

SKRIPSI

DESAIN TEKNO EKONOMI TRANSMISI ARUS SEARAH KONFIGURASI *LINE COMMUTATED CONVERTER (LCC)* DAN *VOLTAGE SOURCE CONVERTER (VSC)*

Disusun dan diajukan oleh:

MUSA PRAYOGA
D041 19 1049



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

DESAIN TEKNO EKONOMI TRANSMISI ARUS SEARAH KONFIGURASI *LINE COMMUTATED CONVERTER* (LCC) DAN *VOLTAGE SOURCE CONVERTER* (VSC)

Disusun dan diajukan oleh

Musa Prayoga

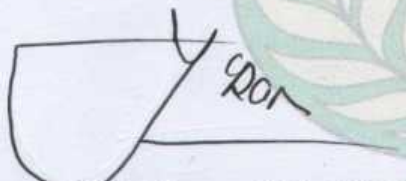
D041191049

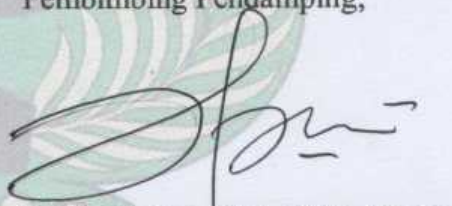
Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada Tanggal 25 Januari 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,


Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T.
NIP 197504042000121001


Ir. Hasniaty A, S.T., M.T., Ph. D
NIP 197412052000122001

Ketua Program Studi,


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



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Musa Prayoga

NIM : D041191049

Program Studi : Teknik Elektro

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

**DESAIN TEKNO EKONOMI TRANSMISI ARUS SEARAH
KONFIGURASI *LINE COMMUTATED CONVERTER* (LCC) DAN
VOLTAGE SOURCE CONVERTER (VSC)**

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, 26 Januari 2024

Yang Menyatakan



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT. Tuhan Yang Maha Esa karena atas Rahmat dan Karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul: “Desain Tekno Ekonomi Transmisi Arus Searah Konfigurasi *Line Commutated Converter* (LCC) dan *Voltage Source Converter* (VSC)”.

Dalam proses penyelesaian skripsi ini tentunya tidaklah mudah, begitu banyak kendala yang penulis harus hadapi namun penulis bersyukur bisa menyelesaikan skripsi ini dengan upaya maksimal dan tentunya dengan bantuan dari seluruh pihak yang telah membantu penulis pada proses penyelesaian skripsi ini.

Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan ucapan terima kasih bagi semua pihak yang telah memberikan bantuan, dukungan dan doa dalam penyusunan tugas akhir ini hingga selesai. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Kedua orang tua penulis, Bapak Nursyamsu Rasmin dan Ibu Musdalipah, Saudara Airin Nasyifa dan Aulia Ramadani beserta seluruh keluarga yang senantiasa memberikan doa dan dukungan dalam bentuk apapun sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
- 2) Bapak Dr. Ir. Yusran, S.T., M.T. selaku Pembimbing Utama dan Ibu Ir. Hasniaty, S.T., M.T., Ph.D. selaku Pembimbing Pendamping yang telah banyak memberikan bantuan dan senantiasa meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan kepada penulis pada proses penyelesaian tugas akhir ini.
- 3) Bapak Prof. Dr. Eng. Syafaruddin, S.T., M.Eng., dan Bapak Ir. Tajuddin Waris, M.T. selaku dosen penguji yang memberikan saran, koreksi dan arahan dalam menyelesaikan tugas akhir penulis.



- 4) 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.
- 5) Seluruh dosen pengajar serta pegawai Departemen Teknik Elektro Universitas Hasanuddin atas bimbingan, didikan, kemudahan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis selama menempuh perkuliahan.
- 6) Rekan-rekan asisten Laboratorium Listrik Dasar dan Laboratorium Elektronika Daya, yang telah memberikan ilmu dan pengalaman yang bermanfaat selama menjadi asisten laboratorium.
- 7) Teman-teman seperjuangan di Laboratorium Elektronika Daya diantaranya saudara Adeq, Deddy, Isnun, dan Namirah yang telah memberikan banyak bantuan, nasihat, serta pengalaman yang bisa menambah semangat penulis dalam menjalani kehidupan di semester akhir perkuliahan dan tentunya pada proses penyelesaian tugas akhir ini.
- 8) Seluruh teman-teman “TR19GER” yang telah kebersamai dari awal perkuliahan hingga saat ini, dan pastinya untuk momen-momen lainnya di masa yang akan datang. Penulis sangat berterima kasih atas kesempatan untuk bisa mengenal kalian semua yang telah membagikan ilmu dan banyak pengalaman kepada penulis.
- 9) Rekan-rekan asisten Laboratorium Fisika Dasar 2019 yakni Arya, Angel, Anjali, Alfian, Adam, Faidel, Faiz, Fia, Gita, Haekal, Inu, Nisa, Ridho dan Wawan. Terima kasih telah memberikan momen perkuliahan yang patut untuk selalu dikenang dan dirindukan. Seperti bunyi Hukum I Newton, momen bersama kalian yang mula-mula menyenangkan cenderung akan terus kita pertahankan.
- 10) Teman-teman KKN 108 PUPR Universitas Hasanuddin Kelurahan Tompobalang atas kebersamaan dan pengalaman yang luar biasa bersama penulis selama melakukan pengabdian pada masyarakat.



- 11) Ibu kos, yaitu ibu Mulyati beserta keluarga yang telah memberikan fasilitas kos hunian yang nyaman bagi penulis, dan tak kadang asupan makanan yang gratis kepada penulis selama menjadi penghuni di kos yang ibu miliki.
- 12) Semua pihak yang telah memberikan bantuan kepada penulis dalam bentuk apapun namun tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan tugas akhir ini. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka terhadap kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak guna dijadikan bahan evaluasi untuk meningkatkan kualitas kedepannya. Penulis berharap skripsi ini dapat memberikan sedikit ilmu yang bermanfaat untuk penelitian-penelitian yang serupa atau dapat menjadi data dalam penyusunan tugas akhir bagi yang membutuhkan.

Gowa, 17 Desember 2023

Musa Prayoga



ABSTRAK

MUSA PRAYOGA. *Desain Tekno Ekonomi Transmisi Arus Searah Konfigurasi Line Commutated Converter (LCC) dan Voltage Source Converter (VSC)* (dibimbing oleh Yusran dan Hasniaty)

Keunggulan efisiensi HVDC ini semakin berkembang dengan meningkatnya jarak transmisi yang digunakan. Berlandaskan dari skema penyaluran daya listrik melalui transmisi HVDC Pulau Sumatera-Jawa menimbulkan suatu studi kasus yang dapat diteliti yakni melihat bagaimana karakteristik secara teknis jika proyek transmisi HVDC Pulau Sumatera-Jawa ini dibangun dengan dua jenis topologi yang berbeda yaitu tipe LCC dan VSC. Tidak sampai disitu saja, pembangunan transmisi HVDC Pulau Sumatera-Jawa tentunya membutuhkan biaya yang besar demi mewujudkan tujuan penyaluran daya listrik ini. Oleh karena itu perlu dikaji bagaimana transmisi HVDC Pulau Sumatera-Jawa ini dari segi kacamata ekonomi teknik yang tentunya akan memberikan gambaran tentang seberapa layak proyek ini untuk dijalankan. Adapun tujuan penelitian yang ingin dicapai diantaranya mengetahui cara merancang model saluran transmisi HVDC dengan topologi LCC dan VSC menggunakan MatLab Simulink, mengetahui perbandingan karakteristik antara saluran transmisi HVDC dengan topologi LCC dan VSC, dan mengetahui bagaimana perbandingan studi ekonomi teknik saluran transmisi HVDC dengan topologi LCC dan VSC. Beberapa tahapan yang dilakukan pada proses penelitian kali ini terbagi dalam dua jenis pengumpulan data yakni pada sisi uji simulasi menggunakan MatLab Simulink dan juga pada studi ekonomi. Karakteristik antara saluran transmisi HVDC dengan topologi LCC dan VSC dapat dilihat dari data hasil simulasi yang diperoleh seperti data efisiensi, regulasi tegangan, dan pengaruh gangguan harmonisa pada sisi konverter pada masing-masing topologi dimana data menunjukkan untuk efisiensi saluran DC lebih tinggi pada topologi VSC yakni sebesar 99.31% juga mencapai keadaan *steady state* yang lebih cepat yaitu pada waktu 0.2 sekon. Berdasarkan hasil proses studi kelayakan secara ekonomis yang menghasilkan bahwa pembangunan saluran transmisi HVDC dengan topologi LCC lebih menguntungkan dari segi nilai NPV yang lebih positif dibanding saluran transmisi HVDC dengan topologi VSC dengan *study period* 30 tahun.

