

**ANALISIS *MATRIX CONVERTER*
PADA *SOLID STATE TRANSFORMER*
DI GARDU TRAKSI KERETA REL LISTRIK**

(Tesis)

**Oleh
WAHYU CAHYO HIDAYAT
NPM 2225031013**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

**ANALISIS *MATRIX CONVERTER*
PADA *SOLID STATE TRANSFORMER*
DI GARDU TRAKSI KERETA REL LISTRIK**

Oleh

WAHYU CAHYO HIDAYAT

Tesis

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
MAGISTER TEKNIK ELEKTRO**

Pada

**Program Pascasarjana Magister Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

ANALISIS *MATRIX CONVERTER* PADA *SOLID STATE TRANSFORMER* DI GARDU TRAKSI KERETA REL LISTRIK

Oleh

WAHYU CAHYO HIDAYAT

Penelitian ini bertujuan merancang dan menganalisis *solid-state transformer (SST)* sebagai alternatif transformator konvensional pada gardu traksi Kereta Rel Listrik (KRL) 1.500 V DC melalui integrasi *direct matrix converter (DMC)* dan *Vienna rectifier*. Kontribusi utama meliputi perumusan topologi SST berbasis *DMC–Vienna rectifier*, penerapan modulasi Venturini untuk menghasilkan tegangan AC berfrekuensi lebih tinggi, serta pengujian tiga skema konversi, yaitu konversi langsung, konversi tidak langsung melalui penalaan manual, dan konversi tidak langsung dengan penalaan otomatis. Usulan sistem memanfaatkan kemampuan *DMC* untuk menurunkan tegangan sekaligus menaikkan frekuensi tanpa DC-link besar, yang dikombinasikan dengan *Vienna rectifier* berbasis *vector control* untuk menghasilkan tegangan DC stabil sesuai IEC 60850. Metodologi penelitian meliputi studi literatur, observasi gardu traksi, pengumpulan data teknis, pemodelan dalam MATLAB/Simulink, dan pengujian performa pada tiga skenario. Hasil menunjukkan bahwa konfigurasi *DMC–Vienna rectifier* mampu menyediakan tegangan DC yang stabil untuk beban traksi, sedangkan transformator frekuensi menengah dengan penalaan otomatis pada *Vienna rectifier* meningkatkan stabilitas regulasi pada berbagai kondisi beban dan indeks modulasi. Disimpulkan bahwa SST berpotensi kuat menggantikan transformator konvensional pada gardu traksi modern.

Kata Kunci: *solid-state transformer, direct matrix converter, modulasi Venturini, high-frequency transformer, Vienna rectifier, elektrifikasi kereta rel listrik.*

ABSTRACT

ANALYSIS OF A MATRIX CONVERTER IN A SOLID-STATE TRANSFORMER FOR ELECTRIC RAILWAY TRACTION SUBSTATIONS

Oleh

WAHYU CAHYO HIDAYAT

This study aims to design and analyze a solid-state transformer (SST) as an alternative to conventional transformers for 1.5 kV DC electric railway traction substations by integrating a direct matrix converter (DMC) with a Vienna rectifier. The main contributions include the formulation of a DMC–Vienna rectifier–based SST topology, the application of Venturini modulation to generate higher-frequency AC voltage, and the evaluation of three conversion schemes: direct conversion, indirect conversion with manual tuning, and indirect conversion with automatic tuning. The proposed system exploits the capability of the DMC to perform voltage step-down while increasing frequency without a bulky DC-link, combined with a vector-controlled Vienna rectifier to produce a stable DC output compliant with IEC 60850. The research methodology consists of a literature review, traction substation observation, technical data acquisition, MATLAB/Simulink modeling, and performance evaluation under three operating scenarios. Simulation results demonstrate that the DMC–Vienna rectifier configuration can provide stable DC voltage for traction loads, while the use of a medium-frequency transformer with automatic tuning enhances regulation stability across varying load conditions and modulation indices. These findings demonstrate the feasibility of SST implementation for modern traction substations.

Keywords: *solid-state transformer, direct matrix converter, modulasi Venturini, high-frequency transformer, Vienna rectifier, elektrifikasi kereta rel listrik.*

Judul Tesis

: **ANALISIS *MATRIX CONVERTER*
PADA *SOLID STATE*
TRANSFORMER DI GARDU
TRAKSI KERETA REL LISTRIK**

Nama Mahasiswa

: **Wahyu Cahyo Hidayat**

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2225031013

Program Studi

: Magister Teknik Elektro

Fakultas

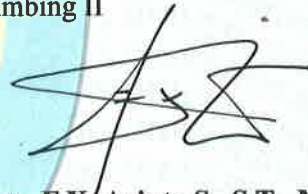
: Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II



Dr. Eng. Ir. Charles R Harahap, S.T., M.T.

Dr. Eng. F.X. Arinto S., S.T., M.T.

NIP 19691211 199903 1 001

NIP 19691219 199903 1 002

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro



Prof. Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T.

NIP 19651021 199512 2 001

MENGESAHKAN

1. Komisi Penguji 1

Ketua Komisi Penguji

(Pembimbing I)

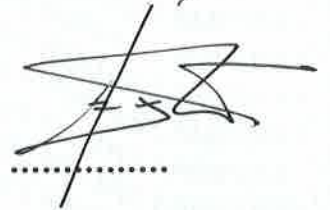
: **Dr. Eng. Ir. Charles R Harahap, S.T., M.T.**



Sekretaris Komisi Penguji

(Pembimbing II)

: **Dr. Eng. F.X. Arinto S., S.T., M.T.**



Anggota Komisi Penguji

(Penguji I)

: **Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc.**



Anggota Komisi Penguji

(Penguji II)

: **Dr. Herman H Sinaga, S.T., M.T.**



Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.)

NIP 19750928/200112 1 002



2. Direktur Program Pascasarjana

Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.

NIP 19640326 198902 1 001



Tanggal Lulus Ujian Tesis: **4 Desember 2025**

LEMBAR PERNYATAAN

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Tesis yang saya susun sebagai syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik dan Program Pascasarjana Magister Teknik Elektro seluruhnya merupakan hasil karya sendiri.

Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan Tesis yang saya kutip dari hasil karya hasil orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah dan etika penulisan ilmiah.

Tesis dengan judul "*Analisis Matrix Converter pada Solid State Transformer di Gardu Traksi Kereta Rel Listrik*" dapat diselesaikan berkat bimbingan dan motivasi dari pembimbing-pembimbing saya, yaitu:

1. Dr. Eng. Ir. Charles R Harahap, S.T., M.T.
2. Dr. Eng. F.X. Arinto S., S.T., M.T.

Saya ucapkan terima kasih yang sebesar besarnya kepada semua pihak, khususnya kedua dosen pembimbing dan Bapak/Ibu Dosen Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Lampung yang banyak memberikan ilmu pengetahuan, bimbingan dan motivasi.

Apabila dikemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian tesis ini bukan hasil karya sendiri atau adanya plagiat dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi pencabutan gelar akademik yang saya sandang dan sanksi-sanksi lainnya sesuai dengan peraturan perundangan yang berlaku.



Bandar Lampung, 4 Desember 2025

WAHYU CAHYO HIDAYAT

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Bandar Lampung, 10 Juni 1996. Penulis merupakan anak tunggal dari pasangan Bapak Drs. Hi. Maulan dan Ibu Hj. Supiati, S.Pd. Penulis mulai menempuh pendidikan formal di Sekolah Dasar Negeri 2 Labuhan Ratu Kota Bandar Lampung lulus tahun 2007, Sekolah Menengah Pertama Negeri 22 Bandar Lampung lulus tahun 2010, Sekolah Menengah Atas Negeri 5 Bandar Lampung lulus tahun 2013, dan diterima di Universitas Lampung di Jurusan Teknik Elektro pada tahun 2013, lalu meraih gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada tahun 2018, serta berkarir sebagai Pegawai Negeri Sipil Fungsional Inspektur Ketenagalistrikan pada Pemerintah Provinsi Lampung sejak 2019 s.d. sekarang. Selama menjadi mahasiswa sarjana, penulis pernah menjadi Asisten Praktikum Elektronika Daya, mengikuti Praktik Kerja Lapangan (PKL) tahun 2016 di PT PLN (Persero) Sektor Pembangkitan Tarahan Unit 3 dan 4 dengan laporan berjudul "Pengaturan Kecepatan Motor AC 3 Fasa Untuk Mengatur Mobilitas Pemakaian Batu Bara Pada Coal Silo PLTU Tarahan Dengan Unit *Variable Speed Drive (VSD)* Tosvert VF-A7", serta menyusun Tugas Akhir (Skripsi) sebagai syarat kelulusan sarjana berjudul "Audit Intensitas Cahaya dan Suhu Udara Kereta Api Penumpang Jarak Jauh Lintas Tanjungkarang-Kertapati Sesuai Standar Pelayanan Minimum (SPM) Angkutan Orang dan Peluang Penghematan Biaya Pembangkitan Listrik". Pada tahun 2022 penulis melakukan studi lanjut pada Program Pascasarjana Teknik Elektro di Universitas Lampung, serta melakukan Penelitian (Tesis) berjudul "Analisis *Matrix Converter* pada *Solid State Transformer* di Gardu Traksi Kereta Rel Listrik" di bawah bimbingan Bapak Dr. Eng. Ir. Charles R Harahap, S.T., M.T., dan Bapak Dr. Eng. F.X. Arinto S., S.T., M.T.

Bandar Lampung, 4 Desember 2025

Penulis



PERSEMBAHAN

Dengan Ridho Allah SWT, teriring sholawat kepada Nabi Muhammad SAW.
Karya Tulis ini ku persembahkan untuk :

Bapak dan Ibu Tercinta,

Sebagai tanda bakti, hormat dan terima kasih yang tiada hingga kupersembahkan tesis ini untuk kedua orangtua tercinta Drs. Hi. Maulan dan Hj. Supiati, S.Pd., yang selalu senantiasa memberikan saya kasih sayang tiada tara, dan dukungan. Semoga selalu dalam lindungan Allah S.W.T.

Belahan jiwaku,

Kakanda persembahkan tesis ini kepada adindaku Agnis Pinasti, S.Pd., Gr. Terima Kasih senantiasa memberikan semangat dalam proses penyelesaian tesis ini. Semoga doa dan segala hal yang terbaik yang adinda berikan dapat menjadikan kakanda sebagai pribadi yang bermanfaat.

Dosen Teknik Elektro Unila,

Selalu membimbing, mengajarkan, memberikan saran, baik secara akademis maupun non akademis.

Keluarga Besar S1 TE 2013 Unila,

Yang kebersamai proses perjalanan awalku di dunia kampus, menguatkan di masa ragu, dan menyatukan langkah dalam satu tujuan.

Keluarga Besar MTE 2022 Unila,

Yang selalu memberi semangat, dukungan dalam proses yang sangat panjang, dan selalu berdiri bersama dalam perjuangan menuju kesuksesan.

Almamaterku,

Universitas Lampung





MOTTO

“Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.”
(QS. Alam Nasyroh: 5)

“Somewhere, something incredible is waiting to be known.”
(Di suatu tempat, ada sesuatu yang luar biasa yang menunggu untuk diketahui.)
— Carl Sagan (Ilmuwan Astronomi)

“The present is theirs; the future, for which I really worked, is mine.”
(Masa kini adalah milik mereka; masa depan yang sebenarnya saya perjuangkan,
adalah milik saya.)
— Nikola Tesla (Fisikawan)



SANWACANA

Dengan mengucapkan puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan berkat kasih dan karunia-Nya, Saya akhirnya bisa menyelesaikan penulisan Tugas Akhir Tesis yang berjudul “**ANALISIS *MATRIX CONVERTER* PADA *SOLID STATE TRANSFORMER* DI GARDU TRAKSI KERETA REL LISTRIK**” ini dapat diselesaikan ditengah tantangan dan aktivitas pekerjaan rutin penulis di kantor. Tugas akhir tesis ini merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik (M.T.) pada Program Studi Magister Teknik di Universitas Lampung.

Tugas akhir Tesis ini dapat diselesaikan dengan bantuan, bimbingan, dan petunjuk dari semua pihak, mulai dari proses perkuliahan dan bimbingan sampai pada saat penulisan laporan. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM selaku Rektor Universitas Lampung;
2. Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung;
3. Prof. Dr. Ir. Sri Ratna Sulistiyanti, M.T. selaku Ketua Program Studi Program Magister Teknik Elektro Universitas Lampung
4. Dr. Eng. Ir. Charles Ronald Harahap, S.T., M.T. selaku Pembimbing Utama dan Dr. Eng. F.X Arinto Setiawan, S.T., M.T., selaku Pembimbing Kedua yang sudah memberikan bimbingan, saran, dan arahan dalam proses penyelesaian tugas akhir Tesis ini yang telah menyediakan waktu, tenaga, pikiran dan kesempatan untuk mengarahkan penulis dalam menyelesaikan tesis ini.
5. Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc., Selaku Penguji Utama sekaligus dosen Pembimbing Akademik dan Dr. Herman H Sinaga, S.T., M.T., selaku Penguji Pendamping selama proses studi Program Magister di Universitas Lampung. Terima kasih saran dan masukan untuk perbaikan tugas akhir Tesis ini.
6. Bapak dan Ibu dosen pengajar pada Program Studi Program Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah membekali penulis dengan ilmu, bimbingan, arahan, dan motivasi selama mengikuti perkuliahan.

7. Rekan-rekan seperjuangan Mahasiswa MTE Angkatan 2022 terima kasih saya ucapkan buat kebersamaan dalam susah senang selama menjalani masa study di Universitas Lampung.
8. Rekan-rekan kerja di Dinas ESDM Provinsi Lampung yang senantiasa membantu dan mendukung pelaksanaan pekerjaan saya, terutama selama saya menyelesaikan studi Magister.

Dalam penulisan tugas akhir Tesis ini, masih ada kekurangan yang harus diperbaiki untuk ke depannya, oleh karena itu kritik yang membangun dan saran yang diberikan akan sangat saya nantikan untuk perbaikan penulisan tugas akhir ini dan tulisan-tulisan lain berikutnya. Akhir kata, saya mengucapkan terimakasih dan saya berharap tugas akhir ini bisa bermanfaat untuk para pembaca.

