

**ANALISIS MATRIX CONVERTER SEBAGAI SOLID STATE
TRANSFORMER (SST) PADA SISTEM CHARGING BATTERY
MENGGUNAKAN KENDALI FUZZY LOGIC**

(TESIS)

Oleh :
LUNGGUK SIBUEA
NPM 2225031001



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

**ANALISIS MATRIX CONVERTER SEBAGAI SOLID STATE
TRANSFORMER (SST) PADA SISTEM CHARGING BATTERY
MENGGUNAKAN KENDALI FUZZY LOGIC**

**Oleh
LUNGGUK SIBUEA**

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
2025**

ABSTRAK

ANALISIS MATRIX CONVERTER SEBAGAI SOLID STATE TRANSFORMER (SST) PADA SISTEM CHARGING BATTERY MENGGUNAKAN KENDALI FUZZY LOGIC

Oleh

LUNGGUK SIBUEA

Kemajuan teknologi diera digitalisasi membuat kebutuhan energi listrik menjadi sangat vital dalam dunia industri. Keandalan pasokan listrik tentunya memiliki tantangan serius terkait terjadinya blackout sistem transmisi akibat gagalnya blackstart pada pembangkit karena supply baterai tidak berfungsi optimal. Guna mengantisipasi kegagalan tersebut dilakukan pemodelan *Matrix Converter (MC)* sebagai *Solid State Transformer (SST)* pengganti trafo konvensional untuk menjaga kestabilan tegangan dan mengubah tegangan sesuai kebutuhan untuk supply baterai. Metodologi SVPWM menggunakan 9 saklar bidirectional pada MC untuk memodulasi lebar pulsa dengan membandingkan duty cicle terhadap gelombang berfrekuensi tinggi. Perbandingan ini dapat menentukan kapan setiap saklar dalam konverter harus open atau close dalam setiap siklus switching. Untuk mengendalikan tegangan stabil dan mengendalikan arus efisien dalam proses charging baterai digunakan *Fuzzy Logic control (FLC)*. Dengan *Rectifier* sebagai penyearah (AC-DC) didapatkan hasil tegangan di 127,6 volt DC sehingga proses charging baterai dapat bekerja secara optimal dan stabil.

Kata kunci: Matrix Converter, SVPWM, Charging Baterai, Fuzzy Logic Control.

ABSTRACT

ANALYSIS OF MATRIX CONVERTER AS SOLID STATE TRANSFORMER (SST) IN BATTERY CHARGING SYSTEM USING FUZZY LOGIC CONTROL

By

LUNGGUK SIBUEA

Technological advancements in the digital era have made electrical energy needs vital in the industrial world. The reliability of electricity supply certainly has serious challenges related to transmission system blackouts due to the failure of blackstart at the plant because the battery supply is not functioning optimally. To anticipate this failure, Matrix Converter (MC) modeling is carried out as a Solid State Transformer (SST) to replace conventional transformers to maintain voltage stability and change the voltage according to the needs for battery supply. The SVPWM methodology uses 9 bidirectional switches in the MC to modulate pulse width by comparing the duty cycle against high-frequency waves. This comparison can determine when each switch in the converter should be open or closed in each switching cycle. To control stable voltage and efficient current in the battery charging process, Fuzzy Logic control (FLC) is used. With a Rectifier as the converter (AC-DC), a stable voltage of 127.6 volts DC is obtained, so the battery charging process can work optimally and stably

Keywords: Matrix Converter, SVPWM, Charging Battery, Fuzzy Logic Control.

Judul Tesis : ANALISIS MATRIX CONVERTER
SEBAGAI SOLID STATE
TRANSFORMER (SST) PADA SISTEM
CHARGING BATTERY
MENGGUNAKAN KENDALI FUZZY
LOGIC

Nama Mahasiswa : Lungguk Sibuea

Nomor Pokok Mahasiswa : 2225031001

Program Studi : Magister Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

Pembimbing I : Dr. Eng. Ir. Charles R Harahap, S.T., M.T.
NIP 19691211 199903 1 001

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

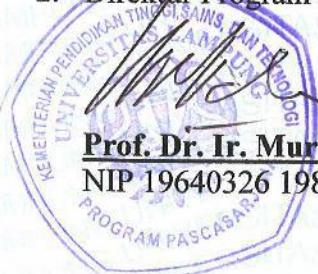
1. Dekan Fakultas Teknik



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 : **27 November 2025**

SURAT 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 “Analisa Matrix Converter Sebagai Solid State Transformer (SST) pada Sistem Charging Battery Menggunakan Kendali Fuzzy Logic” 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, 03 Desember 2025

Lungguk Sibuea

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Sipitu-pitu, 19 November 1990. Penulis merupakan anak ke-tiga dari delapan bersaudara dari pasangan Bapak Alm.Ramli Sibuea dan Ibu Jetty Marpaung. Riwayat pendidikan penulis, penulis lulus dari Sekolah Dasar (SD) di SD 177072 Halado Siantar Narumonda pada tahun 2002, Lulus Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMPN 3 Porsea pada tahun 2005, Lulus Sekolah Menegah Atas (SMA) di SMAN 1 Siantar

Narumonda pada tahun 2008 dan diterima di Universitas Sriwijaya Palembang di Jurusan Teknik Elektro pada tahun 2009 dan meraih gelar Sarjana Teknik (S.T) pada tahun 2014. Penulis melakukan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT PLN (Persero) Gardu Induk Simpang 3 Indralaya pada tahun 2012. Pada tahun 2022 penulis terdaftar sebagai Mahasiswa Program Pascasarjana Teknik Elektro di Universitas Lampung, penulis melakukan penelitian pada bidang Sistem Tenaga Listrik dengan judul Tesis “Analisa Matrix Converter Sebagai Solid State Transformer (SST) pada Sistem Charging Battery Menggunakan Kendali Fuzzy Logic Untuk meningkatkan kestabilan tegangan untuk proses charging baterai dan Meminimalisir terjadinya gagal blackstart sistem pembangkit” 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, 03 Desember 2025

Penulis



PERSEMBAHAN

Dengan Kasih Karunia dari Allah Bapa, Kasih Pengorbanan Anaknya Tuhan
Yesus Kristus dan Penyertaan Kasih Sukacita Roh Kudus
Karya Tulis ini ku persembahkan untuk :

Bapak dan Ibu Tercinta,

Alm.Ramli Sibuea dan Jetty Marpaung

Istriku Tersayang

Ronauli Y Sipayung (Mama Sean)

Saudara Terkasih

Rohani Sibuea, Hiras Sibuea, Desi Sibuea, Teddy Sibuea, Novita Sibuea, Ledi Sibuea dan si bungsu Gomgom Sibuea

Anak Tersayang

Darren Feynman Parasean Sibuea

Dosen Teknik Elektro,

Yang selalu membimbing, mengajarkan, memberikan saran, baik secara akademis maupun non akademis

Keluarga Besar MTE 2022,

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

Almamaterku,

Universitas Lampung



MOTTO

*“Segala perkara dapat kutanggung di dalam Dia yang memberi kekuatan
kepadaku”*
(Filipi 4: 13)

*“Tetapi carilah dahulu Kerajaan Allah dan kebenarannya, maka semuanya itu
akan ditambahkan kepadamu. Sebab itu janganlah kamu kuatir akan hari
besok, karena hari besok mempunyai kesusahannya sendiri. Kesusahan sehari
cukuplah untuk sehari “*

(Matius 6 :33-34)

**“Hendaknya perjuangan kita harus kita dasarkan pada kesucian. Kami
percaya bahwa perjuangan yang suci itu senantiasa mendapat pertolongan
dari Tuhan”**

(Jenderal Besar Soedirman)

**“Keberhasilan bukanlah milik orang yang pintar. Keberhasilan adalah
kepunyaan mereka yang senantiasa berusaha”**

(Presiden RI Bapak BJ.Habibie)

SANWACANA

Dengan mengucapkan puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan berkat kasih dan karunia-Nya, Saya akhirnya bisa menyelesaikan penulisan Tugas Akhir Tesis yang berjudul “ **ANALISIS MATRIX CONVERTER SEBAGAI SOLID STATE TRANSFORMER (SST) PADA SISTEM CHARGING BATTERY MENGGUNAKAN KENDALI FUZZY LOGIC** ” ini dapat terselesaikan ditengah tantangan dan aktivitas pekerjaan rutin dikantor. 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 dan Dr.Herman H Sinaga, S.T., M.T., selaku Penguji Pendamping sekaligus dosen Pembimbing Akademik selama proses Study Program Magister di

Universita Lampung. Terima kasih saran dan masukan utuk 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. Istriku tercinta Ronauli Sipayung (Mama Sean Feynman dan Sean Feynman penyemangatku) dan Mama J. Marpaung yang melahirkanaku, yang selalu support dalam doa maupun materi dan Saudara-saudari tercinta 8 bersaudara yang selalu mendukung semua proses dalam penyelesaian Tesis ini.
8. Rekan-rekan seperjuangan Mahasiswa MTE Angkatan 2022 terima kasih saya ucapan buat kebersamaan dalam susah senang selama menjalani masa study di Universitas Lampung.
9. Rekan-rekan kerja di PLN UP3 Pringsewu dan UP3 Kotabumi yang selalu membackup pekerjaan diterutama dimasa-masa saya menjalankan study, kalian the best dan terbaik makin sukses dan menyala selalu.

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, Desember 2025

Penulis

Lungguk Sibuea

Daftar Isi

Halaman Judul	i
Daftar Isi	ii
Daftar Gambar.....	iii
Daftar Tabel.....	iv

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Tujuan Penelitian.....	4
1.3. Perumusan Masalah.....	4
1.4. Pembatasan Masalah.....	5
1.5. Metodologi Penelitian.....	5
1.6. Sistematika Penulisan	6

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Emergency Diesel Generator (EDG)	8
2.1.1. Umum	8
2.2. Solid Stated Transformer (SST)	10
2.2.1. Prinsip Kerja SST	12
2.2.2. Aplikasi Umum SST	14
2.3. Matrix Converter.....	16
2.3.1. <i>Boost Converter</i>	19
2.3.2. Pensaklaran Terbuka.....	21
2.3.3. Pensaklaran Tertutup.....	21
2.4. Transformasi Clarke.....	23
2.4.1. Transformasi Invers Clarke.....	24
2.4.2. Transformasi Park	25
2.4.3. Transformasi Invers Park	26
2.5. <i>Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM)</i>	27

2.6. Charging Batterai	29
2.7. Sistem Fuzzy Logic Kontrol	31

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian.....	36
3.2. Alat dan Bahan.....	36
3.3. Spesifikasi Alat	36
3.4. Tahap Pelaksanaan Penelitian.....	36
3.4.1. Studi Literatur	36
3.4.2. Observasi.....	37
3.4.3. Pengumpulan Data	37
3.4.4. Pemodelan dan Analisis Simulasi.....	37
3.4.5. Pengujian Hasil Simulasi	40
3.4.6. Penyusunan dan Analisa Data Hasil Pengujian	40
3.5. Diagram Alir/ <i>Flowchart</i> Penelitian	41

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Pemodelan Matriks Konverter Sebagai SST Tanpa FL.....	42
4.2. Hasil Pemodelan Matriks Konverter Sebagai SST dengan FL	45
4.1.1. Perhitungan Index Modulation	52
4.1.2. Pemodelan Rangkaian SVPWM	56
4.3. Hasil Pemodelan Rectifier Penyearah 3 Fasa	62
4.4. Pengendalian Boost Converter Menggunakan Kendali Fuzzy Logic	63
4.4.1. Sistem Kendali Fuzzy Logic Pada Boost Konverter.....	65
4.4.2. Hasil Pemodelan Boost Converter Menggunakan Kendali FL.....	68
4.5. Pengendalian Charging Batterai Menggunakan Kendali Fuzzy Logic	69
4.5.1. Sistem Kendali Fuzzy Logic Pada Kendali Charging Batterai.....	69
4.5.2. Hasil PemodelaN Charging Batterai Menggunakan Kendali FL... ..	72
4.5. Analisa Hasil Simulasi Pemodelan	73

BAB IV KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan	75
5.1. Saran	76

Daftar Gambar

Gambar 1.1. Komponen utama Sistem Kelistrikan.....	2
Gambar 2.1. Emergency Diesel Generator (EDG).....	8
Gambar 2.2. Konsep Solid State Transformer (SST).....	11
Gambar 2.3. Klasifikasi Topologi SST	12
Gambar 2.4. Arsitektur Solid State Transformer	12
Gambar 2.5. SST Pada Taksi Lokomotive.....	15
Gambar 2.6. SST pada <i>Offshore energy generation</i>	15
Gambar 2.7. SST pada <i>Smart Grid</i>	16
Gambar 2.8. Rangkaian Matrix Converter 3 Fasa.....	17
Gambar 2.9. Bentuk Gelombang Tegangan.....	19
Gambar 2.10. <i>Boost Converter</i>	19
Gambar 2.11. <i>Continuous Current Mode</i>	20
Gambar 2.12. <i>Discontinuous Current Mode</i>	21
Gambar 2.13. Siklus Kerja <i>Buck-Boost Converter</i>	21
Gambar 2.14. Siklus Kerja <i>Buck-Boost Converter Pensaklaran tertutup</i>	22
Gambar 2.15. Koordinat Transformasi Clarke.....	23
Gambar 2.16. Koordinat transformasi Invers Clarke	24
Gambar 2.17. Koordinat Transformasi Park	25
Gambar 2.18. Koordinat transformasi Invers Park	26
Gambar 2.19. Vector Dasar SVPWM	27
Gambar 2.20. Kapasitas Baterai di PLTG Sebalang	30
Gambar 2.21. Rangkaian pengisi Daya dua arah yang dijepit diode	31
Gambar 2.22. Struktur Dasar Logika Fuzzy	32

