



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**PERENCANAAN SPESIFIKASI PERALATAN DAN
BACKBONE TRANSMISI HVDC 500 KV SISTEM
INTEGRASI KALIMANTAN BERDASARKAN HASIL
PERHITUNGAN ARUS HUBUNG SINGKAT**

Marta Nur Alfian
NRP 07111440000062

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D
Danar Fahmi, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TE 141599

**PERENCANAAN SPESIFIKASI PERALATAN DAN
BACKBONE TRANSMISI HVDC 500 KV SISTEM
INTEGRASI KALIMANTAN BERDASARKAN HASIL
PERHITUNGAN ARUS HUBUNG SINGKAT**

Marta Nur Alfian
NRP 0711144000062

Dosen Pembimbing
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D
Danar Fahmi, S.T., M.T.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

**PLAN OF APPARATUS SPESIFICATIONS AND
BACKBONE 500 KV HVDC TRANSMISSION
KALIMANTAN INTEGRATION SYSTEM BASED ON
SHORT CIRCUIT CURRENT CALCULATION**

Marta Nur Alfian
NRP 07111440000062

Supervisors
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D
Daniar Fahmi, S.T., M.T.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul “**PERENCANAAN SPESIFIKASI PERALATAN DAN BACKBONE TRANSMISI HVDC 500 KV SISTEM INTEGRASI KALIMANTAN BERDASARKAN HASIL PERHITUNGAN ARUS HUBUNG SINGKAT**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2018

Marta Nur Alfian
0711144000062

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERENCANAAN SPESIFIKASI PERALATAN DAN BACKBONE
TRANSMISI HVDC 500 KV SISTEM INTEGRASI
KALIMANTAN BERDASARKAN HASIL PERHITUNGAN ARUS
HUBUNG SINGKAT

TUGAS AKHIR

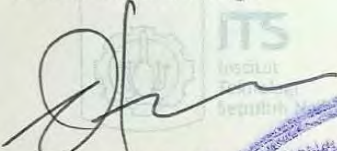
Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada


Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember


Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D
NIP. 198109052005011002


Daniar Fahmi, ST., MT.
NIP. 198909252014041002


SURABAYA
JULI, 2018

Perencanaan Spesifikasi Peralatan dan Backbone Transmisi HVDC 500 KV Sistem Integrasi Kalimantan Berdasarkan Hasil Perhitungan Arus Hubung Singkat

Nama : Marta Nur Alfian
Pembimbing I : Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Pembimbing II : Daniar Fahmi, ST., MT

ABSTRAK

Keandalan suatu sistem transmisi dipengaruhi oleh performa dari peralatan dan spesifikasinya. Pada sistem transmisi HVDC, peralatan yang penting seperti trafo konverter, *thyristor valves*, *smoothing reactor*, suplai daya reaktif dan HVDC *disconnector* harus ditentukan spesifikasinya dengan tepat sesuai sistem agar sistem transmisi HVDC bisa tetap stabil. Namun, peralatan lain yang ada di sistem transmisi seperti pemutus daya, *surge arrester*, *busbar*, konduktor dan isolator sangat berperan penting dalam penyaluran daya dan perlindungan sistem transmisi HVDC. Jumlah dan spesifikasi peralatan tersebut ditentukan sesuai dengan tipe saluran yang digunakan dalam sistem transmisi HVDC. Tipe saluran yang digunakan pada studi ini adalah tipe monopolar. Sedangkan pemilihan tipe saluran dan permodelan sistem transmisi HVDC harus dipertimbangkan sesuai dengan tujuan pembuatan sistem transmisi HVDC tersebut.

Studi ini bertujuan untuk merencanakan spesifikasi peralatan dari sistem transmisi HVDC 500 kV Kalimantan. Penentuan spesifikasi didasarkan dari data simulasi aliran daya dan simulasi hubung singkat. Didapatkan arus hubung singkat sebesar 45 kA pada sisi AC dan 140 kA pada sisi DC, maka *circuit breaker* yang dipakai adalah dengan rating 63 kA pada sisi AC dan 170 kA pada sisi DC. Trafo konverter, *thyristor valves*, *smoothing reactor* dan HVDC *disonnector* ditentukan berdasarkan level tegangan sistem dan arus nominal pada sistem. Untuk konduktor dan *busbar* ditentukan berdasarkan arus nominalnya. Sedangkan *surge arrester* dan isolator ditentukan berdasarkan level tegangannya.

Kata kunci : Transmisi HVDC, Spesifikasi Peralatan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Plan of Apparatus Specifications and Backbone 500 kV HVDC Transmission Kalimantan Integration System Based On Short Circuit Current Calculation

Student Name : Marta Nur Alfian
Supervisor I : Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D.
Supervisor II : Daniar Fahmi, ST., MT

ABSTRACT

The reliability of a transmission system is influenced by the performance of the equipment and its specifications. In HVDC transmission systems, critical equipment such as converter transformers, thyristor valves, smoothing reactors, reactive power supplies, and HVDC disconnector shall be specified precisely according to the system in order for the HVDC transmission system to remain stable. However, other equipment in transmission systems such as circuit breakers, surge arresters, busbars, conductors, and insulators play an important role in power transfer and protection of HVDC transmission systems. The number and specifications of the equipment are determined according to the type of line used in the HVDC transmission system. The type of line used in this study is a monopolar type. While selecting the line type and modeling of the HVDC transmission system should be considered in accordance with the purpose of making the HVDC transmission system.

This study aims to plan the equipment specifications of the HVDC 500 kV transmission Kalimantan system. Determination of specification is based on simulation data of power flow and short circuit simulation. There is a short circuit current of 45 kA on the AC side and 140 kA on the DC side, then the circuit breaker used is rated 63 kA on the AC side and 170 kA on the DC side. The converter transformer, thyristor valves, smoothing reactor and HVDC disconnector are determined based on the system voltage level and nominal current on the system. For the conductor and busbar is determined based on nominal current. While surge arrester and isolator is determined based on its voltage level.

Key Word: *HVDC Transmission, Equipment Specifications*

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala Rahmat, Karunia, dan Petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **“Perencanaan Spesifikasi Peralatan dan Backbone Transmisi HVDC 500 KV Sistem Integrasi Kalimantan Berdasarkan Hasil Perhitungan Arus Hubung Singkat”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia dan petunjuk-Nya.
2. Ibu dan Bapak penulis atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surgaNya.
3. Bapak Dimas Anton Asfani, ST., MT., Ph.D. dan Daniar Fahmi, ST., MT selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
5. Teman-teman seperjuangan e54 yang telah menemani dan memberikan dukungan selama masa kuliah sampai penyusunan tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa penulisan Tugas Akhir ini jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat diharapkan untuk perbaikan dan pengembangan Tugas Akhir ini. Semoga Tugas akhir ini bermanfaat bagi pembaca. Mohon maaf yang sebesar-besarnya apabila ada kesalahan yang dapat menyinggung pembaca. Saya ucapkan sekian dan terima kasih.

Surabaya, Juni 2018

Penulis

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	4
BAB II KAJIAN PUSTAKA	7
2.1 Kajian Penelitian Terkait	7
2.2 Transmisi Arus Searah	7
2.3 Klasifikasi Saluran Transmisi Arus Searah	8
2.3.1 Sistem Monopolar	8
2.3.2 Sistem Bipolar	8
2.3.3 Sistem Homopolar	9
2.3.4 <i>Back to back</i> HVDC	10
2.3.5 Sistem Multiterminal	11
2.4 Peralatan Utama Sistem Transmisi Arus Searah	12
2.4.1 Trafo Konverter	12
2.4.2 <i>Thyristor Valves</i>	13
2.4.3 <i>Smoothing Reactor</i>	14
2.4.4 Suplai Daya Reaktif	15
2.4.5 HVDC <i>Disconnecter</i>	16
2.5 Peralatan Transmisi dan Gardu Induk	16
2.5.1 Pemutus Daya	16
2.5.2 <i>Surge Arrester</i>	17
2.5.3 <i>Busbar</i>	18
2.5.4 Konduktor	18
2.5.5 Isolator	20
BAB III Perancangan dan Simulasi Sistem	23
3.1 Sistem Kelistrikan Kalimantan	23
3.2 <i>Backbone</i> Transmisi HVDC 500 kV Kalimantan	26

3.2.1	Perancangan <i>Single Line Diagram</i> Sistem Backbone Transmisi HVDC 500 kV	28
3.3	Simulasi Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV HVDC	31
3.3.1	Simulasi Aliran Daya	32
3.3.2	Simulasi Hubung Singkat	34
BAB IV	Perencanaan Spesifikasi Peralatan	37
4.1	Trafo Konverter	37
4.2	<i>Thyristor Valves</i>	38
4.3	<i>Smoothing Reactor</i>	39
4.4	Suplai Daya Reaktif	40
4.5	HVDC <i>Disconnecter</i>	41
4.6	Pemutus Daya	42
4.6.1	<i>Circuit Breaker</i> dengan Level Tegangan 345 kV AC.....	42
4.6.2	<i>Circuit Breaker</i> dengan Level Tegangan 230 kV AC.....	44
4.6.3	<i>Circuit Breaker</i> dengan Level Tegangan 500 kV HVDC	45
4.7	<i>Surge Arrester</i>	46
4.7.1	Surge Arrester dengan Level Tegangan 345 kV.....	48
4.7.2	Surge Arrester dengan Level Tegangan 230 kV.....	49
4.7.3	Surge Arrester dengan Level Tegangan 250 kV.....	49
4.7.4	Surge Arrester dengan Level Tegangan 500 kV.....	50
4.8	<i>Busbar</i>	50
4.9	Konduktor.....	51
4.9	Isolator.....	52
4.10	Bill of Quantity	53
BAB V	PENUTUP	59
5.1	Kesimpulan.....	59
5.2	Saran.....	60
	DAFTAR PUSTAKA	61
	BIODATA PENULIS	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Monopolar	8
Gambar 2.2 Sistem Bipolar	9
Gambar 2.3 Sistem Homopolar	10
Gambar 2.4 Sistem Back to Back HVDC	10
Gambar 2.5 Sistem Diagram Multiterminal Paralel Radial	11
Gambar 2.6 Sistem Diagram Multiterminal Paralel Mesh	11
Gambar 2.7 Sistem Diagram Multiterminal Seri	12
Gambar 2.8 Converter Transformer	13
Gambar 2.9 Thyristor dan Modul Thyristor	14
Gambar 2.10 Oil Insulated & Air Insulated reactor	15
Gambar 2.11 Bentuk Penampang Konduktor Kawat Telanjang	19
Gambar 2.12 Penampang Kabel Tegangan Tinggi	20
Gambar 3.1 Peta Kelistrikan Kalimantan Timur	23
Gambar 3.2 Peta Kelistrikan Kalimantan Selatan	24
Gambar 3.3 Peta Kelistrikan Kalimantan Tengah	25
Gambar 3.4 Peta Kelistrikan Kalimantan Barat	25
Gambar 3.5 Sketsa Diagram Backbone HVDC 500 kV	26
Gambar 3.6 Peta Backbone Transmisi HVDC 500 kV Kalimantan	27
Gambar 3.7 Single Line Diagram Backbone HVDC Kalimantan	28
Gambar 3.8 Single Line Diagram Samarinda-Banjarmasin	29
Gambar 3.9 Single Line Diagram Samarinda-Banjarmasin	29
Gambar 3.10 Nilai Filter AC dari Cigre [4]	31
Gambar 3.11 Aliran Daya pada Converter Station Samarinda	32
Gambar 3.12 Aliran Daya pada Converter Station Banjarmasin	33
Gambar 3.13 Aliran Daya pada Converter Station Pontianak	33
Gambar 3.14 Simulasi Hubung Singkat pada Bus HVDC 500 kV	35
Gambar 4.1 Sistem Diagram Transmisi HVDC 500 kV	37
Gambar 4.2 HVDC Disconnecter tipe Center Break	42
Gambar 4.3 ABB dead tank circuit breaker tipe PMI-B	43
Gambar 4.4 Siemens 3AP1 dead tank circuit breaker	45
Gambar 4.5 Siemens 3AP2 circuit breaker	46
Gambar 4.6 Penempatan Surge Arrester pada Converter Station	47
Gambar 4.7 Surge Arrester Siemens Type 3EL3	48
Gambar 4.8 Isolator Changgong Model FXBZ-500/180-C	53

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Data Saluran Sistem Backbone Transmisi HVDC	27
Tabel 3.2 Data Rectifier pada Simulasi	30
Tabel 3.3 Data Inverter pada Simulasi	30
Tabel 3.4 Data Saluran Backbone Transmisi HVDC 500 kV	31
Tabel 3.5 Hasil Arus Hubung Singkat Bus AC	34
Tabel 3.6 Data Hasil Hubung Singkat pada Bus HVDC 500 kV	35
Tabel 4.1 Data yang Diperlukan untuk Menentukan Trafo Konverter ..	37
Tabel 4.2 Spesifikasi Thyristor Valves	39
Tabel 4.3 Spesifikasi Smoothing Reactor	39
Tabel 4.4 Data Hasil Perhitungan Daya Reaktif	41
Tabel 4.5 Spesifikasi HVDC Disconnecter tipe Center Break	42
Tabel 4.6 Data Arus Bus 345 kV AC	42
Tabel 4.7 Spesifikasi ABB dead tank circuit breaker tipe PMI-B.....	43
Tabel 4. 8 Data Arus Bus 230 kV AC.....	44
Tabel 4.9 Spesifikasi Siemens 3AP1 dead tank circuit breaker	44
Tabel 4.10 Data Arus Hubung Singkat Bus 5000 kV HVDC	45
Tabel 4.11 Spesifikasi Siemens 3AP2 circuit breaker	46
Tabel 4. 12 Spesifikasi Surge Arrester Siemens 3EL3 360-4 P.5.– K.2	48
Tabel 4.13 Spesifikasi Surge Arrester Siemens 3ELE 240-4P.4.J.2	49
Tabel 4.14 Spesifikasi Surge Arrester Siemens 3EL3 276–4P.5.– L.2 .	49
Tabel 4.15 Spesifikasi Surge Arrester Siemens 3EL3 468–4P.5.– K.4.	50
Tabel 4.16 Data Arus Nominal Sistem Transmisi 500 kV HVDC.....	511
Tabel 4.17 Spesifikasi Busbar	51
Tabel 4.18 Spesifikasi Konduktor ACSR Bobolink	52
Tabel 4.19 Spesifikasi Isolator Changgong Model FXBZ-500/180-C ..	52
Tabel 4.20 Jumlah Peralatan pada Converter Station Samarinda.....	54
Tabel 4.21 Jumlah Peralatan pada Converter Station Sisi Inverter Banjarmasin	55
Tabel 4.22 Jumlah Peralatan pada Converter Station Sisi Rectifier Banjarmasin	56
Tabel 4.23 Jumlah Peralatan pada Converter Station Pontianak	57

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan listrik yang semakin meningkat mendorong munculnya perencanaan sistem kelistrikan untuk memenuhinya. Hal ini juga terjadi di Kalimantan yang terkenal akan melimpahnya sumber daya alam. Semua kelompok pelanggan listrik Perusahaan Listrik Negara (PLN) yaitu kelompok rumah tangga, bisnis, publik, dan industri mengalami peningkatan yang signifikan. Total kebutuhan listrik dari semua kalangan pelanggan di Kalimantan diprediksi meningkat sebesar 10,1% dari tahun 2017 hingga tahun 2026 [1]. Peningkatan ini harus diperhatikan oleh Perusahaan Listrik Negara (PLN) untuk menyiapkan strategi kedepan sehingga kebutuhan listrik semua pelanggan dapat terpenuhi.

