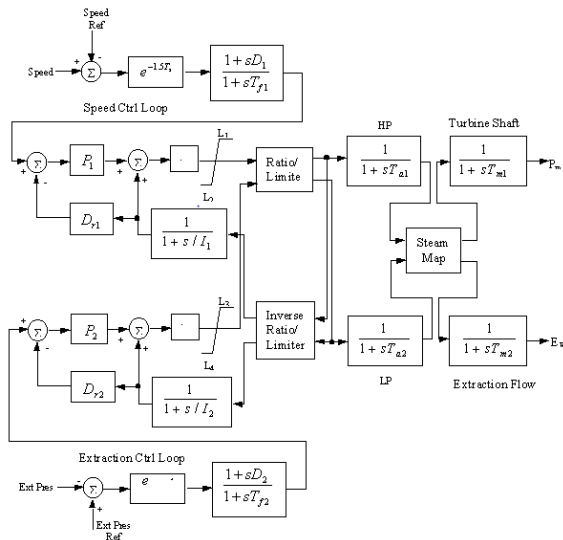
Gambar 3. Model Exciter dan AVR ST1

Tabel 3. Data Exciter dan AVR

Parameter	Nilai (p.u.)
VRmax	4,6
VRmin	0
Vlmax	2,4
Vlmin	-2,4
KA	52
KC	0,05
KF	0,114
TA	0,01
TB	0,92
TC	0
TF	0,6
TR	0

D. Governor

E.



Gambar 4. Governor turbin uap Woodward 505 and 505E (505)

Tabel 4. Parameter Governor 505

Parameter	Nilai	Unit	Keterangan
Mode	Droop	-	Droop atau Isoch
Droop1	4	%	Droop kecepatan keadaan stabil
Droop2	4	%	Droop ekstraksi loop
Efmax	162	T/Hr	Maksimum aliran ekstraksi
ExtFlow	1	%	Aliran ekstraksi turbin
ExtPress	1	%	Tekanan ekstraksi
HPa	84	T/Hr	Ekstraksi minimum @daya maksimum
HPb	172	T/Hr	Ekstraksi maksimum @daya minimum
HPc	30	T/Hr	Ekstraksi minimum @daya minimum
Hpmax	172	T/Hr	Maksimum Aliran HP
I1 <D>	6	%	Kecepatan loop integral (mode Droop)
I1 <I>	6	%	Kecepatan loop integral gain di (mode Isoch)
I2	6	%	Ekstraksi loop integral gain
L1	100	%	Batas atas untuk output loop kecepatan
L2	-30	%	Batas bawah untuk output loop kecepatan
L3	100	%	Batas atas untuk output loop ekstraksi
L4	0	%	Batas bawah untuk output loop ekstraksi
P1 <D>	3	%	Penguatan proporsional loop kecepatan (mode Droop)
P1 <I>	3	%	Penguatan proporsional loop kecepatan (mode Isoch)
P2	3	%	Penguatan ekstraksi loop proporsional
RampRate	0,03	%/Sec.	Kecepatan referensi Ramp rate
Sa	24865	kW	Daya maksimum @ekstraksi minimum
Sb	9600	kW	Daya minimum @ekstraksi maksimum
Sc	-400	kW	Daya minimum @ekstraksi minimum
SDR1	5	%	Parameter kecepatan loop (mode Droop)
SDR1 <I>	5	%	Parameter kecepatan loop (mode Isoch)
SDR2	5	%	Parameter ekstraksi loop
Smax	31235	kW	Daya maksimum
Ta1	1	Sec.	Konstanta waktu aktuatur katup HP
Ta2	1	Sec.	Konstanta waktu aktuatur katup LV
Tm1	1	Sec.	Konstanta waktu turbin (output daya poros)
Tm2	1	Sec.	Konstanta waktu turbin (aliran ekstraksi)
TS	0,015	Sec.	Waktu sampel pengontrol

2.2.3. Generator 3GM-G-101

A. Rating Generator

Tabel 5. Rating Generator

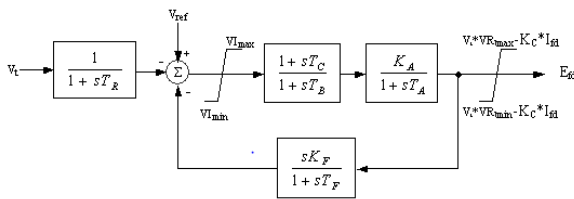
Parameter	Nilai
MW	112,063
kV	13,8
%PF	81,5
MVA	137,5
%Efficiency	95
Poles	2
RPM	3000

