

**PERANCANGAN *BATTERY CHARGING CONTROLLER*  
*RECTIFIER AC TO DC* SVPWM PLTG MENGGUNAKAN  
METODE *SELF-TUNING* PENGONTROL FUZZY PI  
(STUDI PADA UPK SEBALANG)**

**(Tesis)**

**Oleh**

**Elvin Nursandi  
NPM 2225031003**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2024**

**PERANCANGAN *BATTERY CHARGING CONTROLLER*  
*RECTIFIER AC TO DC* SVPWM PLTG MENGGUNAKAN  
METODE *SELF-TUNING* PENGONTROL FUZZY PI  
(STUDI PADA UPK SEBALANG)**

**Oleh**

**Elvin Nursandi**

**Tesis**

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

**Pada**

**Program Studi Teknik Elektro  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2024**

## ABSTRACT

### DESIGN OF AC TO DC RECTIFIER SVPWM PLTG BATTERY CHARGING CONTROLLER USING THE SELF-TUNING METHOD OF FUZZY PI CONTROLLER (STUDY ON UPK SEBALANG)

By

**ELVIN NURSANDI**

The ever-increasing demand for electricity has put a strain on the existing power grid, potentially leading to overloads and blackouts when supplies do not meet demand. Integrating alternative power sources, such as Gas Power Plants (PLTG), as backup solutions can reduce these risks. PLTG relies on various DC components to power the engine, all powered by a high-capacity battery bank. This research is located at the UPK Sebalang PLTG, where the existing system cannot stabilize the rectifier voltage when charging the battery. As a result, there is a failure during the generator starting process. Therefore, this study aims to stabilize the output voltage of the three-phase rectifier system at the UPK Sebalang PLTG. To achieve this goal, the self-tuning method uses fuzzy logic as the battery charging control. This method dynamically adjusts the PI reinforcement on the controller to effectively address errors arising from varying loads. The simulation results show that the proposed system can replace the existing rectifier module, with a more stable result and a voltage drop of about 0.72%.

**Kata Kunci:** Fuzzy logic, self-tuning, battery charging control

## ABSTRAK

### PERANCANGAN *BATTERY CHARGING CONTROLLER RECTIFIER AC TO DC* SVPWM PLTG MENGGUNAKAN METODE *SELF-TUNING* PENGONTROL FUZZY PI (STUDI PADA UPK SEBALANG)

Oleh

ELVIN NURSANDI

Permintaan listrik yang terus meningkat telah membebani jaringan listrik yang ada, sehingga berpotensi menyebabkan kelebihan beban dan pemadaman listrik ketika pasokan tidak memenuhi permintaan. Mengintegrasikan sumber daya alternatif, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG), sebagai solusi cadangan dapat mengurangi risiko tersebut. PLTG mengandalkan berbagai komponen DC untuk menyalakan mesin, semuanya ditenagai oleh bank baterai berkapasitas tinggi. Penelitian ini berlokasi di PLTG UPK Sebalang, yang mana sistem yang ada tidak dapat menstabilkan tegangan penyearah pada saat pengisian baterai. Akibatnya, terjadi kegagalan saat proses starting generator. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menstabilkan tegangan keluaran sistem penyearah tiga fasa yang ada pada PLTG UPK Sebalang. Untuk mencapai tujuan ini, metode *self-tuning* menggunakan *fuzzy logic* sebagai *battery charging control*. Metode ini secara dinamis menyesuaikan penguatan PI pada pengendali untuk secara efektif mengatasi kesalahan yang muncul akibat beban yang bervariasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan dapat menggantikan modul penyearah existing, dengan hasil yang lebih stabil dan penurunan tegangan sekitar 0,72%.

**Kata Kunci:** *Fuzzy logic, self-tuning, battery charging control*

Judul Tesis

: PERANCANGAN BATTERY CONTROLLER  
CHARGING RECTIFIER AC TO DC SVPWM  
PLTG MENGGUNAKAN METODE SELF  
TUNING PENGONTROL FUZZY PI (STUDI  
PADA UPK SEBALANG)

Nama Mahasiswa

: Elvin Nursandi

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2225031003

Program Studi

: Magister Teknik Elektro

Fakultas

: Teknik

**MENYETUJUI**

1. Komisi Pembimbing,

Pembimbing 1

Pembimbing II

**Dr. Eng. Ir. Charles R. Harahap, S.T., M.T.**  
NIP. 196912111999031001

**Dr. Eng. F.X. Arinto S, S.T., M.T.**  
NIP. 196912191999031002

2. Ketua Progam Studi Magister Teknik Elektro

**Misfa Susanto, S.T., M.Sc., Ph.D.**  
NIP. 197105251999031001

**MENGESAIHKAN**

**I. Komisi Penguji  
Ketua Komisi Penguji**

**(Pembimbing I) : Dr. Eng. Ir. Charles R. H, 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. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.**

**NIP 19750928 200112 1 002**



**Direktur Progam Pascasarjana**

**Prof. Dr. Ir. Murlhadi, M.Si.**

**NIP 19640326 198902 1 001**



**Tanggal Lulus Ujian Tesis: 19 September 2024**

## SURAT PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam tesis yang saya buat tidak terdapat karya orang lain dan diterbitkan orang lain kecuali secara tertulis diacu dalam naskah sebagaimana telah dituliskan dalam daftar pustaka. Selain dari itu saya menyatakan bahwa tesis ini saya buat sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar, maka saya bersedia terkena sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 19 September 2024



Elvin Nursandi  
NPM 2225031003

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Palembang pada tanggal 22 November 1997, sebagai anak kedua dari tiga bersaudara, dari Bapak Misun Efendi dan Ibu Dra. Martini.

Pada Tahun 2009 penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Dasar (SD) di Sekolah Dasar Negeri (SDN) 308 Kalidoni. Sekolah Menengah Pertama (SMP) ditempuh oleh penulis di Sekolah Menengah Pertama Negeri (SMPN) 37 Palembang dan diselesaikan pada tahun 2012. Kemudian, penulis melanjutkan pendidikan Sekolah Menengah Kejuruan (SMK) pada jurusan Teknik Tenaga Listrik di SMKN 4 Palembang hingga Tahun 2015. Pada Tahun 2017 hingga saat ini, penulis bekerja di PT Perusahaan Listrik Negara (PLN), Persero sebagai *Junior Technician* Pemeliharaan Listrik. Kemudian sembari bekerja, peneliti menyelesaikan pendidikan sarjana strata satu (S1) di Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Lampung pada Tahun 2021 pada jurusan Teknik Elektro.

Pada Tahun 2022, peneliti terdaftar sebagai mahasiswa di Program Magister Teknik Elektro di Fakultas Teknik Universitas Lampung Dan pada tahun 2023 penulis melakukan penelitian pada bidang Teknik kendali dengan judul tesis “Perancangan *Battery Controller Charging Rectifier AC to DC SVPWM PLTG Menggunakan Metode Self-Tuning* Pengontrol Fuzzy PI (Studi pada UPK Sebalang)”. Di bawah bimbingan Bapak Dr. Eng. Ir. Charles Ronald Harahap, S.T., M.T. dan Bapak Dr. Eng. F. X. Arinto S, S.T., M.T.

Bandar Lampung, 19 September 2024  
Penulis

**Elvin Nursandi**

## **MOTTO**

*“Allahumma laa sahla illa maa ja’altahu sahlaa, wa anta taj’alul hazna idza syi’ta sahlaa”*

“Ya Allah, tidak ada kemudahan kecuali yang Engkau buat mudah, dan Engkau menjadikan kesedihan (kesulitan), jika Engkau kehendaki pasti akan menjadi mudah.”

**(HR. Ibnu Hibban)**

Barang siapa yang menolong kesusahan orang muslim, maka Allah ta’ala akan menolongnya dari kesusahan pada hari kiamat.”

**(HR. Bukhari)**

## **PERSEMBAHAN**

Dengan Ridho Allah SWT, teriring shalawat kepada Nabi Muhammad SAW

Karya tulis ini kupersembahkan untuk:

### **Ayah dan Ibuku Tercinta**

*Bapak Misun Efendi dan Ibu Dra. Martini*

### **Keluarga Kecil Tersayang**

*Istriku Rizky Khairunnisa, S.M., M.M, Putra pertamaku tersayang Zhafi Asyam  
Ubadah dan calon putri keduaku yang masih dalam kandungan. Kakak  
perempuanku Dian Novitasari, S.Pd dan adik perempuanku Fitri Nurfadillah.*

### **Dosen Teknik Elektro**

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

### **Teman- teman kebanggaanku**

*Rekan – rekan Jurusan Teknik Elektro*

### **Sahabat-sahabatku**

*Yang selalu membantu, memberikan semangat, mendukung menuju keberhasilan,  
serta berbagi cerita suka duka dalam berkeluh kesah*

### **Keluarga Besar Magister Teknik Elektro 2022**

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

### **Almamaterku**

*Universitas Lampung*

### **Bangsa dan Negaraku**

*Republik Indonesia*

Terima kasih untuk semua yang telah diberikan kepadaku. *Jazzakumullah Khairan.*

## SAN WACANA

*Assalamu'alaikum Wr. Wb.*

Syukur Alhamdulillahirobbilalamin, penulis haturkan puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah, serta inayah-Nya kepada penulis sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tesis dengan mempersembahkan judul tesis “Perancangan *Battery Controller Charging Rectifier AC to DC* SVPWM PLTG Menggunakan Metode *Self-Tuning* Pengontrol Fuzzy PI (Studi pada UPK Sebalang)” dengan sebaik-baiknya.

Shalawat beriring salam selalu tercurah kepada junjungan seluruh alam Nabi Muhammad SAW, sahabatnya, serta para pengikutnya yang selalu istiqomah di atas jalan agama islam hingga hari ajal menjemput.

Dalam penyusunan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bimbingan, motivasi dan bantuan baik moral maupun materi oleh banyak pihak. Untuk itu dengan sepuh ketulusan hati penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M., selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si., selaku Direktur Program Pascasarjana Fakultas Teknik Universitas Lampung.
3. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M,Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Lampung.
4. Ibu Herlinawati, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung.
5. Bapak Misfa Susanto, S.T., M.T., Ph.D., selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Lampung.
6. Bapak Dr. Eng. Ir. Charles Ronald Harahap, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama tesis yang banyak memberikan waktu, ide pemikiran dan semangat serta motivasi bagi penulis.
7. Dr. Eng. F. X. Arinto S, S.T., M.T., selaku pembimbing kedua tesis, yang telah banyak memberikan waktu, pengalaman, motivasi dan pemikiran bagi

penulis.