Dengan potensi sumber daya alam yang melimpah, energi primer di Kalimantan sangat mendukung untuk penambahan pembangkit. Kebutuhan listrik yang terus meningkat mengharuskan Perusahaan Listrik Negara (PLN) menambah pembangkit listrik untuk memenuhi kebutuhan listrik yang meningkat setiap tahunnya. Sesuai dengan adanya proyek 30 gigawatt dari pemerintah, Perusahaan Listrik Negara (PLN) akan menambahkan pembangkit di beberapa titik di Kalimantan. Tidak hanya di Kalimantan, seluruh daerah di Indonesia akan mengalami penambahan pembangkit sampai tahun 2026 sebesar 77.9 GW. Untuk regional Kalimantan, penambahan pembangkit direncanakan sebesar 6.9 GW yang tersebar di seluruh bagian pulau Kalimantan [1].

Penambahan pembangkit di Kalimantan ini memicu penambahan saluran transmisi juga. Hingga tahun 2026, pada seluruh daerah di Indonesia direncanakan akan menambah saluran transmisi sebesar 67.627 kms. Untuk saluran transmisi di Kalimantan sendiri akan mengalami penambahan sebesar 10,772 kms [1]. Salah satunya adalah perencanaan sistem transmisi HVDC yang terhubung dari Kalimantan Utara hingga Kalimantan Barat. Sistem transmisi HVDC ini menggunakan level tegangan 500 kV yang akan menghubungkan sistem yang telah ada di setiap provinsi Kalimantan. Kondisi sistem kelistrikan Kalimantan sekarang ini masih terdiri dari tiga sistem besar yaitu sistem kaltimra, kalselteng dan kalbar. Dengan adanya penambahan transmisi HVDC, sistem kelistrikan Kalimantan akan diintegrasikan menjadi satu kesatuan sistem yang besar dan handal.

Sistem transmisi HVDC ini memiliki kelebihan yaitu rugi-rugi daya yang ditimbulkan lebih kecil jika dibandingkan dengan sistem transmisi AC [2]. Untuk mendapatkan sistem transmisi HVDC yang baik, spesifikasi peralatan, saluran dan isolator pada sistem harus ditentukan dengan tepat. Oleh karena itu, dibutuhkan studi analisa hubung singkat untuk merencanakan spesifikasi peralatan, saluran dan isolator pada sistem transmisi.

Pada tugas akhir ini akan dilakukan analisa hubung singkat untuk merencanakan spesifikasi peralatan, saluran dan isolator pada sistem transmisi HVDC 500kV. Arus hubung singkat yang didapatkan dari hasil simulasi pada *digilent* akan menjadi bahan acuan untuk menentukan spesifikasi teknis saluran dan spesifikasi teknis peralatan seperti isolator dan konverter yang akan digunakan pada sistem transmisi HVDC ini.

1.2 Permasalahan

Perumusan masalah dari Tugas Akhir ini adalah spesifikasi teknis saluran, spesifikasi teknis isolator, dan spesifikasi teknis konverter pada *backbone* transmisi HVDC 500 kV Kalimantan. Spesifikasi peralatan dapat ditentukan dari hasil simulasi sistem yaitu simulasi aliran daya dan simulasi hubung singkat pada *software digilent*. Kemudian data yang diperoleh dari simulasi sistem baik itu aliran daya maupun hubung singkat dapat digunakan untuk menentukan level peralatan yang dibutuhkan pada transmisi HVDC 500 kV Kalimantan.

1.3 Tujuan

Tujuan penyusunan Tugas Akhir ini yaitu untuk,

1. Menentukan spesifikasi teknis saluran pada *backbone* transmisi Kalimantan HVDC 500 kv
2. Menentukan spesifikasi teknis isolator pada *backbone* transmisi Kalimantan HVDC 500 kv
3. Menentukan spesifikasi teknis konverter pada *backbone* transmisi Kalimantan HVDC 500 kv

1.4 Batasan Masalah

Dalam pengerjaan Tugas Akhir ini, Batasan masalah yang harus diperhatikan adalah sebagai berikut:

1. Pemilihan spesifikasi peralatan berdasarkan data yang diperoleh dari simulasi di *software digilent*.

2. Pemilihan teknis saluran adalah hanya pemilihan spesifikasi dari konduktor.
3. Nilai dari Filter AC tidak dihitung melainkan disesuaikan dengan *paper* yang telah ada.
4. Pemilihan spesifikasi peralatan dilihat dari sisi *electrical* tanpa mempertimbangkan biaya dan spesifikasi mekanik seperti ukuran, berat, tinggi dan hal yang lainnya.

1.5 Metodologi

Pada Tugas Akhir ini, Metodologi pertama yang dilakukan adalah studi literatur. Dalam tahap studi literatur ini dilakukan pengumpulan literatur dan referensi yang telah ada seperti buku, jurnal internasional maupun jurnal nasional, *datasheet*, artikel-artikel dari internet yang berhubungan dengan Tugas Akhir ini. Setelah terkumpul, langkah selanjutnya adalah mempelajari literatur dan referensi tersebut. Dari pembelajaran literatur dan referensi maka akan didapatkan materi seperti sistem transmisi HVDC, peralatan dan komponen utama penyusun sistem transmisi HVDC, dan peralatan-peralatan yang ada pada transmisi. Dalam tahap studi literatur ini, juga dilakukan pembelajaran *software* yang akan digunakan untuk simulasi sistem.

Metodologi yang kedua adalah perancangan sistem. Perancangan yang dimaksud adalah memodelkan sistem di *software* yang bertujuan untuk mendapatkan desain dan mekanisme yang optimal. *Software* yang digunakan adalah Digsilent Power Factory. Sistem transmisi HVDC dimodelkan dalam digsilent menjadi *Backbone* yang menghubungkan tiga sistem yaitu kaltimra, kalselteng dan kalbar.

Metodologi yang ketiga adalah simulasi sistem. Pada tahap ini, pomodelan sistem yang telah dirancang dilakukan simulasi menggunakan digsilent. Data-data yang telah ada dimasukkan pada sistem yang telah dirancang dan disimulasikan. Simulasi sistem yang dilakukan dalam tahap ini adalah simulasi aliran daya dan simulasi hubung singkat. Sebelum melakukan simulasi hubung singkat harus dilakukan simulasi aliran daya terlebih dahulu. Simulasi aliran daya ini bertujuan untuk mengetahui aliran daya di sistem dan transmisi sebagai syarat untuk melakukan simulasi hubung singkat. Melalui simulasi dapat diketahui nilai aliran daya pada sistem dan nilai arus hubung singkat sistem yang dapat digunakan untuk penentuan spesifikasi peralatan.

Metodologi yang ketiga adalah penentuan spesifikasi peralatan. Setelah simulasi selesai dijalankan dan telah mendapatkan data dari aliran

daya dan hubung singkat, maka data tersebut digunakan untuk menentukan spesifikasi peralatan. Peralatan yang dipilih adalah peralatan yang efektif dan efisien untuk sistem transmisi HVDC berdasarkan data dari aliran daya dan hubung singkat.

Metodologi yang terakhir adalah penarikan kesimpulan. Dari hasil penentuan spesifikasi peralatan berdasarkan data aliran daya dan hubung singkat dapat diambil kesimpulan. Kesimpulan yang didapat mencakup semua proses pengerjaan Tugas Akhir yang dimulai dari dasar teori, hasil simulasi sistem dan hasil penentuan spesifikasi peralatan yang diperoleh. Semua hasil yang dikerjakan akan dilaporkan dalam bentuk buku Tugas Akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada Tugas Akhir ini terdiri dari lima bab yang diurutkan secara sistematis. Bab yang pertama adalah pendahuluan. Pada bab ini mengenai tentang penjelasan latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi yang dilakukan dalam Tugas Akhir ini.

Bab kedua adalah kajian pustaka, yang berisi tentang dasar teori yang berasal dari studi literatur yang menjadi landasan teori pada Tugas Akhir ini. Bab ini berisi tentang penjelasan dari sistem transmisi HVDC dan peralatan pada transmisi HVDC.

Bab yang ketiga adalah perancangan dan simulasi, yang berisi tentang sistem transmisi yang telah dirancang dengan digisilent. Selain itu, bab ini berisi tentang analisa aliran daya dan analisa hubung singkat dari sistem transmisi HVDC yang telah dibuat.

Bab keempat adalah perencanaan spesifikasi peralatan. Bab ini berisi hasil simulasi dan hasil dari penentuan spesifikasi peralatan yang dilengkapi dengan pertimbangan pemilihan dari peralatan tersebut.

Bab yang kelima adalah penutup. Bab ini berisi tentang kesimpulan yang didapatkan dari proses perancangan dan simulasi sampai penentuan spesifikasi peralatan pada transmisi HVDC. Pada bab ini juga terdapat saran-saran untuk perancangan sistem transmisi HVDC yang lebih efisien sehingga didapatkan sistem transmisi HVDC yang lebih baik lagi.

1.7 Relevansi

Hasil yang didapatkan dari Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat yaitu sebagai referensi untuk peneliti selanjutnya

yang berkaitan dengan perencanaan spesifikasi peralatan dan transmisi HVDC. Selain itu, dapat menjadi referensi bagi mahasiswa lain yang hendak mengambil topik yang sama sebagai Tugas Akhir.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Bahasan penelitian yang terkait dengan Tugas Akhir ini telah banyak dilakukan. Salah satunya adalah pemodelan transmisi HVDC pada Sumatra-Jawa dan dampaknya pada sistem yang telah ada [3]. Pada penelitian ini, dilakukan simulasi sistem Sumatra dan Jawa yang dihubungkan dengan sistem transmisi HVDC. Dilakukan beberapa kasus gangguan untuk mengetahui dampak pada sistem kelistrikan di Sumatra dan Jawa. Pemodelan transmisi HVDC harus dilakukan pertimbangan yang tepat agar rugi-rugi daya tidak besar dan sistem bisa tetap stabil.

Penelitian lain tentang transmisi HVDC adalah pemodelan sistem HVDC dari manufaktur CIGRE [4]. Dalam penelitian ini dilakukan di tiga *software* simulasi untuk mengetahui performa dari sistem HVDC tersebut. Untuk mendapatkan performa sistem HVDC yang optimal diperlukan sistem kontrol dari HVDC yang sesuai.

Namun, pada Tugas Akhir ini bahasan yang lebih difokuskan adalah pemodelan *backbone* transmisi HVDC dan perencanaan spesifikasi peralatan pada sistem transmisi HVDC. Spesifikasi peralatan diperoleh dari simulasi sistem HVDC yang dilakukan dari pemodelan backbone.

2.2 Transmisi Arus Searah

Transmisi arus searah atau sering disebut transmisi *high voltage direct current* (HVDC) adalah sistem transmisi menggunakan daya arus searah yang telah lama digunakan dalam sistem kelistrikan dan memiliki banyak keuntungan. Transmisi ini lebih menguntungkan jika digunakan dalam sistem transmisi bawah laut dan digunakan pada sistem AC yang memiliki frekuensi berbeda yang dapat menyebabkan ketidakstabilan sistem. Selain itu, transmisi HVDC sering digunakan pada transmisi *overhead line* yang menyalurkan daya yang besar dan jarak yang jauh. [5]

Sistem transmisi HVDC dapat mengontrol daya dengan baik yang berdampak besar bagi kestabilan sistem. Bagus tidaknya desain *control* dari sistem hvdc akan menentukan performa dari sistem tersebut. Jika dibandingkan dengan transmisi AC, transmisi HVDC memiliki *losses* yang lebih sedikit dan biayanya lebih murah [6]. Namun, transmisi

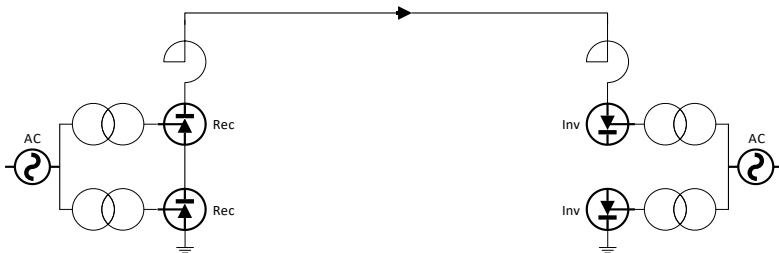
HVDC membutuhkan peralatan pada *converter station* yang dapat menambah banyak pengeluaran biaya dan rugi rugi dayanya.

Untuk menerapkan transmisi HVDC dalam sistem interkoneksi AC harus mempertimbangkan beberapa faktor penting seperti kabel atau konduktor yang dapat menyalurkan sesuai kapasitas daya dan arus charging serta transmisi HVDC harus dapat mengatur pembangkitan dan mengontrol dua sistem yang terhubung. Selain itu, transmisi HVDC harus mampu menahan gangguan pada sistem interkoneksi dan saluran transmisi harus mampu mensinkronkan dua sistem dalam keadaan operasi maksimum. [6]

2.3 Klasifikasi Saluran Transmisi Arus Searah

2.3.1 Sistem Monopolar

Sistem monopolar ini biasanya diaplikasikan pada transmisi yang sangat panjang seperti transmisi bawah laut atau bawah tanah.[7]. Terdapat dua jenis sistem monopolar yaitu sistem monopolar dengan *ground return* dan sistem monopolar dengan *metallic return*. [8]



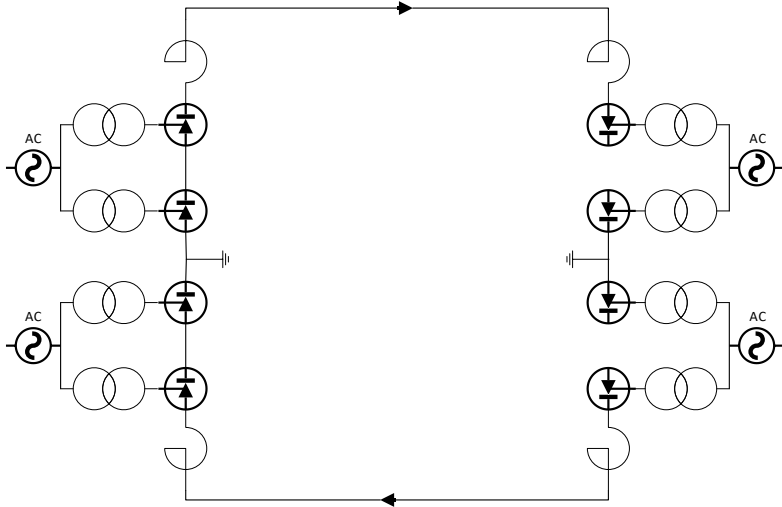
Gambar 2.1 Sistem Monopolar [8]

Gambar 2.1 merupakan rangkaian dari sistem monopolar. Konduktor pada sistem ini biasanya menggunakan satu konduktor dengan *polarity* negatif. Sistem ini dipakai karena pertimbangan biaya sebagai pertimbangan utamanya. Konfigurasi sistem monopolar ini dapat digunakan sebagai langkah awal untuk membuat sistem bipolar HVDC [5].