Bandar Lampung, 4 Desember 2025

Penulis,



WAHYU CAHYO HIDAYAT

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT.....	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
LEMBAR PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
MOTTO	ix
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Tujuan Penelitian	3
1.3. Manfaat Penelitian	3
1.4. Rumusan Masalah.....	3
1.5. Batasan Masalah	4
1.6. Hipotesis	4
1.7. Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1. Sistem Elektrifikasi Perkeretaapian	6
2.1.1. Tipe Catu Daya Elektrifikasi Perkeretaapian	7
2.1.2. Sistem Elektrifikasi Perkeretaapian DC	8
2.2. Penelitian Terdahulu	10
2.3. <i>Solid State Transformer (SST)</i>	13
2.3.1. Prinsip <i>Solid State Transformer (SST)</i>	15
2.3.1.1. Tahap Tegangan Menengah	15
2.3.1.2. Tahap Isolasi	15
2.3.1.3. Tahap Tegangan Rendah.....	16
2.3.2. Topologi <i>Solid State Transformer (SST)</i>	16
2.3.3. Pengaplikasian SST pada Traksi Perkeretaapian	18
2.4. Konverter AC–AC (<i>AC-AC Converter</i>).....	19

2.5. <i>Matrix Converter</i>	21
2.5.1. <i>Direct Matrix Converter</i>	22
2.5.2. Modulasi <i>Venturini</i> pada <i>Direct Matrix Converter</i>	24
2.6. <i>Vienna Rectifier</i>	28
III. METODE PENELITIAN	30
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	30
3.2. Alat Penelitian	30
3.3. Tahap Pelaksanaan Penelitian	30
3.3.1. Studi Literatur	31
3.3.2. Observasi	31
3.3.3. Pengumpulan Data	31
3.3.4. Perancangan dan Analisis Simulasi	32
3.3.5. Pengujian Simulasi	32
3.3.6. Penyusunan dan Analisis Data Hasil Pengujian	32
3.4. Diagram Alir/ <i>Flowchart</i> Penelitian	33
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	34
4.1. Hasil Perancangan Simulasi	34
4.1.1. Pemanfaatan Kontrol Modulasi <i>Venturini</i> pada <i>Direct Matrix Converter</i> Tiga Fasa sebagai <i>Front-End Converter</i>	37
4.1.2. Transformator Frekuensi Menengah (<i>Medium Frequency Transformer/MFT</i>)	42
4.1.3. Desain Sistem Kontrol Berbasis Kontrol Vektor pada <i>Vienna Rectifier</i> sebagai <i>Back End Converter</i>	43
4.1.3.1. Transformasi Tegangan, Arus, dan <i>Phase Lock Loop (PLL)</i> pada Kontrol <i>Vienna Rectifier</i>	44
4.1.3.2. Kontrol Tegangan DC (<i>DC Voltage Controller</i>)	46
a. Kontrol Tegangan DC Penalaan Manual	46
b. Kontrol Tegangan DC Penalaan Otomatis	47
4.1.3.3. Kontrol Arus pada Sumbu <i>d</i> dan <i>q</i>	48
4.1.3.4. Generator PWM	49
4.2. Pemodelan Daya Kereta Rel Listrik	52
4.2.1. Perhitungan Berdasarkan Data Teknis Propulsi	52
4.2.2. Perhitungan Berdasarkan Data <i>Headway</i>	53
4.2.3. Kondisi Pengujian Rangkaian	54
4.3. Hasil Simulasi dan Analisis	55
4.3.1. Pengujian Metode Konversi Langsung	55
4.3.2. Pengujian Metode Konversi Tak Langsung dengan Penalaan Manual	57
4.3.3. Pengujian Metode Konversi Tak Langsung dengan Penalaan Otomatis	59
V. KESIMPULAN DAN SARAN	62
5.1. Kesimpulan	62
5.2. Saran	63
DAFTAR PUSTAKA	64

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1. Parameter modulasi Venturini untuk <i>direct matrix converter</i> tiga fasa	38
Tabel 4.2. Parameter <i>Medium Frequency Transformer</i> (MFT) pada pengujian SST traksi	42
Tabel 4.3. Parameter <i>Vienna rectifier</i> pada pengujian SST traksi	43
Tabel 4.4. Spesifikasi sistem propulsi kereta rel listrik <i>mass rapid transit</i> Jakarta.....	52
Tabel 4.5. Tegangan nominal dan batas yang diizinkan pada sistem elektrifikasi DC sesuai standar IEC 60850	52
Tabel 4.6. Perhitungan beban listrik kereta rel listrik berdasar data teknis propulsi.....	52
Tabel 4.7. Parameter perhitungan berdasarkan data <i>headway</i>	53
Tabel 4.8. Nilai beban resistif (<i>dummy load</i>) berdasar data daya listrik KRL.....	55
Tabel 4.9. Hasil pengujian rangkaian gardu traksi SST metode konversi langsung	55
Tabel 4.10. Hasil pengujian rangkaian gardu traksi SST menggunakan metode konversi tidak langsung dengan penalaan manual pada berbagai kondisi beban.....	57
Tabel 4.11. Hasil pengujian rangkaian gardu traksi SST menggunakan metode konversi tidak langsung dengan penalaan otomatis pada berbagai kondisi beban.....	60

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Ilustrasi skema tipikal sistem elektrifikasi DC kereta api	9
Gambar 2.2. Diagram tipikal gardu traksi DC pada jalur kereta rel listrik	9
Gambar 2.3. Struktur prototipe SST tegangan menengah buatan ABB	11
Gambar 2.4. (a) Konfigurasi transformator konvensional dengan frekuensi rendah (<i>low frequency transformer</i> –LFT, (b) Konfigurasi transformator <i>solid-state</i> (<i>solid-state transformer</i> –SST)	14
Gambar 2.5. Ilustrasi arsitektur tipikal konversi daya pada <i>solid-state transformer</i> (SST) berbasis topologi tiga tahap (<i>three-stage topology</i>)	15
Gambar 2.6. Konfigurasi Topologi SST (a) satu tahap; (b) dua tahap dengan sambungan LVDC; (c) dua tahap dengan sambungan HVDC; (d) tiga tahap	17
Gambar 2.7. Infografis potensi penggunaan <i>solid-state transformer</i>	18
Gambar 2.8. Skema sistem traksi pada sarana kereta rel listrik berbasis SST	19
Gambar 2.9. Topologi <i>Direct Matrix Converter</i> (DMC) tiga fasa dengan sembilan saklar dua arah untuk konversi langsung AC–AC tanpa tahap <i>DC-link</i> , topologi diadopsi dari makalah ulasan (<i>review</i>) Rodriguez et al. (2012)	23
Gambar 2.10. Gelombang tipikal <i>direct matrix converter</i> (DMC) dengan modulasi Venturini dimana (a) tegangan keluaran v_{aN} dan referensinya v_a^* , serta (b) arus keluaran i_a	27
Gambar 2.11. Skema tipikal rangkaian penyearah tipe <i>Vienna</i>	28
Gambar 3.1. Diagram alir (<i>flowchart</i>) penelitian	33
Gambar 4.1. Rangkaian suplai traksi berbasis SST dengan konversi langsung menggunakan <i>three-phase direct matrix converter</i> untuk konversi LFAC–MFAC dan <i>Vienna rectifier</i> MFAC–DC menuju beban resistif setara beban listrik kereta rel listrik	35
Gambar 4.2. Rangkaian suplai traksi berbasis SST dengan konversi tidak langsung menggunakan <i>three-phase direct matrix converter</i> untuk konversi LFAC–MFAC, MFT (<i>medium frequency transformer</i>), dan <i>Vienna rectifier</i> untuk konversi AC–DC menuju beban resistif setara beban listrik kereta rel listrik	36
Gambar 4.3. Topologi <i>direct matrix converter</i> tiga fasa	37

Gambar 4.4.	Diagram blok pembangkitan sinyal gate direct <i>matrix converter</i> berbasis matriks <i>duty cycle</i> yang dibentuk dari referensi tegangan masukan dan keluaran dengan modulasi <i>Venturini</i>	38
Gambar 4.5.	Blok diagram pemodelan <i>duty cycle</i> dari modulasi <i>Venturini</i> dengan <i>third harmonic injection</i>	39
Gambar 4.6.	<i>Pulse generation</i> untuk mengatur <i>timer</i> dan waktu <i>sampling</i> pada modulasi <i>Venturini</i>	40
Gambar 4.7.	Bentuk gelombang tegangan <i>matrix converter</i> sebagai <i>front-end</i> , menampilkan cuplikan interval 0–0,025 detik dari total waktu pengujian 1,5 detik: tegangan masukan AC tiga fasa pada frekuensi 50 Hz (atas), tegangan keluaran AC <i>matrix converter</i> pada frekuensi 75 Hz sebelum proses penyaringan (tengah), dan tampilan tegangan keluaran AC setelah penyaringan menggunakan <i>low-pass filter</i> orde dua (bawah).....	41
Gambar 4.8.	Bentuk gelombang arus <i>matrix converter</i> sebagai <i>front-end</i> , menampilkan cuplikan interval 0–0,25 detik dari total waktu pengujian 1,5 detik: arus masukan AC tiga fasa pada frekuensi 50 Hz (atas), arus keluaran AC <i>matrix converter</i> pada frekuensi 75 Hz sebelum proses penyaringan (tengah), dan arus keluaran AC setelah penyaringan menggunakan <i>low-pass filter</i> orde dua (bawah)	41
Gambar 4.9.	Bentuk gelombang sinyal <i>switching</i> (pensaklaran) S1–S9 modulasi <i>Venturini</i> dari <i>matrix converter</i>	42
Gambar 4.10.	Topologi <i>Vienna Rectifier</i> sebagai <i>back-end converter</i>	43
Gambar 4.11.	Transformasi tegangan tiga fasa (abc) ke kerangka acuan sinkron (<i>dq</i>) menggunakan transformasi Clarke–Park pada sistem kontrol <i>Vienna Rectifier</i> . Sudut ωt diperoleh dari keluaran <i>Phase-Locked Loop</i> (pada Gambar 4.13 selanjutnya) sebagai referensi transformasi Park.....	44
Gambar 4.12.	Transformasi arus tiga fasa (abc) ke kerangka acuan sinkron (<i>dq</i>) pada sistem kontrol <i>Vienna Rectifier</i> . Transformasi ini menggunakan sudut ωt yang dihasilkan oleh PLL untuk memperoleh komponen arus i_d dan i_q sebagai variabel kontrol....	44
Gambar 4.13.	Struktur <i>Phase-Locked Loop</i> (PLL) pada desain sistem kontrol <i>Vienna Rectifier</i> . PLL menghasilkan sudut listrik θ_e dan frekuensi sudut ωt yang digunakan sebagai referensi sinkronisasi pada transformasi tegangan dan arus.....	44
Gambar 4.14.	Blok komponen <i>manual tuning</i> sebagai kontrol tegangan DC.....	46
Gambar 4.15.	Blok komponen <i>automatic tuning</i> sebagai kontrol tegangan DC	47
Gambar 4.16.	Blok komponen kontrol arus pada sumbu d (<i>d-axis current controller</i>) yang merupakan lanjutan blok kontrol tegangan DC berbasis PI	48
Gambar 4.17.	Blok komponen kontrol arus pada sumbu q (<i>q-axis current controller</i>).....	48
Gambar 4.18.	(a) Diagram blok transformasi Park invers beserta masukan dari hasil kontrol arus pada sumbu d-q (d_{out} dan q_{out}), nilai tegangan V_{dc} terukur. serta sudut rotasi (ωt) hasil dari PLL,	

	beserta (b) diagram blok Generator PWM untuk <i>switching</i> komponen <i>Vienna rectifier</i>	49
Gambar 4.19.	Bentuk gelombang sinyal <i>switching</i> generator PWM hasil simulasi untuk <i>switch</i> S1–S6 pada bagian <i>neutral point switch</i> di <i>Vienna Rectifier</i> , pada grafik memperlihatkan pola pensaklaran tiga fasa dalam proses konversi AC–DC.....	50
Gambar 4.20.	Bentuk gelombang karakteristik hasil keluaran DC yaitu tegangan, arus, dan daya dari <i>Vienna rectifier</i> sebagai <i>back end converter</i> yang mengkonversi MFAC menjadi DC.....	51
Gambar 4.21.	Grafik perbandingan nilai P_{grid} , P_{load} , efisiensi η , dan tegangan keluaran V_{load} pada tiga kondisi operasi (nominal, <i>one-hour rating</i> , dan <i>headway normal</i>) pada pengujian konversi langsung.....	56
Gambar 4.22.	Grafik hasil pengujian SST Traksi dengan metode konversi tak langsung (penalaan manual) menunjukkan perubahan P_{grid} , P_{load} , efisiensi η , dan V_{load} terhadap indeks modulasi (m) pada tiga kondisi operasi (nominal, <i>one-hour rating</i> , dan <i>headway normal</i>)	58
Gambar 4.23.	Hasil pengujian SST Traksi dengan metode konversi tak langsung (<i>auto tuning</i>) menunjukkan perubahan P_{grid} , P_{load} , efisiensi η , dan V_{load} terhadap indeks modulasi (m) pada tiga kondisi operasi (nominal, <i>one-hour rating</i> , dan <i>headway normal</i>)	60

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kereta api komuter merupakan moda transportasi yang melayani perpindahan penumpang di kawasan perkotaan maupun antara pusat kota dan wilayah penyangga perkotaan (*suburban*). Di Indonesia layanan ini umumnya menggunakan sarana kereta rel listrik (KRL) sebagai moda utama, selain varian lainnya seperti *Light Rail Transit (LRT)* dan *Mass Rapid Transit (MRT)*. Secara umum, sistem elektrifikasi kereta api di dunia menggunakan dua pendekatan utama, yaitu sistem arus searah (DC) dengan tegangan 750 V atau 1.500 V, serta sistem arus bolak-balik (AC) dengan tegangan 15 kV/16,7 Hz atau 25 kV/50 Hz. Untuk layanan komuter di Indonesia, sistem yang digunakan adalah elektrifikasi DC dengan tingkat tegangan 1.500 V.

Peningkatan kebutuhan transportasi massal di kawasan perkotaan berdampak pada pertumbuhan jumlah penumpang KRL dari tahun ke tahun. Hal ini mendorong operator untuk meningkatkan kapasitas layanan, antara lain melalui penambahan rangkaian, penambahan jumlah gerbong dalam satu rangkaian, penyesuaian panjang peron, serta penjadwalan perjalanan yang lebih padat. Sejalan dengan itu penggunaan *automatic block signaling* memungkinkan peningkatan frekuensi perjalanan melalui pengurangan jarak antar kereta api (*headway*), penggunaan *automatic block signaling* sendiri merupakan pengembangan dari *absolute block signaling* yang merupakan bentuk dasar pengaturan perjalanan kereta api [1], [2]. *Headway* yang semakin pendek membuat jumlah siklus akselerasi dan deselerasi meningkat, sehingga beban listrik pada gardu traksi pun bertambah [3], [4]. Dalam jangka panjang kondisi ini dapat menuntut peningkatan kapasitas gardu traksi. Namun ketersediaan ruang di kawasan perkotaan yang padat (terutama pada jalur kereta api bawah tanah) penambahan instalasi gardu traksi baru dapat menjadi kendala.

Pada fase deselerasi, KRL modern menghasilkan energi regeneratif yang secara teori dapat dikembalikan ke jaringan [5]. Namun, gardu traksi DC konvensional belum mampu menerima arus balik tersebut sehingga energi regeneratif tidak dapat dimanfaatkan secara optimal. Kondisi ini menegaskan perlunya teknologi gardu traksi yang lebih ringkas, modular, adaptif, dan cerdas, serta berpotensi mendukung aliran daya dua arah di masa mendatang. Sehingga dengan pemanfaatan komponen elektronika daya berbasis *solid-state*, maka *Solid State Transformer* (SST) dapat menawarkan keunggulan melalui pengoperasian pada tegangan AC berfrekuensi lebih tinggi yang memungkinkan pengurangan dimensi, sehingga bentuk fisiknya menjadi lebih ringkas [6]. Karakteristik ini sesuai dengan kebutuhan gardu traksi yang memiliki keterbatasan ruang dan berpotensi mengalami peningkatan kapasitas di masa depan. Selain itu, beragam varian SST menyediakan peluang untuk dikembangkan sebagai sistem yang mampu mengelola aliran daya dua arah.

Penelitian ini berfokus pada pengembangan varian SST unidirectional dengan mengintegrasikan *Direct Matrix Converter* (DMC) sebagai tahap AC–AC dan *Vienna Rectifier* sebagai tahap AC–DC pada catu daya Kereta Rel Listrik tegangan 1.500 Volt DC di gardu traksi. Penelitian ini menggunakan pemodelan di MATLAB-Simulink untuk menjalankan simulasi kinerja komponen *Direct Matrix Converter* (DMC) dengan modulasi *Venturini* dan *Vienna Rectifier* sebagai penyusun SST agar dapat dianalisis. Meskipun DMC mendukung aliran daya dua arah dalam domain AC, penggunaan *Vienna Rectifier* yang bersifat unidirectional membuat keseluruhan arsitektur hanya memungkinkan aliran daya dari sisi AC menuju sisi DC. Konfigurasi ini dipilih karena sesuai dengan kebutuhan utama gardu traksi. Peluang pengembangan penyearah dua arah dapat menjadi topik penelitian lanjutan untuk mendukung pemanfaatan energi regeneratif secara lebih optimal.

Pada akhirnya penulis berharap hasil penelitian ini tidak hanya bermanfaat untuk pembelajaran civitas akademika Universitas Lampung, namun juga dapat menjadi masukan bagi regulator, operator, dan pemangku kepentingan (*stakeholder*) dalam penelitian dan pengembangan teknologi perkeretaapian.

1.2. Tujuan Penelitian

Tujuan yang diharapkan pada pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang topologi *solid-state transformer (SST)* untuk konversi tenaga listrik pada gardu traksi Kereta Rel Listrik.
2. Menganalisis kinerja *matrix converter* dan *Vienna rectifier* sebagai topologi penyusun *solid-state transformer (SST)*.
3. Melakukan simulasi menggunakan Simulink Matlab untuk pengujian gardu traksi sesuai data teknis Kereta Rel Listrik.
4. Menganalisis potensi pemanfaatan *solid-state transformer (SST)* sebagai fasilitas pendukung elektrifikasi perkeretaapian.