8. Dr. Eng. Lukmanul Hakim, S.T., M.Sc., selaku dosen penguji utama sekaligus yang telah banyak memberikan kritik, saran dan motivasi yang bermanfaat bagi penulis.
9. Bapak Dr. Herman Halomoan Sinaga, S.T., M.T., selaku dosen penguji kedua yang telah banyak memberikan kritik dan saran yang bermanfaat bagi penulis.
10. Seluruh Dosen Program Studi Magister Teknik Elektro Universitas Lampung, berkat ilmu yang telah diajarkan kepada penulis selama penulis menjalani masa studi di perkuliahan.
11. Seluruh Tenaga Pendidik Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah banyak membantu kepada penulis, sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini.
12. Seluruh teman-teman Program Studi Magister Teknik Elektro UNILA angkatan 2022 untuk kebersamaan yang telah dijalani. Tiada kata yang dapat penulis utarakan untuk mengungkapkan perasaan senang dan bangga menjadi bagian dari angkatan 2022.
13. Kedua orang tua, ayah dan ibu yang selalu menyayangi, mendidik, membimbing, berkorban serta mendoakan penulis.
14. Istri yang selalu berkorban segala cara untuk membantu segala hal keperluan penulis mulai dari akademis hingga non akademis.
15. Serta semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan tugas akhir ini yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Akhir kata, Penulis menyadari bahwa Tesis ini masih jauh dari kesempurnaan, baik dari segi isi maupun cara penyajiannya. Oleh karena itu, Penulis sangat mengharapkan saran serta kritik yang bersifat membangun dari pembaca. Akhir kata sedikit harapan penulis semoga karya sederhana ini dapat berguna dan bermanfaat bagi kita semua. Aamiin Allahumma Aamiin.

***Wassalamu'alaikum Wr. Wb.***

Bandar Lampung, 19 September 2024  
Penulis,

**Elvin Nursandi**

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>i</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>iii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>iv</b>
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan masalah.....	3
1.3. Tujuan.....	3
1.4. Manfaat.....	4
1.5. Batasan Masalah.....	4
1.6. Hipotesis.....	5
1.7. Sistematika Penulisan.....	5
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>6</b>
2.1. Tinjauan Pustaka .....	6
2.2. <i>Rectifier</i> Tiga Fasa .....	7
2.2.1. Setengah Jembatan ( <i>Half-Wave Bridge Rectifier 3 Phase</i> ) .....	7
2.2.2. <i>Rectifier</i> Jembatan <i>Graetz</i> ( <i>Full-Wave Bridge Rectifier Tiga Fasa</i> )....	8
2.2.3. Sistem Kontrol <i>Rectifier</i> .....	10
2.3. <i>Pulse Width Modulation</i> (PWM) .....	10
2.4. <i>DC-DC Converter</i> .....	12
2.5. <i>Buck-boost Converter</i> .....	14
2.5.1 Pensaklaran Terbuka .....	16
2.5.2 Pensaklaran Tertutup.....	16
2.6. Kontrol Fuzzy.....	18
2.7. Baterai .....	20
2.7.1. Jenis Baterai .....	21
2.7.2. Prinsip Kerja Baterai .....	21
2.7.3. Kapasitas Baterai.....	22
<b>III. METODE PENELITIAN</b> .....	<b>23</b>
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian .....	23
3.2. Diagram Alir Penelitian .....	23

3.3.	Perancangan Sistem.....	24
3.3.1	Konfigurasi Sistem <i>Rectifier</i> pada PLTG UPK Sebalang.....	24
3.3.2	Perancangan Vektor $dq0$ .....	25
3.3.3	Perancangan SVPWM.....	28
3.3.4	Perancangan Kontrol Fuzzy .....	30
<b>IV.</b>	<b>HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>35</b>
4.1	Hasil Pengujian .....	35
4.1.1.	Respon Sinyal SVPWM.....	35
4.1.2	Skenario 1: Pengujian <i>rectifier</i> saat proses <i>charging</i> dan motor nonaktif.....	36
4.1.3	Skenario 2: Pengujian <i>rectifier</i> saat proses <i>charging</i> dan motor aktif.....	37
4.1.4	Skenario 3: Pengujian <i>rectifier</i> saat status pengisian baterai 100% dan motor aktif.....	38
4.1.5	Analisis Performa <i>Rectifier</i> .....	38
4.2	Validasi Metode .....	39
4.2.2	Perbandingan respon tegangan.....	40
4.2.3	Perbandingan THD pada arus beban.....	42
<b>V.</b>	<b>KESIMPULAN.....</b>	<b>45</b>
5.1.	Kesimpulan.....	45
5.2.	Saran.....	45
	<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>46</b>
	<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>48</b>

## DAFTAR TABEL

<b>No. Tabel</b>	<b>Keterangan Tabel</b>	<b>Halaman</b>
Tabel 3. 1	Parameter yang Digunakan untuk Eksperimen.....	25
Tabel 3. 2	Tabel Kebenaran Vektor SVPWM .....	29
Tabel 3. 3	Urutan <i>Switching</i> Berdasarkan Sektor .....	29
Tabel 3. 4	Fungsi Keanggotaan Fuzzy .....	34
Tabel 3. 5	Aturan Fuzzy .....	34
Tabel 4. 1	Perbandingan Sistem <i>Rectifier</i> Eksisting dengan Sistem <i>Rectifier</i> yang diajukan.....	39
Tabel 4. 2	Perbandingan Waktu <i>Settling</i> .....	42
Tabel 4. 3	Perbandingan THD .....	43

## DAFTAR GAMBAR

No. Gambar	Keterangan Gambar	Halaman
Gambar 2. 1	<i>Rectifier</i> Setengah Gelombang.....	7
Gambar 2. 2	<i>Rectifier</i> Gelombang Penuh .....	8
Gambar 2. 3	<i>Pulse Width Modulation (PWM)</i> .....	11
Gambar 2. 4	<i>Buck-boost Converter</i> .....	14
Gambar 2. 5	<i>Continuous Current Mode</i> .....	15
Gambar 2. 6	<i>Discontinuous Current Mode</i> .....	16
Gambar 2. 7	Siklus Kerja <i>Buck-boost Converter</i> .....	16
Gambar 2. 8	Siklus Kerja <i>Buck-boost Converter</i> Pensaklaran Tertutup.....	17
Gambar 2. 9	<i>Diagram Blog Fuzzy Logic</i> .....	19
Gambar 2. 10	Proses Pengosongan Baterai ( <i>Discharge</i> ) .....	21
Gambar 2. 11	Proses Pengisian ( <i>Charge</i> ). .....	21
Gambar 3. 1	Diagram Alir Penelitian .....	23
Gambar 3. 2	Konfigurasi Sistem <i>Rectifier</i> pada PLTG UPK Sebalang.....	24
Gambar 3. 3	Pemodelan Sistem <i>Rectifier</i> PLTG UPK Sebalang pada <i>Simulink</i> MATLAB.....	24
Gambar 3. 4	Struktur Vektor Kontrol dq.....	26
Gambar 3. 5	Skematik Sumber Tegangan 3-Fasa dengan Impedansi.....	26
Gambar 3. 6	Diagram <i>Voltage Space Vector</i> .....	29
Gambar 3. 7	Pemodelan SVPWM .....	30
Gambar 3. 8	Struktur <i>fuzzy logic</i> .....	31
Gambar 3. 9	Tampilan Sistem Kendali <i>Fuzzy Logic</i> .....	32
Gambar 3. 10	Blok Diagram Metode <i>Tuning PI</i> dengan FLC .....	32
Gambar 3. 11	Pemodelan FLC.....	33
Gambar 4. 1	Respon Sinyal SVPWM.....	35
Gambar 4. 2	Respon Tegangan Keluaran <i>Rectifier</i> Saat Proses <i>Charging</i> dan Motor Nonaktif.....	36
Gambar 4. 3	Respon Tegangan Keluaran <i>Rectifier</i> Saat Proses <i>Charging</i> dan Motor Aktif .....	37

Gambar 4. 4 Respon Tegangan Keluaran <i>Rectifier</i> Saat Status Pengisian Baterai 100% dan Motor Aktif .....	38
Gambar 4. 5 Pencuplikan Arus Pengisian Baterai dengan Kapasitas Baterai 0-100% .....	39
Gambar 4. 6 Perbandingan <i>Step Response</i> Metode yang Diajukan dengan Penelitian Sebelumnya. (a) Gabungan Ketiga Metode. (b) Metode yang Diajukan. (c) Metode PI. (d) Metode IPQR .....	41
Gambar 4. 7 Perbandingan Waktu <i>Settling</i> Metode yang Diajukan dengan Penelitian Sebelumnya .....	41
Gambar 4. 8 Analisis THD pada Metode IPQR (a), Metode PI Konvensional (b), Metode yang Diajukan (c).....	42
Gambar 4. 9 Perbandingan THD Metode yang Diajukan dengan Penelitian Sebelumnya.....	43

# I. PENDAHULUAN

## 1.1. Latar Belakang

Gangguan transmisi merupakan hal yang dianggap sebagai masalah yang perlu ditangani segera untuk menghindari terjadinya pemadaman listrik secara massal di wilayah Indonesia. Pemadaman listrik atau yang biasa disebut dengan *blackout* merupakan kondisi *abnormal* yang mana sistem jaringan listrik mengalami pemadaman total dikarenakan terjadinya gangguan pada sistem transmisi [1]. Permasalahan tersebut sangat erat kaitannya dengan dunia pembangkit listrik khususnya pada pembangkit yang menggunakan tenaga uap, yang mana hal tersebut cenderung akan berdampak pada pengoperasian serta keandalan peralatan *essential* ketika terjadi *blackout*. Secara umum saat terjadi *blackout*, Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) memerlukan bantuan pengamanan peralatan esensial berupa *Emergency Diesel Generator* (EDG) [2]. Seperti halnya PLTU UPK Sebalang yang merupakan salah satu pembangkit listrik yang cukup berpengaruh dalam pengadaan energi listrik di Provinsi Lampung Indonesia, 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. 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, UPK Sebalang memiliki Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) yang berperan sebagai pentransfer daya dalam keadaan *blackout* yang terhubung ke jaringan transmisi 150 kV atau dapat disebut sebagai pembangkit *blackstart*.

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 sistem DC, terhitung setidaknya 30% dari total kegagalan [3], [4], sehingga diperlukannya penggantian baterai pada PLTG. Namun tidak menutup kemungkinan bahwa dalam jangka panjang baterai yang baru lambat laun akan mengalami penurunan kinerja, dikarenakan pemakaian yang tidak terjaga sebagaimana mestinya dimana *State of Health* (SoH) pada baterai harus dijaga diatas nilai 80%, dikarenakan jika baterai mencapai nilai 80%, maka akan menandakan bahwa baterai tidak layak pakai dan harus segera diganti. Bahwa nilai SoH baterai 80% berdampak kepada penurunan performa dari baterai tersebut secara drastis [5], sehingga akan mengganggu proses pengoperasian PLTG ketika dibutuhkan. Oleh karena itu diperlukannya alternatif sumber energi listrik eksternal dan sistem *charging* yang handal untuk menjaga keandalan pada sistem baterai PLTG UPK Sebalang dalam kondisi *blackout*. EDG pada PLTU UPK Sebalang dapat dimanfaatkan sebagai sumber alternatif energi listrik cadangan yang dapat menyuplai energi listrik dalam keadaan darurat yang memungkinkan akan berdampak pada PLTG UPK Sebalang. Di mana tegangan pada EDG mencapai 380 VAC kemudian akan diubah tegangannya menjadi tegangan 125 VDC menggunakan *rectifier* tiga fasa dengan metode kontrol fuzzy yang dihubungkan ke peralatan *emergency* pada PLTG UPK Sebalang, seperti halnya yang dilakukan oleh beberapa peneliti dimana pengoperasian *rectifier* tiga fasa menggunakan kontrol *Proportional Integral* (PI) [6]. Sedangkan yang dilakukan pada penelitian ini, metode pengoperasian *rectifier* tiga fasa di kontrol menggunakan kontrol fuzzy. *Rectifier* adalah perangkat elektronik yang digunakan untuk mengubah arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC). Penggunaan kontrol fuzzy dalam *rectifier* ini memungkinkan pengaturan yang lebih adaptif dan responsif terhadap kondisi lingkungan dan beban [7].

