

SKRIPSI

**PERBANDINGAN SISTEM TRANSMISI ARUS SEARAH
MENGUNAKAN KONVERTER 12 PULSA DAN 24 PULSA
DENGAN RANGKAIAN *LINE COMMUTATED CONVERTER*
DAN *VOLTAGE SOURCE CONVERTER***

Disusun dan diajukan oleh:

**MUH. ADHEQ AVIF S. KASIM
D041 19 1001**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**PERBANDINGAN SISTEM TRANSMISI ARUS SEARAH
MENGUNAKAN KONVERTER 12 PULSA DAN 24 PULSA DENGAN
RANGKAIAN LINE COMMUTATED CONVERTER DAN VOLTAGE
SOURCE CONVERTER**

Disusun dan diajukan oleh

Muh. Adheq Avif S. Kasim
D041191001

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 21 Agustus 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

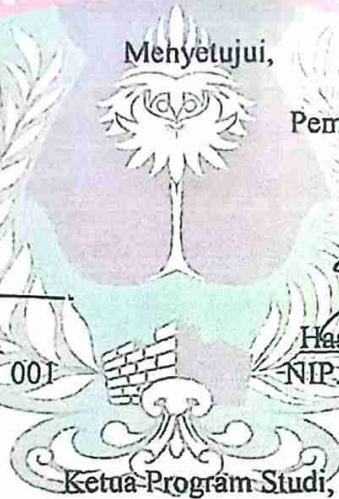
Mehyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Dr. Ir. Yusran, ST., MT.
NIP. 19750404 200012 1 001



Hasmiaty A., ST., MT., Ph.D.
NIP. 19741205 200012 2 001

Ketua Program Studi,



Eng. Ir. Dewiani, M.T. IPM
NIP. 19691026 199412 2 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Muhammad Adheq Avif S. Kasim

NIM : D041191001

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

PERBANDINGAN SISTEM TRANSMISI ARUS SEARAH MENGUNAKAN KONVERTER 12 PULSA DAN 24 PULSA DENGAN RANGKAIAN LINE COMMUTATED CONVERTER DAN VOLTAGE SOURCE CONVERTER

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 dikemudian 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, 21 Agustus 2024

Yang Menyatakan



Muhammad Adheq Avif S. Kasim

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Alhamdulillah Robbil Alamin. Segala puji syukur di panjatkan kepada Allah SWT karena-Nya lah penulis dapat menyelesaikan penelitian ini dengan judul skripsi Perbandingan Sistem Transmisi Arus Searah (HVDC) menggunakan konverter 12 pulsa dan 24 pulsa. Skripsi ini diajukan sebagai syarat untuk menyelesaikan studi dan memperoleh gelar Sarjana Teknik di Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Tak lupa penulis juga menyampaikan banyak terimakasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya atas segala dukungan, nasehat, bimbingan dan arahan dalam mempermudah penulis dalam menyelesaikan skripsi ini, Dengan rasa syukur yang mendalam, dengan telah diselesaikannya skripsi ini Penulis berterima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. orang tua saya. Bapak , Mama, dan saudara/i yang selalu mendukung dan mendoakan dalam bentuk apapun sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini
2. Dosen Pembimbing saya Bapak Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T. dan Ibu Ir. Hasniaty A, S.T., M.T., Ph.D. yang telah meluangkan waktu untuk membantu penulis dalam proses penelitian dan penulisan skripsi ini.
3. Ibu Dr. Eng, Ir. Dewiani, M.T. dan Bapak Dr. Ikhlas Kitta, S.T., M.T. selaku Ketua dan Sekretaris Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. Seluruh dosen Departemen Teknik Universitas Hasanuddin yang telah membimbing dan memberikan ilmu pengetahuan kepada penulis selama masa perkuliahan.
5. Dosen sekaligus tim penguji, Bapak Prof. Dr. Ir. Salama Manjang, M.T. dan Bapak Dr. Ir. Ikhlhas Kitta, S.T., M.T. yang telah memberikan banyak ilmu pengetahuan selama masa perkuliahan, membantu dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
6. Staff Administrasi Akademik Departemen Teknik Universitas Hasanuddin, Ibu Salmiaty, Kak yuyun dan Pak Kama yang telah banyak membantu dan

memberikan kemudahan terhadap penulis dalam proses administrasi akademik selama perkuliahan.

7. Teman-teman Laboratorium Elektronika Daya Musa, Dhedy, Isnun, Namira yang selalu memotivasi dan tidak pernah Lelah untuk berjuang Bersama dalam menyelesaikan tugas akhir.
8. Saudara TR19GER yang telah memberikan banyak pengalaman dan cerita di dalam kehidupan penulis. Jangan ragu dan takut melihat dunia semua akan baik dan taklukkan hidup ini berbekal rasa percaya diri karena semua akan mudah bila kita kuat Bersama.
9. Saudari TR19GER yang berjumlah 22 orang yang selalu mengingatkan dan membantu akademik penulis, sampai dengan penulis menyelesaikan perkuliahannya.
10. Teman-Teman Kabinet Rekonstruksi, yang telah meluangkan waktunya untuk berjuang bekerja keras, dan pantang menyerah dalam menghadapi semua dinamika di Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
11. Saudara musa yang selalu menyempatkan waktu untuk membantu serta memberikan dorongan dan motivasi kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
12. Saudara Fatur selaku 01 dan Raste selaku 03 TR19GER yang telah menjadi rekan seperjuangan dan tak pernah lelah dalam menghadapi segala problematika yang terjadi di Angkatan.
13. Saudara Gabriel, Chord, Fitman, Fikri, Dwi, Dhedy, Mahend, Raste, dan Oang yang selalu mendorong penulis untuk menyelesaikan masa perkuliahan dimana rumah CG menjadi saksi bisu tempat kita untuk melangkah kedepan.
14. saudara bull, mipan, adit yang hadir sebagai 4 kelor yang telah kebersamai selama maba dengan segala kisah dan dinamika, terimakasih atas semua masalah yang pernah dilalui Dimana itu yang membuat kita dewasa hingga saat ini
15. Saudara “Dinamiz09” yang telah memberikan banyak pengalaman, cerita, serta tempat untuk terus bertumbuh bersama dari masa kemasa selama penulis berada di Kampus Merah Hitam.

16. Saudara “OP”, yang selalu menemani penulis dan memberikan motivasi semangat untuk terus sukses bersama
17. Persembahkan skripsi ini untuk yang selalu bertanya: “Kapan Skripsi mu selesai?” Terlambat lulus atau lulus tidak tepat waktu bukan sebuah kejahatan dan bukan sebuah aib. Karena sebaik-baiknya skripsi adalah skripsi yang selesai, baik itu selesai tepat waktu maupun tidak tepat waktu.
18. Kepada Muh. Adheq Avif S. Kasim atau saya sendiri. Terima kasih telah berjuang sampai hari ini. telah melangkah ke satu tahap berikutnya dan akan berjuang lagi di proses selanjutnya
19. Semua pihak yang telah memberikan bantuan kepada penulis dalam bentuk apapun namun tidak dapat disebutkan satu persatu

Penelitian ini masih jauh dari kata sempurna karena sadar dengan keterbatasan yang dimiliki oleh penulis, namun dengan arahan serta bimbingan dan dari berbagai pihak yang terus ada baik berupa dukungan moril maupun material, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

Makassar, 19 Agustus 2024

(Penulis)

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
KATA PENGANTAR	IIIi
DAFTAR ISI.....	VIIi
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	XV
ABSTRAK	1
ABSTRACT	2
BAB I PENDAHULUAN	3
1.1 Latar Belakang	3
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Sistem Tenaga Listrik	7
2.2 Perkembangan Teknologi Tegangan Tinggi Arus Searah	9
2.3 Transmisi Tenaga Listrik	10
2.3.1 Saluran HVAC.....	10
2.3.2 Saluran HVDC.....	11
2.3.3 Perbedaan Saluran HVAC dan HVDC.....	11
2.4 Transformator.....	12
2.4.1 Definisi Transformator	12
2.4.2 Prinsip Kerja Transformator.....	13
2.5 Konverter.....	14
2.5.1 <i>Rectifier</i>	14
2.5.2 <i>Thyristor</i>	14
2.6 <i>Inverter</i>	16
2.7 Arus Listrik	17

2.8 Tegangan	17
2.9 Kontrol Sudut Penyelaan.....	18
2.10 Reduksi Harmonik Pada Tegangan Tinggi Arus Searah.....	19
2.11 Matlab Simulink.....	21
BAB III METODE PENELITIAN.....	23
3.1 Variabel Penelitian	23
3.2 Bahan Uji dan Alat Penelitian.....	23
3.3 Teknik Pengumpulan Data.....	23
3.4 Teknik Analisis	24
3.5 Data Penyusun Rangkaian Simulasi MatLab Simulink	25
3.6 Pemodelan Rangkaian Simulasi dengan MatLab Simulink	25
3.7 Rangkaian Simulasi Transmisi HVDC 12 Pulsa Menggunakan LCC	26
3.8 Parameter Penyusunan Rangkaian Simulasi Transmisi LCC-HVDC.....	28
3.8.1 Parameter Blok Sumber 3 Fasa LCC-HVDC	28
3.8.2 Rangkaian Filter AC dan Alat Ukur 3 Fasa.....	29
3.8.3 Rangkaian Elektronika Daya LCC-HVDC 12 Pulsa.....	31
3.8.4 Rangkaian Elektronika Daya LCC-HVDC 24 Pulsa.....	32
3.9 Parameter Penyusunan Rangkaian VSC-HVDC.....	34
3.9.1 Parameter Blok Sumber 3 Fasa VSC-HVDC	36
3.9.2 Rangkaian Filter AC.....	37
3.9.3 Rangkaian Elektronika Daya VSC-HVDC	38
3.10 Parameter Elektrik LCC-HVDC	39
3.11 Parameter Elektrik VSC-HVDC	40
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	41
4.1 Hasil Uji Simulasi	41
4.1.1 Hasil Simulasi LCC-HVDC 12 Pulsa 500kV,750 kV dan 1000 kV	41
4.1.2 Hasil Simulasi VSC-HVDC 12 Pulsa 500kV, 750 kV, dan 1000 kV	54
4.1.3 Hasil Simulasi LCC-HVDC 24 Pulsa 500kV, 750 kV, dan 1000 kV	64
4.1.4 Hasil Simulasi VSC-HVDC 24 Pulsa 500kV, 750 kV, dan 1000 kV	77
4.2 Total Harmonic Distortion	86
4.2.1 THD LCC-HVDC 12 Pulsa 500kV	86
4.2.2 THD VSC-HVDC 12 Pulsa 500kV	89