B. Rating Penggerak Mula

Tabel 6. Rating penggerak mula

Kondisi	HP	MW
Continuous	114791	85,6
Peak	114791	85,6

C. Exciter



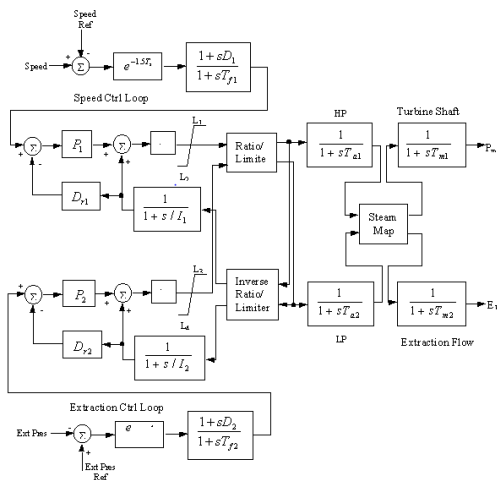
Gambar 5. Model Exciter dan AVR ST1

Tabel 7. Data Exciter dan AVR

Parameter	Nilai (p.u.)
VRmax	4,6
VRmin	0
VImax	2,4
Vimin	-2,4
KA	52
KC	0,05
KF	0,114
TA	0,01
TB	0,92

L1	100	%	Batas atas untuk output loop kecepatan
L2	-30	%	Batas bawah untuk output loop kecepatan
L3	100	%	Batas atas untuk output loop ekstraksi
L4	0	%	Batas bawah untuk output loop ekstraksi
P1 <D>	3	%	Penguatan proporsional loop kecepatan (mode Droop)
P1 <I>	3	%	Penguatan proporsional loop kecepatan (mode Isoch)
P2	3	%	Penguatan ekstraksi loop proporsional
RampRate	0,03	%/Sec.	Kecepatan referensi Ramp rate
Sa	24865	kW	Daya maksimum @ekstraksi minimum
Sb	9600	kW	Daya minimum @ekstraksi maksimum
Sc	-400	kW	Daya minimum @ekstraksi minimum
SDR1	5	%	Parameter kecepatan loop (mode Droop)
SDR1 <I>	5	%	Parameter kecepatan loop (mode Isoch)
SDR2	5	%	Parameter ekstraksi loop
Smax	31235	kW	Daya maksimum
Ta1	1	Sec.	Konstanta waktu aktuatur katup HP
Ta2	1	Sec.	Konstanta waktu aktuatur katup LV
Tm1	1	Sec.	Konstanta waktu turbin (output daya poros)
Tm2	1	Sec.	Konstanta waktu turbin (aliran ekstraksi)
TS	0,015	Sec.	Waktu sampel pengontrol

D. Governor



Gambar 6. Governor turbin uap Woodward 505 and 505E (505)

Tabel 8. Parameter Governor 505

Parameter	Nilai	Unit	Keterangan
Mode	Droop	-	Droop atau Isoch
Droop1	4	%	Droop kecepatan keadaan stabil
Droop2	4	%	Droop ekstraksi loop
Efmax	162	T/Hr	Maksimum aliran ekstraksi
ExtFlow	1	%	Aliran ekstraksi turbin
ExtPress	1	%	Tekanan ekstraksi
HPa	84	T/Hr	Ekstraksi minimum @daya maksimum
HPb	172	T/Hr	Ekstraksi maksimum @daya minimum
HPc	30	T/Hr	Ekstraksi minimum @daya minimum
Hpmax	172	T/Hr	Maksimum Aliran HP
I1 <D>	6	%	Kecepatan loop integral (mode Droop)
I1 <I>	6	%	Kecepatan loop integral gain di (mode Isoch)
I2	6	%	Ekstraksi loop integral gain

3. Hasil dan Analisis

3.1. Hasil Perhitungan CCA dan CCT

Berdasarkan rumus yang diadopsi menggunakan teori 2 saluran (*double circuit*) [9], Berikut hasil perhitungan untuk CCA dan CCT di lokasi gangguan tengah saluran transmisi di Bus KMJ 2

Diketahui :

A. Saluran Transmisi Generator Unit 2

$$\begin{aligned}
 H &= 4,658 \text{ H} \\
 X'_d &= 0,25 \text{ pu} \\
 P_e &= 85,6 \text{ MW} \\
 Q &= 17,382 \text{ MVar} \\
 V &= 13,8 \text{ kV} \\
 MVA_{base} &= 100,706 \\
 KV_{base} &= 13,8 \\
 \text{Trafo :} \\
 Z &= 0,127 \text{ pu} \\
 X &= 40 \\
 R &= 40
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 MVA &= 96 \\
 X &= j12,696 \% \\
 R &= 0,1317 \% \\
 Z_{base} &= \frac{(13,8)^2}{100,706} \\
 &= 1,63 \Omega
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{base} &= \frac{(150)^2}{100,706} \\
 &= 223,42 \Omega
 \end{aligned}$$

$$P_{ebase} = \frac{85,6}{100,706} = 0,85 \text{ pu}$$

$$Q_{base} = \frac{17,382}{100,706} = 0,173 \text{ pu}$$

$$\begin{aligned}
 Z_{base \text{ trafo}} &= 0,127 \times \left(\frac{13,8}{13,8}\right)^2 \times \frac{100,706}{96} \\
 &= 0,133 \text{ pu}
 \end{aligned}$$

$$X_{base\ trafo} = 0,12696 \times \left(\frac{13,8}{13,8}\right)^2 \times \frac{100,706}{96} = 0,133 pu$$