Gambar 2.23. Pemodelan Fuzzy Metode Sugeno	35
Gambar 3.1. Tampilan Simulink MATLAB	38
Gambar 3.2. Diagram Blok Fuzzy Logic	38
Gambar 3.3. Diagram blok EDG kondisi eksisting.....	39
Gambar 3.4. Diagram blok EDG menggunakan matriks konverter.....	39
Gambar 3.5. Pemodelan Charging Batterai	40
Gambar 3.6. Diagram Alir Penelitian	41
Gambar 4.1. Diagram kondisi Eksisting	42
Gambar 4.2. Gelombang Tegangan 3 Fasa Tanpa Kendali Fuzzy Logic	43
Gambar 4.3. Gelombang Arus 3 Fasa Tanpa Kendali Fuzzy Logic	43
Gambar 4.4. Gelombang Tegangan Keluaran Rectifier Penyearah 3 Fasa Tanpa Fuzzy Logic	44
Gambar 4.5. Gelombang Tegangan Boost Converter Tanpa Kandali Fuzzy Logic	45
Gambar 4.6. Diagram Blok Kondisi Menggunakan Fuzzy Logic	46
Gambar 4.7. Gelombang Tegangan Sumber Tiga Fasa dengan Fuzzy Logic.....	48
Gambar 4.8. Gelombang Arus Sumber Tiga Fasa	48
Gambar 4.9. Diagram Blok Tegangan Transformasi Park.....	50
Gambar 4.10. Gelombang Keluaran Tegangan Transformasi Clarke	51
Gambar 4.11. Respon Siyal berbentuk gelombang Persegi	52
Gambar 4.12. Gelombang duty cycle 1/d1 sampai 1/d4	55
Gambar 4.13. Rangkaian SVPWM	57
Gambar 4.14. Gelombang sinyal modulasi keluaran Algoritma SVPWM	59
Gambar 4.15. Pemodelan Matrix Converter sebagai SST sebagai SST dengan 9 saklar bidirectional.....	60

Gambar 4.16. Gelombang Tegangan Keluaran Matrix converter sebagai SST	61
Gambar 4.17. Gelombang Arus Keluaran Matrix converter sebagai SST	61
Gambar 4.18. Rectifier Penyearah 3 fasa.....	62
Gambar 4.19. Gelombang Tegangan keluaran Rectifier Penyearah 3 Fasa.....	63
Gambar 4.20. Rangkaian Boost Converter Untuk menaikkan Tegangan DC.....	64
Gambar 4.21. Sistem Kendali Fuzzy untuk Menentukan e,Delta e dan fu	65
Gambar 4.22. Membershif function boost Converter	66
Gambar 4.23. Surface viewer duty cycle	67
Gambar 4.24. Membershif function duty cycle range 200 hz sampai 9300 hz.....	68
Gambar 4.25. Gelombang tegangan boost converter.....	68
Gambar 4.26. Sistem member function kendali Fuzzy charging batterai	70
Gambar 4.27.Rules sistem charging batterai.....	70
Gambar 4.28. Membershif function charging batterai	70
Gambar 4.29. Rangkaian 3 Motor DC Beban Baterai	72
Gambar 4.30. Gelombang Tegangan Charging Batterai.....	72

Daftar Tabel

Tabel 1. Parameter Matrix Converter.....	46
Tabel 2. Switching antara input (A,B,C) dan output (a,b,c)	58
Tabel 3. Membership Function	65
Tabel 4. Rules Base Sugeno inference system booster konverter.....	67
Tabel 5. Rules base Sugeno inference sistem charging batterai	71

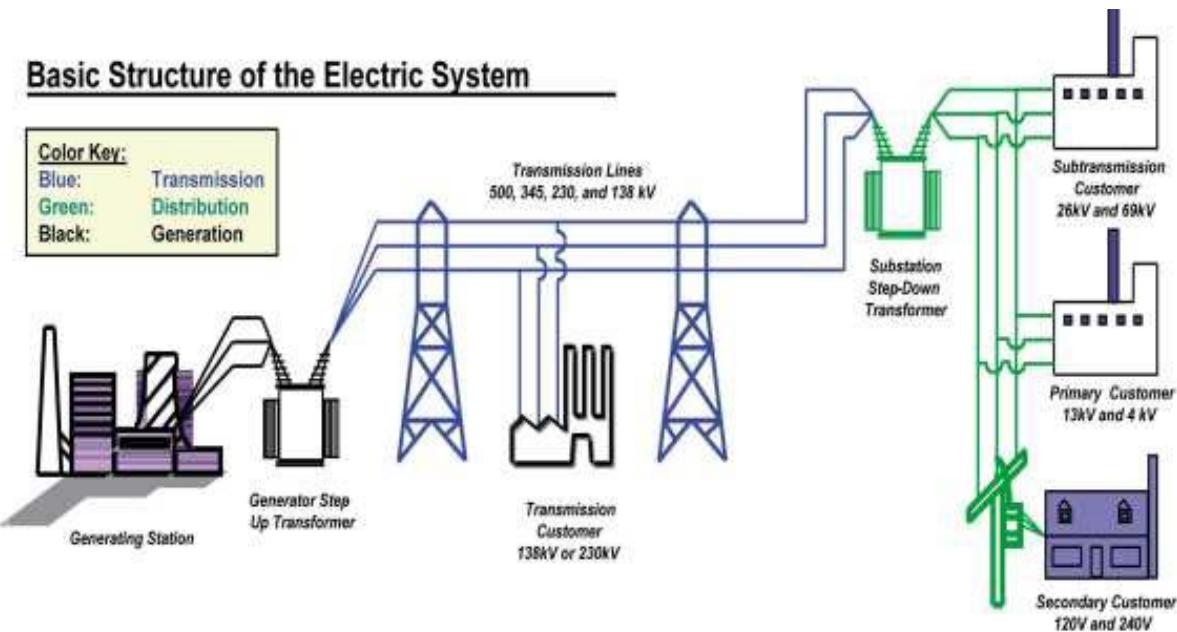
BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dengan pertumbuhan ekonomi yang cukup pesat listrik merupakan kebutuhan yang sangat penting bagi masyarakat untuk meningkatkan kinerja teknologi saat ini, untuk itu perlu penyediaan sumber listrik yang sangat besar dengan kualitas keandalan yang baik. Pada revolusi industri 4.0 semua aktivitas hampir tidak dapat melakukan pekerjaan yang ada dengan baik ataupun memenuhi kebutuhannya jika tidak ada pasokan energi listrik. Kekurangan energi listrik dapat mengganggu aktivitas manusia dan produksi industri. Oleh sebab itu kesinambungan dan ketersediaan energi listrik harus dipertahankan. Pada suatu sistem tenaga listrik tingkat keandalan adalah hal yang sangat penting dalam menentukan kinerja sistem tersebut. Ukuran keandalan dapat dinyatakan sebagai seberapa sering sistem mengalami pemadaman, berapa lama pemadaman terjadi dan berapa cepat waktu yang dibutuhkan untuk memulihkan kondisi dari pemadaman yang terjadi.

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi ketersediaan listrik di Indonesia, antara lain ketersediaan energi primer, harga bahan bakar, teknologi, dan budaya masyarakat. Beberapa usaha yang dapat di tempuh Perusahaan Listrik Negara dalam mengatasi peningkatan kebutuhan listrik antara lain dengan pembangunan pembangkit baru, pembelian listrik swasta (independent power producer), dan sistem sewa pembangkit dengan pemda/ pengusaha. Sedangkan, usaha – usaha yang dapat dilakukan guna mendapatkan biaya operasi yang ekonomis adalah dengan pergantian pemakaian bahan bakar, pengoptimalan efisiensi dan pemeliharaan pembangkit yang sudah ada.



Gambar 1.1 : Komponen utama sistem kelistrikan [1]

Permasalahan yang paling mendasar pada penyaluran daya listrik adalah terletak pada mutu, kontinuitas dan ketersediaan pelayanan daya listrik pada beban. Gangguan yang terjadi pada unit-unit pembangkitan akan menyebabkan terganggunya penyediaan tenaga listrik dengan segala akibatnya bagi perusahaan listrik maupun konsumen. Saat ini kebutuhan energi listrik semakin meningkat seiring dengan pertambahan jumlah penduduk dan kemajuan teknologi serta informasi, maka dibangunlah pembangkit-pembangkit energi listrik. Salah satunya yaitu PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Uap).

PLTU adalah pembangkit listrik yang mengubah energi kinetik uap menjadi energi listrik. PLTU membutuhkan panas yang cukup untuk menghasilkan uap yang dapat memutar turbin sehingga menghasilkan listrik. Sehingga, Secara prinsip PLTU adalah alat yang diciptakan dengan memanfaatkan panas yang dapat diubah menjadi uap untuk menggerakkan turbin dan menghasilkan energi listrik. PLTU beroperasi pada siklus yang dimodifikasi agar mencakup proses pemanasan lanjut (super heating), pemanasan air pengisian ketel/boiler (feed water heating) dan pemanasan kembali uap keluar turbin tekanan tinggi (steam heating). Untuk mempertahankan

efisiensi panas (thermal efficiency) maka uap yang dipakai harus dibuat bertekanan dan suhu setinggi mungkin [2].

Setiap Komponen PLTU Perlu dilakukan pemeliharaan secara rutin, dan salah komponen penting untuk penunjang PLTU adalah Batterai. Batterai ini digunakan untuk menyuplai beban-beban DC essensial seperti halnya motor DC yang berfungsi memompa oli bertekanan ke poros turbin yang dimana jika pada kondisi tertentu motor tersebut berhenti secara tiba -tiba maka dapat menyebabkan kerusakan fatal pada turbin. Oleh karena itu pada kesempatan ini, akan dilakukan penelitian dengan analisis terhadap batterai yang digunakan di PLTU khusnya untuk menyuplai beban-beban DC komponen utama turbin. Dimana selama ini saat terjadi *blackout* PLTU membutuhkan waktu 8-12 jam untuk proses pemulihan/ recovery [2].

Sebagai komponen penting tentunya suatu pembangkit seperti PLTU perlu memastikan kalau batterai yang digunakan masih sesuai standar dan masih bisa dipastikan fungsinya tidak menurun baik dari proses charge in (Pengisian) maupun proses discharge (pembebanan). Secara umum saat terjadi *blackout*, PLTU memerlukan bantuan pengamanan peralatan esensial berupa *Emergency Diesel Generator* (EDG). Seperti halnya PLTU menyuplai 2×100 MW yang dihasilkan dari dua unit penghasil listriknya yang diberi nama Unit 1 dan Unit 2. Total 200 MW listrik tersebut disuplai untuk membantu memenuhi kebutuhan listrik di wilayah Provinsi Lampung, yang menggunakan EDG sebagai transfer daya cadangan apabila terjadi *blackout*.

Saat terjadi *blackout*, sebagian besar unit pembangkit listrik tidak dapat beroperasi secara normal yang berdampak pada kemampuan pembangkitan listrik pada sistem transmisi jauh lebih rendah dari kebutuhan beban, serta dapat menyebabkan sistem jaringan transmisi mengalami pemadaman MLS(*Manual Load Shedding*) dan pemadaman UFLS (*Under Frekuensi Load Shedding*). Apabila hal ini terjadi, maka sistem tenaga listrik harus segera melakukan penormalan jaringan transmisi untuk dapat melayani beban atau pengguna tenaga listrik dengan segera.

Berkaitan dengan kondisi tersebut, Unit Pelaksana Pembangkitan memiliki pembangkit listrik tenaga gas (PLTG) yang berperan sebagai pentransfer daya dalam keadaan *blackout* yang terhubung ke jaringan transmisi 150KV atau dapat disebut sebagai pembangkit *Blackstar* [3].

Namun pada kenyataannya, PLTG tidak dapat beroperasi apabila kondisi sistem *direct current* (DC) pada baterai tidak dapat bekerja secara optimal, kegagalan yang paling sering terjadi pada suatu pembangkit yang menggunakan *engine* adalah kegagalan pada baterai. Guna meminimalisir terjadinya pemadaman lama akibat blackout karena kegagalan baterai dalam proses pemulihan sistem kelistrikan Lampung dilakukan analisis secara menyeluruh terhadap baterai ini dengan melakukan **Analisis Matrix Konverter Sebagai Solid State Transformer Pada Sistem Charging Battery Menggunakan Kendali Fuzzy Logic** tentu diharapkan dapat membantu untuk menganalisa keadaan baterai bisa berfungsi secara baik saat terjadi masalah seperti blackout dapat segera teratasi dan apabila sudah terjadi *blackout* dapat dilakukan recovery secepat mungkin.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penulisan Tesis ini adalah untuk :

1. Penggantian Transformator konvensional dengan Mendesign penggunaan Matrix Konverter Sebagai Solid State Transformer (SST) untuk Charging Batteray pada PLTG.
2. Menganalisa hasil simulasi Matrix Konverter menggunakan SST dengan metode fuzzy logic kontrol menggunakan Simulink Matlab.

1.3 Perumusan Masalah

Stabilitas proses charging baterai sangat penting untuk menjaga keandalan sistem dan percepatan pemulihan saat terjadi *blackout* pada sistem kelistrikan. Dibawah ini rumusan masalah yang perlu dipertimbangkan antara lain :

1. Bagaimana cara merancang penggunaan Matrix Konverter sebagai *Solid State Transformer* menggantikan transformator konvensional pada PLTG ?
2. Bagaimana cara mengontrol proses charging baterai menggunakan *fuzzy logic* untuk mengendalikan kestabilan tegangan dan saat terisi penuh ?
3. Bagaimana sistem kontrol dapat dikembangkan untuk memastikan operasi yang stabil dan efisien dalam penggunaan Matrix Converter sebagai Solid State Transformer pada pengisian baterai?

1.4 Pembatasan Masalah

Dalam Tesis ini, kita akan membatasi masalah dan fokus pada kegagalan supply pada baterai saat terjadi blackout dengan pemanfaatan penggunaan Matrix Konverter sebagai pengganti transformator konvesional menggunakan *fuzzy logic* guna mengendalikan tegangan tetap stabil saat beban mengalami perubahan dan proses charging tetap efisien sehingga EDG bisa bekerja optimal. Penelitian ini menggunakan aplikasi *Simulink Matlab* untuk melakukan simulasi pemanfaatan Matrix Konverter sebagai pengganti transformator konvesional menggunakan *fuzzy logic* kontrol.

1.5 Metodologi Penelitian

Metodologi penilitian yang dilakukan dalam penyusunan Tesis ini antara lain :

1. Studi Literatur

Yaitu dengan mencari teori-teori yang berkaitan mengenai sistem PLTU, *Emergency Diesel Generator*, *blackout*, *Manual Load Shedding*, baterai, Matrix Konverter, *Fuzzy Logic* kontrol dan *Solid State Transformer* dari buku-buku referensi, jurnal, dan lain-lain. Hasil studi

literatur tersebut diimplementasikan dengan melakukan simulasi pada SIMULINK yang terdapat pada program MATLAB.