1.3. Manfaat Penelitian

Penelitian *solid-state transformer (SST)* ini dapat dimanfaatkan sebagai masukan dalam pengaplikasian elektronika daya pada berbagai bidang, khususnya pada sistem elektrifikasi sektor transportasi perkeretaapian, serta menjadi dasar bagi pengembangan dan penelitian lanjutan terkait penerapan teknologi elektronika daya di sektor tersebut, sehingga kelak keunggulan *SST* dapat dimanfaatkan secara optimal dari sisi kinerja, efisiensi, dan fleksibilitas operasi.

1.4. Rumusan Masalah

Berdasarkan permasalahan yang telah diidentifikasi pada latar belakang penelitian, rumusan masalah dalam penelitian tugas akhir ini dirumuskan untuk mengarahkan pembahasan secara sistematis dan terfokus, yaitu sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang topologi *solid state transformer (SST)* untuk dimanfaatkan sebagai gardu traksi?
2. Bagaimana menyusun komponen topologi *solid state transformer* berbasis gabungan *matrix converter* dan *Vienna rectifier* sebagai gardu traksi?
3. Bagaimana menerapkan pemodelan *solid state transformer (SST)* sebagai gardu traksi dengan kondisi beban listrik sesuai data teknis?

1.5. Batasan Masalah

Limitasi atau batasan masalah dalam penelitian tugas akhir ini ditetapkan untuk memperjelas fokus penelitian, menyederhanakan analisis, serta memastikan ketercapaian tujuan penelitian, dengan rincian sebagai berikut:

1. Penelitian menggunakan simulasi Matlab-Simulink untuk simulasi pemanfaatan SST pada gardu traksi.
2. Perancangan SST dilakukan dengan dua tahap yaitu AC-AC dan AC-DC dengan sifat unidirectional.
3. Kontrol *switching* dilakukan pada komponen penyusun *matrix converter* dan *Vienna rectifier*.
4. Analisis dilakukan pada perhitungan efisiensi rangkaian SST sebagai satu kesatuan.

1.6. Hipotesis

Solid state transformer dapat menjadi substitusi transformator LFT (transformator *step-down* konvensional) pada gardu traksi, dimana kombinasi *matrix converter* dan *Vienna rectifier* dapat berfungsi untuk menurunkan tegangan AC dari *incoming* Jaringan Tegangan Menengah 20 kV AC, untuk kemudian dikonversi menjadi tegangan 1.500 Volt DC sebagai catu daya Kereta Rel Listrik (KRL).

1.7. Sistematika Penulisan

Penulisan tesis ini disusun menurut sistematika secara runtut sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

Pada bab ini menjelaskan tentang latar belakang, tujuan, manfaat, rumusan masalah, batasan masalah, hipotesis, dan sistematika penulisan. Uraian di atas dimaksudkan untuk menguraikan hal-hal yang bersifat menjelaskan hal yang akan diteliti.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini memaparkan landasan teori terhadap pengertian umum atau hal teoritis untuk menjelaskan pokok bahasan pada penelitian yang dilakukan.

BAB III. METODE PENELITIAN

Dalam bab ini menguraikan tata cara atau teknik yang digunakan dalam mengumpulkan data parameter objek penelitian, serta pengumpulan data penelitian untuk menunjang keberlangsungan penelitian.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini berisi mengenai hasil pengujian dan pembahasan terhadap hasil penelitian yang diperoleh.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi tentang kesimpulan dari hasil penelitian serta saran-saran untuk penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA**LAMPIRAN**

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Elektrifikasi Traksi Perkeretaapian

Traksi merupakan unsur kunci dalam penyelenggaraan transportasi massal penumpang maupun logistik. Traksi merujuk kepada serangkaian fenomena, peralatan, dan sistem yang berkontribusi dalam menyebabkan pergerakan kendaraan, sementara “listrik” menegaskan bahwa gaya tersebut dihasilkan oleh motor listrik melalui suplai tenaga dari sistem elektrifikasi pada jalur kereta api.

Pada sistem elektrifikasi pada jalur kereta api saat ini terdapat berbagai macam sistem basis kelistrikan traksi seperti sistem AC pada tegangan 15 kV/16,7 Hz atau 25 kV/50 Hz dan sistem DC bertegangan 1,5 kV/3 kV. Namun sistem elektrifikasi kereta api berbasis AC memiliki keterbatasan, antara lain adanya penurunan tegangan akibat komponen induktif jaringan serta konsumsi daya reaktif yang signifikan. Selain itu interaksi harmonik antara konverter traksi dan impedansi infrastruktur dapat menimbulkan gangguan kualitas tegangan.

Arus traksi menimbulkan penurunan tegangan induktif ($X \cdot I$) pada saluran listrik aliran atas (LAA), *feeder*, serta reaktansi bocor transformator traksi. Fenomena ini berkaitan langsung dengan konsumsi daya reaktif yang berasal dari arus magnetisasi transformator traksi serta karakteristik kerja konverter traksi, khususnya pada kondisi awal akselerasi ketika faktor daya sistem masih rendah [7], [8]. Pada sistem elektrifikasi 25 kV/50 Hz, gardu traksi satu fasa memerlukan daya hubung singkat yang cukup tinggi pada titik *kopling (point of common coupling/PCC)* untuk membatasi ketidakseimbangan tegangan yang ditimbulkan oleh beban satu fasa pada jaringan tiga fasa [9], [10]. Sehingga gardu traksi pada sistem elektrifikasi AC harus dilengkapi dengan peralatan kompensasi ketidakseimbangan tegangan dan kompensator daya reaktif untuk menjaga kualitas tegangan pada titik kopling.

Kebutuhan tersebut meningkatkan kompleksitas sistem elektrifikasi AC, sehingga secara struktural lebih rumit dibandingkan catu daya DC yang tidak memerlukan pengendalian ketidakseimbangan fasa [11],[12],[13]. Kompleksitas sistem elektrifikasi AC tersebut berimplikasi langsung pada rancangan kereta rel listrik yang beroperasi di sistem ini, karena memerlukan rangkaian daya yang terdiri atas transformator *step-down* satu fasa, penyearah, filter frekuensi rendah (33,3 Hz atau 100 Hz), serta inverter sumber tegangan tiga fasa untuk memasok tenaga listrik ke motor traksi AC [14]. Sebaliknya pada sistem elektrifikasi DC, gardu traksi umumnya hanya terdiri dari transformator *step-down* konvensional berfrekuensi rendah (*Low Frequency Transformer/LFT*) dan penyearah dioda/thyristor [15], serta konverter traksi pada kereta rel listrik pada sistem elektrifikasi DC juga lebih sederhana dan direduksi menjadi filter masukan dan inverter tiga fasa [16].

2.1.1. Tipe Catu Daya Elektrifikasi Traksi Perkeretaapian

Teknologi yang tersedia di berbagai era pengembangan traksi listrik, terutama terkait transmisi daya, tingkat tegangan, dan kontrol kecepatan motor penggerak traksi, telah mengarah pada adopsi berbagai solusi teknologi yang bertahan hingga hari ini. Secara spesifik sistem elektrifikasi perkeretaapian memiliki variasi macam sistem sebagai berikut [17]:

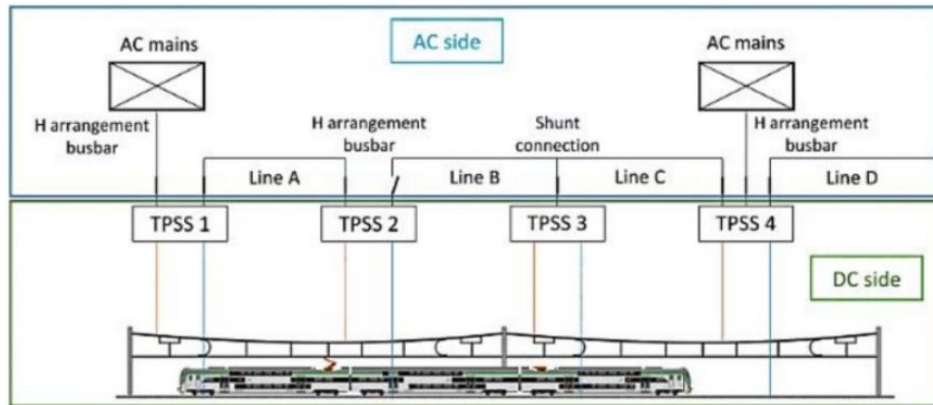
- Tegangan DC 750 V di Inggris dan Indonesia (LRT Palembang, LRT Jakarta, dan LRT Jabodebek) dengan catu daya rel ketiga.
- Tegangan DC 1.500 V di Jepang, Prancis, Belanda, Indonesia (KRL *Commuter Line* Jabodetabek, MRT Jakarta, dan KRL *Commuter Line* Yogyakarta), dan sebagainya.
- Tegangan DC 3.000 V di Rusia, Italia, Polandia, Spanyol, Afrika Selatan, Brasil, Ceko, Slovakia, Belgia, dan seterusnya.
- Tegangan AC satu fasa 15 kV, 16 2/3 Hz di Jerman, Swiss, Norwegia
- Tegangan AC satu fasa 25 kV, 50/60 Hz di Rusia, Prancis, Tiongkok, dan Afrika Selatan
- Tegangan AC satu fasa 11–12 kV, 25 Hz dan sebagainya di Amerika Serikat.

2.1.2. Sistem Elektrifikasi Traksi Perkeretaapian DC

Sistem elektrifikasi traksi DC secara luas digunakan pada jaringan transportasi perkotaan dengan rentang tegangan 750–1.500 V menjadi preferensi utama dibandingkan sistem AC karena arsitektur topologi yang sederhana. Karakteristik ini membuat sistem DC lebih sesuai untuk pola operasi berhenti-jalan (*stop-and-go*) yang membutuhkan percepatan dan perlambatan cepat, serta menimbulkan gangguan yang lebih rendah terhadap jaringan distribusi tegangan menengah dibandingkan sistem AC. Pada sejumlah layanan kereta regional, terdapat pula penggunaan sistem DC dengan tingkat tegangan yang lebih tinggi.

Meluasnya penerapan traksi DC dalam berbagai sektor perkeretaapian menjadikan riset terhadap sistem inovatif semakin penting, khususnya yang bertujuan memastikan kualitas catu daya yang baik bagi kendaraan traksi sekaligus meminimalkan gangguan terhadap jaringan penyedia tenaga. Pada jaringan perkeretaapian perkotaan, kawasan peri-urban, maupun regional yang umumnya menggunakan traksi DC, energi untuk sistem penggerak diambil dari jaringan distribusi tiga fasa bertegangan menengah atau tinggi, kemudian dikonversi menjadi DC melalui jembatan penyearah pada gardu traksi (GT), sebagaimana ditunjukkan pada diagram tipikal pada Gambar 2.1.

Konfigurasi konektivitas gardu dan jarak antar-gardu bervariasi sesuai dengan karakteristik layanan transportasi yang dilayani. Jalur metro dan trem perkotaan umumnya beroperasi pada rentang tegangan 750–1500 V, meskipun pada beberapa wilayah terdapat tingkat tegangan lain karena alasan historis. Gardu-gardu traksi biasanya ditempatkan pada interval beberapa kilometer, umumnya antara 2–10 km, tergantung pada jenis kendaraan yang digunakan dan intensitas lalu lintas. Pada jalur kereta api yang beroperasi pada tegangan yang lebih tinggi, biasanya antara 1.500 V dan 3.000 V, jarak rata-rata antara dua GT dapat bervariasi antara 15 dan 20 km. Untuk jaringan transportasi regional yang ditandai dengan lalu lintas yang cukup padat, atau dalam kasus pasokan daya yang lebih tinggi seperti yang diperlukan untuk jalur kecepatan tinggi, jarak ini sebenarnya dapat dikurangi secara signifikan [17].

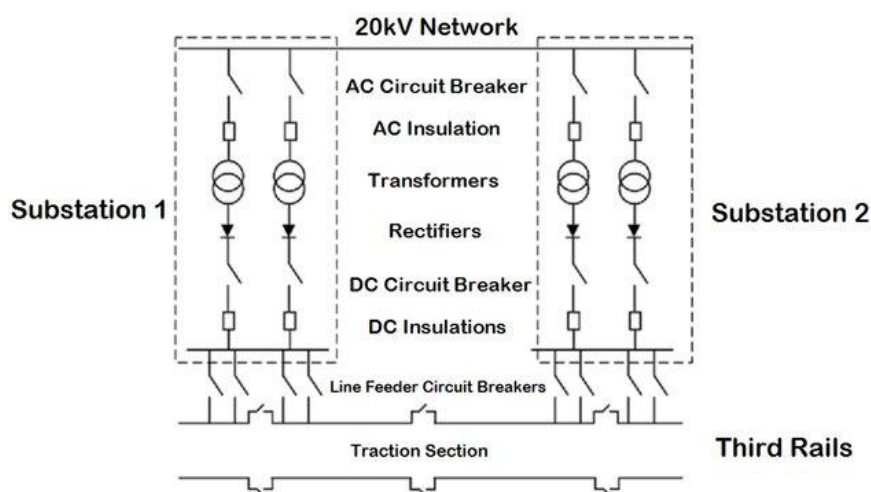


Gambar 2.1. Ilustrasi skema tipikal sistem elektrifikasi DC kereta api [18].

Berdasarkan gambar 2.1 tersebut mengilustrasikan skema koneksi gardu induk umum yang memungkinkan untuk jalur traksi DC, menyoroti komponen tipikal yang dipasang di bagian hilir titik antarmuka jaringan:

- saluran primer tiga fase;
- gardu konversi;
- konduktor positif berupa jalur kontak listrik aliran atas (LAA)/*overhead catenary system* atau rel ketiga.

Gardu traksi terdiri dari berbagai jenis peralatan dimana konversi daya pada gardu traksi terdiri berbagai bagian berbeda, dengan tegangan dan tingkat daya yang berbeda. Hal ini umum terjadi di semua penggunaan jenis kereta rel listrik. Topologi tipikal gardu traksi ditunjukkan pada Gambar 2.2 berikut



Gambar 2.2. Diagram tipikal gardu traksi DC pada jalur kereta rel listrik [19].

Pada gardu traksi DC dapat dibagi menjadi dua bagian utama:

- Bagian AC, yang menampung peralatan kontrol, proteksi, dan pengukuran untuk koneksi ke jaringan, konverter, dan transformator.
- Bagian DC, yang meliputi konverter AC/DC, filter saluran, dan peralatan kontrol, proteksi, dan pengukuran untuk saluran traksi.

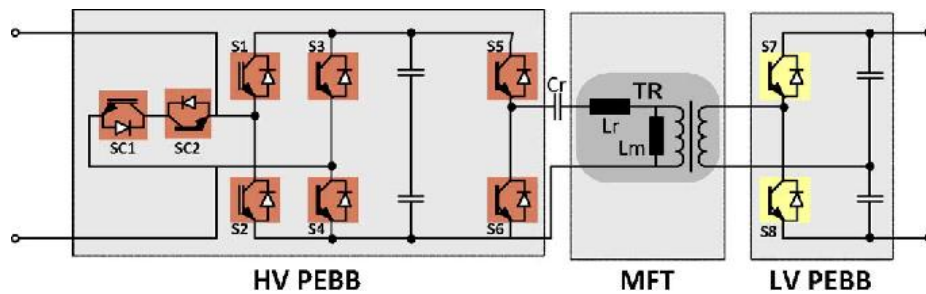
2.2. Penelitian Terdahulu

Dalam pelaksanaan penelitian, penulis telah melakukan penelusuran terhadap beberapa penelitian yang telah dilakukan atau penelitian sebelumnya untuk mendapatkan referensi penelitian mengenai *matrix converter* sebagai *solid state transformer*. Berikut uraian penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian yang dilakukan penulis adalah sebagai berikut:

1. C. Zhao dkk (2014). "*Power Electronic Traction Transformer—Medium Voltage Prototype*".

Penelitian ini dilaksanakan oleh ABB yang membuat prototipe *solid state transformer* atau *power electronic traction transformer* (PETT) yang dipasang pada sebuah lokomotif uji coba di Jenewa, Swiss dengan kapasitas 1.2 MVA dengan tegangan 15 kV AC berfrekuensi 16,7 Hz, dengan menggunakan IGBT 6.5 kV/400-A dan 3.3 kV/800-A pada susunan konverter *cascaded multilevel front-end*. Beberapa sel yang identik menampilkan jenis koneksi *input seri-output paralel* (ISOP), dengan tegangan DC yang disediakan pada *output* PETT. Dengan demikian tegangan masuk dari saluran 15 kV 16,7 Hz didukung oleh sel bertingkat, serta koneksi paralel sel di sisi sekunder. Desain modular ini sendiri memberikan beberapa keuntungan sehubungan dengan implementasi dan pemeliharaan konverter. Untuk memenuhi tegangan saluran dari jaringan kereta api 15 kV 16,7 Hz dengan modul IGBT 6.5-kV dengan tujuan meminimalkan jumlah perangkat *switching*, $N = 8$ sel digunakan sebagai dasar untuk koneksi seri, dengan mempertimbangkan tegangan berlebih saluran, riak harmonik kedua pada tegangan DC-link, dan margin tersedia untuk strategi kontrol. Konsep redundansi $N + 1$ digunakan untuk menjaga ketersediaan konversi daya pada PETT.