Penerapan kontrol fuzzy dalam *rectifier* tiga fasa dapat mengoptimalkan efisiensi energi, mengurangi harmonisa arus dan tegangan, serta meningkatkan kualitas daya yang disalurkan ke beban [8]. konsep kontrol fuzzy, yang mana variabel-variabel tidak hanya memiliki nilai biner (0 atau 1) tetapi nilai-nilai di antara 0 dan 1, yang memungkinkan sistem untuk

membuat keputusan yang lebih kompleks berdasarkan kondisi nyata dan beragam [9] dan mudah diterapkan untuk sistem yang kompleks sebagai kebutuhan sistem DC pada PLTG. Di samping itu langkah tersebut dianggap sebagai salah satu cara yang dapat dilakukan dalam mempertahankan keandalan pada pengoperasian PLTG Sebalang, sehingga penanganan *blackout* pada sistem jaringan transmisi dapat segera teratasi segera walaupun dalam kondisi baterai PLTG yang tidak mendukung.

## 1.2. Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan di atas, maka dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana cara merancang sistem penyearah dengan metode kontrol fuzzy untuk penyesuaian otomatis parameter PI yang dapat mencapai stabilisasi tegangan penyearah secara akurat?
2. Bagaimana efektifitas metode kontrol fuzzy dalam mengurangi kerugian daya dan meningkatkan efisiensi sistem pada modul penyearah?
3. Sejauh mana metode kontrol fuzzy dapat meminimalkan *Total Harmonic Distortion* (THD) dari arus input dan mengurangi waktu *Settling* untuk memperbaiki respons transien sistem?
4. Apakah metode kontrol fuzzy yang diusulkan dapat menggantikan modul penyearah yang ada di sistem pembangkit listrik gas UPK Sebalang, dan bagaimana dampaknya terhadap performa sistem secara keseluruhan?

## 1.3. Tujuan

Adapun tujuan penelitian ini sebagai berikut:

1. Merancang sistem penyearah dengan metode kontrol fuzzy untuk penyesuaian otomatis parameter PI yang mampu mencapai stabilisasi tegangan penyearah secara akurat.
2. Menganalisis efektivitas metode kontrol fuzzy dalam mengurangi kerugian daya dan meningkatkan efisiensi sistem penyearah.

3. Mengevaluasi kemampuan metode kontrol fuzzy dalam meminimalkan *Total Harmonic Distortion* (THD) dari arus input dan mengurangi waktu *settling* untuk memperbaiki respons transien sistem.
4. Menguji dan memvalidasi apakah metode kontrol fuzzy yang diusulkan dapat menggantikan modul penyearah yang ada di sistem pembangkit listrik gas UPK Sebalang dengan peningkatan performa secara keseluruhan.

#### 1.4. Manfaat

Penelitian ini dapat memberikan manfaat secara teoritis maupun praktis sebagai berikut:

1. Secara teoritis hasil penelitian ini dapat dijadikan rujukan untuk penelitian berikutnya terkait dengan pengoptimalisasian sistem EDG PLTU terhadap sistem *emergency* PLTG Sebalang. Bagi peneliti juga, diharapkan dapat bermanfaat untuk memperdalam dan menerapkan teori yang telah diperoleh.
2. Secara praktis, bagi pihak perusahaan sektor pembangkitan Sebalang penelitian ini dapat dijadikan rujukan untuk melakukan pengoptimalisasian sistem EDG PLTU terhadap sistem *emergency* pada PLTG, sehingga dapat terciptanya pengoperasian yang efektif dan efisien.

#### 1.5. Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini membahas pemanfaatan EDG sebagai suplai daya *emergency* pada PLTG menggunakan *rectifier* 3 fasa dengan metode kontrol fuzzy.
2. Penelitian ini menggunakan *software* MATLAB *Simulink* untuk menyimulasikan perancangan pemanfaatan EDG sebagai suplai daya *emergency* pada PLTG menggunakan *rectifier* 3 fasa dengan metode kontrol fuzzy.

## 1.6. Hipotesis

Penggunaan *rectifier* tiga fasa dengan kontrol fuzzy sebagai sumber energi cadangan dari *Emergency Diesel Generator* (EDG) pada PLTG UPK Sebalang akan meningkatkan keandalan operasi PLTG dalam kondisi *blackout*, dengan cara mengoptimalkan efisiensi energi, mengurangi harmonisa, dan meningkatkan kualitas daya yang disalurkan ke sistem baterai PLTG.

## 1.7. Sistematika Penulisan

Laporan akhir ini dibagi menjadi lima bab yaitu:

### BAB I. PENDAHULUAN

Pada bab ini memaparkan latar belakang, masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, perumusan masalah, hipotesis dan sistematika penulisan.

### BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini menjelaskan teori-teori pendukung materi penelitian yang diambil dari berbagai sumber ilmiah yang digunakan dalam penulisan laporan penelitian ini.

### BAB III. METODE PENELITIAN

Pada bab ini memaparkan waktu dan tempat penelitian, alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian, metode penelitian yang digunakan, serta pelaksanaan dan pengamatan penelitian.

### BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini menjelaskan hasil data penelitian dan pembahasan dari penelitian ini.

### BAB V. KESIMPULAN

Pada bab ini menjelaskan kesimpulan yang didasarkan pada hasil data dan pembahasan dari penelitian ini.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Tinjauan Pustaka

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang berfokus pada *rectifier* tiga fasa. mengangkat metode berbasis *artificial neural network* yang bertujuan untuk menghasilkan tegangan konstan pada *rectifier* tiga fasa [10]. melakukan penelitian untuk mengatasi *power loss* pada *rectifier* tiga fasa bertopologi tiga-level menggunakan metode *soft switching* [11]. Selanjutnya, memodifikasi SVPWM konvensional untuk mengoptimalkan pengisian daya pada baterai 48V [12]. Ketiga metode tersebut berhasil menghasilkan respon yang stabil serta *power loss* yang minimum, tetapi kompleksitas sirkuit menjadi sebuah permasalahan baru.

Dengan adanya permasalahan di atas, mengangkat permasalahan terkait kestabilan tegangan pada *rectifier* tiga fasa dengan konfigurasi yang minimum. Pada kedua penelitian tersebut, blok kontrol PI dimodifikasi untuk meningkatkan kecepatan dan kestabilan *rectifier* [13] dan [14]. Namun, adanya tambahan *loop* pada kontrol tegangan membuat respon *rectifier* menjadi lebih lambat.

Pendekatan lain dilakukan dengan menggunakan metode kontrol fuzzy. Kontrol fuzzy merupakan metode yang handal dalam mengatasi permasalahan pada sistem non linier seperti *rectifier* tiga fasa [15]. Penelitian yang dilakukan oleh [16] dan [17] menggunakan metode fuzzy untuk menghasilkan sinyal PWM yang adaptif terhadap perubahan parameter. Kelebihan penelitian ini yaitu ditunjukkan oleh respon *rectifier* yang adaptif serta konfigurasi yang minimum. Namun, metode ini belum dioptimalkan untuk beban yang sifatnya dinamis seperti baterai.

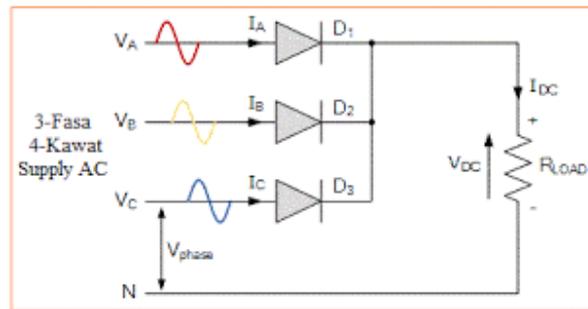
Pada penelitian ini, sistem *rectifier* tiga fasa diajukan untuk menggantikan *rectifier* eksisting yang ada pada PLTG UPK Sebalang. Berdasarkan kekurangan pada beberapa penelitian sebelumnya, penelitian ini mengoptimalkan metode kontrol fuzzy untuk meningkatkan respon *rectifier* serta memitigasi *power loss*.

## 2.2. Rectifier Tiga Fasa

*Rectifier* tiga fasa adalah suatu perangkat elektronik yang digunakan untuk mengubah arus bolak balik (AC) menjadi arus searah (DC) dalam sistem tiga fasa, ini adalah komponen penting dalam banyak aplikasi industri dan komersial karena dapat menyediakan pasokan daya DC yang stabil untuk berbagai peralatan elektronik [8]

### 2.2.1. Setengah Jembatan (*Half-Wave Bridge Rectifier 3 Phase*)

Gambar 2.1 merupakan gambar rangkaian penyearah tiga fasa setengah gelombang. Dalam rangkaian ini digunakan tiga buah dioda, D1, D2, D3 untuk masing-masing fasa keluaran dari trafo tiga fasa. Prinsip kerjanya identik dengan penyearah satu fasa setengah gelombang, perbedaan terletak pada tegangan inputnya yang mana pada rangkaian ini digunakan tegangan input tiga fasa.



**Gambar 2.1 Rectifier Setengah Gelombang**

Tegangan *output* rata-rata:

$$V_{dc} = \frac{3V_m}{2\pi} \quad (1)$$

Arus beban rata-rata:

Tegangan *output* (rms):

$$I_{dc} = \frac{V_{dc}}{R} \quad (2)$$

$$V_{rms} = 0.84V_m \quad (3)$$

Arus *output* (rms):

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{R} \quad (5)$$

Tegangan *output* (rms) pada sisi sekunder trafo:

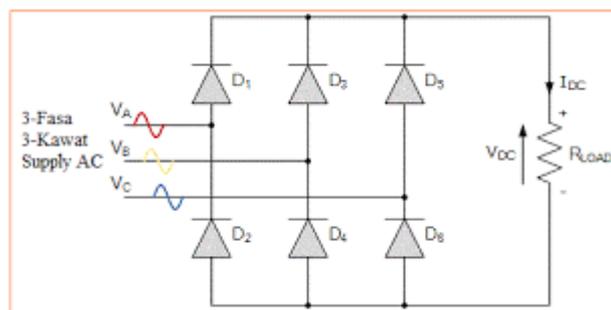
$$V_s = V_{rms} \quad (5)$$

Arus *output* (rms) pada sisi sekunder trafo:

$$I_s = \frac{V_m}{R} \quad (6)$$

### 2.2.2. Rectifier Jembatan Graetz (*Full-Wave Bridge Rectifier Tiga Fasa*)

Penyearah tiga fasa gelombang penuh dapat disebut juga sebagai penyearah jembatan tiga fasa, pada umumnya penyearah jembatan tiga fasa ini digunakan pada aplikasi yang membutuhkan daya yang tinggi. Rangkaian penyearah ini merupakan rangkaian penyearah gelombang penuh yang dapat dioperasikan dengan atau tanpa transformator, yang mana pada tegangan *output* akan menghasilkan enam buah pulsa gelombang. Gambar 2.2 menjelaskan bahwa rangkaian *rectifier* gelombang penuh memuat enam buah dioda di dalamnya, tiap dioda akan aktif untuk sudut konduksi sebesar  $120^\circ$ . Pada rangkaian ini dioda D1-D2, D2-D3, D3-D4, D4-D5, D5-D6, dan D6-D1 akan konduksi secara bersamaan.