2. Bimbingan/Konsultasi

Metode ini dilaksanakan melalui konsultasi dan diskusi tentang topik Tesis ini secara langsung dengan dosen pembimbing, rekan-rekan yang lebih paham tentang topik yang akan dibahas dan teman-teman sesama mahasiswa.

3. Metode Analisa

Dalam hal ini, penulis akan menganalisa dan mengambil kesimpulan dari hasil simulasi yang dilakukan.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika yang digunakan dalam penulisan Proposal Tesis ini terdiri dari lima bab yang secara garis besar diuraikan sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini merupakan pendahuluan yang berisi tentang latar belakang masalah, pembatasan masalah, perumusan masalah, tujuan penulisan, manfaat penulisan, metodelogi penulisan, dan sistematika penulisan.

BAB II LANDASAN TEORI DAN HIPOTESIS

Landasan Teori dan Hipotesis ini mencakup teori-teori yang berkaitan dengan penelitian. Adapun teori-teori tersebut meliputi sistem PLTU,

Emergency Diesel Generator, blackout, Manual Load Shedding, batterai, Matrix Konverter, Fuzzy Logic, Solid State Transforme dan lain-lain.

BAB III PEMODELAN DAN SIMULASI

Pemodelan dan Simulasi ini berkaitan dengan sistem PLTU, *Emergency Diesel Generator, blackout, Manual Load Shedding, batterai, Matrix Konverter, Fuzzy Logic* dan *Solid State Transforme*.

BAB IV HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

Hasil simulasi dan analisis berupa penggunaan Matrix Converter sebagai *Solid State Transformer* untuk pengisian batterai saat terjadi kondisi *blackout* pada sistem kelistrikan dan untuk mempercepat pemulihan sistem kelistrikan saat terjadi pemadaman karena *blackout*.

BAB V PENUTUP

Bagian penutup ini berisi tentang kesimpulan dan Saran.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Emergency Diesel Generator (EDG)

2.1.1 Umum

Generator merupakan perangkat yang mampu menghasilkan daya listrik. Alat ini berfungsi sebagai *back-up* apabila terjadi *blackout* dimana tidak ada supply energi listrik dari luar untuk peralatan pembangkit. *Emergency Generator Diesel (EDG)* merupakan generator set yang dioperasikan pada saat keadaan darurat (emergency) seperti dalam kondisi abnormal pada sistem kelistrikan dan juga disebut dengan generator berpenggerak diesel yang berarti gabungan dari dua komponen yaitu mesin dan generator. Mesin bekerja sebagai pemutar sedangkan generator atau alternator bekerja sebagai pembangkit listrik dimana mesin berbahan bakar HSD (High Speed Diesel) yang dapat menghasilkan putaran untuk memutar generator yang terdiri atas gulungan atau kumparan tembaga yang terdiri dari kumparan rotor (kumparan berputar) dan kumparan stator (kumparan statis). Mesin memutar generator sehingga menimbulkan medan magnet pada generator, medan magnet yang ditimbulkan stator dan bertemu dengan rotor yang diputar maka akan menghasilkan tenaga listrik. Dalam keadaan normal, listrik yang digunakan oleh pembangkit dipasok dari generatoriannya sendiri. Namun jika semua generator utama pembangkit mati, maka listrik harus dipasok dari sistem kelistrikan[3].



Gambar 2.1 : Emergency Diesel Generator (EDG)

Namun, dalam kejadian *blackout* (pemadaman listrik total), sistem juga tidak mendapat pasokan listrik. Sehingga dalam keadaan darurat seperti ini, diperlukan *blackstart* untuk memulai ulang pembangkit, agar dapat kembali beroperasi normal. Keadaan darurat dimana suplai daya dari generator utama mengalami gangguan atau kehilangan beban yang membuat padam total atau biasa disebut *blackout*. Berbeda dengan startup diesel generator, EDG mempunyai fungsi sebagai pensuplai daya kepada beban vital tambahan (auxiliary load) yang biasanya bekapasitas daya kecil sampai menengah. Sehingga EDG dapat didefinisikan sebagai peralatan pembangkit yang bertujuan untuk segera dapat membantu suplai daya pada beban vital tambahan dalam melakukan pengoperasian pembangkit tambahan [3].

Blackstart adalah proses mengembalikan sebuah pembangkit listrik atau bagian dari sistem kelistrikan agar dapat beroperasi kembali, tanpa memerlukan jaringan transmisi listrik eksternal, dan pulih dari *blackout* (pemadaman total) ataupun sebagian. *Blackout* merupakan keadaan pembangkit listrik yang mengalami gangguan total pada system transmisi dan tidak memasok listrik sehingga seluruh beban konsumen tidak dapat terpenuhi. *Blackout* berdampak besar pada kerugian materi maupun non materi [3].

Operasi *blackstart* salah satu tahapan pada proses pemulihan system kelistrikan dampak dari *blackout*. *Blackstart* merupakan suatu kondisi pengoperasian unit tanpa beban yang bertujuan untuk mempertahankan putaran generator agar berfungsi dalam kondisi yang tidak lebih parah. Pada kondisi ini generator dalam keadaan FSNL (Full Seed No Load). Pada sistem *blackstart* ini menggunakan supply utama EDG untuk mempertahankan putaran generator. Kapasitas catu daya *blackstart* (EDG) harus memenuhi persyaratan beban listrik, berikut berapa tahapan *blackstart* sebagai berikut :

1. Kapasitas generator set diesel harus cukup untuk memenuhi input dari beban yang diperlukan untuk starting unit tanpa kemampuan start sendiri.

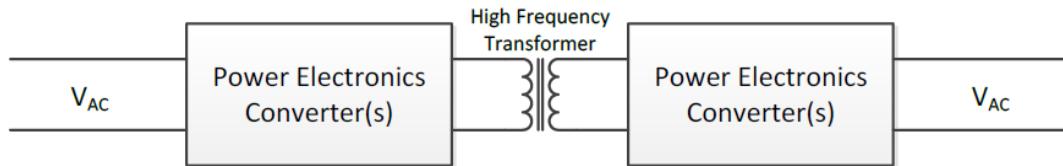
2. Sifat generator diesel yang dinamis harus tetap memenuhi start-up untuk menurunkan fluktasi tegangan dan frekuensi yang disebabkan oleh input dari beban yang berat.

FNSL (Full Speed No Load) merupakan suatu kondisi generator berputar secara penuh namun tidak mensupply beban. Dalam artian generator berputar dengan bantuan motor prime over. Hal ini bertujuan untuk mempercepat proses starting saat kondisi sistem mulai berjalan [4].

2.2 Solid State Transformer (SST)

Transformator konvensional sudah digunakan semenjak penemuan sistem *Alternating Current* (AC) untuk konversi tegangan dan isolasi. Meluasnya penggunaan teknologi ini telah menghasilkan teknologi yang murah, efisien, andal dan matang serta sedikit peningkatan kemampuan dengan menimbulkan biaya yang besar. Meskipun digunakan secara global, transformator konvensional memiliki beberapa kelemahan sebagai berikut:

1. Memiliki ukuran besar dan berat
2. Minyak trafo dapat berbahaya apabila terkena lingkungan
3. Kejemuhan inti menghasilkan harmonik, yang menghasilkan arus masuk yang besar.
4. Karakteristik yang tidak diinginkan pada sisi masukan seperti penurunan tegangan, direpresentasikan dalam bentuk keluaran gelombang.
5. Kerugian yang relatif tinggi pada operasi beban rata-rata. Transformator biasanya dirancang dengan efisiensi maksimum mendekati beban *overload* sedangkan transformator konvensional memiliki beban operasi rata-rata 30 %.
6. Semua trafo konvensional memiliki regulasi yang tidak sempurna. Kemampuan pengaturan tegangan suatu transformator berbanding terbalik dengan ratingnya. Pada trafo distribusi umumnya berukuran kecil dan pengaturan tegangan tidak terlalu baik.

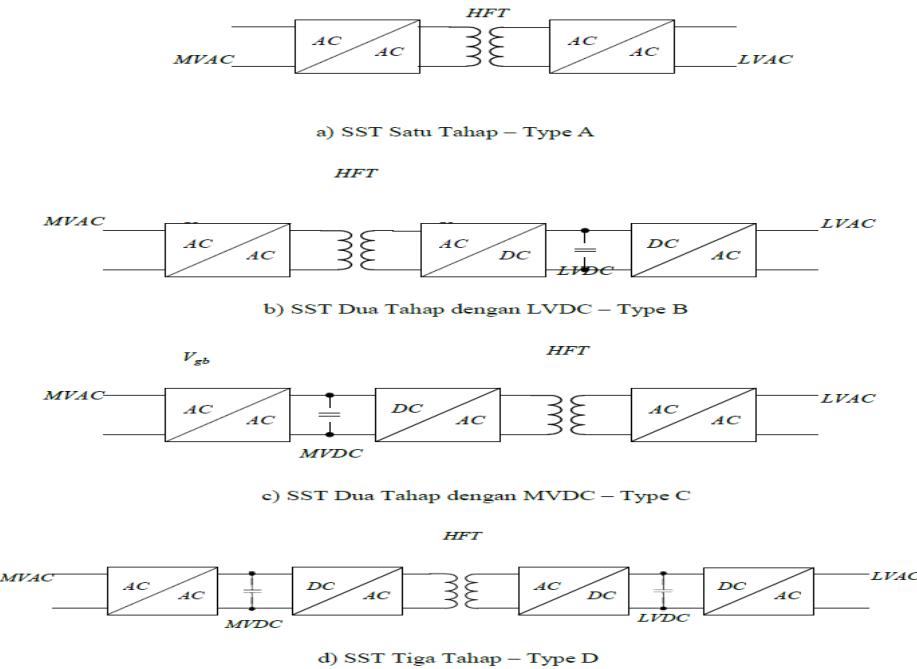


Gambar 2.2 : Konsep SST

Solid State Transformer (SST) bisa sebagai pengganti transformator konvensional. SST merupakan perangkat elektronika daya dan transformator frekuensi tinggi untuk mencapai konversi dan isolasi tegangan dengan mengubah level tegangan AC ke tegangan AC lainnya. Fungsi dan manfaat SST yang tidak dimiliki transformator konvensional adalah sebagai berikut :

1. Memiliki pengendalian yang tinggi karena penggunaan elektronika daya.
2. Mengurangi ukuran dan berat karena transformator frekuensi tinggi. Ukuran trafo berbanding terbalik dengan frekuensinya, karena frekuensi yang lebih tinggi akan menghasilkan transformator yang lebih kecil.
3. Unit faktor daya berfungsi sebagai alat koreksi daya pada AC/DC. Unit faktor daya biasanya akan meningkatkan faktor daya aktif tersedia sebesar 20 %.
4. Tidak terpengaruh pada kenaikan dan drop tegangan karena terdapat sambungan DC pada SST.
5. Kemampuan mempertahankan output daya pada beberapa siklus karena terdapat energi tersimpan dalam kapasitor DC.
6. Dapat berfungsi sebagai pemutus arus setelah elektronika daya pada SST dimatikan, aliran listrik akan terhenti karena rangkaian terputus.

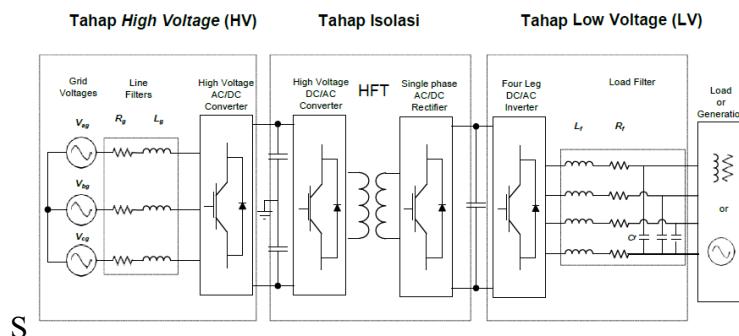
7. Memiliki sistem deteksi dan keamanan yang baik [5].



Gambar 2.3. Klasifikasi Topologi SST

2.2.1 Prinsip Kerja SST

SST menggunakan konverter elektronika daya bergantung pada konfigurasinya, sehingga diklasifikasikan ke dalam berbagai topologi. Untuk menguraikan konsep SST, topologi tiga tahap menjadi contoh populer yang ditunjukkan pada Gambar 2.3, sebab topologi khusus ini menyederhanakan desain kontrol dan dapat menyediakan semua fungsi.



Gambar 2.4. Arsitektur Solid State Tranformer .

SST dasar terdiri dari tiga tahapan berbeda sebagai berikut:

1. Tahap Tegangan Menengah: Tegangan tingkat menengah mencakup rentang tegangan antara 1 kV sampai dengan 100 kV. Tegangan AC tiga fase dengan frekuensi 50/60 Hz disuplai ke SST, diubah menjadi tegangan DC (tahap penyearah). Berbeda dengan konverter elektronik dengan *input* tegangan rendah, konverter daya di SST berinteraksi langsung dengan tingkat tegangan lebih tinggi, sehingga beroperasi pada tingkat daya besar terkait dengan aplikasi seperti pada traksi, jaringan listrik. Dalam aplikasinya di mana berat dan ukuran tidak selalu memainkan peran penting, SST dapat menawarkan *filter* harmonik melalui tahap penyearah ini dengan menggunakan penyearah PWM (modulasi lebar pulsa) yang sangat dibutuhkan dalam sistem jaringan yang ada dan *smart grid* di masa depan [6].
2. Tahap Isolasi: Pada tahap ini terdapat transformator frekuensi menengah. Pada tahap ini 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 berikutnya, transformator frekuensi tinggi digunakan untuk menurunkan besaran tegangan. Pengoperasian transformator frekuensi tinggi dapat memanfaatkan penuh sifat magnetik inti. Pada langkah berikutnya, konversi AC-DC terjadi dimana AC frekuensi tinggi diubah menjadi DC [6]. Pengoperasian SST pada frekuensi yang lebih tinggi membuatnya cocok untuk aplikasi spesifik seperti traksi, di mana kendala berat dan volume menghambat efisiensi yang lebih tinggi [6]. Terlepas dari aplikasi di mana SST dapat membantu mencapai berbagai manfaat karena pengurangan berat dan ukurannya, karakteristik tambahannya, seperti memungkinkan aliran daya dua arah, kompensasi daya reaktif, tautan DC, dll., dapat bermanfaat dalam aplikasi lain. Karena SST menggunakan konverter daya *multistage* untuk berbagai aplikasi, konverter ini harus memiliki frekuensi *switching* yang tinggi. Seiring dengan peningkatan frekuensi switching, kerugian

switching juga akan meningkat. Hal ini juga dianggap sebagai hambatan yang signifikan terhadap peningkatan efisiensi dan harus dipertimbangkan selama desain dan produksi [6].

