

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iv
PRAKATA.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	x
ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN.....	xii
ABSTRAK.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Penelitian.....	4
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Keaslian dan Kontribusi Penelitian	5
1.6 Manfaat Penelitian.....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI.....	9
2.1 Tinjauan Pustaka.....	9
2.2 Landasan Teori	11
2.2.1 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik	11
2.2.2 Transient Stability.....	13
2.2.3 Inersia Sistem dan Penetrasi PV	14
2.2.4 <i>Critical Clearing Time</i>	15
2.2.5 <i>Critical Clearing Time</i> Menggunakan Metode Numeris <i>Bisection</i>	17
2.2.6 <i>Single Machine Infinite Bus</i>	18
2.2.7 Pemodelan Dinamis <i>Grid-Following Inverter</i>	19
2.2.8 Pemodelan Dinamis <i>Grid-Forming Inverter</i> Berbasis VSG.....	24
BAB III METODE PENELITIAN	29
3.1 Alat dan Bahan	29
3.1.1 Alat Penelitian	29
3.1.2 Bahan	29
3.2 Alur Penelitian.....	30
3.3 Model Sistem SMIB	31
3.3.1 Sistem SMIB dengan Generator Sinkron dan PV <i>Grid-following</i> (GFL).....	32
3.3.2 Sistem SMIB berbasis PV <i>Grid-Forming</i> (GFM).....	32
3.4 Pemodelan Sistem dan Parameter.....	34
3.4.1 Parameter Generator Sinkron	34
3.4.2 Parameter Sistem PV <i>Grid-following</i> (GFL).....	36

3.4.3 Parameter Sistem PV <i>Grid-Forming</i> (GFM).....	40
3.5 Skenario Simulasi	43
3.6 Metode Penentuan <i>Critical Clearing Time</i> (CCT)	46
3.7 Analisis Data.....	48
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	49
4.1 Validasi Model Sistem (Tanpa Gangguan)	49
4.1.1 Validasi Sistem SMIB dengan <i>Grid-following</i> (GFL)	49
4.1.2 Validasi Sistem SMIB dengan <i>Grid-Forming</i> (GFM)	52
4.2 Analisis Stabilitas Transien Sistem SMIB dengan PV <i>Grid-following</i> (GFL). 55	
4.2.1 Pengaruh Variasi Penetrasi PV terhadap Nilai CCT	58
4.2.2 Pengaruh Lokasi Gangguan terhadap Nilai CCT	62
4.2.3 Pengaruh Parameter PLL terhadap Stabilitas Transien	64
4.3 Analisis Stabilitas Transien Sistem SMIB dengan PV <i>Grid-Forming</i> (GFM). 67	
4.3.1 Pengaruh Kombinasi Inersia Virtual dan <i>Damping</i> terhadap Nilai CCT 70	
4.3.2 Analisis Respon Dinamis pada Berbagai Skenario GFM.....	72
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	75
5.1 Kesimpulan.....	75
5.2 Saran	76
DAFTAR PUSTAKA	78
LAMPIRAN.....	83
L.1 Data Parameter Jaringan Transmisi dan Transformator Sistem SMIB PV GFL	
.....	83
L.2 Model Sistem Simulasi.....	84
L.3 Model Sistem Simulasi.....	86
L.4 Contoh Iterasi <i>Bisection</i>	92