4.2.3 THD LCC-HVDC 24 Pulsa 500kV	94
4.2.4 THD VSC-HVDC 24 Pulsa 500kV	97
4.2.5 THD LCC-HVDC 12 Pulsa 750kV	102
4.2.6 THD VSC-HVDC 12 Pulsa 750kV	105
4.2.7 THD LCC-HVDC 24 Pulsa 750kV	110
4.2.8 THD VSC-HVDC 24 Pulsa 750kV	114
4.2.9 THD LCC-HVDC 12 Pulsa 1000kV	118
4.2.10 THD VSC-HVDC 12 Pulsa 1000kV	121
4.2.11 THD LCC-HVDC 24 Pulsa 1000kV	124
4.2.12 THD VSC-HVDC 24 Pulsa 1000kV	127
4.3 Data Hasil Simulasi LCC HVDC 12 Pulsa	131
4.4 Data Hasil Uji Simulasi LCC HVDC 24 Pulsa	132
4.5 Data Hasil Uji Simulasi VSC HVDC 12 Pulsa	133
4.6 Data Hasil Uji Simulasi VSC HVDC 24 pulsa	134
4.7 Perbandingan Hasil Uji Simulasi LCC-HVDC	135
4.8 Perbandingan Hasil Uji Simulasi VSC-HVDC	138
4.9 Perbandingan Hasil Uji Simulasi Rangkaian LCC dan VSC	140
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	145
5.1 Kesimpulan	145
5.2 Saran	146
DAFTAR PUSTAKA	147

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Sistem Tenaga Listrik.....	7
Gambar 2 Bagian Transformator	13
Gambar 3 Rangkaian Inverter	16
Gambar 4 Bentuk Gelombang Dari Konverter 12 Pulsa.....	20
Gambar 5 Harmonik Arus Konverter 12 Pulsa	21
Gambar 6 Diagram Alir Penelitian	23
Gambar 7 Rangkaian HVDC 12 Pulsa Menggunakan LCC	27
Gambar 8 Parameter Blok Sumber Listrik 3 Fasa	29
Gambar 9 Filter AC 3 Fasa Sisi Rectifier	30
Gambar 10 Alat Ukur 3 Fasa	30
Gambar 11 Model Rangkaian Rectifier 12 Pulsa LCC HVDC.....	31
Gambar 12 Model Rangkaian Inverter 12 Pulsa LCC HVDC	32
Gambar 13 Model Rangkaian Rectifier 24 Pulsa LCC HVDC.....	33
Gambar 14 Model Rangkaian Inverter 24 Pulsa LCC HVDC	33
Gambar 15 Rangkaian VSC-HVDC	35
Gambar 16 Parameter Sistem AC (1) VSC HVDC	36
Gambar 17 Parameter Sistem AC (2) VSC HVDC	37
Gambar 18 Rangkaian Filter AC VSC-HVDC	38
Gambar 19 Rangkaian penyearah VSC-HVDC.....	39
Gambar 20 Rangkaian Inverter VSC-HVDC.....	39
Gambar 21 Sinyal LCC-HVDC 12 Pulsa 500 kV Sisi Pembangkitan AC	41
Gambar 22 LCC-HVDC 12 Pulsa 750 kV Sisi Pembangkitan AC	42
Gambar 23 LCC-HVDC 12 Pulsa 1000 kV Sisi Pembangkitan AC	42
Gambar 24 Sinyal LCC-HVDC 12 Pulsa 500 kV Sisi Pembangkitan AC Zoom. 43	43
Gambar 25 Sinyal LCC-HVDC 12 Pulsa 750 kV Sisi Pembangkitan AC Zoom. 43	43
Gambar 26 LCC-HVDC 12 Pulsa 1000 kV Sisi Pembangkitan AC Zoom.....	44
Gambar 27 Sinyal LCC-HVDC 12 Pulsa 500 kV Sisi Penerima AC	44
Gambar 28 LCC-HVDC 12 Pulsa 750 kV Sisi Penerima.....	45
Gambar 29 LCC-HVDC 12 Pulsa 1000 kV Sisi Penerima.....	46
Gambar 30 Sinyal LCC-HVDC 12 Pulsa 500 kV Sisi Penerima AC Zoom	46

Gambar 31 LCC-HVDC 12 Pulsa 750 kV Sisi Penerima AC Zoom.....	47
Gambar 32 LCC-HVDC 12 Pulsa 1000 kV Sisi Penerima AC Zoom.....	47
Gambar 33 LCC-HVDC 12 pulsa 500 kV sisi keluaran rectifier	48
Gambar 34 LCC-HVDC 12 Pulsa 750 kV Sisi Keluaran Rectifier	49
Gambar 35 LCC-HVDC 12 Pulsa 1000 kV Sisi Keluaran Rectifier	49
Gambar 36 LCC-HVDC 12 PULSA 500 kV sisi masukan inverter.....	50
Gambar 37 LCC-HVDC 12 Pulsa 750 kV Sisi Masukan Inverter.....	51
Gambar 38 LCC-HVDC 12 Pulsa 1000 kV Sisi Masukan Inverter.....	51
Gambar 39 Sudut Pemadaman LCC-HVDC 12 Pulsa 500 kV	52
Gambar 40 Sudut Pemadaman LCC-HVDC 12 Pulsa 750 kV	53
Gambar 41 Sudut Pemadaman LCC-HVDC 12 Pulsa 1000 kV	53
Gambar 42 VSC-HVDC 12 Pulsa 500 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Sisi Parameter 1.....	54
Gambar 43 VSC-HVDC 12 Pulsa 500 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Sisi Parameter 1 Zoom.....	54
Gambar 44 VSC-HVDC 12 Pulsa 750 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Sisi Parameter 1.....	55
Gambar 45 VSC-HVDC 12 Pulsa 750 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Sisi Parameter 1 di Zoom.....	55
Gambar 46 VSC-HVDC 12 Pulsa 1000 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Sisi Parameter 1.....	56
Gambar 47 VSC-HVDC 12 Pulsa 1000 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Sisi Parameter 1 zoom.....	56
Gambar 48 VSC-HVDC 12 Pulsa 500 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Parameter 2.....	57
Gambar 49 VSC-HVDC 12 Pulsa 500 kV Sinyal Tegangan dan Arus Penerima Setelah di Zoom	57
Gambar 50 VSC-HVDC 12 Pulsa 750 kV Sinyal Tegangan dan Arus Penerima pada Parameter 2.....	58
Gambar 51 VSC-HVDC 12 Pulsa 750 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Parameter 2 zoom.....	58

Gambar 52 VSC-HVDC 12 Pulsa 1000 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Parameter 2.....	58
Gambar 53 VSC-HVDC 12 Pulsa 1000 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Parameter 2 di zoom.....	60
Gambar 54 VSC-HVDC 12 Pulsa 500 kV Sinyal pada Sisi Penyearah	60
Gambar 55 VSC-HVDC 12 Pulsa 750 kV Sinyal pada Sisi Penyearah	61
Gambar 56 VSC-HVDC 12 Pulsa 1000 kV Sinyal pada Sisi Penyearah	61
Gambar 57 VSC-HVDC 12 Pulsa 500 kV Sinyal pada Sisi Inverter	62
Gambar 58 VSC-HVDC 12 Pulsa 750 kV Sinyal pada Sisi Inverter	63
Gambar 59 VSC-HVDC 12 Pulsa 1000 kV Sinyal pada Sisi Inverter	63
Gambar 60 Sinyal LCC-HVDC 24 500kV Pulsa Sisi Pembangkitan AC	64
Gambar 61 Sinyal LCC-HVDC 24 500kV Sisi Pembangkitan AC Zoom	65
Gambar 62 Sinyal LCC-HVDC 24 750kV Pulsa Sisi Pembangkitan AC	65
Gambar 63 Sinyal LCC-HVDC 24 750kV Sisi Pembangkitan AC Zoom	66
Gambar 64 Sinyal LCC-HVDC 24 1000kV Sisi Pembangkitan AC.....	66
Gambar 65 Sinyal LCC-HVDC 24 1000kV Sisi Pembangkitan AC Zoom	67
Gambar 66 Sinyal LCC-HVDC 24 500kV Sisi Penerima AC.....	67
Gambar 67 Sinyal LCC-HVDC 24 500kV Sisi Penerima AC Zoom	68
Gambar 68 Sinyal LCC-HVDC 24 750kV Sisi Penerima AC.....	68
Gambar 69 Sinyal LCC-HVDC 24 750kV Sisi Penerima AC Zoom	69
Gambar 70 Sinyal LCC-HVDC 24 1000kV Sisi Penerima AC.....	69
Gambar 71 Sinyal LCC-HVDC 24 1000kV Sisi Penerima AC Zoom	70
Gambar 72 Sinyal LCC-HVDC 24 500kV pada Sisi Penyearah.....	70
Gambar 73 Sinyal LCC-HVDC 24 750kV pada Sisi Penyearah.....	71
Gambar 74 Sinyal LCC-HVDC 24 1000kV pada Sisi Penyearah.....	72
Gambar 75 Sinyal LCC-HVDC 24 500kV pada Sisi Inverter	72
Gambar 76 Sinyal LCC-HVDC 24 750kV pada Sisi Inverter	73
Gambar 77 Sinyal LCC-HVDC 24 1000kV pada Sisi Inverter	74
Gambar 78 Sudut Pemadaman LCC-HVDC 24 Pulsa 500kV	75
Gambar 79 Sudut Pemadaman LCC-HVDC 24 Pulsa 750kV	75
Gambar 80 Sudut Pemadaman LCC-HVDC 24 Pulsa 1000 kV	76