Kata kunci: Transmisi, HVDC, LCC, VSC



ABSTRACT

MUSA PRAYOGA. *Techno-Economic Design of Direct Current Transmission Line Commutated Converter (LCC) and Voltage Source Converter (VSC) Configuration* (supervised by Yusran and Hasniaty)

The efficiency advantages of HVDC continue to grow with increasing transmission distances used. Based on the electrical power distribution scheme through HVDC transmission on Sumatra-Java Island, a case study can be studied, namely looking at the technical characteristics of the Sumatra-Java Island HVDC transmission project was built with two different types of topologies, namely LCC and VSC types. It doesn't stop there, the construction of HVDC transmission on Sumatra-Java Island certainly requires large costs to realize the goal of distributing electric power. Therefore, it is necessary to study how the HVDC transmission for Sumatra-Java Island is carried out from a technical economic perspective, which will certainly provide an idea of how feasible this project is to carry out. The research goals to be achieved include knowing how to design an HVDC transmission line model with LCC and VSC topologies using MatLab Simulink, knowing the comparison of characteristics between HVDC transmission lines with LCC and VSC topologies, and knowing how to compare the technical economic studies of HVDC transmission lines with LCC and VSC topologies. Several stages carried out in the research process this time were divided into two types of data collection, namely on the simulation test side using MatLab Simulink and also on economic studies. The characteristics between HVDC transmission lines with LCC and VSC topologies can be seen from the simulation results data obtained such as efficiency data, voltage regulation, and the influence of harmonic interference on the converter side in each topology where the data shows that DC transmission efficiency is higher in the VSC topology, namely amounting to 99.31% also reached steady state faster, namely in 0.2 seconds. Based on the results of the economic feasibility study process, it was found that the construction of an HVDC transmission line with an LCC topology is more profitable in terms of a more positive NPV value than an HVDC transmission line with a VSC topology with a study period of 30 years.

Keywords: Transmission, HVDC, LCC, VSC



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan.....	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Batasan Masalah	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Sistem Tenaga Listrik.....	6
2.2 Transmisi Tenaga Listrik.....	7
2.3 Parameter Saluran Transmisi.....	9
2.3.1 Resistansi (R).....	9
2.3.2 Induktansi (L)	9
2.3.3 Kapasitansi (C).....	10
2.4 GMR dan GMD Saluran Transmisi	11
2.5 Distribusi Tenaga Listrik.....	13
2.6 Saluran HVAC dan HVDC	13
2.6.1 Saluran HVAC	13
2.6.2 Saluran HVDC	14
2.7 LCC-HVDC.....	15
2.8 VSC-HVDC.....	16
2.9 Konverter Daya dan Karakteristiknya.....	17
2.9.1 Konverter Daya dan Karakteristiknya	20



2.11 Perbedaan Gejala Transmisi HVAC dan HVDC	21
2.12 Gambaran Sistem Transmisi HVDC Sumatera-Jawa	23
2.13 Keunggulan Sistem HVDC Dibandingkan HVAC	25
2.14 Efisiensi Daya Listrik	26
2.15 Matlab Simulink	26
BAB III METODE PENELITIAN	28
3.1 Bahan Uji dan Alat Penelitian	28
3.2 Teknik Pengumpulan Data	28
3.3 Teknik Analisis	32
3.4 Data Penyusun Rangkaian Simulasi MatLab Simulink	33
3.5 Single Line Diagram	33
3.6 Rancangan Simulasi HVDC	35
3.7 Rancangan LCC-HVDC	35
3.7.1 Parameter rangkaian LCC-HVDC	37
3.7.2 Pemodelan rangkaian elektronika daya LCC-HVDC	39
3.7.3 Penggunaan filter pada LCC	39
3.8 Pemodelan Kontrol Sistem LCC-HVDC	40
3.8.1 Kontrol penyearah LCC	41
3.8.2 Kontrol inverter LCC	42
3.9 Rancangan VSC-HVDC	43
3.9.1 Parameter rangkaian VSC-HVDC	45
3.9.2 Pemodelan rangkaian Elektronika Daya VSC-HVDC	46
3.9.3 Penggunaan filter pada VSC	47
3.10 Pemodelan Kontrol Sistem VSC-HVDC	48
3.10.1 Kontrol penyearah VSC	48
3.10.2 Kontrol inverter VSC	49
3.11 Parameter elektrik LCC-HVDC	50
3.12 Parameter elektrik VSC-HVDC	51
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	52
4.1 Hasil Uji Simulasi	52
4.2 Hasil Uji Simulasi LCC-HVDC	52
4.2.1 Analisis parameter rangkaian LCC-HVDC	56
il analisis parameter rangkaian LCC-HVDC	61



4.3 Hasil Uji Simulasi VSC-HVDC	62
4.3.1 Analisis parameter rangkaian VSC-HVDC	65
4.3.2 Hasil analisis parameter rangkaian VSC-HVDC	69
4.3.3 Perbandingan hasil parameter LCC dan VSC	70
4.4 Hasil Uji Simulasi LCC Variasi Tegangan 750 kV & 1000 kV	71
4.4.1 Hasil simulasi LCC tegangan 750 kV	71
4.4.2 Hasil simulasi LCC tegangan 1000 kV	73
4.4.3 Perbandingan hasil simulasi LCC tegangan 750 kV & 1000 kV	75
4.5 Hasil Uji Simulasi VSC Variasi Tegangan 750 kV & 1000 kV	76
4.5.1 Hasil simulasi VSC tegangan 750 kV	76
4.5.2 Hasil simulasi VSC tegangan 1000 kV	76
4.5.3 Perbandingan hasil simulasi VSC tegangan 750 kV & 1000 kV	78
4.6 Perbandingan Simulasi LCC-VSC Tegangan 750 kV & 1000 kV	79
4.7 Hasil Studi Ekonomi Implementasi Proyek HVDC Sumatera-Jawa	80
4.7.1 Biaya investasi implementasi proyek HVDC Sumatera-Jawa	80
4.7.2 Perhitungan parameter ekonomi	82
4.7.3 Perbandingan alternatif keekonomian	84
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	86
5.1 Kesimpulan	86
5.2 Saran	87
DAFTAR PUSTAKA	88
LAMPIRAN	91



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Sistem tenaga listrik	6
Gambar 2 Model rangkaian ekivalen saluran transmisi	8
Gambar 3 Kapasitansi 2 kawat	11
Gambar 4 Model diameter konduktor	13
Gambar 5 Diagram skematik LCC HVDC	16
Gambar 6 Sistem transmisi VSC HVDC <i>point to point</i>	17
Gambar 7 Gelombang <i>switching</i> untuk saklar daya ideal	18
Gambar 8 Struktur <i>tower</i> transmisi HVAC dan HVDC	22
Gambar 9 Peta rencana transmisi HVDC Sumatera-Jawa	25
Gambar 10 Diagram alir penelitian pemodelan simulasi HVDC	30
Gambar 11 Diagram alir penelitian studi ekonomi HVDC	31
Gambar 12 <i>Single line diagram</i> interkoneksi Sumatera-Jawa	34
Gambar 13 Rangkaian LCC-HVDC Sumatera-Jawa	36
Gambar 14 Parameter blok sumber listrik 3 fasa	37
Gambar 15 Parameter blok alat ukur tegangan dan arus 3 fasa	38
Gambar 16 Model penyearah LCC-HVDC	39
Gambar 17 Model inverter LCC-HVDC	39
Gambar 18 Rangkaian filter AC pada sisi penyearah dan inverter	40
Gambar 19 Kontrol penyearah LCC	42
Gambar 20 Kontrol inverter LCC	43
Gambar 21 Rangkaian VSC-HVDC Sumatera-Jawa	44
Gambar 22 Sistem AC pulau Sumatera	45
Gambar 23 Sistem AC pulau Jawa	46
Gambar 24 Model penyearah VSC-HVDC	47
Gambar 25 Model inverter VSC-HVDC	47
Gambar 26 Rangkaian filter AC pada kedua stasiun konverter	48
Gambar 27 Kontrol penyearah VSC	49
Gambar 28 Kontrol inverter VSC	50



Gambar 30 Sinyal AC pada sisi pembangkitan setelah di-zoom	53
Gambar 29 Sinyal AC pada sisi pembangkitan	53
Gambar 32 Sinyal AC pada stasiun penerima setelah di-zoom	54
Gambar 31 Sinyal AC pada stasiun penerima	54
Gambar 34 Sisi masukan inverter	55
Gambar 33 Sisi keluaran penyearah	55
Gambar 35 Sudut pemadaman	56
Gambar 36 Nilai THD arus sisi penyearah	59
Gambar 37 Nilai THD tegangan sisi penyearah	59
Gambar 38 Nilai THD arus sisi inverter	60
Gambar 39 Nilai THD tegangan sisi inverter	60
Gambar 41 Sinyal tegangan dan arus pada pulau Sumatera setelah di-zoom	62
Gambar 40 Sinyal tegangan dan arus pada pulau Sumatera	62
Gambar 42 Sinyal tegangan dan arus pada pulau Jawa	63
Gambar 43 Sinyal tegangan dan arus pada pulau Jawa setelah di-zoom	63
Gambar 44 Sinyal pada sisi penyearah	64
Gambar 45 Sinyal pada sisi inverter	64
Gambar 46 THD arus pada sisi penyearah	67
Gambar 47 THD tegangan pada sisi penyearah	67
Gambar 48 THD arus pada sisi inverter	68
Gambar 49 THD tegangan pada sisi inverter	68
Gambar 50 THD tegangan pada sisi penyearah LCC 750 kV	72
Gambar 51 THD tegangan pada sisi inverter LCC 750 kV	72
Gambar 52 THD tegangan pada sisi inverter LCC 1000 kV	74
Gambar 53 THD arus pada sisi penyearah LCC 1000 kV	74
Gambar 54 THD arus pada sisi penyearah VSC 1000 kV	77
Gambar 55 THD tegangan pada sisi penyearah VSC 750 kV	77