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Standar Waktu Pemutusan Gangguan berdasarkan Aturan Jaringan Jawa-Madura-Bali 2007	17
Tabel 3.1 Parameter Model Generator PLTU Celukan Bawang Bali.....	36
Tabel 3.2 Parameter Sistem PV <i>Grid-following</i> (GFL).....	40
Tabel 3.3 Parameter Sistem PV <i>Grid-Forming</i> (GFM).....	42
Tabel 3.4 Hasil Konversi Parameter Inersia Virtual (J) dan Koefisien Redaman (D_p) ke Satuan Per-Unit	43
Tabel 3.5 Skenario Simulasi Sistem SMIB dengan PV <i>Grid-following</i> (GFL).....	44
Tabel 3.6 Variasi Parameter PLL pada Sistem PV <i>Grid-Following</i> (GFL)	45
Tabel 3.7 Skenario Simulasi Sistem SMIB dengan PV <i>Grid-Forming</i> (GFM).....	45
Tabel 4.1 Perbandingan parameter sistem pada berbagai penetrasi PV	52
Tabel 4.2 Skenario Variasi Penetrasi PV	58
Tabel 4.3 Pengaruh Variasi Penetrasi PV terhadap Nilai <i>Critical Clearing Time</i> (CCT) pada Sistem SMIB.....	59
Tabel 4.4 Skenario Variasi Lokasi Gangguan	62
Tabel 4.5 Pengaruh Lokasi Gangguan terhadap Nilai CCT pada Berbagai Penetrasi PV	62
Tabel 4.6 Pengaruh Parameter PLL terhadap Nilai CCT	65
Tabel 4.7 Variasi parameter inersia virtual dan <i>damping</i> terhadap nilai CCT	70
Tabel L.1 1 Parameter Saluran Transmisi Line 1 dan Line 2	83
Tabel L.1 2 Parameter Transformator Generator.....	83
Tabel L.1 3 Parameter Transformator PV GFL.....	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Klasifikasi <i>Power System Stability</i>	12
Gambar 2.2	Respons sudut rotor terhadap gangguan transien pada kondisi <i>Under CCT</i> dan <i>Exceed CCT</i>	14
Gambar 2.3	Kurva <i>Equal Area Criterion</i> (EAC) pada analisis stabilitas transien yang menunjukkan daerah percepatan (A1) dan perlambatan (A2)	16
Gambar 2.4	Struktur Kendali Inverter <i>Grid-following</i> (GFL) pada Sistem Tenaga.....	20
Gambar 2.5	Diagram Blok Kendali <i>Phase-Locked Loop</i> (PLL) pada Inverter <i>Grid- following</i>	21
Gambar 2.6	Struktur Kendali Inverter <i>Grid-Forming</i> (GFM) Berbasis VSG pada Sistem Tenaga	25
Gambar 3.1	<i>Flow Chart</i> Penelitian	30
Gambar 3.2	Model sistem <i>Single Machine Infinite Bus</i> (SMIB) dengan integrasi pembangkit <i>photovoltaic</i> (PV) berbasis <i>Grid-following</i> (GFL)	32
Gambar 3.3	Model sistem PV <i>Grid-Forming</i> berbasis VSG.....	33
Gambar 3.4	Diagram blok komponen utama dalam model sistem PV komposit yang diimplementasikan pada <i>DIgSILENT PowerFactory</i>	36
Gambar 3.5	Model <i>Phase-Locked Loop</i> (PLL) versi 3 pada Perangkat Lunak <i>DIgSILENT PowerFactory</i>	37
Gambar 3.6	Diagram blok pengendalian arus inverter PV menggunakan pengendali PI	38
Gambar 3.7	Struktur kontrol VSG berbasis APC dan RPC pada sistem <i>Grid-Forming</i>	41
Gambar 3.8	<i>Flow chart</i> metode penentuan CCT menggunakan algoritma <i>bisection</i>	47
Gambar 4.1	Respon sistem SMIB pada kondisi PV 0%.....	50
Gambar 4.2	Respon sistem SMIB pada kondisi PV 20%.....	50
Gambar 4.3	Respon sistem SMIB pada kondisi PV 40%.....	51
Gambar 4.4	Respon tegangan sumbu-d (V_d) pada sistem GFM tanpa gangguan.....	53
Gambar 4.5	Respon sudut rotor virtual (δ) pada sistem GFM tanpa gangguan	53
Gambar 4.6	Respon kecepatan rotor (ω) pada sistem GFM tanpa gangguan.....	54
Gambar 4.7	Respon sudut rotor pada kondisi stabil	55
Gambar 4.8	Respon kecepatan rotor pada kondisi stabil.....	56
Gambar 4.9	Respon sudut rotor pada kondisi tidak stabil.	57
Gambar 4.10	Respon kecepatan rotor pada kondisi tidak stabil.....	57
Gambar 4.11	Pengaruh penetrasi PV terhadap nilai <i>Critical Clearing Time</i> (CCT).....	60
Gambar 4.12	Respon sudut rotor pada variasi penetrasi PV	61
Gambar 4.13	Pengaruh lokasi gangguan terhadap nilai <i>Critical Clearing Time</i> (CCT) pada berbagai penetrasi PV	64
Gambar 4.14	Respon sudut rotor pada variasi <i>gain</i> proporsional K_p	65
Gambar 4.15	Respon sudut rotor pada variasi <i>gain</i> proporsional K_i	66
Gambar 4.16	Respon sudut rotor virtual pada kondisi stabil.....	67
Gambar 4.17	Respon kecepatan rotor virtual pada kondisi stabil	68