Sehingga pada operasi normal dan terjadi kegagalan pada salah satu sel, maka sel yang rusak tersebut akan dilewati dan satu sel tambahan dapat diaktifkan. Sehingga prototipe MV PETT yang dikembangkan ABB ini memiliki total sembilan sel, dengan masing-masing memiliki nilai 150 kVA (kapasitas puncak 225 kVA) [20].



Gambar 2.3. Struktur prototipe SST tegangan menengah buatan ABB [21].

2. Caroline Stackler, Diego Velazco, dkk (2020). “*Scalable Solid-State Transformers (SSTs) for DC railway substations*”.

Gardu traksi kereta api DC terdapat kemungkinan variasi daya pengenalan, tegangan AC *input* dan tegangan DC *output* berbeda-beda tergantung standar atau kebutuhan. Oleh karena itu, teknologi gardu traksi saat ini perlu disesuaikan sesuai aplikasinya. Untuk mengatasi masalah tersebut topologi *solid-state transformer* (SST) secara inheren bersifat modular baik dengan koneksi bintang atau delta, dapat mengatasi aplikasi yang berbeda dengan *power electronic building block* (PEBB). Dalam penelitian ini, sebuah metodologi diusulkan untuk menentukan daya pengenalan dan jumlah PEBB yang optimal, sehingga menghasilkan PEBB berkapasitas 94 kW dengan bus DC 3,6 kV. Topologi PEBB dengan jembatan sekunder dapat dikonfigurasi ulang untuk aplikasi standar tegangan traksi DC 750 V dan 1,5 kV [22].

3. M. A. Hannan, P. J. Ker, dkk (2020). “*State of the art of solid-state transformers: Advanced topologies, implementation issues, recent progress and improvements*”.

Solid-state transformer (SST) adalah teknologi baru yang mengintegrasikan konverter elektronika daya dengan transformator dan sirkuit kontrol. Artikel ilmiah ini secara komprehensif mengulas topologi SST yang cocok

untuk berbagai variasi tingkat tegangan dan, operasi kontrol, serta tren pengaplikasian yang berbeda. Pada artikel ini membahas berbagai konfigurasi SST beserta desain dan karakteristik untuk mengubah *input* menjadi *output* dalam operasi *unipolar* dan *bipolar*. Potensi manfaat SST dalam banyak aplikasi dalam hal pengendalian dan sinergi sistem AC dan DC disorot untuk mengetahui pentingnya teknologi SST [23].

4. Khan, S., Rahman, K., dkk (2021). “*Solid-State Transformers: Fundamentals, Topologies, Applications, and Future Challenges*”.

Solid-state transformer (SST) telah muncul sebagai alternatif transformator konvensional dan dianggap sebagai blok jaringan pintar masa depan. SST menggabungkan sirkuit elektronika daya dan operasi frekuensi tinggi, untuk memungkinkan kemampuan kontrol tinggi dan memungkinkan aliran daya dua arah sehingga mengatasi keterbatasan transformator konvensional. Penelitian ini membahas perlunya penggantian transformator frekuensi rendah (LFT) dan menyajikan konfigurasi SST. Terdapat tantangan masa depan untuk implementasi SST secara *real-time* dengan arah penelitian tertentu [24].

5. Cervero, D., Fotopoulou, M., Muñoz-Cruzado, J., Rakopoulos, dkk (2023). “*Solid State Transformers: A Critical Review of Projects with Relevant Prototypes and Demonstrators*”.

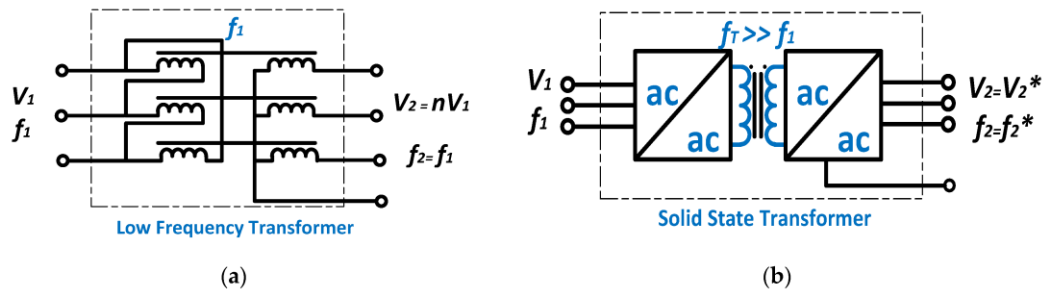
Penelitian ini bertujuan memberikan gambaran praktis tentang SST, termasuk berbagai kemungkinan penerapannya seperti pada smart grid, pusat data, sistem perkeretaapian, dan pembangkit listrik tenaga angin lepas pantai. Studi ini juga meninjau beberapa prototipe SST yang sudah dikembangkan, dengan melihat parameter penting seperti tegangan kerja, frekuensi *switching*, dan kapasitas daya. Pada bagian akhir, penelitian ini membahas arah perkembangan masa depan dan berbagai tantangan agar teknologi SST dapat digunakan lebih luas dalam sistem tenaga listrik [25].

2.3. *Solid State Transformer (SST)*

Transformator *solid-state* (*Solid State Transformer–SST*) juga dikenal sebagai transformator elektronika daya merupakan transformator berbasis konverter daya berkomponen *solid state* yang merupakan pengembangan transformator. Transformator sendiri merupakan komponen fundamental dalam sistem tenaga listrik, karena berperan dalam transmisi dan distribusi tenaga listrik. Transformator konvensional diteliti dan dikembangkan agar hemat biaya, andal, dan efisien. Namun transformator masih mempunyai kelemahan tertentu, termasuk *power loss* dan kenaikan suhu karena harmonisa, pengaturan tegangan yang buruk pada beban, perlindungan yang tidak memadai dari arus abnormal, tegangan berlebih, dan beban berlebih. Selain itu perlindungan transformator konvensional terhadap gangguan internal masih tergolong terbatas, terutama terhadap kerusakan dari inti transformator serta pengaruh karakteristik masukan yang tidak diinginkan, seperti fluktuasi tegangan yang menyebabkan penurunan tegangan di sisi keluaran. Transformator konvensional juga sulit diintegrasikan dengan sumber energi baru terbarukan (EBT). Di samping dimensinya yang besar, transformator konvensional memiliki kemampuan pengendalian yang terbatas dan menimbulkan dampak lingkungan akibat penggunaan minyak transformator dalam jumlah besar, yang berpotensi berkontribusi terhadap permasalahan energi dan lingkungan secara global [26].

Perkembangan kebutuhan teknologi kelistrikan seperti integrasi sumber EBT, *distributed generation* (DG), sistem penyimpanan energi (*Battery Energy Storage System*), serta infrastruktur pengisian kendaraan listrik, menjadi keterbatasan transformator konvensional yang perlu diatasi. Desentralisasi sistem tenaga akibat integrasi berbagai sumber energi dapat menimbulkan permasalahan pengaturan tegangan, kualitas daya, serta distorsi harmonisa yang tidak dapat dikendalikan optimal oleh transformator konvensional. Seiring dengan kemajuan teknologi, konverter daya kapasitas tinggi dapat diaplikasikan dalam sistem tenaga listrik, khususnya pada integrasi sumber EBT ke dalam sistem tenaga listrik, serta berperan aktif dalam proses transmisi dan distribusi daya. Penerapan elektronika berkomponen *solid-state* sebagai *solid-state transformer* (SST) telah memungkinkan konverter daya kapasitas tinggi untuk mengontrol dan

mengkonversi daya listrik. SST dapat dianggap sebagai substitusi transformator konvensional di *smart grid* pada masa mendatang dan dianggap sebagai salah satu teknologi rintisan sistem tenaga listrik masa depan [24].

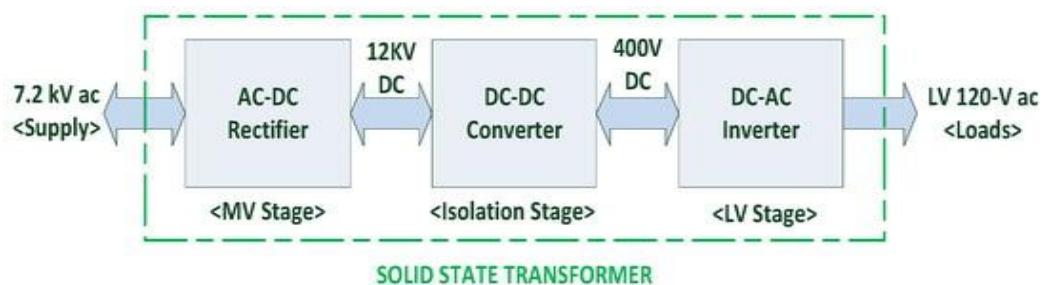


Gambar 2.4. (a) Konfigurasi transformator konvensional dengan frekuensi rendah (*low frequency transformer* – LFT), (b) Konfigurasi transformator *solid-state* (*solid-state transformer* – SST) [27].

Gambar 2.4 (a) menunjukkan konfigurasi transformator konvensional yang beroperasi pada f_1 . Pada sisi keluaran, level tegangan berubah, namun frekuensinya tetap sama. Namun konfigurasi SST yang disajikan pada Gambar 2.4 (b), frekuensi operasi transformator f_T jauh lebih tinggi dibandingkan LFT dan frekuensi keluaran belum tentu sama dengan masukan. Frekuensi f_2^* mencakup kemungkinan tegangan DC V_2^* yaitu $f_2^* = 0$ Hz. Konfigurasi SST pada gambar 2.4 (b), terlihat bahwa berbagai fungsi SST yang tidak terdapat pada transformator konvensional. Pemanfaatan elektronika daya dalam arsitektur SST memungkinkan pengoperasian tegangan AC berfrekuensi tinggi. SST menawarkan sejumlah keunggulan, antara lain pengaturan tegangan, pengendalian aliran daya, kompensasi daya reaktif, reduksi sag tegangan, kemampuan aliran daya dua arah, pembatasan arus gangguan, penahanan harmonisa, isolasi galvanik, serta kemampuan menyediakan tegangan keluaran DC. Berbagai fungsi aktif ini menjadikan SST lebih unggul dibandingkan transformator konvensional yang bersifat pasif. Selain itu keuntungan pemanfaatan SST adalah pengurangan ukuran dan berat. Sebuah studi perbandingan menunjukkan bahwa SST 3 fase memiliki volume 80% lebih kecil daripada LFT. Pengurangan volume SST sangat penting karena portabilitasnya, biaya pemasangan yang rendah, dan kemudahan perakitan di area tertentu yang tidak nyaman seperti aplikasi transmisi lepas pantai [24].

2.3.1. Prinsip *Solid State Transformer (SST)*

Solid-state transformer (SST) bekerja berdasarkan prinsip konversi elektronika daya yang menggabungkan fungsi transformator konvensional dengan kemampuan kontrol tertentu, melalui konversi daya berlapis (*multi-stage power conversion*) [28], [29], [30]. Prinsip dasarnya melibatkan tiga tahap utama yang merupakan tipikal prinsip *solid-state transformer* yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 sebagai berikut.



Gambar 2.5. Ilustrasi arsitektur tipikal konversi daya pada *solid-state transformer (SST)* berbasis topologi tiga tahap (*three-stage topology*) [27].

2.3.1.1. Tahap Tegangan Menengah

Pada tahap tegangan tingkat menengah mencakup rentang tegangan antara 1 kV s.d. 100 kV. Tegangan AC tiga fase dengan frekuensi 50/60 Hz disuplai ke SST, diubah menjadi tegangan DC (tahap penyearah). Konverter daya pada SST berinteraksi langsung dengan tingkat tegangan lebih tinggi, sehingga beroperasi pada tingkat daya besar. Dalam aplikasinya dimana berat dan ukuran tidak selalu memainkan peran penting, SST dapat menawarkan *filter* harmonik di tahap penyearah ini dengan penyearah PWM (modulasi lebar pulsa) [24].

2.3.1.2. Tahap Isolasi

Pada tahap ini terdapat transformator frekuensi menengah dan terjadi konversi DC–AC–DC. DC diubah menjadi AC dengan frekuensi lebih tinggi dari rentang 100 Hz hingga orde kHz. Pada langkah konversi AC-AC tersebut transformator frekuensi menengah (berfrekuensi lebih tinggi daripada frekuensi 50/60 Hz) digunakan untuk menurunkan tegangan.

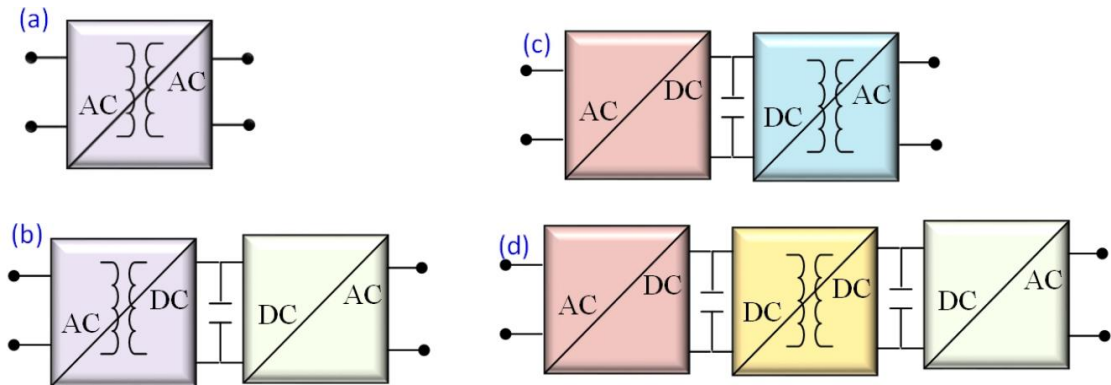
Pengoperasian transformator frekuensi tinggi dapat memanfaatkan sifat magnetik inti. Kemudian konversi AC-DC terjadi dimana AC frekuensi tinggi diubah menjadi DC. Pengoperasian SST pada frekuensi tinggi cocok pada pengaplikasian traksi, dimana kendala berat dan volume menghambat efisiensi lebih tinggi. Pada pengaplikasian lain terdapat berbagai manfaat SST seperti pengurangan berat dan ukuran, karakteristik tambahan berupa aliran daya dua arah, kompensasi daya reaktif, dan *DC link*. Karena SST menggunakan konverter daya *multistage*, maka harus memiliki frekuensi *switching* tinggi. Peningkatan frekuensi dan kerugian pada *switching* berbanding lurus, sehingga dianggap sebagai hambatan peningkatan efisiensi dan menjadi pertimbangan desain dan produksi [24].

2.3.1.3. Tahap Tegangan Rendah

Rentang tegangan rendah ialah tegangan 50 s.d. 1000 volt. Pada tahap ini terjadi konversi DC-AC (inverter), frekuensi AC dikonversi menjadi frekuensi 50/60 Hz. SST juga memungkinkan kemampuan kontrol pada tahap tegangan rendah, sehingga memungkinkan pengontrolan tegangan *input* dan *output*, arus, dan aliran daya melalui konverter daya dan trafo MF. Selain itu, hal ini memungkinkan pengontrolan frekuensi *output*, sebab frekuensi *output* yang diinginkan dapat dicapai dalam konversi DC-AC [24].