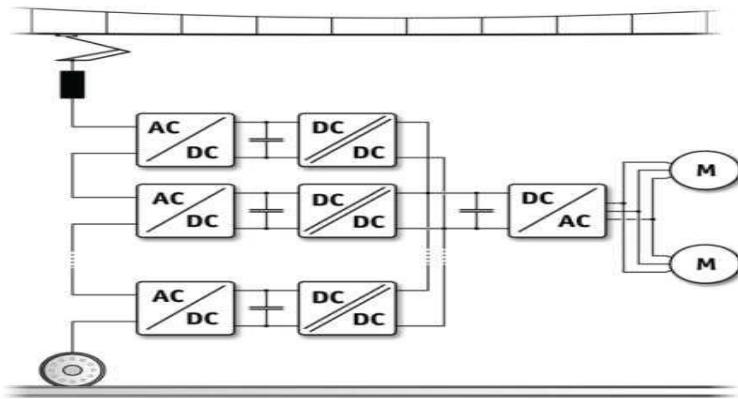
3. Tahap Tegangan Rendah: Rentang tegangan rendah ialah tegangan dari 50 s.d. 1000 volt. Pada tahap ini, terjadi konversi DC-AC atau tahap inverter. Frekuensi AC yang dikonversi biasanya pada frekuensi 50/60 Hz. Tidak seperti trafo konvensional, SST juga memungkinkan kemampuan kontrol pada tahap Tegangan Rendah ini. Sehingga memungkinkan pengontrolan tegangan *input* dan *output*, arus, dan aliran daya melalui konverter daya dan trafo MF yang digunakan pada SST biasa. Selain itu, ini memungkinkan pengontrolan frekuensi output karena frekuensi output yang diinginkan dapat dicapai dalam konversi DC-AC [6].

2.2.2 Aplikasi Umum SST

SST dapat digunakan sebagai pengganti transformator konvensional dalam sistem kelistrikan apa pun, namun karena kelebihan dan fungsi tambahannya, penerapan SST di area tertentu jauh lebih menarik. Contoh aplikasi tersebut adalah sebagai berikut :

1. Lokomotif dan sistem traksi lainnya

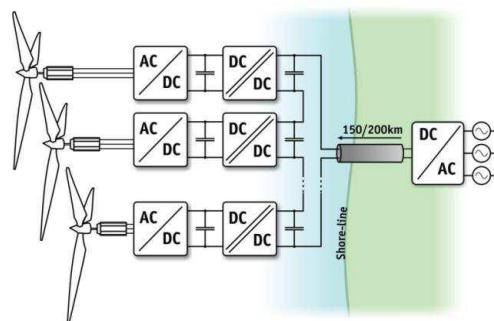
Trafo yang digunakan pada kendaraan lokomotif saat ini adalah 16,7Hz dan $\pm 15\%$ dari total berat lokomotif. SST dapat memberikan pengurangan berat dan bentuk yang signifikan. Selain itu, SST juga mampu meningkatkan efisiensi, mengurangi EMC (noise), harmonik, dan emisi bahan bakar yang ditimbulkan.



Gambar 2.5 : SST pada Traksi lokomotive

2. Pembangkit Listrik Lepas Pantai (*Offshore energy generation*)

Pembangkit listrik lepas pantai, baik yang berasal dari angin, pasang surut, atau sumber lainnya, dapat memperoleh manfaat dari pengurangan berat dan ukuran. Pengurangan ini menyebabkan anjungan lepas pantai menjadi lebih kecil dan lebih murah. Keunggulan lainnya adalah SST dapat mencapai unit faktor daya sehingga meningkatkan efisiensi dalam transmisi daya [5].

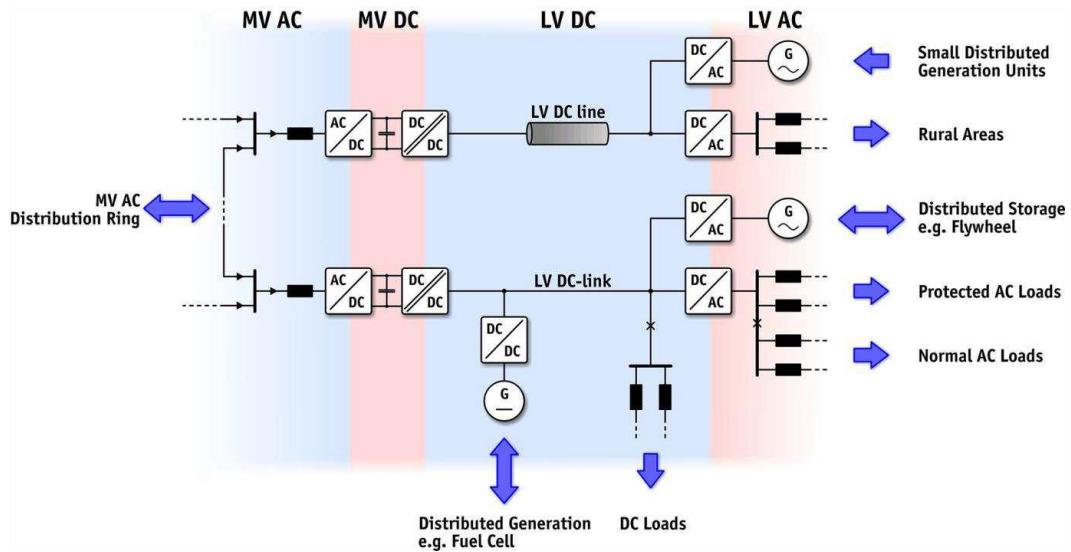


Gambar 2.6 : SST pada *Offshore energy generation*

3. Smart Grids

Dalam sistem ketenagalistrikan di masa depan, penggunaan pembangkit listrik terbarukan diperkirakan akan meningkat, dan memerlukan skema pengelolaan energi yang secara fundamental berbeda dari metode klasik. Untuk manajemen perubahan

beban dan sumber yang berbeda secara cepat dan efisien, SST dapat digunakan untuk menyesuaikan distribusi energi dalam jaringan secara dinamis. Fungsi SST seperti yang dijelaskan dalam skenario ini mirip dengan router, namun alih-alih mengelola data, SST akan mengatur aliran energi. Oleh karena itu, SST terkadang juga disebut sebagai router energi [5].



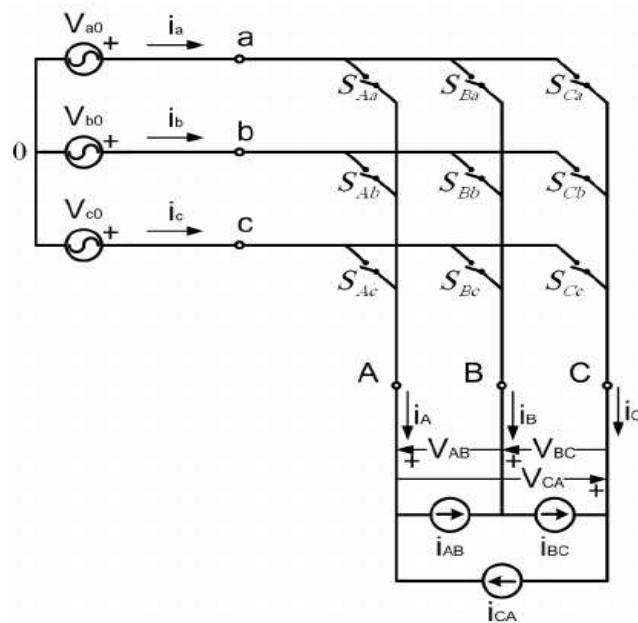
Gambar 2.7 : SST pada Smart Grid

2.3 Matrix Converter

Matrix converter adalah konverter yang mengubah listrik AC menjadi listrik AC dengan parameter berbeda. Matrix converter banyak dimanfaatkan oleh industri dan pabrik yang untuk mengendalikan kecepatan motor induksi. Matrix converter mempunyai kelebihan yaitu lebih sederhana dalam aplikasinya untuk mengendalikan, namun lebih membutuhkan banyak komponen semikonduktor. Matrix converter memiliki beberapa keunggulan dibandingkan konverter frekuensi daya rectifier-inverter. Matrix converter menyediakan bentuk gelombang masukan dan gelombang keluaran berupa gelombang sinusoidal dengan harmonisa yang memiliki nilai yang rendah dan hampir tidak ada subharmonik, faktor daya masukan dapat dikendalikan sepenuhnya, memiliki kemampuan penyimpanan energi minimal, yang

memungkinkan untuk dapat menggantikan kapasitor sebagai penyimpanan energi yang besar dan hemat energi [7].

Pada dasarnya, matrix converter disusun oleh 9 saklar dua arah, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.8 dimana setiap titik grid mempresentasikan hubungan antara terminal keluaran dan terminal masukan. Konverter biasanya diberi tegangan di sisi masukan oleh sumber tegangan tiga fasa dan terhubung ke beban induktif pada sisi keluaran [8].



Gambar 2.8 : Rangkaian Matrix Converter 3 fasa [9]

Sumber tegangan digunakan untuk memberi masukan ke matrix converter, karena alasan ini, terminal sisi masukan tidak pernah terjadi hubung singkat. Jika terminal sisi masukan menjadi hubung singkat pada sirkuit kemudian arus besar mengalir melalui switch maka switch akan menyebabkan kerusakan karena arus lebih yang mengalir. Sama seperti beban induktif pada motor induksi yang digunakan, terminal keluaran pada sisi samping tidak boleh terbuka. Jika ada terminal keluaran yang dibiarkan terbuka kemudian tegangan lebih mengalir di switch maka dapat menyebabkan kerusakan pada switch. Matrix converter dapat ditulis dengan bentuk

persamaan matriks 3x3. Hasil keluaran tegangan pada matrix converter ditulis dengan persamaan:

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Ba}(t) & S_{Ca}(t) \\ S_{Ab}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Cb}(t) \\ S_{Ac}(t) & S_{Bc}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} V_A(t) \\ V_B(t) \\ V_C(t) \end{bmatrix} \\ V_o &= Sx V_i \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

Dimana V_o tegangan fasa keluaran dan V_i merupakan tegangan fasa masukan. S adalah matrix transfer switching. Arus masukan pada matrix converter diberikan dengan persamaan:

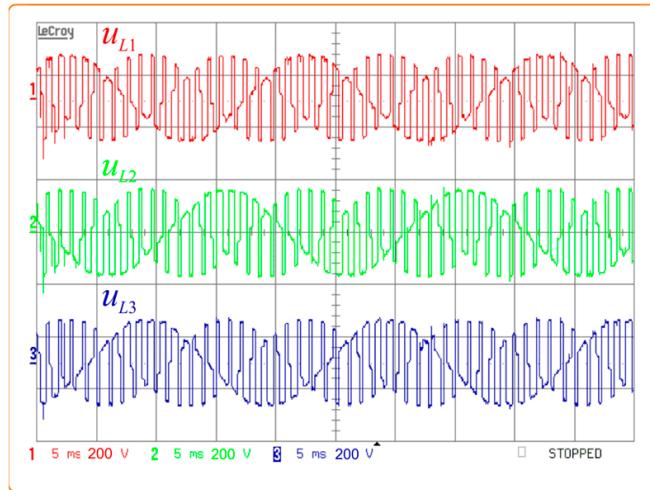
$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} I_A(t) \\ I_B(t) \\ I_C(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} S_{Aa}(t) & S_{Ba}(t) & S_{Ca}(t) \\ S_{Ab}(t) & S_{Bb}(t) & S_{Cb}(t) \\ S_{Ac}(t) & S_{Bc}(t) & S_{Cc}(t) \end{bmatrix} X \begin{bmatrix} I_a(t) \\ I_b(t) \\ I_c(t) \end{bmatrix} \\ I_i &= Sx I_0 \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Di mana I_0 adalah arus fasa keluaran dan merupakan I_i arus fasa masukan. S adalah matrix transfer switching. Pada setiap tegangan fasa keluaran akan membentuk persamaan:

$$[Vi(t)] = Vm \begin{bmatrix} \cos(\omega it) \\ \cos\left(\omega it + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega it + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} [Vo(t)] = q Vm \begin{bmatrix} \cos(\omega it) \\ \cos\left(\omega it + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega it + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} [Vo(t)] \quad (2.3)$$

Dimana q = rasio tegangan. Kemudian pada arus ditulis dengan persamaan:

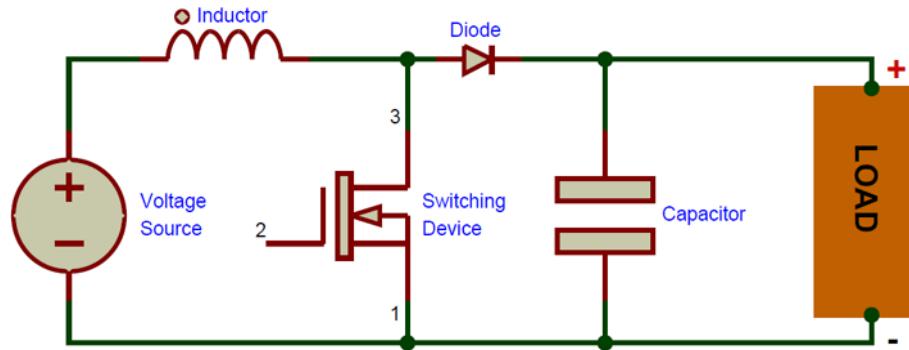
$$[i0(t)] = Im \begin{bmatrix} \cos(\omega it) \\ \cos\left(\omega it + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega it + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} [i1(t)] = q Im \frac{\cos(\phi_1)}{\cos(\phi_0)} \begin{bmatrix} \cos(\omega it) \\ \cos\left(\omega it + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\omega it + \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} [Vo(t)] \quad (2.4)$$



Gambar 2.9 : Bentuk gelombang tegangan [9]

2.3.1 Boost Converter

Boost converter adalah jenis *converter* yang mampu mengubah nilai tegangan DC menjadi lebih tinggi dari nilai awalnya. Dengan mengubah nilai polaritas dari tegangan output terhadap tegangan input. Rangkaian utama *Boost converter* tersusun atas komponen *mosfet* yang berfungsi sebagai *mosfet*, *induktor* (L), *diode*, *kapasitor* (C), dan beban.