**Gambar 2. 2 Rectifier Gelombang Penuh**

Pasangan dioda yang terhubung pada suplai tegangan fasa-fasa akan dikonduksi secara bersamaan seketika. Besarnya tegangan fasa-fasa adalah  $\sqrt{3}$  kali dari besarnya tegangan fasa-netral pada sumber tegangan tiga fasa hubung bintang.

Tegangan *output* rata-rata:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} = 1.654V_m \quad (7)$$

Tegangan *output* (rms):

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi}} V_m = 1.654V_m \quad (8)$$

Jika beban adalah resistif, arus puncak yang dilalui dioda:

$$I_m = \sqrt{3} \frac{V_m}{R} \quad (9)$$

Nilai arus (rms) dioda:

$$I_r = I_m \left[ \frac{1}{\pi} \left( \frac{\pi}{6} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{6} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = 0.5518V_m \quad (10)$$

Nilai rms arus pada sisi sekunder transformator adalah:

$$I_r = I_m \left[ \frac{2}{\pi} \left( \frac{\pi}{6} + \frac{1}{2} \sin \frac{2\pi}{6} \right) \right]^{\frac{1}{2}} = 0.7804V_m \quad (11)$$

$V_{dc}$  = Nilai rata-rata tegangan *output* (beban)

$I_{dc}$  = Nilai rata-rata arus *output* (beban),

Daya *output* DC adalah:

$$P_{dc} = I_{dc} \times V_{dc} \quad (12)$$

$V_{rms}$  = Nilai (rms) tegangan *output*

$I_{rms}$  = Nilai (rms) arus *output*

$$P_{ac} = V_{rms} \times I_{rms} \quad (13)$$

Efisiensi (*rectification ratio*) sebuah penyearah merupakan contoh untuk membandingkan efisiensi didefinisikan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}} \quad (14)$$

Tegangan *output* dapat dikatakan sebagai gabungan dua komponen, yaitu:

1. Nilai DC, dan
2. Nilai AC atau *ripple*.

Nilai efektif (rms) komponen AC tegangan *output* adalah:

$$V_{ac} = \sqrt{(V_{rms}^2 - V_{dc}^2)} \quad (15)$$

Faktor bentuk (*form factor*) yang mengukur tegangan keluaran:

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{dc}} \quad (16)$$

Faktor *ripple* (*ripple factor*) yang mengukur kandungan *ripple*:

$$RF = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} \parallel RF = \sqrt{\left[\left(\frac{V_{rms}}{V_{dc}}\right)^2 - 1\right]} = \sqrt{(FF^2 - 1)} \quad (17)$$

Faktor penggunaan (*transformer utilization factor*):

$$TUF = \frac{P_{dc}}{V_s I_s} \quad (18)$$

### 2.2.3. Sistem Kontrol *Rectifier*

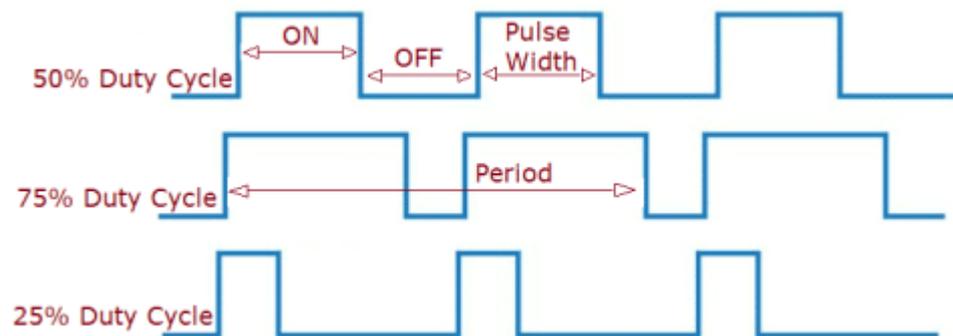
*Rectifier* tiga fasa memerlukan kontrol untuk mengendalikan tegangan yang konstan, dan berapapun arus yang diserap oleh beban serta mempertahankan satuan *Power Factor* (PF) yang memerlukan arus saluran sefasa *sinusoidal* seperti yang telah dijelaskan [6] menggunakan skema kontrol dq *vector*, skema *vector* dq yang dipisahkan dan mengguakan pengontrol PI linier, memiliki struktur *loop* bersarang dua: yang pertama *loop* arus dalam yang relatif lebih cepat dan yang kedua *loop* luar yang lebih lambat untuk kontrol tegangan DC atau daya aktif [18][19]

### 2.3. *Pulse Width Modulation* (PWM)

*Pulse Width Modulation* (PWM) merupakan suatu cara/teknik modulasi lebar sinyal yang dinyatakan dengan lebar pulsa (*pulse*) dalam suatu periode, untuk mendapatkan nilai tegangan rata-rata yang berbeda. Beberapa contoh pengaplikasian PWM diantaranya yaitu: pemodulasian data untuk telekomunikasi, pengontrolan tegangan daya atau tegangan yang masuk ke beban, regulator tegangan, *audio effect* dll. Sedangkan dalam penerapannya pada mikrokontroler biasanya berupa pengendalian

kecepatan motor DC, pengendalian motor servo, pengaturan nyala terang LED dan sebagainya.

Sinyal PWM biasanya memiliki amplitudo dan frekuensi dasar yang konstan dengan lebar pulsa (*duty cycle*) yang bervariasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 lebar pulsa (*duty cycle*) PWM sebanding dengan amplitudo sinyal asli yang belum termodulasi. Artinya, ketika sinyal PWM memiliki frekuensi gelombang yang tetap, namun lebar pulsa (*duty cycle*) nya bervariasi antara 0% - 100%.



**Gambar 2. 3 Pulse Width Modulation (PWM)**

*Pulse Width Modulation* (PWM) menjadi salah satu teknik untuk mendapatkan sinyal analog dari sebuah piranti digital. Pada umumnya sinyal PWM dapat dibangkitkan dengan berbagai cara seperti menggunakan metode analog dengan rangkaian op-amp maupun dengan metode digital. Dengan metode analog PWM memiliki perubahan yang sangat halus, sedangkan saat dengan metode digital setiap perubahan PWM dipengaruhi oleh resolusi dari PWM itu sendiri.

Resolusi adalah jumlah variasi perubahan nilai dalam PWM tersebut. Misalnya, diketahui sebuah PWM memiliki resolusi 8-bit artinya PWM itu memiliki perubahan variasi sebanyak  $2^8 = 256$  variasi mulai dari 0 – 255. Perubahan nilai yang mewakili nilai lebar pulsa (*duty cycle*) adalah antara 0% - 100% dari keluaran PWM tersebut.

Dengan cara mengatur lebar pulsa saat “on” dan “off” dalam suatu periode gelombang melalui pemberian besar sinyal referensi *output* dari suatu PWM akan didapatkan nilai lebar pulsa (*duty cycle*) yang diinginkan. Nilai lebar pulsa (*duty cycle*) dari PWM dinyatakan sebagai berikut:

$$D = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} \times F = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \times 100\% \quad (19)$$

Keterangan:

$t_{on}$  = Waktu/lamanya *switch* ditutup

$t_{off}$  = Waktu/lamanya *switch* dibuka

$T$  = Periode

$F$  = Frekuensi

*Duty cycle* 100% berarti sinyal tegangan pengatur motor dilewatkan seluruhnya. Jika tegangan catu daya 100 Volt, maka motor akan mendapatkan tegangan 100 Volt. Pada *duty cycle* 50%, tegangan pada motor akan diberikan 50% dari tegangan total yang ada, begitu seterusnya.

#### 2.4. DC-DC Converter

DC-DC *converter* merupakan suatu rangkaian listrik yang mentransfer energi dari sumber tegangan DC ke beban. DC-DC *converter* adalah rangkaian elektronika yang digunakan untuk mengubah suatu tegangan masukan DC menjadi tegangan keluaran DC dengan nilai yang lebih besar maupun lebih kecil sesuai yang dikehendaki. Tegangan masukan DC pada proses DC-DC *converter* biasanya memiliki nilai tegangan masukan yang tetap/konstan [20].

Dalam sistem perubahan daya DC atau DC to DC *converter*, terdapat dua tipe yaitu tipe linier dan tipe peralihan atau tipe *switching (DC chopper)*. Tipe linier merupakan cara termudah untuk mencapai tegangan keluaran yang bervariasi, namun kurang diminati karena tingginya daya yang hilang (*power loss*) pada transistor sehingga berakibat rendahnya efisiensi. Sedangkan pada tipe *switching*, tidak ada daya yang diserap pada transistor sebagai *switch*. Ini dimungkinkan karena pada waktu *switch* ditutup tidak ada tegangan yang jatuh pada transistor, sedangkan pada waktu *switch* dibuka, tidak ada arus listrik mengalir. Ini berarti semua daya terserap pada beban, sehingga efisiensi daya menjadi 100%. Namun pada prakteknya, tidak ada *switch* yang ideal.

Pada tipe *switching*, fungsi transistor sebagai *electronic switch* yang dapat dibuka (*off*) dan ditutup (*on*). Jika *switch* ditutup maka tegangan keluaran akan sama dengan tegangan masukan, sedangkan jika *switch* dibuka maka tegangan keluaran akan menjadi nol, dengan demikian tegangan keluaran yang dihasilkan akan berbentuk pulsa.

Pertama, energi ditransfer melalui suatu piranti elektronik *switch device* ke piranti penyimpanan energi. Kemudian, energi dikirimkan ke beban dari piranti penyimpanan energi. Induktor dan kapasitor biasanya digunakan sebagai penyimpanan energi. Proses transfer energi ini menghasilkan tegangan keluaran yang ditentukan oleh tegangan input dan *duty ratio* rangkaian *switching*.

Salah satu aplikasi elektronika daya adalah konverter DC-DC atau yang lazim disebut dengan *DC chopper*. Konverter DC-DC berfungsi untuk mengkonversi tegangan masukan searah konstan menjadi tegangan keluaran searah yang dapat divariasikan berdasarkan perubahan *duty cycle* rangkaian kontrol *chopper*-nya.

*DC chopper* digunakan untuk mengubah sumber tegangan DC yang tetap menjadi tegangan DC yang variabel dengan mengatur kondisi *on-off* (*duty cycle*) rangkaian *DC chopper* melalui rangkaian kontrol PWM, komponen yang digunakan untuk menjalankan fungsi penghubung tersebut tidak lain adalah *switch (solid state electronic switch)* seperti misalnya *thyristor*, MOSFET, IGBT, SCR, dan GTO. Sumber tegangan DC dapat diperoleh dari baterai, atau dengan menyearahkan sumber tegangan AC yang kemudian dihaluskan dengan *filter* kapasitor untuk mengurangi riak. Kelebihan utamanya terletak pada pengubah daya secara jauh lebih efisien dan pemakaian komponen yang ukurannya lebih kecil.