Gambar 4. 18 Respon sudut rotor virtual pada kondisi tidak stabil.....	68
Gambar 4. 19 Respon kecepatan rotor virtual pada kondisi tidak stabil	69
Gambar 4. 20 Respon sudut rotor virtual pada variasi <i>damping</i>	72
Gambar 4. 21 Respon sudut rotor virtual pada variasi inersia.....	72
Gambar L.2 1 model sistem SMIB PV GFL di <i>DIgSILENT PowerFactory</i>	84
Gambar L.2 2 diagram blok kontrol PV GFL di <i>DIgSILENT PowerFactory</i>	84
Gambar L.2 3 model sistem SMIB PV GFM di <i>MATLAB/Simulink</i>	85
Gambar L.2 4 diagram blok kontrol VSG di <i>MATLAB</i>	85
Gambar L.3 1 Sudut Rotor dan Kecepatan Rotor PV 0% Stabil (Sebelum CCT).....	86
Gambar L.3 2 Sudut Rotor dan Kecepatan Rotor PV GFL 20% Stabil (Sebelum CCT)86	
Gambar L.3 3 Sudut Rotor dan Kecepatan Rotor PV GFL 40% Stabil (Sebelum CCT)87	
Gambar L.3 4 Sudut Rotor dan Kecepatan Rotor PV GFL 40% Stabil (Setelah CCT) . 87	
Gambar L.3 5 Sudut Rotor Variasi Kp, Ki (5,2) PV GFL.....	88
Gambar L.3 6 Sudut Rotor Variasi Kp, Ki (45,2) PV GFL.....	88
Gambar L.3 7 Sudut Rotor GFM stabil sebelum CCT	89
Gambar L.3 8 Kecepatan Rotor GFM stabil sebelum CCT.....	89
Gambar L.3 9 Sudut Rotor GFM tidak stabil setelah CCT	90
Gambar L.3 10 Kecepatan Rotor GFM stabil setelah CCT	90
Gambar L.3 11 Sudut Rotor GFM variasi Dp sebelum CCT	91
Gambar L.3 12 Sudut Rotor GFM variasi J sebelum CCT.....	91
Gambar L.4 1 Contoh Simulasi Running SMIB PV GFL pada <i>DIgSilent Power Factory</i>	92
Gambar L.4 2 Contoh Simulasi Running SMIB PV GFM pada <i>Matlab</i>	92

ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

δ	Sudut rotor generator sinkron atau sudut rotor virtual inverter (rad)
δ_0	Sudut rotor awal sebelum gangguan (rad)
δ_c	Sudut rotor saat gangguan dibersihkan / sudut <i>clearing</i> (rad)
δ_{max}	Sudut rotor maksimum yang dicapai selama transien (rad/s)
ω	Kecepatan sudut rotor (rad/s)
ω_0	Kecepatan sudut nominal / sinkron sistem (rad/s)
ω_s	Kecepatan sudut referensi <i>grid</i> (rad/s)
ω_g	Kecepatan sudut keluaran GFM VSG (rad/s)
ω_{nom}	Kecepatan sudut nominal GFM VSG (rad/s)
θ	Sudut fasa keluaran PLL atau sudut referensi inverter (rad)
θ_s	Sudut keseimbangan stabil (rad)
θ_u	Sudut keseimbangan tidak stabil (rad)
θ_{cc}	Sudut kritis pembersihan gangguan (rad)
φ	Sudut impedansi jaringan (rad)
ε	Toleransi numeris algoritma <i>bisection</i> (s)
ψ_{1d}	Fluks pada sumbu-q (p.u.)
ψ_{2q}	Fluks pada sumbu-q (p.u.)
A_1	Luas daerah percepatan rotor pada <i>Equal Area Criterion</i>
A_2	Luas daerah perlambatan rotor pada <i>Equal Area Criterion</i>
C_f	Kapasitansi filter inverter GFM (mF)
D_p	Koefisien <i>damping</i> kontrol VSG (W·s/rad)
E'_d	Tegangan internal stator sumbu-d (p.u.)
E'_{fd}	Tegangan eksitasi medan (p.u.)
E_{max}	Batas maksimum keluaran AVR (p.u.)
E_{min}	Batas minimum keluaran AVR (p.u.)
E'_q	Tegangan internal stator sumbu-q (p.u.)
f_0	Frekuensi nominal sistem (Hz)
f_{max}	Batas frekuensi maksimum sistem (Hz)
f_{min}	Batas frekuensi minimum sistem (Hz)