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Perbedaan teknologi konverter LCC dan VSC	15
Tabel 2 Perbedaan teknologi konverter LCC dan VSC	20
Tabel 3 Perbandingan <i>two-level</i> inverter dan <i>multilevel</i> inverter	21
Tabel 4 Parameter sistem LCC HVDC	50
Tabel 5 Parameter sistem VSC HVDC	51
Tabel 6 Hasil simulasi parameter transmisi LCC	61
Tabel 7 Hasil simulasi parameter transmisi VSC	69
Tabel 8 Perbandingan parameter topologi LCC dan VSC	70
Tabel 9 Data simulasi LCC tegangan 750 kV	71
Tabel 10 Data simulasi LCC tegangan 1000 kV	73
Tabel 11 Data perbandingan simulasi LCC tegangan 750 kV & 1000 kV	75
Tabel 12 Data simulasi VSC tegangan 750 kV	76
Tabel 13 Data simulasi VSC tegangan 1000 kV	76
Tabel 14 Data perbandingan simulasi VSC tegangan 750 kV & 1000 kV	78
Tabel 15 Hasil Perbandingan Simulasi LCC-VSC Tegangan 750 kV & 1000 kV	79
Tabel 16 Cakupan parameter interkoneksi HVDC sumatera-jawa.....	80
Tabel 17 Biaya investasi saluran interkoneksi sumatera -jawa (LCC)	81
Tabel 18 Biaya investasi saluran interkoneksi sumatera -jawa (VSC)	81
Tabel 19 <i>Cash flow</i> transmisi HVDC LCC dan VSC	83
Tabel 20 Perbandingan keekonomian LCC dan VSC.....	85



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Rectifier 12 pulsa sisi penyearah	91
Lampiran 2 Inverter 12 pulsa sisi inverter	91
Lampiran 3 <i>Master control</i> pada topologi LCC	92
Lampiran 4 Data parameter blok <i>powergui</i> topologi LCC	92
Lampiran 5 Pusat data akuisisi topologi LCC	93
Lampiran 6 Data parameter blok <i>powergui</i> topologi VSC	93
Lampiran 7 Data parameter blok IGBT topologi VSC	94
Lampiran 8 Data parameter blok generator PWM topologi VSC	94
Lampiran 9 Pusat data akuisisi topologi VSC sisi inverter	95
Lampiran 10 Pusat data akuisisi topologi VSC sisi penyearah	95



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Daya listrik dapat disalurkan kepada konsumen melalui proses transmisi daya listrik dari sisi pembangkit hingga pada sisi distribusi. Pada proses transmisi daya listrik sangatlah krusial, karena dapat mempengaruhi besar perubahan nilai daya listrik yang dikirim pada sisi pembangkit menuju ke beban yang akan disuplai.

Daya listrik yang disalurkan sisi pembangkit menuju ke beban umumnya memiliki jarak pengiriman yang jauh, mulai dari ratusan kilometer hingga pada ribuan kilometer. Akibatnya nilai tegangan yang disalurkan dapat mengalami penurunan. Berdasarkan persamaan daya listrik, maka proses penurunan kualitas tegangan pada saluran transmisi juga mengakibatkan penurunan nilai daya listrik. Oleh karena itu semakin jauh jarak pengiriman daya listrik menuju ke beban melalui saluran transmisi maka semakin besar pula rugi-rugi daya yang ditimbulkan. Kemudian jika dilihat dari sisi nilai tegangan semakin besar nilai tegangan yang disalurkan maka akan mengakibatkan semakin kecil jumlah arus listrik yang dibutuhkan, akibatnya kerugian listrik akan minim terjadi.

Pada umumnya dalam proses penyaluran daya listrik pada konsumen dibedakan dalam dua jenis yaitu transmisi arus bolak-balik (AC) dan transmisi arus searah (DC). Namun sampai saat ini untuk pengiriman daya listrik dengan jarak yang jauh, penggunaan dari transmisi tegangan tinggi AC atau *High Voltage Alternating Current* (HVAC) masih mendominasi dibandingkan dengan transmisi tegangan tinggi DC atau *High Voltage Direct Current* (HVDC). Hal ini dikarenakan keadaan transformator yang memungkinkan perubahan tegangan listrik AC dari rendah ke tinggi atau sebaliknya menjadi sangat mudah. Namun seiring perkembangan jaman, kebutuhan energi listrik semakin meningkat, sedangkan sumber pembangkit listrik semakin terbatas, sehingga dibangunlah pembangkit listrik yang dapat diperbarui. Beberapa sumber tenaga listrik yang dapat diperbarui



pada lokasi yang jauh dari konsumen. Seperti pada pembangkit listrik angin lepas pantai, yang memiliki medan yang sulit untuk kabel transmisi dan, berakibat akan semakin sulit transmisi dilakukan.

Oleh karena itu dikembangkan saluran transmisi dengan menggunakan arus searah, HVDC, yang dapat mengatasi permasalahan tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk menunjukkan bagaimana perbandingan efisiensi sistem transmisi HVDC jika dibandingkan dengan sistem transmisi HVDC jenis yang lain pada saluran transmisi jarak jauh.

Pada penelitian yang mengevaluasi kerugian transmisi HVAC dan HVDC pada pembangkit listrik tenaga angin lepas pantai (Negra et al., 2006), dikemukakan bahwa pada pembangkit tersebut, penggunaan saluran transmisi HVDC dapat lebih efisien dibandingkan dengan HVAC. Data penelitian menyebutkan transmisi HVDC memiliki efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan HVAC.

Keunggulan efisiensi HVDC ini semakin berkembang dengan meningkatnya jarak transmisi yang digunakan. Data tersebut juga didukung oleh jurnal (Kalair et al., 2016). Pada jurnal tersebut yang membahas tentang studi komparatif untuk sistem transmisi HVDC dan HVAC, menyatakan bahwa sekalipun HVDC memiliki biaya terminal yang lebih mahal dari pada HVAC, namun karena sistem HVDC memiliki efisiensi yang lebih baik dan biaya transmisi yang lebih rendah, maka pada transmisi jarak jauh transmisi HVDC menjadi lebih murah dibandingkan dengan HVAC.

Salah satu jenis transmisi HVDC yang sering digunakan adalah HVDC-LCC atau biasa disebut transmisi HVDC konvensional dimana beroperasi didasarkan pada *line commutated converter* (LCC). Transmisi HVDC-LCC ini dapat dikatakan transmisi dengan teknologi yang sudah matang karena memiliki kapasitas transmisi yang besar, namun masih memiliki beberapa kelemahan seperti risiko kegagalan komutasi, kurangnya kemampuan untuk melakukan *black start*, dan konsumsi daya reaktif yang besar.

Hal ini mendorong munculnya topologi transmisi HVDC yang lebih baik secara teknis yakni berbasis *voltage source converter* (VSC) adalah teknologi yang lebih baru yang menyediakan fleksibilitas operasional yang lebih tinggi termasuk kontrol independen atas daya aktif dan reaktif juga dalam melakukan *black start*.

VSC memiliki kerugian peralihan dan biaya konstruksi yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan LCC. (M. H. Nguyen, 2012)



Jika melihat proyek transmisi HVDC yang ada pada negara Indonesia yakni proyek transmisi HVDC interkoneksi Pulau Jawa-Sumatera menjadi suatu proyek penyaluran daya listrik yang terbilang cukup masif yang ada pada negara Indonesia.

Tentunya proyek tersebut dibangun untuk memenuhi kebutuhan penyaluran daya listrik antar Pulau Jawa-Sumatera, dimana pusat pembangkitan juga biasanya berlokasi jauh dari pusat beban. Oleh karena itu listrik yang dihasilkan harus disalurkan melalui saluran transmisi. Karena sebagian besar wilayah Indonesia terdiri dari lautan, maka lautan tidak dianggap sebagai batas antar pulau, melainkan sebagai penghubung antar pulau.

Berdasarkan penjelasan ini, para ahli perencanaan pasokan listrik di negara ini juga harus memperhatikan integrasi sistem tenaga listrik dengan menerapkan transmisi tenaga listrik melalui kabel bawah laut. Distribusi energi listrik dengan sistem arus searah hanya ekonomis jika panjang saluran udara melebihi 500 km (Arismunandar, 1997), ketika saluran bawah tanah melebihi 48 km, atau ketika saluran bawah laut melebihi 24 km.

Jarak Sumatera dan Jawa sangat pendek dan hanya dibatasi oleh Selat Sunda. Menggunakan kabel bawah laut sepanjang sekitar 40 km tidak akan menimbulkan banyak masalah. Ketapang di Lampung merupakan lokasi ideal untuk transportasi listrik melalui kabel bawah laut ke Tanjung Pukat di Jawa Barat yang berjarak sekitar 40 km.

Berlandaskan dari skema penyaluran daya listrik melalui transmisi HVDC Pulau Sumatera-Jawa menimbulkan suatu studi kasus yang dapat diteliti yakni melihat bagaimana karakteristik secara teknis jika proyek transmisi HVDC Pulau Sumatera-Jawa ini dibangun dengan dua jenis topologi yang berbeda yaitu tipe LCC dan VSC.

Tidak sampai disitu saja, pembangunan transmisi HVDC Pulau Sumatera-Jawa tentunya membutuhkan biaya yang besar demi mewujudkan tujuan penyaluran daya listrik ini. Oleh karena itu perlu dikaji bagaimana transmisi HVDC Pulau Sumatera-Jawa ini dari segi kacamata ekonomi teknik yang tentunya akan memberikan

tentang seberapa layak proyek ini untuk dijalankan.

dasarnya skripsi ini memberikan hasil analisis dasar-dasar sistem HVDC untuk topologi VSC-HVDC maupun LCC-HVDC. Hal ini diperoleh



dengan melakukan pemodelan sistem transmisi HVDC yang berdasarkan parameter-parameter yang telah disediakan atau dengan melakukan studi pustaka terlebih dahulu. Dengan demikian penelitian ini dapat memberikan perbandingan karakteristik secara teknis dari topologi VSC-HVDC maupun LCC-HVDC juga dari sisi ekonomi yang sesuai dengan batasan masalah yang telah ditentukan sebelumnya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang model saluran transmisi HVDC dengan topologi LCC dan VSC menggunakan MatLab Simulink?
2. Bagaimana perbandingan karakteristik antara saluran transmisi HVDC dengan topologi LCC dan VSC?
3. Bagaimana perbandingan studi ekonomi teknik saluran transmisi HVDC dengan topologi LCC dan VSC?