Konverter DC-DC dapat dibagi menjadi dua kategori besar, yaitu yang terisolasi dan yang tak terisolasi. Kata “isolasi” di sini secara sederhana bermakna adanya penggunaan trafo (isolasi galvanis) antara tegangan masukan dan tegangan keluaran konverter DC-DC. Beberapa sumber menyebutkan bahwa konverter DC-DC yang tak terisolasi dengan istilah

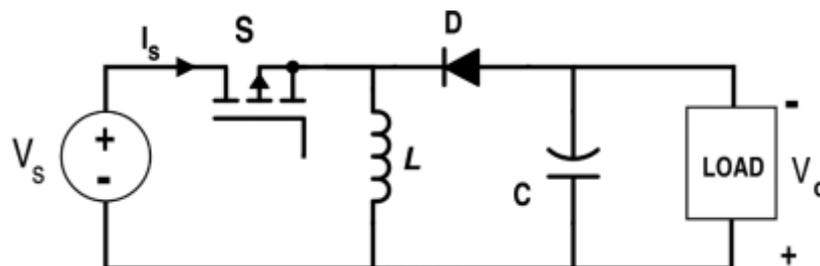
*direct converter*, dan konverter yang terisolasi dengan istilah *indirect converter*.

DC-DC *converter* yang banyak digunakan dalam pasokan beralih menjadi mode *power*, *speed drive* disesuaikan, pasokan listrik terputus dan banyak aplikasi lainnya untuk mengubah tingkat tegangan *input* untuk memenuhi kondisi operasi yang diperlukan.

Secara umum, DC to DC *converter* berfungsi untuk mengkonversikan daya listrik searah ke bentuk daya listrik searah lainnya yang terkontrol arus, atau tegangan, atau arus dan tegangan. Ada lima rangkaian dasar dari konverter DC-DC non-isolasi yaitu: *buck*, *boost*, *buck-boost*, *cuk* dan *sepic*. Pada tugas akhir penulis, rangkaian DC-DC *converter* yang digunakan adalah rangkaian *buck-boost converter*.

## 2.5. *Buck-boost Converter*

*Buck-boost converter* adalah jenis *converter* yang mampu mengubah nilai tegangan DC menjadi lebih tinggi maupun lebih rendah dari nilai awalnya, dengan mengubah nilai polaritas dari tegangan *output* terhadap tegangan *input*. Rangkaian utama *buckboost converter* tersusun atas komponen *mosfet* yang berfungsi sebagai *mosfet*, induktor (L), diode, kapasitor (C), dan *resistor* sebagai beban.

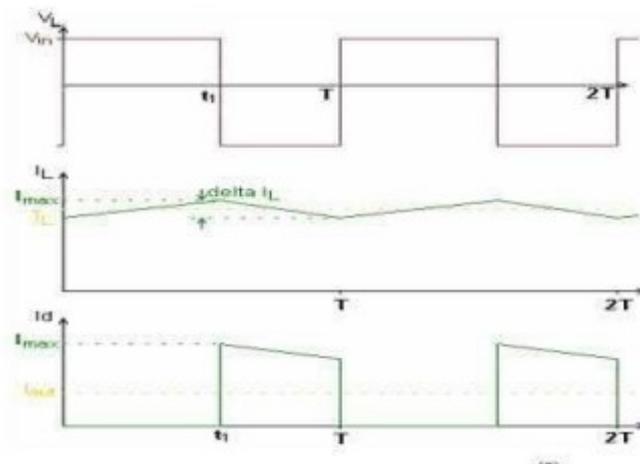


**Gambar 2. 4 *Buck-boost Converter***

Gambar 2.4 menggambarkan bahwa rangkaian *buck-boost converter* induktor (L) digunakan sebagai *filter* untuk mengurangi *ripple* yang terjadi pada arus, sedangkan untuk mengurangi *ripple* pada tegangan digunakan kapasitor (C). Sementara dioda digunakan untuk *switching* yang bekerja pada keadaan *switch open* sehingga arus tetap dapat mengalir pada induktor.

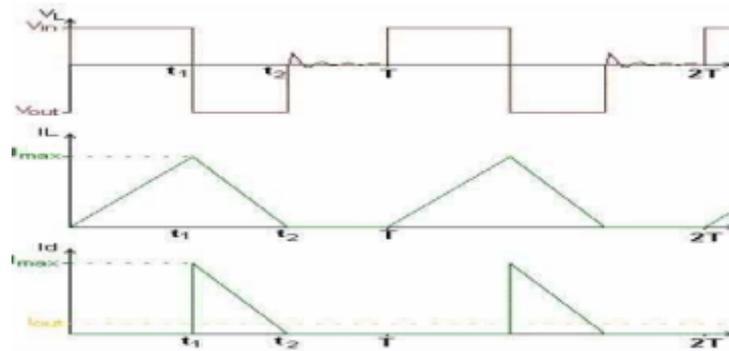
Pengoperasian *buckboost converter* dikelompokkan menjadi dua cara yaitu yang pertama adalah *Continuous Current Mode* (CCM) yang ditandai dengan arus yang mengalir secara terus-menerus pada induktor selama *switching cycle* dalam keadaan *steady state* (mantap). Selain itu, pada mode CCM tidak tergantung 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 2.5 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 2.5 Continuous Current Mode**

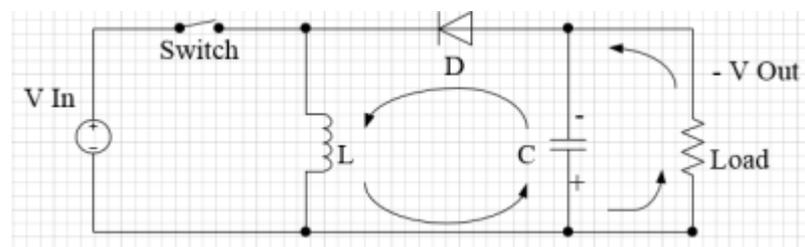
Sedangkan Gambar 2.6 merupakan *discontinuous current mode* ditandai dengan arus induktor menjadi nol pada setiap pensaklaran *cycle*-nya dan tegangan *output* tergantung pada nilai induktor dan besarnya lebar pulsa.



**Gambar 2. 6 Discontinuous Current Mode**

### 2.5.1 Pensaklaran Terbuka

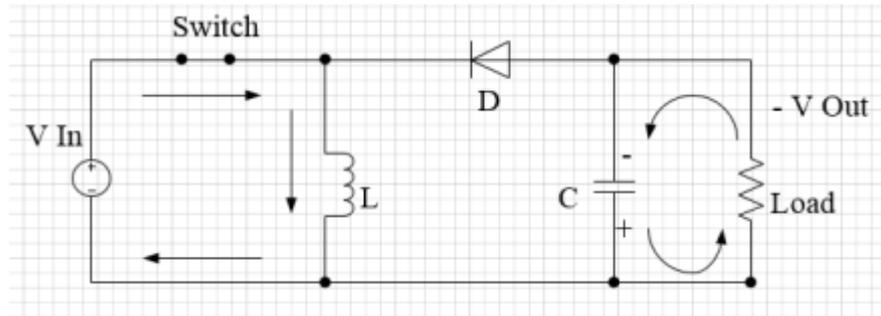
Gambar 2.7 memperlihatkan bahwa prinsip kerja *buck-boost converter* saat pensaklaran terbuka adalah induktor mendapat tegangan dari masukan dan mengakibatkan adanya arus yang melewati induktor berdasarkan waktu, dan dalam waktu yang sama kapasitor dalam kondisi membuang (*discharge*) dan menjadi sumber tegangan dan arus pada beban.



**Gambar 2. 7 Siklus Kerja Buck-boost Converter**

### 2.5.2 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. 8 Siklus Kerja *Buck-boost Converter* Pensaklaran Tertutup**

Sebuah konverter DC-DC dengan tegangan *input* yang ditunjukkan pada Gambar 2.8, besarnya 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:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D}{D-1} \quad (20)$$

Keterangan:

$V_{out}$  = Tegangan keluaran

$V_{in}$  = Tegangan *input*

$D$  = *Duty cycle*

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

$$L_{min} = \frac{V_o}{(1-D)R} - \frac{(1-D)V_o}{2L_f} \quad (21a)$$

$$L_{min} = \frac{(1-D)^2}{2xf} R \quad (21b)$$

Atau

$$L = \frac{V_{in}xD}{\Delta ILxF} R \quad (21c)$$

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:

$$\Delta V_0 = \frac{V_0 x D}{R x C x f} \quad (22a)$$

$$C = \frac{V_0 x D}{R x \Delta V_0 x f} \quad (22b)$$

Keterangan:

- $C$  = Kapasitor  
 $D$  = *Duty cycle*  
 $R$  = Nilai hambatan (ohm)  
 $F$  = Frekuensi (Hz)

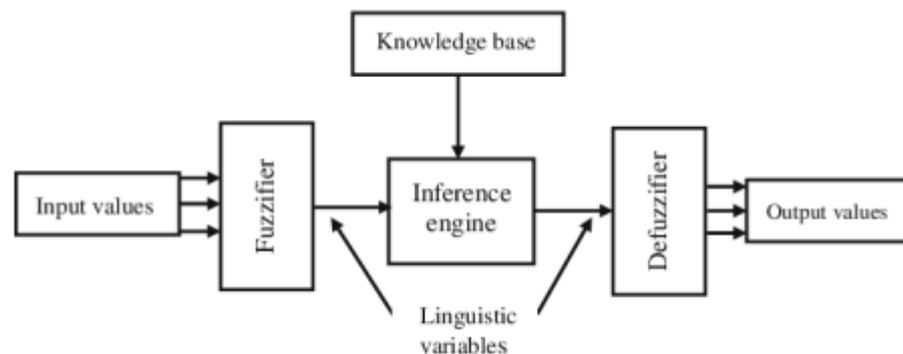
## 2.6. Kontrol Fuzzy

Kontrol fuzzy adalah suatu metode pengendalian yang menggunakan konsep logika fuzzy untuk mengatasi kerumitan dan kompleksitas dalam suatu sistem yang mana logika fuzzy merupakan cara mekanisme pengolahan atau manajemen ketidakpastian yang kemudian dikenal dengan logika fuzzy. Dalam penyajiannya, variabel-variabel yang akan digunakan harus cukup menggambarkan logika fuzzy, tetapi di lain pihak persamaan-persamaan yang dihasilkan dari variabel-variabel itu haruslah cukup sederhana sehingga komputasinya menjadi cukup mudah, kemudian menyajikannya dengan menentukan “derajat keanggotaan” (*membership function*) dari masing-masing variabelnya. Fungsi keanggotaan (*membership function*) adalah suatu kurva yang menunjukkan pemetaan titik input data ke dalam nilai keanggotaannya (sering juga disebut dengan derajat keanggotaan) yang memiliki interval antara 0 sampai 1.

Terdapat dua definisi fungsi keanggotaan untuk himpunan fuzzy yaitu numerikal dan fungsional. Numerikal adalah pernyataan tingkat dari fungsi keanggotaan dari himpunan fuzzy yang dinyatakan dengan vektor bilangan.

Fungsional didefinisikan dengan menentukan fungsi keanggotaan dari himpunan fuzzy dalam pernyataan analitik yang menyatakan tingkat keanggotaan untuk setiap elemen yang ditentukan pada himpunan universal.

*Fuzzy logic controller* merupakan suatu metode kendali yang pada dasarnya menyerupai pola pikir manusia dalam mengambil suatu keputusan secara acak atau tidak pasti (samar) yaitu nilai yang terletak antara 0 dan 1. Sistem kendali ini memiliki himpunan tersendiri yaitu himpunan fuzzy yang memiliki derajat keanggotaan tertentu. Di dalam sistem fuzzy, fungsi keanggotaan memiliki peranan yang sangat penting untuk mempresentasikan masalah dan menghasilkan keputusan yang akurat. Ada banyak jenis fungsi keanggotaan di antaranya fungsi *sigmoid*, fungsi phi, fungsi segitiga, dan fungsi trapesium. Suatu sistem berbasis aturan fuzzy yang lengkap terdiri dari tiga proses komponen utama yang dapat dilihat pada Gambar 2.9.