2.3.2. Topologi Solid State Transformer (SST)

Berbeda dengan transformator konvensional, teknologi SST memiliki banyak topologi. Semua jenis SST memiliki fungsi konversi AC-AC terisolasi terlepas dari perbedaannya dalam desain topologi converter [24],[31]. Semua desain topologi ini pada dasarnya dikategorikan menjadi satu tahap, dua tahap, dan tiga tahap, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6 [32]. Dewasa ini, berbagai riset telah dilakukan untuk melakukan improvisasi teknologi SST menjadi berbagai topologi. SST menggunakan konverter *multi-level* untuk kinerja yang lebih baik dan menggunakan topologi *multistage* sesuai persyaratan tegangan tinggi [33].



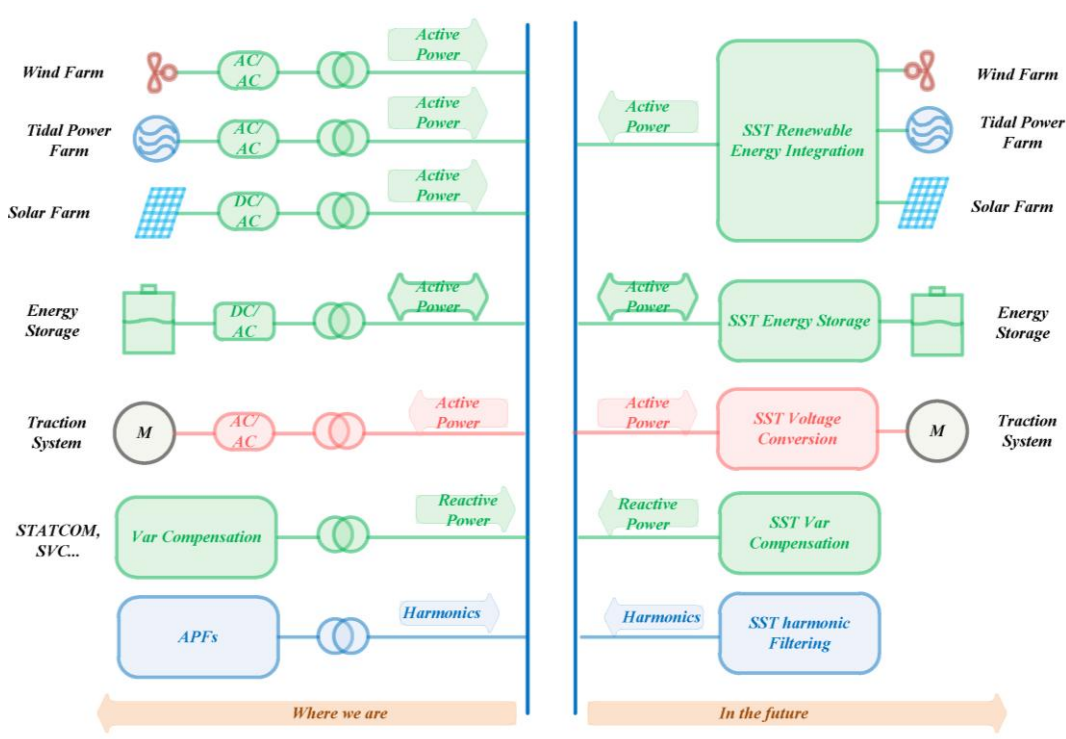
Gambar 2.6. Konfigurasi Topologi SST (a) satu tahap; (b) dua tahap dengan sambungan LVDC; (c) dua tahap dengan sambungan HVDC; (d) tiga tahap [32].

Topologi SST sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.6 tersebut memiliki rincian sebagai berikut:

- SST satu tahap (*single-stage*): tegangan tinggi AC (*high voltage AC–HVAC*) diturunkan dengan menggunakan transformator frekuensi tinggi ke tegangan rendah AC (*low voltage AC–LVAC*) [34]. Pada topologi ini terdapat saklar empat kuadran pengatur tegangan dengan menggeser fasa antara saklar sisi primer dan sekunder, namun memiliki rasio konversi tegangan rendah karena frekuensi *switching* yang rendah dari konverter daya. [35]
- SST dua tahap (*two-stage*): tegangan tinggi AC (*high voltage AC–HVAC*) diubah menjadi tegangan rendah AC (*low voltage AC–LVAC*) mirip dengan topologi satu tahap dan memanfaatkan tautan DC. Topologi ini memiliki dua variasi konfigurasi dengan tautan tegangan rendah DC (*low voltage DC–LVDC*), dimana tegangan AC diturunkan oleh transformator frekuensi tinggi untuk dikonversi menjadi DC, lalu diubah menjadi AC. Keberadaan LVDC dapat memungkinkan integrasi beban DC dan sumber energi terbarukan [36].
- SST tiga tahap (*three-stage*): tegangan tinggi AC (*high voltage AC–HVAC*) disuplai ke tahap penyearah AC-DC, lalu kemudian memanfaatkan sambungan tegangan tinggi DC (*high voltage DC–HVDC*) dan juga tegangan rendah DC (*low voltage DC–LVDC*). Pada topologi ini terdapat pengaturan tegangan pada sambungan HVDC, aliran daya dua arah, kompensasi Var, dan penyaringan harmonik dengan menghasilkan bentuk gelombang yang lebih sinusoidal.

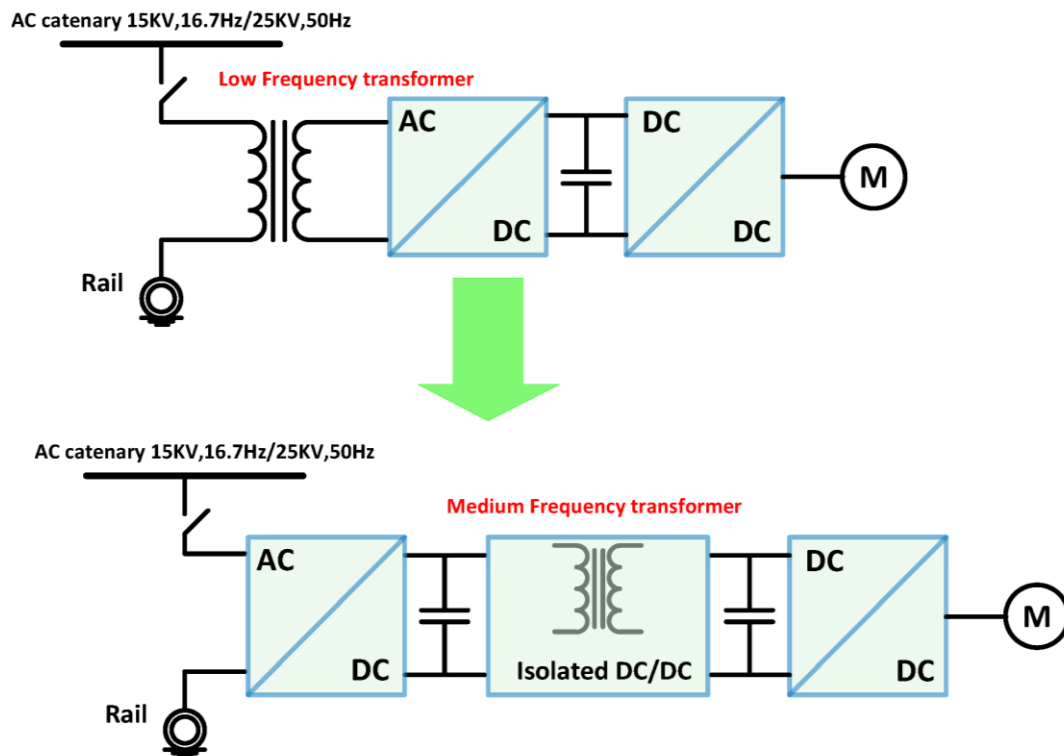
2.3.3. Pengaplikasian SST pada Traksi Perkeretaapian

Seiring perkembangan zaman, *smart grid* memiliki karakteristik integrasi sumber energi terbarukan dan *storage device*. SST sebagai alternatif transformator konvensional dapat meminimalkan dan menghilangkan kebutuhan minyak mineral untuk pendinginan dan isolasi. Potensial penggunaan SST ditunjukkan pada gambar 2.7, dimana salah satunya ialah traksi kereta api. Dewasa ini terdapat desain dan konfigurasi teknologi SST diusulkan untuk berbagai aplikasi traksi, sebab dapat meningkatkan kepadatan dan efisiensi daya serta pengurangan bobot dan ruang [27].



Gambar 2.7. Infografis potensi penggunaan *solid-state transformer* [27].

Gambar 2.8 berikut menunjukkan contoh sistem traksi kereta rel listrik berbasis SST, di mana transformator konvensional secara efektif digantikan oleh SST. ABB pada tahun 2011 mendesain prototipe 1,2 MVA dengan konverter resonansi 9 modul CHB plus LLC untuk jaringan kereta api 15 kV/16,7 Hz yang memiliki efisiensi sekitar 96%. Konfigurasi lain dengan IGBT tegangan tinggi pernah diusulkan untuk efisiensi lebih baik dengan biaya lebih rendah dibandingkan konfigurasi konvensional dengan struktur seri-paralel modular [37].



Gambar 2.8. Skema sistem traksi pada sarana kereta rel listrik berbasis SST [27].

2.4. Konverter AC–AC (*AC-AC Converter*)

Konverter AC–AC merupakan perangkat elektronika daya yang berfungsi mengubah tegangan AC pada satu amplitudo dan frekuensi menjadi tegangan AC lain dengan amplitudo dan frekuensi yang berbeda. Konversi ini dapat dilakukan dengan atau tanpa tahap penyimpanan energi, tergantung pada topologi yang digunakan. Menurut Kolar *et al.* (2011) tujuan utama konverter AC–AC adalah menghasilkan bentuk gelombang keluaran yang dapat dikendalikan, menjaga kualitas daya, serta mempertahankan integritas jaringan dengan faktor daya yang diinginkan. Topologi AC–AC banyak digunakan pada *adjustable-speed drives*, *power conditioning*, sistem propulsi, hingga antar muka energi terdistribusi pada sistem tenaga modern [38].

Berdasarkan perspektif teori sistem, proses AC–AC melibatkan pembentukan vektor tegangan keluaran dari vektor tegangan input melalui strategi modulasi saklar. Struktur topologi dan metode PWM menentukan kualitas arus input, distorsi harmonisa keluaran, dan efisiensi konversi daya. Fundamental AC–AC sangat terkait dengan komutasi saklar, kontrol *transfer function*, serta

manajemen energi instan antara sisi sumber dan sisi beban. Berdasarkan pendekatan konversinya paling dasar konverter AC–AC dapat berupa *Indirect AC–AC Converter (AC–DC–AC Converter)*.

Topologi ini menggunakan dua tahap konversi yaitu penyearah (*rectifier*) dan *inverter*. Konverter dapat berupa *Voltage-Source Inverter (VSI)* atau *Current-Source Inverter (CSI)*. Kapasitor atau induktor pada *DC-link* digunakan sebagai penyimpan energi antara kedua tahap. Jenis ini memiliki keunggulan dimana kontrol *rectifier* dan *inverter* dapat dipisahkan, implementasi PWM sederhana, dan rentang kendali frekuensi luas. Namun terdapat pula kekurangan sebab membutuhkan kapasitor elektrolit berukuran besar, *power density* rendah, dan usia *lifetime* bergantung pada komponen *DC-link* [38].

Dalam perkembangan konverter daya terdapat *cycloconverter* topologi lanjutan AC–AC. Konverter AC–DC–AC dengan *DC-link* besar sebelumnya menjadi pilihan utama untuk mengubah frekuensi, namun keterbatasannya pada ukuran, kebutuhan kapasitor besar, serta respons dinamis membuatnya kurang optimal untuk aplikasi berdaya tinggi dan frekuensi rendah [39]. *Cycloconverter* mampu menghasilkan tegangan keluaran berfrekuensi sangat rendah secara langsung dari sumber AC melalui pengaturan penyulutan thyristor, sehingga cocok untuk menggerakkan motor besar torsi tinggi. Hal ini dapat berupa *cascaded MMC* dan *cycloconverter drive system* yang memanfaatkan *cycloconverter* untuk menurunkan frekuensi dari level menengah ke frekuensi sangat rendah untuk motor 6.6 kV/5 MW, sebagaimana ditunjukkan pada penelitian oleh S. Mishra and N. R. Babu [40].

Meskipun efektif untuk aplikasi berdaya besar, penggunaan thyristor membuat *cycloconverter* menghasilkan distorsi harmonisa yang signifikan dan sangat bergantung pada komutasi alami, sehingga membatasi kualitas gelombang serta fleksibilitas pengendaliannya [39], [40], [41]. Keterbatasan tersebut mendorong muncul riset konverter AC–AC generasi baru, berupa *matrix converter* yang menghubungkan sumber tiga fasa langsung ke beban tanpa memerlukan *DC-link* atau elemen penyimpanan energi berkapasitansi besar [42].

Dengan pemanfaatan susunan saklar dua arah (*bidirectional switch*) serta kendali tertentu, *matrix converter* mampu melakukan konversi AC–AC satu tahap secara penuh dan menghasilkan arus serta tegangan sinusoidal, kontrol faktor daya, dan kemampuan operasi regeneratif yang fleksibel. Konfigurasi ini membuat *matrix converter* memiliki struktur yang lebih ringkas serta respons dinamis yang lebih baik dibandingkan konversi AC–AC sebelumnya [43], [44].

2.5. *Matrix Converter*

Matrix Converter (MC) merupakan salah satu bentuk konverter AC–AC langsung yang menggunakan rangkaian saklar dua arah (*bidirectional*) untuk meng-hubungkan sumber tegangan tiga fasa ke beban tanpa memerlukan *DC-link* ataupun elemen penyimpanan energi berkapasitansi besar. Arsitektur ini membuat *Matrix Converter* jauh lebih ringkas, karena proses konversi daya dilakukan sepenuhnya oleh saklar aktif tanpa memerlukan komponen penyimpanan energi berukuran besar seperti kapasitor *DC-link*. Pendekatan ini berbeda dengan konverter AC–DC–AC konvensional yang mengandalkan kapasitor elektrolit sebagai penyangga energi, sehingga MC menawarkan densitas daya yang lebih tinggi dan umur pakai yang lebih panjang. Perkembangan awal MC dimulai pada dekade 1980 melalui kontribusi Venturini dan Alesina yang pertama kali mengusulkan istilah “*matrix converter*” sekaligus memformulasikan model matematis dan metode modulasi dasar untuk mengendalikan hubungan langsung antara fasa input dan fasa output. Kajian tersebut menjadi fondasi bagi penelitian selanjutnya mengenai teknik komutasi, dan strategi modulasi. Pemahaman teoretis ini kemudian berkembang hingga menghasilkan berbagai penelitian modern dengan fokus pada kinerja dinamis, efisiensi dan kualitas gelombang, serta pemanfaatan perangkat semikonduktor berkecepatan tinggi [42], [45].

Selain itu kajian arsitektur atau topologi *matrix converter* memunculkan pengembangan struktur berupa *direct matrix converter (DMC)* dan *indirect matrix converter (IMC)* yang tetap mempertahankan prinsip konversi satu tahap tanpa perantara *DC-link*. Bentuk sederhana *matrix converter* ialah *direct matrix converter (DMC)* melakukan konversi AC–AC satu tahap menggunakan sembilan saklar dua-arah yang menghubungkan langsung masukan dan keluaran dalam

bentuk matriks, sehingga menawarkan bentuk konversi langsung namun dengan tantangan komutasi yang kompleks. Sementara *indirect matrix converter* (IMC) memecah proses tersebut menjadi dua tahap melalui pembentukan *fictitious DC-link* menggunakan *current-source rectifier* diikuti *voltage-source inverter*, sehingga tetap mempertahankan kinerja DMC dengan topologi lebih sederhana, komutasi lebih mudah, serta pemanfaatan modul inverter standar [42], [45].

Matrix Converter menarik perhatian signifikan karena memiliki sejumlah keunggulan yang tidak dimiliki topologi AC–AC lain; seperti kemampuan menghasilkan tegangan keluaran dengan amplitudo dan frekuensi yang dapat diatur secara bebas, menghasilkan gelombang arus dan tegangan sinusoidal baik pada sisi input maupun output, serta mendukung pengoperasian dengan faktor daya input yang dapat dikontrol hingga unity. *Matrix Converter* sendiri memungkinkan aliran daya dua arah serta operasi regeneratif penuh, bahkan dapat memisahkan secara efektif dinamika frekuensi antara masukan dan keluaran.