2.3.2 Sistem Bipolar

Pada sistem ini biasanya menggunakan dua konduktor dengan *polarity*nya positif dan negatif di setiap konduktor. Rangkaian sistem bipolar ini bisa dilihat pada gambar 2.2. Pada setiap konverternya

mempunyai nilai tegangan yang sama. Sistem bipolar ini mempunyai dua konverter yang dipasang seri. [5]

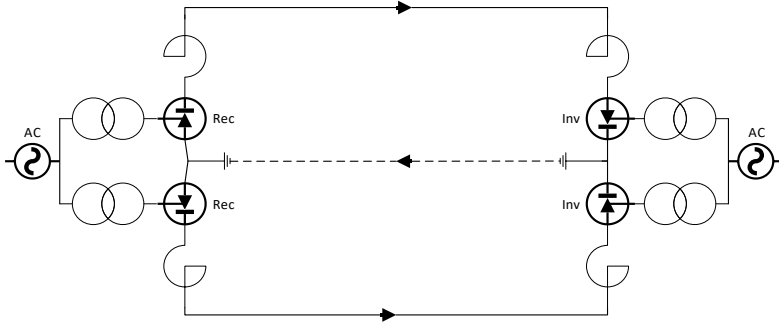


Gambar 2.2 Sistem Bipolar [8]

Sistem bipolar merupakan kombinasi dari dua skema sistem monopolar dengan *ground return*. Untuk fenomena *lightning performance*, sistem bipolar HVDC bisa dikatakan sama efektifnya dengan *double-circuit* pada sistem sistem AC.

2.3.3 Sistem Homopolar

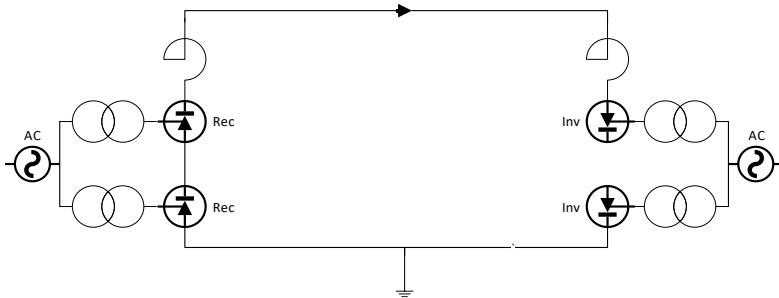
Sistem homopolar ini biasanya mempunyai dua konduktor atau lebih yang mempunyai *polarity* sama. *Polarity* negatif lebih banyak digunakan karena lebih sedikitnya intervensi radio yang disebabkan oleh korona [5]. Konfigurasi sistem homopolar dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Sistem Homopolar [5]

2.3.4 *Back to back* HVDC

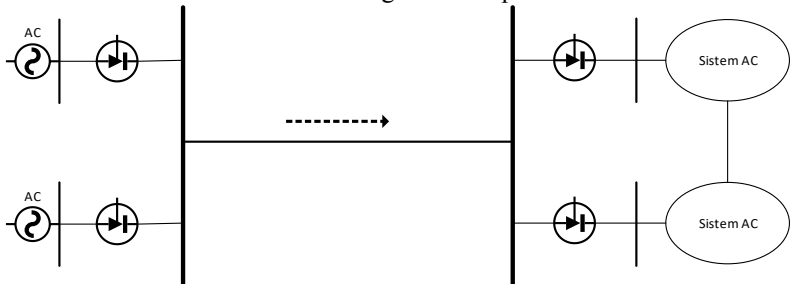
Sistem ini biasanya di gunakan untuk operasi monopolar atau bipolar yang memiliki jumlah *valve groups per pole* yang berbeda bergantung pada tujuan interkoneksi dan keandalan yang diinginkan [7]. Pada *back to back* HVDC, tegangan dari sisi DC biasanya memiliki rating rendah dan arus pada *thyristor valve* biasanya tinggi. Konfigurasi sistem *back to back* HVDC dapat dilihat pada gambar 2.4. Sistem *back to back* HVDC yang besar bisa terdiri dari dua atau lebih saluran independen sehingga saat satu konverter tidak bekerja ataur rusak maka akan kehilangan seluruh daya yang disalurkan.



Gambar 2.4 Sistem *Back to Back* HVDC [8]

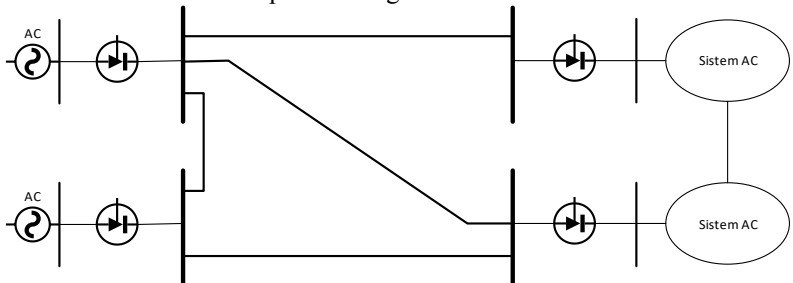
2.3.5 Sistem Multiterminal

Sistem ini biasanya digunakan saat sistem HVDC menghubungkan lebih dari dua sistem AC. Sistem multiterminal lebih banyak keuntungannya dalam segi ekonomi dan segi teknis dalam perkembangan teknologi HVDC. Terdapat dua skema koneksi dalam sistem multiterminal yaitu skema paralel dan skema seri. Gambar 2.5 adalah salah satu contoh multiterminal dengan skema paralel.



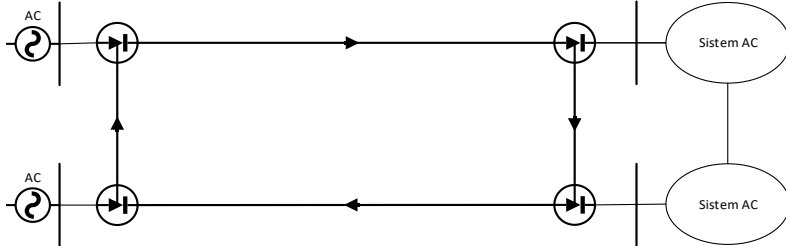
Gambar 2.5 Sistem Diagram Multiterminal Paralel Radial [5]

Dalam skema paralel, konverter terhubung secara paralel. Koneksi dari skema paralel ini bisa secara *radial* dan *mesh* [5]. Sistem multiterminal dengan skema paralel yang banyak diaplikasikan adalah skema paralel dengan koneksi tipe *radial*. Untuk koneksi *mesh* dibutuhkan jarak transmisi yang jauh untuk bisa diaplikasikan. Gambar 2.6 adalah multiterminal paralel dengan koneksi *mesh*.



Gambar 2.6 Sistem Diagram Multiterminal Paralel Mesh [5]

Dalam skema seri pada gambar 2.7, konverter dihubungkan secara seri dengan arus searah mengalir melewati seluruh terminal. Skema seri ini mempunyai kelebihan yaitu rugi rugi daya yang kecil, pengaturannya yang mudah dan lebih fleksibel untuk sistem masa depan. Sedangkan skema paralel mempunyai masalah yang sedikit dalam operasionalnya.



Gambar 2.7 Sistem Diagram Multiterminal Seri [5]

2.4 Peralatan Utama Sistem Transmisi Arus Searah

2.4.1 Trafo Konverter

Trafo konverter atau *converter transformer* terletak diantara bus AC dan converter pada sistem HVDC. Trafo ini berfungsi untuk mentransformasikan tegangan dari *busbar* sistem AC yang dibutuhkan oleh konverter sebagai tegangan *input* konverter [7].

Trafo konverter biasanya menggunakan tipe trafo fasa tunggal, dimana katup belitan koneksi bintang dan delta untuk konfigurasi satu inti setidaknya menggunakan dua anggota bagian utuh atau secara terpisah, sedangkan untuk dua inti setidaknya mempunyai satu anggota bagian utama tergantung pada daya dan tegangan sistem. Untuk kualitas lembaran inti, laminasi lembaran dan nominal induksi harus sesuai dengan persyaratan seperti rugi rugi, tingkat *noise* dan *over* eksitasi.

Paramater dari trafo converter biasanya ditentukan berdasarkan hal hal seperti rating daya, rasio trafo, tegangan hubung singkat, dan rugi rugi dari desain belitan. Gambar 2.8 merupakan salah satu contoh dari trafo konverter yang dibuat oleh siemens untuk trasnmisi HVDC di Tian Guang.



Gambar 2.8 Converter Transformer [7]

Untuk menentukan rating dari trafo konverter digunakan persamaan berikut [5].

$$S \text{ trafo Rectifier (6 pulse)} = \sqrt{2} \cdot I_{dn} \cdot V \text{ sec Rec} \quad (2.1)$$

$$S \text{ trafo Inverter (6 pulse)} = \sqrt{2} \cdot I_{dn} \cdot V \text{ sec Inv} \quad (2.2)$$

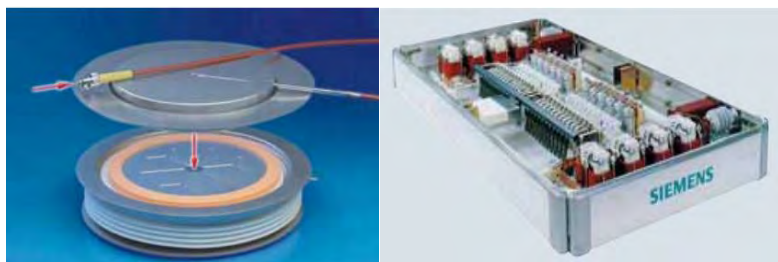
Keterangan :

- S trafo = Daya total trafo konverter (MVA)
- I_{dn} = Arus DC nominal
- V sec Rec = Tegangan trafo konverter sisi rectifier
- V sec Inv = Tegangan trafo konverter sisi inverter

2.4.2 Thyristor Valves

Pada sistem transmisi HVDC, *Thyristor* digunakan untuk *switch* dan katup (*valve*) menjadi pengontrolnya. *Thyristor* terbuat dari bahan *monocrystalline silicon* dengan tingkat kemurnian yang tinggi [7]. Parameter yang penting untuk perencanaan *thyristor* adalah arus hubung singkat. Hal ini ditentukan dari rasio antara nilai arus sisi DC dan reaktansi trafo.

Untuk mendapatkan performa terbaik dari *Thyristor* dalam sistem HVDC biasanya *Thyristor* yang digunakan memiliki karakteristik dengan diameter dari *silicon wafer* lebih dari 5" atau 125 mm. *Thyristor* tersebut bisa menahan tegangan lebih dari 8 kV dan kapasitas arusnya lebih dari 4 kA DC. Kumpulan jumlah *thyristor* yang dihubungkan seri akan menjadi dasar nilai tegangan system HVDC. Gambar 2.9 Merupakan contoh dari *silicon wafer thyristor* dan modul *thyristor valves* dari manufaktur siemens.



Gambar 2.9 *Thyristor dan Modul Thyristor* [7]

Teknologi terbaru untuk *thyristor* saat ini adalah *Light Triggered Thyristor* atau LTT. LTT ini dapat mengurangi jumlah komponen pada *thyristor valves* hingga 80%. Keuntungan dari teknologi ini adalah kemampuan dalam *starting* dan operasi saat sistem mengalami *undervoltage*.

2.4.3 *Smoothing Reactor*

Smoothing reactor adalah sebuah *reactor* yang mempunyai nilai induktansi yang tinggi. Fungsi dari *smoothing reactor* ini adalah untuk mengurangi tegangan harmonisa dan arus harmonisa pada sistem DC, mencegah kegagalan komutasi pada inverter, dan mencegah arus puncak pada rectifier ketika terjadi hubung singkat pada saluran DC [5].

Rating arus dan tegangan dari *smoothing reactor* dapat diperoleh berdasarkan dari data sistem HVDC. Besarnya nilai induktansi menentukan nilai dari *smoothing reactor* ini. Untuk transmisi HVDC yang panjang biasanya membutuhkan *smoothing reactor* dengan nilai dari 100 – 300 mH [7]. Sedangkan untuk *back to back* konverter, nilai *smoothing reactor* adalah antara 30 – 80 mH.



Gambar 2.10 *Oil Insulated & Air Insulated reactor [7]*

Secara umum terdapat dua tipe desain dari *smoothing reactor* yaitu *Oil insulated reactor* & *Air insulated reactor* yang bisa dilihat pada gambar 2.10. *Oil insulated reactor* lebih cocok diaplikasi di daerah yang tingkat *seismic* tinggi. Sedangkan *air insulated reactor* mempunyai keuntungan yaitu biaya pemeliharaan sedikit lebih murah [5].

2.4.4 Suplai Daya Reaktif

Pada sistem HVDC, daya reaktif dibutuhkan oleh konverter. Dalam kondisi *steady state* konverter menyerap daya reaktif sekitar setengah dari daya aktif yang disalurkan [5]. Namun dalam kondisi transient, sistem HVDC menyerap daya reaktif lebih besar dari keadaan normal yaitu lebih dari setengah. Sumber daya reaktif biasanya berupa kapasitor bank yang diletakkan dekat dengan konverter dan biasanya kapasitor yang di filter AC juga ikut memberikan daya reaktif yang dibutuhkan oleh konverter.

Untuk menghitung daya reaktif yang dibutuhkan digunakan persamaan berikut [5].

Tegangan no load DC

$$V_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} B.T.V_{ac} \quad (2.3)$$

Daya yang disalurkan

$$P_{dc} = V_d . I_d \quad (2.4)$$

Faktor Daya

$$\cos \emptyset = \frac{V_d}{V_{d0}} \quad (2.5)$$

Daya Reaktif

$$Q = P_{dc} \cdot \tan \emptyset \quad (2.6)$$

Keterangan :

- V_{d0} = Tegangan no load DC
- B = jumlah *bridge* pada *converter station*
- T = rasio trafo konverter
- V_{ac} = Tegangan sistem AC
- P_{dc} = Daya sistem DC
- V_d = Tegangan DC rata-rata
- I_d = Arus nominal
- Q = Daya Reaktif

2.4.5 HVDC *Disconnecter*

HVDC *Disconnecter* adalah pemisah yang dirancang khusus untuk sistem HVDC dan sangat berbeda dengan *disconnecting switch* pada sistem AC [9]. Peralatan ini berperan untuk menahan tegangan DC dan diketanahkan agar operator pada *converter station* bisa aman. Selain itu, HVDC *disconnecter* digunakan untuk memungkinkan konfigurasi tata letak yang tepat dan aman. Terdapat tiga tipe HVDC *disconnecter* yaitu *knee type disconnecter*, *center break disconnecter*, dan *vertical break disconnecter*.

2.5 Peralatan Transmisi dan Gardu Induk

Peralatan yang terpasang di *converter station* atau gardu induk terdapat banyak jenisnya dengan fungsi yang berbeda-beda. Peralatan-peralatan ini cukup krusial dan penting pada sistem transmisi baik transmisi HVDC atau transmisi AC.

2.5.1 Pemutus Daya

Pemutus daya atau sering disebut dengan *circuit breaker* adalah salah satu peralatan untuk keperluan proteksi pada sistem tenaga. Pemutus daya mempunyai beberapa fungsi, salah satunya untuk menutup suatu jaringan yang mengalami gangguan agar jaringan yang lain dapat

tetap beroperasi secara normal. Ketika terjadi gangguan, *circuit breaker* mempunyai peranan untuk memutuskan suatu jaringan agar sistem tetap stabil. Karena saat terjadi gangguan, generator akan menyuplai daya besar yang berdampak pada kestabilan sistem.

Ada beberapa syarat *circuit breaker* agar bekerja secara maksimal. Syarat pertama adalah *circuit breaker* harus mampu menyalurkan arus maksimum sistem secara terus menerus. Kedua yaitu *circuit breaker* harus mampu memutuskan dan menutup jaringan dalam keadaan berbeban atau tidak tanpa menimbulkan kerusakan pada *circuit breaker* tersebut. Selain itu, *circuit breaker* harus bias memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi agar arus hubung singkat tidak merusak peralatan, membuat sistem tidak stabil dan merusak *circuit breaker* itu sendiri.

