UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Skema Load Shedding Optimal Untuk Meningkatkan Stabilitas Frekuensi Saat Operasi Island di Sistem Kelistrikan Bali
Muhammad Arif, Ir. Lesnanto Multa Putranto, S.T., M.Eng, Ph.D., IPM., SMIEEE. ; Husni Rois Ali, S.T., M.Eng., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
HALAMAN PERSETUJUAN ii
HALAMAN PENGESAHAN iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI iv
PRAKATA v
DAFTAR ISI vii
DAFTAR GAMBAR ix
DAFTAR TABEL x
ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN xi
ABSTRAK xiv
ABSTRACT xv
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Perumusan masalah 4
1.3 Batasan Penelitian 5
1.4 Keaslian penelitian 6
1.5 Tujuan Penelitian 9
1.6 Manfaat Penelitian 10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI 11
2.1 Tinjauan Pustaka 11
2.2 Landasan Teori 14
2.2.1 Stabilitas Frekuensi dan Respons Frekuensi Sistem Tenaga 14
2.2.2 Governor pada pembangkit 17
2.2.3 Model Inersia Sistem, Load Damping, dan Respons Primer Governor 23
2.2.4 Linearized Classical Generator 25
2.2.5 UFLS dan ADS 29
2.2.6 Konsep Optimisasi Load shedding 34
2.2.7 Mixed Integer Linear Programming (MILP) 36
BAB III METODOLOGI 38
3.1 Alat dan Bahan 38
3.1.1 Alat 38
3.1.2 Bahan 38
3.2 Alur Penelitian 39
3.3 Pemodelan Sistem Kelistrikan Bali 41
3.4 Penentuan Skenario Gangguan dan Estimasi Parameter Awal 48
3.4.1 Skenario Gangguan Sistem 49
3.4.2 Metode Analisis Respons Frekuensi 50

Skema Load Shedding Optimal Untuk Meningkatkan Stabilitas Frekuensi Saat Operasi Island di Sistem
Kelistrikan Bali
Muhammad Arif, Ir. Lesnanto Multa Putranto, S.T., M.Eng, Ph.D., IPM., SMIEEE. ; Husni Rois Ali, S.T., M.Eng., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.4.3 Metode Estimasi ROCOF, Inersia Sistem, dan Penetapan Parameter Governor 50
3.5 Pemodelan Frekuensi Agregat Sistem 53
3.5.1 Linearized Classical Generator Model 53
3.5.2 Swing Equation Sistem Agregat 54
3.6 Formulasi Optimisasi Load shedding Berbasis MILP 55
3.6.1 Fungsi Objektif 56
3.6.2 Variabel Keputusan 57
3.6.3 Kendala Optimisasi 57
3.7 Simulasi dan Validasi Hasil 59
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 62
4.1 Hasil Simulasi Gangguan N-4 SKLT dan Respons Frekuensi Sistem 62
4.1.1 Kondisi Operasi Sistem Sebelum Gangguan 62
4.1.2 Respons Frekuensi Sistem pada Kondisi Beban Puncak 64
4.1.3 Respons Frekuensi Sistem pada Kondisi Beban Rendah 65
4.2 Estimasi Parameter Dinamik Sistem 66
4.2.1 Estimasi ROCOF 66
4.2.2 Estimasi Konstanta Inersia Sistem 67
4.2.3 Penetapan Parameter Load Damping dan Governor 69
4.2.4 Ringkasan Parameter Dinamik Sistem 76
4.3 Hasil Optimisasi Load shedding Berbasis MILP 77
4.3.1 Parameter Input Model Optimisasi 77
4.3.2 Hasil Optimisasi pada Kondisi Beban Rendah 78
4.3.3 Hasil Optimisasi pada Kondisi Beban Puncak 82
4.3.4 Perbandingan Hasil Optimisasi dengan ADS Eksisting 86
4.4 Validasi Hasil Optimisasi pada DIgSILENT PowerFactory 88
4.4.1 Validasi pada Kondisi Beban Rendah 88
4.4.2 Validasi pada Kondisi Beban Puncak 90
4.5 Analisis Perbandingan dan Rekomendasi Penyempurnaan ADS 92
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 97
5.1 Kesimpulan 97
5.2 Saran 98
DAFTAR PUSTAKA 100
LAMPIRAN 105