Saluran 1 :

$$Z_1 = Z_2 = (0,0685 + j0,2045); L = 0,1 km$$

$$Z_0 = (0,2185 + j0,6135); L = 0,1 km$$

Saluran 2 :

$$Z_1 = Z_2 = (0,0685 + j0,2045); L = 1,2 km$$

$$Z_0 = (0,2185 + j0,6135); L = 1,2 km$$

Saluran (1)(2):

$$(0,0685 + j0,2045)(1,3) = \frac{0,08905 + j0,26585}{1,63\Omega}$$

$$= 0,172\angle 71,48$$

$$= 0,0546 + j0,163$$

Saluran 3 :

$$Z_1 = Z_2 = (0,057151 + j0,15535); L = 0,1 km$$

$$Z_0 = (0,41732 + j1,2029); L = 0,1 km$$

$$\frac{0,0057151 + j0,015535}{1,63} = 0,01015\angle 69,797$$

$$= 3,5 \times 10^{-3} + 9,52 \times 10^{-3}$$

$$X_{L1} = 0,163 \times \left(\frac{13,8}{150}\right)^2 \times \left(\frac{100,076}{100,076}\right) = 1,38 \times 10^{-3}$$

$$X_{L2} = 9,52 \times 10^{-3} \times \left(\frac{13,8}{150}\right)^2 \times \left(\frac{100,076}{100,076}\right) = 8,06 \times 10^{-5}$$

$$I = \frac{S^*}{V^*} = \frac{P_e - jQ}{V^*} = \frac{0,85 - j0,173}{1}$$

$$= 0,85 - j0,173$$

$$X_{sebelum\ gangguan} = X'_d + X_T + X_{L1} + X_{L2} = 0,25 + 0,133 + 1,38 \times 10^{-3} + 8,06 \times 10^{-5} = 0,3844606$$

$$E' = V + jX I = 1,0 + ((j0,03325)(0,85 - j0,173)) = 1,006149272\angle 1,6096369 \cong 1,00615\angle 1,61$$

$$P_{maks} \sin\delta = \frac{|E'| |V|}{X_{sebelum}} = \frac{(1,00615)(1,0)}{0,3844606} = 2,617 \sin\delta$$

$$2,617 \sin\delta = 0,85$$

$$\sin\delta = \frac{0,85}{2,617} = 0,3248$$

$$\delta_0^* = \sin^{-1}(0,3248) = 18,95345849^\circ = 0,33 rad$$

$$\delta_{max} = 180^\circ - 18,95345849^\circ = 161,0465415 = 2,81 rad$$

$$\cos\delta_k = \frac{0,85}{2,617} (2,81 - 0,33) + \cos 161,0465415^\circ$$

$$= 0,805 + (-0,945)$$

$$= -0,14$$

$$\delta_k = \cos^{-1}(-0,14) = 98,04 derajat = 96,55^\circ$$

$$= 1,728 rad = 1,68 rad$$

$$t_k = \sqrt{\frac{2H(\delta_k - \delta_0)}{\pi \cdot f_0 \cdot P_m}} = \sqrt{\frac{2 \times 4,658(1,728 - 0,33)}{\pi \times 50 \times 0,85}}$$

$$= 0,31 s$$

Berikut hasil perhitungan untuk CCA dan CCT di lokasi gangguan tengah saluran transmisi dari generator unit 3[9]:

B. Saluran Transmisi Generator 3

$$H = 5,25 H$$

$$X'_d = 0,22 pu$$

$$P_e = 112,063 MW$$

$$Q = 22,763 MVar$$

$$V = 13,8 kV$$

$$MVA_{base} = 100,706$$

$$KV_{base} = 13,8 KV$$

Trafo :

$$Z = 0,105 pu$$

$$\frac{X}{R} = 42$$

$$MVA = 145MVA$$

$$X = j0,105$$

$$R = 0,0025$$

$$Z_{base} = \frac{(13,8)^2}{100,706}$$

$$= 1,63 \Omega$$

$$P_{ebase} = \frac{112,063}{100,706} = 1,1127 pu$$

$$Q_{base} = \frac{22,763}{100,706} = 0,226 pu$$

$$X_{base\ trafo} = 0,105 \times \left(\frac{13,8}{13,8}\right)^2 \times \left(\frac{100,706}{145}\right)$$

$$= 0,0729 pu$$

Saluran 1 :

$$Z_1 = Z_2 = (0,05751 + j0,15535); L = 0,1 km$$

$$Z_0 = (0,41732 + j1,12029); L = 0,1 km$$

Saluran 2 :

$$Z_1 = Z_2 = (0,05751 + j0,15535); L = 14 km$$

$$Z_0 = (0,41732 + j1,12029); L = 14 km$$

Saluran 3 :

$$Z_1 = Z_2 = (0,057151 + j0,15535); L = 0,1 km$$

$$Z_0 = (0,41732 + j1,2029); L = 0,1 km$$

Saluran (1)(2)(3):

