

SKRIPSI

ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN *ON LOAD TAP CHANGER* (OLTC) TERHADAP KESTABILAN TEGANGAN SEKUNDER PADA TRANSFORMATOR DAYA 150/20 KV DI GI PANAKKUKANG

Disusun dan diajukan oleh :

AZIZAH AINUN ZHARIAH

D041 20 1044



DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2024

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN *ON LOAD TAP CHANGER* (OLTC) TERHADAP KESTABILAN TEGANGAN SEKUNDER PADA TRANSFORMATOR DAYA 150/20 KV DI GI PANAKKUKANG**

Disusun dan diajukan oleh

Azizah Ainun Zhariah

D041201044

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 13 November 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,
Pembimbing,



Dr. Ir. Sri Mawar Said, M.T.
NIP. 19601106 198601 2 001

Ketua Program Studi,




Prof. Dr. Ing. Ir. Faizal A. Samman, IPU, ACPE, APEC Eng.
NIP. 19750605 200212 1 004

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Azizah Ainun Zhariah
NIM : D041201044
Program Studi : Teknik Elektro
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN *ON LOAD TAP CHANGER* (OLTC) TERHADAP KESTABILAN TEGANGAN SEKUNDER PADA TRANSFORMATOR DAYA 150/20 KV DI GI PANAKKUKANG

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 20 November 2024

Yang Menyatakan


Azizah Ainun Zhariah

ABSTRAK

AZIZAH AINUN ZHARIAH. Analisis Pengaruh Perubahan *On Load Tap Changer* (OLTC) Terhadap Kestabilan Tegangan Sekunder pada Transformator Daya 150/20 kV di GI Panakkukang (dibimbing oleh Sri Mawar Said).

Kestabilan tegangan sistem merupakan salah satu masalah paling umum yang dalam mempertahankan kualitas pasokan listrik. Penggunaan *on load tap changer* (OLTC) pada transformator daya adalah salah satu metode yang digunakan untuk menjaga stabilitas tegangan pada sistem. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh perubahan OLTC terhadap kestabilan tegangan sekunder pada transformator daya 150/20 kV di GI Panakkukang. Penelitian menunjukkan bahwa perubahan posisi *tap* OLTC pada transformator daya berdampak langsung terhadap kestabilan tegangan sekunder. Perubahan posisi kedua *tap changer* pada masing-masing trafo dipicu oleh fluktuasi tegangan pembebanan dengan setpoint sebesar 1,1% - 1,3% sehingga tegangan sekunder yang dihasilkan dapat dipertahankan dalam kondisi stabil. Pada tanggal 7 Mei 2024, tercatat jatuh tegangan sebesar 2,5% pada Trafo #1 dan fluktuasi sebesar 0,5% hingga 1% pada Trafo #2, yang masih memenuhi standar PLN. Untuk mempertahankan tegangan sekunder pada 20,2 kV pada kondisi beban puncak siang, Trafo #1 menggunakan posisi *tap* dari 3 hingga 9 dengan tegangan primer antara 151-153 kV, sedangkan Trafo #2 menggunakan *tap* 12 hingga 8 dengan tegangan primer antara 147-148 kV. Sementara itu, penggunaan OLTC terbukti dapat menekan nilai jatuh tegangan sistem sebesar empat hingga lima kali lebih rendah daripada jatuh tegangan sistem tanpa penggunaan OLTC, sehingga OLTC dapat disimpulkan sebagai salah satu metode paling efisien dalam mengurangi jatuh tegangan sistem.

Kata Kunci: *on load tap changer*, kestabilan tegangan, transformator daya, beban puncak.

ABSTRACT

AZIZAH AINUN ZHARIAH. *Analysis of the Effect of Changes in On Load Tap Changer (OLTC) on Secondary Voltage Stability in 150/20 kV Power Transformer at GI Panakkukang (supervised by Sri Mawar Said)..*

System voltage stability is one of the most common problems in maintaining the quality of electricity supply. The use of *on load tap changer* (OLTC) in power transformers is one of the methods used to maintain voltage stability in the system. This study aims to analyze the effect of OLTC changes on secondary voltage stability in 150/20 kV power transformers at Panakkukang GI. The research shows that changes in the position of the OLTC *tap* on the power transformer have a direct impact on secondary voltage stability. Changes in the position of the two *tap changers* on each *transformer* are triggered by fluctuations in the loading voltage with a setpoint of 1.1% - 1.3% so that the resulting secondary voltage can be maintained in a stable condition. On May 7, 2024, a voltage drop of 2.5% was recorded at Transformer #1 and fluctuations of 0.5% to 1% at Transformer #2, which still met PLN standards. To maintain the secondary voltage at 20.2 kV during afternoon peak load conditions, Transformer #1 uses *tap* positions from 3 to 9 with primary voltages between 151-153 kV, while Transformer #2 uses *taps* 12 to 8 with primary voltages between 147-148 kV. Meanwhile, the use of OLTC is proven to reduce the system voltage drop value by four to five times lower than the system voltage drop without the use of OLTC, so OLTC can be concluded as one of the most efficient methods in reducing system voltage drop.

Keywords: *on load tap changer*, voltage stability, power transformer, peak load.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR LAMPIRAN	xii
KATA PENGANTAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup.....	5
1.6 Sistematika Penulisan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Sistem Tenaga Listrik	7
2.2 Transformator	8
2.2.1 Prinsip kerja transformator	9
2.2.2 Transformator 1 fasa dan 3 fasa.....	11
2.3 Transformator Daya	11
2.4 Konstruksi Transformator Daya	13
2.4.1 Inti trafo	13
2.4.2 Kumparan trafo	13
2.4.3 Minyak Trafo	14
2.4.4 <i>Bushing</i>	15
2.4.5 Tangki dan konservator	15
2.4.6 Peralatan bantu.....	16
2.5 <i>Tap Changer</i>	16
2.5.1 Fungsi <i>tap changer</i> pada transformator	17
2.5.2 <i>On load tap changer</i> (OLTC)	18
2.5.3 Bagian-bagian <i>on load tap changer</i>	20
2.5.3 Cara kerja <i>on load tap changer</i>	23
2.6 Daya	32
2.6.1 Daya aktif.....	32
2.6.2 Daya reaktif.....	32
2.6.3 Daya semu.....	33
2.7 Jatuh Tegangan	33
2.8 Gangguan <i>Overvoltage</i> dan <i>Undervoltage</i>	36
2.9 Penelitian Terkait	37
BAB III METODE PENELITIAN.....	41
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	41

3.2 Alat dan Bahan.....	41
3.3 Diagram Alir Penelitian	41
3.4 Teknik Pengumpulan Data.....	44
3.5 Data Penelitian.....	45
3.5.1 <i>Single Line Diagram</i>	45
3.5.2 Trafo yang digunakan	47
3.5.3 Data pembebanan transformator daya GI Panakkukang.....	49
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	54
4.1 Tegangan Primer Transformator.....	54
4.2 Tegangan Sekunder Trafo Tanpa <i>Tapping</i>	59
4.3 Perhitungan Daya Aktif pada Sisi Sekunder.....	63
4.4 Perubahan <i>Tap Changer</i>	66
4.5 Perubahan OLTC pada Kondisi Beban Puncak	75
4.6 Perhitungan Jatuh Tegangan	85
4.6.1 Perhitungan jatuh tegangan pada trafo dengan OLTC.....	85
4.6.2 Perhitungan jatuh tegangan pada trafo tanpa OLTC	96
4.6.3 Perbedaan jatuh tegangan transformator dengan OLTC dan tanpa OLTC.....	102
4.7 Analisis Pengaruh Tegangan dan Beban terhadap Perubahan Posisi <i>Tap Changer</i>	106
4.8 Analisis Kurva Beban Harian	109
BAB V PENUTUP.....	116
5.1 Kesimpulan	116
5.2 Saran	117
DAFTAR PUSTAKA	118
LAMPIRAN.....	120

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Komponen utama pada penyaluran tenaga listrik	7
Gambar 2 Jenis transformator menurut konstruksinya	8
Gambar 3 Bagian-bagian transformator.....	9
Gambar 4 Transformator daya 60 MVA GI Panakkukang	12
Gambar 5 Inti trafo.....	13
Gambar 6 Kumputan trafo	14
Gambar 7 Pengujian minyak trafo	14
Gambar 8 <i>Bushing</i>	15
Gambar 9 Konservator minyak (tangki)	16
Gambar 10 <i>Tap changer</i>	17
Gambar 11 OLTC tipe <i>compartment</i> (a) dan <i>in-tank</i> (b).....	18
Gambar 12 Posisi OLTC pada trafo daya	20
Gambar 13 Bagian-bagian OLTC	21
Gambar 14 <i>Control panel</i> pada OLTC.....	22
Gambar 15 <i>Motor drive unit</i> pada OLTC di GI Panakkukang.....	23
Gambar 16 OLTC pada <i>service position tap 3</i>	24
Gambar 17 Perpindahan <i>tap selector C2</i> dari <i>tap 2</i> ke <i>tap 4</i>	25
Gambar 18 Proses perpindahan <i>diverter switch</i> dari titik M1 ke titik T1	26
Gambar 19 Transisi kontak T1.....	27
Gambar 20 Keadaan superposisi.....	28
Gambar 21 Transisi kontak T2.....	29
Gambar 22 Transisi <i>diverter switch</i> ke <i>service position tap 4</i>	30
Gambar 23 OLTC pada <i>service position tap 4</i>	31
Gambar 24 <i>Flowchart</i> sistem OLTC.....	42
Gambar 25 <i>Flowchart</i> penelitian	43
Gambar 26 <i>Single line diagram</i> GI Panakkukang.....	46
Gambar 27 Grafik perubahan posisi <i>tap changer</i> terhadap tegangan sekunder Trafo #1	68
Gambar 28 Grafik perubahan posisi <i>tap changer</i> terhadap rasio belitan Trafo #1	69
Gambar 29 Grafik perubahan posisi <i>tap changer</i> terhadap arus sekunder Trafo #1	69
Gambar 30 Grafik perubahan posisi <i>tap changer</i> terhadap tegangan sekunder Trafo #1	71
Gambar 31 Grafik perubahan posisi <i>tap changer</i> terhadap rasio belitan Trafo #2	72
Gambar 32 Grafik perubahan posisi <i>tap changer</i> terhadap arus sekunder Trafo #2	72
Gambar 33 Grafik perubahan $V_{tap\ sekunder}$ dan rasio <i>tap a</i> OLTC Trafo #1 pada beban puncak siang	78
Gambar 34 Grafik perubahan $V_{tap\ sekunder}$ dan rasio <i>tap a</i> OLTC Trafo #1 pada beban puncak malam.....	80
Gambar 35 Grafik perubahan $V_{tap\ sekunder}$ dan rasio <i>tap a</i> OLTC Trafo #2 pada beban puncak siang	82

Gambar 36 Grafik perubahan $V_{Tap\ sekunder}$ dan rasio $tap\ a$ Trafo #2 pada beban puncak malam	84
Gambar 37 Grafik selisih $V_{off\ load}$ dan $V_{on\ load}$ Trafo #1 dengan <i>tapping</i> pada beban puncak siang	88
Gambar 38 Grafik nilai $\%V_d$ pada Trafo #1 pada beban puncak siang dengan <i>tapping</i>	89
Gambar 39 Grafik selisih $V_{off\ load}$ dan $V_{on\ load}$ Trafo #1 dengan <i>tapping</i> pada beban puncak malam.....	90
Gambar 40 Grafik nilai $\%V_d$ pada Trafo #1 pada beban puncak malam dengan <i>tapping</i>	90
Gambar 41 Grafik selisih $V_{off\ load}$ dan $V_{on\ load}$ Trafo #2 dengan <i>tapping</i> pada beban puncak siang	93
Gambar 42 Grafik nilai $\%V_d$ pada Trafo #2 pada beban puncak siang dengan <i>tapping</i>	94
Gambar 43 Grafik selisih $V_{off\ load}$ dan $V_{on\ load}$ Trafo #2 dengan <i>tapping</i> pada beban puncak malam.....	95
Gambar 44 Grafik nilai $\%V_d$ pada Trafo #2 pada beban puncak malam dengan <i>tapping</i>	95
Gambar 45 $V_d(\%)$ Trafo #1 dengan OLTC dan tanpa OLTC pada beban puncak siang	100
Gambar 46 $V_d(\%)$ Trafo #1 dengan OLTC dan tanpa OLTC pada beban puncak malam.....	100
Gambar 47 $V_d(\%)$ Trafo #2 dengan OLTC dan tanpa OLTC pada beban puncak siang	101
Gambar 48 $V_d(\%)$ Trafo #2 dengan OLTC dan tanpa OLTC pada beban puncak malam.....	101
Gambar 49 Grafik $\Delta V_d (\%)$ pada Trafo #1.....	105
Gambar 50 Grafik $\Delta V_d (\%)$ pada Trafo #2.....	105
Gambar 51 Grafik pengaruh tegangan dan beban terhadap perubahan <i>tap</i> OLTC Trafo #1 pada beban puncak siang.....	107
Gambar 52 Grafik pengaruh tegangan dan beban terhadap perubahan <i>tap</i> OLTC Trafo #1 pada beban puncak malam	107
Gambar 53 Grafik pengaruh tegangan dan beban terhadap perubahan <i>tap</i> OLTC Trafo #2 pada beban puncak siang.....	108
Gambar 54 Grafik pengaruh tegangan dan beban terhadap perubahan <i>tap</i> OLTC Trafo #2 pada beban puncak malam	108
Gambar 55 Kurva beban harian Trafo #1	111
Gambar 56 Grafik tegangan harian Trafo #1	112
Gambar 57 Kurva beban harian Trafo #2	114
Gambar 58 Grafik tegangan harian Trafo #2	115

