UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Studi Optimasi Lokasi dan Kapasitas BESS untuk Stabilitas Frekuensi di Sistem Kelistrikan Aceh Pascagangguan
ANDIGAN D. SITOMPUL, Ir. Roni Irnawan, S.T., M.Sc., Ph.D., SMIEEE. ; Dr.-Ing. Ir. Yohan Fajar Sidik, S.T., M.Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING ii
HALAMAN PENGESAHAN TESIS iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI iv
PRAKATA v
DAFTAR ISI vii
DAFTAR TABEL x
DAFTAR GAMBAR xi
DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN xii
ABSTRAK xv
ABSTRACT xvi
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Batasan Penelitian 3
1.4 Tujuan Penelitian 4
1.5 Keaslian Penelitian 5
1.6 Manfaat Penelitian 7
1.7 Sistematika Penulisan 7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI 9
2.1 Tinjauan Pustaka 9
2.1.1 Pendekatan Konvensional Penempatan BESS 9
2.1.2 Keterbatasan Pendekatan Heuristik terhadap Stabilitas Dinamis 9
2.1.3 Peran Algoritma Optimasi Metaheuristik 9
2.2 Stabilitas Sistem Tenaga Listrik 10
2.2.1 Stabilitas Frekuensi dan Persamaan Ayunan (*Swing Equation*) 11
2.2.2 *Rate of Change of Frequency* (RoCoF) 12
2.2.3 *Frequency Nadir* 13
2.2.4 Waktu Pemulihan (*Settling Time*) 14
2.2.5 *Integral Absolute Frequency Deviation* (IAFD) 15
2.3 *Battery Energy Storage System* (BESS) 16
2.3.1 Peran BESS dalam Stabilitas Frekuensi 17
2.3.2 Model dan Karakteristik Operasi BESS 17
2.3.3 Strategi Pengendalian BESS untuk Stabilitas Frekuensi 22
BAB III ALAT DAN METODOLOGI PENELITIAN 25
3.1 Alat dan Bahan Penelitian 25
3.1.1 Perangkat Keras (*Hardware*) 25
3.1.2 Perangkat Lunak (*Software*) 25
3.1.3 Data Penelitian 26
3.2 Alur Penelitian 27

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Studi Optimasi Lokasi dan Kapasitas BESS untuk Stabilitas Frekuensi di Sistem Kelistrikan Aceh Pascagangguan
ANDIGAN D. SITOMPUL, Ir. Roni Irnawan, S.T., M.Sc., Ph.D., SMIEEE. ; Dr.-Ing. Ir. Yohan Fajar Sidik, S.T., M.Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.3 Algoritma Optimasi Metaheuristik untuk Optimasi Lokasi dan Kapasitas BESS 29
3.3.1 *Bat Algorithm* 31
3.4 Validasi Penelitian 35
3.4.1 Skenario Sistem Uji (IEEE 9-Bus System) 35
3.4.2 Validasi Matematis Respons Frekuensi Awal 36
3.5 Skenario Gangguan dan Uji Sensitivitas Lintas Skenario 38
3.6 Desain *Co-Simulation* (Python – DIgSILENT) 39
3.6.1 Arsitektur Antarmuka API (*Application Programming Interface*) 39
3.6.2 Alur Automasi dan Pertukaran Data 40
3.7 Fungsi Objektif dan Kendala/Kekangan (*Constraints*) 41
3.7.1 Formulasi Fungsi Objektif Hibrida 42
3.7.2 Kriteria Perhitungan Parameter Stabilitas Frekuensi 42
3.7.3 Batasan Variabel Keputusan (*BESS Constraints*) 43
3.7.4 Batasan Operasional Sistem (*System Constraints*) 43
3.7.5 Mekanisme Fungsi Penalti 45
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 47
4.1 Validasi Model Dinamis 47
4.1.1 Validasi Kondisi *Baseline* (Tanpa BESS) 47
4.1.2 Evaluasi Pengaruh BESS terhadap RoCoF 49
4.1.3 Validasi Karakteristik *Droop Control* BESS pada Kondisi Tunak 50
4.2 Optimasi Lokasi dan Kapasitas BESS pada Subsistem Aceh 52
4.2.1 Gambaran Umum Subsistem Aceh 52
4.2.2 Deskripsi Skenario Baseline dan Parameter Dinamik Sistem 55
4.2.3 Respons Frekuensi Subsistem Aceh Tanpa BESS 56
4.2.4 Transfer Daya Interkoneksi Pangkalan Brandan–Langsa . 57
4.2.5 Analisis Deviasi Frekuensi dan IAFD 58
4.2.6 Ringkasan Kondisi *Baseline* Tanpa BESS 59
4.2.7 Evaluasi BESS Tanpa Optimasi sebagai Pembanding 60
4.2.8 Optimasi Lokasi dan Kapasitas BESS Menggunakan *Bat Algorithm* 64
4.3 Ketahanan Solusi BESS melalui Uji Sensitivitas Lintas Skenario 69
4.3.1 Uji Sensitivitas Solusi Terhadap Perubahan Skenario Kontingensi 70
4.3.2 Sensitivitas Sistem Terhadap Perluasan Batas Kapasitas BESS 72
4.3.3 Evaluasi Batasan Operasi dan Implikasi 73
4.3.4 Implikasi Mitigasi Hibrida untuk Skenario Kontingensi Ekstrem 74