X_L 1,2,3 Lama

$$X_L = 14,2(0,05751 + j0,15535)$$

$$= 0,165\angle 69,68^\circ (14,2)$$

$$= 2,343\angle 69,68^\circ = 0,813 + j2,197$$

X_L 1, 2, 3 Baru

$$X_L = 2,197 \times \left(\frac{13,8}{150}\right)^2 \times \left(\frac{100,076}{100,076}\right) = 0,018595 pu$$

$$I = \frac{S^*}{V^*} = \frac{P_e - jQ}{V^*} = \frac{1,27 - j0,226}{1}$$

$$= 1,27 - j0,226$$

$$X_{sebelum\ gangguan} = X'_d + X_T + X_{L123}$$

$$= 0,22 + 0,0729 + 0,018595$$

$$= 0,311495$$

$$E' = V + jX \cdot I = 1 + ((j0,311495)(1,27 - j0,226))$$

$$= 1,0 + (0,311495\angle 90^\circ \times 1,29\angle -10,09^\circ)$$

$$= 0,40182\angle 79,91^\circ + 1,0$$

$$= 0,07039 + j0,395 + 1,0$$

$$= 1,07039 + j0,395$$

$$= 1,14\angle 20,25^\circ$$

$$P_{maks} \sin \delta = \frac{|E'| |V|}{X_{Sebelum}} = \frac{(1,14)(1,0)}{0,311495} = 3,6597 \sin \delta$$

$$3,6597 \sin \delta = 1,27$$

$$\sin \delta = \frac{1,27}{3,617} = 0,347$$

$$\delta = 20,30^\circ$$

$$= 0,354 \text{ rad}$$

$$\delta_{max} = 180^\circ - 20,30^\circ = 159,70^\circ$$

$$= 2,7873 \text{ rad}$$

$$\cos \delta_k = \frac{1,27}{3,6597} (2,7873 - 0,347)$$

$$= -0,0914$$

$$\delta_k = \cos^{-1}(-0,0914) = 95,244^\circ$$

$$= 1,66 \text{ rad}$$

$$t_k = \sqrt{\frac{2H(\delta_k - \delta_0)}{\pi \cdot f_0 \cdot P_m}} = \sqrt{\frac{2 \times 5,25(1,66 - 0,354)}{\pi \times 50 \times 1,27}}$$

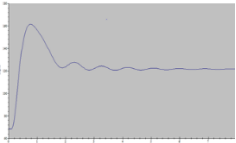
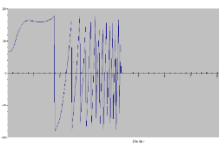
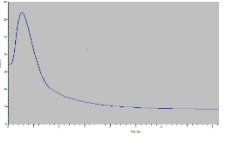
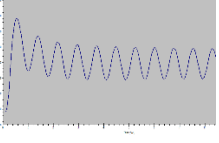
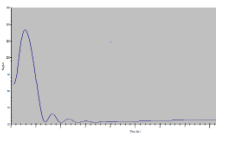
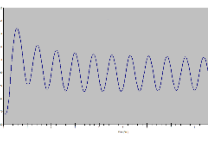
$$= 0,262 \text{ s}$$

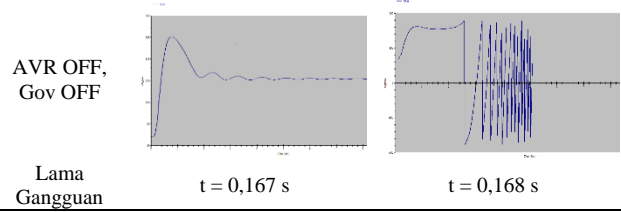
3.2. Analisis Transient Stability

Berdasarkan hasil perhitungan sudut pemutusan kritis (Critical Clearing Angle)[10] yang kemudian digunakan untuk mendapatkan waktu pemutusan kritis (Critical Clearing Time)[11] pada subbab 4 yaitu untuk gangguan ditengah saluran transmisi dari generator 2GM ialah 0,31 detik dan untuk gangguan di tengah saluran transmisi dari generator 3GM – G – 101 ialah 0,262 detik.

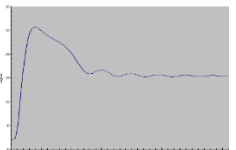
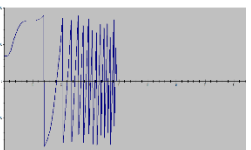
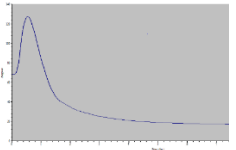
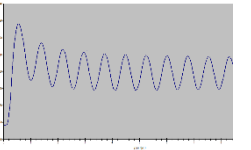
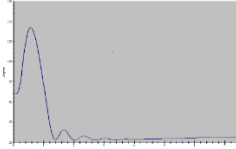
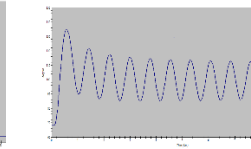
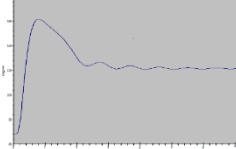
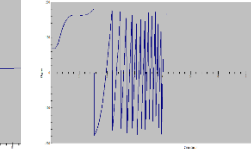
A. Generator 2GM

