UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Analisis Dampak Perubahan Tegangan Operasi Terhadap Proteksi Elektrik Transformator Tenaga di Wilayah Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta
Jaka Purnama, Dr. Ir. M. Isnaeni Bambang Setyonegoro, M.T.; Husni Rois Ali, S.T., M.Eng., Ph.D., DIC., SMIEEE.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
LEMBAR PENGESAHAN TIM PEMBIMBING ii
LEMBAR PENGESAHAN TIM PENGUJI iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI iv
PRAKATA v
DAFTAR ISI vii
DAFTAR TABEL x
DAFTAR GAMBAR xi
DAFTAR ARTI LAMBANG xii
DAFTAR ARTI SINGKATAN xiv
INTISARI 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 dan Kontribusi Penelitian 4
1.6 Manfaat Penelitian 5
1.7 Sistematika Penulisan 6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI 8
2.1 Tinjauan Pustaka 8
2.2 Landasan Teori 11
2.2.1 Transformator Tenaga 11
2.2.2 *On-Load Tap Changer* (OLTC) 13
2.2.3 Proteksi Elektrik 15
2.2.4 Proteksi Mekanik dan Panas 16
2.2.5 Proteksi Diferensial Transformator 17
2.2.6 Proteksi *Restricted Earth Fault* (REF) 20

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Analisis Dampak Perubahan Tegangan Operasi Terhadap Proteksi Elektrik Transformator Tenaga di Wilayah Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta
Jaka Purnama, Dr. Ir. M. Isnaeni Bambang Setyonegoro, M.T.; Husni Rois Ali, S.T., M.Eng., Ph.D., DIC., SMIEEE.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

2.2.7 Proteksi Arus Lebih 22
2.2.8 Arus Hubung Singkat Transformator Tenaga 24
2.2.9 Standar Hasil Uji Relai Proteksi 25
2.2.10 Standar Tegangan Operasi Sistem 27
2.2.11 Skema Pengoperasian Sistem Tegangan Tinggi dan Menengah 27
2.3 Hipotesis 28
BAB III METODE PENELITIAN 29
3.1 Alat dan Bahan 29
3.1.1 Alat Penelitian 29
3.1.2 Bahan 30
3.2 Tahapan Penelitian 31
3.2.1 Studi Literatur 33
3.2.2 Pengambilan dan Analisis Data Rasio Transformator Tenaga 33
3.2.3 Analisis Matematis Dampak Perubahan Tegangan Operasi 33
3.2.4 Simulasi Dampak Perubahan Tegangan Operasi 35
3.2.5 Evaluasi Dampak Perubahan Tegangan Operasi 36
3.2.6 Usulan Perbaikan 37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 38
4.1 Analisis Dampak Perubahan Tegangan Operasi 38
4.1.1 Analisis Data Sampel Pengukuran Arus Transformator 38
4.1.2 Analisis Matematis pada Proteksi Diferensial 41
4.1.3 Analisis Matematis pada Proteksi REF 43
4.1.4 Analisis Matematis pada Proteksi Arus Lebih 44
4.1.5 Analisis Matematis Arus Hubung Singkat dan Koordinasi Proteksi 46
4.1.6 Simulasi Dampak Perubahan Tegangan pada Proteksi Diferensial 47
4.1.7 Simulasi Dampak Perubahan Tegangan pada Proteksi Arus Lebih 49
4.1.8 Simulasi Arus Hubung Singkat dan Koordinasi Proteksi Arus Lebih 51
4.2 Evaluasi Dampak Perubahan Tegangan Operasi 53
4.3 Usulan Perbaikan Sistem Proteksi Elektrik Transformator 56
4.3.1 Usulan Perbaikan *Setting* Proteksi Diferensial Transformator 56
4.3.2 Usulan Perbaikan *Setting* Proteksi Arus Lebih Opsi Pertama 60

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Analisis Dampak Perubahan Tegangan Operasi Terhadap Proteksi Elektrik Transformator Tenaga di Wilayah Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta
Jaka Purnama, Dr. Ir. M. Isnaeni Bambang Setyonegoro, M.T.; Husni Rois Ali, S.T., M.Eng., Ph.D., DIC., SMIEEE.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