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Studi Optimasi Lokasi dan Kapasitas BESS untuk Stabilitas Frekuensi di Sistem Kelistrikan Aceh Pascagangguan
ANDIGAN D. SITOMPUL, Ir. Roni Irnawan, S.T., M.Sc., Ph.D., SMIEEE. ; Dr.-Ing. Ir. Yohan Fajar Sidik, S.T., M.Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

4.3.5 Ringkasan Hasil Uji Sensitivitas 76
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 77
5.1 Kesimpulan 77
5.2 Saran 77
DAFTAR PUSTAKA 79
LAMPIRAN 81

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Studi Optimasi Lokasi dan Kapasitas BESS untuk Stabilitas Frekuensi di Sistem Kelistrikan Aceh Pascagangguan
ANDIGAN D. SITOMPUL, Ir. Roni Irnawan, S.T., M.Sc., Ph.D., SMIEEE. ; Dr.-Ing. Ir. Yohan Fajar Sidik, S.T., M.Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu 5

Tabel 3.1 Parameter BAT 35

Tabel 4.1 Parameter Generator Sistem IEEE 9-Bus 47

Tabel 4.2 Daftar Pembangkit Subsistem Aceh 55

Tabel 4.3 Ringkasan Respons Frekuensi Baseline Tanpa BESS 56

Tabel 4.4 Perbandingan kondisi tanpa BESS dan kondisi dengan BESS 62

Tabel 4.5 Perbandingan Transfer Daya Interkoneksi Dengan dan Tanpa BESS 63

Tabel 4.6 Parameter Fungsi Objektif 64

Tabel 4.7 Hasil Optimasi 65

Tabel 4.8 Ringkasan parameter stabilitas frekuensi 66

Tabel 4.9 Ringkasan respons daya BESS 67

Tabel 4.10 Ringkasan batasan operasi 67

Tabel 4.11 Rincian komponen fitness 68

Tabel 4.12 Hasil uji sensitivitas lintas skenario untuk solusi BESS pada rentang pencarian 10–100 MW 71

Tabel 4.13 Hasil Optimasi BESS pada Rentang Kapasitas Berbeda 71

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Studi Optimasi Lokasi dan Kapasitas BESS untuk Stabilitas Frekuensi di Sistem Kelistrikan Aceh Pascagangguan
ANDIGAN D. SITOMPUL, Ir. Roni Irnawan, S.T., M.Sc., Ph.D., SMIEEE. ; Dr.-Ing. Ir. Yohan Fajar Sidik, S.T., M.Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Struktur *simplified battery model* BESS pada PowerFactory 19

Gambar 2.2 Diagram blok kontrol unit BESS 20

Gambar 2.3 Diagram blok *Charge Controller* 20

Gambar 2.4 Diagram blok *Primary Frequency Controller* 21

Gambar 2.5 Diagram blok PQ *Controller* 22

Gambar 2.6 Ilustrasi perbandingan kinerja respons frekuensi dengan dan tanpa BESS 24