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Skema Load Shedding Optimal Untuk Meningkatkan Stabilitas Frekuensi Saat Operasi Island di Sistem Kelistrikan Bali
Muhammad Arif, Ir. Lesnanto Multa Putranto, S.T., M.Eng, Ph.D., IPM., SMIEEE. ; Husni Rois Ali, S.T., M.Eng., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Kurva Respons Frekuensi 15
Gambar 2.2 Linearized Classical Generator Model 28
Gambar 2.3 Skema UFLS Konvensional 30
Gambar 2.4 Prinsip Kerja ADS Island Bali 32
Gambar 2.5 Klasifikasi teknik load shedding pada sistem tenaga listrik 35
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian 41
Gambar 3. 2 Single Line Diagram Sistem Bali 42
Gambar 3. 3 Skenario Gangguan N-4 SKLT Gilimanuk-Banyuwangi 50
Gambar 3. 4 Co-simulation Python MILP dengan DigSILENT PowerFactory 60
Gambar 4.1 Kurva frekuensi sistem pada kondisi beban puncak tanpa load shedding optimal (N-4 SKLT) 64
Gambar 4.2 Kurva respons frekuensi sistem pada kondisi beban rendah tanpa load shedding optimal (N-4 SKLT) 65
Gambar 4.3 Output solver MILP kondisi beban rendah 79
Gambar 4.4 Respons frekuensi sistem kondisi beban rendah dengan optimal load shedding 81
Gambar 4.5 Kurva daya aktif pembangkit pada kondisi beban rendah setelah gangguan N-4 SKLT 81
Gambar 4.6 Grafik trafo yang dilepas pada sistem Bali kondisi beban rendah 82
Gambar 4.7 Output solver MILP kondisi beban puncak 83
Gambar 4.8 Respons frekuensi sistem kondisi beban puncak dengan optimal load shedding 84
Gambar 4.9 Kurva daya aktif pembangkit pada kondisi beban puncak setelah gangguan N-4 SKLT 85
Gambar 4.10 Grafik beban trafo yang dilepas pada sistem Bali kondisi beban puncak 86
Gambar 4.11 Respons frekuensi sistem kondisi beban rendah dengan skema ADS eksisting 88
Gambar 4.12 Respons governor pada kondisi beban rendah dengan skema ADS eksisting 89
Gambar 4.13 Respons frekuensi sistem kondisi beban puncak dengan skema ADS eksisting 90
Gambar 4.14 Respons governor pada kondisi beban puncak dengan skema ADS eksisting 91

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Skema Load Shedding Optimal Untuk Meningkatkan Stabilitas Frekuensi Saat Operasi Island di Sistem Kelistrikan Bali
Muhammad Arif, Ir. Lesnanto Multa Putranto, S.T., M.Eng, Ph.D., IPM., SMIEEE. ; Husni Rois Ali, S.T., M.Eng., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Skala Prioritas Pelanggan pada Trafo 43
Tabel 3.2 Data beban trafo gardu induk beban terendah dan beban tertinggi..... 44
Tabel 3.3 Data Transfer Interkoneksi SKLT Gilimanuk-Banyuwangi..... 46
Tabel 3.4 Data Pembangkit di Sistem Bali 46
Tabel 3.5 Data jalur transmisi sistem Bali 47
Tabel 3.6 Skenario gangguan yang dianalisis 49
Tabel 3.7 Indikator kinerja evaluasi validasi hasil optimisasi 61
Tabel 4.1 Komposisi pembangkit lokal dan transfer daya sistem Bali 62
Tabel 4.2 Ringkasan kondisi sistem kelistrikan Bali sebelum gangguan N-4 SKLT 63
Tabel 4.3 Data pengukuran frekuensi dan hasil perhitungan ROCOF..... 67
Tabel 4.4 Parameter dan hasil estimasi konstanta inersia agregat sistem 68
Tabel 4.5 Nilai parameter load damping dan governor..... 70
Tabel 4.6 Parameter model DEGOV unit pembangkit yang diaktifkan 72
Tabel 4.7 Headroom operasi setiap unit pada kedua kondisi..... 73
Tabel 4.8 Perhitungan ΔPm aktual kondisi beban rendah (Δfref = 0,5 Hz)..... 73
Tabel 4.9 Perhitungan ΔPm aktual kondisi beban puncak (Δfref = 0,5 Hz)..... 74
Tabel 4.10 Rekapitulasi titik saturasi governor setiap unit 75
Tabel 4.11 Ringkasan perhitungan Kgov efektif sistem 75
Tabel 4.12 Ringkasan parameter dinamik sistem kelistrikan Bali untuk model frekuensi agregat..... 76
Tabel 4.13 Parameter input model optimisasi MILP untuk kedua kondisi operasi 77
Tabel 4.14 Hasil optimisasi load shedding per trafo pada kondisi beban rendah 80
Tabel 4.15 Hasil optimisasi load shedding per trafo pada kondisi beban puncak 83
Tabel 4.16 Perbandingan hasil optimisasi MILP terhadap ADS eksisting 87
Tabel 4.17 Perbandingan kinerja ADS eksisting dan optimal load shedding 93
Tabel 4.18 Rekomendasi penyempurnaan setting ADS 94
Tabel 4.19 Kelebihan dan keterbatasan metode..... 95