1.3 Tujuan

1. Mengetahui cara merancang model saluran transmisi HVDC dengan topologi LCC dan VSC menggunakan MatLab Simulink.
2. Mengetahui perbandingan karakteristik antara saluran transmisi HVDC dengan topologi LCC dan VSC.
3. Mengetahui bagaimana perbandingan studi ekonomi teknik saluran transmisi HVDC dengan topologi LCC dan VSC.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dapat memberikan informasi berupa hasil simulasi yang nantinya dapat memberikan *review* terhadap data-data hasil simulasi yang diperoleh yang dapat digunakan pada penelitian serupa di masa yang akan datang.



1.5 Batasan Masalah

1. Penelitian ini hanya berfokus pada hasil simulasi pada software MatLab Simulink.
2. Penelitian ini berfokus pada karakteristik saluran transmisi HVDC dari segi perancangan dan segi ekonomi.
3. Parameter pada sistem tenaga hanya berfokus pada sisi transmisi saja.
4. Tidak memperhatikan konfigurasi kabel transmisi.



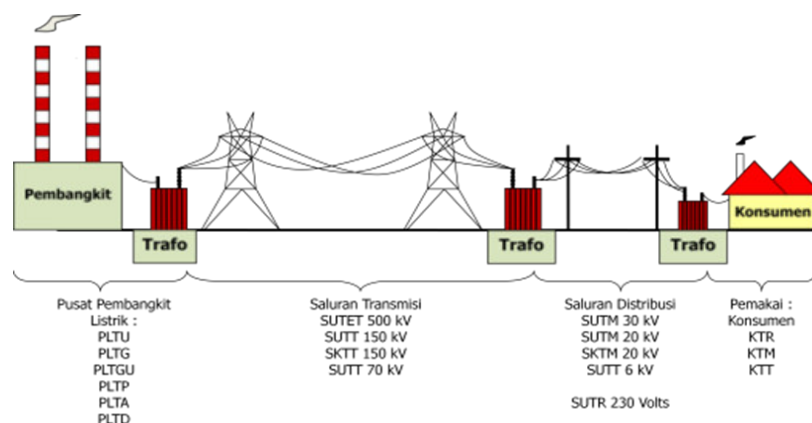
BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Tenaga Listrik

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.

Industri tenaga listrik mulai beroperasi pada tahun 1882 ketika pembangkit listrik pertama bernama *Pearl Street Electric Station* mulai beroperasi di New York, AS. Selain itu, industri ketenagalistrikan berkembang sangat pesat, pembangkit listrik serta jaringan transmisi dan distribusi bermunculan di berbagai negara.

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.



Gambar 1 Sistem tenaga listrik (Sumber: Wikarsa,2010)

Aliran energi listrik dalam suatu sistem tenaga listrik dapat dijelaskan berikut. Di pembangkit listrik, sumber energi primer seperti bahan bakar fosil (batu bara, gas alam dan minyak bumi), air, energi panas bumi dan energi



nuklir diubah menjadi energi listrik. Generator sinkron mengubah energi mekanik yang dihasilkan pada poros turbin menjadi energi listrik tiga fasa. Trafo *step-up* kemudian mentransmisikan energi listrik ini ke pusat beban melalui saluran tegangan tinggi.

Kenaikan tegangan bertujuan untuk mengurangi arus yang mengalir pada saluran transmisi. Jadi saluran transmisi tegangan tinggi akan membawa arus rendah dan dengan demikian mengurangi besar rugi-rugi panas (I^2R) terkait.

Pada saat saluran transmisi mencapai pusat beban, tegangan dikurangi kembali menjadi tegangan menengah oleh trafo *step-down*. Di pusat beban yang terhubung ke jalur distribusi, energi listrik ini diubah menjadi bentuk energi lain yang dapat digunakan seperti energi mekanik (motor), penerangan, pemanasan, pendinginan, dll. (Syahputra, 2016)

2.2 Transmisi Tenaga Listrik

Saluran transmisi listrik ada dua kategori saluran transmisi, yaitu saluran udara dan saluran bawah tanah. Saluran udara mengirimkan energi listrik ke menara atau tiang transmisi melalui kabel yang digantung dari isolator, sementara saluran kabel bawah tanah melewati kabel yang terkubur di bawah tanah. Saluran transmisi bawah tanah tidak terpengaruh oleh cuaca buruk, hujan, angin, petir, dan lain-lain, cocok digunakan di area ramai.

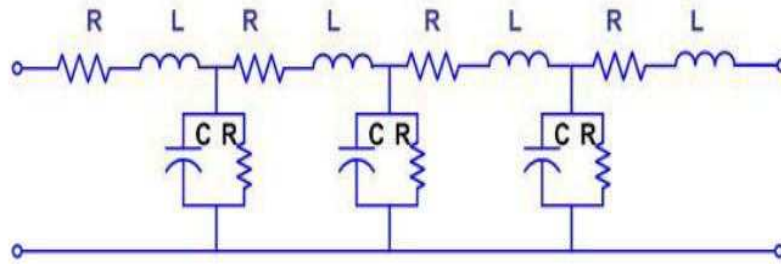
Namun, biaya produksinya jauh lebih mahal daripada saluran udara dan lebih sulit diperbaiki jika terjadi kerusakan. Tergantung pada jenis daya yang akan ditransmisikan, hampir semua saluran transmisi saat ini menggunakan sistem AC, bukan sistem DC.

Untuk keperluan analisis dan perhitungan, saluran transmisi biasanya dibagi dalam tiga kelas berdasarkan panjang saluran transmisi. (Hutahruk, 1985)

- 1) Saluran pendek (<80 km)
- 2) Saluran menengah (80-250 km)



3) Saluran panjang (>250 km) (Wibowo, 2018)



Gambar 2 Model rangkaian ekivalen saluran transmisi (Sumber: Sukisno,2012)

Berdasarkan Gambar 2 dimana menampilkan bagaimana rangkaian ekivalen dari suatu saluran transmisi tenaga listrik dimana terdiri atas tiga komponen penghantar listrik yaitu resistor, kapasitor, dan induktor. Susunan resistor dan induktor dihubungkan seri sedangkan untuk susunan dari kapasitor dan resistor dihubungkan secara paralel pada saluran transmisi tenaga listrik.

Adapun klasifikasi transmisi tenaga listrik berdasarkan tegangannya:

1. Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 200 kV - 500 kV
SUTET 200 kV-500 kV, umumnya digunakan pada generator dengan daya lebih besar dari 500 kV, dengan tujuan untuk mengurangi jatuh tegangan dan memperkecil penampang konduktor secara maksimal, agar tercapai operasi yang efisien dan efektif.
2. Saluran Udara Tegangan Tinggi (SUTT) 30 kV - 150 kV
Dengan tegangan operasi dari 30 kV hingga 150 kV, jenis jaringan biasanya sirkuit tunggal atau ganda, dengan 1 sirkuit terdiri dari 3 fasa dengan 3 atau 4 konduktor. Biasanya hanya 3 kabel dan kabel netral diganti dengan ground sebagai kabel balik. Ketika kapasitas daya input besar, kabel di setiap fasa terdiri dari dua atau empat kabel (ganda atau quadrupole), dan bundel kawat disebut kawat bundel.
3. Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) 40V - 1 kV
Transmisi Saluran Udara Tegangan Rendah (SUTR) adalah jaringan listrik bagian hulu dengan tegangan distribusi kurang dari 1 kV yang mengalirkan listrik tegangan rendah langsung ke konsumen. Di Indonesia, tegangan operasi transmisi SUTR saat ini adalah 220/380 volt.



2.3 Parameter Saluran Transmisi

Suatu saluran transmisi listrik mempunyai empat parameter yang mempengaruhi kemampuan dalam memenuhi tugasnya sebagai bagian suatu sistem daya diantaranya yakni resistansi, induktansi, kapasitansi dan konduktansi.

Resistansi dan induktansi itu secara seragam tersebar sepanjang saluran dalam bentuk impedansi seri. Konduktansi dan kapasitansi terdapat di antara penghantar pada saluran fasa tunggal atau dari sebuah penghantar ke netral pada saluran fasa tiga membentuk admitansi simpang. Meskipun resistansi, induktansi dan kapasitansi itu tersebar, rangkaian setara suatu saluran terdiri dari parameter-parameter yang terkumpul.

2.3.1 Resistansi (R)

Resistansi penghantar saluran transmisi merupakan sumber utama rugi-rugi daya pada saluran transmisi. Istilah resistansi, kecuali bila ada keterangan yang lebih spesifik, berarti resistansi efektif. Resistansi efektif suatu penghantar dinyatakan

$$R = \frac{\text{rugi daya dalam penghantar}}{|I|^2} \Omega \quad (1)$$

di mana daya dinyatakan dalam Watt dan I adalah arus efektif dalam suatu penghantar dalam Ampere. Resistansi efektif ini sama dengan resistansi arus searah penghantar hanya jika sebaran arus dalam penghantar tersebut seragam.