Tabel 9. Grafik hasil simulasi gangguan di tengah saluran transmisi 150 kV

Kasus	Hasil Simulasi	
	Kondisi Stabil	Kondisi Tidak Stabil
AVR ON, Governor OFF		
Lama Gangguan	t = 0,153 s	t = 0,154 s
AVR OFF, Governor ON		
Lama Gangguan	t = 0,173 s	t = 0,174 s
AVR ON, Governor ON		
Lama Gangguan	t = 0,164 s	t = 0,165 s

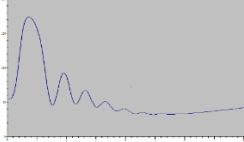
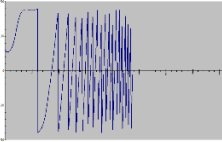
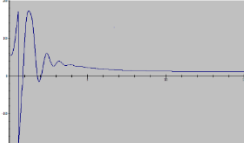
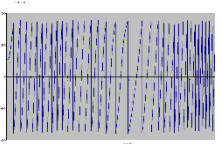


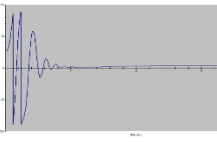
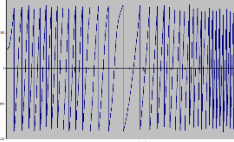
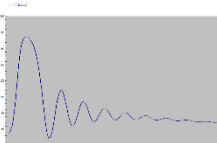
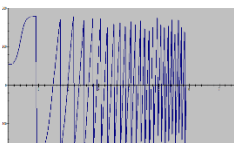
Tabel 10. Grafik hasil simulasi gangguan di ujung saluran transmisi 150 kV

Kasus	Hasil Simulasi	
	Kondisi Stabil	Kondisi Tidak Stabil
AVR ON, Govern or OFF		
Lama Gangguan	t = 0,154 s	t = 0,155 s
Govern or ON, AVR OFF		
Lama Gangguan	t = 0,173 s	t = 0,174 s
AVR ON, Govern or ON		
Lama Gangguan	t = 0,165 s	t = 0,166 s
AVR OFF, Govern or OFF		
Lama Gangguan	t = 0,168 s	t = 0,169 s

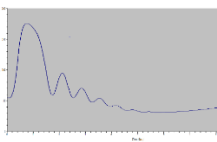
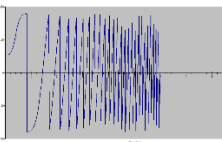
B. Generator 3GM-G-101

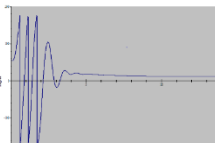
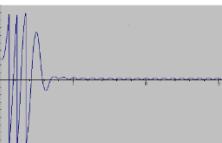
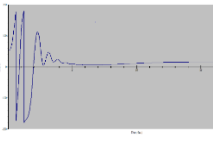
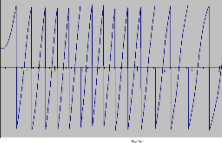
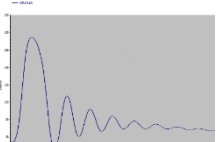
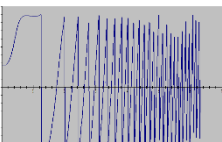
Tabel 11. Grafik hasil simulasi gangguan di tengah saluran transmisi 150 kV

Kasus	Hasil Simulasi	
	Kondisi Stabil	Kondisi Tidak Stabil
AVR ON, Governor OFF		
Lama Gangguan	t = 0,313 s	t = 0,314 s
Governor ON, AVR OFF		
Lama Gangguan	t = 0,689 s	t = 0,69 s

AVR ON, Governor ON		
Lama Gangguan	t = 0,684 s	t = 0,685 s
AVR OFF, Governor OFF		
Lama Gangguan	t = 0,316 s	t = 0,317 s

Tabel 12. Grafik hasil simulasi gangguan di ujung saluran transmisi 150 kV

Kasus	Hasil Simulasi	
	Kondisi Stabil	Kondisi Tidak Stabil
AVR ON, Governor OFF		
Lama Gangguan	t = 0,321 s	t = 0,322 s

Governor ON, AVR OFF		
Lama Gangguan	t = 0,898 s	t = 0,899 s
AVR ON, Governor ON		
Lama Gangguan	t = 0,698 s	t = 0,699 s
AVR OFF, Governor OFF		
Lama Gangguan	t = 0,323 s	t = 0,324 s

3.3. Rekomendasi Reverse Power Relay

Rele ini berfungsi sebagai anti *motoring*, artinya digunakan untuk mengamankan generator dari gangguan hilangnya penggerak mula (turbin uap) yang mengakibatkan generator dapat berubah menjadi motor[12]. Rele daya balik ini dapat mendeteksi aliran daya ke generator dan melepas generator sebelum penggerak mula mengalami kerusakan[13].

Berikut langkah – langkah untuk menghitung *setting* rele daya balik (32) :

1. Menentukan daya motoring generator.
 $D_p = 0,5\% \times \text{MW Generator}$ [14]
2. Menentukan daya motoring sekunder 3 fasa.
 $D_s = \frac{\text{Daya motoring primer}}{(CT \text{ Ratio}) \times (PT \text{ Ratio})}$
3. Menentukan setting pickup
4. Menentukan waktu tunda
 Berdasarkan IEEE C37.102-2006[15], waktu tunda rele daya balik disetting pada 30 detik.