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Perbandingan penelitian terkait yang terdahulu dengan penelitian yang diajukan.....	37
Tabel 2 Data penyulang GI Panakkukang.....	45
Tabel 3 Spesifikasi transformator daya di GI Panakkukang.....	47
Tabel 4 <i>Nameplate</i> transformator daya di GI Panakkukang.....	48
Tabel 5 <i>Nameplate</i> posisi <i>tap changer</i> trafo.....	48
Tabel 6 Data pembebanan Trafo #1 dalam kondisi beban puncak siang di GI Panakkukang Mei 2024.....	50
Tabel 7 Data pembebanan Trafo #1 dalam kondisi beban puncak malam di GI Panakkukang Mei 2024.....	51
Tabel 8 Data pembebanan Trafo #2 dalam kondisi beban puncak siang di GI Panakkukang Mei 2024.....	52
Tabel 9 Data pembebanan Trafo #2 dalam kondisi beban puncak malam di GI Panakkukang Mei 2024.....	53
Tabel 10 Nilai tegangan nominal primer dan arus primer pada belitan <i>tap changer</i> Trafo #1 dan Trafo #2.....	54
Tabel 11 Beban puncak siang Trafo #1 Mei 2024.....	55
Tabel 12 Beban puncak malam Trafo #1 Mei 2024.....	56
Tabel 13 Beban puncak siang Trafo #2 Mei 2024.....	57
Tabel 14 Beban puncak malam Trafo #2 Mei 2024.....	58
Tabel 15 Tegangan sekunder Trafo #1 pada beban puncak siang bulan Mei 2024 tanpa <i>tapping</i>	59
Tabel 16 Tegangan sekunder Trafo #1 pada beban puncak malam bulan Mei 2024 tanpa <i>tapping</i>	60
Tabel 17 Tegangan sekunder Trafo #2 pada beban puncak siang bulan Mei 2024 tanpa <i>tapping</i>	61
Tabel 18 Tegangan sekunder Trafo #2 pada beban puncak malam bulan Mei 2024 tanpa <i>tapping</i>	62
Tabel 19 Nilai daya aktif di sisi sekunder Trafo #1 Mei 2024.....	64
Tabel 20 Nilai daya aktif di sisi sekunder Trafo #2 Mei 2024.....	65
Tabel 21 Tegangan sekunder Trafo #1 pada setiap <i>tap</i>	67
Tabel 22 Tegangan sekunder Trafo #2 pada setiap <i>tap</i>	70
Tabel 23 Persentase selisih tegangan sekunder <i>tap changer</i> sebagai <i>setpoint</i> OLTC.....	74
Tabel 24 Nilai perubahan rasio OLTC Trafo #1 pada beban puncak siang Mei 2024.....	77
Tabel 25 Nilai perubahan rasio OLTC Trafo #1 dalam keadaan beban puncak malam Mei 2024.....	79
Tabel 26 Nilai perubahan rasio OLTC Trafo #2 dalam keadaan beban puncak siang Mei 2024.....	81
Tabel 27 Nilai perubahan rasio OLTC Trafo #2 dalam keadaan beban puncak malam Mei 2024.....	83
Tabel 28 Nilai jatuh tegangan dari kondisi beban puncak siang pada Trafo #1 dengan <i>tapping</i>	86

Tabel 29 Nilai jatuh tegangan dari kondisi beban puncak siang pada Trafo #1 dengan <i>tapping</i>	87
Tabel 30 Nilai jatuh tegangan dari kondisi beban puncak siang pada Trafo #2 dengan <i>tapping</i>	91
Tabel 31 Nilai jatuh tegangan dari kondisi beban puncak malam pada Trafo #2 dengan <i>tapping</i>	92
Tabel 32 Nilai jatuh tegangan dari kondisi beban puncak siang pada Trafo #1 tanpa <i>tapping</i>	96
Tabel 33 Nilai jatuh tegangan dari kondisi beban puncak malam pada Trafo #1 tanpa <i>tapping</i>	97
Tabel 34 Nilai jatuh tegangan dari kondisi beban puncak siang pada Trafo #2 tanpa <i>tapping</i>	98
Tabel 35 Nilai jatuh tegangan dari kondisi beban puncak malam pada Trafo #2 tanpa <i>tapping</i>	99
Tabel 36 Persentase selisih jatuh tegangan Trafo #1 dengan OLTC dan tanpa OLTC	102
Tabel 37 Persentase selisih jatuh tegangan Trafo #2 dengan OLTC dan tanpa OLTC	103
Tabel 38 Sampel data tegangan dan beban terhadap perubahan posisi <i>tap changer</i>	106
Tabel 39 Beban harian Trafo #1 pada 19 Mei 2024.....	110
Tabel 40 Beban harian Trafo #2 pada 19 Mei 2024.....	113

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 <i>Bay</i> Trafo #1 GI Panakkukang	120
Lampiran 2 <i>Nameplate</i> Trafo #1 GI Panakkukang	120
Lampiran 3 <i>Bay</i> Trafo #2 GI Panakkukang	121
Lampiran 4 <i>Nameplate</i> Trafo #2 GI Panakkukang	121
Lampiran 5 Beban puncak siang penyulang GI Panakkukang.....	122
Lampiran 6 Beban puncak malam penyulang GI Panakkukang	123
Lampiran 7 Beban puncak Trafo #1 GI Panakkukang.....	124
Lampiran 8 Beban puncak Trafo #2 GI Panakkukang	124
Lampiran 9 Beban puncak <i>Line</i> Tello #1	125
Lampiran 10 Beban puncak <i>Line</i> Tello #2.....	125

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT., karena atas limpahan rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “**ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN *ON LOAD TAP CHANGER* (OLTC) TERHADAP KESTABILAN TEGANGAN SEKUNDER PADA TRANSFORMATOR DAYA 150/20 KV DI GI PANAKKUKANG**”. Tidak lupa pula saya kirimkan shalawat serta salam kepada nabi junjungan kita yaitu Nabi Muhammad SAW yang telah membawa kita dari kegelapan menuju alam yang terang benderang seperti saat ini.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari bahwa selama penyusunan skripsi ini, penulis banyak dihadapi dengan berbagai hambatan, namun berkat adanya bimbingan, dukungan, dan bantuan dari berbagai pihak, akhirnya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Oleh karena itu, melalui kesempatan ini penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Tuhan Yang Maha Esa, yang telah senantiasa memberikan kesempatan, berkat, akal budi, pengetahuan, dan segala yang tak terhitung jumlahnya untuk dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Orang tua penulis, ayah Rudi, S.T. dan ibu Syahratul Waisyah, S.Pd., yang telah menjadi pilar kekuatan dan inspirasi penulis yang senantiasa memberi dukungan tiada henti, segala doa yang tak pernah terputus, kasih sayang yang begitu tulus, dan semangat yang selalu ditanamkan pada setiap langkah hidup penulis.
3. Ibu Dr. Ir. Sri Mawar Said, M.T. selaku dosen pembimbing yang senantiasa memberikan arahan, bimbingan, dan dukungan yang sangat berharga dalam proses penyelesaian tugas akhir penulis.
4. Bapak Ir. Tajuddin Waris, M.T. dan Ir. Gassing, M.T., selaku dosen penguji penulis yang telah menyempatkan waktunya dan memberikan berbagai

saran, koreksi, dan arahan, yang berarti dalam penyelesaian tugas akhir penulis.

5. Seluruh dosen pengajar dan staff Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin atas bimbingan, didikan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis selama berkuliah di Universitas Hasanuddin.
6. PT. PLN (Persero) ULTG Panakkukang, khususnya kepada seluruh jajaran dan staf yang telah berperan serta dalam menyediakan data serta memberikan dukungan dan kesempatan bagi penulis dalam melakukan penelitian ini.
7. Teman-teman penulis, Rini dan Fara yang telah berada di samping penulis selama kurang lebih 10 tahun, serta Viya dan Laras yang telah memberi dukungan moril dalam suka dan duka sejak tahun-tahun awal perkuliahan hingga proses penyelesaian skripsi ini.
8. Teman-teman PROCEZ20R dan teman-teman Riset Laboratorium Mesin-Mesin Listrik dan Penggerak Daya yang telah menjadi teman bertukar cerita dan tawa serta dukungan dan bantuan kepada. Terima kasih atas segala proses baik suka maupun duka yang telah dilalui bersama.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa tugas akhir ini masih memiliki banyak kesalahan dan kekurangan serta masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis menerima kritik dan saran dari para pembaca yang membangun untuk perkembangan penelitian ini dan perkembangan penulis. Akhir kata, melalui tugas akhir ini penulis berharap dapat turut serta dalam perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi serta tugas akhir ini bermanfaat bagi banyak orang nantinya.

Gowa, 20 November 2024

Azizah Ainun Zhariah

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Transformator daya memegang peranan yang sangat penting dalam penyaluran energi listrik dari tegangan tinggi ke tegangan menengah. Trafo daya dapat ditemui di gardu induk dan digunakan untuk menurunkan level tegangan dari sistem transmisi tenaga listrik, misalnya 150 kV, ke sistem distribusi tenaga listrik yakni 20 kV. Trafo daya pada umumnya memiliki *on load tap changer* (OLTC), yang merupakan komponen trafo yang dapat mengubah perbandingan transformasi trafo dalam keadaan berbeban agar tegangan keluaran yang dihasilkan memiliki kualitas yang lebih baik dan sesuai dengan permintaan konsumen.

Salah satu masalah yang dihadapi dalam sistem tenaga listrik secara umum adalah adanya potensi terjadi ketidakstabilan pada tegangan keluaran yang didistribusikan ke beban. Ketidakstabilan tegangan dapat menyebabkan kondisi *undervoltage* yang dapat mengganggu operasi sistem tenaga dan menurunkan keandalan sistem sehingga menimbulkan kerugian terhadap produsen energi listrik, dalam hal ini Perusahaan Listrik Negara (PLN), dan konsumen itu sendiri.

Menurut standar Institute of *Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), kondisi *undervoltage* adalah suatu keadaan dimana nilai tegangan yang disalurkan dalam suatu sistem tenaga listrik mengalami penurunan sebesar 10% dari tegangan nominalnya dalam kurun waktu kurang lebih 1 menit. *Undervoltage* pada umumnya terjadi ketika permintaan energi listrik melonjak, misalnya pada saat kondisi beban puncak. Ketika sistem tenaga listrik menerima permintaan beban (*demand*) yang berlebih, tegangan sistem akan menurun untuk memenuhi *demand* tersebut. Akibatnya, efisiensi transformator menurun dan nilai arus yang mengalir pada sistem akan meningkat, sehingga memicu timbulnya panas berlebih pada belitan transformator dan alat-alat listrik lainnya. Energi listrik akan terbuang dalam bentuk energi panas, berpotensi menghasilkan percikan api dan menyebabkan kebakaran pada komponen listrik apabila sistem proteksi gagal menangani gangguan tersebut.

Selain itu, panas berlebih pada sistem dapat menyebabkan meningkatnya rugi-rugi atau *losses* yang menghasilkan kenaikan pada nilai tegangan jatuh sehingga kualitas energi listrik yang disalurkan tidak maksimal. Tingginya nilai tegangan jatuh akan memaksa sistem untuk melepas beban (*load shedding*) yang memengaruhi sektor publik seperti rumah sakit, sekolah, dan layanan umum, serta menyebabkan ketidaknyamanan dan kerugian pada sisi konsumen.