Distribusi arus yang seragam pada penampang konduktor hanya terjadi pada kasus arus searah. Ketika frekuensi arus bolak-balik meningkat, ketidakseragaman distribusi daya menjadi lebih nyata. Ketika frekuensi meningkat, kerapatan arus menjadi tidak seragam. Gejala-gejala ini disebut efek kulit (*skin effect*). Untuk konduktor dengan penampang melingkar, rapat arus biasanya meningkat dari dalam ke luar. Namun, jika jari-jari konduktor cukup besar, rapat arus dapat bervariasi menurut jarak radial dari pusat. (William D. Stevenson, 1994)

2.3.2 Induktansi (L)



Induktansi pada saluran transmisi merupakan akibat dari adanya medan magnet yang mengelilingi penghantar yang dialiri arus. Jika arus pada rangkaian berubah maka medan magnet yang ditimbulkan juga akan berubah-ubah dan

apabila medan magnet yang ditimbulkan memiliki permeabilitas yang konstan maka banyaknya fluks gandeng berbanding lurus dengan arus sehingga tegangan imbasnya sebanding dengan kecepatan perubahan arus. (William D. Stevenson, 1994)

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (2)$$

Dimana:

L adalah induktansi rangkaian (H)

Φ adalah fluks listrik (Weber)

I adalah arus listrik yang mengalir (A)

Karena induktansi saluran terdiri dari konduktor terintegrasi, semua serat identik dalam keadaan yang sama membagi penyebaran arus yang seragam di dalam serat. Metode ini dapat diperluas untuk diterapkan pada jenis konduktor termasuk serat dengan ukuran berbeda.

2.3.3 Kapasitansi (C)

Kapasitansi suatu saluran transmisi merupakan akibat beda potensial antar penghantar, kapasitansi dapat menyebabkan penghantar-penghantar tersebut bermuatan seperti halnya yang terjadi pada keping-keping suatu kapasitor bila ada perbedaan potensial di antaranya.

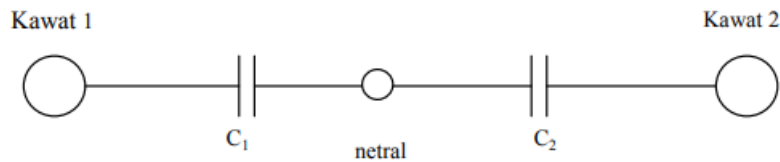
Kapasitansi antar penghantar adalah muatan per satuan selisih potensial. Kapasitansi antara penghantar-penghantar sejajar konstan tergantung kepada ukuran dan jarak pemisah antar penghantar tersebut. Untuk saluran daya yang kurang dari kira-kira 80 km panjangnya, pengaruh kapasitansi itu kecil dan biasanya diabaikan. Untuk saluran yang lebih panjang dengan tegangan yang lebih tinggi, nilai kapasitansi sangatlah penting. (William D. Stevenson, 1994)

$$C = \frac{q}{V} \text{ Farad} \quad (3)$$



apasitansi antara dua penghantar pada suatu saluran dua kawat kan sebagai muatan pada penghantar-penghantar itu per satuan beda di antara keduanya.

Dalam bentuk persamaan, kapasitansi per satuan panjang saluran ditunjukkan pada persamaan (3). Dimana q adalah muatan pada saluran dalam satuan coulomb dan V adalah selisih potensial antara kedua penghantar dinyatakan dalam volt.



Gambar 3 Kapasitansi 2 kawat (Sumber: Syafriyudin, 2012)

2.4 GMR dan GMD Saluran Transmisi

GMR (*Geometrical Mean Radius*) dan GMD (*Geometrical Mean Distance*) adalah dua istilah penting yang digunakan saat menghitung induktansi dan kapasitansi saluran udara. GMD dan GMR menyederhanakan penghitungan induktansi dan kapasitansi pada saluran transmisi.

a. GMR

Radius rata-rata geometri (GMR) dari suatu luas (area) adalah: limit dari jarak rata-rata geometris (GMD), antara pasangan elemen dalam luas itu sendiri bila jumlah elemen itu diperbesar sampai tak terhingga. Atau dengan kata lain khususnya untuk kawat bundar GMR dari suatu kawat bundar adalah: radius dari suatu silinder berdinding yang sangat tipis mendekati nol sehingga induktansi dari silinder itu sama dengan induktansi kawat asli.

Penggunaan GMR ini membutuhkan distribusi arus yang uniform dan tidak ada bahan-bahan magnet, untuk bahan jenis ACSR dengan inti yang terdiri dari kawat baja (bahan magnet), dalam hal ini nilai tahanan/impedansi baja jauh lebih besar dari bahan penghantar jenis tembaga atau aluminium (Al, Cu) dimisalkan semua arus mengalir lewat penghantar, dan arus yang kecil yang

vati baja dapat diabaikan, dengan demikian GMR dapat digunakan pada 2. (Syafriyudin, 2012)



GMR biasanya disimbolkan dengan D_s yang memiliki hubungan dengan induktansi saluran transmisi per meter sebagai berikut:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{d}{D_s} \quad (4)$$

Nilai GMR penghantar berkas per fasa adalah

$$GMR = \sqrt[3]{GMR_1 \cdot GMR_2 \cdot GMR_3} \quad (5)$$

b. GMD

Konsep GMD (jarak rata-rata geometris) menyederhanakan perhitungan induktansi timbal balik dari konduktor yang dibundel. Disebut GMD karena diukur sebagai jarak rata-rata geometrik dari satu konduktor ke konduktor lainnya. GMD adalah jarak antar konduktor yang berbeda, jadi jika penempatan konduktor berubah maka GMD juga akan berubah. GMD dari suatu titik terhadap lingkaran adalah jarak dari titik itu terhadap lingkaran. (Syafriyudin, 2012)

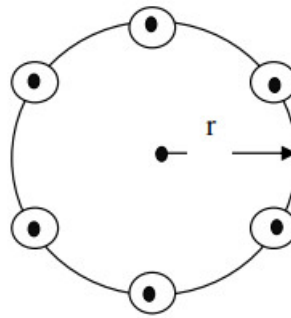
Berdasarkan teori Guye terkait perhitungan nilai GMD suatu konduktor transmisi tenaga listrik yang menyatakan bahwa jika pada suatu lingkaran dengan radius r terdapat n titik yang jarak satu sama lain sama besar maka GMD antara titik itu adalah:

$$GMD = r^{n-1} \sqrt{n} \quad (6)$$

Nilai GMD penghantar berkas per fasa adalah

$$GMD = \sqrt[3]{GMD_{RS} \cdot GMD_{ST} \cdot GMD_{TR}} \quad (7)$$





Gambar 4 Model diameter konduktor (Sumber: Syafriyudin, 2012)

2.5 Distribusi Tenaga Listrik

Sistem distribusi adalah sistem yang paling dekat dengan beban atau pelanggan dalam sistem suplai energi listrik sehingga sistem ini mendapat perhatian lebih dibandingkan sistem pembangkitan dan transmisi terutama oleh pihak pelanggan. (Püttgen, 2003)

Beberapa bentuk rangkaian sistem distribusi antara lain adalah rangkaian radial, loop, dan grid. Namun secara umum, bentuk rangkaian sistem distribusi yang kerap digunakan adalah radial. Kelemahan sistem distribusi radial dibandingkan loop dan grid adalah beban yang dialirkan rentan terhadap pemadaman jika terjadi gangguan (Gonen, 1986). Hal ini disebabkan kurangnya pasokan dukungan pengganti ketika daya utama dimatikan. Sedangkan keuntungannya adalah biaya investasi relatif lebih sedikit dibandingkan jenis lainnya. (Doloksaribu, 2010)

2.6 Saluran HVAC dan HVDC

2.6.1 Saluran HVAC

Sistem transmisi tenaga listrik arus bolak-balik tegangan tinggi atau high voltage alternating 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 pengenalan AC dinaikkan untuk mengurangi jatuh tegangan dan rugi-rugi daya.



Saluran transmisi tenaga listrik yang cukup jauh dari pusat pembangkit ke pusat beban menyebabkan adanya rugi-rugi 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)

2.6.2 Saluran HVDC

Sistem transmisi 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, dan filter bekerja untuk mengurangi frekuensi harmonik yang disebabkan oleh kerja trafo.

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

Adapun dua jenis topologi konverter yang tersedia untuk saat ini khususnya pada transmisi HVDC diantaranya sebagai berikut:

1. *Line-Commutated Converters (LCC)*
2. *Voltage Source Converters (VSC)*

Topologi yang banyak digunakan saat ini adalah LCC yang berbasis katup thyristor yang dipasang untuk transmisi HVDC yang dayanya mencakup hingga ribuan MW. Topologi LCC merupakan *Current Source Converter (CSC)* karena Arus DC akan tetap konstan mengalir dengan menggunakan induktor besar yang membentuk sumber arus pada sisi DC. Teknologi ini sudah solid dan menyediakan sistem transmisi yang efisien dan handal untuk banyak pengaplikasian.

Sementara topologi VSC berbasis saklar yang dapat dikontrol, umumnya *Insulated Gate Bipolar Transistors (IGBTs)*. IGBTs bisa di hidup dan matikan sehingga keuntungannya dari beralih (*switching*) berkali-kali per siklus dan meningkatkan distorsi harmonik dari sinyal output.

Hasilnya adalah kebutuhan ruang yang menurun karena memerlukan filter yang lebih sedikit. Topologi VSC memungkinkan kontrol daya aktif dan reaktif yang cepat dan independen sehingga tidak memerlukan kompensasi daya atau capacitor bank tidak diperlukan. Tetapi topologi ini memungkinkan



rugi-rugi yang lebih besar karena adanya *switching* frekuensi tinggi dan rugi-rugi pada IGBT dibandingkan dengan thyristor. (Kundur, 1994).