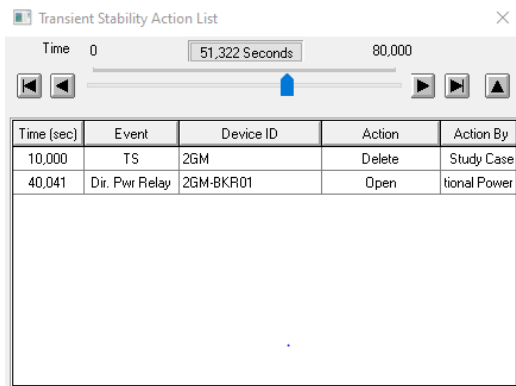
Dari perhitungan di atas didapatkan setting rele daya balik baik untuk generator unit 2 maupun unit 3 seperti pada Tabel 13 berikut ini

Tabel 13. Hasil perhitungan *setting* rele daya balik 32G

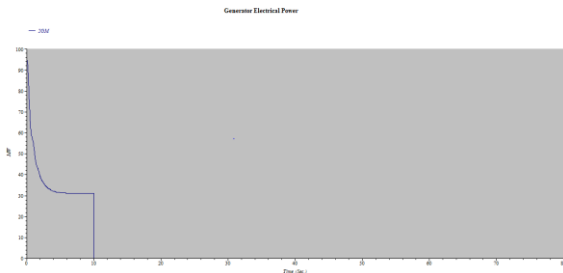
Keterangan	Setting
Pick Up tap (W)	3
Waktu Tunda (Maks)	30 Detik

3.3.1. Pengujian RPR

A. Generator 2 GM



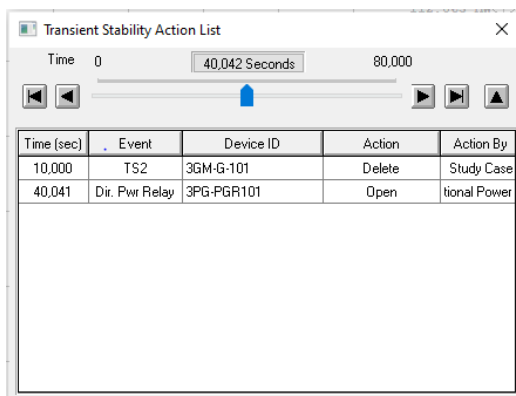
Gambar 7. Hasil Simulasi *Transient Stability*



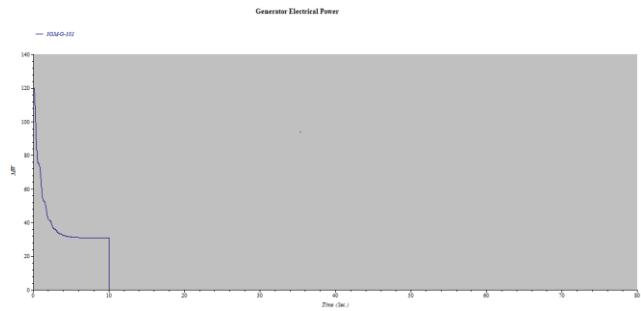
Gambar 8. Kurva daya aktif generator 3GM – G – 101

Berdasarkan gambar 7 hasil simulasi *transient stability* menunjukkan adanya rele daya balik bekerja dengan baik menghalau adanya daya balik sehingga dapat kita lihat pada gambar 8 tidak adanya daya balik yang menuju generator karena sudah diputus oleh rele daya balik (32) pada detik ke 40,041 detik. Dapat kita simpulkan bahwasannya rele bekerja sesuai setting hasil perhitungan pada pembahasan sebelumnya.

B. Generator 3GM-G-101



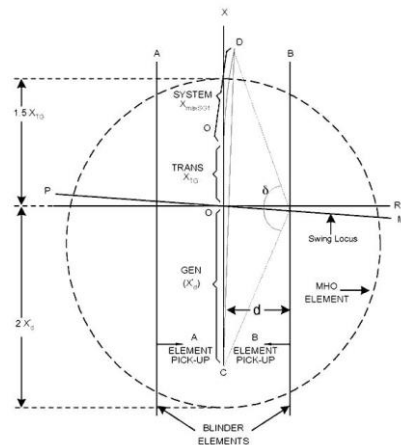
Gambar 9. Hasil simulasi *transient stability*



Gambar 10. Kurva daya aktif generator 3GM – G – 101

Berdasarkan hasil simulasi transient stability dapat kita lihat pada gambar 9 bahwasannya rele daya balik (32) bekerja sesuai setting. Waktu tunda yang disetting pada rele daya balik yaitu 30 detik, sudah mengacu sesuai standar IEEE C37.102-2006[15]. Maka dapat kita simpulkan bahwasannya hasil perhitungan yang diinputkan untuk setting rele daya balik berdampak pada kinerja rele tersebut menjadi efisien. Kinerja yang efisien dapat kita lihat berdasarkan gambar 10 bahwasannya generator tidak mengalami peristiwa motoring atau menerima daya balik dari sistem. Hal ini menunjukkan bahwasannya rele sudah bekerja sesuai dengan setting rele.