**Gambar 2. 9 Diagram Blog Fuzzy Logic**

*Fuzzifier* merupakan suatu proses yang dapat mengubah nilai-nilai numerik menjadi kelas keanggotaan set fuzzy. Untuk memutuskan pergantian kondisi setiap aturan sesuai dengan *input*, blok fuzzifikasi harus sesuai dengan kondisi aturan dan data *input*. Nilai dari fungsi keanggotaan fuzzy dapat diatur tergantung penggunaannya. Jumlah himpunan fuzzy meningkat ketika ada banyak kemungkinan yang terjadi seperti contoh kendali pengisian daya pada baterai.

*Inference engine* atau *fuzzy inference* merupakan proses pemetaan dari *input* dalam bentuk himpunan fuzzy ke *output* dengan menggunakan *fuzzy logic*. Proses ini dibagi menjadi dua bagian yaitu *data*

*base* dan *rule base*. *Data base* berisi parameter-parameter fuzzy dan *rule base* berisi aturan-aturan *fuzzy logic*. Untuk satu aturan *fuzzy logic* ditulis IF *antecedent* THEN *consequent*.

*Defuzzifier* atau defuzzifikasi merupakan sebuah bilangan tunggal, yaitu harga variabel masukan dan keluarannya adalah derajat keanggotaan dalam suatu set fuzzy dalam *antecedent*, maka masukan dan keluaran defuzzifikasi adalah sebuah set (dalam hal ini set fuzzy hasil agregasi) dan keluarannya adalah sebuah tunggal untuk diisikan ke sebuah variabel keluaran FIS. Ada beberapa jenis versi bilangan tunggal yang dimaksud tersebut. Mungkin yang paling populer adalah *center of area* atau *centroid* dibawah kurva dari set fuzzy hasil agregasi. Transformasi yang menyatakan kembali keluaran dari dominan fuzzy dalam dominan *crisp*. Keluaran fuzzy diperoleh melalui eksekusi dari beberapa fungsi keanggotaan fuzzy.

## 2.7. Baterai

Baterai atau akumulator adalah sebuah sel listrik di mana di dalamnya berlangsung proses elektrokimia yang reversibel (dapat berbalikan) dengan efisiensinya yang tinggi. Yang dimaksud dengan proses elektrokimia reversibel, adalah di dalam baterai dapat berlangsung proses perubahan kimia menjadi tenaga listrik (proses pengosongan), dan sebaliknya dari tenaga listrik menjadi tenaga kimia, pengisian kembali dengan cara regenerasi dari elektroda-elektroda yang dipakai, yaitu dengan melewati arus listrik dalam arah (polaritas) yang berlawanan di dalam sel. Jenis sel baterai ini disebut juga *storage battery*, adalah suatu baterai yang dapat digunakan berulang kali pada keadaan sumber listrik arus bolak-balik (AC) terganggu.

Tiap sel baterai ini terdiri dari dua macam elektroda yang berlainan, yaitu elektroda positif dan elektroda negatif yang dicelupkan dalam suatu larutan kimia. Menurut pemakaian baterai dapat digolongkan ke dalam 2 jenis yaitu *stationary* (tetap) dan *portable* (dapat dipindah-pindah).

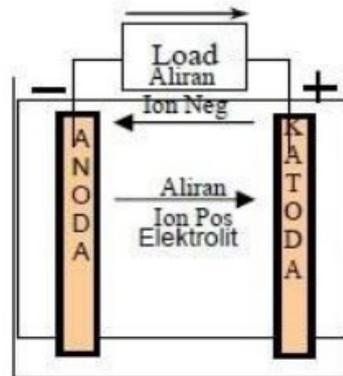
### 2.7.1. Jenis Baterai

Ada 2 macam baterai aki yang dapat digunakan di pusat pembangkit listrik yaitu;

- 1) Baterai asam dengan kutub timah hitam
- 2) Baterai basa yang menggunakan nikel *cadmium* (NiCd) sebagai kutub

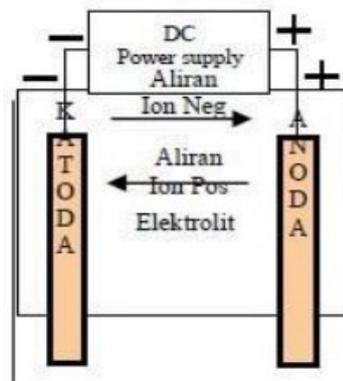
### 2.7.2. Prinsip Kerja Baterai

- 1) Proses *discharge* pada sel berlangsung menurut skema pada Gambar 2.10, bila sel 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.



**Gambar 2. 10 Proses Pengosongan Baterai (*Discharge*)**

- 2) Pada proses pengisian menurut skema Gambar 2.11 adalah bila sel dihubungkan dengan *power supply* maka elektroda positif menjadi anoda dan elektroda negatif menjadi katoda dan proses kimia yang terjadi adalah sebagai berikut.



**Gambar 2. 11 Proses Pengisian (*Charge*).**

### 2.7.3. Kapasitas Baterai

Suatu baterai adalah menyatakan besar arus listrik (*ampere*) baterai yang disuplai/dialirkan ke suatu beban dalam jangka waktu (jam) tertentu, untuk memberikan tegangan tertentu. Kapasitas baterai (Ah) dinyatakan sebagai berikut:

$$C = Ixt \quad (23)$$

Keterangan:

$C$  = Kapasitas baterai (Ah)

$I$  = Besar arus yang mengalir (A)

$t$  = Waktu pemakaian (Jam)

Serta untuk mendapatkan waktu dapat menggunakan rumus sebagai berikut:

$$t = \frac{VxC_hxNx C_p}{P} \quad (24)$$

Keterangan:

$V$  = Tegangan (V)

$C_h$  = Kapasitas Baterai (Ah)

$N$  = Banyak Baterai

$C_p$  = Persentase Baterai (%)

$P$  = Beban (W)

### III. METODE PENELITIAN

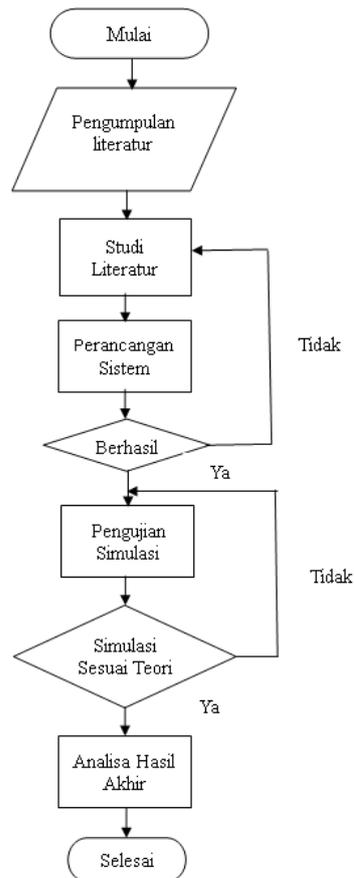
Bab ini membahas tentang metode penelitian yang meliputi tahapan penelitian, konfigurasi sistem *rectifier*, dan perancangan sistem *rectifier* 3 fasa.

#### 3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian tesis ini dimulai pada bulan September 2023 sampai bulan April 2024 yang berlokasi di UPK Sebalang. Penelitian ini dilakukan dengan simulasi menggunakan *software* MATLAB.

#### 3.2. Diagram Alir Penelitian

Tahapan dari penelitian ini mulai dari studi literatur, perancangan sistem, pengujian sistem, pengambilan data, dan analisis data yang dapat dilihat pada diagram alir penelitian pada Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian

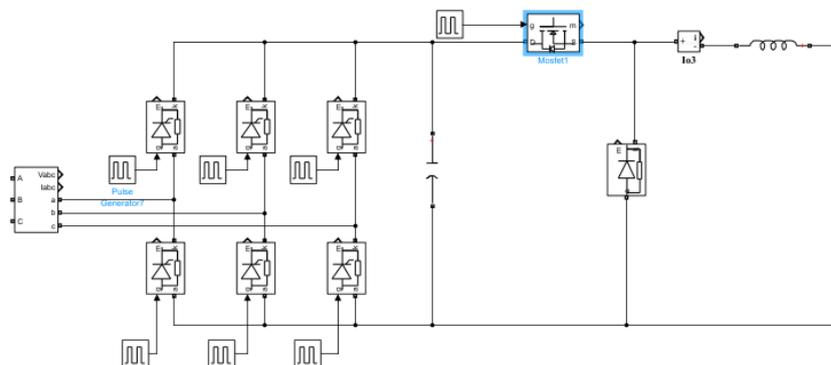
### 3.3. Perancangan Sistem

#### 3.3.1 Konfigurasi Sistem *Rectifier* pada PLTG UPK Sebalang

Konfigurasi sistem pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.2 terdapat 6 komponen utama yang digunakan yaitu *module rectifier*, transformer, baterai, motor pompa minyak, motor pompa bahan bakar, dan motor *starter*. Modul *rectifier* terhubung ke *battery bank* dengan kapasitas 125V 200Ah. Baterai tersebut digunakan untuk menyuplai daya ke 3 motor yang berperan dalam mengaktifkan generator utama.



Gambar 3. 2 Konfigurasi Sistem *Rectifier* pada PLTG UPK Sebalang



Gambar 3. 3 Pemodelan Sistem *Rectifier* PLTG UPK Sebalang pada *Simulink* MATLAB

Gambar 3.3 menampilkan model sistem *rectifier* tiga fasa pada *software* MATLAB. Model ini akan merepresentasikan modul *rectifier* yang ada pada PLTG UPK Sebalang, seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.2. Tegangan *grid* 380V disuplai oleh EDG pada PLTU UPK Sebalang. Eksperimen dilakukan berdasarkan parameter yang tersaji pada Tabel 3.1.

**Tabel 3. 1 Parameter yang Digunakan untuk Eksperimen**

Parameter	Nilai
Tegangan <i>grid</i> (RMS): $V_{abc}$ /V	380
Frekuensi: $f$ /Hz	50
Filter induktor: $L_f$ /mH	0.5
Filter kapasitor: $C_f$ /mF	0.1
Kapasitor DC <i>bus</i> : $C$ /mF	5.6
Tegangan baterai: $V_b$ /V	125
Kapasitas baterai: $C_A$ /Ah	200
Beban motor: $I_l$ /A	150.25
Frekuensi <i>switching</i> : $f_s$ /kHz	10

### 3.3.2 Perancangan Vektor $dq0$

Struktur vektor  $dq$  diilustrasikan pada Gambar 3.4, yang memiliki 2 kontroler PI untuk tiap-tiap vektor  $d$  dan  $q$ . Nilai vektor  $d$  dan  $q$  diperoleh melalui transformasi tegangan dan arus. Blok utama terdiri atas kontroler tegangan, arus, dan Phase Locked Loop (PLL).