Circuit breaker diklasifikasikan berdasarkan beberapa kategori. Jenis *circuit breaker* dibedakan berdasarkan tegangannya, yaitu *circuit breaker* tegangan rendah, tegangan medium dan tegangan tinggi. Sedangkan *circuit breaker* berdasarkan pemadaman busur api dibedakan menjadi lima jenis, yaitu *air circuit breaker*, *oil circuit breaker*, *air-blast circuit breaker*, dan *SF6 circuit breaker* [10]. Selanjutnya, *Circuit breaker* menurut desain eksternal dibagi menjadi dua, yaitu *circuit breaker dead tank* dan *circuit breaker live tank*.

Untuk memilih *circuit breaker* harus mempertimbangkan beberapa hal sesuai dengan sistem kerjanya. Hal yang perlu dipertimbangkan yaitu tegangan efektif tertinggi, frekuensi sistem, arus kontinu maksimum, arus hubung singkat maksimum, durasi maksimum dari hubung singkat, jarak bebas antara bagian bertegangan tinggi dengan objek lain. Hal lain yang perlu dipertimbangkan adalah kekuatan dielektrik bahan isolasi, iklim dan lokasi penempatan dari *circuit breaker*.

2.5.2 Surge Arrester

Surge Arrester atau alat pelindung tegangan lebih adalah suatu peralatan yang berfungsi melindungi peralatan lain saat terjadi lonjakan tegangan atau tegangan lebih. Pada keadaan tegangan sistem normal, surge arrester berfungsi sebagai isolasi atau tidak mengalirkan arus ke tanah [10]. Namun, ketika ada tegangan yang tinggi atau tegangan impuls pada terminal, maka surge arrester berubah fungsi menjadi peralatan yang menghantarkan dan mengalirkan arus impuls ke tanah. Sehingga tegangan

yang mengarah ke peralatan menjadi berkurang dan peralatan bisa terlindungi.

Ada beberapa jenis surge arrester yaitu *rod gap arrester*, *horn gap arrester*, *multi gap arrester*, *expulsion type lightning arrester* dan *valve type lightning arrester*. Sedangkan *surge arrester* berdasarkan penggunaannya dibagi menjadi tiga yaitu *surge arrester* jenis gardu, *surge arrester* jenis jaringan dan *surge arrester* jenis distribusi.

Penempatan lokasi surge arrester yang terbaik adalah ditempatkan pada tempat paling dekat dengan peralatan yang dilindungi. Hal ini bertujuan untuk mengurangi tegangan impuls merambat pada konduktor yang terhubung dengan peralatan yang dilindungi. Biasanya *surge arrester* ini dipasang paralel dengan peralatan yang ingin dilindunginya. Peralatan ini mengalirkan arus petir ke tanah sehingga harus diperhatikan pemasangannya agar *surge arrester* tidak mengalami kerusakan.

2.5.3 Busbar

Busbar atau bisa disebut dengan rel daya sering digunakan pada gardu induk dan panel. Peralatan ini mempunyai fungsi sebagai titik pertemuan atau hubungan antara trafo daya, saluran udara tegangan tinggi (SUTT), saluran kabel tegangan tinggi (SKTT) dan komponen listrik lainnya yang ada pada *switchyard*. *Busbar* pada gardu induk biasanya terbuat dari konduktor berbentuk kawat. Untuk *busbar* pada panel biasanya terbuat dari konduktor berbentuk batang. Ukuran dan tipe *busbar* dipilih sesuai sistem sehingga mampu menahan arus yang disalurkan [10].

Pada saat terjadi hubung singkat pada sistem, arus hubung singkat akan mengalir pada *busbar* dan busbar akan mengalami gaya elektromagnetik yang besarnya bergantung pada nilai arus hubung singkat dan jarak antar *busbar*. Karena hal ini, jarak antar *busbar* harus dirancang dengan tepat agar gaya yang diakibatkan arus hubung singkat tidak sampai merusak *busbar* dan isolatornya. [10] Pemilihan *busbar* harus dipilih secara ekonomis dan rasional dengan memperhatikan beberapa hal seperti probabilitas gangguan, pemeriksaan, pemeliharaan dan konstruksi tata ruang.

2.5.4 Konduktor

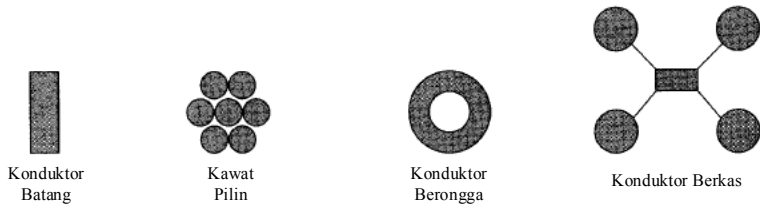
Konduktor merupakan salah satu peralatan utama dalam sistem tenaga yang berfungsi untuk menyalurkan arus yang menghubungkan peralatan dengan tegangan yang sama [10]. Peralatan ini sering

ditemukan pada sistem tenaga, seperti pada transmisi, gardu induk dan jaringan distribusi. Untuk bahannya, konduktor yang sering digunakan adalah tembaga dan aluminium.

Konduktor dibagi menjadi dua jenis berdasarkan jenis isolasi yang digunakan, yaitu konduktor kawat telanjang dan kabel atau konduktor yang berisolasi.

2.5.4.1 Konduktor Kawat Telanjang

Pada umumnya konduktor kawat telanjang menggunakan bahan seperti tembaga, aluminium dan aluminium campuran. Tipe konduktor diklasifikasikan menjadi empat, yaitu *All Aluminium Conductor (AAC)*, *All Aluminium Alloy Conductor (AAAC)*, *Aluminium Conductor Steel Reinforce (ACSR)* dan *Aluminium Conductor Alloy Reinforced (ACAR)*. Konduktor tipe-tipe ini umumnya digunakan pada transmisi [10].



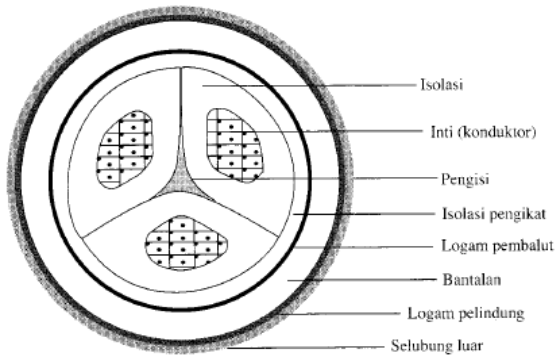
Gambar 2.11 Bentuk Penampang Konduktor Kawat Telanjang [10]

Berdasarkan bentuk penampangnya, konduktor kawat telanjang dibagi menjadi empat yaitu konduktor batang, kawat pilin, konduktor berongga dan konduktor berkas. Bentuk konduktor bisa dilihat pada gambar 2.11. Konduktor batangan digunakan pada bagian panel daya sedangkan kawat pilin digunakan pada jaringan transmisi dan distribusi. Untuk konduktor berongga dan konduktor berkas sering digunakan pada transmisi tahanan tinggi.

2.5.4.2 Kabel

Konduktor berisolasi atau sering disebut kabel harus memiliki bahan isolasi yang membuat konduktor ini fleksibel dan tetap memiliki kekuatan mekanis yang memadai.

Gambar 2.12 adalah gambar penampang kabel. Bagian utama dari kabel adalah inti (konduktor), bahan isolasi, bahan pengisi, bahan pengikat, bahan pelindung dan selubung pelindung luar.



Gambar 2.12 Penampang Kabel Tegangan Tinggi [10]

2.5.4.3 Pemilihan Konduktor

Pemilihan konduktor secara garis besarnya adalah ditinjau dari segi ekonomi dan segi teknis. Konduktor dari segi ekonomis dapat dipertimbangkan dengan melihat beberapa hal. Hal ekonomi yang menyangkut dengan konduktor adalah harga konduktor, harga energi terbuang dan biaya tahunan harus diperhitungkan.

Untuk dari segi teknisnya, ada beberapa hal yang harus diperhatikan seperti rugi rugi daya yang terjadi pada konduktor harus tidak lebih dari nilai yang diizinkan. Kemudian *drop* tegangan pada konduktor tidak lebih dari nilai yang diizinkan dan fenomena korona tidak terjadi di permukaan konduktor.

2.5.5 Isolator

Isolator adalah suatu peralatan yang berfungsi sebagai pemisah konduktor bertegangan tinggi dengan peralatan lain yang tidak mempunyai tegangan, contohnya konduktor transmisi dengan *tower* transmisi. Isolator biasanya terletak diantara konduktor dan *tower* transmisi, yang fungsinya untuk mencegah tegangan dan arus agar tidak merambat pada tower [10]. Zat pengisi isolator terdiri dari beberapa bahan seperti udara, SF₆, minyak, karet dan plastik.

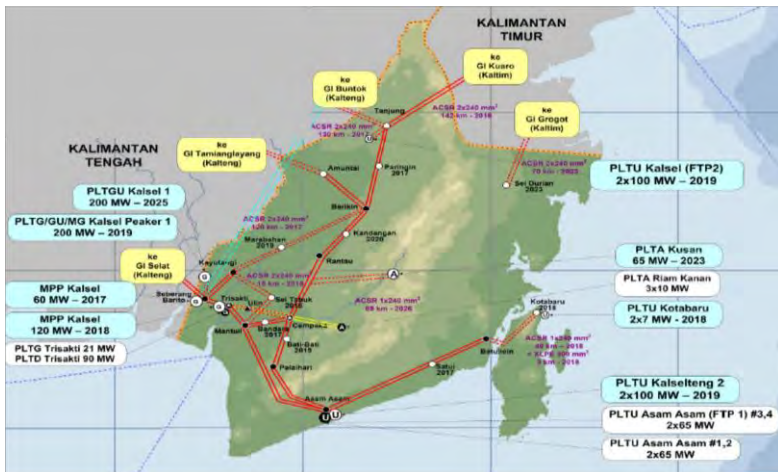
Isolator berdasarkan fungsinya dibagi menjadi isolator gantung dan isolator pendukung. Isolator gantung (*suspension*) terdiri dari dua jenis yaitu isolator piring dan isolator batang tonggak. *Suspension insulator* berupa isolator piring yang disusun seri dan banyak digunakan

pada gardu induk, saluran udara tegangan tinggi (SUTT) dan saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET). Sedangkan isolator pendukung terdiri dari tiga jenis yaitu isolator *pin*, isolator *post*, dan isolator *pin-post*. Isolator jenis *pin* biasanya digunakan pada saluran distribusi sedangkan isolator *post* sering digunakan sebagai penyangga *busbar* atau sakelar pemisah.

Terdapat tiga jenis dari bahan dielektrik isolator yang sering digunakan yaitu porselen, gelas dan bahan komposit. Bahan dielektrik porselen memiliki kekuatan dielektrik tinggi dan tidak dipengaruhi oleh kondisi sekitar. Sedangkan untuk isolator dengan bahan dielektrik gelas lebih murah daripada porselen. Bahan dielektrik gelas mempunyai karakteristik elektrik dan mekanis yang tidak jauh berbeda dengan porselen. Karakteristik bahan dielektrik gelas bergantung pada kandungan alkali yang ada pada gelas. Kedua bahan dielektrik porselen dan gelas ini mempunyai kelemahan yaitu mudah pecah, berat, dan polutan lebih mudah menempel sehingga kemampuannya menahan tegangannya berkurang. Untuk bahan dielektrik komposit biasanya terbuat dari kertas dan karet silikon. Bahan ini memiliki keuntungan seperti ringan, polutan tidak mudah menempel dan tekanan angin pada isolator lebih rendah.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

Pada sistem kelistrikan Kalimantan Selatan, sistem transmisi yang sudah ada adalah transmisi dengan level tegangan 150 kV. Sistem ini menghubungkan kota-kota yang ada di Kalimantan Selatan seperti Barikin, Rantau, Asam Asam, Batulicin dan Seberang Barito. Sistem ini juga terhubung dengan sistem kelistrikan Kalimantan Timur dan Kalimantan Tengah. Pada sistem kelistrikan Kalimantan Tengah juga sudah terpasang transmisi dengan tegangan 150 kV. [1] Transmisi di Kalimantan Tengah ini menghubungkan kota-kota seperti Selat, Pulang Pisau, Palangkaraya, Kasongan, dan Sampit. Dengan adanya rencana penambahan pembangkit, akan ada penambahan saluran transmisi 150 kv di sistem kalselteng ini. Pada gambar 3.2 , garis merah adalah sistem transmisi yang terpasang hingga tahun 2017. Sedangkan garis putus-putus menandakan rencana sistem transmisi yang akan dibangun.



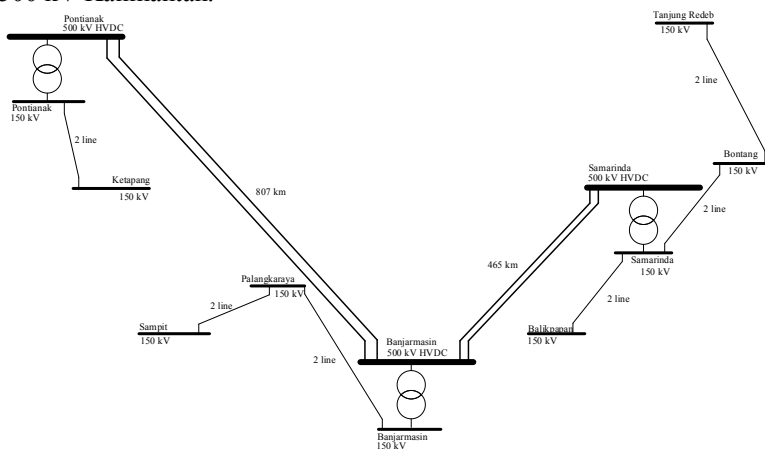
Gambar 3.2 Peta Kelistrikan Kalimantan Selatan [1]

Pada sistem kelistrikan Kalimantan Barat, sistem transmisi yang sudah terpasang adalah sistem transmisi dengan level tegangan 150 kV. Sistem ini menghubungkan kota-kota yang ada di Kalimantan Barat seperti Sei Raya, Siantan, Mempawah, Singkawang dan Sambas. Sistem kalbar ini belum terhubung sistem kelistrikan kaltimra dan kalselteng. Dengan adanya rencana penambahan pembangkit, akan ada penambahan saluran transmisi 150 kV dan akan dihubungkan dengan sistem kalselteng lewat jalur bawah.

beberapa gardu induk besar di semua sistem yang terletak di Tanjung Redep, Bontang, Samarinda, Banjarmasin, Palangkaraya, Sampit, Ketapang dan Pontianak. Jalur ketiga adalah jalur atas atau jalur utara, yaitu jalur yang menghubungkan transmisi dari palangkaraya di Kalimantan Tengah sampai Pontianak di Kalimantan Barat dengan melewati Kalimantan Timur dan Kalimantan Utara. Namun, pada Tugas Akhir ini penulis menggunakan jalur transmisi yang kedua yaitu transmisi jalur bawah atau jalur selatan Kalimantan.

3.2 Backbone Transmisi HVDC 500 kV Kalimantan

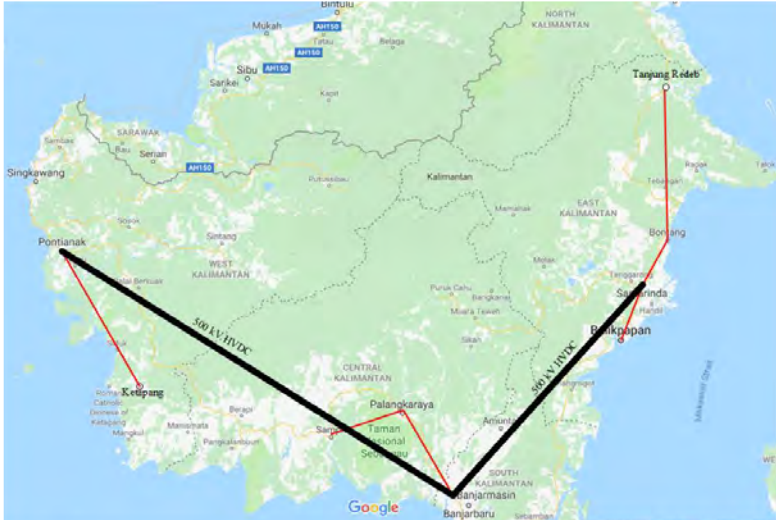
Salah satu rencana *backbone* transmisi di Kalimantan adalah *backbone* transmisi dengan level tegangan 500 kV. *Backbone* transmisi HVDC akan menghubungkan tiga sistem di Kalimantan atau sering disebut dengan sistem integrasi Kalimantan. Jalur yang digunakan pada sistem *backbone* transmisi ini adalah jalur bawah atau jalur selatan Kalimantan. Gambar 3.5 adalah sketsa dari *backbone* transmisi HVDC 500 kV Kalimantan.