3.4. Rekomendasi *Setting Rele Loss of Synchronism*



Gambar 11. Karakteristik Loss of synchronism[15]

Kemudian kita cari parameter yang dibutuhkan untuk membentuk karakteristik rele *loss of synchronism* untuk masing – masing generator :

A. Generator 2GM

$$\begin{aligned}
 X_{base} &= 17,56 \Omega \\
 X'_d &= 0,25 \times 17,56 = 4,39 \Omega \\
 X_{TG} &= 0,127 \times 17,56 = 2,23 \Omega \\
 diameter &= (2 \times X'_d + 1,5 \times X_{TG}) \\
 diameter &= (2 \times 4,39 + 1,5 \times 2,23) \\
 diameter &= 12,125 \Omega \\
 X_{maxSG1} &= 0,04035 \times 17,56 = 0,7086 \Omega, \beta = 90^\circ
 \end{aligned}$$

$$d = \frac{(X'_d + X_{TG} + X_{maxSG1})/2}{2} \times \tan\left(90 - \left(\frac{\delta}{2}\right)\right)$$

$$d = \frac{(4,39 + 2,23 + 0,7086)}{2} \times \tan\left(90 - \left(\frac{120}{2}\right)\right)$$

$$d = 2,115 \Omega$$

B. Generator 3GM – G – 101

$$X_{base} = 17,56 \Omega$$

$$X'_d = 0,22 \times 17,56 = 3,86 \Omega$$

$$X_{TG} = 0,105 \times 17,56 = 1,844 \Omega$$

$$diameter = (2 \times X'_d + 1,5 \times X_{TG})$$

$$diameter = (2 \times 3,86 + 1,5 \times 1,844)$$

$$diameter = 10,486 \Omega$$

$$X_{maxSG1} = 0,04035 \times 17,56 = 0,7086 \Omega, \beta = 90^\circ$$

$$d = \frac{(X'_d + X_{TG} + X_{maxSG1})/2}{2} \times \tan\left(90 - \left(\frac{\delta}{2}\right)\right)$$

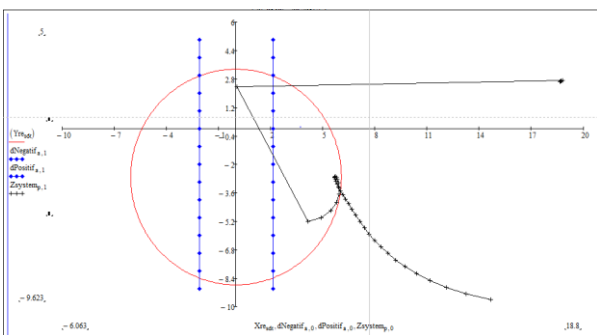
$$d = \frac{(3,86 + 1,844 + 0,7086)}{2} \times \tan\left(90 - \left(\frac{120}{2}\right)\right)$$

$$d = 1,85 \Omega$$

3.4.1. Pengujian Rele LOS

Untuk dilakukan pengujian mengenai kinerja rele *loss of synchronism*, perlu dilakukan pengambilan data respon impedansi generator melalui kejadian hubung singkat 3 fasa di tengah saluran transmisi dari generator 2GM maupun dari generator 3GM – G – 101. Untuk study kasus yang diamati yaitu ketika kondisi *existing* generator yaitu *exciter* (AVR) dan *governor* bekerja, kemudian pengkondisian ketika *exciter* dan *governor* dianggap belum bekerja atau mati.

Berikut hasil pengujian kinerja rele *loss of synchronism* apakah sudah efisien dalam memproteksi keadaan *loss of synchronism* dan sudah sesuai dengan standar waktu pemutusan pada IEEE C37.102-2006 yaitu antara 40 milidetik hingga 100 milidetik untuk mendekteksi adanya ayunan pada generator dengan cepat[15].



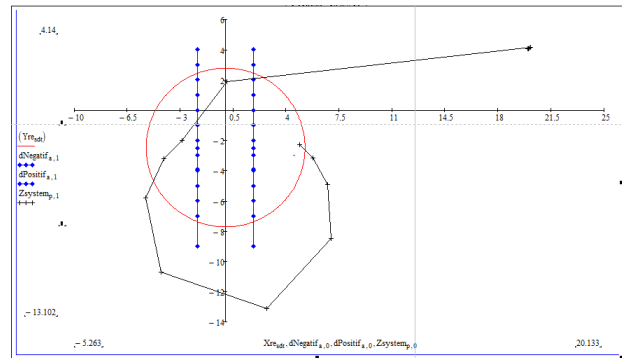
Gambar 12. Hasil Plot Pengujian Rele *Loss of Synchronism* Gangguan di tengah saluran transmisi generator 2GM

Kondisi *existing* generator 2GM yaitu *exciter* (AVR) dan *governor* dianggap bekerja secara normal. Dalam hasil pengujian sesuai gambar 12 menggunakan data respon

perubahan impedansi pada generator 2GM ketika *exciter* dan *governor* bekerja ketika diberikan gangguan hubung singkat di tengah saluran transmisi. Pada hasil *plot* gambar 4.18 menggunakan satuan dalam bentuk Ohm.