Gambar 3.1 Alur Penelitian 29

Gambar 3.2 Single Line Diagram Sistem Uji IEEE 9-Bus 36

Gambar 3.3 Arsitektur *co-simulation* antara Python sebagai *optimizer* dan DIgSILENT PowerFactory sebagai *simulation engine* dalam proses evaluasi stabilitas frekuensi sistem 41

Gambar 4.1 Respons frekuensi sistem tanpa BESS 49

Gambar 4.2 Perbandingan respons frekuensi dengan dan tanpa BESS 50

Gambar 4.3 Hubungan frekuensi dan daya BESS 51

Gambar 4.4 *Single Line Diagram* Subsistem Aceh 54

Gambar 4.5 Respons frekuensi Subsistem Aceh tanpa BESS (kondisi *baseline*) 56

Gambar 4.6 Hubungan frekuensi dengan transfer daya interkoneksi 58

Gambar 4.7 IAFD pada kondisi *baseline* 59

Gambar 4.8 Perbandingan Respons Frekuensi Subsistem Aceh Tanpa vs Dengan BESS 61

Gambar 4.9 Hubungan Frekuensi dengan Respons Daya Aktif BESS 61

Gambar 4.10 Perbandingan Transfer Daya Interkoneksi Tanpa dan Dengan BESS 63

Gambar 4.11 Respons Frekuensi pada Uji Sensitivitas Lintas Skenario 70

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Studi Optimasi Lokasi dan Kapasitas BESS untuk Stabilitas Frekuensi di Sistem Kelistrikan Aceh Pascagangguan
ANDIGAN D. SITOMPUL, Ir. Roni Irnawan, S.T., M.Sc., Ph.D., SMIEEE. ; Dr.-Ing. Ir. Yohan Fajar Sidik, S.T., M.Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ARTI LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang	Keterangan
f_0	Frekuensi nominal sistem (Hz)
$f(t)$	Frekuensi sistem sebagai fungsi waktu (Hz)
$f_i(t)$	Frekuensi lokal generator ke-i sebagai fungsi waktu (Hz)
f_{COI}	Frekuensi ekuivalen *Center of Inertia* (Hz)
f_{nadir}	Frekuensi minimum yang dicapai sistem selama periode transien atau *frequency nadir* (Hz)
f_{ss}	Frekuensi kondisi tunak atau *steady-state frequency* (Hz)
Δf	Deviasi frekuensi terhadap nilai nominal (Hz)
Δf_{nadir}	Deviasi *frequency nadir* terhadap frekuensi nominal (Hz)
df/dt	Laju perubahan frekuensi terhadap waktu (Hz/s)
RoCoF	*Rate of Change of Frequency* atau laju perubahan frekuensi (Hz/s)
$RoCoF_{max}$	Batas maksimum nilai absolut RoCoF yang diizinkan (Hz/s)
H_i	Konstanta inersia generator ke-i (s)
H_{eq}	Konstanta inersia ekuivalen sistem (s)
S_i	Kapasitas generator ke-i (MVA)
S_{base}	Kapasitas basis sistem (MVA)
S_{total}	Total kapasitas generator sinkron yang digunakan dalam perhitungan (MVA)
P_m	Daya mekanik generator (p.u.)
P_e	Daya listrik generator (p.u.)
ΔP	Ketidakseimbangan daya aktif atau defisit daya aktif akibat gangguan (MW)
P_{BESS}	Daya aktif *Battery Energy Storage System* (MW)
$P_{BESS}(t)$	Daya aktif BESS sebagai fungsi waktu (MW)
$P_{BESS,rated}$	Kapasitas atau rating daya aktif BESS yang dipilih oleh algoritma optimasi (MW)
P_{dis}	Daya saat BESS melakukan pelepasan energi atau *discharging* (MW)
P_{ch}	Daya saat BESS melakukan pengisian energi atau *charging* (MW)
P_{min}	Batas minimum kapasitas daya aktif BESS dalam ruang pencarian optimasi (MW)
P_{max}	Batas maksimum kapasitas daya aktif BESS dalam ruang pencarian optimasi (MW)
E_{BESS}	Kapasitas energi BESS (MWh)