Fenomena ketidakstabilan tegangan dan pengaruh beban pada transformator telah dibahas oleh Zulkhulaifah dkk (2021) dengan judul penelitian “Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Trafo Distribusi 20 kV terhadap Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi pada Penyulang Hertasning Baru PT PLN (Persero) ULP Panakkukang”. Riset ini mengangkat masalah timbulnya arus pada kawat netral akibat pembebanan di ketiga fasa yang tidak seimbang, menghasilkan sistem tenaga dengan rugi-rugi daya yang tinggi dan efisiensi rendah. Dengan objek penelitian terfokus pada data pembebanan penyulang Hertasning Baru di GI Panakkukang, variabel peubah tidak bebas yang dihitung adalah faktor ketidakseimbangan beban, rugi-rugi daya, serta efisiensi trafo. Untuk menyeimbangkan beban masing-masing fasa, dilakukan pemindahan beban dari satu fasa ke fasa lain. Penyeimbangan beban pada empat gardu menghasilkan persentase rugi-rugi daya menurun dari 0,34 kW, 43,66 kW, 24,97 kW, dan 10,36 kW hingga 0,24 kW, 40,87 kW, 21,34 kW, dan 9,84 kW secara berturut-turut untuk masing-masing gardu.

Sementara itu, Sampeallo dkk (2019) mengangkat judul “Analisis Pengaturan Posisi *Tap On Load Tap Changer* pada Transformator Daya 30 MVA 70/20 kV di GI Maulafa” untuk mengamati kinerja OLTC pada dua trafo daya untuk menstabilkan tegangan keluaran trafo ketika terjadi jatuh tegangan di sisi primer. Analisis data dilakukan pada dua kondisi pembebanan trafo, yakni pada saat beban puncak dan beban terendah. Penelitian ini menghasilkan posisi tap OLTC pada saat beban puncak, yakni pada *tap* 9 dengan jangkauan tegangan 20,94 kV dan tegangan primer 60,12 kV pada trafo 1. Sementara trafo 2 menggunakan *tap* 2 dengan jangkauan tegangan 21,19 kV dan tegangan primer sebesar 69,08 kV. Pada kondisi beban terendah, trafo 1 menggunakan *tap* 9 dengan tegangan primer sebesar 68,81 kV dan trafo 2 menggunakan *tap* 1 dengan tegangan primer tafo sebesar 68,91 kV.

Penelitian ini dilakukan Gardu Induk Panakkukang yang memiliki 2 transformator daya 60 MVA untuk mentransformasi tegangan 150 kV ke 20 kV. Gardu Induk Panakkukang memiliki lokasi yang strategis di tengah kota Makassar yang menyuplai tenaga listrik ke daerah yang padat akan penduduk, industri, dan perkantoran, seperti rumah sakit, hotel dan pusat perbelanjaan, sehingga sangat penting untuk menjaga kualitas dan keandalan pasokan listrik. Seperti yang telah dibahas sebelumnya, setiap sistem tenaga menghadapi masalah dalam mempertahankan kestabilan tegangan. Hal ini pada kenyataannya cukup sulit untuk ditangani, karena dipengaruhi oleh perubahan pembebanan serta rugi-rugi daya yang terjadi selama penyaluran energi listrik sehingga mengakibatkan timbulnya jatuh tegangan. Semakin besar rugi-rugi yang terjadi akibat impedansi konduktor, semakin besar pula jatuh tegangan pada sistem.

Di samping itu, pembebanan pada sistem tiga fasa yang seringkali tidak seimbang sehingga sulit untuk memperoleh tegangan keluaran yang stabil. Untuk mengatasi masalah ini, tegangan keluaran di sisi sekunder trafo dapat dipertahankan dalam kondisi stabil dengan menggunakan *tap changer* yang secara otomatis berubah terhadap setiap perubahan tegangan primer. Besarnya jatuh tegangan atau *voltage drop* dapat memengaruhi pengaturan OLTC, sehingga diperlukan analisis mengenai parameter-parameter terkait sehingga tegangan yang didistribusikan ke konsumen dapat disalurkan dengan konstan.

Melalui penelitian ini, diharapkan dapat diperoleh pengaturan *tap* pada OLTC yang dapat meminimalisir pengaruh rugi-rugi daya dan jatuh tegangan pada sistem, sehingga menghasilkan tegangan sekunder dengan kestabilan yang optimal dan berkualitas untuk disalurkan ke beban. Di samping itu, penelitian ini juga berpotensi untuk dikembangkan dengan metode-metode yang lebih inovatif sehingga perbaikan kualitas tegangan pada sistem tenaga listrik dapat dilakukan dengan lebih efisien.

Berdasarkan dari penjelasan di atas, maka penulis melakukan penelitian yang berjudul **“ANALISIS PENGARUH PERUBAHAN *ON LOAD TAP CHANGER* (OLTC) TERHADAP KESTABILAN TEGANGAN SEKUNDER PADA TRANSFORMATOR DAYA 150/20 KV DI GI PANAKKUKANG”**.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dilakukannya penelitian, dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut.

1. Bagaimana pengaruh fluktuasi beban terhadap perubahan posisi *tap* OLTC?
2. Berapa besar perubahan posisi *tap* OLTC yang dibutuhkan untuk menstabilkan tegangan dalam kondisi beban puncak pada transformator daya di GI Panakkukang?
3. Bagaimana pengaruh jatuh tegangan terhadap kestabilan tegangan sekunder dan perubahan posisi *tap* OLTC?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui dampak perubahan pembebanan terhadap posisi *tap* OLTC.
2. Menganalisis perubahan posisi *tap* OLTC yang dibutuhkan untuk mempertahankan kualitas tegangan dalam kondisi beban puncak pada trafo daya di GI Panakkukang.
3. Mengetahui pengaruh jatuh tegangan dalam mengubah posisi *tap* OLTC serta kestabilan tegangan keluaran trafo.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Optimalisasi kestabilan tegangan sekunder : Kestabilan tegangan yang didistribusikan ke beban merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi mutu energi listrik. Melalui penelitian ini, naik-turunnya tegangan sekunder yang dipengaruhi oleh beberapa variabel dapat diminimalisir dengan penggunaan OLTC.
2. Pengaturan posisi *tap* pada OLTC : Penelitian ini menghasilkan analisis data yang dapat menunjukkan penggunaan *tap* OLTC dengan tegangan keluaran paling stabil dalam keadaan pembebanan puncak.

3. Peningkatan efisiensi sistem tenaga : Optimalisasi penggunaan *tap* pada OLTC yang menghasilkan tegangan sekunder sistem yang stabil mengindikasikan efisiensi sistem yang baik, dimana rugi-rugi daya dapat diminimalisir dan jatuh tegangan dapat ditangani dengan baik.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini meliputi hal-hal sebagai berikut.

1. Dampak perubahan beban terhadap kinerja OLTC : Pembebanan sistem yang berubah-ubah menuntut suplai tenaga listrik yang berfluktuasi pula. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada efek yang ditimbulkan dari permintaan beban yang berubah-ubah pada waktu tertentu.
2. Posisi *tap* pada OLTC untuk menstabilkan tegangan sekunder : Penelitian ini dititikpusatkan untuk menganalisis posisi *tap changer* pada OLTC yang dapat menyediakan tegangan sekunder yang paling stabil. Dengan permintaan suplai tenaga yang mencapai beban puncak,
3. Perubahan toleransi OLTC dalam menaikkan atau menurunkan tegangan : Penelitian ini berfokus pada rentang nilai toleransi jatuh tegangan yang memicu perubahan *tap* pada OLTC. Menggunakan data pembebanan pada interval waktu tertentu, perubahan *tap changer* dapat dikaitkan dengan perubahan tegangan di sisi primer trafo daya.

1.6 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan pemahaman terhadap penelitian ini, maka diuraikan sistematika penulisan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini membahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penulisan, ruang lingkup, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menguraikan teori-teori relevan yang mendukung penelitian yang meliputi sistem tenaga listrik, transformator daya, *on load tap changer*, jatuh tegangan, terdahulu yang digunakan sebagai referensi.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang diagram alir penelitian, rancangan sistem, waktu dan lokasi penelitian, alat dan bahan yang digunakan, serta teknik pengumpulan data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas mengenai proses analisa data yang diperoleh dengan menggunakan

BAB V SIMPULAN DAN SARAN

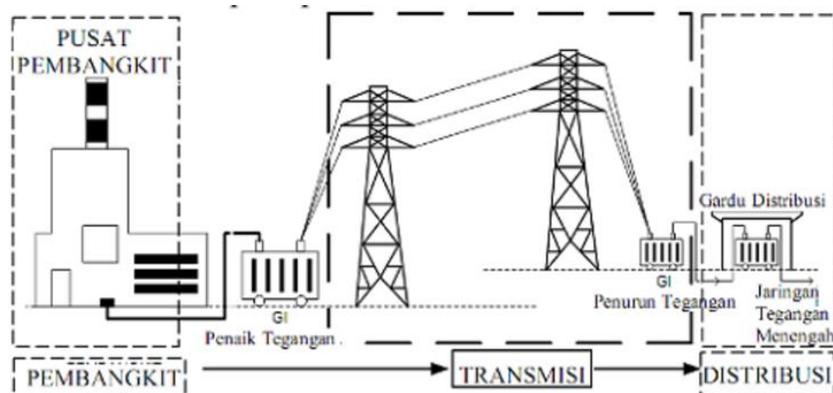
Bab ini memuat simpulan dari penelitian yang dilakukan dan saran-saran yang dapat digunakan sebagai tindak lanjut dari penelitian yang telah dilakukan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

Sistem Tenaga Listrik merupakan sekumpulan pusat listrik dan pusat beban yang satu sama lain dihubungkan oleh jaringan transmisi dan distribusi sehingga merupakan sebuah kesatuan interkoneksi. Energi listrik dibangkitkan oleh pusat-pusat listrik seperti PLTA, PLTU, PLTG, PLTGU, PLTP dan PLTP. Kemudian energi listrik disalurkan melalui saluran transmisi dan didistribusikan ke beban-beban melalui saluran distribusi (Kadir, 2010).



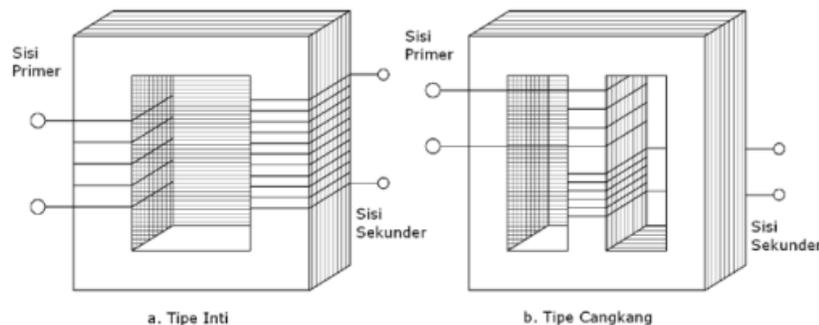
Gambar 1 Komponen utama pada penyaluran tenaga listrik
Sumber: (Dasa Novfowan dkk., 2020)

Pada sistem yang besar, tegangan keluaran generator dinaikkan menjadi tegangan transmisi yaitu berupa tegangan tinggi (TT) ataupun tegangan ekstra tinggi (TET) untuk memperkecil rugi-rugi daya yang terjadi dengan menggunakan transformator *step up*. Setelah energi listrik disalurkan melalui saluran transmisi maka sampailah energi listrik ke Gardu Induk (GI) untuk diturunkan tegangannya menjadi tegangan menengah (TM) menggunakan transformator *step down*. Setelah keluar dari GI, maka energi listrik akan disalurkan melalui jaringan distribusi primer pada level tegangan menengah, kemudian kembali diturunkan tegangannya

pada gardu distribusi menjadi tegangan rendah dan akhirnya disalurkan melalui jaringan distribusi sekunder kepada konsumen (Kadir, 2010).

2.2 Transformator

Transformator adalah salah satu mesin listrik statis yang berfungsi mengubah tegangan arus bolak-balik dari suatu tingkat ke tingkat lainnya. Secara umum, transformator terdiri atas dua buah kumparan yang dibelit pada sebuah inti besi. Jumlah belitan pada masing-masing kumparan memengaruhi perubahan tegangan yang dihasilkan oleh transformator. Menurut konstruksinya, transformator dapat dibedakan menjadi dua jenis, yakni tipe inti (*core type*) dan tipe cangkang (*eggshell type*) seperti yang ditunjukkan pada gambar 2. Pada tipe inti terdapat dua kaki, dan masing-masing kaki dibelit oleh satu kumparan. Sedangkan tipe cangkang mempunyai tiga buah kaki, dan hanya kaki yang tengah-tengah dibelit oleh kedua kumparan. Kedua kumparan terhubung secara elektrik, melainkan saling tergabung secara magnetik melalui inti (Kadir, 2010b).