Gambar 81 VSC-HVDC 24 Pulsa 500 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Sisi Parameter 1.....	77
Gambar 82 VSC-HVDC 24 Pulsa 500 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Sisi Parameter 1 Zoom.....	77
Gambar 83 VSC-HVDC 24 Pulsa 750 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Sisi Parameter 1.....	78
Gambar 84 VSC-HVDC 24 Pulsa 750 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Sisi Parameter 1 Zoom.....	78
Gambar 85 VSC-HVDC 24 Pulsa 1000 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Sisi Parameter 1.....	79
Gambar 86 VSC-HVDC 24 Pulsa 1000 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Sisi Parameter 1 zoom.....	79
Gambar 87 VSC-HVDC 24 Pulsa 500 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Sisi Parameter 2.....	80
Gambar 88 VSC-HVDC 24 pulsa 500 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Sisi Parameter 2 Zoom.....	80
Gambar 89 VSC-HVDC 24 Pulsa 750 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Sisi Parameter 2.....	81
Gambar 90 VSC-HVDC 24 Pulsa 750 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Sisi Parameter 2 Zoom.....	81
Gambar 91 VSC-HVDC 24 Pulsa 1000 kV Sinyal Tegangan dan Arus pada Sisi Parameter 2.....	82
Gambar 92 VSC-HVDC 24 Pulsa 1000 kV Sinyal Tegangan dan Arus Pada Sisi Parameter 2 Zoom.....	82
Gambar 93 VSC-HVDC 24 Pulsa 500 kV Sinyal pada Sisi Penyearah	83
Gambar 94 VSC-HVDC 24 Pulsa 750 kV Sisi Penyearah	84
Gambar 95 VSC-HVDC 24 Pulsa 1000 kV Sisi Penyearah	84
Gambar 96 VSC-HVDC 24 Pulsa 500 kV Sisi Inverter	85
Gambar 97 VSC-HVDC 24 Pulsa 750 kV Sisi Inverter	85
Gambar 98 VSC-HVDC 24 Pulsa 1000 kV Sisi Inverter	86
Gambar 99 THD Arus LCC-HVDC 12 Pulsa Sisi Inverter 500kV	87
Gambar 100 THD Arus LCC-HVDC 12 Pulsa Sisi Rectifier 500kV	87

Gambar 101 THD Tegangan LCC-HVDC 12 Pulsa Sisi Inverter 500kV	88
Gambar 102 THD Tegangan LCC-HVDC 12 Pulsa Sisi Rectifier 500kV	89
Gambar 103 THD Arus VSC-HVDC 12 Pulsa Sisi Rectifier 500kV	90
Gambar 104 THD Arus VSC-HVDC 12 Pulsa Sisi Inverter 500kV	91
Gambar 105 THD Tegangan VSC-HVDC Sisi Rectifier 500kV.....	92
Gambar 106 THD Tegangan VSC-HVDC 12 Pulsa Sisi Inverter 500kV	93
Gambar 107 THD Arus LCC-HVDC 24 Pulsa Sisi Rectifier 500kV	94
Gambar 108 THD Arus LCC-HVDC 24 Pulsa Sisi Inverter 500Kv	95
Gambar 109 THD Tegangan LCC-HVDC 24 Pulsa Sisi Inverter 500kV	96
Gambar 110 THD Tegangan LCC-HVDC 24 pulsa Sisi Rectifier 500kV	97
Gambar 111 THD Arus VSC-HVDC 24 Pulsa Sisi Rectifier 500kV	98
Gambar 112 THD Arus VSC-HVDC 24 Pulsa Sisi Inverter 500Kv	99
Gambar 113 THD Tegangan VSC-HVDC 24 Pulsa Sisi Inverter 500kV	100
Gambar 114 THD Tegangan VSC-HVDC 24 Pulsa Sisi Rectifier 500kV	101
Gambar 115 THD Arus LCC-HVDC 12 Pulsa Sisi Inverter 750kV	102
Gambar 116 THD Arus LCC-HVDC 12 Pulsa Sisi Rectifier 750kV	103
Gambar 117 THD Tegangan LCC-HVDC 12 Pulsa Sisi Rectifier 750Kv.....	104
Gambar 118 THD Tegangan LCC-HVDC 12 Pulsa Sisi Inverter 750kV	105
Gambar 119 THD Arus VSC-HVDC 12 Pulsa Sisi Rectifier 750kV	106
Gambar 120 THD Arus VSC-HVDC 12 Pulsa Sisi Inverter 750Kv	107
Gambar 121 THD Tegangan VSC-HVDC 12 Pulsa Sisi Rectifier 750kV	108
Gambar 122 THD Tegangan VSC-HVDC 12 Pulsa Sisi Inverter 750kV.	109
Gambar 123 THD Arus LCC-HVDC 24 Pulsa Sisi Rectifier 750kV	110
Gambar 124 THD Arus LCC-HVDC 24 Pulsa Sisi Inverter 750Kv	111
Gambar 125 THD Tegangan LCC-HVDC 24 Pulsa Sisi Inverter 750kV	112
Gambar 126 THD Tegangan LCC-HVDC 24 Pulsa Sisi Rectifier 750kV	113
Gambar 127 THD Arus VSC-HVDC 24 Pulsa Sisi Rectifier 750kV	114
Gambar 128 THD Arus VSC-HVDC 24 Pulsa Sisi Inverter 750kV	115
Gambar 129 THD Tegangan VSC-HVDC 24 Pulsa Sisi Rectifier 750kV	116
Gambar 130 THD Tegangan VSC-HVDC 24 Pulsa Sisi Inverter 750kV.	117
Gambar 131 THD Arus LCC-HVDC 12 Pulsa Sisi Rectifier 1000kV.....	118
Gambar 132 THD Arus LCC-HVDC 12 Pulsa Sisi Inverter 1000Kv	119

Gambar 133 THD Tegangan LCC-HVDC 12 Pulsa Sisi Inverter 1000kV	120
Gambar 134 THD Tegangan LCC-HVDC 12 Pulsa Sisi Rectifier 1000kV	120
Gambar 135 THD Arus VSC-HVDC 12 Pulsa Sisi Inverter 1000kV	121
Gambar 136 THD Arus VSC-HVDC 12 Pulsa Sisi Rectifier 1000kV	122
Gambar 137 THD Tegangan VSC-HVDC 12 Pulsa Sisi Rectifier 1000kV	123
Gambar 138 THD Tegangan VSC-HVDC 12 Pulsa Sisi Inverter 1000kV	124
Gambar 139 THD Arus LCC-HVDC 24 Pulsa Sisi Rectifier 1000kV	125
Gambar 140 THD Arus LCC-HVDC 24 Pulsa Sisi Inverter 1000kV	125
Gambar 141 THD Tegangan LCC-HVDC 24 Pulsa Sisi Inverter 1000kV	126
Gambar 142 THD Tegangan LCC-HVDC 24 Pulsa Sisi Rectifier 1000kV	127
Gambar 143 THD Arus VSC-HVDC 24 Pulsa Sisi Rectifier 1000kV	128
Gambar 144 THD Arus VSC-HVDC 24 Pulsa Sisi Inverter 1000kV	128
Gambar 145 THD Tegangan VSC-HVDC 24 Pulsa Sisi Rectifier 1000kV	129
Gambar 146 THD Tegangan VSC-HVDC 24 Pulsa Sisi Inverter 1000kV	130

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Parameter Sistem LCC-HVDC	40
Tabel 2 Parameter Sistem VSC-HVDC	40
Tabel 3 LCC-HVDC 12 Pulsa.....	131
Tabel 6 LCC-HVDC 24 Pulsa.....	132
Tabel 9 VSC-HVDC 12 Pulsa.....	133
Tabel 12 VSC-HVDC 24 Pulsa.....	134
Tabel 15 Perbandingan LCC-HVDC 500kV	135
Tabel 16 Perbandingan LCC-HVDC 750kV	136
Tabel 17 Perbandingan LCC-HVDC 1000kV	137
Tabel 18 Perbandingan VSC-HVDC 500kV	138
Tabel 19 Perbandingan VSC-HVDC 750kV	139
Tabel 20 Perbandingan VSC-HVDC 1000kV	140
Tabel 21 Perbandingan Rangkaian LCC dan VSC 500kV	141
Tabel 22 Perbandingan Rangkaian LCC dan VSC 750kV	142
Tabel 23 Perbandingan Rangkaian LCC dan VSC 1000kV	143

ABSTRAK

MUH. ADHEQ AVIF S. KASIM. Perbandingan Sistem Transmisi Arus Searah dengan Parameter Konverter 12 Pulsa dan 24 Pulsa dengan Rangkaian *Line Commutated Converter* dan *Voltage Source Converter*. (dibimbing oleh Yusran dan Hasniaty A.)