Gambar 3.5 Sketsa Diagram Sistem Backbone Transmisi HVDC 500 kV Kalimantan

Dengan sistem integrasi diharapkan semua sistem dapat saling melengkapi kekurangan daya pada sistem kelistrikan Kalimantan. Sistem transmisi HVDC yang digunakan pada sistem integrasi ini diharapkan dapat menjadi solusi untuk menyalurkan daya yang besar pada jarak yang

jauh, dimana pada sistem integrasi Kalimantan ini jarak yang harus ditempuh adalah 1272 km. Selain itu, sistem transmisi HVDC bisa menjadi solusi untuk mengurangi *losses* pada saluran transmisi dan dapat mengurangi biaya pembangunan transmisi.



Gambar 3.6 Peta *Backbone* Transmisi HVDC 500 kV Kalimantan

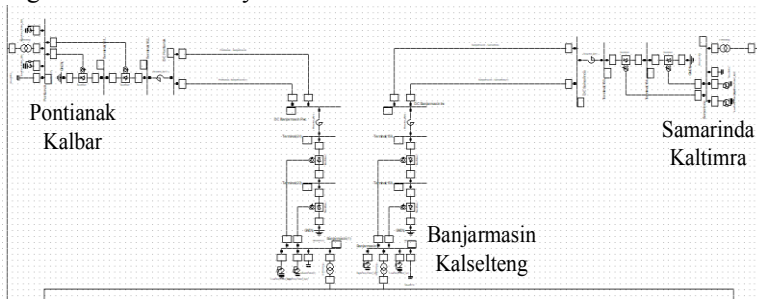
Pada backbone HVDC Kalimantan ini terdapat tiga gardu induk atau converter station yang masing-masing diletakkan pada tiga sistem kelistrikan yang ada. Peta *backbone* transmisi HVDC 500 kV Kalimantan dapat dilihat pada gambar 3.6. *Converter station* diletakkan pada tiga kota yaitu Samarinda, Banjarmasin, dan Pontianak. Pemilihan tiga tempat ini berdasarkan pertimbangan seperti beban terbesar dan bagaimana dampak pada tiga sistem kelistrikan yang ada. Berikut ini adalah data saluran dari backbone sistem transmisi HVDC 500 kV dapat dilihat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Data Saluran Sistem *Backbone* Transmisi HVDC

Dari	Menuju	Saluran	Panjang (km)
Samarinda	Banjarmasin	2	465
Banjarmasin	Pontianak	2	807

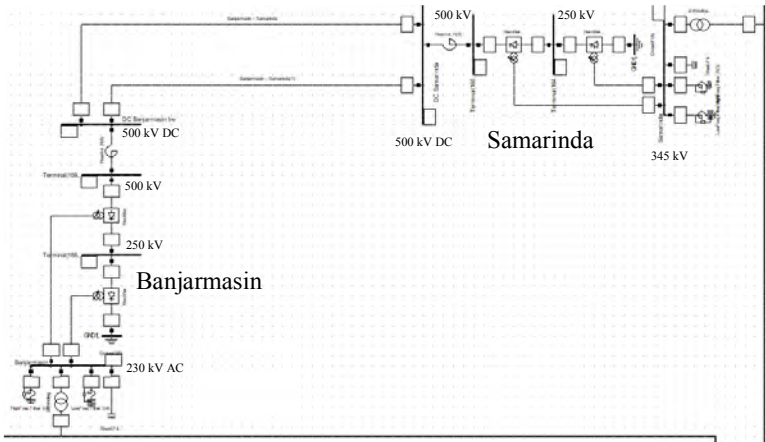
3.2.1 Perancangan *Single Line Diagram* Sistem *Backbone* Transmisi HVDC 500 kV

Perancangan *single line diagram backbone* transmisi HVDC 500 kV dan sistem kelistrikan Kalimantan dilakukan dengan *software* Digsilent PowerFactory 15.1 .

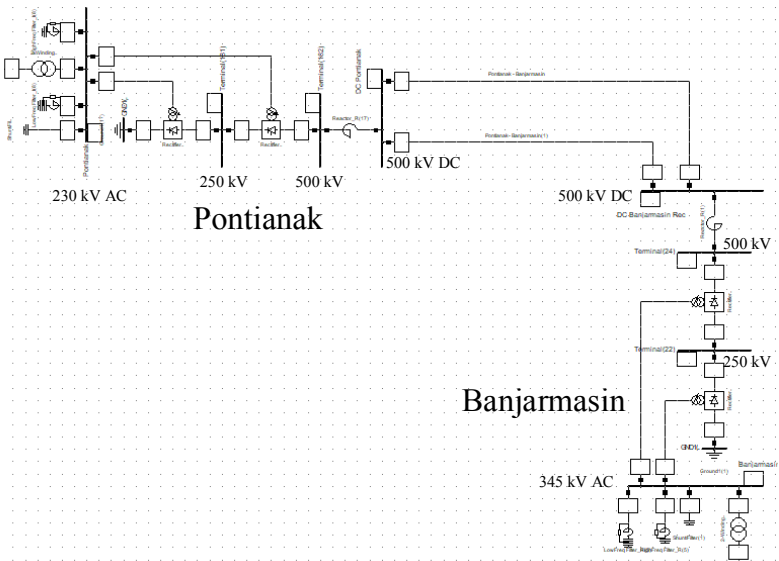


Gambar 3.7 *Single Line Diagram Backbone* Transmisi HVDC Kalimantan

Backbone transmisi HVDC pada gambar 3.7 menghubungkan tiga sistem kelistrikan yang ada di Kalimantan. Sistem transmisi HVDC 500 kV yang dibuat adalah menggunakan sistem monopolar HVDC. Sistem monopolar ini terdapat dua dalam perancangan yaitu dari Samarinda menuju Banjarmasin dan dari Banjarmasin menuju Pontianak. Pada sisi kanan atas adalah gardu induk *atau converter station* Samarinda. Untuk sisi bawah adalah gardu induk *atau converter station* Banjarmasin. Sedangkan pada sisi kiri atas adalah gardu induk *atau converter station* Pontianak. Untuk *single line diagram backbone* transmisi HVDC Samarinda-Banjarmasin dapat dilihat pada gambar 3.8.



Gambar 3.8 *Single Line Diagram* Samarinda-Banjarmasin



Gambar 3.9 *Single Line Diagram* Samarinda-Banjarmasin

Gambar 3.9 adalah *single line diagram backbone* transmisi HVDC Samarinda-Banjarmasin. Disetiap gardu induk atau *converter station*

menghubungkan ke sistem AC 150 kV. *Converter station* Samarinda menghubungkan ke sistem kaltimra. Untuk *converter station* Banjarmasin menghubungkan sistem kalselteng. Sedangkan *converter station* Pontianak menghubungkan sistem kalbar.

Berikut ini adalah data rectifier dan inverter dari sistem transmisi HVDC 500 kV. Terdapat dua rectifier yang dihubungkan seri dengan tegangan pada tiap-tiap rectifier adalah 250 kV. Pada tabel 3.2 adalah data rectifier yang digunakan untuk simulasi sistem.

Tabel 3.2 Data Rectifier pada Simulasi

Parameter	Nilai
Rating Tegangan AC (kV)	312.8548
Rating Tegangan DC (kV)	250
Rating Daya Aktif (MW)	750
Rating Arus DC (A)	3000 A
Nominal Turns-Ratio (t2/t1)	0,612586
Nominal Firing Angle	15

Untuk inverter juga sama dengan rectifier, terdapat dua inverter yang dipasang secara seri dengan tegangan 250 kV. Pada tabel 3.3 adalah data inverter yang digunakan untuk simulasi sistem. Pemilihan nilai parameter dari rectifier dan inverter didapatkan dari penelitian dari [4].

Tabel 3.3 Data Inverter pada Simulasi

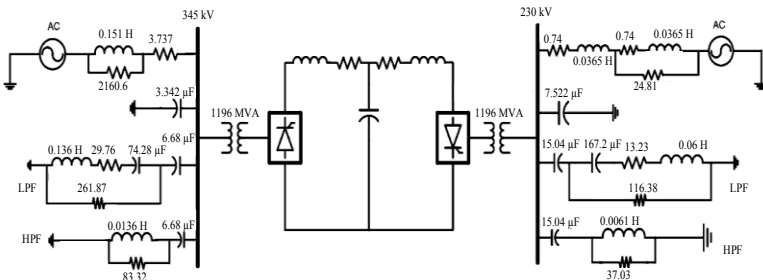
Parameter	Nilai
Rating Tegangan AC (kV)	208,5696
Rating Tegangan DC (kV)	250
Rating Daya Aktif (MW)	750
Rating Arus DC (A)	3000
Nominal Turns-Ratio (t2/t1)	0,9188
Nominal Firing Angle	15

Untuk data saluran yang digunakan pada *backbone* transmisi HVDC 500 kV untuk simulasi terlihat pada tabel 3.4. Data saluran ini dapat digunakan sebagai dasar dari penentuan spesifikasi dari konduktor.

Tabel 3.4 Data Saluran *Backbone* Transmisi HVDC 500 kV

Rating Tegangan (kV)	500
Rating Arus (A)	2000
Frekuensi (Hz)	50
Jenis Saluran	Overhead Line
Tipe Sistem	DC
AC-Resistance $R'@20^{\circ} C$ (ohm/km)	0,0153
Reactance X' (ohm/km)	0,1

Untuk nilai pada *filter* AC HPF dan LPF menggunakan nilai berdasarkan penelitian dari [4]. Nilai parameter ini didapatkan dari sistem HVDC yang telah dikaji oleh CIGRE, dimana sistem ini dijadikan sebagai referensi umum dan tolak ukur untuk studi sistem HVDC. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar 3.10. Pada gambar 3.10 nilai *Filter* AC pada level tegangan 345 kV adalah untuk LPF $L = 0.1364$ H, $R = 29.75$ ohm, $C1 = 74,8 \mu F$, dan $C2 = 6,685 \mu F$. Untuk *filter* HPF $L = 0.136$ H, $R = 83.32$ ohm dan $C = 6.685 \mu F$. Sedangkan untuk filter AC level tegangan 230 kV adalah untuk LPF $L = 0.0606$ H, $R = 13.23$ ohm, $C1 = 167,2 \mu F$, dan $C2 = 15,04 \mu F$. Untuk *filter* HPF $L = 0.0061$ H, $R = 37.03$ ohm dan $C = 15.04 \mu F$.



Gambar 3.10 Nilai Filter AC dari Cigre [4]

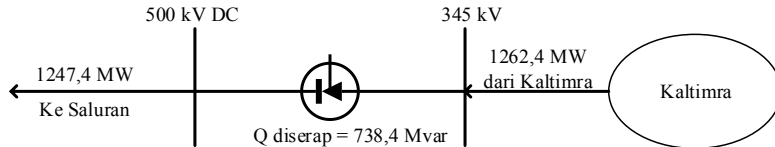
3.3 Simulasi Sistem Kelistrikan Kalimantan 500 kV HVDC

Simulasi yang dilakukan bertujuan untuk mendapat data untuk menentukan spesifikasi peralatan yang dibutuhkan sistem HVDC. Pada

Tugas Akhir ini, simulasi yang dilakukan adalah simulasi aliran daya dan simulasi hubung singkat.

3.3.1 Simulasi Aliran Daya

Pada simulasi ini bertujuan untuk melihat suatu aliran daya yang mengalir pada *backbone* transmisi HVDC. Hasil dari simulasi aliran daya adalah sebagai berikut.

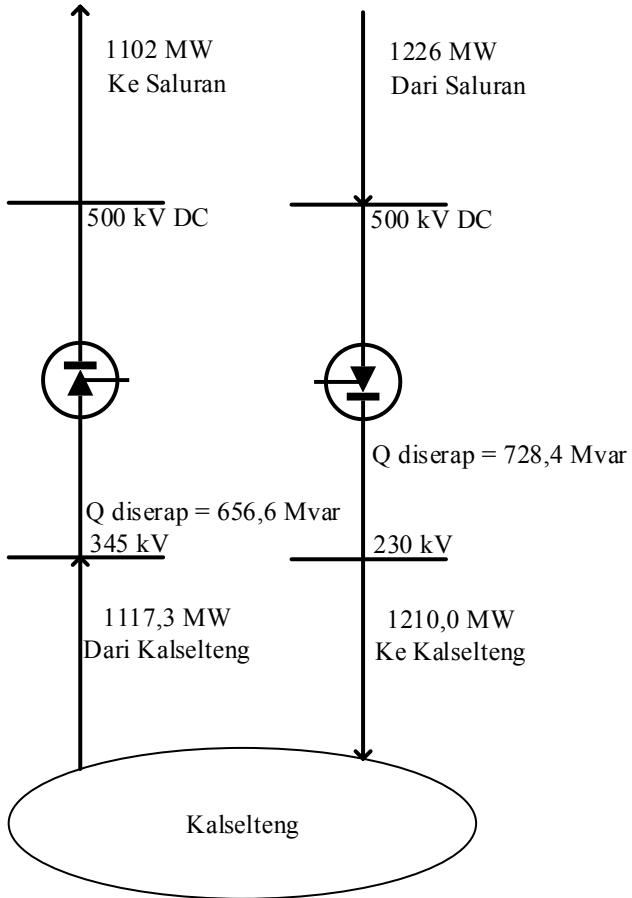


Gambar 3.11 Aliran Daya pada *Converter Station* Samarinda

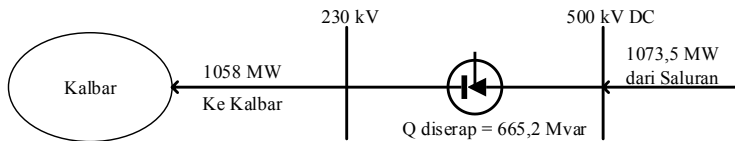
Pada gambar 3.11 terlihat aliran daya yang masuk dari sistem kaltimra ke arah *converter station* sebesar 1262,4 MW. Setelah melewati rectifier, daya yang disalurkan dari *converter station* samarinda adalah sebesar 1247,8 MW. Berkurangnya daya sebesar 14,6 MW pada *converter station* Samarinda adalah diserap oleh *filter AC*. Sedangkan daya reaktif yang dibutuhkan oleh konverter adalah sebesar 738,4 Mvar.

Untuk aliran daya pada *converter station* Banjarmasin dapat dilihat pada gambar 3.12. Daya yang masuk ke inverter Banjarmasin adalah sebesar 1226 MW. Sehingga daya yang hilang pada saluran sepanjang Samarinda-Banjarmasin sebesar 21,8 MW. Sedangkan daya yang masuk ke sistem kalselteng adalah sebesar 1211 MW, berkurangnya daya sebesar 15 MW pada inverter Banjarmasin adalah diserap oleh *filter AC*. Untuk daya reaktif yang dibutuhkan oleh konverter adalah sebesar 728,4 Mvar.