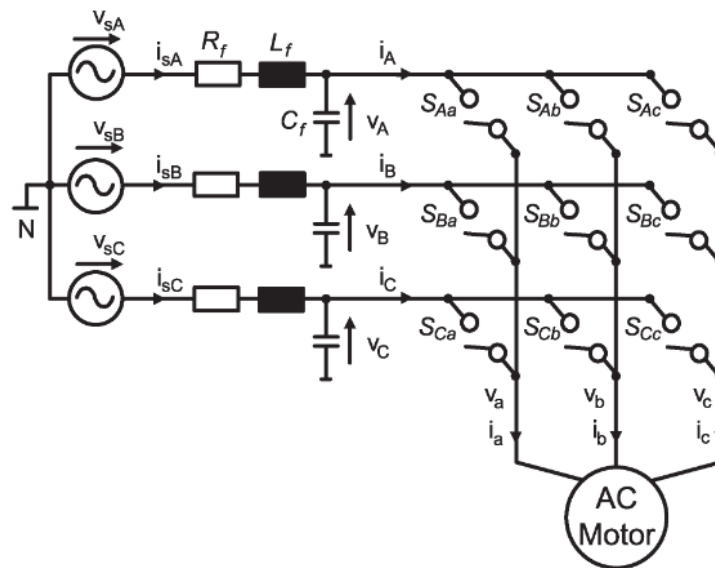
Sifat-sifat tersebut memungkinkan topologi ini relevan untuk aplikasi modern seperti kendali motor berkecepatan variabel (*Variable Speed Drive*), sistem energi regeneratif, dan perangkat antarmuka daya berperforma tinggi. Namun terdapat tantangan teknis terkait komutasi saklar dua arah, interaksi dengan *input filter*, serta batas *voltage transfer ratio* dibatasi oleh teori modulasi sinusoidal. Namun kemajuan teknik pengendalian seperti *Venturini Modulation*, *Space Vector Modulation (SVM)*, dan berbagai metode kontrol prediktif telah memperluas potensi aplikasi MC sekaligus meningkatkan kualitas daya yang dihasilkan [42], [45].

2.5.1. *Direct Matrix Converter*

Direct Matrix Converter (DMC) merupakan konverter satu tahap dengan jumlah saklar daya *bidirectional* (dua arah) sejumlah $m \times n$ yang menghubungkan *m-phase* tegangan sumber kepada *n-phase* beban. DMC dengan saklar 3×3 seperti pada Gambar 2.x., adalah penggambaran yang menghubungkan sumber tiga fase ke beban tiga fase, biasanya berupa motor induksi.

$$S_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & \text{switch on} \\ 0, & \text{switch off} \end{cases} \quad (1)$$

Pada struktur DMC ketiadaan *DC-link* mengakibatkan seluruh komponen frekuensi tinggi yang dihasilkan oleh proses komutasi saklar secara langsung muncul pada sisi masukan. Oleh karena itu, suatu filter masukan berbentuk rangkaian LC (R_f, L_f, C_f) diperlukan untuk meredam harmonisa arus berfrekuensi tinggi, membentuk arus masukan yang mendekati sinusoidal, serta mencegah terjadinya tegangan lebih akibat proses komutasi yang cepat. Keberadaan filter masukan ini merupakan elemen penting dalam menjaga kualitas daya dan stabilitas operasi DMC [46], [47], [48].



Gambar 2.9. Topologi *Direct Matrix Converter* (DMC) tiga fasa dengan sembilan saklar dua arah untuk konversi langsung AC–AC tanpa tahap *DC-link*, topologi diadopsi dari makalah ulasan (*review*) Rodriguez et al. (2012) [42].

Fungsi pensaklaran dari setiap saklar pada DMC didefinisikan berdasarkan kondisi operasi saklar tersebut. Karena pada sisi masukan DMC terdapat kapasitor, maka dalam setiap kolom hanya diperbolehkan satu saklar yang berada dalam kondisi tertutup pada satu waktu. Selain itu, sifat induktif pada beban menyebabkan arus keluaran tidak dapat diputus secara tiba-tiba, sehingga setidaknya satu saklar pada setiap kolom harus selalu berada dalam keadaan tertutup untuk menjaga kontinuitas arus. Untuk mengembangkan strategi modulasi pada matrix converter, diperlukan suatu model matematis yang menggambarkan hubungan antara variabel masukan dan keluaran.

Berdasarkan konfigurasi rangkaian, hubungan tegangan keluaran dan arus masukan terhadap tegangan masukan dan arus keluaran dapat dinyatakan sebagai berikut dengan persamaan berikut :

$$\mathbf{v}_o = \mathbf{T}(S_{ij})\mathbf{v}_i \quad (2)$$

$$\mathbf{i}_i = \mathbf{T}(S_{ij})^T \mathbf{i}_o \quad (3)$$

Dimana $\mathbf{v}_o = [v_A \ v_B \ v_C]^T$ ialah vektor tegangan keluaran, $\mathbf{v}_i = [v_A \ v_B \ v_C]^T$ merupakan vektor tegangan masuk, $\mathbf{i}_i = [i_A \ i_B \ i_C]^T$ adalah vektor arus masuk, $\mathbf{i}_o = [i_A \ i_B \ i_C]^T$ adalah vektor arus keluaran, dan $\mathbf{T}(S_{ij})$ adalah matriks transfer sesaat (*instantaneous transfer matrix*) dari Direct Matrix Converter, yang nilainya ditentukan oleh status saklar S_{ij} (saklar ON/OFF), didefinisikan sebagai :

$$\{\mathbf{T}(S_{ij})\} = \begin{bmatrix} S_{Aa} & S_{Ba} & S_{Ca} \\ S_{Ab} & S_{Bb} & S_{Cb} \\ S_{Ac} & S_{Bc} & S_{Cc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Untuk menghasilkan tegangan keluaran sinus pada *matrix converter*, kita harus memilih kombinasi saklar yang tepat. Persamaan (2) dan (3) adalah persamaan dasar yang digunakan semua metode modulasi untuk menentukan saklar mana yang harus *ON/OFF* agar tegangan keluaran sesuai dengan yang diinginkan [42].

2.5.2. Modulasi Venturini pada Direct Matrix Converter

Berbagai metode modulasi telah dikembangkan (Venturini, *scalar Roy*, *PWM Carrier Based*, *SVM*, *Direct Torque Control*, dan *Predictive Control*), namun penelitian ini secara difokuskan pada metode Venturini yang diintegrasikan dengan *Vienna Rectifier* dalam arsitektur *Solid-State Transformer* untuk gardu traksi DC yang belum ditemukan pembahasannya di berbagai literatur elektronika daya sebelumnya. Mengingat konfigurasi tersebut memerlukan model yang linear dan kompatibel dengan arus kontinyu pada beban traksi, metode *Venturini* dinilai paling sesuai dan menjadi fokus kajian ini.

Metode *Venturini* merupakan teknik modulasi awal yang dikembangkan khusus untuk *direct matrix converter* dan digunakan untuk menentukan pola penyulutan (*firing pulses*) bagi sembilan sakelar dua arah (*bidirectional switches*) (S_{ij}). Tujuannya adalah membentuk tegangan keluaran sinusoidal dengan

amplitudo dan frekuensi yang dapat diatur, menggunakan tegangan masukan yang memiliki amplitudo dan frekuensi tetap. Dalam prinsip kerjanya, modulasi dipahami sebagai proses mengombinasikan tegangan-tegangan masukan sesaat secara terkontrol untuk menghasilkan nilai rata-rata tegangan keluaran selama satu interval pensampelan. Dimana t_{ij} menyatakan durasi sakelar S_{ij} berada dalam kondisi ON dan T_s adalah periode pensampelan, Dari penjelasan sebelumnya tentang proses tegangan keluaran dibentuk dari kombinasi tegangan masukan, prinsip tersebut dapat dituangkan menjadi bentuk persamaan berikut.

$$\left[\bar{v}_{jN} = \frac{t_{Aj}v_A + t_{Bj}v_B + t_{Cj}v_C}{T_s} \right] \quad (5)$$

Persamaan ini menunjukkan bahwa $\bar{v}_{jN}$ merupakan nilai rata-rata (komponen frekuensi rendah) dari fasa keluaran ke-j, dihitung setiap interval *sampling*. Dengan cara ini, tegangan keluaran sebenarnya berupa sinyal *switching* berfrekuensi tinggi, tetapi komponen fundamentalnya tetap berbentuk gelombang yang sesuai. Karena ($T_s = t_{Aj} + t_{Bj} + t_{Cj}$) untuk setiap fasa ($j = a, b, c$), maka *duty cycle* dapat dirumuskan berikut.

$$\left[m_{Aj}(t) = \frac{t_{Aj}}{T_s}, \quad m_{Bj}(t) = \frac{t_{Bj}}{T_s}, \quad m_{Cj}(t) = \frac{t_{Cj}}{T_s} \right] \quad (6)$$

Dengan menerapkan konsep tersebut ke setiap fasa keluaran dengan memanfaatkan definisi *duty cycle* di atas, diperoleh:

$$[\bar{v}_o(t) = M(t), v_i(t)] \quad (7)$$

Dimana $\bar{v}_o(t)$ adalah vektor tegangan keluaran frekuensi rendah, $\bar{v}_i(t)$ adalah vektor tegangan masukan sesaat, dan $M(t)$ adalah matriks transfer frekuensi rendah:

$$M(t) = \begin{bmatrix} m_{Aa}(t) & m_{Ba}(t) & m_{Ca}(t) \\ m_{Ab}(t) & m_{Bb}(t) & m_{Cb}(t) \\ m_{Ac}(t) & m_{Bc}(t) & m_{Cc}(t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

Kemudian dengan pendekatan serupa untuk arus rerata, dengan $\bar{i}_i(t)$ adalah vektor arus masukan frekuensi rendah, $\bar{i}_o(t)$ adalah vektor arus keluaran sesaat, dan $M^T(t)$ adalah matriks transpose $M(t)$ diturunkan hubungan:

$$[i_i(t) = M^T(t)i_o(t)] \quad (9)$$

Dengan demikian, hubungan dasar modulasi Venturini adalah bahwa komponen frekuensi rendah tegangan keluaran terbentuk dari nilai sesaat tegangan masukan, sementara komponen frekuensi rendah arus masukan dibentuk oleh arus keluaran. Selanjutnya, diasumsikan tegangan masukan tiga fasa berbentuk:

$$v_i(t) = \begin{bmatrix} v_i \cos(\omega_i t) \\ v_i \cos(\omega_i t - 2\pi/3) \\ v_i \cos(\omega_i t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (10)$$

Karena karakteristik *low-pass* dari beban, arus keluaran ialah:

$$i_o(t) = \begin{bmatrix} I_o \cos(\omega_i t + \phi_o) \\ I_o \cos(\omega_i t - 2\pi/3 + \phi_o) \\ I_o \cos(\omega_i t + 2\pi/3 + \phi_o) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Dengan $\omega_i = 2\pi f_i$ dan $\omega_o = 2\pi f_o$, demikian pula arus masukan yang diinginkan:

$$i_i(t) = \begin{bmatrix} I_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \\ I_i \cos(\omega_i t + \phi_i - 2\pi/3) \\ I_i \cos(\omega_i t + \phi_i + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Sedangkan tegangan keluaran dinyatakan sebagai:

$$v_o(t) = \begin{bmatrix} qv_i \cos(\omega_o t) \\ qv_i \cos(\omega_o t - 2\pi/3) \\ qv_i \cos(\omega_o t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Dengan dan persamaan keseimbangan daya aktif berikut harus dipenuhi:

$$\left[P_o = \frac{3qV_i I_o \cos(\phi_o)}{2} = \frac{3V_i I_i \cos(\phi_i)}{2} = P_i \right] \quad (14)$$

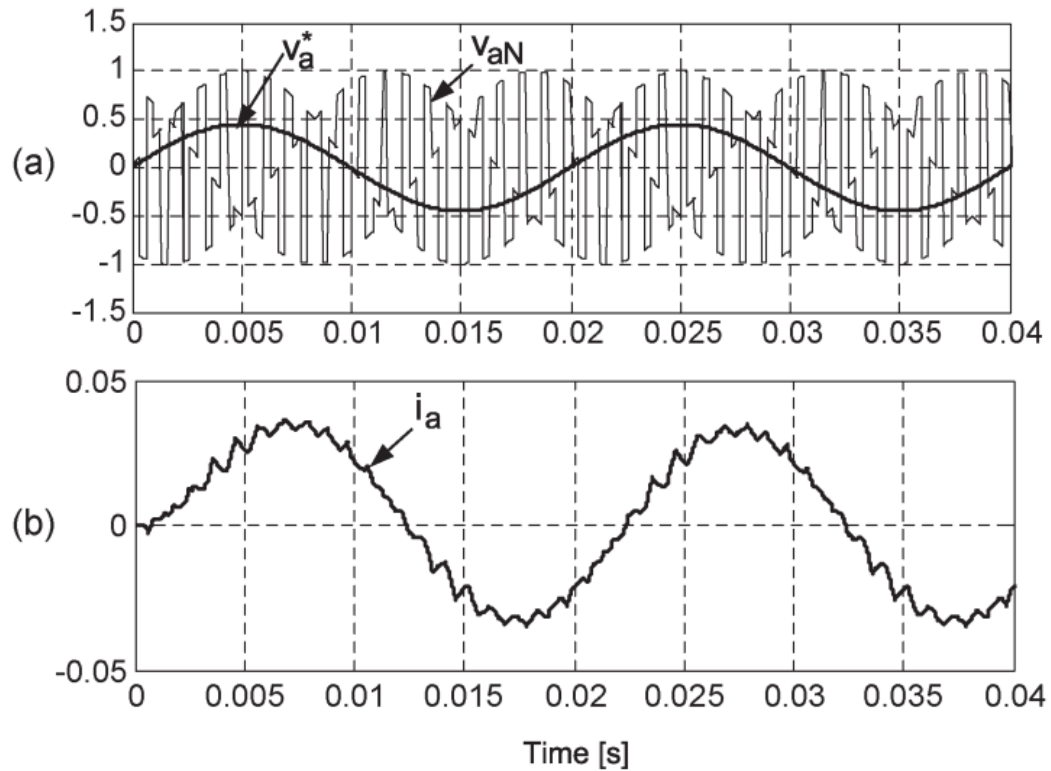
Dimana P_o dan P_i masing-masing adalah daya aktif keluaran dan masukan, ϕ_i adalah sudut perpindahan masukan, dan q adalah penguatan tegangan *matrix converter*. Sehingga permasalahan modulasi direduksi menjadi pencarian $(M(t))$ yang memenuhi persamaan tegangan dan arus di atas. Bentuk eksplisit matriks tersebut menghasilkan:

$$\left[m_{ij}(t) = \frac{1}{3} \left(1 + 2, v_{iN}(t), v_{jN}(t)/V_i^2 \right) \right] \quad (15)$$

dengan $(i = A, B, C)$ dan $(j = a, b, c)$.

Solusi dasar ini memiliki batas rasio peralihan tegangan maksimum ($q = 0.5$) karena prinsip kerja rata-rata dan bentuk gelombang masukan. Untuk mencapai rasio $q = \sqrt{3}/2 = 0.866$, Venturini menambahkan komponen *third harmonic* sehingga:

$$\left[m_{ij}(t) = \frac{1}{3} \left(1 + \frac{2v_{iN}(t)v_{jN}(t)}{V_i^2} + \frac{4q}{3\sqrt{3}}, \zeta \right) \right] \quad (16)$$



Gambar 2.10. Gelombang tipikal *direct matrix converter* (DMC) dengan modulasi Venturini dimana (a) tegangan keluaran v_{aN} dan referensinya v_a^* , serta (b) arus keluaran i_a [42].