4.3.3 Usulan Perbaikan *Setting* Proteksi Arus Lebih Opsi Kedua 63
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN 66
5.1 Kesimpulan 66
5.2 Saran..... 67
DAFTAR PUSTAKA 68
Lampiran 1 Data Tegangan Minimum dan Maksimum Gardu Induk 71
Lampiran 2 Kode Analisis Aliran Daya dan Hubung Singkat..... 73
Lampiran 3 Kode Analisis Perhitungan Tegangan Kritis Diferensial 77
Lampiran 4 Kode Analisis Perhitungan Tegangan Kritis Arus Lebih..... 79

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Analisis Dampak Perubahan Tegangan Operasi Terhadap Proteksi Elektrik Transformator Tenaga di Wilayah Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta
Jaka Purnama, Dr. Ir. M. Isnaeni Bambang Setyonegoro, M.T.; Husni Rois Ali, S.T., M.Eng., Ph.D., DIC., SMIEEE.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan dengan penelitian sebelumnya 10
Tabel 2.2 Arus nominal transformator tenaga 13
Tabel 2.3 Posisi tap pada on-load tap changer 13
Tabel 2.4 Impedansi transformator berdasarkan posisi tap 14
Tabel 2.5 Perbandingan penerapan pengaturan AVR 15
Tabel 2.6 Pola proteksi mekanis dan panas [30] 17
Tabel 2.7 Perbandingan penerapan *setting* arus dan waktu kerja diferensial 18
Tabel 2.8 Perbandingan penerapan *setting* arus dan waktu kerja REF 21
Tabel 2.9 Perbandingan penerapan *setting* arus lebih 150 kV dan 20 kV 23
Tabel 2.10 Arus hubung singkat transformator tenaga 60 MVA 25
Tabel 2.11 Standar hasil uji arus kerja proteksi elektrik 26
Tabel 2.12 Rentang standar hasil uji arus kerja proteksi arus lebih 26
Tabel 4.1 Data sampel pengukuran arus di 8 gardu induk 38
Tabel 4.2 Koordinasi waktu kerja proteksi arus lebih 46
Tabel 4.3 Koordinasi proteksi arus lebih pada tegangan operasi 20 kV 52
Tabel 4.4 Koordinasi proteksi arus lebih pada tegangan operasi 21 kV 52
Tabel 4.5 Evaluasi berdasarkan analisis perhitungan matematis dan simulasi 53
Tabel 4.6 Evaluasi tegangan kritis 55

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Analisis Dampak Perubahan Tegangan Operasi Terhadap Proteksi Elektrik Transformator Tenaga di Wilayah Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta
Jaka Purnama, Dr. Ir. M. Isnaeni Bambang Setyonegoro, M.T.; Husni Rois Ali, S.T., M.Eng., Ph.D., DIC., SMIEEE.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Contoh transformator tenaga di PT PLN (Persero) 11
Gambar 2.2 Skema sistem proteksi transformator 16
Gambar 2.3 Prinsip kerja proteksi diferensial transformator 17
Gambar 2.4 Karakteristik kemiringan proteksi diferensial transformator 19
Gambar 2.5 Prinsip kerja proteksi REF 20
Gambar 2.6 Kurva koordinasi proteksi arus lebih tegangan tinggi dan menengah 23
Gambar 2.7 Rangkaian pengganti arus hubung singkat 3 fasa 24
Gambar 3.1 Diagram alur penelitian 32
Gambar 3.2 Pemodelan sistem pada *DIgSILENT PowerFactory* 35
Gambar 4.1 Rasio transformator tenaga di 8 gardu induk 39
Gambar 4.2 Indikasi 87T.Alarm_Diff di GI 150 kV Bantul Bay Trafo 1 40
Gambar 4.3 Pembacaan arus diferensial di GI 150 kV Bantul Bay Trafo 1 40
Gambar 4.4 Tegangan kritis proteksi diferensial 42
Gambar 4.5 Tegangan kritis proteksi arus lebih 45
Gambar 4.6 Simulasi tegangan operasi 20 kV pada proteksi diferensial 47
Gambar 4.7 Simulasi tegangan operasi 21 kV pada proteksi diferensial 48
Gambar 4.8 Simulasi tegangan operasi 20 kV pada proteksi arus lebih 49
Gambar 4.9 Simulasi tegangan operasi 21 kV pada proteksi arus lebih 50
Gambar 4.10 Simulasi arus hubung singkat pada tegangan operasi 20 kV 51
Gambar 4.11 Simulasi arus hubung singkat tegangan menengah 21 kV 52
Gambar 4.12 Tegangan minimum di gardu induk 55
Gambar 4.13 Tegangan kritis dengan *setting* tegangan nominal 21 kV 57
Gambar 4.14 Simulasi proteksi diferensial dengan *setting* tegangan nominal 21 kV 58
Gambar 4.15 Tegangan kritis dengan *setting* 1,3 arus nominal transformator 61
Gambar 4.16 Simulasi proteksi arus lebih dengan *setting* 1,3 nominal transformator 62
Gambar 4.17 Tegangan kritis dengan pembatasan beban 1.649,57 A 63
Gambar 4.18 Simulasi proteksi arus lebih dengan pembatasan beban 1.649,57 A 64