Penelitian ini di latar belakang oleh sistem transmisi arus searah *High Voltage Direct Current* (HVDC) yang memiliki banyak keunggulan dalam berbagai kondisi, termasuk pertumbuhan daya yang efisien dan relatif stabil dengan rating daya yang sama. HVDC memiliki kemampuan untuk memecahkan masalah stabilitas, menurunkan arus gangguan, dan meningkatkan kapasitas daya listrik sehari-hari karena daya kerugian yang lebih kecil daripada *High Voltage Alternating Current* (HVAC). Hal ini terjadi karena saluran transmisi HVDC memiliki impedansi yang lebih rendah sehingga mengalami rugi daya yang lebih kecil. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan rancangan HVDC menggunakan konverter 12 pulsa dan 24 pulsa dengan variasi rangkaian LCC dan VSC, mengetahui perbandingan variasi tegangan pembangkitan, arus transmisi HVDC, dan harmonisa dari sistem transmisi HVDC yang menggunakan konverter 12 pulsa dan 24 pulsa dengan rangkaian LCC dan VSC, membandingkan karakteristik HVDC 12 pulsa dan 24 pulsa menggunakan rangkaian LCC dan VSC dengan tegangan pembangkitan 500 kV, 750 kV, dan 1000 kV. Perancangan rangkaian dari sistem transmisi HVDC menggunakan rangkaian LCC dan VSC konverter 12 pulsa dan 24 pulsa dengan tegangan pembangkitan 500 kV, 750 kV, 1000 kV yang diaplikasikan dengan MatLabSimulink. Simulasi dinyatakan valid ketika hasil uji telah sesuai dengan uji rangkaian VSC dan LCC menggunakan konverter 12 pulsa dan 24 pulsa dengan tegangan pembangkitan 500 kV, 750 kV, dan 1000 kV pada komponen elektronika daya. Setelah membandingkan parameter-parameter yang diujikan maka telah diperoleh bagaimana perbandingan parameter-parameter penelitian HVDC dengan topologi 12 pulsa dan 24 pulsa dari segi sudut penyalan dari *thyristor*, tegangan pembangkitan, arus transmisi DC, serta harmonisa.

Kata Kunci : Transmisi HVDC, Konverter 12 pulsa dan 24 pulsa, VSC, LCC

ABSTRACT

MUH. ADHEQ AVIF S. KASIM. *Comparison of Direct Current Transmission System with 12 Pulse and 24 Pulse Converter Parameters with Line Commutated Converter and Voltage Source Converter. (supervised by Yusran and Hasniaty A.)*

This research is motivated by the High Voltage Direct Current (HVDC) direct current transmission system which has many advantages in various conditions, including efficient and relatively stable power growth with the same power rating. HVDC has the ability to solve stability problems, lower fault currents, and increase daily electrical power capacity due to smaller power losses than High Voltage Alternating Current (HVAC). This is because the HVDC transmission line has a lower impedance and thus experiences smaller power losses. This research aims to obtain the design of HVDC using 12-pulse and 24-pulse converters with variations of LCC and VSC circuits, knowing the comparison of variations in generation voltage, HVDC transmission current, and harmonics of the HVDC transmission system using 12-pulse and 24-pulse converters with LCC and VSC circuits, comparing the characteristics of 12-pulse and 24-pulse HVDC using LCC and VSC circuits with generation voltages of 500 kV, 750 kV, and 1000 kV. The circuit design of the HVDC transmission system uses 12-pulse and 24-pulse LCC and VSC converter circuits with generation voltages of 500 kV, 750 kV, 1000 kV applied with MatLabSimulink. The simulation is declared valid when the test results are in accordance with the VSC and LCC circuit tests using 12-pulse and 24-pulse converters with generation voltages of 500 kV, 750 kV, and 1000 kV on power electronics components. After comparing the tested parameters, it has been obtained how the comparison of HVDC research parameters with 12 pulses and 24 pulses topology in terms of the ignition angle of the thyristor, generation voltage, DC transmission current, and harmonics.

Keywords: HVDC Transmission, 12-pulse and 24-pulse Converter, VSC, LCC

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah sebuah negara pulau yang terdiri dari empat pulau besar dan total sekitar 17.000 pulau kecil. Selain itu, Indonesia adalah negara terbesar keempat di dunia dan memiliki permintaan energi yang relatif tinggi, terutama untuk listrik (Faizal et al., 2015). Saluran transmisi umumnya dibangun dalam bentuk jaringan yang terdiri dari menara, tiang, dan kabel yang menghubungkan pembangkit listrik dengan sub-stasiun distribusi dan kemudian ke konsumen. Kabel-kabel yang digunakan dalam saluran transmisi umumnya terbuat dari bahan tembaga atau aluminium untuk memungkinkan aliran listrik yang lancar.

High Voltage Direct Current (HVDC) transmisi adalah satu-satunya jenis transmisi listrik yang menggunakan arus searah tegangan tinggi sebagai sumbernya. HVDC memiliki banyak keunggulan atas arus bergantian tegangan tinggi *High Voltage Alternating Current* atau transmisi tegangan tinggi (AC) dalam berbagai kondisi, termasuk pertumbuhan daya yang efisien dan relatif stabil dengan rating daya yang sama (Arrilaga et al., 2007).

HVDC memiliki kemampuan untuk memecahkan masalah stabilitas sistem AC, menurunkan arus gangguan, dan meningkatkan kapasitas listrik sehari-hari (Kim et al., 2009). Karena daya kerugian yang lebih kecil daripada HVAC. Kemampuan mengirimkan daya saluran AC berbanding terbalik dengan Jarak transmisi, akan tetapi saluran DC tidak dipengaruhi jarak transmisi (Rashid, 2001). Hal ini terjadi karena saluran transmisi DC memiliki impedansi yang lebih rendah daripada saluran transmisi AC sehingga mengalami rugi daya yang lebih kecil.

Selain itu, saluran transmisi DC juga lebih stabil dan dapat menghindari masalah kebocoran daya listrik yang sering terjadi pada saluran transmisi AC. Hal ini terjadi karena saluran transmisi DC hanya mengirimkan arus listrik searah yang memungkinkan arus listrik mengalir dengan lebih stabil dan konsisten. Namun, salah satu kelemahan dari saluran transmisi DC adalah biaya yang lebih mahal untuk pembangunan dan pemeliharannya dibandingkan dengan saluran transmisi AC.

Selain itu, saluran transmisi DC juga memiliki batasan daya listrik yang lebih kecil daripada saluran transmisi AC, sehingga tidak cocok untuk pengiriman daya listrik dalam skala kecil seperti pada rumah tangga. Meskipun demikian, dengan keuntungan dan kelemahan yang dimilikinya, saluran transmisi DC tetap menjadi pilihan yang penting dalam menyediakan pasokan listrik yang andal dan efisien bagi industri dan masyarakat modern.

Prinsip HVDC adalah untuk mengkonversi AC ke DC. Menggunakan Semikonduktor elektronik piranti, seperti *thyristor*, digunakan di DC. Sistem HVDC menggunakan 12-pulse konverter. terdiri dari dua jembatan *thyristor* yang terhubung secara seri dengan konverter trafo tiga fasa. *Thyristor bridge* adalah konverter daya yang digunakan secara luas yang terdiri dari enam switch daya yang terhubung bersama dalam konfigurasi *bridges* (Misra & Nayak, 2018).

Konverter 24 pulsa adalah salah satu jenis konverter HVDC yang menggunakan empat jembatan *thyristor* yang terhubung secara seri dengan konverter trafo tiga fasa untuk merubah arus bolak-balik menjadi arus searah. Konverter 12 pulsa memiliki keunggulan dalam biaya produksi yang lebih rendah dan sederhana dalam operasinya, namun memiliki kelemahan dalam kualitas gelombang output yang kurang baik, serta menghasilkan harmonisa yang tinggi pada sistem kelistrikan. Sementara itu, konverter 24 pulsa adalah jenis konverter HVDC yang lebih kompleks dan lebih mahal dibandingkan dengan konverter 12 pulsa.

Konverter 24 pulsa memiliki keunggulan dalam kualitas gelombang output yang lebih baik dan menghasilkan harmonisa yang lebih rendah pada sistem kelistrikan, namun memiliki kelemahan dalam biaya produksi yang lebih tinggi dan kompleksitas operasi yang lebih tinggi. Dalam penggunaannya, pemilihan jenis konverter HVDC harus disesuaikan dengan kebutuhan dan karakteristik sistem kelistrikan yang ada. Faktor-faktor seperti biaya produksi, kualitas gelombang output, dan kompleksitas operasi harus dipertimbangkan dengan baik dalam memilih jenis konverter HVDC yang tepat untuk sistem transmisi arus searah. Adapun judul penelitian yang diangkat adalah “PERBANDINGAN SISTEM TRANSMISI SEARAH MENGGUNAKAN KONVERTER 12 PULSA DAN 24 PULSA DENGAN RANGKAIAN *LINE COMMUTATED CONVERTER* DAN

VOLTAGE SOURCE CONVERTER” yang akan disimulasikan menggunakan matlab simulink.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang maka rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem HVDC menggunakan konverter 12 pulsa dan 24 pulsa dengan variasi rangkaian LCC dan VSC.
2. Bagaimana perbandingan variasi tegangan pembangkitan, arus transmisi DC, dan harmonisa dari sistem transmisi HVDC yang menggunakan konverter 12 pulsa dan 24 pulsa dengan rangkaian LCC dan VSC.
3. Bagaimana perbedaan karakteristik HVDC 12 pulsa dan 24 pulsa dengan rangkaian LCC dan VSC.