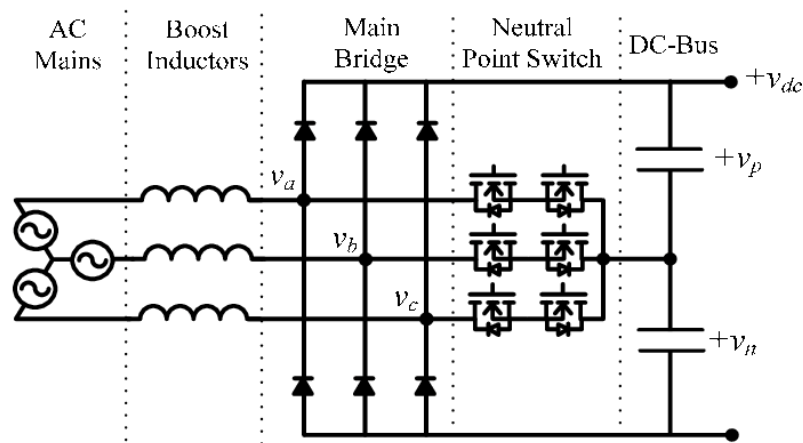
Dengan $\zeta = \sin(\omega_i t + \beta_i) \sin(3\omega_i t)$, serta $\beta_i = 0,2\pi/3, 4\pi/3$, dimana $i = A, B, C$ dan $j = a, b, c$. Tegangan penguatan yang sama $q = \sqrt{3}/2$ juga dapat dicapai menggunakan tegangan *line-to-line* [42]. Dengan persamaan-persamaan tersebut, makanya didapatkan tegangan dan arus keluaran *direct matrix converter* dengan metodel Venturini dengan Gambar 2.10 yang menampilkan bentuk tipikal tegangan dan arus keluaran.

2.6. *Vienna Rectifier*

Vienna Rectifier adalah tipe penyearah yang dapat digunakan pada aplikasi elektronika daya terkoneksi sistem tenaga listrik seperti *electric vehicle (EV) charging*, konversi tenaga angin pada pembangkit listrik tenaga bayu, UPS, dan instalasi sistem industri [49], [50]. Topologi ini menawarkan keunggulan berupa jumlah saklar aktif yang lebih sedikit dibandingkan rectifier tipe lain, serta mampu menghasilkan faktor daya tinggi, rugi-rugi saklar rendah, dan total harmonik arus input yang kecil [49], [51].

Struktur dasarnya mengombinasikan tiga *diode bridge*, tiga pasang saklar aktif, dan dua kapasitor *DC-link*, sehingga menghasilkan tiga terminal DC (positif, nol, dan negatif) yang memungkinkan penggunaan tegangan DC dua kutub, yang kini menjadi standar pada sistem *fast-charging* kendaraan listrik [52], [53]. Dimana Gambar 2.11 menunjukkan skema tipikal rangkaian penyearah tipe Vienna terdiri atas jembatan dioda utama dan saklar dua arah.

Dalam berbagai aplikasinya, *Vienna Rectifier* banyak dipilih sebagai *AC/DC stage* karena kemudahan penerapan *Power Factor Correction (PFC)*. Pada *fast-charging* kendaraan listrik *Vienna Rectifier* dapat dikombinasikan dengan *isolated DC/DC converter* seperti *series-resonant dual-active-bridge* untuk membangun sistem *charger* berdaya besar dengan efisiensi tinggi dan *low electromagnetic interference*. Penggunaan semikonduktor SiC (*Silicon Carbide*) juga telah terbukti meningkatkan *switching frequency* tanpa mengorbankan efisiensi, sehingga memungkinkan desain *input filter* yang lebih ringkas [52].



Gambar 2.11. Skema tipikal rangkaian penyearah tipe Vienna [54].

Vienna Rectifier tetap terdapat tantangan berupa distorsi arus input saat *zero-crossing* dan ketidakseimbangan tegangan pada titik netral (*midpoint*) pada *DC-link*. Distorsi arus *zero-crossing* utamanya disebabkan perubahan vektor *switching* yang mendadak saat arus input melewati nol, sedangkan ketidakseimbangan tegangan *midpoint* sering terjadi akibat asimetri beban dan waktu aksi vektor kecil yang kurang optimal. Untuk mengatasi tantangan ini terdapat berbagai pengembangan strategi modulator seperti modulasi *hybrid* yang merupakan mengkombinasikan *Discontinuous PWM (DPWM)* dan *Space Vector PWM (SVPWM)*, serta penambahan *control loop balancing* tegangan *midpoint* [49], [51].

Pengembangan kontrol *Vienna Rectifier* kini berfokus pada metode lanjutan untuk meningkatkan respons dinamik dan ketahanan terhadap gangguan. Selain PI dan *vector control* yang sudah menjadi standar, pendekatan *sliding mode control (SMC)* dan *fractional-order SMC (FOSMC)* mulai diadopsi berkat respons lebih cepat dan robust. *FOSMC* menawarkan fleksibilitas tuning yang lebih tinggi, sehingga stabilitas tetap terjaga pada perubahan beban mendadak. Alternatif lain adalah *direct power control (DPC)*, yang menyederhanakan struktur kontrol sekaligus mempercepat tracking daya aktif dan reaktif. [53].

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian tugas akhir ini dimulai pada bulan Oktober 2023 s.d. Oktober 2025 bertempat di Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung dan wilayah layanan *Mass Rapid Transit* (MRT) di Jakarta khususnya pada lintas rel Lebak Bulus s.d. Bundaran HI. Penelitian ini dilakukan dengan pemodelan menggunakan *software* Matlab-Simulink.

3.2. Alat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dengan menggunakan peralatan yang memiliki spesifikasi sebagai berikut:

1. Satu unit laptop dengan spesifikasi prosesor: *11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-11400H @ 2.70GHz (12 CPUs)*, RAM 16 GB, dan sistem operasi Windows 11 Home 64 bit. Laptop digunakan untuk menjalankan simulasi perangkat lunak MATLAB/Simulink
2. *Software* MATLAB R2024b-Simulink sebagai perangkat lunak perancangan dan pelaksanaan simulasi pemodelan *matrix converter* dan *Vienna rectifier* sebagai penyusun *solid state transformer* di gardu traksi.
3. Microsoft Office 2021 untuk membuat laporan penelitian tugas akhir (tesis).

3.3. Tahap Pelaksanaan Penelitian

Pencapaian tujuan penelitian ini memerlukan penggunaan pendekatan pemodelan sistem serta simulasi pada perangkat lunak MATLAB R2024b-Simulink. Tahapan-tahapan yang disusun untuk memenuhi tujuan tersebut diuraikan sebagai berikut.

3.3.1. Studi Literatur

Tahap pertama dalam penelitian ini merupakan tahap pengumpulan dan pengkajian literatur yang berfokus pada sistem elektrifikasi perkeretaapian, *solid state transformer* (SST), *matrix converter*, serta *Vienna Rectifier*. Studi literatur dilakukan untuk memperoleh pemahaman mendalam mengenai topik-topik tersebut melalui penelusuran referensi berupa *state of the art* (artikel ilmiah terkini dan tinjauan pustaka), artikel ulasan (*review*), jurnal, buku, maupun karya ilmiah relevan lainnya. Seluruh referensi yang telah dikumpulkan kemudian dianalisis dan disintesis sebagai dasar ilmiah yang mendukung pelaksanaan penelitian tugas akhir ini.

3.3.2. Observasi

Setelah melakukan studi literatur terkait, maka pada tahapan berikut penulis melakukan observasi rangkaian gardu traksi eksisting pada jalur layanan *mass rapid transit* Jakarta di lintas jalan rel rute Lebak Bulus s.d. Bundaran HI, khususnya pada gardu traksi Cipete Raya.

3.3.3. Pengumpulan Data

Tahap pengumpulan data ini dilakukan untuk mengetahui parameter yang digunakan untuk menunjang pengolahan data penelitian berupa:

- *Single line diagram* gardu traksi (*substation*) eksisting.
- Penggunaan komponen gardu traksi eksisting.
- Spesifikasi teknis unit kereta rel listrik (KRL) yang digunakan pada lintas jalan rel rute Lebak Bulus s.d. Bundaran HI, berdasarkan spesifikasi teknis diketahui jumlah beban listrik pada beberapa motor penggerak (traksi) unit yang dapat diasumsikan sebagai beban listrik satu set kesatuan kereta rel listrik. Spesifikasi ini diambil dari data teknis pemilik unit KRL atau sumber sekunder lain bersifat teknis.

3.3.4. Perancangan dan Analisis Simulasi

Pada tahap ini dilakukan perancangan susunan gardu traksi menggunakan *solid-state transformer* (SST) sebagai pengganti transformator konvensional. Susunan gardu traksi yang diteliti ini disimulasikan menggunakan *software* MATLAB *Simulink*. Perancangan ini dibuat berdasarkan parameter yang didapatkan dari tahapan studi literatur, observasi, dan pengumpulan data. Tahapan yang dilakukan pada perancangan simulasi ini ialah:

- Merancang topologi *matrix converter* tiga fasa sebagai *front-end converter* rangkaian beserta modulasi *Venturini* sebagai *switching* rangkaian dengan memanfaatkan komponen blok diagram dari MATLAB *Simulink*. Pada topologi ini juga ditambahkan *Medium Frequency Transformer* (MFT) untuk memungkinkan perbandingan pengujian konversi tidak langsung dengan pengujian langsung yang tidak menggunakan MFT.
- Merancang filter LCL sebagai *filter* perantara *front-end converter* dengan *back-end converter*.
- Merancang topologi *Vienna rectifier* sebagai *back-end converter* rangkaian beserta *switching* PWM dengan kontrol *vector* (transformasi arus dan tegangan) sebagai penunjangnya.

3.3.5. Pengujian Simulasi

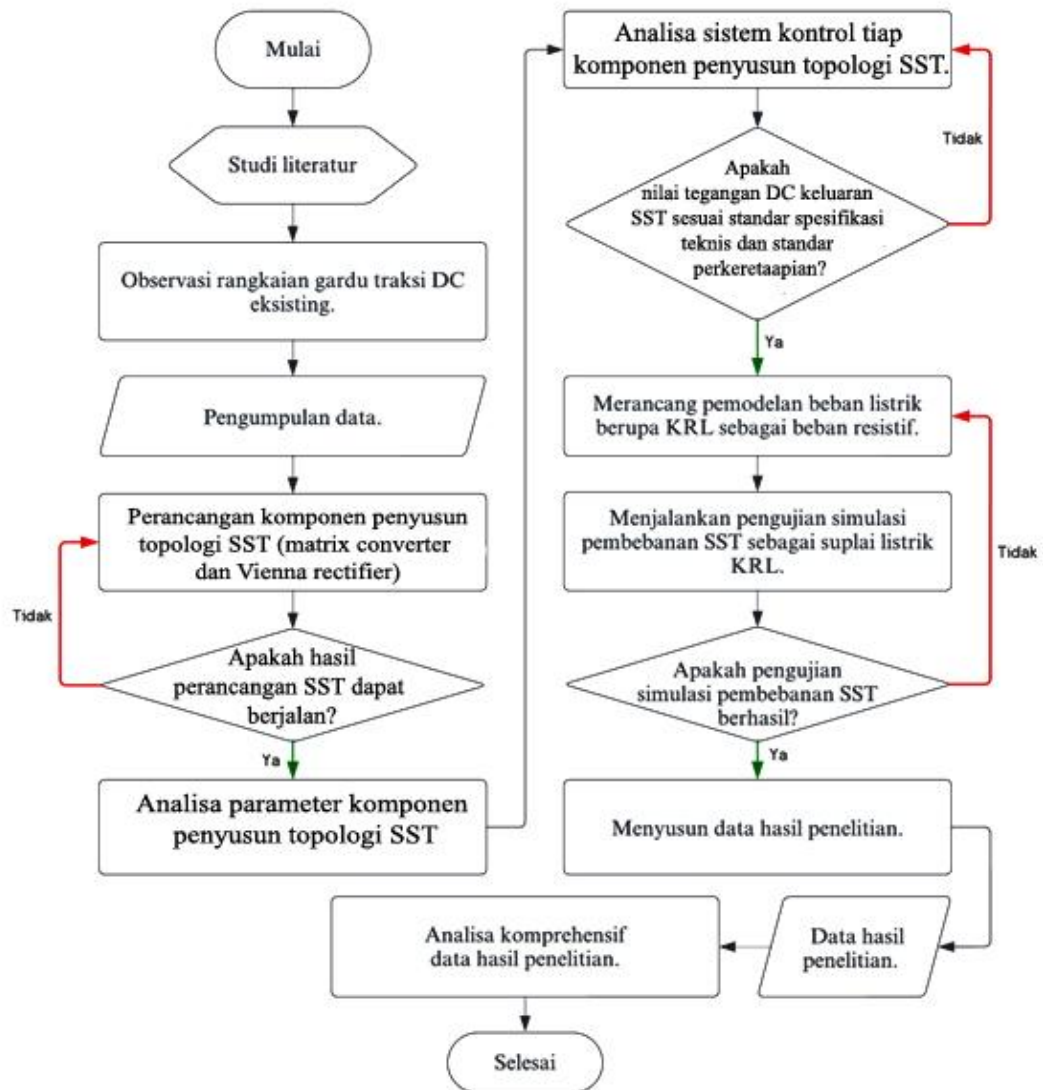
Pada tahap ini dilakukan pengujian terhadap susunan komponen pemodelan yang telah dirancang pada MATLAB *Simulink*. Tahap pengujian ini untuk mengumpulkan data dan menganalisa kinerja satu kesatuan rangkaian SST sebagai catu daya listrik tegangan 1.500 Volt DC untuk kereta rel listrik dalam kondisi statis (dimodelkan sebagai beban resistif/*dummy load*).

3.3.6. Penyusunan dan Analisis Data Hasil Pengujian

Tahap ini merupakan tahap terakhir penelitian. Setelah melakukan perancangan simulasi dan pengujian, maka penulis dapat menyusun data hasil penelitian untuk kemudian dianalisis secara komprehensif dari segi efisiensi kombinasi rangkaian SST berupa gabungan *matrix converter* dan *Vienna rectifier*.

3.4. Diagram Alir/Flowchart Penelitian

Tahapan dari penelitian ini mulai dari studi literatur, perancangan sistem, pengujian sistem, pengambilan data, dan penyusunan serta analisa data yang dapat dilihat pada diagram alir penelitian pada gambar 3.1 sebagai berikut.



Gambar 3.1. Diagram alir (*flowchart*) penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Penelitian ini disimpulkan dari perumusan dari serangkaian penelitian, pengujian, dan analisis yang telah dilaksanakan sebagai berikut:

1. *Matrix converter* dan *Vienna rectifier* dapat digunakan sebagai pengganti transformator konvensional di gardu traksi.
2. Topologi gardu traksi berbasis *Solid-State Transformer* (SST) yang dikembangkan menggunakan arsitektur AC–AC–DC, *matrix converter* (AC–AC) berfungsi sebagai *front-end* untuk meningkatkan frekuensi AC, sedangkan *Vienna rectifier* (AC–DC) bertindak sebagai *back-end* untuk menyuplai tegangan DC kepada sistem traksi (kereta rel listrik).
3. Dalam perancangan SST untuk aplikasi gardu traksi, *matrix converter* dioperasikan menggunakan modulasi *Venturini* metode 2, sementara *Vienna rectifier* dikendalikan melalui strategi kendali vektor yang menghasilkan sinyal pensaklaran PWM. Keduanya dihubungkan melalui filter LCL.
4. Pada pengujian konversi tidak langsung, digunakan transformator frekuensi menengah (*Medium Frequency Transformer/MFT*) untuk menurunkan tegangan sesuai kebutuhan sekaligus mengatasi keterbatasan rasio transfer pada *matrix converter*.
5. Konfigurasi gardu traksi berbasis SST yang mengombinasikan *matrix converter* dengan modulasi *Venturini* metode 2 pada rasio transfer maksimum ($m = 0,866$) serta *Vienna rectifier* dengan penalaan otomatis (*auto-tuning*) pada pengendali DC terbukti menghasilkan performa konversi daya yang paling efisien. Efisiensi tertinggi yang dicapai adalah 97,72% pada kondisi pengujian headway normal dengan daya beban sebesar 2.819,44 kW yang merupakan kondisi beban tertinggi dalam pengujian.