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Analisis Dampak Perubahan Tegangan Operasi Terhadap Proteksi Elektrik Transformator Tenaga di Wilayah Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta
Jaka Purnama, Dr. Ir. M. Isnaeni Bambang Setyonegoro, M.T.; Husni Rois Ali, S.T., M.Eng., Ph.D., DIC., SMIEEE.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ARTI LAMBANG

Δt : Selisih waktu koordinasi proteksi

E : Tegangan sumber dalam per-unit

I_1 : Arus sisi primer / sisi tegangan tinggi transformator

I_2 : Arus sisi sekunder / sisi tegangan menengah transformator

I_A : Arus fasa R

I_B : Arus fasa S

I_C : Arus fasa T

I_{Base} : Arus dasar

I_d : Arus diferensial

I_n : Arus nominal transformator

I_N : Arus netral

I_{Op} : *Setting* arus kerja proteksi

$I_{sc,2\phi}$: Arus hubung singkat dua fasa

$I_{sc,3\phi}$: Arus hubung singkat tiga fasa

I_{Test} : Hasil uji arus kerja

I_{W1} : Arus referensi belitan sisi tegangan tinggi pada relai diferensial

I_{W2} : Arus referensi belitan sisi tegangan menengah pada relai diferensial

N_1 : Jumlah lilitan sisi primer / tegangan tinggi

N_2 : Jumlah lilitan sisi sekunder / tegangan menengah

n_1 : Rasio CT sisi tegangan tinggi

n_2 : Rasio CT sisi tegangan menengah

n_f : Rasio CT fasa

n_n : Rasio CT netral

pu : Per-unit

S_{Base} : Daya semu dasar

S_n : Daya semu nominal transformator

S_{Rated} : Daya semu transformator

t_{Op} : Waktu kerja proteksi arus lebih

TMS : *Time multiplier setting*

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Analisis Dampak Perubahan Tegangan Operasi Terhadap Proteksi Elektrik Transformator Tenaga di Wilayah Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta
Jaka Purnama, Dr. Ir. M. Isnaeni Bambang Setyonegoro, M.T.; Husni Rois Ali, S.T., M.Eng., Ph.D., DIC., SMIEEE.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

V_1 : Tegangan sisi primer / sisi tegangan tinggi transformator

V_2 : Tegangan sisi sekunder / sisi tegangan menengah transformator

V_{Base} : Tegangan dasar

V_n : Tegangan nominal transformator

$Z_{l(pu)}$: Impedansi penghantar dalam per-unit

$Z_{s(pu)}$: Impedansi sumber dalam per-unit

$Z_{t(\%)}$: Impedansi transformator dalam %

$Z_{t(pu)}$: Impedansi transformator dalam per-unit

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Analisis Dampak Perubahan Tegangan Operasi Terhadap Proteksi Elektrik Transformator Tenaga di Wilayah Jawa Tengah dan Daerah Istimewa Yogyakarta
Jaka Purnama, Dr. Ir. M. Isnaeni Bambang Setyonegoro, M.T.; Husni Rois Ali, S.T., M.Eng., Ph.D., DIC., SMIEEE.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ARTI SINGKATAN

A : *Ampere*

AVR : *Auto Voltage Regulator*

CT : *Current Transformer*

GI : Gardu Induk

HV : *High Voltage*

IEEE : *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

kV : *Kilo Volt*

LV : *Low Voltage*

MV : *Medium Voltage*

MVA : *Mega Volt Ampere*

OCR : *Over Current Relay*

OLTC : *On-Load Tap Changer*

PLN : Perusahaan Listrik Negara

REF : *Restricted Earth Fault*

V : *Volt*

VT : *Voltage Transformer*