Arus referensi dilambangkan oleh  $i_d^*$  dan  $i_q^*$ , yang berperan sebagai referensi untuk kontroler arus. Arus pada vektor  $d$   $i_d^*$  merupakan keluaran dari kontroler tegangan dan  $i_q^*$  merupakan arus pada vektor  $q$  yang bernilai 0. Vektor arus  $i_{dq}^*$  merupakan referensi untuk kontroler arus  $dq$ , yang menghasilkan vektor tegangan  $v'_{dq}$ . Vektor tegangan  $v'_{dq}$  dikonversi ke tegangan referensi tiga fasa  $v_{abc}^*$  dengan menggunakan transformasi *inverse park*. Tegangan referensi tersebut digunakan untuk menghasilkan sinyal PWM yang digunakan untuk mengendalikan saklar IGBT.



Vektor  $dq$  merupakan kombinasi dari vektor  $d$  dan  $q$  pada sistem koordinat  $dq0$ . Vektor tegangan  $d$  merepresentasikan komponen tegangan DC yang ekuivalen dengan tegangan tiga fasa, sementara komponen tegangan  $q$  bernilai 0 [21]. O'Rourke [22] menelaah transformasi Clarke dan Park yang memiliki parameter seperti  $abc$ ,  $\alpha\beta 0$ , dan  $dq0$ . Persamaan (27), (28), dan (29) menyajikan transformasi tegangan dari  $abc$  ke  $dq0$ .

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta t) & \sin(\theta t) & 0 \\ -\sin(\theta t) & \cos(\theta t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

Transformasi Clarke mengubah  $V_{abc1}$  menjadi  $V_{\alpha\beta}$  seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan (27) [23]. Selanjutnya, Persamaan (29) menunjukkan transformasi dari  $V_{\alpha\beta}$  ke  $V_{dq0}$ . Pada dasarnya,  $dq0$  dapat ditransformasikan langsung dari  $V_{abc}$  dengan menggunakan transformasi Park. Namun, dalam hal ini  $V_{\alpha\beta}$  diperlukan sebagai tegangan referensi.

#### b. Transformasi Arus

Arus  $I_{abc}$  yang merepresentasikan  $I_a$ ,  $I_b$ , dan  $I_c$  adalah arus yang mengalir melalui komponen  $RL$ . Untuk mempermudah perhitungan,  $I_{abc}$  kemudian diubah ke  $I_{dq}$  menggunakan transformasi Park seperti yang ditunjukkan dalam persamaan (30).

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta t) & \cos\left(\theta t - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta t) & -\sin\left(\theta t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$V_{d1} = -\left(RI_d + L \frac{dI_d}{dt}\right) + \omega_s LI_q + V_d \quad (31)$$

$$V_{q1} = -\left(RI_q + L \frac{dI_q}{dt}\right) - \omega_s LI_d \quad (32)$$

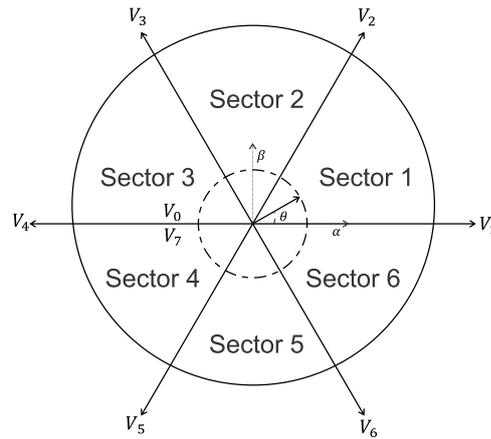
$$I_{dq} = \frac{V_{dq1} - V_{dq}}{jX_L} \quad (33)$$

$$I_{dq} = \frac{V_{d1} - V_d}{jX_L} + \frac{V_{q1}}{X_L} \quad (34)$$

Seperti yang dijabarkan sebelumnya bahwa  $I_{dq}$  dalam persamaan (30) adalah arus yang mengalir di sepanjang grid, dan  $V_{dq1} = V_{d1} + V_{q1}$  seperti yang diturunkan dalam persamaan (31) dan (32) mewakili tegangan keluaran konverter dalam vektor dq0. Sudut putar dan kecepatan sudut dilambangkan oleh  $\theta$  dan  $\omega$  secara berurutan. Persamaan (34) mendefinisikan  $V_d$  sebagai komponen *real* dan  $V_q$  sebagai komponen imajiner dari tegangan, dengan  $X_L$  sebagai reaktansi grid yang dinyatakan sebagai  $j\omega_s L$ . Dalam hal ini,  $\omega_s$  adalah frekuensi *synchronous* dan  $L$  adalah induktansi.

### 3.3.3 Perancangan SVPWM

Sistem yang diusulkan tidak berfokus pada modifikasi SVPWM, sehingga pengaturan konvensional digunakan seperti yang tertera dalam Tabel 3.2. Gambar 3.6 menggambarkan masing-masing sektor yang memiliki area kerja sebesar  $60^\circ$ .



**Gambar 3. 6 Diagram Voltage Space Vector**

Pada kondisi ini,  $V_0$  dan  $V_7$  adalah vektor nol, sedangkan  $V_1$  hingga  $V_6$  adalah vektor ruang. Sudut  $\theta$  berputar dari 0 hingga  $360^\circ$  berlawanan arah jarum jam. Dalam hal ini,  $\theta$  berputar antara 0 hingga  $60^\circ$  di antara 2 sumbu untuk tiap-tiap sektor. Setiap sektor terdiri dari 2 vektor ruang yang mewakili konfigurasi saklar dari sebuah IGBT.

**Tabel 3. 2 Tabel Kebenaran Vektor SVPWM**

Vektor	Logika Switching	Transistor ON
$V_0$	000	$S_2, S_4, S_6$
$V_1$	100	$S_1, S_4, S_6$
$V_2$	110	$S_1, S_3, S_6$
$V_3$	010	$S_2, S_3, S_6$
$V_4$	011	$S_2, S_3, S_5$
$V_5$	001	$S_2, S_4, S_5$
$V_6$	101	$S_1, S_4, S_5$
$V_7$	111	$S_1, S_3, S_5$

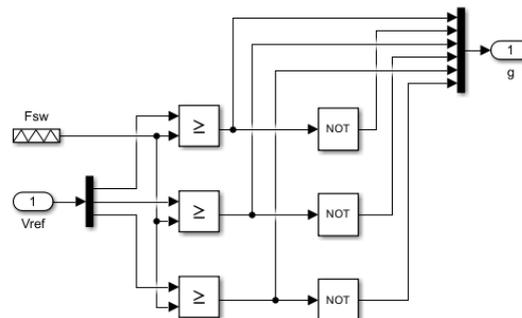
**Tabel 3. 3 Urutan Switching Berdasarkan Sektor**

Sektor	Urutan Switching
1	$V_0, V_1, V_2, V_7, V_2, V_1, V_0$
2	$V_0, V_3, V_2, V_7, V_2, V_3, V_0$
3	$V_0, V_3, V_4, V_7, V_4, V_3, V_0$
4	$V_0, V_5, V_4, V_7, V_4, V_5, V_0$
5	$V_0, V_5, V_6, V_7, V_6, V_5, V_0$
6	$V_0, V_1, V_6, V_7, V_6, V_1, V_0$

Saklar IGBT direpresentasikan oleh  $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$ , dan  $S_6$  yang mana setiap saklar diimplementasikan dalam topologi *full bridge*. Topologi tersebut

terdiri atas saklar atas dan saklar bawah. Saklar atas adalah saklar utama yang dilambangkan dengan angka ganjil seperti  $S_1, S_3,$  dan  $S_5$  sedangkan saklar bawah adalah inversi biner dari saklar atas yang dilambangkan dengan  $S_2, S_4,$  dan  $S_6$ . Pemodelan pensaklaran SVPWM tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.7.

Tabel 3.3 menunjukkan urutan pensaklaran untuk setiap sektor. Setiap urutan diawali dengan vektor *zero* diikuti oleh vektor *non-zero*. Dengan asumsi bahwa setiap sektor mewakili siklus  $60^\circ$  yang memiliki dua bagian, bagian kedua dari siklus merupakan invers dari bagian pertama. Kombinasi dari keenam sektor ini dalam  $360^\circ$  menghasilkan sinyal PWM untuk operasi pensaklaran.



**Gambar 3. 7 Pemodelan SVPWM**

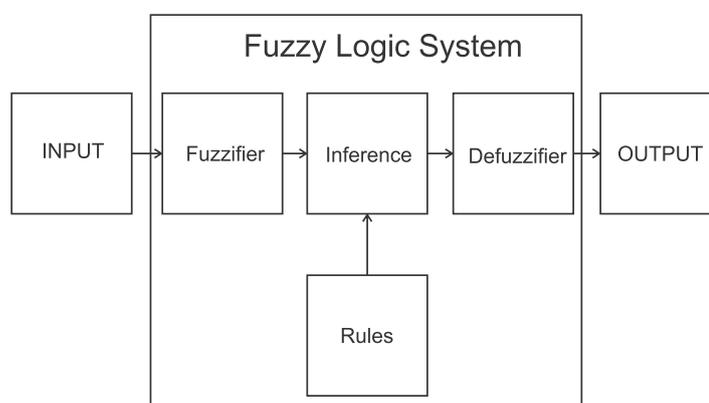
### 3.3.4 Perancangan Kontrol Fuzzy

Pada tahap ini perancangan *fast charging* baterai menggunakan *rectifier* tiga fasa kontrol daya langsung menggunakan metode *fuzzy logic* pada pengendalian proses pengisian disimulasikan menggunakan *software* MATLAB *Simulink*. Perancangan ini dibuat berdasarkan acuan dasar yang didapatkan dari tahapan studi literatur. Tahapan yang dilakukan pada perancangan simulasi ini yaitu, membuat desain sistem kendali *fuzzy logic*, menggabungkan sistem kendali *fuzzy logic* dengan sistem *fast charging*, dan membuat sistem rangkaian PWM. Perancangan ini disimulasikan menggunakan *software* MATLAB *Simulink*.

*Fuzzy logic* adalah salah satu sistem kendali yang paling sering digunakan dalam bidang kendali otomatis maupun bidang industri. Sistem

kendali fuzzy adalah sistem yang relatif mudah dan fleksibel, sistem ini dirancang tidak banyak melibatkan model matematis yang sulit.

*Fuzzy logic* merupakan sistem kendali yang tepat untuk memetakan suatu ruang masukan ke dalam ruang keluaran. Penggunaan *fuzzy logic* dapat mengatasi sistem yang rumit untuk dipecahkan. Pada sistem kendali tradisional umumnya dirancang untuk mengendalikan keluaran tunggal yang berasal dari beberapa masukan yang tidak saling berhubungan, dan jika terdapat masukan yang baru akan mempersulit proses kendali dan membutuhkan proses perhitungan kembali dari semua fungsi. Sedangkan pada sistem kendali *fuzzy logic*, sistem akan bekerja berdasarkan prinsip *fuzzy logic* seperti pada Gambar 3.8.