5.2. Saran

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, sejumlah saran dapat dijadikan dasar penelitian lanjutan disampaikan sebagai berikut:

1. Pengembangan pemodelan beban dinamis yang lebih mendekati karakteristik kereta rel listrik termasuk variasi beban akibat akselerasi, *cruising*, dan pengereman regeneratif, sehingga respon sistem gardu traksi berbasis SST dapat dievaluasi secara lebih realistis.
2. Perubahan beban traksi akibat penyempitan *headway* (penambahan frekuensi perjalanan kereta rel listrik) dapat menjadi kajian untuk mengetahui respons gardu traksi berbasis SST terhadap fluktuasi beban dinamis, stres termal, dan kemampuan menyerap energi regeneratif, serta dampaknya terhadap stabilitas dan efisiensi gardu traksi.
3. Analisis harmonisa gardu traksi berbasis SST dapat dijadikan kajian dampak distorsi gelombang, resonansi, dan kualitas daya terhadap performa keseluruhan gardu traksi.
4. Peningkatan kinerja *matrix converter* pada gardu traksi dapat dikembangkan lebih lanjut dengan modulasi *space vector pulse width modulation* (SVPWM) untuk memperoleh kualitas gelombang yang lebih baik, efisiensi *switching* yang lebih tinggi, serta kemampuan pengendalian yang lebih presisi.
5. Eksplorasi topologi lain *indirect matrix converter* (IMC) atau konfigurasi *multi-cell*, berpotensi meningkatkan efisiensi sistem serta memberikan karakteristik *fault tolerance* yang lebih baik sehingga lebih sesuai untuk aplikasi traksi yang menuntut keandalan tinggi.
6. Kemampuan bidirectional dan pemanfaatan energi regeneratif secara penuh dapat dikembangkan melalui penggunaan topologi *Active Front-End (AFE)* atau *Modular Multilevel Converter (MMC)* yang merupakan varian SST dua arah.
7. Penerapan metode kontrol cerdas, seperti *fuzzy logic*, *neural network*, atau pendekatan adaptif lainnya, dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan kemampuan adaptasi sistem terhadap perubahan beban, gangguan jaringan, dan dinamika operasi pada sistem traksi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Yousefi, "Characterizing the Performance of Fixed-Block and Moving-Block Signal Systems in Urban Rail Transit: A Microscopic Simulation Approach," 2024. doi: 10.2139/ssrn.4985596.
- [2] J. Pachl, "Railway Signalling Principles," no. Technische Universität Braunschweig, 2020, doi: 10.24355/dbbs.084-202006161443-0.
- [3] A. M. Elagab dan I. M. El-Amin, "The Impact of Electrical Traction Drives on Power System Quality under Different Loading Conditions," *Arab J Sci Eng*, vol. 47, no. 11, hlm. 14695–14710, Nov 2022, doi: 10.1007/s13369-022-06774-w.
- [4] Z. Tian, P. Weston, N. Zhao, S. Hillmansén, C. Roberts, dan L. Chen, "System energy optimisation strategies for metros with regeneration," *Transp Res Part C Emerg Technol*, vol. 75, hlm. 120–135, Feb 2017, doi: 10.1016/j.trc.2016.12.004.
- [5] D. Sadiq, "Review of Energy Storage Systems in Regenerative Braking Energy Recovery in DC Electrified Urban Railway Systems: Converter Topologies, Control Methods, & Future Prospects," *TechRxiv*, Sep 2021, doi: 10.36227/techrxiv.16699942.v1.
- [6] J. E. Huber dan J. W. Kolar, "Volume/weight/cost comparison of a 1MVA 10 kV/400 V solid-state against a conventional low-frequency distribution transformer," dalam *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, IEEE, Sep 2014, hlm. 4545–4552. doi: 10.1109/ECCE.2014.6954023.
- [7] M. Tanta, J. G. Pinto, V. Monteiro, A. P. Martins, A. S. Carvalho, dan J. L. Afonso, "Topologies and Operation Modes of Rail Power Conditioners in AC Traction Grids: Review and Comprehensive Comparison," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 9, hlm. 2151, Mei 2020, doi: 10.3390/en13092151.

- [8] H. J. Kaleybar, M. Brenna, F. Foiadelli, S. S. Fazel, dan D. Zaninelli, "Power Quality Phenomena in Electric Railway Power Supply Systems: An Exhaustive Framework and Classification," *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 24, hlm. 6662, Des 2020, doi: 10.3390/en13246662.
- [9] D. Frugier dan P. Ladoux, "Voltage disturbances on 25kV-50 Hz railway lines – Modelling method and analysis," dalam *SPEEDAM 2010*, IEEE, Jun 2010, hlm. 1080–1085. doi: 10.1109/SPEEDAM.2010.5544858.
- [10] S. M. Mousavi Gazafrudi, A. Tabakhpour Langerudy, E. F. Fuchs, dan K. Al-Haddad, "Power Quality Issues in Railway Electrification: A Comprehensive Perspective," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 5, hlm. 3081–3090, Mei 2015, doi: 10.1109/TIE.2014.2386794.
- [11] Yasu Oura, Yoshifumi Mochinaga, dan Hiroki Nagasawa, "Railway electric power feeding systems," *Japan Railway & Transport Review* 16, hlm. 48–58, Juni 1998.
- [12] P. Ladoux, J. Fabre, dan H. Caron, "Power Quality Improvement in ac Railway Substations: The concept of chopper-controlled impedance," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 2, no. 3, hlm. 6–15, Sep 2014, doi: 10.1109/MELE.2014.2331792.
- [13] A. Verdicchio, P. Ladoux, H. Caron, dan C. Courtois, "New Medium-Voltage DC Railway Electrification System," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 2, hlm. 591–604, Jun 2018, doi: 10.1109/TTE.2018.2826780.
- [14] D. Frugier dan P. Ladoux, "Voltage disturbances on 25kV-50 Hz railway lines – Modelling method and analysis," dalam *SPEEDAM 2010*, IEEE, Jun 2010, hlm. 1080–1085. doi: 10.1109/SPEEDAM.2010.5544858.
- [15] D. Cornic, "Efficient recovery of braking energy through a reversible dc substation," dalam *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, IEEE, Okt 2010, hlm. 1–9. doi: 10.1109/ESARS.2010.5665264.
- [16] A. Steimel, "Under Europe's incompatible catenary voltages a review of multi-system traction technology," dalam *2012 Electrical Systems for*

- Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, IEEE, Okt 2012, hlm. 1–8. doi: 10.1109/ESARS.2012.6387460.
- [17] M. Brenna, F. Foiadelli, dan D. Zaninelli, *Electrical Railway Transportation Systems*. Wiley, 2018. doi: 10.1002/9781119386827.
- [18] M. Brenna, F. Foiadelli, dan H. J. Kaleybar, “The Evolution of Railway Power Supply Systems Toward Smart Microgrids: The concept of the energy hub and integration of distributed energy resources,” *IEEE Electrification Magazine*, vol. 8, no. 1, hlm. 12–23, Mar 2020, doi: 10.1109/MELE.2019.2962886.
- [19] D. Yu, Z. Wu, L. Wang, Z. Cao, dan H. Aliev, “Energy-Efficient DC Power Traction Network Systems for Urban Mass Transportation: A Comparative Study of Optimization Algorithms,” *IEEE Access*, vol. 13, hlm. 45653–45668, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3547626.
- [20] C. Zhao dkk., “Power Electronic Traction Transformer—Medium Voltage Prototype,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 7, hlm. 3257–3268, Jul 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2278960.
- [21] H. Hayashiya dan K. Kondo, “Recent trends in power electronics applications as solutions in electric railways,” *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 15, no. 5, hlm. 632–645, Mei 2020, doi: 10.1002/tee.23121.
- [22] C. Stackler, D. Velazco, F. Wallart, dan P. Dworakowski, “Scalable Solid State Transformers (SSTs) for DC railway substations,” dalam *PCIM International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Nuremberg (on line), Germany, Jul 2020. [Daring]. Tersedia pada: <https://hal.science/hal-03195539>
- [23] M. A. Hannan dkk., “State of the Art of Solid-State Transformers: Advanced Topologies, Implementation Issues, Recent Progress and Improvements,” *IEEE Access*, vol. 8, hlm. 19113–19132, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2967345.
- [24] S. Khan, K. Rahman, M. Tariq, S. Hameed, B. Alamri, dan T. S. Babu, “Solid-State Transformers: Fundamentals, Topologies, Applications, and

- Future Challenges,” *Sustainability*, vol. 14, no. 1, hlm. 319, Des 2021, doi: 10.3390/su14010319.
- [25] D. Cervero *dkk.*, “Solid State Transformers: A Critical Review of Projects with Relevant Prototypes and Demonstrators,” *Electronics (Basel)*, vol. 12, no. 4, hlm. 931, Feb 2023, doi: 10.3390/electronics12040931.
- [26] R. Hassan dan G. Radman, “Survey on Smart Grid,” dalam *Proceedings of the IEEE SoutheastCon 2010 (SoutheastCon)*, IEEE, Mar 2010, hlm. 210–213. doi: 10.1109/SECON.2010.5453886.
- [27] S. Khan, K. Rahman, M. Tariq, S. Hameed, B. Alamri, dan T. S. Babu, “Solid-State Transformers: Fundamentals, Topologies, Applications, and Future Challenges,” *Sustainability*, vol. 14, no. 1, hlm. 1–20, Des 2021, doi: 10.3390/su14010319.
- [28] X. Wang, L. Cao, dan J. Meng, “Modulation Strategy of the Input Stage for Solid State Transformer Based on Modular Multilevel,” dalam *2018 IEEE International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE)*, IEEE, Nov 2018, hlm. 289–294. doi: 10.1109/AUTEEE.2018.8720749.
- [29] G. Zheng, Y. Chen, dan Y. Kang, “A Modular Multilevel Converter (MMC) Based Solid-State Transformer (SST) Topology with Simplified Energy Conversion Process and Magnetic Integration,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 68, no. 9, hlm. 7725–7735, Sep 2021, doi: 10.1109/TIE.2020.3013493.
- [30] A. Shojaei dan G. Joos, “A topology for three-stage Solid State Transformer,” dalam *2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, IEEE, 2013, hlm. 1–5. doi: 10.1109/PESMG.2013.6672781.
- [31] A. Q. Huang, M. L. Crow, G. T. Heydt, J. P. Zheng, dan S. J. Dale, “The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy Internet,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 1, hlm. 133–148, Jan 2011, doi: 10.1109/JPROC.2010.2081330.
- [32] S. Falcones, Xiaolin Mao, dan R. Ayyanar, “Topology comparison for Solid State Transformer implementation,” dalam *IEEE PES General Meeting*, IEEE, Jul 2010, hlm. 1–8. doi: 10.1109/PES.2010.5590086.

- [33] A. Q. Huang, "Medium-Voltage Solid-State Transformer: Technology for a Smarter and Resilient Grid," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 10, no. 3, hlm. 29–42, Sep 2016, doi: 10.1109/MIE.2016.2589061.
- [34] Hengsi Qin dan J. W. Kimball, "Ac-ac dual active bridge converter for solid state transformer," dalam *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, IEEE, Sep 2009, hlm. 3039–3044. doi: 10.1109/ECCE.2009.5316507.
- [35] S. Khan, K. Rahman, M. Tariq, S. Hameed, B. Alamri, dan T. S. Babu, "Solid-State Transformers: Fundamentals, Topologies, Applications, and Future Challenges," *Sustainability*, vol. 14, no. 1, hlm. 319, Des 2021, doi: 10.3390/su14010319.
- [36] M. Sabahi, S. H. Hosseini, M. B. Sharifian, A. Y. Goharrizi, dan G. B. Gharehpetian, "Zero-voltage switching bi-directional power electronic transformer," *IET Power Electronics*, vol. 3, no. 5, hlm. 818, 2010, doi: 10.1049/iet-pel.2008.0070.
- [37] J. Zhang, J. Liu, S. Zhong, J. Yang, N. Zhao, dan T. Q. Zheng, "A Power Electronic Traction Transformer Configuration With Low-Voltage IGBTs for Onboard Traction Application," *IEEE Trans Power Electron*, vol. 34, no. 9, hlm. 8453–8467, Sep 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2889107.
- [38] J. W. Kolar, T. Friedli, J. Rodriguez, dan P. W. Wheeler, "Review of Three-Phase PWM AC–AC Converter Topologies," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 11, hlm. 4988–5006, Nov 2011, doi: 10.1109/TIE.2011.2159353.
- [39] A. Ali, J. Su, A. Farghly, Z. A. Memon, dan P. H. Shaikh, "Advanced Modulation Techniques and Topological Innovations in High-Frequency Link Inverters: A Comprehensive Review," *IEEE Access*, vol. 13, hlm. 128541–128561, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3535776.
- [40] Y. Zhang dkk., "Cascaded Modular Multilevel Converter and Cycloconverter Based Machine Drive System," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 70, no. 3, hlm. 2373–2384, Mar 2023, doi: 10.1109/TIE.2022.3169851.

- [41] T. Islam, H. H. Fayek, E. Rusu, dan F. Rahman, “Triac Based Novel Single Phase Step-Down Cycloconverter with Reduced THDs for Variable Speed Applications,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 18, hlm. 8688, Sep 2021, doi: 10.3390/app11188688.
- [42] J. Rodriguez, M. Rivera, J. W. Kolar, dan P. W. Wheeler, “A Review of Control and Modulation Methods for Matrix Converters,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 1, hlm. 58–70, Jan 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2165310.
- [43] A. von Jouanne, E. Agamloh, dan A. Yokochi, “A Review of Matrix Converters in Motor Drive Applications,” *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 1, hlm. 164, Jan 2025, doi: 10.3390/en18010164.
- [44] L. C. Gili, J. C. Dias, dan T. B. Lazzarin, “Review, Challenges and Potential of AC/AC Matrix Converters CMC, MMC, and M3C,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 24, hlm. 9421, Des 2022, doi: 10.3390/en15249421.
- [45] D. Varajão dan R. E. Araújo, “Modulation Methods for Direct and Indirect Matrix Converters: A Review,” *Electronics (Basel)*, vol. 10, no. 7, hlm. 812, Mar 2021, doi: 10.3390/electronics10070812.
- [46] S. Ferreira Pinto dan J. Fernando Silva, “Input filter design for sliding mode controlled matrix converters,” dalam *2001 IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.01CH37230)*, IEEE, 2001, hlm. 648–653. doi: 10.1109/PESC.2001.954190.
- [47] M. hamouda, F. Fnaiech, dan K. Al-Haddad, “Input filter design for SVM Dual-Bridge Matrix Converters,” dalam *2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, IEEE, Jul 2006, hlm. 797–802. doi: 10.1109/ISIE.2006.295736.
- [48] H. She, H. Lin, X. Wang, dan L. Yue, “Damped input filter design of matrix converter,” dalam *2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, IEEE, Nov 2009, hlm. 672–677. doi: 10.1109/PEDS.2009.5385684.

- [49] Y. Wang, Y. Li, X. Guo, dan S. Huang, “Hybrid Space Vector PWM Strategy for Three-Phase Vienna Rectifiers,” *Sensors*, vol. 22, no. 17, hlm. 1–14, Sep 2022, doi: 10.3390/s22176607.
- [50] R. Raman *dkk.*, “An Experimental Investigation and Feasibility Analysis of a Novel Modified Vienna Rectifier for Harmonic Mitigation in an Induction Heating System,” *Machines*, vol. 11, no. 4, hlm. 488, Apr 2023, doi: 10.3390/machines11040488.
- [51] S. Zhu, J. Liu, Y. Cao, B. Guan, dan X. Du, “Vienna Rectifier Modeling and Harmonic Coupling Analysis Based on Harmonic State-Space,” *Electronics (Basel)*, vol. 13, no. 8, hlm. 1447, Apr 2024, doi: 10.3390/electronics13081447.
- [52] G. Wrona, M. Zdanowski, P. Trochimiuk, J. Rąbkowski, dan R. Sobieski, “Experimental Validation of 40 kW EV Charger Based on Vienna Rectifier and Series-Resonant Dual Active Bridge,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 15, hlm. 5797, Agu 2023, doi: 10.3390/en16155797.
- [53] T. Wang, S. Chen, X. Li, J. Zhang, dan J. Ma, “Direct Power Control of Vienna Rectifier Based on Fractional Order Sliding Mode Control,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 15, no. 12, hlm. 543, Nov 2024, doi: 10.3390/wevj15120543.
- [54] R. Burgos, R. Lai, Y. Pei, F. Wang, D. Boroyevich, dan J. Pou, “Space Vector Modulation for Vienna-Type Rectifiers Based on the Equivalence between Two- and Three-Level Converters: A Carrier-Based Implementation,” dalam *2007 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, IEEE, 2007, hlm. 2861–2867. doi: 10.1109/PESC.2007.4342473.