1.3 Tujuan Penelitian

1. Mendapatkan rancangan HVDC menggunakan konverter 12 pulsa dan 24 pulsa dengan variasi rangkaian LCC dan VSC.
2. Untuk mengetahui perbandingan variasi tegangan pembangkitan, arus transmisi DC, dan harmonisa dari sistem transmisi HVDC yang menggunakan konverter 12 pulsa dan 24 pulsa dengan rangkaian LCC dan VSC.
3. Untuk membandingkan karakteristik HVDC 12 pulsa dan 24 pulsa menggunakan rangkaian LCC dan VSC.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi penambahan referensi yang berkaitan dengan sistem transmisi HVDC di Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

1.5 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

1. Penelitian ini berfokus pada perancangan HVDC menggunakan konverter 12 pulsa dan 24 pulsa dengan variasi rangkaian LCC dan VSC menggunakan software matlab simulink.

2. Penelitian ini membandingkan hasil simulasi dari konverter 12 pulsa dan 24 pulsa menggunakan rangkaian LCC dan VSC.
3. Variabel penelitian berupa variasi tegangan pembangkitan, arus beban, dan Harmonisa.

1.6 Sistematika Penulisan

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

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini dibahas mengenai latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penulisan, ruang lingkup, serta sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini diuraikan teori-teori relevan yang mendukung penelitian yang meliputi Motor Induksi 3 Fasa, *Inverter*, Dioda, *Insulated Gate Bipolar*

Transistor (IGBT), *Pulse Width Modulation* (PWM) dan MATLAB Simulink

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi diagram alur penelitian, rancangan sistem, alat dan bahan yang digunakan, serta teknik pengumpulan data.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas mengenai pemodelan sistem menggunakan Matlab Simulink serta pengujian dan analisa data.

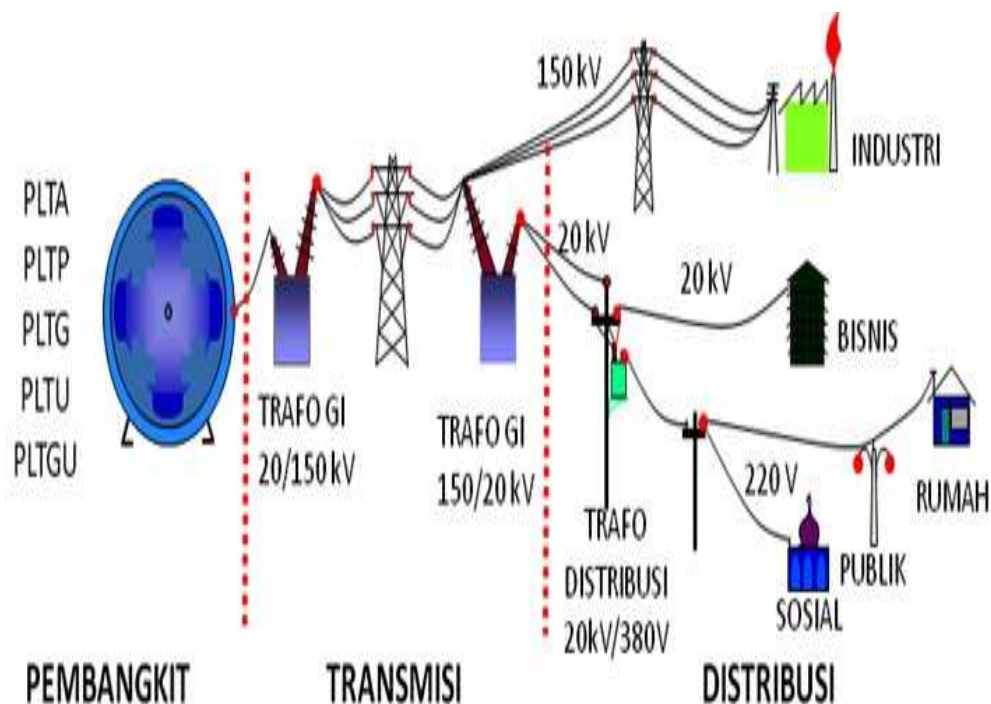
BAB V SIMPULAN DAN SARAN

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 adalah sistem yang terdiri dari berbagai komponen, seperti pembangkitan, transmisi, distribusi, dan beban, yang bekerja bersama dan dalam komunikasi dekat untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik pelanggan. Sistem tenaga listrik secara umum dapat diilustrasikan dengan skema di bawah ini (Suswanto, 2009):



Gambar 1 Sistem Tenaga Listrik
(Suripto, 2017)

Berikut penjelasan dari bagian-bagian dari sistem tenaga listrik: (Suripto, 2017)

1. Pembangkitan Tenaga Listrik

Unit pembangkitan merupakan komponen sistem tenaga listrik yang terdiri dari generator pembangkit tenaga listrik yang digerakkan oleh turbin. Unit pembangkitan berfungsi untuk membangkitkan tenaga listrik dengan cara mengubah energi primer yang berasal dari sumber energi lain, misalnya air, batu bara, panas bumi atau minyak bumi menjadi energi listrik. Pada sistem

pembangkitan, level tegangan disesuaikan dengan spesifikasi dan kapasitas generator pembangkit yang digunakan, biasanya berkisar antara 4,5 s/d 20 kV.

2. Transmisi Tenaga Listrik

Transmisi tenaga listrik merupakan proses penyaluran tenaga listrik dari pusat pembangkitan listrik hingga saluran distribusi listrik sehingga nantinya sampai pada konsumen. Sistem penyaluran tenaga listrik yang beroperasi pada TT (Tegangan Tinggi), TET (Tegangan Ekstra Tinggi), dan TUT (Tegangan Ultra Tinggi). Tegangan saluran transmisi umumnya berkisar antara 70 kV sampai dengan 500 kV.

3. Distribusi Tenaga Listrik

Jaringan distribusi merupakan komponen sistem tenaga listrik yang terdiri dari penghantar yang dibentang mulai dari gardu induk sampai dengan lokasi pelanggan. Jaringan distribusi berfungsi untuk mendistribusikan energi listrik dari gardu induk pusat beban ke lokasi konsumen/pelanggan energi listrik. Tegangan pada jaringan distribusi biasanya 20 kV, 11 kV, atau 6 kV (M. Sulaiman, 2015).

Metode yang paling ekonomis, paling sederhana dan paling aman untuk pengiriman energi adalah pengiriman energi listrik. Tenaga listrik dapat ditransmisikan secara terus menerus dari satu tempat ke tempat lain yang berjauhan dalam suatu sistem tenaga listrik. Sistem tenaga listrik adalah kumpulan komponen atau perangkat listrik seperti generator, trafo, saluran transmisi, saluran distribusi, dan beban yang dihubungkan bersama untuk membentuk suatu sistem.

Secara umum pengertian sistem tenaga listrik meliputi sistem pembangkitan, sistem transmisi, dan sistem distribusi. Saat ini, sistem distribusi diperkirakan sama dengan biaya investasi sarana produksi secara nasional. Sistem distribusi bersama dengan sistem produksi berbasis pengalaman biasanya memakan biaya hingga 80% dari total investasi sistem tenaga.

2.2 Perkembangan Teknologi Tegangan Tinggi Arus Searah

Teknologi penyaluran daya listrik menggunakan Tegangan Tinggi Arus Searah (TTAS) dan pembangunan saluran daya TTAS di dunia tumbuh dengan pesat. Pertumbuhan ini didukung oleh teknologi dalam bidang konversi daya listrik dari Arus AC ke Arus DC dan sebaliknya menggunakan konverter daya berbasis-silikon seperti peralatan *thyristor* dan *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT). Yang mana kedua peralatan mempunyai kemampuan untuk daya rendah atau beberapa *Volt Ampere* (VA) sampai dengan daya tinggi (100 Mega VA). Dengan kemampuan dari *thyristor*/IGBT ini membuat saluran TTAS lebih mudah dan murah untuk diwujudkan.

Sementara itu, sistem tenaga listrik adalah sebuah sistem (sekumpulan elemen yang bekerja bersama-sama untuk mencapai tujuan tertentu) yang terdiri dari pembangkit, gardu induk penaik tegangan, saluran transmisi, gardu induk penurun tegangan, saluran subtransmisi, gardu induk penurun tegangan dari saluran subtransmisi ke saluran distribusi primer. Pelanggan daya listrik kapasitas besar dapat langsung tersambung pada saluran distribusi primer, sedangkan pelanggan daya kapasitas menengah sampai kecil tersambung pada saluran distribusi sekunder (tegangan distribusi primer yang diturunkan menggunakan gardu distribusi). Sistem tenaga listrik saat ini secara umum menggunakan sistem tegangan Arus Bolak-balik atau *Alternating Current* (AC). Sistem tegangan Arus AC didukung oleh sistem pembangkit tenaga listrik yang menggunakan mesin AC. Mesin AC dapat dirancang untuk kapasitas besar karena kumparan jangkar mesin (kumparan untuk suplai daya ke beban) terletak pada bagian stator mesin (bagian yang diam pada mesin). Berbeda dengan sistem Arus DC yang tidak didukung oleh pembangkit Arus Searah dengan kapasitas besar. Pembangkitan daya listrik pada sistem Arus Searah menggunakan mesin DC. Dalam operasinya, mesin DC mempunyai kelemahan yaitu kumparan jangkar mesin berada pada rotor sehingga suplai daya ke beban harus melalui komutator pada sisi rotor dan sikat pada sisi stator. Sambungan pada komutator dan sikat merupakan titik kritis pada mesin DC khususnya untuk mesin berdaya besar. Permasalahan muncul jika komutator/sikat tidak terhubung dengan baik dapat menimbulkan percikan api pada saat daya disalurkan (I Made Ginarsa., et al. 2020).