Gambar 2 Jenis transformator menurut konstruksinya
Sumber: (Alamsyah & L, 2018)

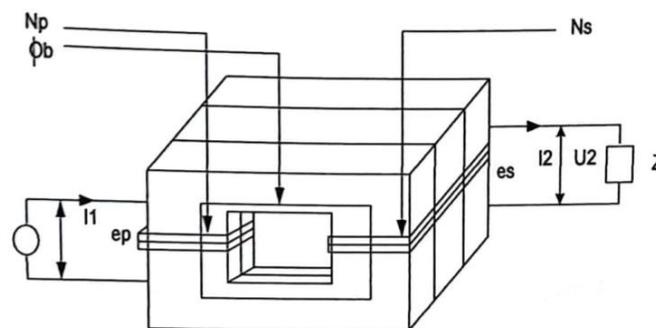
Transformator yang dipakai pada jaringan tenaga listrik merupakan transformator tenaga. Di samping itu, ada jenis-jenis transformator lain yang banyak dipergunakan dan yang pada umumnya merupakan transformator yang jauh lebih kecil. Misalnya transformator yang dipakai di rumah tangga untuk menyesuaikan tegangan dari lemari es dengan yang dari jaringan listrik umum.

Atau transformator yang lebih kecil, yang dipakai pada lampu TL. Atau, lebih kecil lagi, transformator "mini" yang dipergunakan pada berbagai alat elektronik, seperti pesawat penerima radio, televisi, dan lain sebagainya (Kadir, 2010b).

2.2.1 Prinsip kerja transformator

Hukum utama dalam transformator adalah Hukum Induksi Faraday. Menurut hukum ini, suatu gaya listrik melalui garis lengkung yang tertutup, adalah berbanding lurus dengan perubahan persatuan waktu dari pada arus induksi atau *flux* yang dilingkari oleh garis lengkung itu. Arus induksi atau fluks didefinisikan sebagai integral permukaan induksi magnet melalui suatu bidang (Kadir, 2010b).

Untuk memahami prinsip kerja transformator, dapat dilihat gambar 3 berikut.



Gambar 3 Bagian-bagian transformator
Sumber: (Kadir, 2010)

dimana

U_1	=	tegangan sumber	e_p	=	GGL induksi kumparan primer
U_2	=	tegangan beban	e_s	=	GGL induksi kumparan sekunder
I_1	=	arus primer	N_p	=	jumlah lilitan kumparan primer
I_2	=	arus beban	N_s	=	jumlah lilitan kumparan sekunder
Φ_b	=	fluks magnet Bersama	Z	=	Beban

Apabila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan, maka akan mengalir arus bolak-balik I_1 pada kumparan tersebut, karena kumparan tersebut mempunyai inti maka I_1 menimbulkan fluks magnet yang juga berubah-ubah pada

intinya. Hal ini mengakibatkan timbulnya GGL (gaya gerak listrik) induksi pada kumparan primer. Besarnya GGL induksi pada kumparan primer adalah

$$E_p = -N_p \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

dimana

- E_p = GGL induksi kumparan primer
- N_p = jumlah lilitan kumparan primer
- $d\Phi$ = perubahan garis-garis gaya magnet
- dt = perubahan waktu dalam satuan detik

Fluks magnet yang menginduksikan GGL induksi E_p juga dialami oleh kumparan sekunder karena merupakan *mutual flux*. Dengan demikian fluks tersebut menginduksikan GGL induksi E_s pada kumparan sekunder, besarnya GGL pada kumparan sekunder adalah :

$$E_s = -N_s \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

dimana

- E_s = GGL induksi kumparan sekunder
- N_s = jumlah lilitan kumparan sekunder
- $d\Phi$ = perubahan garis-garis gaya magnet
- dt = perubahan waktu dalam satuan detik

Dari persamaan (1) dan (2), dapat diperoleh perbandingan jumlah lilitan berdasarkan perbandingan GGL induksi, yaitu:

$$a = \frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{V_p}{V_s} \quad (3)$$

dimana

- a = Rasio lilitan transformator

Apabila $a < 1$, maka transformator berfungsi untuk menaikkan tegangan (*step-up transformer*). Sementara $a > 1$, maka transformator berfungsi untuk menurunkan tegangan (*step-down transformer*).

2.2.2 Transformator 1 fasa dan 3 fasa

Transformator 1 fasa adalah transformator yang memiliki frekuensi kumparan primer dan kumparan sekunder yang sama. Tegangan dan arus pada kumparan primer dan kumparan sekunder dapat diubah-ubah sesuai yang dikehendaki. Pada umumnya transformator 1 fasa digunakan untuk kapasitas kecil. Sementara itu, transformator 3 fasa digunakan untuk mengubah energi listrik bolak-balik AC dari suatu nilai ke nilai tegangan lainnya pada sistem 3 fasa (Kadir, 2010b).

Transformator 1 fasa secara prinsip sama dengan sebuah transformator 1 fasa, perbedaan yang paling mendasar adalah pada sistem kelistrikannya yaitu sistem 1 fasa dan 3 fasa. Transformator 3 fasa banyak digunakan pada sistem transmisi dan distribusi tenaga listrik karena pertimbangan ekonomis. transformator tiga fasa banyak sekali mengurangi berat dan lebar kerangka, sehingga harganya dapat dikurangi bila dibandingkan dengan penggabungan tiga buah transformator satu fasa dengan *rating* daya yang sama (Alamsyah & L, 2018).

2.3 Transformator Daya

Transformator daya adalah suatu peralatan tenaga listrik yang berfungsi untuk menyalurkan tenaga atau daya listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah atau sebaliknya. Sebagai jantung dari operasi penyaluran tenaga listrik pada sistem transmisi dan distribusi, suatu transformator diharapkan dapat beroperasi secara maksimal tanpa berhenti. Berdasarkan tegangan operasinya, transformator daya dapat dibedakan menjadi transformator 500/150 kV dan 150/70 kV biasa disebut *Interbus Transformator (IBT)*. Transformator 150/20 kV dan 70/20 kV disebut juga trafo distribusi. Titik netral transformator ditanahkan sesuai dengan kebutuhan untuk sistem pengamanan/proteksi, sebagai contoh transformator 150/70 kV ditanahkan secara langsung di sisi netral 150 kV dan transformator 70/20 kV

ditanahkan dengan tahanan rendah atau tahanan tinggi atau langsung di sisi netral 20 kV (Siburian, 2019).



Gambar 4 Transformator daya 60 MVA GI Panakkukang

Transformator adalah peralatan listrik yang digunakan pada sistem tenaga listrik untuk menyalurkan daya dari pembangkit ke konsumen. Pada sistem tenaga listrik terdapat tegangan transmisi dan distribusi yang beragam. Hal ini menyebabkan transformator daya harus diletakkan pada tiap titik dimana di titik tersebut terjadi transisi antar level tegangan.. Menurut kapasitasnya, transformator dapat diklasifikasikan sebagai berikut (*U.S. rating*) :

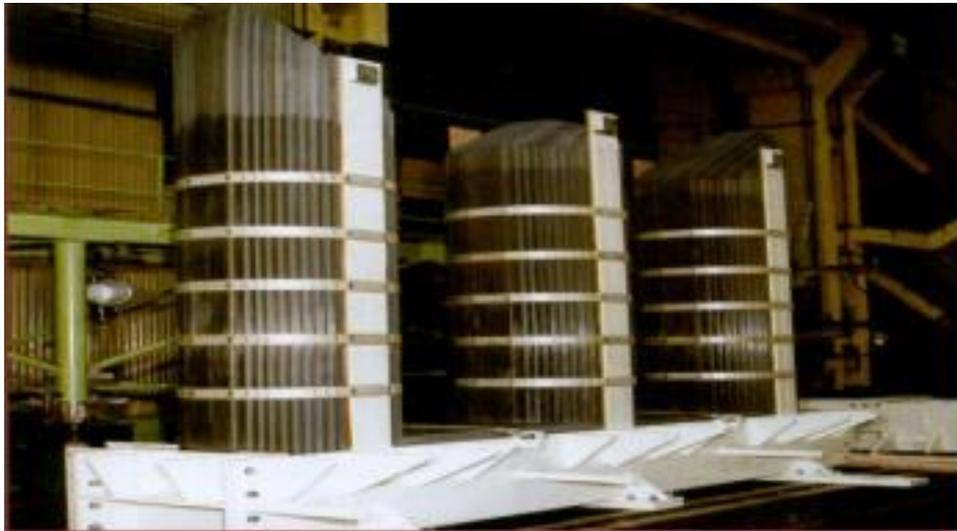
1. Transformator daya kecil; 500 – 7500 kVA
2. Transformator daya menengah; 7500 kVA – 100 MVA
3. Transformator daya besar; diatas 100 MVA (Hafidz dkk., 2020).

Trafo daya umumnya dilengkapi dengan suatu alat pengatur tegangan yaitu *On Load Tap Changer* (OLTC) artinya trafo tersebut dapat diubah-ubah tegangannya melalui suatu *tap* dan perubahan ini bisa dijalankan pada waktu trafo dalam keadaan berbeban. Umumnya trafo yang dilengkapi dengan OLTC adalah trafo-trafo dengan rating tegangan 30 kV sampai 150 kV (Hafid dkk., 2019a).

2.4 Konstruksi Transformator Daya

2.4.1 Inti trafo

Inti besi berfungsi untuk mempermudah jalan fluks, yang ditimbulkan oleh arus listrik yang melalui kumparan. Dibuat dari lempengan-lempengan atau plat-plat tipis dari campuran besi khusus yang berisi sedikit silikon. Laminasi-laminasi saling terisolasi, untuk mengurangi panas (sebagai rugi-rugi besi) yang ditimbulkan oleh “*Eddy Current*”, dan dijepit secara kuat agar tidak terjadi getaran-getaran (Siburian, 2019).



Gambar 5 Inti trafo
Sumber: (Hafid dkk., 2019)

2.4.2 Kumparan trafo

Beberapa lilitan kawat berisolasi membentuk suatu kumparan. Kumparan tersebut diisolasi baik terhadap inti besi maupun terhadap kumparan lain dengan isolasi padat, seperti karton, pertinax dan lain-lain. Umumnya pada trafo terdapat kumparan primer dan sekunder. Bila kumparan primer dihubungkan dengan tegangan atau arus bolak-balik maka pada kumparan tersebut timbul fluks yang menginduksikan tegangan, bila pada rangkaian skunder diberi beban maka akan mengalir arus pada kumparan sebagai alat transformasi tegangan dan arus (Siburian, 2019).



Gambar 6 Kumbaran trafo

Sumber: <https://atstekno.com/macam-macam-tranformator-trafo-prinsip-kerja-transformator/>

2.4.3 Minyak Trafo



Gambar 7 Pengujian minyak trafo

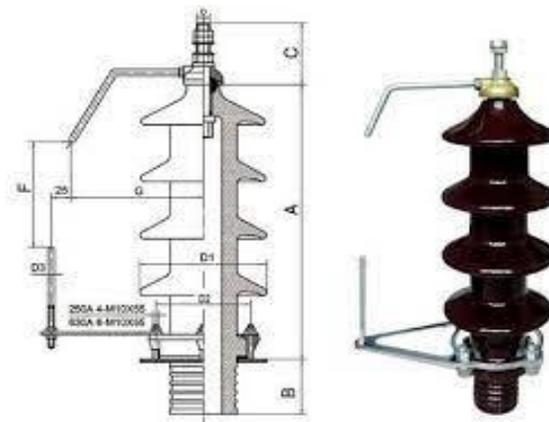
Sebagian besar trafo daya, kumbaran-kumbaran dan intinya direndam dalam minyak trafo, terutama trafo-trafo daya berkapasitas besar, karena minyak trafo mempunyai sifat sebagai media pemindah panas dan sebagai isolasi (daya tegangan

tembus tinggi) sehingga berfungsi sebagai media pendingin dan isolasi. Untuk itu minyak trafo harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

1. Memiliki kekuatan isolasi yang tinggi.
2. Penyalur panas yang baik dan memiliki berat jenis yang kecil, sehingga partikel-partikel dalam minyak dapat mengendap dengan cepat.
3. Memiliki viskositas yang rendah agar lebih mudah bersirkulasi sehingga pendingin menjadi lebih baik.
4. Memiliki titik nyala yang tinggi, tidak mudah menguap yang dapat membahayakan.
5. Tidak merusak bahan isolasi yang padat.
6. Memiliki sifat kimia yang stabil.
7. Tidak bereaksi secara kimiawi dengan logam dan bahan isolasi (Siburian, 2019).

2.4.4 Bushing

Hubungan antara kumparan trafo ke jaringan luar melalui sebuah *bushing*, yaitu sebuah konduktor yang diselubungi oleh isolator, yang sekali berfungsi sebagai penyekat antara konduktor dengan tangki trafo (Siburian, 2019).