Tabel 1 Perbedaan teknologi konverter LCC dan VSC

Konverter LCC	Konverter VSC
Menggunakan Thyristor	Menggunakan IGBT
Digunakan pada transmisi daya yang besar	Digunakan pada transmisi daya menengah
Rugi rugi daya 0,8% tiap konverter	Rugi rugi daya 1-2%
Membutuhkan daya reaktif	Menghasilkan dan mengelola daya reaktif
Membutuhkan AC Grid yang kuat dalam sistem penyaluran dayanya	Membantu AC Grid dalam sistem penyaluran dayanya
Membutuhkan filter dalam kapasitas yang besar	Membutuhkan filter dalam kapasitas kecil atau dapat ditiadakan

Sumber: Kundur, 1994

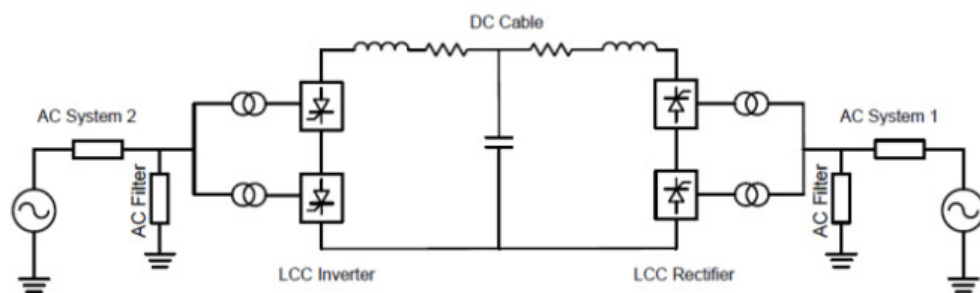
2.7 LCC-HVDC

Sebagian besar konverter HVDC yang beroperasi adalah LCC. LCC modern didasarkan pada perangkat *switching* yang dapat dikontrol, menggunakan katup thyristor untuk melakukan komutasi. Dalam LCC, arus DC tidak berubah arahnya dimana mengalir melalui induktansi yang lebar dan dapat dipertimbangkan hampir konstan. Di sisi AC, konverter bertindak sebagai sumber arus, menginjeksi frekuensi jaringan dan arus harmonik ke dalam jaringan AC. Oleh karena itu, LCC untuk HVDC juga dikenal sebagai konverter sumber arus. Karena arah arus tidak riasikan, pembalikan arah aliran daya (bila diperlukan) dicapai dengan skan polaritas tegangan DC di kedua stasiun. (Jovcic & Ahmed, 2015)



LCC mengandalkan sistem AC yang kuat untuk beroperasi. Faktanya, tegangan AC diperlukan untuk memungkinkan komutasi dilakukan dari satu perangkat switching ke perangkat lainnya. Akibatnya, LCC bergantung pada jaringan AC sinkron untuk memastikan konversi daya. Selain itu, *line-commutated converter* beroperasi dalam kondisi tunak pada 1 p.u. daya aktif akan mengkonsumsi sekitar 0,5 p.u. dari daya reaktif, yang harus dikompensasi dengan bank kapasitor. Namun demikian, LCC memiliki kerugian yang lebih rendah dibandingkan konverter VSC. Kerugian LCC diperoleh sebesar 0,7% dari daya yang dikonversi.

Meskipun kerugiannya lebih rendah, stasiun LCC-HVDC membutuhkan lebih banyak ruang. Dibandingkan dengan Stasiun VSC-HVDC, LCC yang lengkap membutuhkan ruang dua kali lipat. Hal ini terutama disebabkan oleh kebutuhan bank kapasitor dan bank filter untuk mengatasi harmonisa. LCC konverter menghasilkan harmonik, yang harus disaring. Stasiun LCC dalam kisaran seratus MW akan membutuhkan antara 1600 dan 5000 m² hanya untuk bank filter. Selain itu, LCC membutuhkan jaringan AC yang kuat untuk mengubah arus pada katup thyristor. (Napoles, et al., 2010)



Gambar 5 Diagram skematik LCC HVDC (Sumber: Song, 2018)

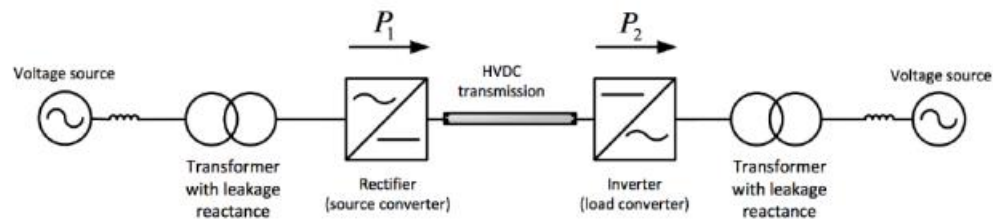
2.8 VSC-HVDC

Sebagai alternatif, VSC mengatasi sebagian besar tantangan LCC, dan menawarkan keuntungan signifikan lainnya. VSC adalah teknologi yang cukup baru, teknologi VSC pertama kali dipasang di darat pada tahun 1997. Penggunaan Konverter dalam



lepas pantai tersebut relatif baru, karena konverter VSC pertama kali lepas pantai pada tahun 2005. Saat itu menggunakan topologi dua tingkat, n saat ini, VSC menggunakan konsep *modular multi-level converter*

VSC didasarkan pada penggunaan transistor IGBT, yang dapat dikontrol sepenuhnya artinya dapat dihidupkan dan dimatikan secara bergantian berbeda dengan prinsip kerja thyristor yang digunakan dalam konverter LCC. Selain itu, dalam VSC daya aktif dan reaktif dapat dikontrol secara mandiri sehingga tidak diperlukan kompensasi daya reaktif. (Araujo, 2016)



Gambar 6 Sistem transmisi VSC HVDC *point to point* (Sumber: Song, 2018)

Selain itu, pada VSC konverter pembalikan aliran daya dilakukan dengan pembalikan arus, sebaliknya pada konverter LCC, yang polaritas tegangannya dibalik, sehingga membuatnya lebih cocok untuk aplikasi jaringan DC. Selain itu, karena tegangan AC memiliki kandungan harmonik yang rendah, maka kebutuhan akan filter sangat kurang atau bahkan dapat dihilangkan. (Hertem, Gomis-Bellmunt, & Liang., 2016)

Faktor lain yang membuat konverter VSC lebih menarik adalah kemampuan black start. Jika terjadi pemadaman listrik, konverter VSC dapat menuntun pemulihan jaringan (asalkan kapasitornya bermuatan dan dapat berfungsi sebagai sumber tegangan) karena tidak bergantung pada jaringan AC untuk bekerja, dan tidak memerlukan catu daya eksternal.

Di sisi lain, salah satu kelemahan utama konverter VSC adalah kerugiannya. Awalnya, kerugian pada konverter VSC pertama dilaporkan sebesar 3% dari daya yang dikonversi untuk desain pertama. Saat ini, konverter multi-level modular modern mencapai kerugian kurang dari 1% per konverter. (Grid, Stafford, & Davidson., 2013)

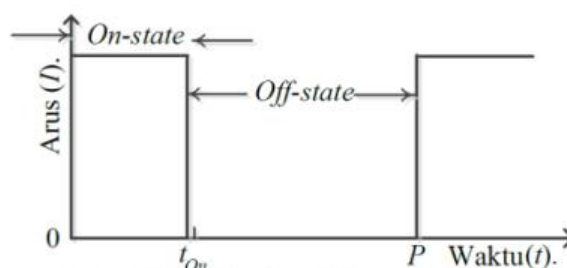


verter Daya dan Karakteristiknya

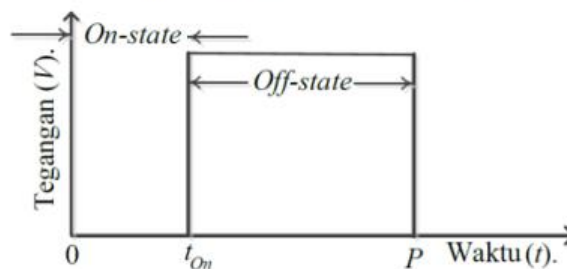
apat bersifat induktif (seperti motor dan solenoida), resistif (seperti dan filamen lampu), atau kapasitif (seperti transduser dan indikator).

Umumnya, daya ke beban dikontrol dengan mengalihkan perangkat secara berkala untuk menghasilkan pulsa arus yang mengalir melalui perangkat.

Bentuk gelombang arus dan tegangan ditunjukkan pada Gambar 7. Dalam operasi "on-state" ketika perangkat diberi daya, tegangan tidak boleh turun. Selain itu, dalam operasi "off-state", di mana perangkat mempunyai tegangan, tidak ada arus yang mengalir melalui perangkat. Perangkat yang ideal juga harus dapat beralih di antara dua keadaan tanpa menghabiskan daya. Hal ini memerlukan perubahan tegangan dan arus seketika selama proses peralihan peralihan. (Ginarsa, Nrrartha, & Muljono, 2020)



(a). Bentuk-gelombang ideal untuk arus.



(b). Bentuk-gelombang ideal untuk tegangan.

Gambar 7 Gelombang switching untuk saklar daya ideal (Sumber: Ginarsa,2020)

Dari perspektif sejarah, perangkat semikonduktor daya telah memainkan peran yang semakin penting dalam pengembangan sistem elektronika daya selama 50 tahun terakhir. Dengan diperkenalkannya power thyristor pada tahun 1950-an, thyatron digantikan oleh *power conditioning*. Jumlah *power thyristor* telah meningkat selama bertahun-tahun karena permintaan akan perangkat yang dapat menangani tingkat daya yang lebih tinggi. Sangat mengesankan bahwa perangkat dengan tegangan balik melebihi 6 kV tersedia secara komersial dan dapat puluhan Ampere.