2.3 Transmisi Tenaga Listrik

Saluran transmisi adalah sarana untuk mengalirkan listrik dari pembangkit atau fasilitas tenaga ke gardu induk yang mendistribusikannya ke pengguna akhir. Bahan konduktif yang mengalir di sepanjang saluran transmisi listrik mentransfer daya listrik. Transmisi distribusi tenaga listrik baik menggunakan arus DC maupun arus AC.

Saluran transmisi listrik ada dua kategori saluran transmisi, yaitu saluran udara dan saluran bawah tanah. Saluran Udara (*Overhead Lines*), saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kawat-kawat yang digantung pada isolator antara menara atau tiang transmisi. Keuntungan dari saluran transmisi udara antara lain ialah Mudah dalam perbaikan, Mudah dalam perawatan, Mudah dalam mengetahui letak gangguan, Lebih murah. Sementara Kerugian dari saluran transmisi udara adalah Karena berada diruang terbuka, maka cuaca sangat berpengaruh terhadap keandalannya, dengan kata lain mudah terjadi gangguan dari luar, seperti gangguan hubungan singkat, gangguan tegangan bila tersambar petir, dan gangguan lainnya, Dari segi estetika/keindahan kurang, sehingga saluran transmisi bukan pilihan yang ideal untuk transmisi di dalam kota. Saluran kabel bawah tanah (*underground cable*), saluran transmisi yang menyalurkan energi listrik melalui kabel yang dipendam didalam tanah. Kategori saluran seperti ini adalah favorit untuk pemasangan didalam kota, karena berada didalam tanah maka tidak mengganggu keindahan kota dan juga tidak mudah terjadi gangguan akibat kondisi cuaca atau kondisi alam. Namun tetap memiliki kekurangan, antara lain mahal dalam instalasi dan investasi serta sulitnya menentukan titik gangguan dan perbaikannya (Hutahruk,1985).

2.3.1 Saluran HVAC

Sistem transmisi tenaga listrik arus bolak-balik tegangan tinggi atau biasa disebut *high voltage current* (HVAC) adalah sistem transmisi pada sistem tenaga listrik yang menggunakan arus bolak-balik tegangan tinggi sebagai alat pendistribusian tenaga listrik. Dalam sistem transmisi ini, tegangan pengenal AC dinaikkan untuk mengurangi jatuh tegangan dan rugi-rugi daya.

Jarak yang cukup jauh dari pusat pembangkit ke pusat beban menyebabkan penurunan tegangan akibat line charging dan rugi-rugi daya. Umumnya rugi daya yang ditimbulkan dapat berupa panas berlebih pada penghantar kabel saluran transmisi yang terbawa oleh arus berlebih tersebut (saadat, 1994).

2.3.2 Saluran HVDC

Sistem transmisi tenaga listrik arus searah adalah sistem transmisi yang menggunakan arus searah sebagai penyalur daya. Sistem transmisi ini merupakan sistem transmisi yang aman dan efisien untuk mentransmisikan daya jarak jauh dengan kerugian rendah dan biaya rendah. Sistem transmisi ini biasanya membutuhkan trafo dan filter pada setiap terminal distribusi daya. Trafo bekerja sebagai alat yang mengubah jenis arus dari AC ke DC dan sebaliknya, filter bekerja untuk mengurangi frekuensi harmonik yang disebabkan oleh kerja trafo.

Dalam praktiknya, sistem ini membutuhkan saluran transmisi yang lebih sedikit dan lebih tipis dan memiliki kerugian yang lebih rendah dibandingkan dengan sistem transmisi AC (Kundur,1994).

2.3.3 Perbedaan Saluran HVAC dan HVDC

Saluran DC lebih murah dan sederhana karena membutuhkan dua konduktor bukan tiga, jumlah isolator juga lebih sedikit dan Menara transmisi lebih sederhana dan sempit sehingga hak jalan lebih kecil.

Selain itu, perlu diperhatikan bahwa terdapat arus reaktif dalam sistem AC, yang mengakibatkan penurunan signifikan nilai beban yang dapat dibagi tanpa memanaskan kabel.

Pembebanan tambahan meningkatkan kerugian dielektrik secara signifikan pada tegangan tinggi. Dalam sistem DC tidak ada arus reaktif, sehingga tidak membatasi jarak transmisi dengan kabel. Oleh karena itu, transmisi melalui kabel laut dengan Panjang lebih dari 30 km hanya dimungkinkan dengan sistem arus searah.

Resistansi AC konduktor juga sedikit lebih tinggi daripada resistansi DC, karena kerapatan arus tidak terdistribusi secara merata pada penampang konduktor dalam kasus arus bolak-balik. Kepadatan arus lebih tinggi di tepi konduktor daripada ditengah. Ini disebut efek kulit (*skin effect*) Oleh karena itu, penampang konduktor

tidak dapat sepenuhnya dimanfaatkan dengan arus AC. Tidak ada efek kulit pada sistem DC. Untuk transmisi AC jarak jauh, kompensasi seri dan shunt harus dipasang. Saluran seperti itu memerlukan reactor seri diperlukan untuk stabilitas. Kabel DC tidak memerlukan kompensasi (Kadir, 1998).

2.4 Transformator

2.4.1 Definisi Transformator

Transformator adalah suatu alat listrik yang dapat memindahkan dan mengubah energi listrik dari satu atau lebih rangkaian listrik ke rangkaian listrik yang lain tanpa mengubah frekuensi dari sistem, melalui suatu gandengan magnet dan berdasarkan prinsip induksi elektromagnet. Trafo digunakan secara luas, baik dalam bidang tenaga listrik maupun elektronika. Penggunaan trafo dalam sistem tenaga memungkinkan terpilihnya tegangan yang sesuai dan ekonomis untuk tiap-tiap keperluan misalnya kebutuhan akan tegangan tinggi dalam pengiriman daya listrik jarak jauh (Tondok dkk, 2019).

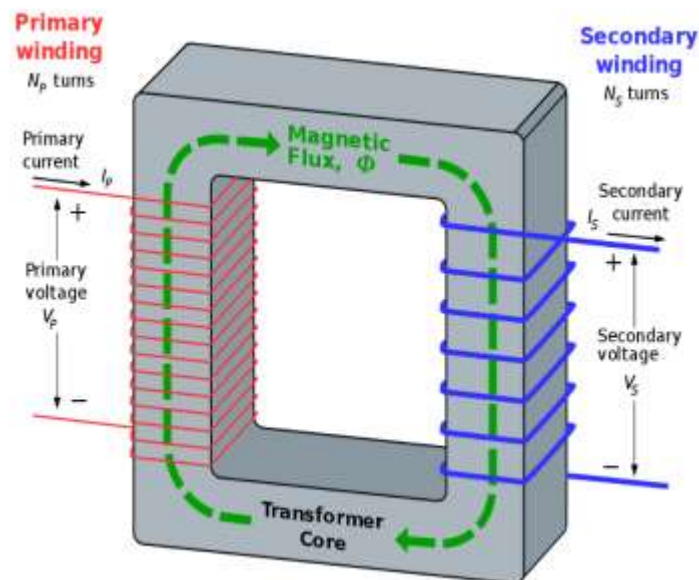
Dalam bidang tenaga listrik pemakaian transformator dikelompokkan menjadi (A.Kadir, 1984):

- 1) Transformator daya, transformator daya memiliki peranan sangat penting dalam sistem tenaga listrik. Transformator daya digunakan untuk menyalurkan daya dari generator bertegangan menengah ke transmisi jaringan distribusi. Kebutuhan transformator daya bertegangan tinggi dan berkapasitas besar menimbulkan persoalan dalam perencanaan isolasi, ukuran bobotnya.
- 2) Transformator distribusi, Transformator distribusi digunakan untuk mengubah tegangan menengah menjadi tegangan rendah. Sebagaimana halnya dengan komponen-komponen lain dari rangkaian distribusi, rugi-rugi energi dan turun tegangan yang disebabkan arus listrik mengalir menuju beban merupakan penentuan untuk pemilihan dan lokasi transformator.
- 3) Transformator pengukuran, Dalam prakteknya tidaklah aman menghubungkan instrumen, alat ukur atau peralatan kendali langsung ke rangkaian tegangan tinggi. Transformator Instrumen umumnya digunakan

untuk mengurangi tegangan tinggi dan arus hingga harga aman dan dapat digunakan untuk kerja peralatan.

Masing–masing tipe transformator memiliki kekhususan dalam perencanaan dan pembuatan yang disesuaikan dengan pemakaiannya. Walaupun demikian semua tipe transformator mempunyai prinsip dasar yang sama. Pada umumnya transformator terdiri atas sebuah inti, yang terbuat dari besi berlapis dan dua buah kumparan, yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Rasio perubahan tegangan akan tergantung dari rasio jumlah lilitan pada kedua kumparan. Biasanya kumparan terbuat dari kawat tembaga yang dibelit seputar “kaki” inti transformator (Tondok dkk, 2019).

2.4.2 Prinsip Kerja Transformator



Gambar 2 Bagian Transformator
(Suripto, 2017)

Tranformator adalah suatu peralatan listrik elektromagnetik statis yang berfungsi untuk memindahkan/mengubah energi listrik dari satu rangkaian litrik ke rangkaian listrik lainnya, dengan frekuensi yang sama dan perbandingan transformasi tertentu. Transformator menggunakan prinsip hukum induksi Faraday dalam menyalurkan daya, dimana apabila kumparan primer dihubungkan dengan sumber tegangan

bolak-balik, maka akan mengalir arus dalam kumparan primer menimbulkan perubahan fluks magnetik dalam inti besi (Badaruddin & Firdianto, 2016).