Gambar 8 *Bushing*

Sumber: <https://www.radius.co.id/partial-discharge-transformer-pada-bushing-trafo-bagian-2/>

2.4.5 Tangki dan konservator

Pada umumnya bagian-bagian dari trafo yang terendam minyak trafo berada (ditempatkan) dalam tangki. Untuk menampung pemuaian minyak trafo, tangki

dilengkapi dengan konservator. Konservator senantiasa berisi sebagian minyak, guna menjamin bahwa tangki transformator berisi minyak penuh dan juga membantu menghindari absorpsi kelembaban dari atmosfer oleh minyak tangki (Siburian, 2019).



Gambar 9 Konservator minyak (tangki)
Sumber: (Siburian, 2019)

2.4.6 Peralatan bantu

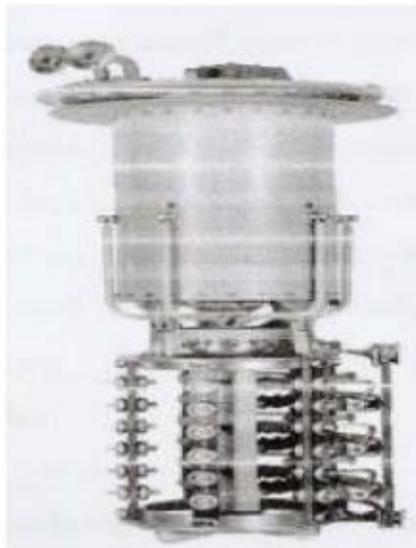
Peralatan bantu yang terdapat pada trafo daya terdiri dari :

1. Pendingin trafo
2. *Tap Changer* (perubah tap)
3. Alat pernapasan
4. Indikator (Siburian, 2019).

2.5 Tap Changer

Dalam proses transmisi bisa saja tegangan tersebut mengalami *losses* yang disebabkan oleh berbagai macam faktor. Seperti tegangan terima dari pembangkit,

tegangan kirim di sisi 20 kV juga ditransformasikan kembali atau diturunkan oleh transformator *step down* dari tegangan transmisi menjadi tegangan ideal distribusi yakni 20 kV. Akan tetapi, dalam proses pendistribusiannya sering sekali mengalami *losses* atau kehilangan daya sehingga menyebabkan jatuh tegangan, yang berakibat pada terganggunya jaringan distribusi dan proses distribusi pada sisi 20 kV. Salah satu cara untuk menanggulangi hal tersebut adalah dengan melakukan pengaturan *tap changer*, yang merupakan sebuah alat yang bekerja dengan cara merubah perbandingan lilitan dalam sebuah transformator untuk mendapat tegangan keluaran yang normal (Sampeallo dkk., 2018).



Gambar 10 *Tap changer*
Sumber: (Sampeallo dkk., 2018)

2.5.1 Fungsi *tap changer* pada transformator

Tap changer dari transformator daya digunakan untuk mengatur tegangan keluaran transformator. Karena tegangan pada jaringan listrik tidak sama persis, untuk membuat transformator tidak bermasalah dalam posisi di *grid* yang bisa memberi nilai tegangan pengenalan, transformator pada lilitan tegangan tinggi menetapkan sejumlah keran dan akan disadap tombol tekan dengan membuka tentang *grid* yang terhubung. Dengan cara ini saklar dapat dihubungkan dengan gulungan transformator yang berbeda untuk mengubah rasio putaran gulungan

tegangan tinggi dan rendah, sehingga dapat menyesuaikan tegangan keluaran pada transformator. *Tap changer* yang dapat beroperasi untuk memindahkan *tap* transformator dalam keadaan berbeban disebut *on load tap changer* dan dapat beroperasi secara manual atau otomatis.

2.5.2 *On load tap changer* (OLTC)

Pada tahun 1926, Dr. Bernhard Jansen bersama Oskar dan Richard Scheubeck bersaudara mengembangkan komponen resistor dengan kecepatan tinggi yang membuka peluang perubahan rasio pada belitan transformator secara langsung dalam keadaan berbeban. Dengan beberapa penyempurnaan, ketiganya akhirnya menemukan teknologi yang terkenal di berbagai belahan dunia dengan nama “Reinhausen *On Load Tap Changer*”. Dengan membaiknya keandalan dari *on load tap changer*, maka kebanyakan dipakai adalah *on load tap changer* sekaligus sebagai pengganti dari *on load voltage regulator*. Sejak dikembangkan, dua sistem *switching* telah digunakan untuk proses perpindahan beban, yakni tipe OLTC dengan resistor berkecepatan tinggi dan OLTC dengan tipe reaktor. OLTC dengan resistor berkecepatan tinggi dipasang dalam tanki transformator (*in-tank type*), sementara OLTC tipe reaktor biasanya dipasang di luar tank trafo (*compartment type*).



(a)



(b)

Gambar 11 OLTC tipe *compartment* (a) dan *in-tank* (b)

Sumber : <https://www.reinhausen.com/newsroom/mr-knowledge-base/tap-changer-basics>

Untuk memenuhi kualitas tegangan pelayanan suatu kebutuhan konsumen tegangan keluaran harus dapat diubah sesuai keinginan. Untuk memenuhi hal tersebut, maka pada salah satu atau pada kedua sisi belitan transformator dibuat *tap* (penyadap) untuk merubah perbandingan transformasi (rasio) trafo (Syahputra dkk., 2020).

Ada beberapa alasan dasar yang menyebabkan trafo daya membutuhkan *tapping*.

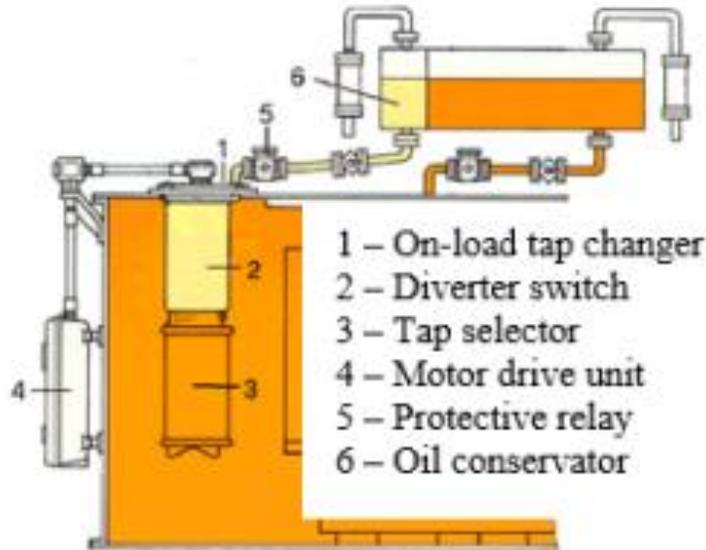
- a. Mengimbangi perubahan tegangan yang disumbangkan oleh sistem besar dan sistem trafo lainnya.
- b. Mengimbangi proses dalam trafo dan mempertahankan tegangan output tetap konstan.
- c. Pada generator dan trafo interbus berfungsi untuk membantu dalam pengendalian aliran Var.
- d. Memungkinkan kompensasi untuk faktor yang tidak diketahui secara akurat pada saat perencanaan sistem tenaga listrik.
- e. Memungkinkan untuk perubahan kondisi sistem di masa depan.

Selain keuntungan, terdapat juga kerugian penggunaan *tapping* pada trafo:

- a. Penggunaannya selalu mengarah ke beberapa variasi kerapatan fluks dalam operasi sehingga kerapatan fluks didesain harus lebih rendah daripada keadaan optimal.
- b. Impedansi transformator akan bervariasi sesuai dengan posisi tap sehingga desain sistem harus memungkinkan untuk ini.
- c. *Losses* akan bervariasi sesuai dengan posisi tap, maka pendingin yang disediakan harus cukup besar untuk memenuhi kemungkinan kerugian maksimum.
- d. Akan ada beberapa kondisi ketika bagian kumparan tidak digunakan, menyebabkan kurang idealan keseimbangan elektromagnetik dalam trafo yang mana perubahan tersebut menghasilkan peningkatan ketidakseimbangan gaya yang akan menyebabkan gangguan.

- e. Peningkatan jumlah sambungan dalam trafo akan meningkatkan kompleksitas dan kemungkinan gangguan internal (Fathurrahman & Ismanto, 2015).

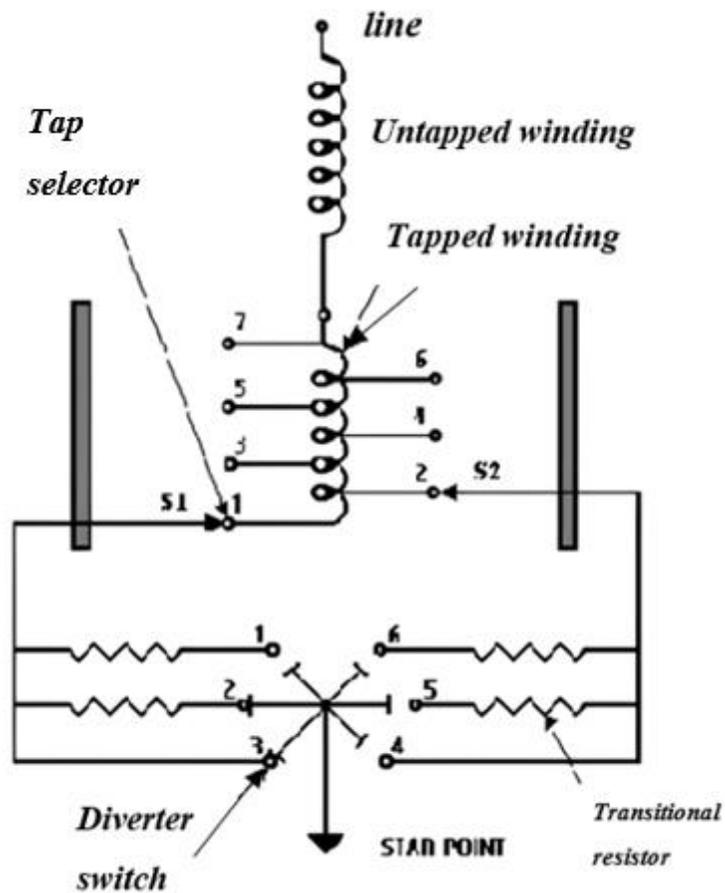
2.5.3 Bagian-bagian *on load tap changer*



Gambar 12 Posisi OLTC pada trafo daya
Sumber : (Fathurrahman & Ismanto, 2015)

On load tap changer terdiri atas beberapa komponen utama, yakni *tap selector* (pemilih *tap*), *diverter switch* (saklar pengalih), dan *transitional resistor* (tahanan transisi). *Tap selector* terdiri atas rangkaian mekanis berupa beberapa terminal yang dapat menentukan perubahan posisi *tap* maupun rasio belitan primer yang aktif pada transformator. Sementara *diverter switch* berupa rangkaian mekanis yang berfungsi untuk membuat kontak atau melepas kontak dalam waktu yang singkat. *Diverter switch* ditempatkan di dalam *tap changer oil compartment*, yang merupakan tangki yang terisi oleh minyak isolasi sebagai isolator dan bahan pendingin. Untuk melakukan perpindahan *tap* dengan cepat dalam keadaan trafo berbeban, diperlukan sejumlah tahanan yang mampu menahan aliran arus primer pada belitan transformator selama titik penyadapan berubah, oleh karena itu digunakan *transitional resistor*. *Transitional resistor* pada umumnya berupa resistor berbahan nikelin sebanyak dua buah dengan resistansi sebesar 4,8 Ω .

Diverter switch, *tap selector* dan *transitional resistor* terisolir terhadap tanah, oleh karena itu *switch* akan menimbulkan busur api pada saat beroperasi (Saifulloh, 2022).



Gambar 13 Bagian-bagian OLTC
Sumber : (Fathurrahman & Ismanto, 2015)

Sebagai sistem pengendali, *tap changer* dari suatu transformator daya dilengkapi dengan *control panel* dan *motor drive unit* yang digunakan untuk memberikan gaya penggerak menerima sinyal listrik dan panel kontrol. *Motor drive* umumnya dipasang pada sisi luar dinding tanki transformator dan poros penggerak dihubungkan dengan mekanik dengan *diverter switch* dan *tap selector*.