Transistor daya bipolar dikembangkan untuk mengatasi masalah frekuensi thyristor yang relatif lambat. Pada tahun 1960an, perangkat berkapasitas

tinggi dikembangkan untuk aplikasi transmisi daya menengah. Perangkat ini mampu beroperasi pada frekuensi hingga 50 kHz. Tegangan balik dari perangkat ini diperluas menjadi 1200 Volt untuk rangkaian defleksi TV, sedangkan perangkat dengan kemampuan penanganan arus yang lebih tinggi memiliki tegangan tembus sekitar 500 Volt untuk kontrol motor.

Pada tahun 1970-an, industri semikonduktor daya mengadopsi teknologi semikonduktor oksida logam (MOS) yang dikembangkan untuk sirkuit terpadu. ini mengarah pada pengenalan Transistor Efek Medan MOS Daya (*Metal-oxide-semiconductor Field effect Transistor*, MOSFET).

MOSFET ini memiliki kemampuan switching yang jauh lebih cepat dan sistem kendali yang lebih sederhana. Perangkat ini dilengkapi transistor bipolar pengganti dalam sistem pengaturan arus rendah yang beroperasi pada frekuensi lebih besar dari 10 kHz dan memiliki tegangan pemblokiran kurang dari 200 Volt. Contoh aplikasi MOSFET termasuk catu daya dan periferal komputer. Meskipun perangkat MOSFET ini pada awalnya diharapkan berdampak pada area pengkondisian daya menengah, tetapi belum bisa diwujudkan karena kemampuan penanganan daya MOSFET saat ini belum bagus ketika dirancang untuk beroperasi pada tegangan yang lebih tinggi (di atas 300 Volt).

Kemajuan lebih lanjut dalam kemampuan perangkat semikonduktor daya terjadi pada era 1980-an oleh pengenalan transistor bipolar gerbang terisolasi (*insulated gate bipolar transistor*, IGBT) secara komersial.

Perangkat IGBT memiliki impedansi input tinggi seperti MOSFET daya dan kemampuan penanganan arus tinggi seperti perangkat bipolar dengan konstruksi terintegrasi. Performa alat ini mampu menangani tegangan melebihi 1500 Volt dan arus ratusan ampere. Contoh aplikasi IGBT ini termasuk pengontrol motor untuk pemanasan, ventilasi, dan pendingin udara, pengontrol numerik untuk robotika dan sistem otomasi pabrik, dan perangkat ini juga dipilih untuk *train drive* kendaraan listrik. (Ginarsa, Nrratha, & Muljono, 2020)



Tabel 2 Perbedaan teknologi konverter LCC dan VSC

Teknik	Tegangan Tembus (%)	Puncak Medan Listrik Permukaan (%)	Ukuran Perangkat	Tipe Perangkat
<i>Planer Junction</i>	50	80	<i>Small (<100 mils)</i>	BJT, MOSFET
<i>Planer Junction With Field Ring</i>	80	80	<i>Medium (<1 inch)</i>	BJT, MOSFET, SCR, GTO, IGBT, MCT
<i>Planer Junction With Field Plate</i>	60	80	<i>Medium (<1 inch)</i>	BJT, MOSFET, IGBT, MCT
<i>Positive Bevel</i>	100	50	<i>Large (>1 inch)</i>	Rectifier, SCR, GTO, MCT
<i>Negative Bevel</i>	90	60	<i>Large (>1 inch)</i>	SCR, GTO, MCT
<i>Double Positive Bevel</i>	100	80	<i>Large (>1 inch)</i>	SCR, GTO, MCT
<i>Surface Ion Implanted Edge</i>	95	80	<i>All</i>	BJT, MOSFET, SCR, GTO, IGBT, MCT

Sumber: Ginarsa, 2020

2.10 Inverter Daya dan Karakteristiknya

Inverter adalah konverter DC-ke-AC yang menggunakan perangkat switching semikonduktor untuk mentransfer parameter energi listrik (yaitu tegangan, arus, dan/atau frekuensi) pada nilai yang diinginkan. Dua tingkat inverter diperkenalkan pertama kali. Namun peningkatan signifikan dalam aplikasi yang memerlukan konversi DC-AC telah memicu penelitian tentang teknologi Inverter lebih mendalam lagi.

Namun, inverter dua tingkat menjadi kurang efisien untuk sebagian besar aplikasi karena tingginya *Total Harmonic Distortion* (THD) pada bentuk gelombang keluaran, rugi-rugi *switching*, dan adanya sifat keterbatasannya untuk tegangan tingkat menengah karena tegangan dv/dt pada saklar luktur.



Tabel 3 Perbandingan *two-level* inverter dan *multilevel* inverter

No.	Two-level Inverter	Multilevel Inverter
1	Output waveform contains higher THD	Low THD in the output waveform
2	Larger switching stress	Low switching stress
3	It has limitations with high-voltage applications	It can be used for high-voltage applications
4	Cannot produce high voltages	It Can produce high voltages
5	Larger dv/dt	Low dv/dt
6	Increased switching losses due to higher switching frequency.	Reduced switching losses because of lower switching frequency.

Sumber: L. P. Suresh, 2016

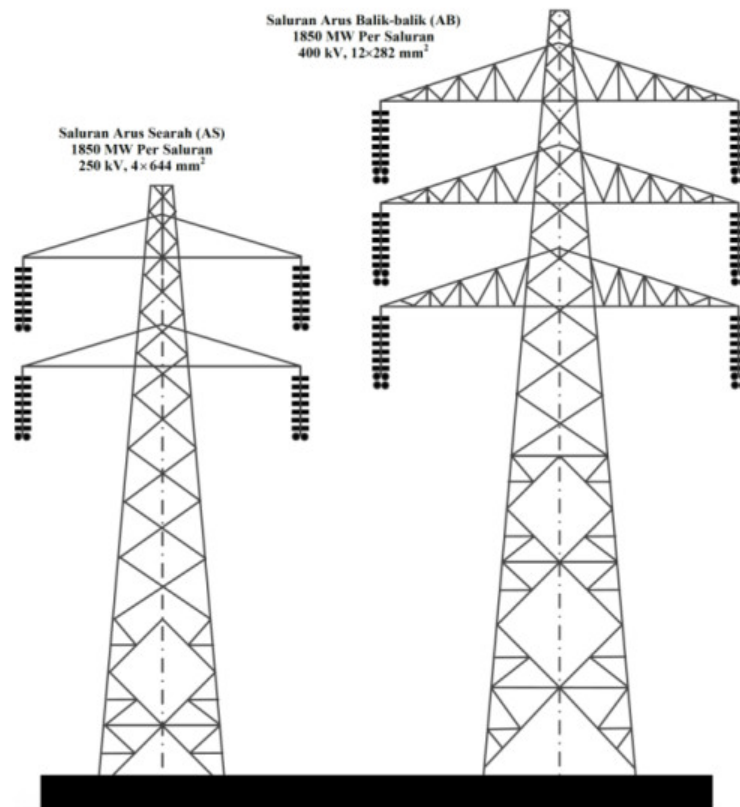
Untuk mengatasi masalah ini, frekuensi switching yang lebih tinggi digunakan dengan filter yang sesuai untuk mencapai bentuk gelombang sinusoidal keluaran yang optimal. Namun hal ini akan menimbulkan masalah *switching loss*. Inverter multilevel (MLI) digunakan untuk menghasilkan kinerja yang lebih baik menggunakan berbagai teknik untuk mengatasi keterbatasan inverter dua tingkat. Inverter multilevel (MLI) adalah versi yang ditingkatkan dari inverter dua tingkat yang menawarkan lebih banyak tingkat keluaran dalam bentuk gelombang arus dan tegangan sekaligus menurunkan rasio dv/dt dan di/dt. Tergantung pada jenis suplai, seperti inverter sumber arus (CSI) atau inverter sumber tegangan (VSIS), bentuk gelombang keluaran dihasilkan sebagai gelombang bertingkat arus atau tegangan.

2.11 Perbedaan Gejala Transmisi 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, mengakibatkan penurunan signifikan nilai beban yang dapat dibagi tanpa kan kabel.





Gambar 8 Struktur *tower* transmisi HVAC dan HVDC (Sumber: Ginarsa, 2020)

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 di tengah. Ini disebut efek kulit (*skin effect*). Oleh karena itu, penampang konduktor tidak dapat sepenuhnya dimanfaatkan dengan arus bolak-balik. Tidak ada efek kulit pada sistem DC. Untuk transmisi AC jarak jauh, kompensasi seri dan shunt harus dipasang. Saluran seperti itu memerlukan reaktor shunt untuk modasi daya kVAR pada beban ringan, sementara reaktor seri diperlukan bilas. Kabel DC tidak memerlukan kompensasi. (Kadir, 1998)



2.12 Gambaran Sistem Transmisi HVDC Sumatera-Jawa

Sistem kelistrikan Jawa-Bali dan Sumatera yang sekarang masih terpisah, direncanakan akan saling terhubung dalam satu jaringan interkoneksi. PLN tengah mengembangkan proyek interkoneksi Sumatera – Jawa melalui sistem transmisi HVDC. Dengan proyek ini maka ke depan akan dimungkinkan untuk menyalurkan energi listrik dari sejumlah pembangkit yang ada di Sumatera Selatan ke Jawa maupun dari pembangkit di Jawa ke Sumatera untuk memenuhi kebutuhan listrik di Sumatera maupun Jawa-Bali. Sistem interkoneksi yang akan dibangun, dirancang untuk mampu menyalurkan daya sebesar 3.000 MW dari Sumatera ke Jawa-Bali maupun sebaliknya.