Untuk aliran daya pada sisi rectifier Banjarmasin, daya yang masuk dari sistem kalselteng sebesar 1117,3 MW. Sedangkan daya yang disalurkan dari rectifier samarinda adalah sebesar 1102 MW, daya yang berkurang pada rectifier Samarinda sebesar 15,3 MW adalah diserap oleh *filter AC*. Untuk daya reaktif yang dibutuhkan oleh rectifier Banjarmasin sebesar 656,6 Mvar.



Gambar 3.12 Aliran Daya pada *Converter Station Banjarmasin*



Gambar 3.13 Aliran Daya pada *Converter Station Pontianak*

Untuk aliran daya pada *converter station* Pontianak bisa dilihat pada gambar 3.13. Daya yang masuk ke *converter station* dari saluran adalah sebesar 1073,5 MW. Jadi daya yang hilang pada saluran adalah sebesar 28,5 MW. Sedangkan daya yang masuk ke sistem kalbar adalah sebesar 1058 MW. Berkurangnya daya pada *converter station* Pontianak sebesar 15,5 MW dikarenakan daya diserap oleh filter AC. Untuk daya reaktif yang dibutuhkan oleh inverter adalah sebesar 665,2 Mvar.

3.3.2 Simulasi Hubung Singkat

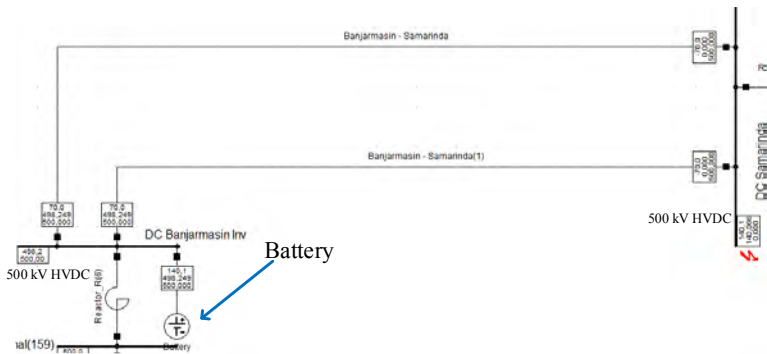
Simulasi hubung singkat bertujuan untuk melihat arus hubung singkat pada sistem sehingga dapat merencanakan spesifikasi peralatan diatas dari nilai arus hubung singkat tersebut. Gangguan hubung singkat pada sistem *backbone* transmisi HVDC 500 kV dilakukan pada bus yang terletak pada *converter station*. Simulasi hubung singkat yang dilakukan adalah hubung singkat tiga fasa. Bus yang dipilih untuk simulasi hubung singkat adalah bus HVDC 500 kV dan bus pada sisi AC yaitu bus dengan level tegangan 345 kV dan 230 kV.

Dari hasil simulasi hubung singkat pada sistem backbone transmisi HVDC 500 kV, didapatkan data seperti pada tabel berikut ini. Pada tabel 3.5 adalah data dari hubung singkat yang dilakukan pada bus AC sisi rectifier dan inverter dengan level tegangan 345 kV dan 230 kV.

Tabel 3.5 Hasil Arus Hubung Singkat Bus AC

Bus	I sym (kA)	I asym (kA)	I sym 30 C (kA)	I peak (kA)
Samarinda 345 kV	7,705	12,039	7,031	20,147
Banjarmasin 230 kV	16,883	27,3	14,735	45,33
Banjarmasin 345 kV	9,873	16,017	8,754	26,575
Pontianak 230 kV	7.589	12,08	6,492	20,131

Untuk melakukan simulasi hubung singkat pada sisi DC atau melakukan gangguan hubung singkat pada bus 500 kV HVDC diperlukan suatu sumber DC agar simulasi bisa berjalan. Simulasi hubung singkat dengan menambahkan sumber DC dapat dilihat pada gambar 3.14. Sumber DC yang dipilih disini adalah *battery* dengan tegangan 500 kV.



Gambar 3.14 Simulasi Hubung Singkat pada Bus HVDC 500 kV

Tabel 3.6 Data Hasil Hubung Singkat pada Bus HVDC 500 kV

Bus HVDC 500 kV	Arus Puncak (kA)
Samarinda	140,066
Inverter Banjarmasin	140,066
Rectifier Banjarmasin	80,827
Pontianak	80,827

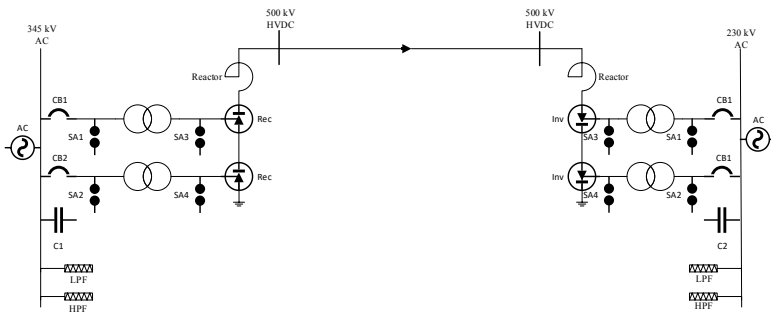
Data hasil hubung singkat pada bus HVDC 500 kV dapat dilihat pada tabel 3.6 . Hasil arus hubung singkat pada bus Samarinda dan bus inverter Banjarmasin adalah sama, sebesar 140,066 kA. Sedangkan arus hubung singkat pada bus rectifier Banjarmasin dan bus inverter Pontianak adalah sebesar 80,827 kA.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

Perencanaan Spesifikasi Peralatan

Peralatan-peralatan yang dibutuhkan pada transmisi HVDC terlihat pada gambar 4.1 . Peralatan tersebut memiliki peran penting untuk berlangsungnya sistem transmisi HVDC. Berikut ini adalah spesifikasi peralatan pada transmisi HVDC.



Gambar 4.1 Sistem Diagram Transmisi HVDC 500 kV

4.1 Trafo Konverter

Trafo konverter terletak diantara busbar AC dan *thyristor valves*. Level tegangan dari trafo konverter ditentukan dari busbar AC dan *thyristor valves*. Pada sistem transmisi Kalimantan ini, trafo konverter memiliki perbedaan kapasitas MVA dan level tegangannya. Untuk trafo konverter pada sisi kirim atau sisi rectifier, level tegangannya adalah 345/250 kV. Sedangkan pada sisi terima atau sisi inverter, level tegangannya 230/250 kV.

Untuk menentukan spesifikasi trafo konverter pada sistem HVDC diperlukan beberapa data dari hasil simulasi aliran daya. Data yang diperlukan terlihat pada tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data yang Diperlukan untuk Menentukan Trafo Konverter

Parameter	Nilai
Tegangan Sisi Rectifier (kV)	250
Tegangan Sisi Inverter (kV)	250
Arus Nominal Samarinda-Banjarmasin (kA)	2,452
Arus Nominal Banjarmasin-Pontianak (kA)	2,147

Untuk tegangan dan arus nominal pada sisi rectifier dan sisi inverter adalah sama, maka rating trafo konverter pada sisi rectifier dan sisi inverter adalah sama. Dari hasil simulasi yang didapatkan, maka rating trafo konverter dapat ditentukan menggunakan persamaan 2.1 dan 2.2. Perhitungan rating trafo konverter sebagai berikut.

Rectifier Samarinda

$$\begin{aligned} \text{S trafo rectifier (6 pulse)} &= \sqrt{2} \cdot I_{dn} \cdot V_{sec \text{ Rec}} \\ &= \sqrt{2} \cdot 2,452 \cdot 250 \\ &= 866,9 \text{ MVA} \end{aligned}$$

Inverter Banjarmasin

$$\begin{aligned} \text{S trafo inverter (6 pulse)} &= \sqrt{2} \cdot I_{dn} \cdot V_{sec \text{ Inv}} \\ &= \sqrt{2} \cdot 2,452 \cdot 250 \\ &= 866,9 \text{ MVA} \end{aligned}$$

Rectifier Banjarmasin

$$\begin{aligned} \text{S trafo rectifier (6 pulse)} &= \sqrt{2} \cdot I_{dn} \cdot V_{sec \text{ Rec}} \\ &= \sqrt{2} \cdot 2,147 \cdot 250 \\ &= 759 \text{ MVA} \end{aligned}$$

Inverter Pontianak

$$\begin{aligned} \text{S trafo inverter (6 pulse)} &= \sqrt{2} \cdot I_{dn} \cdot V_{sec \text{ Inv}} \\ &= \sqrt{2} \cdot 2,147 \cdot 250 \\ &= 759 \text{ MVA} \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan yang didapatkan, maka rating trafo konverter pada sisi rectifier dan sisi inverter adalah sama. Untuk sistem transmisi HVDC Samarinda-Banjarmasin diperlukan trafo konverter sebesar 866,9 MVA pada tiap-tiap *thyristor valves*. Sedangkan untuk sistem transmisi HVDC Banjarmasin-Pontianak diperlukan trafo konverter sebesar 759 MVA. Pada sistem transmisi HVDC Kalimantan diperlukan trafo konverter sebanyak 8 buah, yaitu 2 trafo konverter pada sisi rectifier Samarinda, 2 trafo konverter pada sisi inverter banjarmasin, 2 trafo konverter pada sisi rectifier Banjarmasin dan 2 trafo konverter pada sisi inverter Pontianak.

4.2 *Thyristor Valves*

Berdasarkan data yang diperoleh dari simulasi sistem, maka didapatkan rating *thyristor valves* sebagai berikut.

Tabel 4.2 Spesifikasi *Thyristor Valves*

	Nilai
Rating Tegangan DC (kV)	250
Rating Arus (A)	3000
Rating Daya Aktif (MW)	750
Frekuensi	50

Tabel 4.2 merupakan data spesifikasi *thyristor valves* yang didapatkan dari hasil simulasi sistem. *thyristor valves* terdiri dari beberapa modul yang disusun seri sehingga mendapatkan nilai tegangan DC. Didalam modul *thyristor valves* terdapat beberapa *thyristor cell*. Tegangan dari *thyristor cell* biasanya sekitar 6-8 kV [11]. Pada setiap *converter station* dibutuhkan dua *thyristor valves* yang dipasang seri. Maka pada sistem *backbone* transmisi HVDC Kalimantan ini diperlukan 8 *thyristor valves* dengan tegangan 250 kV. *Thyristor valves* tersebut diletakkan setelah trafo konverter. Jika melihat *single line diagram* pada simulasi, *thyristor valves* disimbolkan sebagai *rectifier* dan *inverter* di setiap *converter station* nya.

4.3 *Smoothing Reactor*

Smoothing reactor dipasang setelah *thyristor valves* atau dipasang seri dengan saluran. Salah satu fungsinya adalah untuk membatasi arus gangguan pada sisi DC. Berdasarkan hasil simulasi sistem yang dilakukan, spesifikasi *smoothing reactor* dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Spesifikasi *Smoothing Reactor*

Rating Tegangan DC (kV)	500
Rating Arus DC (A)	3000
Induktansi (mH)	596,8
Tipe	Air-insulated dry type reactor

Pemilihan nilai induktansi *smoothing reactor* ini didasarkan dari penelitian yang telah dilakukan oleh manufaktur CIGRE [4]. Dengan sistem monopolar dan level tegangan yang sama, maka nilai induktansi dari *smoothing reactor* disamakan yaitu 596,8 mH. Untuk pemilihan tipe dari *smoothing reactor* dipilih tipe *air-insulated dry type reactor*.

Smoothing reactor tipe ini dipilih berdasarkan pertimbangan keuntungan seperti saat pemeliharaannya tidak terlalu mengeluarkan banyak biaya karena *smoothing reactor* ini hanya berisi beberapa bagian belitan saja.

4.4 Suplai Daya Reaktif

Suplai daya reaktif pada sistem *backbone* transmisi HVDC 500 kV Kalimantan ini bersumber dari kapasitor bank yang dipasang didekat dengan konverter. Untuk menghitung daya reaktif yang dibutuhkan oleh konverter dapat dicari dengan persamaan 2.3 , 2.4 , 2.5 dan 2.6. Perhitungan daya reaktif yang dibutuhkan sebagai berikut,

Sisi Rectifier Samarinda

$$Vd0 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} B.T.Vac$$

$$Vd0 = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} 2.0,612586.345$$

$$Vd0 = 570,8244 \text{ kV}$$

$$Pdc = Vd.Id$$

$$= 508,7 . 2,452$$

$$= 1247,3 \text{ MW}$$

$$\cos \emptyset = \frac{Vd}{Vd0}$$

$$\cos \emptyset = \frac{508,7}{570,8244}$$

$$\cos \emptyset = 0,891$$

$$\emptyset = 26,98$$

$$Q = Pdc . \tan \emptyset$$

$$= 1247,3 . \tan 26,98$$

$$= 634,978 \text{ Mvar}$$

Dari perhitungan diatas didapatkan nilai daya reaktif sebesar 634,978 Mvar. Untuk nilai Vd dan Id didapatkan dari simulasi sistem. Untuk hasil dari daya reaktif di tiap-tiap *converter station* dapat dilihat di tabel 4.4.

Tabel 4.4 Data Hasil Perhitungan Daya Reaktif pada Converter Station

	Vd0 (kV)	Vd (kV)	Id (kA)	Pdc (MW)	\emptyset	Q (Mvar)
Rectifier Samarinda	570,824	508,7	2,452	1247,3	26,98	634,978
Inverter Banjarmasin	570,825	500	2,452	1226	28,8	675,263
Rectifier Banjarmasin	570,824	513,3	2,147	1102	25,9	536,137
Inverter Pontianak	570,825	500	2,147	1073,5	28,8	591,268

Dari data tabel 4.4, nilai Vd dan Id didapatkan dari hasil simulasi sistem. Hasil tersebut adalah daya yang dibutuhkan atau diserap oleh konverter. Untuk menentukan nilai sumber suplai daya reaktif bagi konverter dapat ditentukan dari hasil tabel 4.4. Sumber suplai daya reaktif pada sistem backbone transmisi HVDC Kalimantan berupa kapasitor bank dan beberapa *filter* yang ada pada bus AC di tiap-tiap *converter station*. Nilai kapasitor bank dapat ditentukan kurang lebih sama dengan nilai Q pada tabel 4.4 tergantung dampaknya terhadap pada sistem.

4.5 HVDC Disconnecter

Untuk HVDC *disconnecter* pada sistem transmisi HVDC Kalimantan dipilih HVDC *disconnecter* dengan tipe *center break disconnecter*, produk milik GE Grid Solution. *Center break disconnecter* dipilih dengan mempertimbangkan biaya yang lebih murah dan tipe ini lebih banyak digunakan daripada tipe lain pada transmisi HVDC. Spesifikasi dari *center break disconnecter* bisa dilihat pada tabel 4.5. Spesifikasi tersebut didapatkan dari brosur *GE Grid Solution, "Switchgear for Direct Current (DC) Applications, Disconnecter, Switches and Circuit Breaker"* [9]. Gambar 4.2 merupakan HVDC *disconnecter* tipe *center break*.

Tabel 4.5 Spesifikasi HVDC *Disconnecter* tipe *Center Break*

Rating Tegangan (kV)	245 – 800
Rating Arus (A)	6600
Temperatur	-50 sampai 50 °C



Gambar 4.2 HVDC *Disconnecter* tipe *Center Break* [9]

4.6 Pemutus Daya

Pemutus daya atau *circuit breaker* pada sistem *backbone* transmisi Kalimantan diletakkan pada level tegangan 345 kV AC sisi rectifier, 230 kV AC pada sisi inverter dan 500 kV HVDC.