H	Konstanta inersia generator sinkron (detik)
H_i	Konstanta inersia generator ke-i (detik)
H_{sys}	Konstanta inersia sistem rata-rata (detik)
I_d	Komponen arus inverter sumbu-d (A)
I_q	Komponen arus inverter sumbu-q (A)
J	Inersia virtual inverter VSG ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
K	Penguatan pengendali AVR (p.u.)
K_i	Gain integral <i>Phase-Locked Loop</i>
K_p	Gain proporsional <i>Phase-Locked Loop</i>
L_f	Induktansi filter inverter GFM (μH)
m_p	Koefisien <i>droop</i> daya aktif terhadap frekuensi
n_q	Koefisien <i>droop</i> reaktif kontrol GFM
P_e	Daya listrik keluaran generator (p.u.)
P_m	Daya mekanik masukan generator (p.u.)
P_{PV}	Daya aktif yang dihasilkan pembangkit PV (MW)
P_{rated}	Daya nominal inverter (W)
P_{SG}	Daya aktif yang dihasilkan generator sinkron (MW)
P_{TOTAL}	Total daya pembangkitan sistem (MW)
R_f	Resistansi filter inverter GFM (mOhm)
S_i	Kapasitas daya semu generator ke-i (MVA)
S_{SG}	Kapasitas daya semu generator sinkron (MVA)
T^*	Torsi referensi input VSG (Nm)
T'_{do}	Konstanta waktu rangkaian terbuka transien sumbu-d (s)
T''_{do}	Konstanta waktu rangkaian terbuka subtransien sumbu-d (s)
T_{em}	Torsi elektromagnetik VSG (Nm)
T''_{qo}	Konstanta waktu rangkaian terbuka subtransien sumbu-q (s)
t_{cc}	<i>Critical Clearing Time</i> - batas waktu pembersihan gangguan kritis (s)
t_{max}	Batas atas interval waktu pada algoritma <i>bisection</i> (s)
t_{min}	Batas bawah interval waktu pada algoritma <i>bisection</i> (s)
V_{dc}	Tegangan sisi DC inverter (V)

V_g	Tegangan grid (V)
V_q	Komponen tegangan sumbu-q di titik PCC (V)
V_{ref}	Tegangan referensi AVR (p.u.)
V_t	Tegangan terminal generator (p.u.)
X_d	Reaktansi sinkron sumbu-d (p.u.)
X'_d	Reaktansi transien sumbu-d (p.u.)
X''_d	Reaktansi subtransien sumbu-d (p.u.)
X_{ls}	Reaktansi kebocoran stator (p.u.)
X_q	Reaktansi sinkron sumbu-q (p.u.)
X'_q	Reaktansi transien sumbu-q (p.u.)
X''_q	Reaktansi subtransien sumbu-q (p.u.)
AC	<i>Alternating Current</i>
APC	<i>Active Power Controller</i>
AVR	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
CCT	<i>Critical Clearing Time</i>
DC	<i>Direct Current</i>
EAC	<i>Equal Area Criterion</i>
EMT	<i>Electromagnetic Transient</i>
GFL	<i>Grid-Following</i>
GFM	<i>Grid-Forming</i>
IBR	<i>Inverter-Based Resource</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NZE	<i>Net Zero Emission</i>
PCC	<i>Point of Common Coupling</i>
PI	<i>Proportional-Integral</i>
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>
PLN	PT PLN (Persero)
PLTS	Pembangkit Listrik Tenaga Surya
PLTU	Pembangkit Listrik Tenaga Uap
PQ	Daya Aktif dan Reaktif
PV	<i>Photovoltaic</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>

RES	<i>Renewable Energy Sources</i>
RPC	<i>Reactive Power Controller</i>
RUKN	Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional
RUPTL	Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik
SEXS	<i>Single-Input Excitation System</i>
SMIB	<i>Single Machine Infinite Bus</i>
VSC	<i>Voltage Source Converter</i>
VSG	<i>Virtual Synchronous Generator</i>
VSM	<i>Virtual Synchronous Machine</i>