Saat ini sedang dirintis pembangunan PLTU Mulut Tambang batubara berkalori rendah dengan kapasitas total 3.000 MW di kawasan pertambangan batubara Sumatera Selatan. Sementara ini, di Pulau Jawa juga tengah dibangun pembangkit dalam program Fast Track Program (FTP) – 1 serta pembangkit swasta berupa PLTU batubara dengan kapasitas diatas 10.000 MW yang akan memperkuat sistem Jawa (RUPTL 2012-2021). Pilihan proyek ini juga didorong oleh semakin sulitnya mendapatkan lokasi baru untuk membangun PLTU batubara skala besar di pulau Jawa.

Menurut skala ekonomi, sistem kelistrikan dengan pembangkit dan beban yang makin besar akan lebih efisien. Oleh karenanya penggabungan sistem kelistrikan di Jawa-Bali dengan kapasitas terpasang lebih dari 30.000 MW dengan sistem kelistrikan Sumatera dengan beban sekitar 5.000 MW akan berakibat pada peningkatan efektifitas penggunaan energi murah dengan skala ekonomi yang lebih efisien. Hal ini juga dimaksud untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik di Sumatera dan Jawa-Bali yang di masa mendatang akan terus meningkat seiring dengan semakin membaiknya pertumbuhan ekonomi di kedua pulau tersebut.

Secara umum pemilihan lokasi pembangkit diupayakan untuk memenuhi prinsip *regional balance*. *Regional balance* adalah situasi dimana kebutuhan listrik daerah dipenuhi sebagian besar oleh pembangkit yang berada pada daerah itu sendiri dan tidak banyak bergantung pada transfer daya dari daerah lain melalui transmisi interkoneksi. Dengan prinsip ini, kebutuhan transmisi



interkoneksi antar daerah akan minimal. Namun kebijakan regional balance ini tidak membatasi PLN dalam mengembangkan pembangkit di suatu daerah kemudian mengirim energinya ke pusat beban melalui transmisi, sepanjang hal tersebut layak secara teknis dan ekonomis. Hal ini tercermin dari adanya rencana untuk mengembangkan PLTU skala besar di Sumatera Selatan dan menyalurkan sebagian besar energi listriknya ke Pulau Jawa melalui transmisi HVDC. Situasi yang sama juga terjadi di sistem Sumatera, dimana sumber daya energi (batubara, panas bumi dan gas) lebih banyak tersedia di Sumbagsel, sehingga di wilayah ini banyak direncanakan PLTU batubara dan PLTP yang sebagian energinya akan ditransfer ke Sumbagut melalui sistem transmisi tegangan ekstra tinggi.

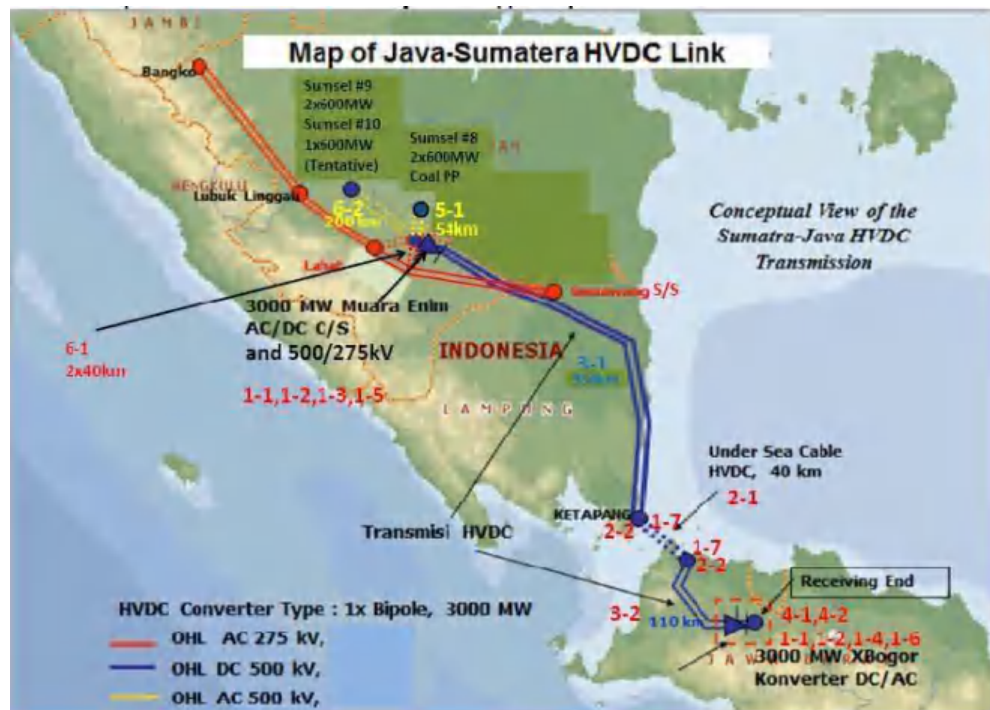
Pembangunan interkoneksi *point-to-point* jarak jauh, melalui laut dan berkapasitas besar memerlukan teknologi transmisi daya arus searah. Kebijakan PLN dalam memilih tegangan transmisi HVDC adalah mengadopsi tegangan yang banyak digunakan di negara lain, yaitu 500 kV DC dan 250 kV DC. Berbeda dengan teknologi HVAC yang mempunyai standar tegangan internasional dan nasional, teknologi HVDC tidak mempunyai standar tegangan. Pemilihan tegangan HVDC disesuaikan dengan kapasitas daya yang akan disalurkan dan kelas kabel (kabel laut) yang banyak digunakan di dunia, misalnya 500 kV DC (India, Kanada), 250 kV DC (Jepang, Swedia). (Ramananda, 2014)

Lingkup proyek transmisi sejauh kurang lebih 700 km itu akan meliputi pekerjaan:

- a) Stasiun konverter atau inverter di Kabupaten Muara Enim (Sumatera Selatan) & Kabupaten Bogor (Jawa Barat).
- b) Saluran transmisi kabel bawah laut 500 kV DC sepanjang 40 km dari Ketapang (Lampung) - Tanjung Pucut (Jawa Barat), yang melintasi Selat Sunda.



- c) Saluran transmisi udara 500 kV DC dari Muara Enim (Sumatera Selatan) ke Ketapang (Lampung) dan dari Tanjung Pucut (Jawa Barat) ke Bogor (Jawa Barat).



Gambar 9 Peta rencana transmisi HVDC Sumatera-Jawa (Sumber: PLN Pusat)

2.13 Keunggulan Sistem HVDC Dibandingkan HVAC

Penggunaan trafo dalam transmisi daya pada awal abad ke-20 menjadikan sistem AC memenangkan pertarungan dalam perdebatan pemilihan tipe arus antara AC maupun DC, sehingga transmisi daya AC adalah metode transmisi daya yang paling disukai. (Rebled Lluich, 2017)

Sistem DC sebagian besar telah berpindah selama bertahun-tahun ke bidang lain seperti elektronik dan beberapa proses industri kimia. Namun, sejak tahun 1970 an, arus searah dipandang sebagai metode pembangkit listrik yang menarik dan mampu menyediakan listrik dalam jumlah besar. Sistem AC mempunyai beberapa kelemahan terkait daya reaktif kapasitif dan dampaknya terhadap kemampuan daya, terutama saat mentransmisikan daya dalam jumlah besar melalui jalur laut.

sem DC, sebaliknya, tidak menyediakan daya reaktif. Faktanya, karena daya reaktif bergantung pada frekuensi, efek kapasitif dan induktif adalah hasil dari



fluktuasi tegangan dan arus sinusoidal. Ketika tegangan dan arus tidak berosilasi (yaitu ketika frekuensi nol), efek induktansi saluran dan kapasitansi saluran keadaan tunak adalah nol. Oleh karena itu, karena tidak adanya efek induktif dan kapasitif, sistem DC hanya dibatasi oleh rugi-rugi resistif.

Hal ini menghilangkan kebutuhan untuk mengkompensasi daya reaktif yang dihasilkan oleh kabel, sehingga mengurangi biaya sistem transmisi. Sebaliknya, tidak adanya daya reaktif meningkatkan stabilitas sistem dan memungkinkan transfer energi yang sangat cepat melalui transmisi DC jarak jauh.

Selain itu, karena efek kulit konduktor melekat pada sistem AC, namun tidak pada sistem DC. Oleh karena itu, untuk dua sistem yang setara, resistansi saluran AC lebih tinggi daripada DC, hal ini dikarenakan rugi-rugi resistansi (ohmik) pada saluran DC lebih rendah. Faktanya, ini sama halnya dengan mengatakan bahwa untuk penampang yang setara antara AC dan DC penggunaannya lebih rendah pada DC, sehingga mengurangi biaya kabel. (Oni, Mbangula, & Davidson, 2016)

2.14 Efisiensi Daya Listrik

Efisiensi daya listrik adalah upaya yang dapat dilakukan dalam mengurangi rugi-rugi daya listrik yang biasa terjadi pada saluran transmisi. Efisiensi adalah ketepatan cara (usaha, kerja) dalam menjalankan sesuatu dengan tidak membuang waktu, tenaga dan biaya. Efisiensi juga berarti rasio antara input dan output atau biaya dan keuntungan. Dalam hal ini adalah rasio daya masukan dan daya keluaran pada saat proses transmisi hingga pada distribusi.

Efisiensi daya didefinisikan sebagai rasio daya keluaran dibagi dengan daya masukan:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (8)$$

η adalah efisiensi dalam persen (%).

P_{in} adalah konsumsi daya input dalam watt (W).

P_{out} adalah daya keluaran atau pekerjaan aktual dalam watt (W).



tlab Simulink

(pendekatan dari *Matrix Laboratory*) adalah bahasa pemrograman khusus hitungan 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.