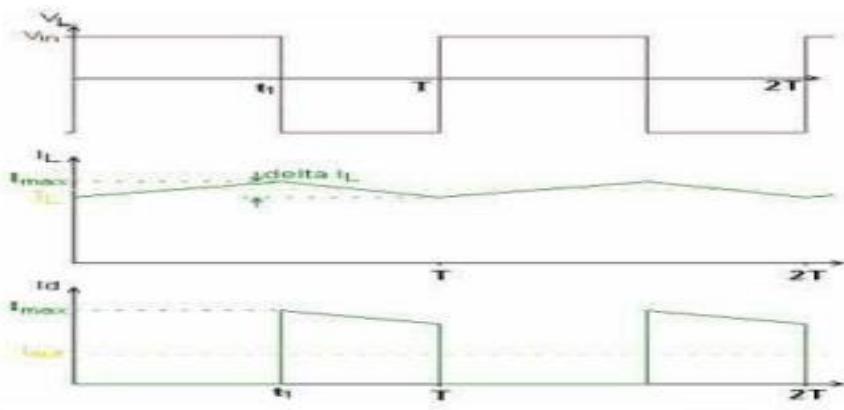
Gambar 2.10 Boost Converter

Pada rangkaian *boost converter* induktor (L) digunakan sebagai filter untuk mengurangi *ripple* yang terjadi pada arus, sedangkan untuk mengurangi *ripple* pada tegangan digunakan kapasitor (C). Sementara diode digunakan

untuk *switching* yang bekerja pada keadaan *switch open* sehingga arus tetap dapat mengalir pada induktor.

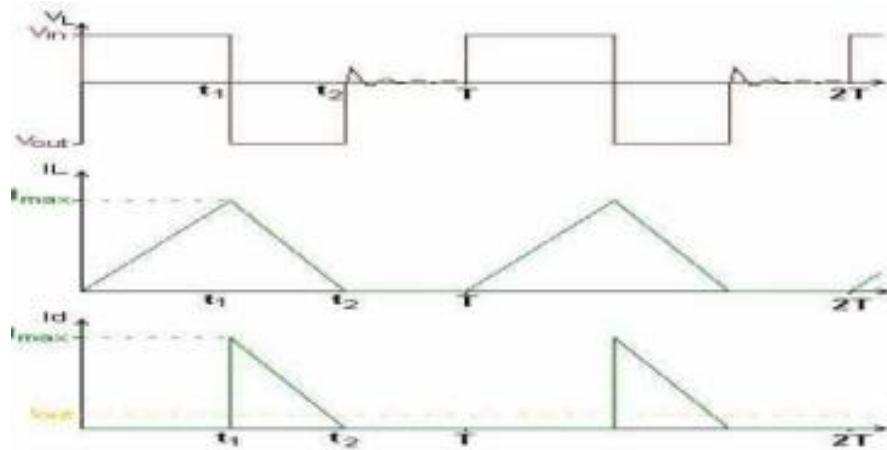
Pengoperasian *buckboost converter* dikelompokkan menjadi dua cara yaitu yang pertama adalah *Continuous Current Mode* (CCM) yang ditandai dengan arus yang mengalir secara terus-menerus pada induktor selama *switching cycle* dalam keadaan *steady state* (mantap). Selain itu, pada mode CCM tidak tergantung pada nilai induktor dan kapasitornya. Sedangkan cara yang kedua yaitu *Discontinuous Current Mode* (DCM) yang ditandai dengan nilai pada induktor menjadi nol saat *switching cycle*. Pada mode DCM nilai tegangan output tergantung pada nilai dan besarnya *duty cycle*.

Gambar 2.12 merupakan *Continuous current mode* ditandai oleh arus yang mengalir secara terus menerus pada induktor pensaklaran *cycle*-nya pada keadaan mantap (*steady state*). Sehingga tegangan output dapat diatur dengan mengubah lebar pulsa (*duty cycle*) dan tidak tergantung dengan induktor dan kapasitor.



Gambar 2.11 *Continuous Current Mode*

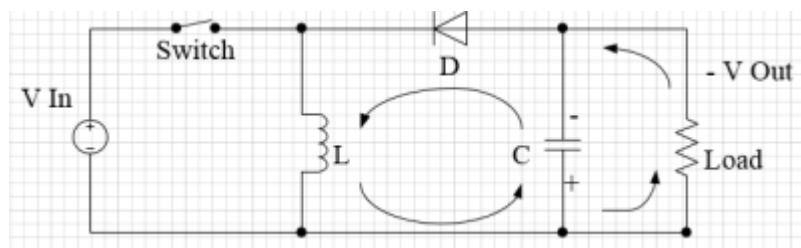
Sedangkan Gambar 2.13 merupakan *Discontinuous current mode* ditandai dengan arus induktor menjadi nol pada setiap pensaklaran *cycle*-nya dan tegangan *output* tergantung pada nilai induktor dan besarnya lebar pulsa.



Gambar 2.12 Discontinuous Current Mode

2.3.2 Pensaklaran Terbuka

Prinsip kerja *Buck-Boost Converter* saat pensaklaran terbuka adalah induktor mendapat tegangan dari masukan dan mengakibatkan adanya arus yang melewati induktor berdasarkan waktu, dan dalam waktu yang sama kapasitor dalam kondisi membuang (*discharge*) dan menjadi sumber tegangan dan arus pada beban.

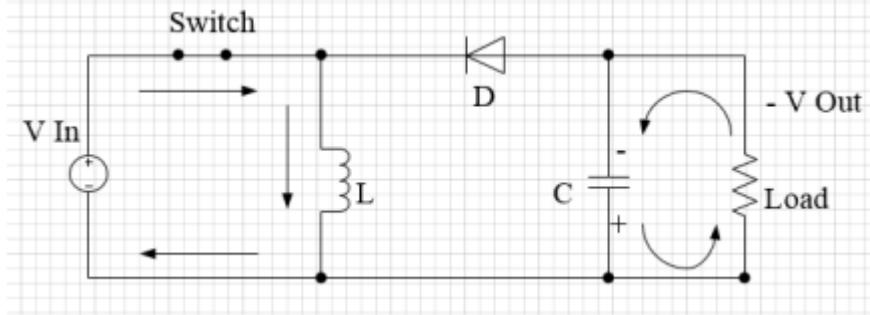


Gambar 2.13 Siklus Kerja *Buck-Boost Converter*

2.3.3 Pensaklaran Tertutup

Prinsip kerja *Buck-Boost Converter* saat pensaklaran tertutup adalah tegangan masukan terputus menyebabkan mulainya penurunan arus dan menyebabkan ujung dioda bernilai negatif dan induktor mensuplai kapasitor (*charge*) dan beban. Jadi pada saat

pensaklaran terbuka arus beban disuplai oleh kapasitor, namun pada saat pensaklaran tertutup disuplai oleh induktor.



Gambar 2.14 Siklus Kerja *Buck-Boost Converter* Pensaklaran Tertutup

Pada sebuah konverter DC-DC dengan tegangan *input* yang ditentukan, besar tegangan *output* dikendalikan dengan durasi pensaklaran (T_{on} dan T_{off}). Pengendalian dilakukan dengan memberikan sinyal atau tegangan yang mengatur waktu *on* dan waktu off *switch*. Dengan persamaan sebagai berikut :

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{D-1} \quad (2.5)$$

Dimana :

V_{out} = Tegangan keluaran

V_{in} = Tegangan *input*

D = *Duty cycle*

Selanjutnya, setelah nilai *duty cycle* ditentukan. Langkah selanjutnya yaitu kita harus mencari nilai inductor yang akan digunakan dengan rumus sebagai berikut:

$$I L_{min} = \frac{V_o}{(1-D)R} - \frac{(1-D)V_o}{2Lf} \quad (2.6)$$

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2}{2 \times f} R \quad (2.7)$$

Atau

$$L = \frac{V_{in} \times D}{\Delta I L \times F} \quad (2.8)$$

Keterangan :

L_{min} = Nilai induktor minimal

L = *Inductor*

D = *Duty cycle*

R = Nilai hambatan (ohm)

F = Frekuensi (Hz)

Setelah nilai induktor diketahui, langkah selanjutnya yaitu menentukan nilai kapasitor yang akan digunakan. Dengan persamaan dibawah ini :

$$\Delta V_o = \frac{V_o \times D}{R \times C \times f} \quad (2.9)$$

$$C = \frac{V_o \times D}{R \times \Delta V_o \times f} \quad (2.10)$$

Keterangan :

C = Kapasitor

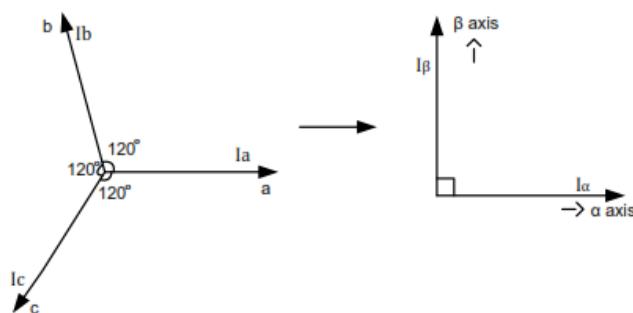
D = *Duty cycle*

R = Nilai hambatan (ohm)

F = Frekuensi (Hz)

2.4 Transformasi Clarke

Transformasi Clarke merupakan transformasi yang berfungsi mengubah sistem tiga fasa a, b dan c menjadi sistem dua fasa yaitu α dan β . Sistem koordinat transformasi park dapat dilihat pada gambar 2.16



Gambar 2.15. Koordinat transformasi Clarke

Persamaan matematis transformasi Clarke pada motor sinkron magnet permanen yaitu :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

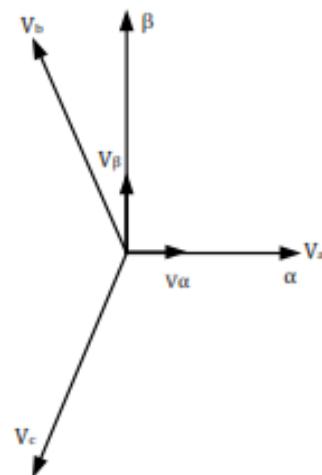
Sehingga persamaan arus α dan β adalah,

$$i_\alpha = i_a \quad (2.13)$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} i_a + \frac{2}{\sqrt{3}} i_b \quad (2.14)$$

2.4.1 Transformasi Invers Clarke

Transformasi invers clarke digunakan pada sistem kendali untuk mengubah kembali sistem dua fasa statis $\alpha\beta$ menjadi sistem tiga fasa abc yang akan digunakan sebagai masukan inverter yang akan mengendalikan kecepatan motor sinkron magnet permanen. Sistem koordinat transformasi invers Clarke dapat dilihat pada gambar 2.17.



Gambar 2.16. Koordinat transformasi Invers Clarke

Persamaan yang digunakan untuk mengubah sistem dua fasa statis $\alpha\beta$ dapat dilihat pada persamaan Sebagai berikut :

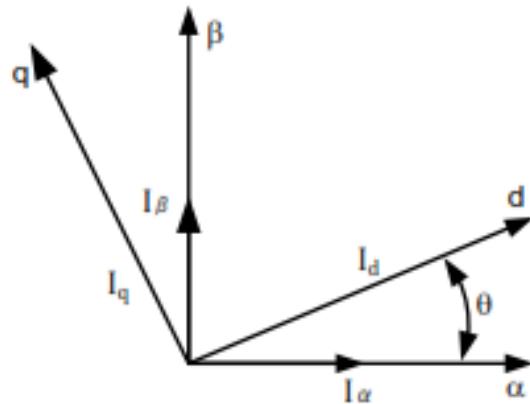
$$v_a = v_\alpha \quad (2.15)$$

$$v_b = \frac{-v_\alpha + \sqrt{3} \cdot v_\beta}{2} \quad (2.16)$$

$$v_c = \frac{-v_\alpha - \sqrt{3} \cdot v_\beta}{2} \quad (2.17)$$

2.4.2 Transformasi Park

Transformasi park merupakan transformasi koordinat yang mengubah sistem dua fasa α dan β tidak bergerak menjadi sistem d dan q bergerak dimana sistem koordinatnya dapat dilihat pada gambar 2.17, dengan persamaan sebagai berikut :



Gambar 2.17. Koordinat transformasi Park

Persamaan tegangan d dan q pada motor sinkron magnet permanen adalah

$$V_q = R_s \cdot i_q + \omega_r \cdot \lambda_d + p \cdot \lambda_q \quad (2.18)$$

$$V_d = R_s \cdot i_d - \omega_r \cdot \lambda_q + p \cdot \lambda_d \quad (2.19)$$

Dimana $\lambda_q = L_q \cdot i_q$ dan $\lambda_d = L_d \cdot i_d + \lambda_f$, sehingga

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p \cdot L_q & \omega_r \cdot L_d \\ -\omega_r \cdot L_q & R_s + p \cdot L_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_r \cdot \lambda_f \\ p \cdot \lambda_d \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

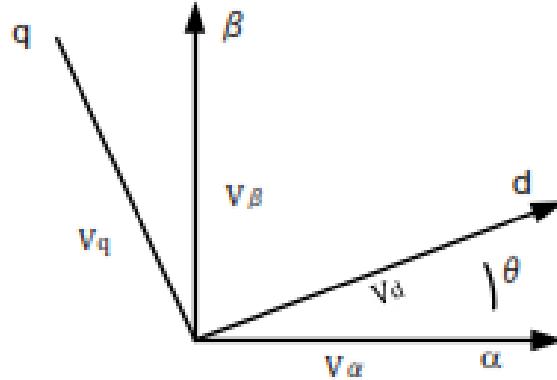
$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Transformasi koordinat hanyalah cara untuk menyederhanakan kontrol torka motor sinkron magnet permanen. Dengan transformasi koordinat, model kendali motor sinkron magnet permanen diubah dari koordinat a-b-c menjadi koordinat d-q. Rumus kontrol torka juga diubah menjadi koordinat d-q, sehingga persamaannya adalah:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \psi_d I_q \quad (2.22)$$

2.4.3 Transformasi Invers Park

Transformasi invers park digunakan pada sistem kendali untuk mengubah kembali sistem dua fasa bergerak dq menjadi sistem statis $\alpha\beta$ yang akan digunakan sebagai masukan inverter. Sistem koordinat transformasi invers park dapat dilihat pada gambar 2.19.