Gambar 14 Control panel pada OLTC
 Sumber : <http://www.kaixing-merchantinfo.cn>

Control panel dan *motor drive* terdiri atas beberapa bagian, yaitu:

- a. Motor AC tiga fasa sebagai penggerak mekanik saat *tap* diganti.
- b. Kontaktor yang terdiri atas tiga buah kontak dengan fungsi yang berbeda. Kontak utama digunakan untuk mengalirkan suplai tegangan AC 380 volt ke motor 3 fasa dan sebagai *limit switch* saat posisi *tap* sudah sesuai. Sementara kontak kedua dan ketiga berfungsi sebagai pembalik fasa motor sehingga motor dapat bekerja baik pada arah putaran ke kiri dan ke kanan.
- c. MCB sebagai pengaman perangkat pada *control panel*.
- d. *Mechanic counter display*, berfungsi sebagai penampil untuk menunjukkan berapa kali *tap changer* sudah bekerja dan posisi atau kedudukan *tap*-nya.
- e. *Selector switch* yang memiliki dua pilihan pengontrolan, yaitu pengontrolan *remote* atau *local*. Pengontrolan *remote* adalah pengontrolan *tap changer* yang dilakukan dari panel kontrol di gardu induk. Sedangkan pengontrolan *local* adalah pengontrolan yang dilakukan secara manual di trafo atau langsung pada panel control di lapangan. Di beberapa *tap changer*, fungsi dari *diverter switch* dan *tap selector* merupakan kombinasi dari *selector switch* (Saifulloh, 2022).



Gambar 15 *Motor drive unit* pada OLTC di GI Panakkukang

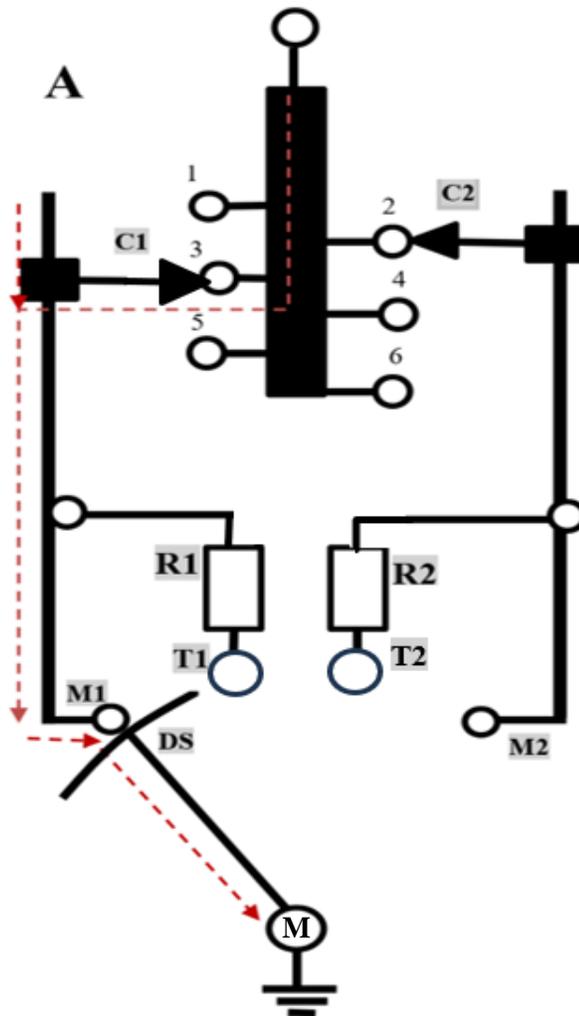
Di samping itu, OLTC juga terdiri atas bagian *head and cover* yang merupakan bagian pelindung OLTC yang terhubung ke bagian luar. OLTC juga memiliki *protection relay* yang berfungsi mengamankan tekanan minyak berlebih pada *diverter switch compartment* pada saat terjadi gangguan pada sistem. Sementara itu, *tap changer oil conservator tank* berfungsi sebagai tempat penyimpanan cadangan suplai minyak untuk *tap changer*. Biasanya tangki ini juga digabung dengan tangki konservator transformator yang dipisahkan oleh suatu sekat pemisah.

2.5.3 Cara kerja *on load tap changer*

)Secara umum, *on load tap changer* bekerja dengan cara mengatur tegangan sisi primer dan sekunder melalui pengaturan rasio tegangan yang dapat dilakukan dengan menambah atau mengurangi jumlah belitan transformator menggunakan *tap selector* dan *diverter switch*. Agar lebih mudah dipahami, Fathurrahman & Ismanto (2015) menguraikan proses perpindahan posisi *tap* dari titik *tap 3* ke *tap 4* sebagai contoh. Mekanisme perpindahan titik penyadapan dari *tap 3* ke *tap 4* ditunjukkan pada gambar 16 sampai gambar 23.

a. Posisi A

Pada posisi A, arus mengalir dari sisi primer transformator ke bagian *tap changer* melalui kontak *tap selector* ganjil C1 yang terhubung dengan *tap 3*. Sementara kontak *tap selector* genap C2 terhubung dengan *tap 2*. Arus mengalir melalui *tap 3* ke kontak C1, kemudian melalui kontak M2 yang terhubung dengan kontak *diverter switch* DS ke sisi sekunder trafo yang terhubung dengan beban dan titik *ground*. Posisi ini dapat disebut dengan *service position* pada *tap 3*.

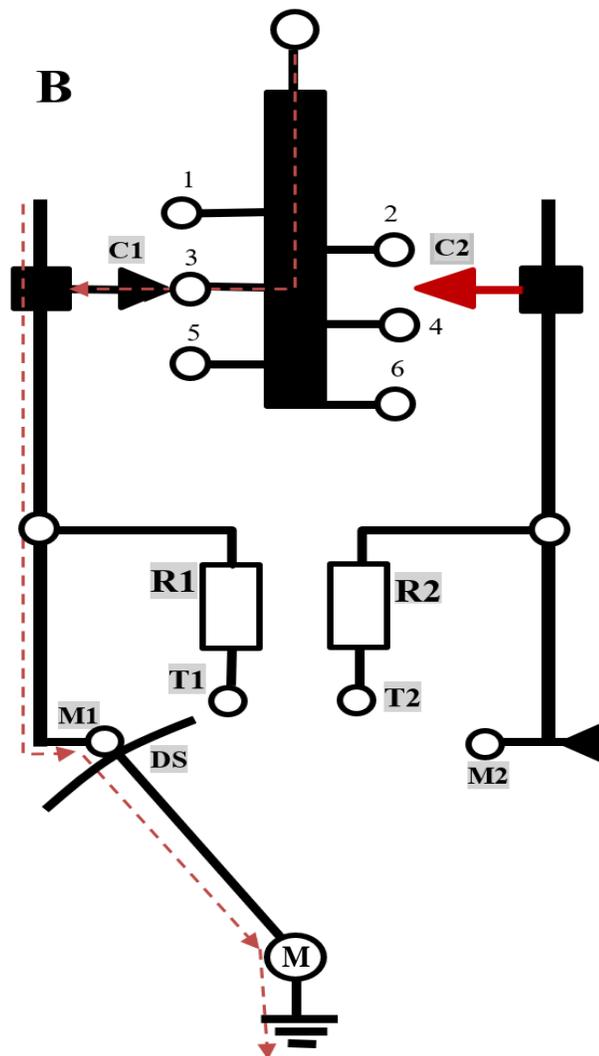


Gambar 16 OLTC pada *service position* tap 3

Sumber : (Fathurrahman & Ismanto, 2015)

b. Posisi B

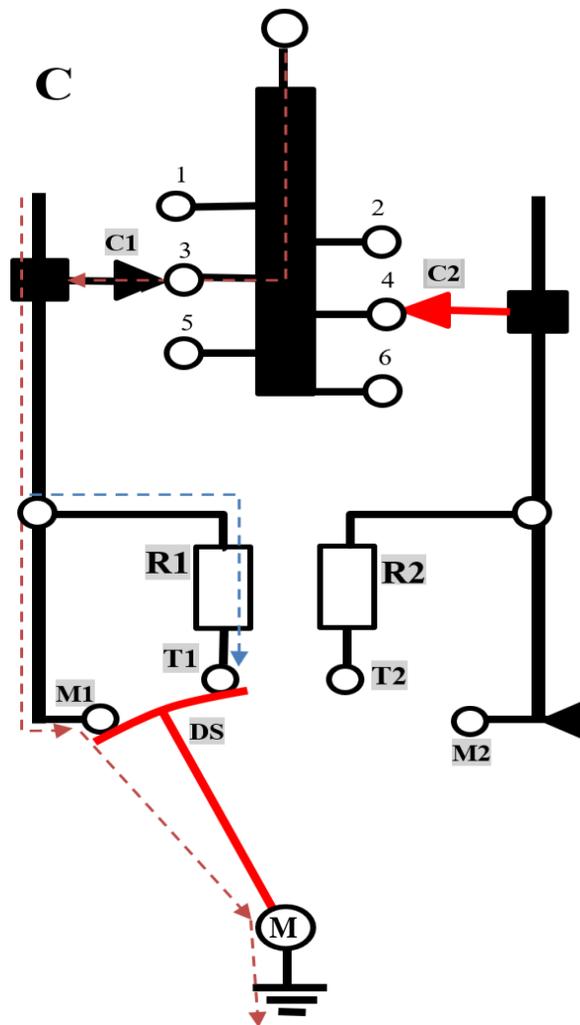
Posisi B menunjukkan kondisi dimana OLTC masih beroperasi pada *tap* 3, sementara *tap selector* C2 mulai bergerak ke titik penyadapan *tap* 4. Pada keadaan ini, arus masih mengalir seperti pada posisi A. Posisi B terjadi ketika OLTC mulai mendeteksi adanya indikasi tegangan yang tidak sesuai dengan standar operasinya, sehingga titik penyadapan digeser sebanyak satu *tap*.



Gambar 17 Perpindahan *tap selector* C2 dari *tap* 2 ke *tap* 4
 Sumber : (Fathurrahman & Ismanto, 2015)

c. Posisi C

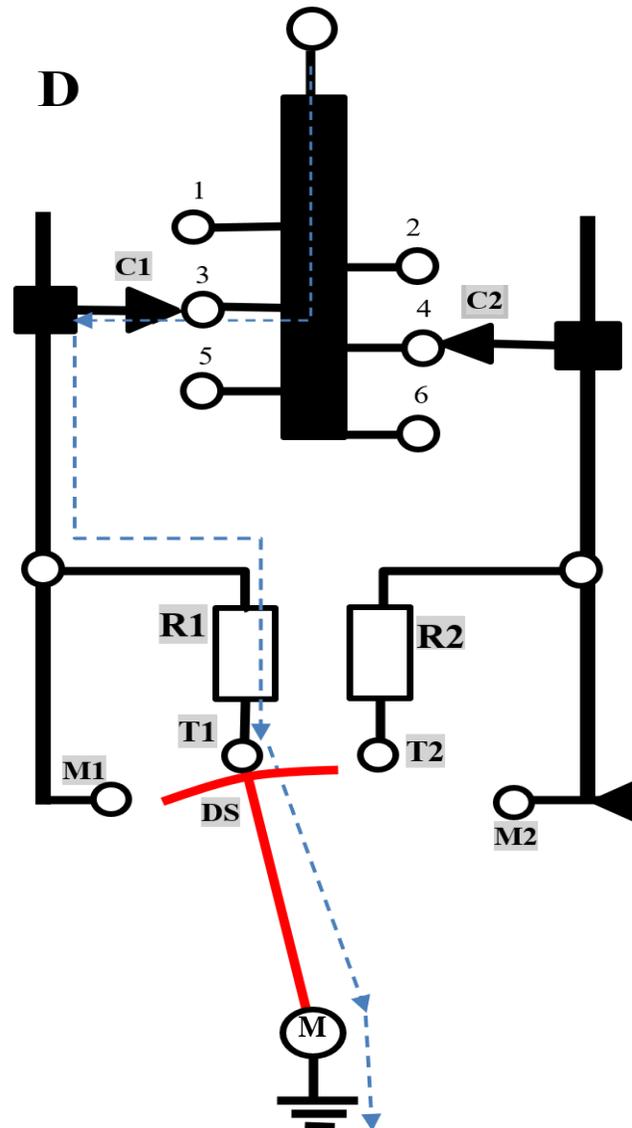
Posisi ketiga yakni posisi C, kontak *tap selector* C2 berhenti pada *tap* 4. Sementara itu *switch diverter* mulai bergerak dari kontak M1 ke kontak T1 sehingga terdapat arus yang mengalir ke arah kontak T1. Namun, dengan adanya penggunaan *transitional resistor* R1, maka arus dapat dihambat dengan waktu yang cepat sehingga arus hanya mengalir melalui kontak M1.