Skema Load Shedding Optimal Untuk Meningkatkan Stabilitas Frekuensi Saat Operasi Island di Sistem
Kelistrikan Bali
Muhammad Arif, Ir. Lesnanto Multa Putranto, S.T., M.Eng, Ph.D., IPM., SMIEEE. ; Husni Rois Ali, S.T., M.Eng., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

f_0	Nilai frekuensi sistem pada kondisi operasi normal yang menjadi acuan dalam analisis deviasi frekuensi
f	Nilai frekuensi aktual sistem pada setiap saat setelah terjadi gangguan atau perubahan kondisi operasi
Δf	Selisih antara frekuensi aktual sistem dan frekuensi nominal
f_{nadir}	Nilai frekuensi terendah yang dicapai sistem setelah terjadi gangguan sebelum memasuki fase pemulihan
$\frac{df}{dt}$	Laju perubahan frekuensi pada periode awal setelah gangguan yang menunjukkan kecepatan penurunan atau kenaikan frekuensi (ROCOF).
H	Parameter yang merepresentasikan energi kinetik tersimpan pada massa berputar generator dan berperan menahan perubahan frekuensi secara tiba-tiba
ΔP	Selisih antara daya pembangkitan dan daya beban yang menyebabkan sistem mengalami penurunan atau kenaikan frekuensi
D	Parameter yang menunjukkan sensitivitas beban terhadap perubahan frekuensi sistem
ΔP_m	Tambahan daya mekanik dari pembangkit yang muncul secara otomatis sebagai respons awal terhadap deviasi frekuensi
t_r	Waktu yang dibutuhkan sistem untuk kembali mendekati kondisi frekuensi stabil setelah gangguan
R	Droop governor, rasio perubahan frekuensi terhadap perubahan daya mekanik
K_{gov}	Parameter penguatan yang menunjukkan sensitivitas tambahan daya mekanik terhadap deviasi frekuensi

Skema Load Shedding Optimal Untuk Meningkatkan Stabilitas Frekuensi Saat Operasi Island di Sistem
Kelistrikan Bali
Muhammad Arif, Ir. Lesnanto Multa Putranto, S.T., M.Eng, Ph.D., IPM., SMIEEE. ; Husni Rois Ali, S.T., M.Eng., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

T_{gov}	Parameter yang menunjukkan kecepatan respons dinamik governor terhadap gangguan frekuensi
δ	Sudut posisi rotor generator terhadap kerangka acuan sinkron
$\Delta\delta$	Perubahan sudut rotor terhadap titik operasi awal akibat gangguan
ω	Kecepatan sudut rotor generator selama proses dinamik
$\Delta\omega$	Perubahan kecepatan sudut rotor terhadap kecepatan sinkron
ω_s	Kecepatan sudut sinkron sistem yang berhubungan dengan frekuensi nominal
ΔP_m	Perubahan daya mekanik akibat respons governor setelah terjadi gangguan
ΔP_e	Perubahan daya listrik keluaran generator akibat gangguan atau perubahan kondisi sistem
K_sync	Parameter yang merepresentasikan sensitivitas perubahan daya listrik
wi	Nilai bobot prioritas
P_{shed}	Daya beban yang dilepas pada trafo ke-i
S_{base}	Daya basis sistem
Δt	Interval waktu diskret
p_i	Daya aktif beban pada trafo ke-i
λ	Bobot minimisasi total load shedding pada fungsi objektif MILP
$P_{L,i}$	Daya aktif beban pada trafo gardu induk ke-i [MW]
x_i	Variabel biner keputusan pelepasan beban pada trafo ke-i (0 = tidak dilepas, 1 = dilepas)
s_k^F	Variabel slack untuk pelanggaran batas frekuensi atas (f_max) pada langkah waktu ke-k
W_F	Bobot penalti pelanggaran batas frekuensi atas pada fungsi objektif MILP

Skema Load Shedding Optimal Untuk Meningkatkan Stabilitas Frekuensi Saat Operasi Island di Sistem
Kelistrikan Bali
Muhammad Arif, Ir. Lesnanto Multa Putranto, S.T., M.Eng, Ph.D., IPM., SMIEEE. ; Husni Rois Ali, S.T., M.Eng., Ph.D
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

s_k^U	Variabel slack untuk pelanggaran batas frekuensi bawah (f_min) pada langkah waktu ke-k
W_U	Bobot penalti pelanggaran batas frekuensi bawah pada fungsi objektif MILP
s_k^R	Variabel slack untuk pelanggaran batas ROCOF pada langkah waktu ke-k
W_R	Bobot penalti pelanggaran batas ROCOF pada fungsi objektif MILP
f_{min}	Batas frekuensi minimum operasi sistem [Hz]
f_{max}	Batas frekuensi maksimum operasi sistem [Hz]
δk	Deviasi sudut rotor pada langkah ke-k
Δωk	Deviasi kecepatan rotor pada langkah ke-k
Δfk	Deviasi frekuensi sistem pada langkah ke-k
ΔPm,k	Deviasi respons daya governor pada langkah ke-k
T1	Konstanta waktu lag kontroler elektrik
T2	Konstanta waktu lead kontroler elektrik
T3	Konstanta waktu dominan (Tgov)
Δf_{ref}	Deviasi Frekuensi Referensi