Transformator terdiri dari kumparan primer, inti besi, dan kumparan sekunder. Prinsip kerja trafo adalah saat kumparan primer telah dialiri arus AC, maka akan menimbulkan medan magnet atau yang disebut dengan fluks magnetik yang ada di sekitarnya. Kekuatan medan magnet atau disebut dengan densitas fluks magnet akan dipengaruhi oleh besarnya arus listrik yang telah dialirinya. Dalam hal ini, semakin besar arus listrik yang dihasilkan, maka semakin besar pula medan magnetnya. Flukstuasi medan magnet yang terjadi di sekitar kumparan primer akan menginduksi Gaya Gerak Listrik (GGL) yang berada di dalam kumparan sekunder. Selanjutnya, akan terjadi pelimpahan daya dari kumparan primer menuju kumparan sekunder. Dalam hal ini, maka akan terjadi perubahan taraf tegangan listrik, baik dari tegangan rendah menuju tegangan lebih tinggi atau sebaliknya, dari tegangan tinggi menuju tegangan yang lebih rendah (Tondok dkk, 2019).

2.5 Konverter

2.5.1 Rectifier

Rectifier adalah alat yang digunakan untuk mengubah sumber arus AC menjadi sinyal sumber arus DC. Gelombang AC yang berbentuk gelombang sinus hanya dapat dilihat dengan alat ukur CRO. Rangkaian *rectifier* banyak menggunakan transformator *step down* yang digunakan untuk menurunkan tegangan sesuai dengan perbandingan transformasi transformator yang digunakan. Penyearah dibedakan menjadi 2 jenis, penyearah setengah gelombang dan penyearah gelombang penuh, sedangkan untuk penyearah gelombang penuh dibedakan menjadi penyearah gelombang penuh dengan *center tap* (CT), dan penyearah gelombang penuh dengan menggunakan dioda *bridge*.

2.5.2 Thyristor

Thyristor adalah suatu bahan semikonduktor yang tersusun atas 4 lapisan (layer) yang berupa susunan P-N-P-N junction, sehingga *thyristor* ini disebut juga sebagai PNP diode.

Thyristor dapat dikategorikan sebagai *latching devais*. *Thyristor* dapat bertingkah seperti dua transistor dengan penurunan rumus sebagai berikut :

$$IB1 = IC2 + Ign$$

$$IB2 = IC1 + Igp \tag{1}$$

Keterangan :

IB1: Arus basis dari transistor pertama (T1).

IC2: Arus kolektor dari transistor kedua (T2).

Ign: Arus gangguan atau arus yang tidak diinginkan (*leakage current*).

IB2: Arus basis dari transistor kedua (T2).

IC1: Arus kolektor dari transistor pertama (T1).

Igp: Arus gangguan atau arus bocor lainnya (*leakage current*).

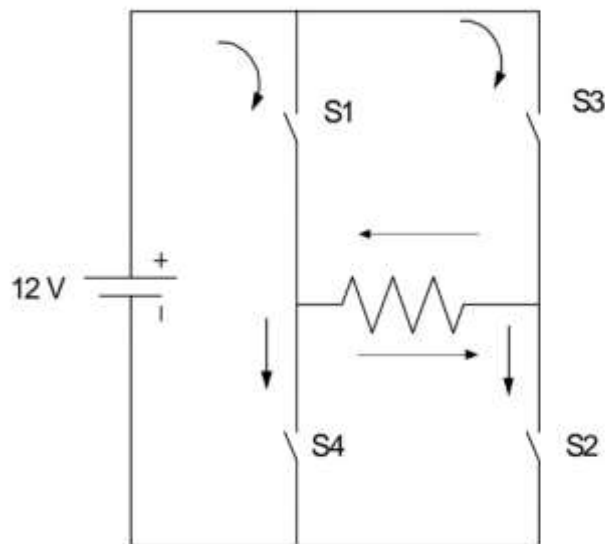
Thyristor mempunyai 3 keadaan atau daerah, yaitu :

1. Keadaan pada saat tegangan balik (daerah I)
2. Keadaan pada saat tegangan maju (daerah II)
3. Keadaan pada saat *thyristor* konduksi (daerah III)

Pada daerah I, *thyristor* sama seperti *diode*, dimana pada keadaan ini tidak ada arus yang mengalir sampai dicapainya batas tegangan tembus (V_r). Pada daerah II terlihat bahwa arus tetap tidak akan mengalir sampai dicapainya batas tegangan penyalaan (V_{bo}). Apabila tegangan mencapai tegangan penyalaan, maka tiba – tiba tegangan akan jatuh menjadi kecil dan ada arus mengalir. Pada saat ini *thyristor* mulai konduksi dan ini adalah merupakan daerah III. Arus yang terjadi pada saat *thyristor* konduksi, dapat disebut sebagai arus genggam ($I_H = \text{Holding Current}$). Arus I_H ini cukup kecil yaitu dalam orde miliampere. Untuk membuat *thyristor* kembali *off*, dapat dilakukan dengan menurunkan arus *thyristor* tersebut dibawah arus genggamnya (I_H) dan selanjutnya diberikan tegangan penyalaan.

2.6 Inverter

Inverter digunakan untuk mengubah tegangan input DC menjadi tegangan AC. Keluaran *inverter* dapat berupa tegangan yang dapat diatur dan tegangan yang tetap. Sumber tegangan input *inverter* dapat menggunakan *battery*, *cell* bahan bakar, tenaga surya, atau sumber tegangan DC yang lain. Tegangan *output* yang biasa dihasilkan adalah 120 V 60 Hz, 220 V 50 Hz, 115 V 400 Hz (Universitas Negeri Yogyakarta, 2023).



Gambar 3 Rangkaian *Inverter*

(Ali Muhammad, 2018)

Prinsip kerja *inverter* dapat dijelaskan dengan menggunakan 4 sakelar seperti ditunjukkan pada gambar diatas. Bila sakelar S1 dan S2 dalam kondisi on maka akan mengalir aliran arus DC ke beban R dari arah kiri ke kanan, jika yang hidup adalah sakelar S3 dan S4 maka akan mengalir aliran arus DC ke beban R dari arah kanan ke kiri. *Inverter* dapat diklasifikasikan menjadi 2 macam : (1) *inverter* 1 fasa, (2) *inverter* 3 fasa. *Inverter* biasanya menggunakan rangkaian modulasi lebar pulsa (pulse width modulation – PWM). *Inverter* juga dapat dibedakan dengan cara pengaturan tegangannya, yaitu : (1) jika yang diatur tegangan input konstan disebut Voltage Fed *Inverter* (VFI), (2) jika yang diatur arus input konstan disebut Current Fed *Inverter* (CFI), dan (3) jika tegangan input yang diatur disebut Variable dc linked *inverter* (Universitas Negeri Yogyakarta, 2023).

2.7 Arus Listrik

Arus merupakan besaran pada listrik yang dapat diartikan sebagai muatan yang mengalir tiap satuan waktu. Arus adalah perubahan laju muatan terhadap waktu, atau muatan yang mengalir per satuan waktu, menggunakan simbol I (dari kata Perancis: intensite) sehingga dapat disimpulkan bahwa listrik adalah muatan yang bergerak. Selama muatan bergerak Arus muncul, tetapi menghilang saat muatan berhenti. Muatan ini dapat bergerak ketika energi eksternal bekerja padanya. Muatan adalah unit terkecil dari atom atau bagian dari atom. Atom biasanya netral, meskipun teori atom modern berpendapat bahwa atom terdiri dari partikel nuklir yang dikelilingi oleh muatan elektron negatif (proton bermuatan positif dan neutron netral).

$$I = \frac{Q}{t} \quad (2)$$

Dimana I = Arus (Ampere)

Q = Muatan listrik (Coulomb)

T = Waktu (s)

Dalam teori sirkuit, arus adalah pergerakan muatan positif. Arus dihasilkan ketika ada perbedaan potensial antara elemen penyusunnya, dan arah aliran arus terdiri dari dua yakni arus positif mengalir dari potensial tinggi ke potensial rendah dan arus negatif mengalir ke arah yang berlawanan (Ramdhani, 2005).

2.8 Tegangan

Tegangan atau yang sering disebut dalam bahasa Inggris sebagai voltage. Tegangan adalah usaha yang dilakukan untuk memindahkan muatan (satu Coulomb) pada elemen atau komponen dari satu konektor/pin ke konektor/pin lainnya atau kedua terminal/kutub yang akan memiliki perbedaan besar potensial ketika kita memindahkan muatan sebesar 1 Coulomb dari satu terminal ke terminal lainnya.

Hubungan antara usaha yang sebenarnya dilakukan adalah energi yang digunakan, untuk menyingkat pengertian di atas bahwa tegangan adalah energi untuk satu satuan muatan (Ramdhani, 2005).