4.6.1 *Circuit Breaker* dengan Level Tegangan 345 kV AC

Circuit breaker 345 kV AC terletak pada *converter station* sisi rectifier Samarinda dan Banjarmasin. *Circuit breaker* yang dipilih pada tegangan 345 kV adalah *circuit breaker* milik perusahaan ABB yaitu *dead tank circuit breaker* tipe PMI-B. Pemilihan *circuit breaker* ini berdasarkan data yang diperoleh dari hasil simulasi sistem yang dapat dilihat pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Data Arus Bus 345 kV AC

Bus 345 kV	I sym (kA)	I asym (kA)	I sym 30 C (kA)	I peak (kA)	I kontinu (kA)
Samarinda	7,705	12,039	7,031	20,147	1,174
Banjarmasin	9,873	16,017	8,754	26,575	1,029

Berdasarkan data yang didapatkan dari simulasi sistem, maka *circuit breaker* yang dipilih adalah ABB *dead tank circuit breaker* tipe PMI-B. Spesifikasi *circuit breaker* tersebut dapat dilihat pada tabel 4.7. Spesifikasi ini didapatkan dari katalog *circuit breaker* ABB, “Type PMI-B, 362 kV, up to 63 kA, Dead Tank Circuit Breaker” [12]. Gambar dari ABB *dead tank circuit breaker* tipe PMI-B dapat dilihat pada gambar 4.3.

Tabel 4.7 Spesifikasi ABB *dead tank circuit breaker* tipe PMI-B

Tegangan Maksimum (kv)	380
Frekuensi (Hz)	50/60
BIL (kv)	1300
Alternatif BIL (kV) *standard IEEE	900, 975, 1050, 1050, 1175, 1300
Switching Impulse Close/Open (kv)	825/900
Arus Kontinu (A)	2000, 3000, 4000, 5000
Arus Close & Latch (kA)	170
Arus Short Circuit (kA)	63
Temperature (C)	-50 sampai 50
Desain	Outdoor



Gambar 4.3 ABB *dead tank circuit breaker* tipe PMI-B [12]

4.6.2 *Circuit Breaker* dengan Level Tegangan 230 kV AC

Circuit breaker 230 kV AC terletak pada *converter station* sisi inverter Banjarmasin dan Pontianak. *Circuit breaker* yang dipilih pada tegangan 230 kV ini adalah *circuit breaker* milik perusahaan Siemens yaitu 3AP1 *dead tank circuit breaker*. Pemilihan *circuit breaker* ini berdasarkan data yang diperoleh dari hasil simulasi sistem yang dapat dilihat pada tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Data Arus Bus 230 kV AC

Bus 230 kV	I sym (kA)	I asym (kA)	I sym 30 C (kA)	I peak (kA)	I kontinu (kA)
Banjarmasin	16,883	27,3	14,735	45,33	1,723
Pontianak	7.589	12,08	6,492	20,131	1,512

Berdasarkan data yang didapatkan dari simulasi sistem, maka *circuit breaker* yang dipilih adalah Siemens 3AP1 *dead tank circuit breaker*. Spesifikasi *circuit breaker* tersebut dapat dilihat pada tabel 4.9. Spesifikasi ini didapatkan dari katalog *circuit breaker* Siemens, “*From 72,5 kV up to 800 kV High Voltage Circuit Breaker*” [13]. Gambar dari *Siemens 3AP1 dead tank circuit breaker* dapat dilihat pada gambar 4.4.

Tabel 4.9 Spesifikasi Siemens 3AP1 *dead tank circuit breaker*

Rating Tegangan (kv)	245
Frekuensi (Hz)	50/60
Rating power-frequency withstand voltage/min (kV)	460
Rating lightning impulse withstand voltage/min (kV)	1050
Alternatif BIL (kV) *standard IEEE	650, 750, 825, 900, 975, 1050
Rating Arus Normal (A)	3150
Arus Short Circuit (kA)	63
Rating break time	2 cycles
Temperature (C)	-55 to 55



Gambar 4.4 Siemens 3AP1 *dead tank circuit breaker* [13]

4.6.3 *Circuit Breaker* dengan Level Tegangan 500 kV HVDC

Circuit breaker 500 kV HVDC terletak pada *converter station* yang letaknya bersentuhan langsung dengan saluran transmisi. *Circuit breaker* yang dipilih pada tegangan 500 kV ini adalah *circuit breaker* milik perusahaan Siemens yaitu 3AP2 *circuit breaker*. Pemilihan *circuit breaker* ini berdasarkan data yang diperoleh dari hasil simulasi sistem yang dapat dilihat pada tabel 4.10.

Tabel 4.10 Data Arus Hubung Singkat Bus 5000 kV HVDC

Bus HVDC 500 kV	Arus Puncak (kA)
Samarinda	140,066
Inverter Banjarmasin	140,066
Rectifier Banjarmasin	80,827
Pontianak	80,827

Berdasarkan data yang didapatkan dari simulasi sistem, maka *circuit breaker* yang dipilih adalah Siemens 3AP *circuit breaker*. Spesifikasi *circuit breaker* tersebut dapat dilihat pada tabel 4.11. Spesifikasi ini didapatkan dari katalog *circuit breaker* Siemens, “*High Voltage Circuit Breaker 3AP1/2*” [14]. Gambar dari *Siemens 3AP2 circuit breaker* dapat dilihat pada gambar 4.5.

Tabel 4.11 Spesifikasi Siemens 3AP2 circuit breaker

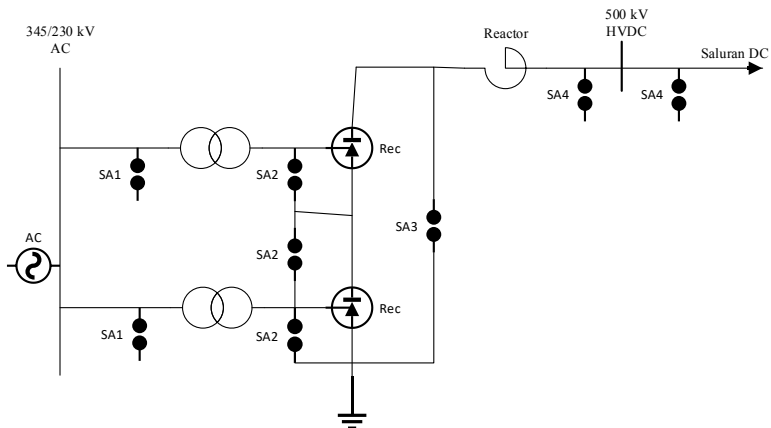
Rating Tegangan (kv)	550
Frekuensi (Hz)	50/60
Rating power-frequency withstand voltage/min (kV)	800
Rating lightning impulse withstand voltage/min (kV)	1550
Rating switching impulse withstand voltage (kV)	1175
Alternatif BIL (kV) *standard IEEE	1300, 1425, 1550, 1675, 1800
Rating Arus Normal (A)	5000
Rating Arus Short Circuit (kA)	63
Rating Arus Puncak	170
Rating break time	2 cycles
Temperature (C)	-40 - 50



Gambar 4.5 Siemens 3AP2 circuit breaker [14]

4.7 *Surge Arrester*

Surge arrester pada *converter station* terletak seperti gambar 4.6. *Surge arrester* akan melindungi semua peralatan pada *conveter station* dari tegangan lebih dan lonjakan tegangan. Peralatan ini terdapat pada semua level tegangan di *converter station* sistem HVDC Kalimantan.



Gambar 4.6 Penempatan Surge Arrester pada Converter Station [7]

Pada gambar 4.3 SA1 adalah *surge arrester* yang dipasang didekat trafo konverter yaitu disebelahnya bushing trafo konverter. Fungsi dari SA1 ini adalah untuk membatasi *overvoltage* di sisi primer dan sisi sekunder dari trafo konverter. Untuk SA2 adalah *surge arrester* yang terletak pada sisi sekunder trafo konverter atau rectifier atau thyristor valve. Fungsi dari SA2 adalah untuk switching surge dari tegangan sistem AC yang melewati trafo konverter dan ground fault antara thyristor valves dan bushing dari trafo konverter saat rectifier beroperasi.

SA3 adalah *surge arrester* yang terletak pada rectifier atau grup dari *thyristor valves*. Fungsi dari SA3 ini adalah sebagai pelindung *overvoltage* dari sisi AC maupun DC. Sedangkan SA4 adalah *surge arrester* yang terletak pada *smoothing reactor* dan pada saluran DC. Fungsi dari SA4 adalah melindungi *smoothing reactor* dan *converter station* dari *overvoltage* sisi DC.

Surge arrester pada transmisi HVDC Kalimantan terletak pada level tegangan 345 kV, 230 kV, 250 kV dan 500 kV. Berdasarkan level tegangannya, maka *surge arrester* yang dipilih adalah produk dari siemens tipe 3EL3. *Surge arrester* ini terbuat dari bahan karet silikon. Gambar dari *surge arrester* siemens 3EL3 dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4.7 *Surge Arrester Siemens Type 3EL3* [15]

4.7.1 Surge Arrester dengan Level Tegangan 345 kV

Pada gambar 4.3 , *surge arrester* ini dilambangkan dengan SA1. *Surge arrester* ini terletak pada sisi rectifier Samarinda dan Banjarmasin. Berdasarkan data simulasi sistem, *Surge arrester* yang dipilih pada level tegangan 345 kV ini adalah *surge arrester* dari Siemens tipe 3EL3 360-4 P.5.– K.2 . Spesifikasinya dapat dilihat pada tabel 4.12. Spesifikasi peralatan ini didapatkan dari katalog produk siemens “*High Voltage Surge Arrester, Product guide*” [15].

Tabel 4. 12 Spesifikasi *Surge Arrester Siemens 3EL3 360-4 P.5.– K.2*

Rating Tegangan (kV)	360
Tegangan Tertinggi Sistem (kV)	420
Ketahanan Impulse Petir (kV)	1740
Ketahanan Impulse Switching (kV)	1140
Alternatif BIL (kV) *standard IEEE	900, 975, 1050, 1050, 1175, 1300
Ketahanan Power-Frequency selama 1 min (kV)	720
Jarak Flashover (mm)	2523
Jarak Creepage (mm)	12087
Berat (kg)	145
Tinggi (mm)	3312

4.7.2 Surge Arrester dengan Level Tegangan 230 kV

Pada gambar 4.3, *surge arrester* ini dilambangkan dengan SA2. *Surge arrester* ini terletak pada sisi inverter Banjarmasin dan Pontianak. Berdasarkan data simulasi sistem, *Surge arrester* yang dipilih pada level tegangan 230 kV ini adalah *surge arrester* dari Siemens tipe 3ELE 240-4P.4.J.2. Spesifikasinya dapat dilihat pada tabel 4.13. Spesifikasi peralatan ini didapatkan dari katalog produk siemens “*High Voltage Surge Arrester, Product guide*” [15].

Tabel 4.13 Spesifikasi *Surge Arrester Siemens 3ELE 240-4P.4.J.2*

Rating Tegangan (kV)	240
Tegangan Tertinggi Sistem (kV)	300
Ketahanan Impulse Petir (kV)	1050
Ketahanan Impulse Switching (kV)	700
Alternatif BIL (kV) *standard IEEE	650, 750, 825, 900, 975, 1050
Ketahanan Power-Frequency selama 1 min (kV)	450
Jarak Flashover (mm)	1830
Jarak Creepage (mm)	7280
Berat (kg)	88,6
Tinggi (mm)	2028

4.7.3 Surge Arrester dengan Level Tegangan 250 kV

Pada gambar 4.3, *surge arrester* ini dilambangkan dengan SA2. *Surge arrester* ini terletak pada sisi sekunder trafo konverter atau rectifier atau *thyristor valve*. Berdasarkan data simulasi sistem, *Surge arrester* yang dipilih pada level tegangan 250 kV ini adalah *surge arrester* dari Siemens tipe 3EL3 276-4P.5.- L.2. Spesifikasinya dapat dilihat pada tabel 4.14. Spesifikasi peralatan ini didapatkan dari katalog produk siemens “*High Voltage Surge Arrester, Product guide*” [15].

Tabel 4.14 Spesifikasi *Surge Arrester Siemens 3EL3 276-4P.5.- L.2*

Rating Tegangan (kV)	276
Tegangan Tertinggi Sistem (kV)	362
Ketahanan Impulse Petir (kV)	1260

Alternatif BIL (kV) *standard IEEE	900, 975, 1050, 1050, 1175, 1300
Ketahanan Impulse Switching (kV)	840
Ketahanan Power-Frequency selama 1 min (kV)	520
Jarak Flashover (mm)	1940
Jarak Creepage (mm)	8834
Berat (kg)	103
Tinggi (mm)	2386

4.7.4 Surge Arrester dengan Level Tegangan 500 kV

Pada gambar 4.3, *surge arrester* ini dilambangkan dengan SA3 dan SA4. *Surge arrester* ini terletak pada *smoothing reactor* dan pada saluran DC. Berdasarkan data simulasi sistem, *Surge arrester* yang dipilih pada level tegangan 500 kV ini adalah *surge arrester* dari Siemens tipe 3EL3 468–4P.5.– K.4. Spesifikasinya dapat dilihat pada tabel 4.15. Spesifikasi peralatan ini didapatkan dari katalog produk siemens “*High Voltage Surge Arrester, Product guide*” [15].

Tabel 4.15 Spesifikasi *Surge Arrester Siemens 3EL3 468–4P.5.– K.4*

Rating Tegangan (kV)	468
Tegangan Tertinggi Sistem (kV)	550
Ketahanan Impulse Petir (kV)	2320
Alternatif BIL (kV) *standard IEEE	1300, 1425, 1550, 1675, 1800
Ketahanan Impulse Switching (kV)	1520
Ketahanan Power-Frequency selama 1 min (kV)	960
Jarak Flashover (mm)	3656
Jarak Creepage (mm)	16116
Berat (kg)	197
Tinggi (mm)	4416

4.8 Busbar

Busbar yang ditentukan dalam transmisi HVDC 500 kV Kalimantan terdiri busbar AC dan DC dengan level tegangan yaitu 345 kV AC, 230 kV AC, 250 kV DC dan 500 kV DC. *Busbar* ditentukan berdasarkan arus nominal yang mengalir pada busbar. Untuk menentukan spesifikasi *busbar*, diperlukan beberapa data arus seperti berikut.

Tabel 4.16 Data Arus Nominal Sistem Transmisi 500 kV HVDC

Bus	Arus Nominal (A)
230 kV AC Banjarmasin	3167
230 kV AC Pontianak	2774
345 kV AC Samarinda	2179
345 kV AC Banjarmasin	1898
250 kV DC Samarinda- Banjarmasin	2452
250 kV DC Banjarmasin-Pontianak	2147
500 kV DC Samarinda-Banjarmasin	2452
500 kV DC Banjarmasin-Pontianak	2147

Berdasarkan tabel 4.16 dapat disimpulkan arus nominal tertinggi adalah 3167 A pada busbar 230 kV di *converter station* Banjarmasin. Maka Spesifikasi busbar yang dipilih adalah produk busbar dari Bruker Hydrosatatic Extrusions Limited. Spesifikasi busbar dapat dilihat pada tabel 4.17. Spesifikasi peralatan ini didapatkan dari produk Bruker Hydrosatatic Extrusions Limited, “*Cuponal Busbar Technical Data : AC/DC Current Rating*” [16].