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Studi Optimasi Lokasi dan Kapasitas BESS untuk Stabilitas Frekuensi di Sistem Kelistrikan Aceh Pascagangguan
ANDIGAN D. SITOMPUL, Ir. Roni Irnawan, S.T., M.Sc., Ph.D., SMIEEE. ; Dr.-Ing. Ir. Yohan Fajar Sidik, S.T., M.Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Lambang	Keterangan
SoC(t)	*State of Charge* BESS sebagai fungsi waktu (p.u.)
SoC_{min}	Batas minimum *State of Charge* BESS (p.u.)
SoC_{max}	Batas maksimum *State of Charge* BESS (p.u.)
L_{BESS}	Lokasi pemasangan BESS
V(t)	Tegangan sistem sebagai fungsi waktu (p.u.)
V_{min}	Batas minimum tegangan sistem (p.u.)
V_{max}	Batas maksimum tegangan sistem (p.u.)
Loading	Pembebanan peralatan sistem (%)
$Loading_{max}$	Batas maksimum pembebanan peralatan sistem (%)
t	Waktu simulasi (s)
t_0	Waktu awal gangguan (s)
t_{end}	Waktu akhir pengamatan simulasi (s)
t_s	Waktu pemulihan atau *settling time* (s)
t_{ref}	Waktu referensi untuk normalisasi *settling time* (s)
K_f	Konstanta pengendalian frekuensi atau penguatan *droop* (MW/Hz)
R	Konstanta *droop* BESS (p.u.)
ε	Batas toleransi deviasi frekuensi (Hz)
ω	Kecepatan sudut rotor (rad/s)
F_{total}	Nilai fungsi objektif total atau *fitness* akhir
F_{obj}	Nilai fungsi objektif berbobot sebelum penalti
$P_{constraint}$	Total penalti akibat pelanggaran batas operasi
w_i	Bobot parameter objektif ke-i
X_i	Nilai parameter objektif ke-i
$X_{i,norm}$	Nilai parameter objektif ke-i setelah normalisasi
$X_{RoCoF,norm}$	Nilai RoCoF yang telah dinormalisasi
$X_{nadir,norm}$	Nilai deviasi *frequency nadir* yang telah dinormalisasi
$X_{IAFD,norm}$	Nilai IAFD yang telah dinormalisasi
$X_{settling,norm}$	Nilai *settling time* yang telah dinormalisasi
$X_{BESS,norm}$	Nilai kapasitas BESS yang telah dinormalisasi
$RoCoF_{ref}$	Nilai referensi normalisasi RoCoF (Hz/s)
Δf_{ref}	Nilai referensi normalisasi deviasi *frequency nadir* (Hz)
$IAFD_{ref}$	Nilai referensi normalisasi IAFD (Hz·s)
P_{ref}	Nilai referensi normalisasi kapasitas BESS (MW)
λ_j	Koefisien penalti untuk pelanggaran batas operasi ke-j

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Studi Optimasi Lokasi dan Kapasitas BESS untuk Stabilitas Frekuensi di Sistem Kelistrikan Aceh Pascagangguan
ANDIGAN D. SITOMPUL, Ir. Roni Irnawan, S.T., M.Sc., Ph.D., SMIEEE. ; Dr.-Ing. Ir. Yohan Fajar Sidik, S.T., M.Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

Lambang	Keterangan
C_j	Status atau besaran pelanggaran batas operasi ke-j
m	Jumlah batas operasi yang dievaluasi dalam fungsi penalti
x_i	Kandidat solusi ke-i pada algoritma optimasi
x_i^t	Posisi kandidat solusi ke-i pada iterasi ke-t
x_{best}	Kandidat solusi terbaik global pada proses optimasi
v_i^t	Kecepatan individu ke-i pada iterasi ke-t
β	Bilangan acak dalam rentang [0,1]
f_i^{BAT}	Frekuensi pulsa individu ke-i pada *Bat Algorithm*
$f_{\text{BAT,min}}$	Batas minimum frekuensi pulsa pada *Bat Algorithm*
$f_{\text{BAT,max}}$	Batas maksimum frekuensi pulsa pada *Bat Algorithm*
A_i^t	Loudness individu ke-i pada iterasi ke-t
A_i^0	Loudness awal individu ke-i
r_i^t	Pulse rate individu ke-i pada iterasi ke-t
r_i^0	Pulse rate awal individu ke-i
α	Koefisien penurunan *loudness* pada *Bat Algorithm*
γ	Koefisien peningkatan *pulse rate* pada *Bat Algorithm*