Secara matematis tegangan didefinisikan:

$$V = I \cdot R \quad (3)$$

Dimana : V= Tegangan (Voltage)

I = Arus (Ampere)

R = Resistansi (ohm)

$$V = \frac{W}{Q}$$

Dimana V = Tegangan (Voltage) (4)

W = Energi (Joule)

Q = Muatan Listrik (Coulomb)

2.9 Kontrol Sudut Penyalaan

Karakteristik alfa minimum pada penyearah. Karakteristik ini ditentukan oleh persamaan yang ditunjukkan di bawah ini

$$V_{as} = V_{di0} \cos \alpha - (d_{xN} + d_{rN}) \cdot \frac{V_{di0}N}{I_{dc}N} \cdot I_{as} \quad (5)$$

Dimana :

V_{as} = tegangan AC pada sisi sekunder

V_{di0} = Tegangan DC maksimum yang diukur ketika pada sudut 0 derajat

α = Sudut konduksi

d_{xN} = Parameter damping eksternal normal

d_{rN} = Parameter damping internal normal

$V_{di0}N$ = Tegangan DC normal

$I_{dc}N$ = Arus DC normal

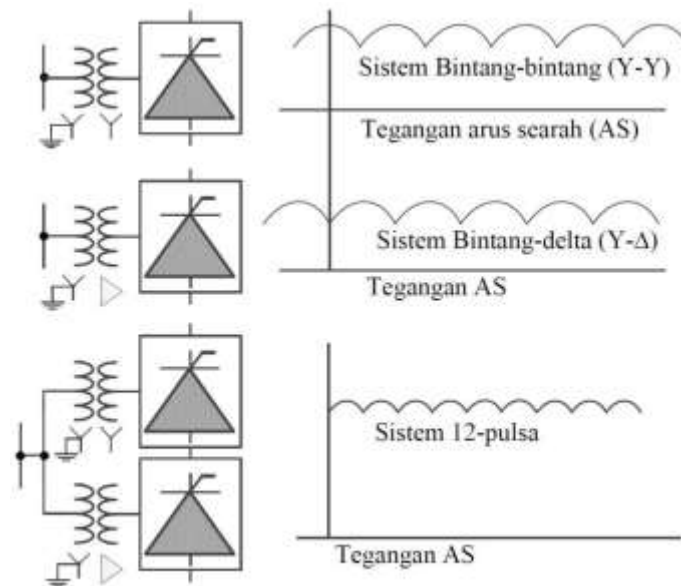
I_{as} = Arus AC sisi sekunder

Persamaan 4 menentukan tegangan Arus Searah melintasi konverter. Jika kita mengasumsikan alfa minimum (α min) lima derajat untuk memiliki tegangan tertentu melintasi saklar sebelum reaktansi penyalaan dan transformator ($d_{xN} + d_{rN}$) $V_{di0}N/I_{as}N$ juga selalu konstan. Oleh karena itu, meningkatkan arus AS akan mengurangi tegangan AS, yaitu kemiringan negatif yang ditentukan oleh reaktansi transformator dan arus AS (mengurangi tegangan karena tumpang tindih arus pada saklar) (I Made Ginarsa., et al. 2020).

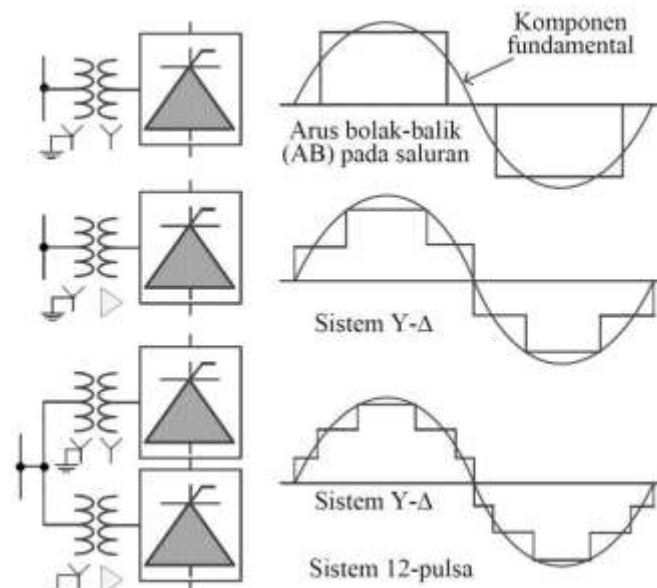
2.10 Reduksi Harmonik Pada Tegangan Tinggi Arus Searah

Hubungan antara jumlah pulsa dan urutan harmonik menunjukkan bahwa jumlah pulsa dan urutan harmonik berbanding lurus satu sama lain. Karena penggunaan peningkatan jumlah pulsa memiliki beberapa kelemahan, sistem TTAS modern terdiri dari konverter 12pulsa, dibentuk dengan menghubungkan dua jembatan 6pulsa model Graetz. Konverter TTAS beroperasi sebagai sumber harmonisa arus di sisi AB dan beroperasi sebagai sumber harmonisa tegangan di sisi AS. Karena harmonik arus berlebihan menghasilkan distorsi tegangan, kerugian tambahan, panas berlebih, dan gangguan harmonik, maka keberadaan harmonik perlu dibatasi.

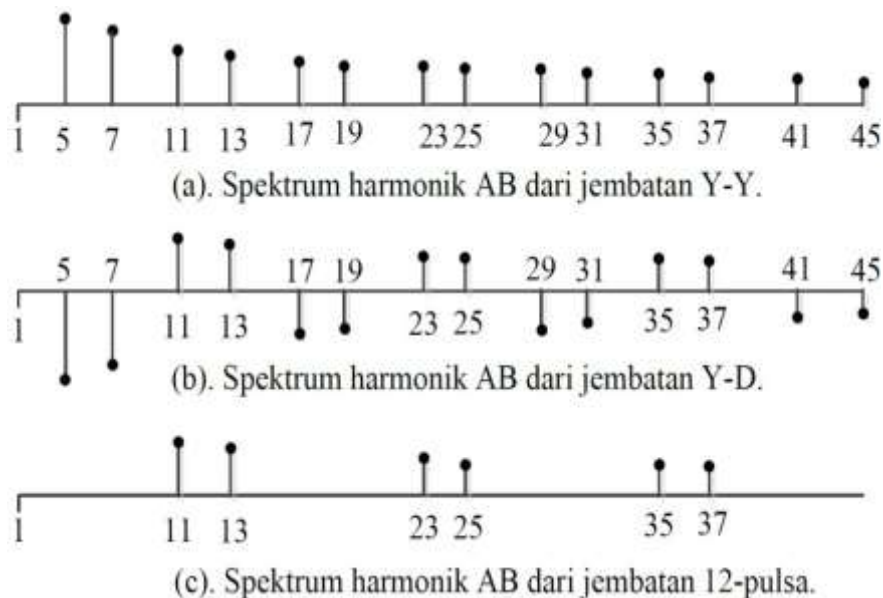
Tegangan AS jembatan 6-pulsa memiliki komponen riak yang enam kali lipat frekuensi fundamentalnya. Dua jembatan 6-pulsa dihubungkan secara seri pada sisi Arus Searah dan dilengkapi dengan tegangan Arus Bolak-Balik 3 fasa yang memiliki perbedaan 30 Derajat. Gambar 4 menunjukkan bagaimana tegangan Arus Searah ditambahkan untuk menghilangkan banyak riak, meninggalkan komponen yang berulang sebanyak 12-kali per siklus dan menunjukkan bentuk gelombang arus Arus Bolak-balik pada kondisi 'ideal' tanpa komutasi tumpang-tindih, arus searah tanpa riak (*ripple*), tegangan komutasi seimbang sinusoida murni, dan pulsa pada penyalaan konverter yang berjarak-sama.



(a). Tegangan AS pada output konverter

Gambar 4 Bentuk Gelombang Dari Konverter 12 Pulsa
(I Made Ginarsa., et al. 2020)

Harmonik karakteristik. Secara umum, harmonik karakteristik terkait dengan nomor pulsa konverter. Harmonik ini berurutan $Kp \pm 1$ di sisi AB dan urutan Kp di sisi AS, di mana p adalah nomor pulsa dan K adalah bilangan bulat. Harmonik ini memiliki urutan ke-11, 13, 23, 25 dan seterusnya dalam konverter 12-pulsa di sisi AB, dan ke-12, 24 di sisi DC. Gambar 5 menunjukkan spektrum harmonik tipikal untuk konverter TTAS. Jelas bahwa meskipun bentuk gelombang bersifat periodik, harmonik ini mengandung komponen di luar sisi Arus Bolak-balik dan arus konstan pada sisi Arus Searah. (I Made Ginarsa., et al. 2020).



Gambar 5 Harmonik Arus Konverter 12 Pulsa
(I Made Ginarsa., et al. 2020)

2.11 Matlab Simulink

Matlab (kependekan dari Matrix Laboratory) adalah bahasa pemrograman khusus untuk perhitungan teknis dan ilmiah. Awalnya, program ini dikembangkan untuk melakukan operasi matematika pada matriks, tetapi kemudian dikembangkan menjadi bahasa pemrograman yang mampu menyelesaikan hampir semua masalah teknis dan ilmiah.

Matlab mengimplementasikan bahasa pemrograman “Matlab” dan menawarkan berbagai alat (tool box) dan pustaka fungsi yang sering digunakan untuk memecahkan masalah teknis dan ilmiah dengan lebih mudah dan efisien.

Simulink adalah paket perangkat lunak yang terintegrasi dalam Matlab yang mensimulasikan sistem dinamis menggunakan metode grafis. Simulink dapat

digunakan untuk membuat suatu permasalahan teknik atau ilmiah berupa diagram blok dan anak panah yang menggambarkan aliran sinyal dan fungsi dari suatu sistem dinamik.

Kita dapat menggunakan MatLab untuk berbagai aplikasi, termasuk pemrosesan sinyal dan komunikasi, pemrosesan gambar dan video, sistem kontrol, pengujian dan pengukuran, informatika keuangan, dan biologi komputasi. Lebih dari satu juta insinyur dan ilmuwan di industri dan akademisi menggunakan MatLab, bahasa untuk komputasi teknis.