Tabel 4.17 Spesifikasi *Busbar*

Rating Arus AC (A)	3260
Rating Arus DC (A)	3745
Ukuran (mm)	90 x 8
Corner Radius (mm)	2
Area (mm ²)	716
Berat (kg/m)	2,601
DC resistance 20°C (μ Ohm/m)	37
DC resistance 85°C (μ Ohm/m)	47
Jumlah Bar	3

4.9 Konduktor

Berdasarkan data simulasi sistem, arus yang mengalir pada saluran transmisi HVDC 500 kV Samarinda-Banjarmasin sebesar 1,226 kA. Sedangkan arus yang mengalir pada saluran transmisi HVDC 500 kV Banjarmasin-Pontianak sebesar 1074 kA. Maka spesifikasi konduktor yang dipilih adalah konduktor ACSR produk milik Priority Wire & Cable, INC. Spesifikasi konduktor dapat dilihat pada tabel 4.16. Spesifikasi

peralatan ini didapatkan dari katalog produk Priority Wire & Cable, “*ACSR – Aluminium Conductor Steel Reinforced*” [17].

Tabel 4.18 Spesifikasi Konduktor ACSR Bobolink

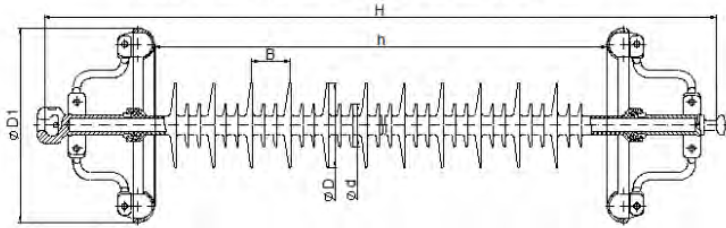
Nama Kode	Bobolink
Rating Arus (A)	1272
Resistansi DC @20C (ohm/km)	0,039
Resistansi AC @75C (ohm/km)	0,0502
Ukuran (AWG/KCM)	1431
Stranded (AI/STL)	45/7
Rating Kekuatan (lbs)	38300
Berat (lbs) per 1000 ft	1613

4.9 Isolator

Isolator pada sistem ini terletak pada saluran transmisi HVDC 500 kV. Berdasarkan tegangan 500 kV, maka isolator yang dipilih adalah produk isolator dari Changgong perusahaan dari China dengan tipe model FXBZ-500/180-C. Isolator ini berbahan Composite atau Polymeric. Spesifikasi isolator ini dapat dilihat pada tabel 4.19. Spesifikasi isolator Changgong FXBZ-500/180-C didapatkan dari website www.polymericinsulators.com/sale-7712558-composite-polymeric-silicone-rubber-insulator-500kv-creepage-distance-17600mm.html [18].

Tabel 4.19 Spesifikasi Isolator Changgong Model FXBZ-500/180-C

Rating Tegangan (kV)	500
Tegangan Full wave Impulse (kV)	2950
Tegangan Wet Switching Impulse (kv)	1750
Tegangan Wet Power Frequency selama 1 min(kV)	700
Berat (kg)	40,5
Beban Mekanik (kN)	180
Minimum Creepage (mm)	22700



Gambar 4.8 Isolator Changgong Model FXBZ-500/180-C [18]

Gambar 4.8 adalah isolator changgong 500 kV HVDC. Isolator ini merupakan isolator tipe *suspension/tension* yang umumnya digunakan pada transmisi saluran udara dan gardu induk. Terdapat dua *corona ring* pada kedua ujung pada isolator ini. Pemilihan isolator ini berdasarkan dari jenis bahan yaitu komposit atau polimer. Isolator yang berbahan polimer memiliki kelebihan dibandingkan bahan keramik atau porcelain. Kelebihan isolator jenis ini adalah dengan kekuatan mekanik yang sama dengan jenis lain, isolator ini lebih ringan. Kemudian isolator ini tidak mudah pecah dan kekuatan dielektriknya lebih besar. Untuk biaya pemeliharaannya juga lebih murah dibanding dengan jenis lain. Namun, isolator ini harganya lebih mahal dari isolator jenis lain.

4.10 Bill of Quantity

Jumlah Peralatan dan spesifikasi perlatan pada gardu induk atau *converter station* pada sistem transmisi HVDC 500 kV Kalimantan dapat dilihat pada tabel-tabel berikut. Tabel ini berisi nama-nama peralatan yang dibutuhkan pada suatu *converter station* beserta spesifikasi dan jumlahnya. Jumlah peralatan pada *converter station* Samarinda dapat dilihat pada tabel 4.20.

Tabel 4.20 Jumlah Peralatan pada *Converter Station* Samarinda

No	Nama Bagian	Spesifikasi	Jumlah
1	Trafo Konverter	345/250 kV, S = 866.9 MVA	2
2	Thyristor Valves	250 kV , In = 3000 A , 50 Hz	2
3	Smoothing Reactor	500 kV, In = 3000 A L = 596,8 mH	1
4	Kapasitor Bank	345 kV, C = 16,98 μF	1
5	Filter	Low Pass Filter. C1 = 16,98 μF , C2 = 6,685 μF , L=136,4 μF , R = 261,87 ohm High Pass Filter, C = 6,685 μF , L=13,6 μF , R=83,32 ohm	2
6	Circuit Breaker		
	345 kV	BIL = 1300 kV, In = 4000 A , Isc = 63 kA	6
	500 kV	BIL = 1550 kV, In = 5000 A, Ip = 170 kA	1
7	Surge Arrester		
	345 kV	BIL = 1740 kV	2
	250 kV	BIL = 1260 kV	4
	500 kV	BIL = 2320 kV	3
8	Busbar	Iac = 3260, Idc = 3745	2

Sama halnya dengan *converter station* Samarinda, jumlah peralatan pada *converter station* sisi inverter Banjarmasin hampir sama hanya berbeda level tegangannya. Jumlah peralatan pada *converter station* sisi inverter Banjarmasin dapat dilihat pada tabel 4.21.

Tabel 4.21 Jumlah Peralatan pada *Converter Station* Sisi Inverter Banjarmasin

No	Nama Bagian	Spesifikasi	Jumlah
1	Trafo Konverter	230/250 kV, S = 866.9 MVA	2
2	Thyristor Valves	250 kV , In = 3000 A , 50 Hz	2
3	Smoothing Reactor	500 kV, In = 3000 A L = 596,8 mH	1
4	Kapasitor Bank	230 kV, C = 40,16 μF	1
5	Filter	Low Pass Filter. C1 = 167,197 μF , C2 = 15,04 μF , L=60,6 μF , R = 116,36 ohm High Pass Filter, C = 15,04 μF , L=6,1 μF , R=37,03 ohm	2
6	Circuit Breaker		
	230 kV	BIL = 1050 kV, In = 3150 A , Isc = 63 kA	6
	500 kV	BIL = 1550 kV, In = 5000 A, Ip = 170 kA	1
7	Surge Arrester		
	230 kV	BIL = 1050 kV	2
	250 kV	BIL = 1260 kV	4
	500 kV	BIL = 2320 kV	3
8	Busbar	Iac = 3260, Idc = 3745	2

Untuk jumlah peralatan pada *converter station* sisi rectifier Banjarmasin dapat dilihat pada tabel 4.22. Pada *converter station* ini jumlah peralatannya sama dengan *converter station* Samarinda. Hal yang membedakan adalah kapasitas dari trafo konverter dan nilai dari kapasitor banknya.

Tabel 4.22 Jumlah Peralatan pada *Converter Station* Sisi Rectifier Banjarmasin

No	Nama Bagian	Spesifikasi	Jumlah
1	Trafo Konverter	345/250 kV, S = 759 MVA	2
2	Thyristor Valves	250 kV , In = 3000 A , 50 Hz	2
3	Smoothing Reactor	500 kV, In = 3000 A L = 596,8 mH	1
4	Kapasitor Bank	345 kV, C = 14,34 μF	1
5	Filter	Low Pass Filter. C1 = 16,98 μF , C2 = 6,685 μF , L=136,4 μF , R = 261,87 ohm High Pass Filter, C = 6,685 μF , L=13,6 μF , R=83,32 ohm	2
6	Circuit Breaker		
	345 kV	BIL = 1300 kV, In = 4000 A , Isc = 63 kA	6
	500 kV	BIL = 1550 kV, In = 5000 A, Ip = 170 kA	1
7	Surge Arrester		
	345 kV	BIL = 1740 kV	2
	250 kV	BIL = 1260 kV	4
	500 kV	BIL = 2320 kV	3
8	Busbar	Iac = 3260, Idc = 3745	2

Untuk jumlah peralatan pada *converter station* Pontianak dapat dilihat pada tabel 4.23. Pada *converter station* ini jumlah peralatannya sama dengan *converter station* sisi inverter Banjarmasin. Hal yang membedakan adalah kapasitas dari trafo konverter dan nilai dari kapasitor banknya.

Tabel 4.23 Jumlah Peralatan pada *Converter Station* Pontianak

No	Nama Bagian	Spesifikasi	Jumlah
1	Trafo Konverter	230/250 kV, S = 759 MVA	2
2	Thyristor Valves	250 kV , In = 3000 A , 50 Hz	2
3	Smoothing Reactor	500 kV, In = 3000 A L = 596,8 mH	1
4	Kapasitor Bank	230 kV, C = 35,578 μF	1
5	Filter	Low Pass Filter, C1 = 167,197 μF , C2 = 15,04 μF , L=60,6 μF , R = 116,36 ohm High Pass Filter, C = 15,04 μF , L=6,1 μF , R=37,03 ohm	2
6	Circuit Breaker		
	230 kV	BIL = 1050 kV, In = 3150 A , Isc = 63 kA	6
	500 kV	BIL = 1550 kV, In = 5000 A, Ip = 170 kA	1
7	Surge Arrester		
	230 kV	BIL = 1050 kV	2
	250 kV	BIL = 1260 kV	4
	500 kV	BIL = 2320 kV	3
8	Busbar	Iac = 3260, Idc = 3745	2

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Spesifikasi peralatan sistem transmisi 500 kV HVDC Kalimantan ditentukan dari data simulasi sistem dan memilih rating dari standard atau produk yang telah ada.

1. Spesifikasi trafo konverter ditentukan berdasarkan tegangan sisi sekundernya 250 kV dan arus nominal. Maka sesuai perhitungan, kapasitas dari trafo konverter adalah 759 MVA dan 866 MVA
2. Berdasarkan simulasi sistem, spesifikasi *thyristor valves* adalah 250 kV, 3000 A, 50 Hz.
3. Berdasarkan data simulasi sistem, spesifikasi *smoothing reactor* adalah 500 kV, 3000 A, $L = 596,8$ mH.
4. Berdasarkan perhitungan, suplai daya yang dibutuhkan pada *converter station* Samarinda adalah 634,978 Mvar, pada *converter station* Banjarmasin sisi inverter adalah 675,263 Mvar, pada *converter station* Banjarmasin sisi rectifier adalah 536,137 Mvar dan pada *converter station* Pontianak adalah 591,268 Mvar.
5. Berdasarkan data simulasi sistem, spesifikasi HVDC *disconnector* adalah 500 kV dengan rating arus 6600 A.
6. Dari data arus hubung singkat pada sisi AC yaitu 45 kA, spesifikasi *circuit breaker* 345 kV adalah 63 kA, *circuit breaker* 230 kV adalah 63 kA. Sedangkan arus hubung singkat sisi DC adalah 140 kA maka spesifikasi *circuit breaker* 500 kV adalah 170 kA.
7. *Surge arrester* ditentukan berdasarkan level tegangannya. Spesifikasi *surge arrester* 345 kV adalah dengan BIL 1740 kV, *surge arester* 230 kV dengan BIL 1050 kV, *surge arrester* 250 kV dengan BIL 1260 kV dan *surge arrester* 500 kV dengan BIL 2320 kV.
8. Dari data arus nominal pada bus, arus nominal terbesar adalah 3167 A, maka spesifikasi *busbar* adalah rating arus AC 3260 A dan rating arus DC 3745 A.
9. Berdasarkan simulasi sistem, arus yang mengalir pada konduktor adalah 1226 A, sehingga spesifikasi konduktor adalah 1272 A dengan kode nama bobolink.
10. Isolator ditentukan berdasarkan level tegangannya. Spesifikasi isolator adalah dengan BIL 2950 kV.

5.2 Saran

Saran yang diberikan pada penelitian ini adalah Tugas Akhir ini dapat dilanjutkan dengan melakukan perencanaan saluran transmisi dengan perhitungan yang lebih lengkap. Kemudian simulasi yang dibuat dapat dimodelkan dengan tipe saluran HVDC yang berbeda agar menemukan sistem yang cocok untuk diterapkan pada sistem kelistrikan Kalimantan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] KEPMENESDM, "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik 2016-2025," vol. 2026, no. 1415, 2016.
- [2] Sood, Vijay K. "*HVDC and FACTS CONTROLLERS Application of Static Converters in Power Systems*". Boston. Kluwer Academic Publisher. 2004.
- [3] R. Faizal, M. Nurdin, N. Hariyanto, S. Pack, dan J. Plesch, "Sumatra-Java HVDC transmission system modelling and system impact analysis," 2015.
- [4] M. O. Faruque, Y. Zhang, dan V. Dinavahi, "Detailed Modeling of CIGRÉ HVDC Benchmark System Using PSCAD/EMTDC and PSB/SIMULINK," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 21, no. 1, hlm. 378–387, Jan 2006.
- [5] P. KUNDUR, "Power System Stability and Control," California, 1993.
- [6] J. Arrillaga, Y. H. Liu, dan N. R. Watson, "*Flexible Power Transmission*", Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [7] Siemens, "*High Voltage Direct Current Transmission*", 91058 Erlangen, 2008.
- [8] ALSTOM, "*HVDC for Beginners and Beyond*", ALSTOM Grid Worldwide Contact Centre, 2010.
- [9] GE Grid Solution, "*Switchgear fo Direct Current (DC) Aplications. Disconnect, Switches, and Circuit Breaker*", La Defense Cedex, 2017.
- [10] B. L. Tohing, "*Peralatan Tegangan tinggi*", Erlangga, 2012.
- [11] J. Ueda, T. Ishida, dan T. Yoshizumi, "*Development of the 500-kV DC Converter System*", Hitachi Review Vol.47, 1998.
- [12] ABB "*Type PMI-B, 362 kV, up to 63 kA Dead Tank Circuit Breaker*", Pennsylvania, 2012.
- [13] Siemens, "*From 72.5 kV up to 700 kV High-Voltage Circuit Breakers*", Erlangen, 2012.
- [14] Siemens, "*High-Voltage Circuit-Breaker 3AP 1/2 72.5 kV up to 550 kV*", Berlin, 2014 .
- [15] Siemens, "*High-voltage Surge Arresters Product Guide*", Erlangen, 2014.
- [16] BRUKER Hydrostatic Extrusions Ltd, "*Cuponal Busbar Technical Data : AC/DC Current Ratings*", North Murtion.

- [17] Priority Wire & Cable,INC ,“*ACSR - Alumunium Conductor Steel Reinforced*”, Little Rock, 2013.
- [18] China Kayi Industrial, “*Composite Polymeric Silicone Rubber Insulator 500kv Creepage Distance 17600mm*”, <URL: www.polymericinsulators.com/sale-7712558-composite-polymeric-silicone-rubber-insulator-500kv-creepage-distance-17600mm.html>. Diakses pada Mei 2018.

BIODATA PENULIS



Marta Nur Alfian lahir di Bojonegoro Jawa Timur pada tanggal 08 Maret 1996. Penulis adalah anak pertama dari dua bersaudara. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN Tapelan (2001-2008), SMP Negeri 1 Bojonegoro (2008-2011), SMA Negeri 1 Bojonegoro (2011-2014). Kemudian melanjutkan pendidikan jenjang perguruan tinggi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS), departemen Teknik Elektro dengan bidang studi Teknik Sistem Tenaga. Semasa kuliah, penulis aktif dalam organisasi HIMATEKTRO departemen lingkaran kampus. Selain itu, penulis juga aktif dalam organisasi TPKI JMMI ITS.