Berdasarkan gambar 12 hasil pengujian didapatkan ketika respon imedansi tepat menyentuh *element pick-up* yaitu ketika R=0,0627 dan X=2,351. Ketika respon impedansi bersentuhan tepat dengan *element pick-up* disitulah waktu pemutusan yang cepat dan tepat karena merespon ketika terjadi gangguan pada waktu 0,1 detik atau 100 milidetik maka setting rele *loss of synchronism* sudah sesuai dengan standar IEEE C37.102-2006 mengenai standar rele proteksi generator.

Kemudian berikut hasil pengujian untuk rele *loss of synchronism* pada generator 3GM – G – 101 ketika terjadi hubung singkat di tengah saluran :



Gambar 13. Hasil Plot Pengujian Rele *Loss of Synchronism* Gangguan di tengah saluran transmisi generator 3GM - G – 101

Berdasarkan hasil uji kinerja rele *loss of synchronism*, pada gambar 13 dapat dilihat ketika respon impedansi dari generator 3GM – G – 101 ketika bersinggungan dengan *element pick-up* pada awal terjadi gangguan yaitu nilai resistansinya ialah 0,1 dan nilai reaktansinya ialah 1,88 mendekati angka dua jika terjadi pembulatan, maka waktu tepat ketika bersinggungan ialah 0,1 detik atau 100 ms. Hal ini menunjukkan bahwasannya rele sudah bekerja secara efektif ketika adanya kondisi *loss of synchronism*. Hal ini dibuktikan pada gambar 13 dan telah sesuai standar IEEE C37.102-2006.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, maka dapat kita simpulkan bahwasannya ketika waktu pemutusan kritis (CCT) yang terbaik ialah ketika respon *exciter* dan *governor* dianggap belum bekerja. Kemudian berdasarkan titik pengujian hubung singkat pada saluran transmisi, semakin dekat dekat generator maka CCT akan semakin cepat dari pada ketika terjadi gangguan hubung singkat pada lokasi terjauh.

Berdasarkan hasil analisis waktu pemutusan kritis pada analisis stabilitas transien dapat kita simpulkan bahwasannya waktu CCT sebagai referensi dalam *setting* rele proteksi. Kemudian diberikan rekomendasi dalam *setting* rele proteksi daya balik dan rele *loss of synchronism* berdasarkan CCT. Sehingga didapatkan waktu *setting* rele harus *disetting* dibawah waktu pemutusan kritis (CCT). Sehingga ketika terjadi gangguan hubung singkat sistem akan kembali stabil seperti sebelum terjadi gangguan.

Referensi

- [1] A. J. Wood and F. Bruce, *POWER GENERATION OPERATION AND CONTROL*, Second. United States of America: John Willey & Sons, Inc., 1996.
- [2] SPLN 64, "Petunjuk Pemilihan dan Penggunaan Pelebur Pada Sistem Distribusi Tegangan Menengah," SPLN 64, 1985.
- [3] IEEE, *Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power System*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2001.
- [4] P. Kundur, "Power System Stability and Control." McGraw-Hill, New York, 1993.
- [5] C. Cekdin, *Teori Singkat Teknik Elektro Disertai Contoh Soal dan Penyelesaian*. Yogyakarta: Penerbit ANDI, Anggota IKAPI, 2016.
- [6] Sulasno, *Analisis Sistem Tenaga Listrik*. Semarang: Satya Wacana, 1993.
- [7] H. M. Robert and H. M. James, *Power System Operation*. New York: McGraw-Hill, 1994.
- [8] Slamet, "Estimasi waktu dan sudut pemutus kritis pada sistem tenaga listrik dengan metode luas sama," vol. 9, no. 1, pp. 53–60, 2010.
- [9] H. Saadat, "Power System Analysis," *Power System Analysis*. pp. 257–313, 1999.
- [10] J. K. Nøland, "Fast-response rotating brushless exciters for improved stability of synchronous generators," *Engineering Sci. Div. Electr.*, vol. Licentiate, no. June, 2016, doi: 10.13140/RG.2.1.1982.6164.
- [11] J. K. Noland and U. Lundin, "Step time response evaluation of different synchronous generator excitation systems," *2016 IEEE Int. Energy Conf. ENERGYCON 2016*, no. April 2016, 2016, doi: 10.1109/ENERGYCON.2016.7513956.
- [12] J. T. Blackburn, J. Lewis; Domin, *Protective Relaying Principles and Applications*, Third Edit., vol. 86, no. 30. Florida: CRC Press Taylor and Francis Group, 2014.
- [13] D. Reimert, *PROTECTIVE RELAYING FOR POWER GENERATION SYSTEMS*. New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2006.
- [14] IEC, "Calculation of Currents," IEC 60909-0, 2001.
- [15] P. E. S. Committee, *IEEE Std C37.102-2006 : Guide for AC Generator Protection*, vol. 2000, no. February. IEEE, 2007.