Gambar 2.18. Koordinat transformasi Invers Park

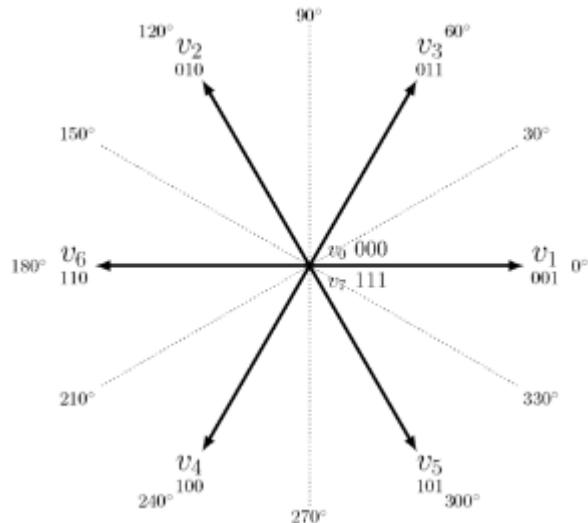
Persamaan yang digunakan untuk mengubah sistem dua fasa statis $\alpha\beta$ dapat dilihat pada persamaan sebagai berikut :

$$v_\alpha = v_d \cdot \cos(\theta) - v_q \cdot \sin(\theta) \quad (2.23)$$

$$v_\beta = v_q \cdot \cos(\theta) + v_d \cdot \sin(\theta) \quad (2.24)$$

2.5 Space Vector Pulse Width Modulation (SVPWM)

Untuk mengendalikan matrix converter pada penelitian ini dibutuhkan sistem kendali SVPWM yang akan mengatur *switching* pada matrix converter. metode SVPWM ini memiliki enam *vector* dasar dan dua *vector* null, dengan waktu kerja yang berbeda. SVPWM merupakan rangkaian pemicu saklar khusus dan kombinasi lebar pulsa dari matrix converter sumber tegangan tiga fasa pada motor yang akan menghasilkan tiga bentuk gelombang sinusoidal dengan sudut 120° yang berbeda satu sama lain.



Gambar 2.19. Vector Dasar SVPWM

Pada gambar diatas merupakan *vector* dasar dari sistem kendali SVPWM Enam dari konfigurasi ini merupakan *vector* aktif yang akan mengatur *switching* dari inverter yaitu V₁ {001}, V₂ {010}, V₃ {011}, V₄ {100}, V₅ {101}, dan V₆ {110}. Dua yang terakhir disebut sebagai vektor nol karena mewakili nol volt pada terminal yaitu V₀ {000} dan V₇ {111},

Model matematis *switching* time duration pada sector 1 dapat dilihat pada persamaan dibawah ini

$$\int_0^{T_z} \bar{V}_{ref} = \int_0^{T_1} \bar{V}_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} \bar{V}_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_z} \bar{V}_0 dt \quad (2.25)$$

$$T_z \cdot \overline{V_{ref}} = (T_1 \cdot \bar{V}_1 + T_2 \cdot \bar{V}_2) \quad (2.26)$$

$$T_z \cdot |\bar{V}_{ref}| \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} = T_1 \cdot \frac{2}{3} \cdot V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + T_2 \cdot \frac{2}{3} \cdot V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Dimana, $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$

$$T_1 = T_z \cdot a \cdot \frac{\sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right)}{\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)} \quad (2.28)$$

$$T_2 = T_z \cdot a \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin\left(\frac{\pi}{3}\right)} \quad (2.29)$$

$$T_0 = T_z - (T_1 + T_2) \quad (2.30)$$

$$\text{Dimana, } T_z = \frac{1}{f_z} \text{ dan } a = \frac{|\bar{V}_{ref}|}{\frac{2}{3} \cdot V_{dc}}$$

Model matematis untuk tiap sector dapat dilihat pada persamaan dibawah ini

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \left(\frac{\pi}{3} - \alpha + \frac{n-1}{3} \pi \right) \right) \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \frac{n}{3} \pi - \alpha \right) \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \frac{n}{3} \pi \cos \alpha - \cos \frac{n}{3} \pi \cdot \sin \alpha \right) \end{aligned} \quad (2.31)$$

$$\begin{aligned} T_2 &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(\sin \left(\alpha - \frac{n-1}{3} \pi \right) \right) \\ &= \frac{\sqrt{3} \cdot T_z \cdot |\bar{V}_{ref}|}{V_{dc}} \left(-\cos \alpha \cdot \sin \frac{n-1}{3} \pi - \sin \alpha \cdot \cos \frac{n-1}{3} \pi \right) \end{aligned} \quad (2.32)$$

$$T_0 = T_z - T_1 - T_2 \quad (2.33)$$

Dimana :

$n=1$ sampai 6 (sector 1 sampai 6), $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$

2.6 Charging Battery

Baterai merupakan peralatan yang dapat mengubah energi. Baterai listrik terdiri dari dua atau lebih sel elektrokimia yang mengubah energi kimia yang tersimpan menjadi energi listrik. Baterai memiliki prinsip kerja sebagai berikut:

- a) Proses Discharge, proses ini berlangsung pada saat sel baterai dihubungkan dengan beban maka elektron mengalir dari anoda melalui beban ke katoda, kemudian ion-ion negatif mengalir ke anoda dan ion-ion positif mengalir ke katoda.
- b) Proses Charging, pada proses ini adalah ketika sel baterai dihubungkan dengan power supply maka elektroda positif menjadi anoda dan elektroda negatif menjadi katoda dan proses kimia yang terjadi adalah:
 1. Aliran elektron menjadi terbalik, mengalir dari anoda melalui power supply ke katoda.
 2. Ion-ion negatif mengalir dari katoda ke anoda.
 3. Ion-ion positif mengalir dari anoda ke katoda [10].

Charging adalah proses pengisian battery dengan arus konstan hingga mencapai tegangan yang ditentukan. Bila level tegangan yang ditentukan itu telah tercapai, maka arus pengisian akan turun secara otomatis ke level yang aman tepatnya yang telah ditentukan dan menahan arus pengisian hingga menjadi lebih lambat sehingga indikator menyala menandakan battery telah terisi penuh. Didalam rangkaian battery charger terdapat rangkaian regulator dan rangkaian comparator. Rangkaian regulator berfungsi untuk mengatur tegangan keluaran agar tetap konstan, sedangkan rangkaian komparator berfungsi untuk menurunkan arus pengisian secara otomatis pada battery pada saat tegangan pada battery penuh ke level yang aman tentunya dan menahan arus pengisian hingga menjadi lebih lambat sehingga menyebabkan indikator aktif menandakan battery telah terisi penuh [11].

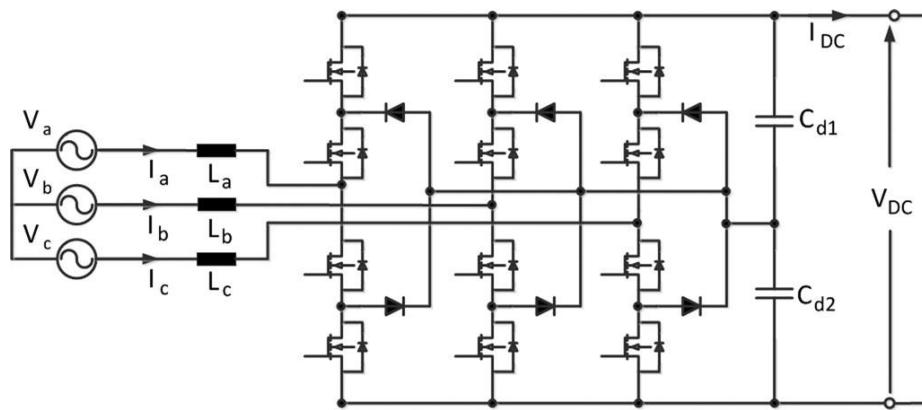


Gambar 2.20 Kapasitas Batterai di PLTG

Dalam pengisian dan pengosongan baterai, ada beberapa parameter yang menjadi pertimbangan bagus atau tidaknya sebuah baterai. Parameter tersebut antara lain adalah tegangan, kapasitas baterai, State of Charge, resistansi internal, dan pelepasan muatan atau self-Discharge [10].

Pengisi daya baterai memiliki peran penting dalam pengembangan EDG pembangkit listrik. Waktu pengisian daya dan masa pakai baterai terkait dengan karakteristik pengisi daya baterai. Pengisi daya harus efisien dan dapat diandalkan, dengan kepadatan daya yang tinggi, biaya rendah, serta volume dan berat rendah. Pengoperasiannya bergantung pada komponen, control dan strategi peralihan. Algoritma kontrol pengisi daya diimplementasikan melalui pengontrol analog, mikrokontroler, pemroses sinyal digital dan sirkuit terintegrasi tertentu bergantung pada biaya dan jenis konverter. Pengisi daya baterai harus memastikan kegunaan arus diambil dengan distorsi rendah untuk meminimalkan dampak kualitas daya dan pada faktor daya tinggi untuk memaksimalkan daya nyata yang tersedia dari stopkontak [12].

Pengisian daya baterai modern memiliki converter boost untuk mengaktifkan power factor correction (PFC) [13]. Desain dalam menggunakan jembatan diode khusus untuk memperbaiki tegangan input AC ke DC yang diikuti oleh bagian penguat [15]. Konverter ini memecahkan masalah panas dijembatan diode penyuarah input yang melekat pada PFC boost konvensional, tetapi meningkatkan interferensi elektromagnetik (EMI) [16].



Gambar 2.21 Rangkaian pengisi daya dua arah yang dijepit diode [17]

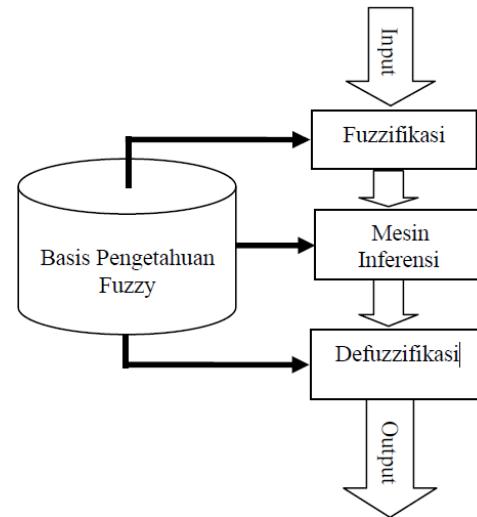
Konverter DC-DC dua arah tingkat tiga telah diteliti untuk aplikasi stasiun pengisian daya. Konverter ini dicirikan oleh tegangan-tegangan pada saklar yang rendah dan digunakan pada perangkat penyimpan energi yang lebih kecil seperti inductor dan kapasitor [18].

2.7 Sistem Fuzzy Logic Kontrol

Logika Fuzzy dikenalkan pertama kali oleh A.Zadeh seorang profesor dari Amerika Serikat [18]. Sebelum muncul teori logika fuzzy, orang lebih mengenal logika tegas (crisp logic). Sebaliknya logika fuzzy merupakan sebuah logika yang memiliki kekaburan atau kesamaran antara benar dan salah. Dalam teori logika fuzzy sebuah nilai bisa bernilai benar dan salah secara bersamaan namun berapa besar kebenaran dan kesalahan suatu nilai tergantung kepada bobot keanggotaan yang dimilikinya [19].

Logika *fuzzy* merupakan pengembangan dari logika primitif yang hanya mengenal keadaan, yaitu "ya" atau "tidak". Logika fuzzy disini dapat mendefinisikan nilai dengan beberapa kategori. Seperti misalkan dalam bahasa keseharian manusia yang menyatakan sesuatu dengan kata "sangat banyak", "banyak", "sangat sedikit", "sangat panas", "sangat dingin" dan seterusnya. Maka nanti output dari logika fuzzy tidak hanya berupa nilai 1 atau 0, melainkan ada beberapa nilai yang menjadi output yang akan digunakan untuk melakukan proses pada system kontrol. Secara umum,

struktur dasar logika fuzzy terdiri dari Pengetahuan dasar (*Knowledge Base*), Proses Fuzzifikasi, Mesin Inferensi, dan proses Defuzzifikasi [20].



Gambar 2.22 Struktur dasar Logika Fuzzy [20]

Penjelasan mengenai diagram struktur dasar logika fuzzy adalah sebagai berikut:

1. Basis Pengetahuan Fuzzy

Semua prosedur-prosedur yang akan digunakan dalam proses Fuzzifikasi, Interferensi, dan Defuzzifikasi mengacu pada apa yang ada pada basis pengetahuan fuzzy. Maka dari itu, basis pengetahuan fuzzy sangat berperan penting dalam sistem fuzzy.

2. Fuzzifikasi

Fuzzifikasi adalah bagian dari sistem Fuzzy yang berfungsi untuk merubah nilai yang bersifat pasti (*Crispt*) kedalam variabel linguistik. Proses ini terdiri dari pembentukan membership function yang sesuai dengan basis pengetahuan fuzzy.

3. Proses Inferensi

Proses inferensi bertujuan untuk memetakan logika untuk mengambil keputusan. Pada bagian ini biasanya digambarkan dengan table FAM (Fuzzy Associative Map). Pengambilan keputusan untuk output fuzzy disini

ditentukan sendiri oleh operator yang membuat logika fuzzy tersebut, dengan mengacu pada basis pengetahuan fuzzy. Biasa proses ini berupa pernyataan implikasi seperti kata Jika-Maka atau yang biasa disebut dengan *IF-Then Rules*.

4. Defuzzifikasi

Proses terakhir dalam sistem fuzzy adalah defuzzifikasi, dimana proses ini bertujuan untuk merubah kembali nilai linguistik output dari proses inferensi menjadi nilai pasti (*crispt*) yang akan digunakan pada proses sistem kontrol selanjutnya [20].