Gambar 18 Proses perpindahan *diverter switch* dari titik M1 ke titik T1
Sumber : (Fathurrahman & Ismanto, 2015)

d. Posisi D

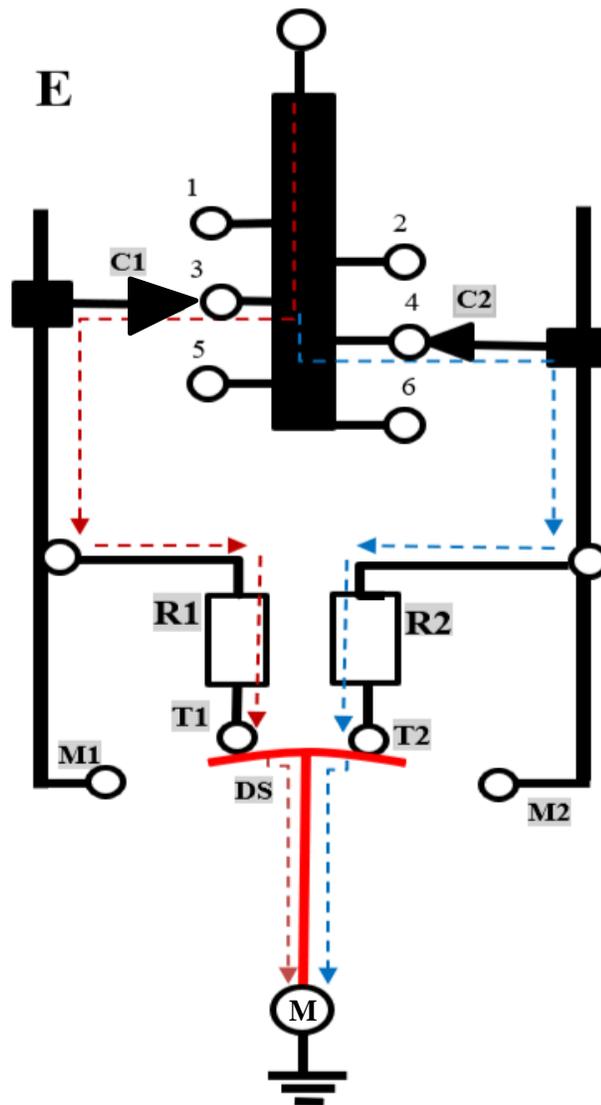
Pada posisi D, *tap selector* C2 membuat kontak dengan terminal *tap* 4. Kontak *diverter switch* terhubung dengan *transitional resistor* R1. Arus mengalir melalui R1 ke kontak T1 menuju titik pembumian. Keadaan ini dapat disebut sebagai proses transisi pada resistor R1.



Gambar 19 Transisi kontak T1
Sumber : (Fathurrahman & Ismanto, 2015)

e. Posisi E

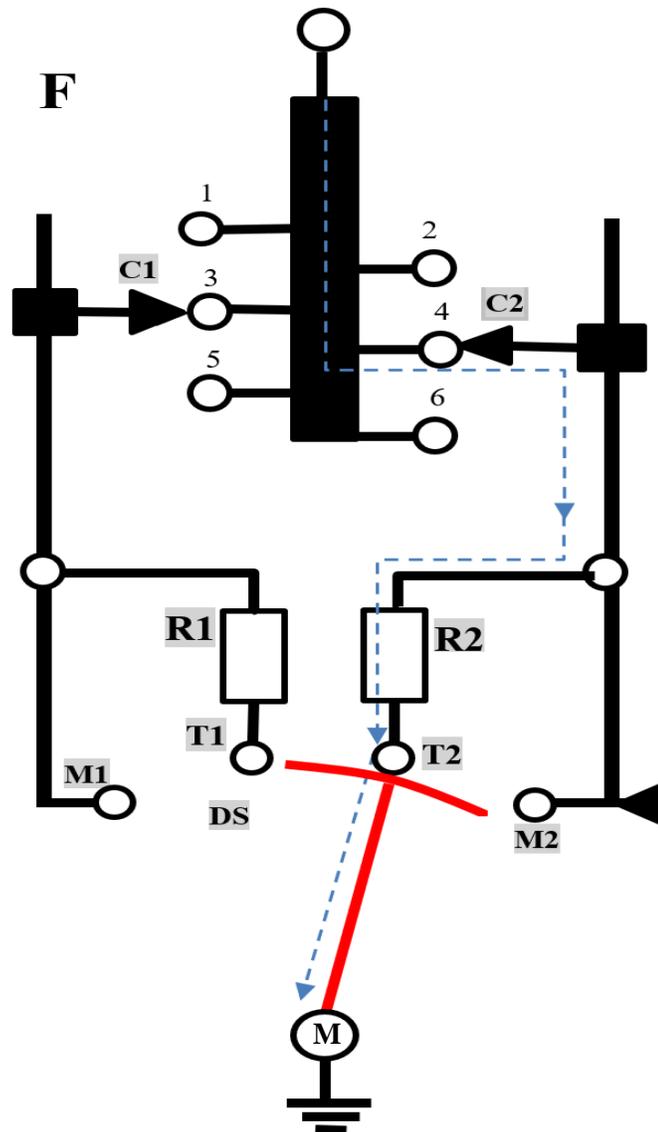
Posisi E disebut sebagai keadaan superposisi, terjadi ketika kontak *diverter switch* bergerak menuju kontak T2 dari T1, sehingga kontak T1 dan T2 tertutup. Akibatnya, arus mengalir melalui *transitional resistor* R1 dan R2 dari *tap 3* dan *tap 4* menuju titik pembumian.



Gambar 20 Keadaan superposisi
Sumber : (Fathurrahman & Ismanto, 2015)

f. Posisi F

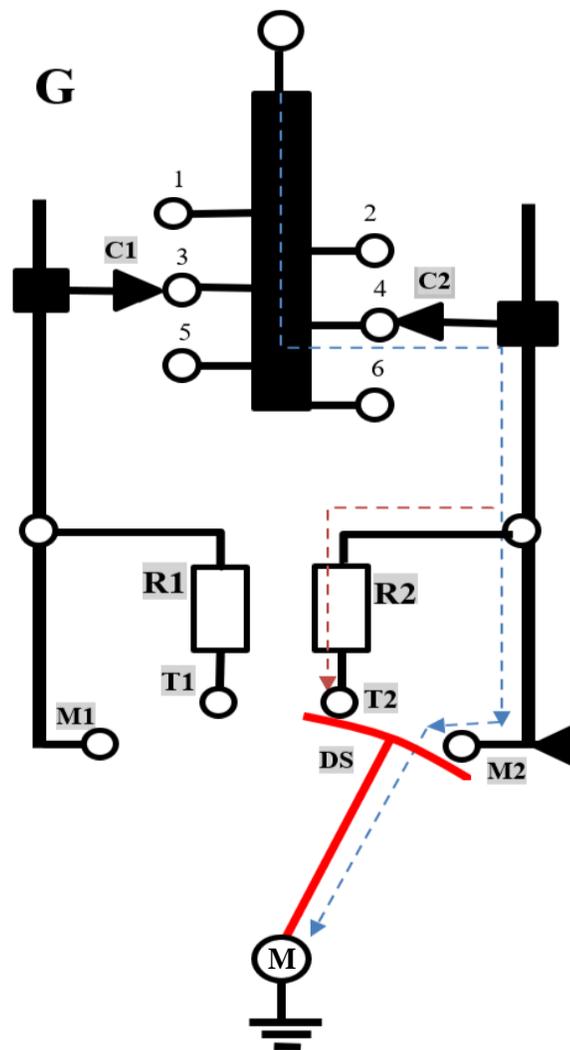
Posisi F mengilustrasikan posisi transisi *diverter switch* ke kontak B. Dengan demikian, arus dapat mengalir dari titik penyadapan *tap* 4 ke resistor R2 menuju kontak T2. Kondisi ini dapat disebut sebagai transisi kontak T2.



Gambar 21 Transisi kontak T2
Sumber : (Fathurrahman & Ismanto, 2015)

g. Posisi G

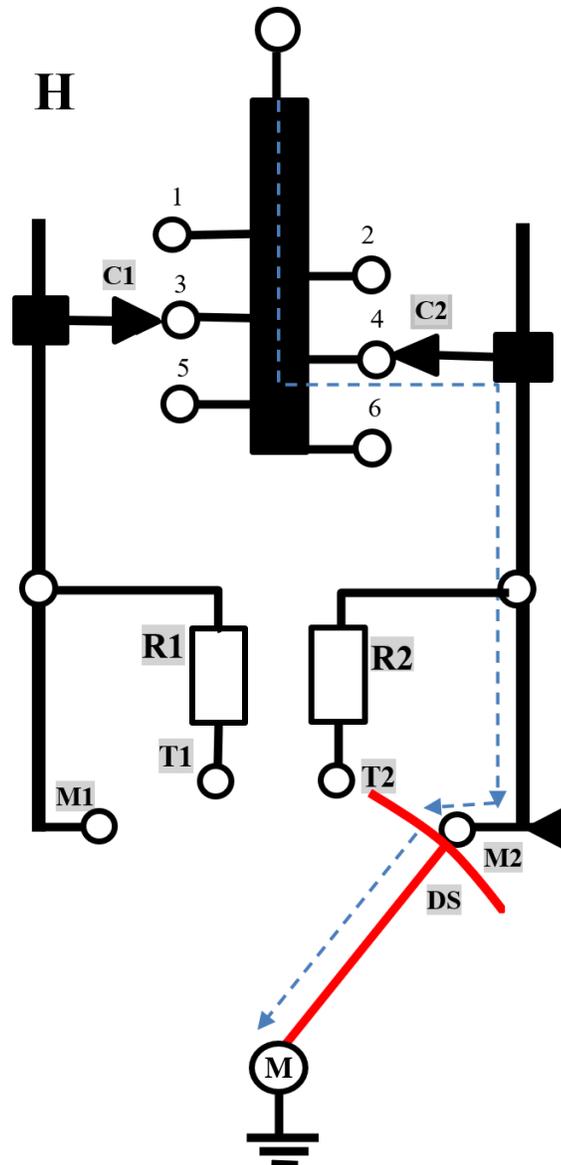
Posisi G terjadi ketika *switch diverter* mulai bergerak dari kontak T2 ke kontak M2 sehingga terdapat arus yang mengalir ke arah kontak T2. Namun, dengan adanya penggunaan *transitional resistor* R2, maka arus dapat dihambat dengan waktu yang cepat sehingga arus hanya mengalir melalui kontak M2.



Gambar 22 Transisi *diverter switch* ke *service position tap 4*
 Sumber : (Fathurrahman & Ismanto, 2015)

h. Posisi H

Posisi H menunjukkan kondisi OLTC pada saat titik penyadapan telah sepenuhnya berpindah dari *tap 3* ke *tap 4*, atau dengan kata lain, *service position tap 4*. Pada keadaan ini, arus mengalir melalui *tap 4* yang terhubung dengan kontak C2 menuju titik M2.



Gambar 23 OLTC pada *service position tap 4*
Sumber : (Fathurrahman & Ismanto, 2015)

2.6 Daya

Daya merupakan jumlah energi listrik yang digunakan untuk melakukan usaha di dalam sistem tenaga listrik. Satuan untuk daya listrik umumnya adalah Watt. Daya pada suatu sistem tegangan bolak-balik (AC) dikenal dengan tiga macam yaitu daya aktif (nyata) dengan simbol (P) satuannya adalah Watt (W), daya reaktif dengan simbol (Q) satuannya adalah volt ampere *reactive* (VAR) dan daya semu dengan simbol (S) satuannya adalah volt ampere (VA).

2.6.1 Daya aktif

Daya aktif adalah daya rata-rata yang sesuai dengan kekuatan sebenarnya ditransmisikan atau dikonsumsi oleh beban. Beberapa contoh dari daya aktif adalah energi panas, energi mekanik, cahaya dan daya aktif memiliki satuan berupa watt (W). Berikut ini merupakan persamaan daya aktif.

$$P = V_{L-L} \times I \times \cos\Phi \quad (1 \text{ Fasa}) \quad (4)$$

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos\Phi \quad (3 \text{ Fasa}) \quad (5)$$

dimana

P	=	daya aktif (Watt)
V_{L-L}	=	tegangan <i>line to line</i> (Volt)
I	=	arus (Ampere)
$\cos \Phi$	=	faktor daya

2.6.2 Daya reaktif

Daya reaktif adalah jumlah daya yang diperlukan untuk pembentukan medan magnet. Dari pembentukan medan magnet maka akan terbentuk fluks medan magnet. Contoh daya yang menimbulkan daya reaktif adalah transformator, motor, lampu pijar, dan lain-lain. Daya reaktif memiliki satuan berupa volt ampere *reactive* (VAR). Berikut ini merupakan persamaan daya reaktif.

$$Q = V \times I \times \sin \Phi \quad (1 \text{ Fasa}) \quad (6)$$

$$Q = 3 \times V \times I \times \sin \Phi \quad (3 \text{ Fasa}) \quad (7)$$

dimana

$$\begin{aligned}
 Q &= \text{ daya reaktif (VAR)} \\
 V &= \text{ tegangan (Volt)} \\
 I &= \text{ arus (Ampere)} \\
 \sin \Phi &= \text{ faktor daya}
 \end{aligned}$$

2.6.3 Daya semu

Daya semu adalah daya yang dihasilkan oleh perkalian antara tegangan dan arus dalam suatu jaringan atau daya yang merupakan hasil penjumlahan trigonometri daya aktif dan daya reaktif. Daya semu ialah daya yang dikeluarkan sumber *alternating current* (AC) atau diserap oleh beban. Satuan dari daya semu yaitu volt ampere (VA). Berikut persamaan dari daya semu.

$$S = V \times I^* \quad (8)$$

dimana

$$\begin{aligned}
 S &= \text{ daya semu (VA)} \\
 V &= \text{ tegangan (Volt)} \\
 I &= \text{ arus (Ampere)}
 \end{aligned}$$

2.7 Jatuh Tegangan

Regulasi tegangan adalah bagaimana pengaturan tegangan baik dari gardu induk, saluran transmisi ataupun pada pembangkit. Regulasi tegangan erat kaitannya dengan jatuh tegangan atau susut tegangan. Jatuh tegangan adalah besarnya tegangan yang diakibatkan oleh arus yang mengalir pada suatu media yang punya impedansi. Untuk sistem satu arah besarnya susut tegangan sama dengan arus dikalikan resistansi hantaran tersebut, sedangkan pada saluran bolak-balik besarnya susut tegangan merupakan fungsi dari arus beban dan *cosinus* sudut impedansi dari beban. Pada jaringan distribusi primer, susut tegangan dan rugi daya sebagian besar terjadi di saluran dan transformator. Oleh karena itu dalam perencanaan sistem harus dipilih saluran dan transformator yang bisa

menghantarkan arus beban tanpa menyebabkan susut tegangan yang berlebihan dan dengan temperatur/suhu yang aman (Ulfa dkk., 2018).

Dampak negatif dari jatuh tegangan di atas standar dapat menyebabkan masalah seperti motor berjalan lambat, pemanas tidak memanaskan hingga potensi penuh, lampu redup. Untuk mengkompensasi penurunan tegangan, kabel berukuran penampang yang lebih besar dapat digunakan yang menawarkan resistansi/impedansi yang lebih kecil terhadap aliran arus.

1. Penurunan kinerja dan kerusakan alat elektronik. Peralatan listrik yang membutuhkan *rating* arus masuk yang lebih tinggi mungkin tidak dapat dinyalakan karena tegangan di bawah tingkat daya pengoperasian minimumnya. Jika alat listrik tidak dapat dinyalakan, alat dapat mati saat mendeteksi penurunan tegangan yang nyata sehingga dapat memengaruhi kualitas penggunaan alat elektronik. Oleh karena itu, pelanggan mengharapkan sistem tenaga yang andal.
2. Tingkat pencahayaan yang tidak konsisten. Desain penerangan jalan harus memperhitungkan penurunan tingkat tegangan secara bertahap karena penurunan tegangan 5% dapat terlihat pada tingkat pencahayaan.
3. Konsumsi arus yang meningkat dapat menyebabkan motor maupun alat listrik lainnya menjadi terlalu panas dan mengurangi masa operasinya. Beban resistif seperti pemanas & lampu pijar juga akan berkurang masa pakainya. Tingkat tegangan yang berfluktuasi yang disebabkan oleh beban lain pada sistem dapat menyebabkan kedipan yang mengganggu (Dasa Novfowan dkk., 2020).

Ada berbagai penyebab jatuh tegangan berlebihan, antara lain:

1. Kondisi *overload*, dimana permintaan beban (*demand*) meningkat dalam waktu yang singkat, menyebabkan suplai yang disediakan oleh sistem tidak cukup untuk memenuhi *demand* tersebut. Akibatnya, tegangan sistem menurun, sementara nilai arus meningkat.

2. Desain teknik yang buruk atau tidak sesuai standar. Hal ini termasuk ukuran penampang konduktor tidak sesuai (*undersized*), panjang konduktor tidak sesuai, serta bahan penghantar kabel yang tidak tepat.
3. Koneksi buruk (terminasi), contohnya menghubungkan terlalu banyak kabel pada satu *cable lug*, menggunakan konektor yang tidak sesuai standar, dan menghubungkan dua konduktor berbeda material pada sebuah konektor yang sesuai standar (seperti tembaga dan aluminium) (Dasa Novfowan dkk., 2020).

Jatuh tegangan secara umum adalah tegangan yang digunakan pada beban. Jatuh tegangan ditimbulkan oleh arus yang mengalir melalui tahanan kawat. Jatuh tegangan V pada penghantar semakin besar jika arus I di dalam penghantar semakin besar dan jika tahanan penghantar $R\ell$ semakin besar pula. Jatuh tegangan merupakan penyebab terjadinya kerugian pada penghantar karena dapat menurunkan tegangan pada beban. Akibatnya hingga berada di bawah tegangan nominal yang dibutuhkan.

Akibat adanya resistansi pada penghantar, maka tegangan yang diterima konsumen ($V_{on\ load}$) akan lebih kecil dari tegangan kirim ($V_{off\ load}$), sehingga jatuh tegangan (V_{drop}) merupakan selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerimaan (*receiving end*) tenaga listrik. Jatuh tegangan V_d dan dinyatakan oleh rumus :

$$V_d = \left| \frac{V_{on\ load} - V_{off\ load}}{V_{off\ load}} \right| \times 100\% \quad (9)$$

dimana

$$\begin{aligned} V_d &= \text{jatuh tegangan (\%)} \\ V_{off\ load} &= \text{tegangan pada pangkal pengiriman (Volt)} \\ V_{on\ load} &= \text{tegangan pada ujung pengiriman (Volt)} \end{aligned}$$

2.8 Gangguan *Overvoltage* dan *Undervoltage*

Adanya gangguan dalam suplai listrik dapat mempengaruhi bahkan merusak suatu sistem tenaga listrik. Gangguan yang terjadi dapat berbagai macam antara lain adalah lonjakan atau penurunan tegangan listrik (*over/under voltage*). Jika gangguan tegangan ini tersambung ke peralatan listrik atau elektronika dan melebihi batas toleransi tegangan nominalnya, maka hal itu dapat mengganggu kinerja peralatan-peralatan tersebut atau bahkan dapat merusaknya. Gangguan seperti itu tidak hanya merugikan konsumen, tetapi juga merugikan produsen tenaga listrik (Arsyad dkk., 2019).

Dalam aturan distribusi tenaga listrik dijelaskan bahwa untuk *undervoltage* yaitu -10% dari tegangan normal, sedangkan untuk *overvoltage* yaitu +5% dari tegangan normal (SPLN: 1, 1995). Gangguan *undervoltage* disebabkan oleh penurunan pasokan daya, pengkawatan yang kurang baik, jarak tranformator yang jauh dari konsumen dan pembebanan yang berlebih (*overload*). Sedangkan *overvoltage* diakibatkan sistem terlalu lemah untuk pengaturan tegangan yang diinginkan, lonjakan tegangan (*surge*) seperti sambaran petir, dan pelepasan beban besar (*loadshedding*). Adapun imbas dari naik turunnya tegangan listrik menyebabkan kerusakan pada peralatan elektronik karena melebihi batas toleransi tegangan nominalnya, maka hal itu dapat mengganggu kinerja peralatan tersebut (Hidayat dkk., 2021).

2.9 Penelitian Terkait

Beberapa penelitian terdahulu yang memiliki kaitan dengan penelitian ini dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1 Perbandingan penelitian terkait yang terdahulu dengan penelitian yang diajukan

No	Penelitian Terkait Terdahulu	Perbedaan	Kelebihan	Kekurangan	Persentase Kemiripan
1.	Analisis Pengaruh Ketidakseimbangan Beban Trafo Distribusi 20 kV terhadap Rugi-Rugi Daya dan Efisiensi pada Penyulang Hertasning Baru PT PLN (Persero) ULP Panakkukang (Zulkhulifah dkk., 2021).	Riset ini mengangkat masalah timbulnya arus pada kawat netral akibat pembebanan di ketiga fasa yang tidak seimbang, menghasilkan sistem tenaga dengan rugi-rugi daya yang tinggi dan efisiensi rendah, sedangkan penelitian yang diajukan	Penelitian yang diajukan lebih fokus pada kinerja OLTC untuk menstabilkan tegangan keluaran.	Penelitian yang diajukan tidak membahas pengaruh ketidakseimbangan di sisi beban.	Lokasi penelitian dan objek penelitian berupa tranformator sama dengan penelitian yang diajukan, sehingga kemiripannya sekitar 30%.

		membahas tentang peran OLTC dalam kualitas tegangan keluaran.			
2.	Studi Transformator pada Gardu Induk Panakkukang Perusahaan Listrik Negara Wilayah III (Hafid dkk., 2019a).	Penelitian ini membahas mengenai pengoperasian, kondisi, serta pemeliharaan transformator daya di GI Panakkukang, sementara penelitian yang diajukan membahas tentang penggunaan OLTC pada trafo daya.	Penelitian yang diajukan dapat menghasilkan konfigurasi pengaturan <i>tap changer</i> yang optimal untuk menghasilkan tegangan keluaran yang stabil.	Penelitian terkait lebih fokus membahas tentang detail-detail transformator daya yang tidak dibahas dalam penelitian yang diajukan.	Dengan lokasi penelitian GI Panakkukang dan objek penelitian transformator daya, penelitian ini dan penelitian yang diajukan memiliki persentase kemiripan sekitar 30%.
3.	Analisis Pengaturan Posisi <i>Tap On Load Tap Changer</i> pada Transformator Daya 30	Penelitian ini mengamati kinerja OLTC pada dua trafo	Penelitian yang diajukan menghasilkan pengaturan OLTC	Penelitian yang diajukan hanya menggunakan data	Penelitian ini hanya mengangkat topik posisi OLTC pada

	MVA 70/20 kV di GI Maulafa (Sampeallo dkk., 2018).	daya untuk menstabilkan tegangan keluaran trafo ketika terjadi jatuh tegangan di sisi primer pada kondisi beban puncak dan beban terendah.	yang menghasilkan kualitas tegangan sekunder yang paling baik.	dari satu trafo sehingga tidak dapat dibandingkan dengan trafo lain yang berada dalam satu sistem tenaga listrik yang sama.	trafo daya, namun tidak menghasilkan konfigurasi <i>tap changing</i> yang paling ideal. Maka dari itu persentase kemiripan sekitar 40%.
4.	Optimasi Koordinasi Kontrol Tegangan pada <i>On Load Tap Changer</i> (OLTC) Transformator dengan Pemanfaatan Suplai dari <i>Distributed Generator</i> pada Jaringan Distribusi Tegangan Menengah (Rambono, 2017).	Penelitian ini memanfaatkan <i>distributed generator</i> untuk menghasilkan kondisi koordinasi kontrol tegangan yang optimal pada OLTC, sementara penelitian yang diajukan berfokus pada system operasi OLTC untuk	Metode analisis penelitian yang diajukan lebih sederhana dan mudah dipahami.	Penelitian yang diajukan hanya berfokus pada satu lokasi penelitian, sementara penelitian ini memiliki cakupan yang jauh lebih luas karena disimulasikan pada	Kedua penelitian ini sama-sama membahas tentang peningkatan kualitas dan kestabilan tegangan, sehingga memiliki persentase kemiripan sekitar 25%.

		menstabilkan tegangan keluaran.		sistem IEEE 33 bus.	
5.	Studi Perbaikan Kualitas Tegangan dan Rugi-Rugi Daya pada Penyulang Pupur dan Bedak Menggunakan <i>Bank Capacitor</i> , Trafo Pengubah <i>Tap</i> dan Penggantian Kabel Penyulang (Cahyanto, 2008).	Penelitian ini menghasilkan simulasi penggunaan <i>bank capacitor</i> , OLTC, serta penggantian kabel penyulang untuk optimasi tegangan yang didistribusikan. Berbeda dengan penelitian yang diajukan, yakni mengevaluasi dan menganalisis pengaturan <i>tap</i> pada OLTC.	Penelitian yang diajukan dapat menjadi solusi peningkatan kualitas tegangan keluaran tanpa memerlukan waktu perencanaan dan risiko yang besar.	Penelitian yang diajukan tidak menyajikan solusi lain untuk perbaikan kualitas tegangan sekunder.	Kemiripan kedua penelitian ini hanya berada pada penggunaan OLTC untuk menstabilkan tegangan keluaran, sehingga kemiripannya sekitar 20%.