Himpunan fuzzy memiliki 2 atribut, sebagai berikut :

1. Linguistik, yaitu penamaan suatu kelompok yang mewakili suatu keadaan atau kondisi tertentu dengan menggunakan bahasa alami, seperti: LAMBAT, SEDANG, CEPAT.
2. Numeris, yaitu suatu nilai (angka) yang menunjukkan ukuran dari suatu variabel, seperti: 40, 50, 60, dan sebagainya.

Ada beberapa hal yang perlu diketahui dalam memahami sistem *fuzzy*, yaitu:

1. Variabel *fuzzy*, merupakan variabel yang hendak dibahas dalam suatu sistem *fuzzy*. Contoh: umur, temperature, permintaan, dan sebagainya
2. Himpunan *fuzzy*, merupakan suatu grup yang mewakili suatu kondisi atau keadaan tertentu dalam suatu variabel *fuzzy*
3. Semesta Pembicaraan adalah keseluruhan nilai yang diperbolehkan untuk dioperasikan dalam suatu variabel *fuzzy*.
4. Domain, keseluruhan nilai yang diijinkan dalam semesta pembicaraan dan boleh dioperasikan dalam suatu himpunan *fuzzy* [21].

Dalam penelitian ini metode fuzzy logic yang digunakan menggunakan metode Fuzzy Logic Sugeno, atau Sistem Inferensi Fuzzy Sugeno (Sugeno Fuzzy Inference System/FIS), adalah salah satu metode logika fuzzy yang populer

digunakan untuk pemodelan sistem nonlinier dan pengambilan keputusan dalam situasi yang tidak pasti. Metode ini dikembangkan oleh Takagi, Sugeno, dan Kang pada tahun 1985. Perbedaan utama metode Sugeno dengan metode Mamdani terletak pada bentuk fungsi outputnya. Jika Mamdani menggunakan fungsi keanggotaan fuzzy pada output, Sugeno menggunakan **fungsi linear** (bentuk orde satu) atau **konstanta** (bentuk orde nol) pada bagian *konsekuensi* (klausa THEN) dari aturan IF-THEN.

Prinsip Kerja dan Komponen Utama

Proses dalam metode Sugeno melibatkan empat tahap utama, serupa dengan sistem inferensi fuzzy lainnya, tetapi dengan pendekatan yang berbeda pada tahap inferensi dan defuzzifikasi:

1. Fuzzifikasi: Mengubah input tegas (nilai numerik) menjadi nilai fuzzy (derajat keanggotaan) menggunakan fungsi keanggotaan tertentu, seperti segitiga, trapesium, atau Gaussian.
2. Mesin Inferensi (Penerapan Aturan): Menerapkan aturan "IF-THEN" untuk mengevaluasi derajat kebenaran dari setiap aturan. Pada metode Sugeno, bagian *anteseden* (klausa IF) tetap berupa himpunan fuzzy, tetapi bagian *konsekuensi* (klausa THEN) dinyatakan dalam bentuk persamaan linear atau konstanta.

- **Contoh Aturan Sugeno:**

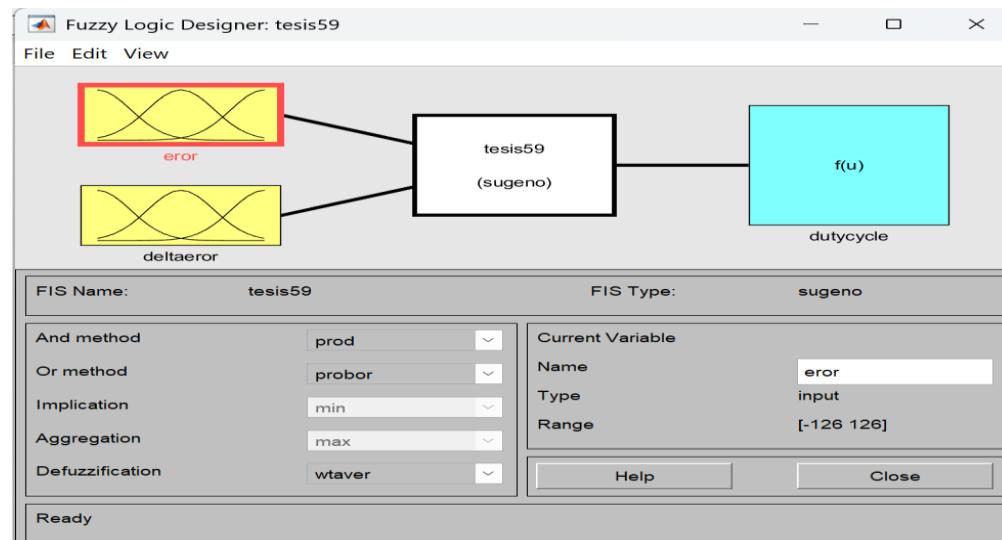
- *IF Permintaan Banyak AND Persediaan Sedikit THEN Produk si = ax + by + c* (fungsi linear) atau *Produksi = z* (konstanta).
- 3. Komposisi Aturan: Menghitung kekuatan (fire strength) setiap aturan, biasanya dengan operator min (AND) atau max (OR), dan menerapkannya pada fungsi output yang sesuai. Kekuatan aturan ini, sering disebut bobot (w), menentukan seberapa besar kontribusi aturan tersebut terhadap hasil akhir.

- Defuzzifikasi: Menghasilkan output tegas dari hasil inferensi. Pada metode Sugeno, proses ini sangat efisien karena output setiap aturan sudah berupa nilai numerik (hasil dari fungsi linear atau konstanta). Nilai output akhir diperoleh melalui rata-rata terbobot (weighted average) dari semua output aturan yang aktif.

Kelebihan Metode Sugeno sebagai berikut:

- Efisiensi Komputasi: Proses defuzzifikasi lebih cepat dan efisien secara komputasi dibandingkan metode Mamdani yang memerlukan perhitungan titik berat (centroid) dari area dua dimensi yang kompleks.
- Integrasi dengan Teknik Lain: Mudah diintegrasikan dengan teknik optimasi seperti jaringan saraf tiruan (neural network) dan algoritma genetik.
- Cocok untuk Interpolasi: Efektif untuk interpolasi model linear guna memodelkan sistem nonlinier yang kompleks.

Metode Sugeno banyak digunakan dalam aplikasi sistem kontrol otomatis, prediksi permintaan pasar, dan sistem pendukung keputusan lainnya karena kemudahan implementasi dan efisiensi perhitungannya [21].



Gambar 2.23 Pemodelan Fuzzy Metode Sugeno [20]

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini membahas tentang metode penelitian yang meliputi tahapan penelitian, konfigurasi sistem *rectifier*, dan perancangan sistem *rectifier* 3 fasa.

3.1 WAKTU DAN TEMPAT PENELITIAN

Penelitian tesis ini dimulai pada bulan November 2023 s.d. November 2025. Penelitian ini dilakukan dengan melakukan pemodelan yang disimulasikan menggunakan *software* Simulink Matlab.

3.2 Alat Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah :

1. Satu unit laptop dengan.
2. *Software* Simulink Matlab 2022
3. Microsoft Office 2019

3.3. Spesifikasi Alat

Adapun spesifikasi alat yang digunakan pada tesis ini adalah :

1. Dalam pelaksanaan penyelesaian tesis ini menggunakan laptop untuk menjalankan simulasi *software* simulik Matlab sebagai perangkat lunak dalam pemodelan dan melakukan simulasi *matrix converter* dan *rectifier* sebagai *solid state transformer* pengganti transformator konvensional dalam proses charging baterai dalam kondisi emergency (*blackout*) pada pembangkit.
2. Menggunakan Microsoft Office 2016 untuk membuat laporan hasil penelitian dan membuat powerpoint presentasi.

3.4 Tahap Pelaksanaan Penelitian

3.4.1 Studi Literatur

Tahap pertama ini merupakan tahapan dimana penulis mengumpulkan dan mempelajari tentang sistem PLTU dan PLTG, *matrix converter*, *solid*

state transformer (SST), *blackout* dan proses charging baterai. Studi literatur dimaksudkan untuk memahami dan mengetahui hal-hal terkait lebih detail dengan cara mencari referensi berupa *state of art* (artikel ilmiah berupa tinjauan pustaka), *review* (artikel ilmiah berupa ulasan topik tertentu) terkait topik penelitian seperti jurnal, buku, dan karya ilmiah lain-lain terkait dengan penyelesaian tesis, sehingga nantinya dihasilkan tesis yang sesuai dengan penelitian ilmiah yang bisa dipertanggungjawabkan.

3.4.2 Observasi

Setelah melakukan studi literatur terkait, maka pada tahapan berikut penulis melakukan observasi terkait prinsip kerja PLTU dan PLTG serta proses charging baterai dalam kondisi emergency seperti terjadinya anomali sistem saat *blackout*.

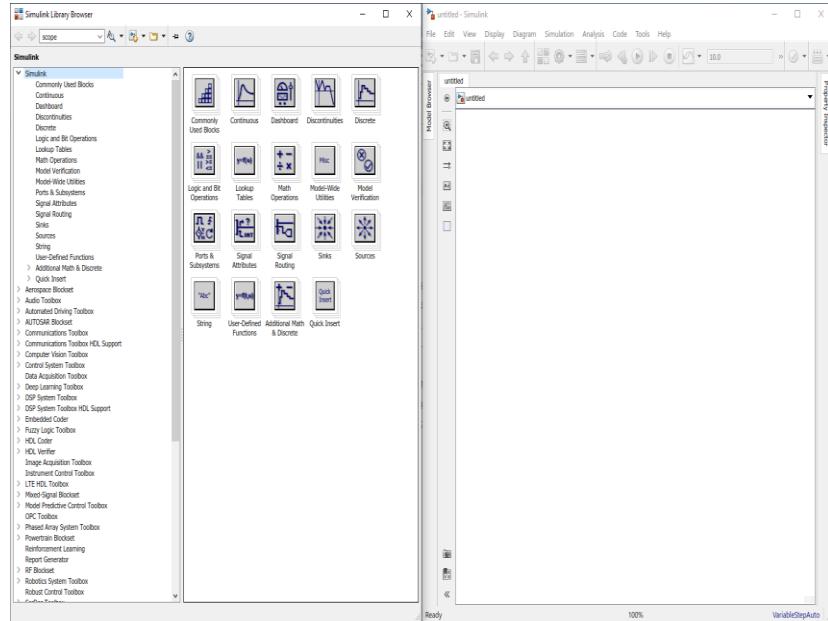
3.4.3. Pengumpulan Data

Pada tahap pengumpulan data ini mengetahui parameter yang akan digunakan untuk menunjang pengolahan data penelitian berupa:

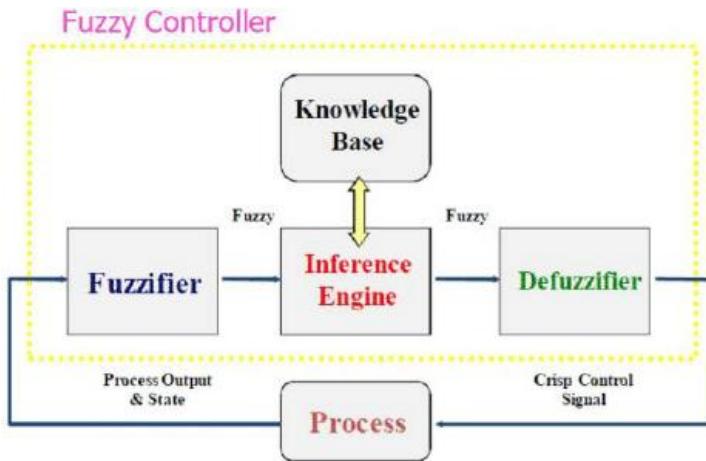
- Nameplate dan spesifikasi teknis terkait generator dan baterai PLTG.
- Spesifikasi teknis yang terdapat pada PLTG, dimana di spesifikasi teknis diketahui jumlah beban motor listrik yang digunakan pada PLTG.

3.4.4. Pemodelan dan Analisis Simulasi

Pada tahap ini dilakukan dilakukan pemodelan matrix converter sebagai *solid state transformer* (SST) pengganti transformator konvensional untuk penchargingan baterai pada PLTG. Pemodelan matrix converter yang diteliti ini disimulasikan menggunakan *software Simulink MATLAB*. Pemodelan ini dibuat berdasarkan parameter yang didapatkan dari tahapan studi literatur, observasi, dan pengumpulan data. Tahapan yang dilakukan pada pemodelan simulasi ini ialah:

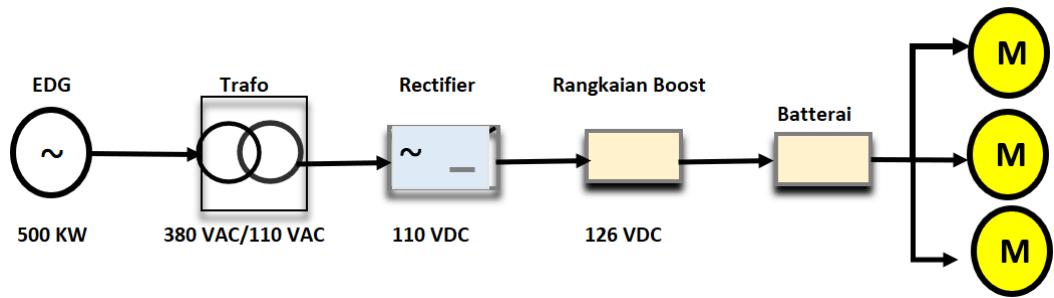


Gambar 3.1 : Tampilan Simulink Matlab



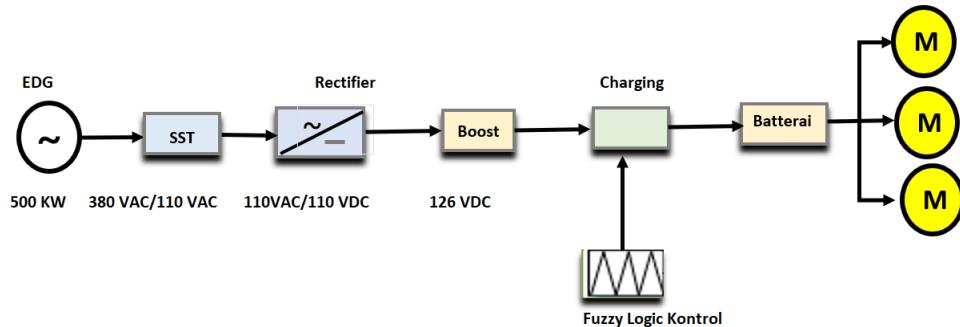
Gambar 3.2 : Diagram Blok Fuzzy Logic

- Membuat pemodelan emergency diesel generator sebagai supply dalam kondisi emergency yang terhubung dengan *solid state converter* sebagai pengganti transformator konvensional dengan komponen pokok berupa *three phase matrix converter* (TPMC) sebagai pengkonversi AC-AC dan *rectifier* sebagai pengkonversi AC-DC, beserta desain sistem kendali fuzzy logic untuk mengontrol switching rectifier.



Gambar 3.3 : Diagram blok EDG kondisi eksisting

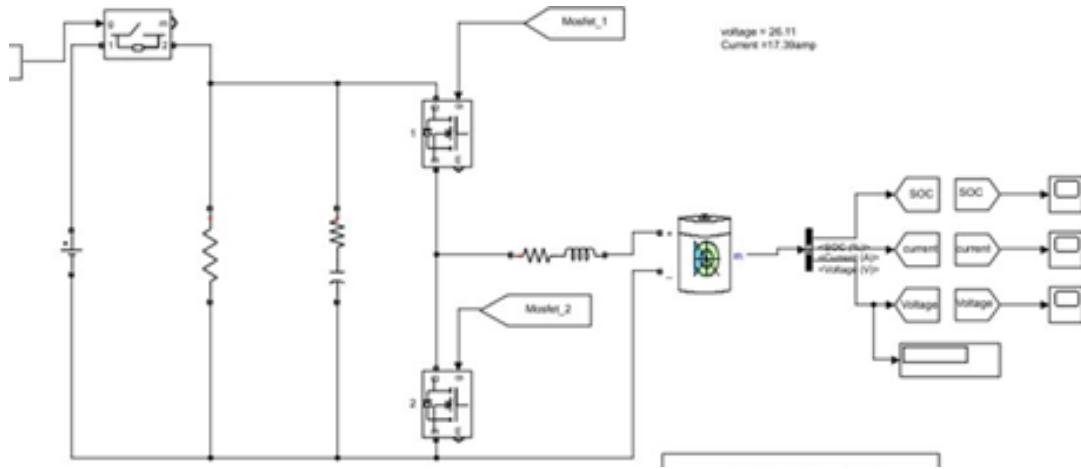
Sesuai gambar 3.3 diatas kondisi eksisting sumber tegangan 380 volt AC melewati trafo (transformator) untuk menurunkan tegangan dari 380 VAC menjadi 110 VAC. Kemudian, Rectifier mengubah daya AC 110 VAC menjadi daya DC (arus searah) sebesar 110 VDC dan sebuah rangkaian penambah tegangan (Rangkaian Boost) meningkatkan tegangan DC tersebut sedikit menjadi 126 VDC. Tegangan dari 126 VDC ini digunakan untuk mengisi daya (Batterai) dan secara bersamaan disalurkan ke beban output dimana beban output adalah 3 buah motor DC untuk pengerak awal saat *blackstart* dimana membutuhkan pasokan daya DC yang stabil dan tak terputus.



Gambar 3.4 : Diagram blok EDG menggunakan Matriks Konverter

Dari kondisi eksisting digunakan Matrix Converter sebagai Solid State Transformer sebagai pengganti trafo konvensional. Kemudian rangkaian boost converter untuk menaikkan tegangan dari 110 VAC ke 126 VDC. Tegangan DC ini di-boost dan digunakan untuk mengisi baterai, di mana proses pengisiannya dikontrol menggunakan fuzzy logic kontrol untuk efisiensi yang optimal dan stabil.

kemudian dilakukan proses charging pada baterai selanjutnya supply dari baterai digunakan untuk menggerakkan beban-beban motor penunjang PLTG (motor auxiliary) sampai mampu menyupply listrik sebesar 15 MW ke bus transmisi, hasil supply listrik 15 MW dari transmisi akan dilakukan *backfeeding* ke PLTU kapasitas 2x100 MW untuk proses *blackstart* kemudian pembangkit utama PLTU dapat beroperasi normal kembali.



Gambar 3.5 : Pemodelan Charging Batterai

3.4.5. Pengujian Hasil Simulasi

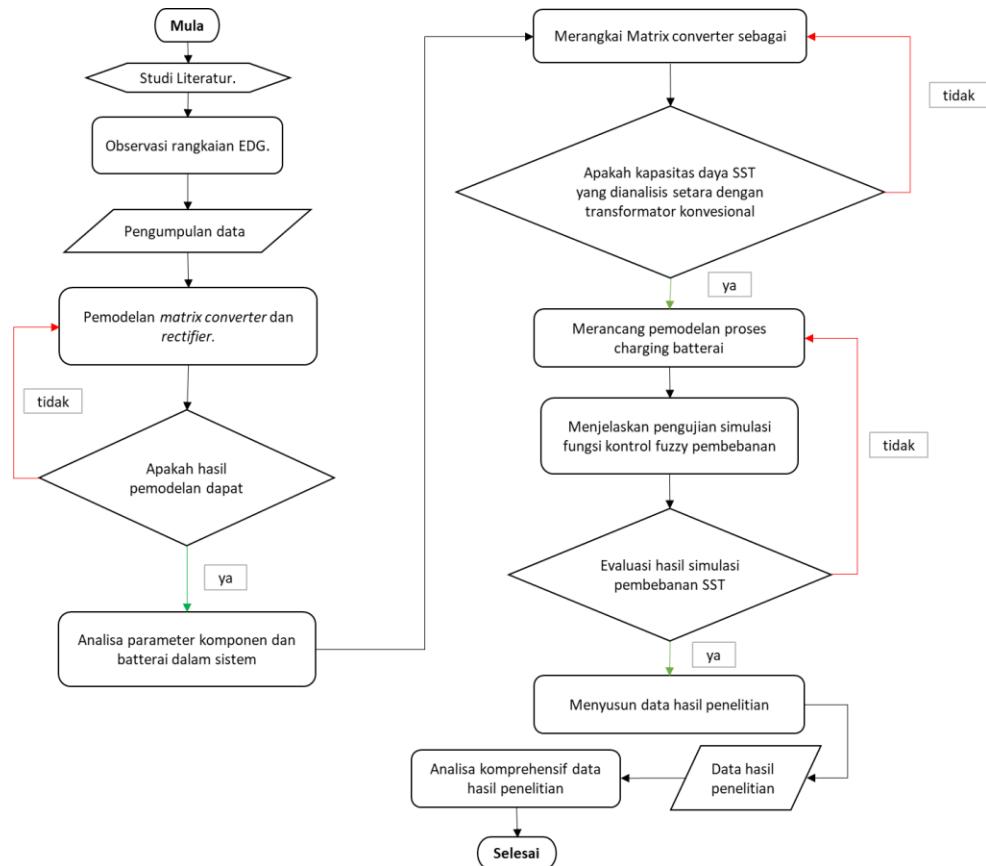
Pada tahap ini dilakukan simulasi terhadap pemodelan yang telah dirancang pada Simulink Matlab. Tahap simulasi ini untuk mendapatkan data hasil simulasi kinerja SST pengganti trafo konvensional sebagai supply tegangan 126 Volt DC untuk baterai.

3.4.6. Penyusunan dan Analisa Data Hasil Pengujian

Tahap ini merupakan tahap terakhir penelitian. Setelah melakukan perancangan simulasi dan pengujian, maka penulis dapat menyusun data hasil penelitian untuk kemudian dianalisa secara komprehensif.

3.5 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 3.5.



Gambar 3.6. Diagram Alir Penelitian

V. KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan serta analisis terhadap hasil eksperimen, dapat disimpulkan bahwa:

1. Matrix converter cukup efektif sebagai solid state transformer sebagai pengganti trafo konvensional dibuktikan dari kemampuan mengubah tegangan sumber dari 380 volt menjadi 110 volt ac yang disearahkan menggunakan rectifier menjadi 110 volt DC.
2. Pada rangkaian boost konverter fase respons transien periode awal ketidakstabilan pada saat waktu $t = 0$ sampai detik $t = 2$ mencapai tegangan puncak 140 volt DC sebelum sistem mencapai kondisi *steady state* yang stabil pada waktu $t = 4$ sampai $t = 6$ detik dimana ripple atau osilasi yang ada diawal cukup tinggi telah hampir sepenuhnya hilang, dan sinyal menetap pada nilai rata-rata yang konstan dengan tegangan di angka 127,9 volt DC diwaktu $t=10$ detik stabil secara konstan. Dimana tegangan keluaran dari boost converter ini akan digunakan untuk proses charging
3. Dalam Proses Charging Fuzzy logic control dengan metode sugeno berhasil membuat tegangan stabil di 127,6 volt, tegangan tersebut digunakan untuk proses charging baterai untuk menggerakan 3 beban motor DC untuk penggerak awal untuk *blackstart* dipembangkit sehingga dapat bekerja secara optimal dan stabil sehingga potensi kegagalan blackstart pembangkit akibat gagal charging dapat diantisipasi.

5.2. Saran

Adapun saran untuk penelitian ini kedepannya dapat dikembangkan untuk dilakukan penelitian lebih lanjut menggunakan metode THIPWM (Third Harmonic Injection Pulse Width Modulation) untuk memastikan *Total Harmonic Distorsi* Dapat tereduksi sesuai standard IEEE 519-2014 tentang pengendalian dalam sistem kelistrikan ;, IEC 61000-3-2 tentang tentang batasan emisi harmonisa untuk sistem listrik. dan IEC 61000-3-4 tentang standard mengatur tentang karakteristik tegangan listrik yang disuplai oleh jaringan listrik publik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Syahputra, DR Ramadoni. Rekayasa dan Pengkondisian Energi Terbarukan. 2016.
- [2] Abimanyu, Gaffar; Ahmad; Pranoto, Sarwo. Analisis Baterai Dalam Mempertahankan Keandalan Pembangkit Listrik Tenaga Uap Punagaya 2x100MW. In: *Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika (SNTEI)*. 2021. p. 185-191.
- [3] J. Marqusee and D. Jenket, "Reliability of emergency and standby diesel generators: Impact on energy resiliency solutions," *Appl. Energy*, vol. 268, no. December 2019, p. 114918, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.114918.
- [4] Hasan, Muhammad; Zamzami, Zamzami; Safitri, Nelly. Analisa Sistem Kerja Blackstart Pada Generator Emergency 1.008 KW di PT. Sewatama Sumbagut 2 Peaker Powerplant 250 MW. *Jurnal TEKTRO*, 2023, 7.1: 98-103.
- [5] Shri, Aniel. "A solid-state transformer for interconnection between the medium-and the low-voltage grid." (2013).
- [6] 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.
- [7] P. Tenti, L. Malesani, L. Rossetto. "Optimum Control of N-Input K-Output Matrix Converters". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 7, no. 4, pp. 707-713, 1992
- [8] A. Alesina, M. Venturini. "Analysis and Design of Optimum-Amplitude NineSwitch Direct AC-AC Converters". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 4, no. 1, pp. 101-112, January 1989

- [9] SZCZESNIAK, Pawel. Challenges and design requirements for industrial applications of AC/AC power converters without DC-link. *Energies*, 2019, 12.8: 1581.
- [10] Saputra, Ahmad Adrian. "Sistem Penyeimbang Baterai Dengan Single Storage Device Untuk Aplikasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) OFF GRID." (2022).
- [11] Pasaribu, Faisal Irsan, and Muhammad Reza. "Rancang Bangun Charging Station Berbasis Arduino Menggunakan Solar Cell 50 WP." *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): Jurnal Teknik Elektro* 3.2 (2021): 46-55.
- [12] Yilmaz, Murat, and Philip T. Krein. "Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles." *IEEE transactions on Power Electronics* 28.5 (2012): 2151-2169.
- [13] C. S. Lee, J. B. Jeong, B. H. Lee, and J. Hur, "Study on 1.5 kW battery chargers for neighborhood electric vehicles," in *Proc. IEEE Veh. Power and Propulsion Conf.*, Sep. 2011, pp. 1–4.
- [14] C. Aguilar, F. Canales, J. Arau, J. Sebastian, and J. Uceda, "An integrated battery charger/discharger with power-factor correction," *IEEE Trans. Ind. Elect.*, vol. 44, no. 5, pp. 597–603, Oct. 1997
- [15] C. Aguilar, F. Canales, J. Arau, J. Sebastian, and J. Uceda, "An integrated battery charger/discharger with power-factor correction," *IEEE Trans. Ind. Elect.*, vol. 44, no. 5, pp. 597–603, Oct. 1997.
- [16] W. Frank, M. Reddig, and M. Schlenk, "New control methods for rectifierless PFC-stages," in *Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, Jun. 2005, pp. 489–493.
- [17] B. Singh, B. N. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, A. Pandey, and D. P. Kothari, "A review of three-phase improved power quality ac–dc converters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 51, no. 3, pp. 641–660, Jun. 2004.

- [18] T. J. Ross, Fuzzy Logic With Engineering Applications, 2nd ed. England: John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [19] K. Sri, Artificial Intelligence (Teknik dan Aplikasinya). Jogjakarta: Graha Ilmu, Jogjakarta, 2003.
- [20] Pratama, I. Putu Adinata Mas, I. Nengah Suweden, and IB Alit Swamardika. "Sistem Kontrol Pergerakan Pada Robot Line Follower Berbasis Hybrid PID-Fuzzy Logic." *Prosiding Conference on Smart-Green Technology in Electrical and Information Systems Bali*. 2013.
- [21] Fiqar, T. P., Fitriani, F., & Abdullah, R. K. (2023). Implementasi sistem monitoring tanaman hidroponik menggunakan metode fuzzy sugeno. *JTIM: Jurnal Teknologi Informasi dan Multimedia*, 5(2), 109-121..
- [22] Shadfar, Hamed, Mehrdad Ghorbani Pashakolaei, and Asghar Akbari Foroud. "Solid-state transformers: An overview of the concept, topology, and its applications in the smart grid." *International Transactions on Electrical Energy Systems* 31.9 (2021): e12996.