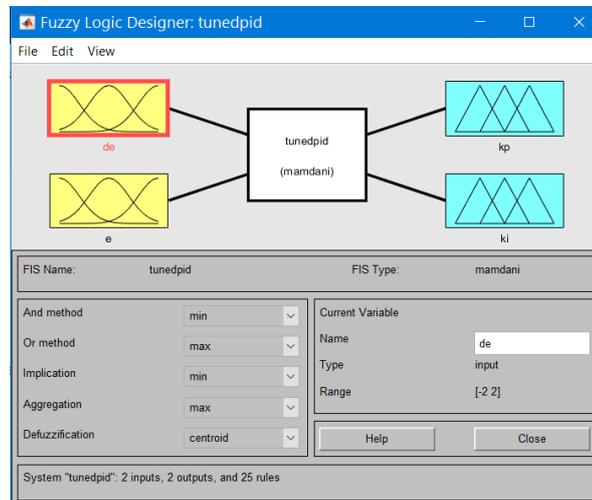


**Gambar 3. 8 Struktur *fuzzy logic***

Fuzifikasi merupakan proses mengubah himpunan *crisp* menjadi himpunan fuzzy atau proses pengubahan *variable numeric* atau bilangan nyata menjadi *variable linguistic* atau bilangan fuzzy, sedangkan defuzifikasi merupakan kebalikan dari fuzifikasi yaitu proses reduksi himpunan fuzzy ke himpunan *crisp*. Blok inferensi merupakan proses merumuskan pemetaan dari masukan ke keluaran menggunakan logika fuzzy.

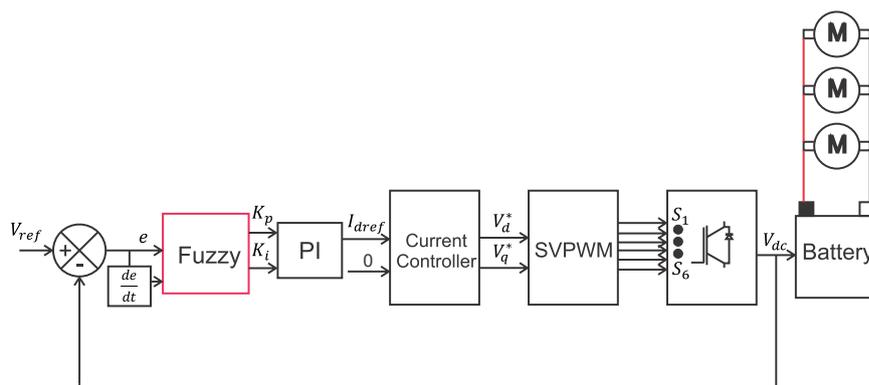
Dengan menggunakan sistem kendali *fuzzy logic*, dapat mengatur sistem *switching* pada *rectifier* tiga fasa dan mengontrol aliaran arus serta tegangan pada beban DC. Algoritma *fuzzy logic* akan menentukan nilai  $K_p$  dan  $K_i$ . Tampilan sistem kendali *fuzzy logic* pada MATLAB yang dapat dilihat pada Gambar 3.9 terlihat bahwa terdapat komponen masukan, metode untuk merepresentasikan hasil logika *fuzzy* yang dapat dipilih diantaranya metode

Tsukamoto, Sugeno, dan Mamdani, kemudian terakhir terdapat komponen keluaran.

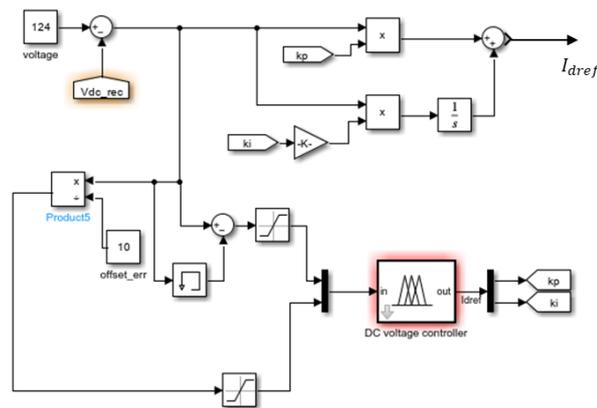


**Gambar 3. 9 Tampilan Sistem Kendali *Fuzzy Logic***

Gambar 3.10 mengilustrasikan diagram blok dari SVPWM *rectifier*, dengan metode Fuzzy yang diusulkan ditandai dengan garis merah. Pendekatan Fuzzy yang diusulkan menyesuaikan parameter PI dari pengendali. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan respon transien, khususnya terhadap perubahan mendadak dan fluktuatif pada beban *rectifier*. Dalam hal ini, tegangan keluaran *rectifier* berbanding lurus dengan arus beban. Dengan demikian,  $V_{dc}$  berubah secara linier terhadap perubahan SoC baterai.



**Gambar 3. 10 Blok Diagram Metode *Tuning PI* dengan *FLC***



**Gambar 3. 11** Pemodelan FLC

Gambar 3.11 menunjukkan pemodelan FLC pada *software* MATLAB. FLC yang diusulkan memiliki 2 *input* dan 2 *output*. Deviasi, laju perubahan deviasi, penguatan proporsional, dan penguatan integral dilambangkan oleh  $e$ ,  $\Delta e$ ,  $K_p$ , dan  $K_i$  secara berurutan. Mengingat bahwa simulasi dilakukan dalam format diskrit, *variable*  $e$  dan  $\Delta e$  dijabarkan pada persamaan (35).

$$\begin{cases} e(k) = V_{ref} - V_{dc} \\ \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \end{cases} \quad (35)$$

Respon penyearah terhadap kesalahan diamati dengan menyesuaikan penguatan proporsional dan integral melalui eksperimen. Nilai inisial tersebut digunakan sebagai referensi dalam menentukan Fuzzy *rules*. Setelah nilai referensi ditemukan, nilai PI diperoleh melalui aturan berikut:

- Ketika  $e(k) > 0$  dan  $\Delta e(k) > 0$ ,  $V_{dc}$  lebih kecil dari  $V_{ref}$  karena SoC rendah. Pada titik ini, penguatan PI harus tinggi untuk mengatasi *error*.
- Ketika  $e(k) > 0$  dan  $\Delta e(k) < 0$ ,  $V_{dc}$  hampir mencapai  $V_{ref}$ . Untuk mencegah *overshoot* dan osilasi, penguatan PI dikurangi secara bertahap.
- Ketika  $e(k) < 0$  dan  $\Delta e(k) > 0$ , terjadi tegangan transien. Oleh karena itu, penguatan PI harus kecil untuk mencegah osilasi lebih lanjut.
- Ketika  $e(k) == 0$  dan  $\Delta e(k) == 0$ ,  $V_{dc}$  bernilai sama dengan  $V_{ref}$ . Maka, penguatan PI diatur rendah.

**Tabel 3. 4 Fungsi Keanggotaan Fuzzy**

Fungsi Keanggotaan	Variabel	Nilai
NB	$e/\Delta e$	[-2 -1]
NS	$e/\Delta e$	[-2 0]
Z	$e/\Delta e$	[-1 1]
PS	$e/\Delta e$	[0 2]
PB	$e/\Delta e$	[1 2]
Z	$Kp/Ki$	[0 0.4]
ZS	$Kp/Ki$	[0 1]
P	$Kp/Ki$	[0.5 1.5]
PS	$Kp/Ki$	[1 2]
PB	$Kp/Ki$	[1.5 2]

Tabel 3.4 menunjukkan fungsi keanggotaan Fuzzy untuk *variable input* ( $e/\Delta e$ ) dan *variable output* ( $Kp/Ki$ ). Pemilihan nilai pada fungsi keanggotaan dilakukan berdasarkan hasil eksperimen di 4 titik SoC yaitu, 10%; 40%; 70%; dan 100%. Kemudian, diterapkan interpolasi terhadap 4 titik SoC tersebut. Hal ini bertujuan untuk mendapatkan prediksi nilai fungsi keanggotaan saat SoC berada pada rentang 0-100%.

**Tabel 3. 5 Aturan Fuzzy**

$e/\Delta e$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	Z	Z	Z	Z	Z
NS	ZS	ZS	Z	ZS	ZS
Z	P	P	Z	P	P
PB	PB	PB	PS	PB	PB
PS	PS	PS	P	PS	PS

Tabel 3.5 menyajikan aturan Fuzzy yang digunakan untuk proses Fuzifikasi. Variabel  $e$  dan  $\Delta e$  merupakan variabel *input* yang memiliki 5 fungsi keanggotaan yang meliputi, *Negative Big* (NB); *Negative Small* (NS); *Zero* (Z); *Positive Small* (PS); dan *Positive Big* (PB). Variabel *output* terdiri dari  $K_p$  dan  $K_i$  dengan 5 fungsi keanggotaan yaitu, *Zero* (Z); *Zero Small* (ZS); *Positive* (P); *Positive Small* (PS); dan *Positive Big* (PB). *Output* Fuzzy didefinisikan dalam rentang [0,2] yang dengan resolusi 0.2. Semesta *input* berada di antara [-2,2] dengan resolusi 0.5.

## V. KESIMPULAN

### 5.1. Kesimpulan

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

1. Sistem penyearah yang diusulkan, yang memanfaatkan metode kontrol Fuzzy untuk penyesuaian otomatis parameter PI, telah terbukti efektif dalam mencapai stabilisasi tegangan penyearah. Dalam berbagai eksperimen, sistem yang diusulkan berhasil mempertahankan tegangan penyearah pada 125V dengan penurunan rata-rata hanya sebesar 0,72%.
2. Sistem yang diusulkan mampu meminimalkan *Total Harmonic Distortion* (THD) dari arus *input* dan mengurangi waktu settling sebesar 0,61 detik, yang berkontribusi pada perbaikan respon transien.
3. Hasil validasi menunjukkan bahwa metode Fuzzy yang diusulkan dapat menggantikan modul penyearah yang ada di sistem pembangkit listrik gas UPK Sebalang. Sistem yang diusulkan mampu menurunkan tegangan *drop* sebesar 2,48% serta mampu memaksimalkan kecepatan pengisian hingga 3,5 kali lipat.
4. Pada saat kondisi pengisian 100%, THD arus mencapai nilai 13%. Hal ini disebabkan adanya *leakage current* saat proses pensaklaran. Kelemahan ini dapat diatasi dengan mengintegrasikan metode *zero-voltage switching*.

### 5.2. Saran

Adapun saran untuk penelitian ini kedepannya dapat dikembangkan untuk dilakukan penelitian lebih lanjut dengan memvariasikan sistem kendali PID atau membandingkan sistem kendali *rectifier* yang ada.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. H. Alhelou, M. E. Hamedani-Golshan, T. C. Njenda, and P. Siano, "A survey on power system blackout and cascading events: Research motivations and challenges," *Energies*, vol. 12, no. 4, pp. 1–28, 2019, doi: 10.3390/en12040682.
- [2] 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.
- [3] P. Y. Du, J. Burnett, and S. M. Chan, "Reliability of standby generators in Hong Kong buildings," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 6, pp. 1592–1595, 2003, doi: 10.1109/TIA.2003.818978.
- [4] A. D'Orazio, S. Elia, E. Santini, and M. Tobia, "Succor system and failure indication for the starter batteries of emergency gensets," *Period. Polytech. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 64, no. 4, pp. 412–421, 2020, doi: 10.3311/PPee.15274.
- [5] B. Gou, Y. Xu, and X. Feng, "State-of-Health Estimation and Remaining-Useful-Life Prediction for Lithium-Ion Battery Using a Hybrid Data-Driven Method," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 10, pp. 10854–10867, 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.3014932.
- [6] W. Taha, A. R. Beig, and I. Boiko, "Quasi optimum PI controller tuning rules for a grid-connected three phase AC to DC PWM rectifier," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 96, no. September 2017, pp. 74–85, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.09.027.
- [7] H. Acikgoz, R. Coteli, B. Dandil, and F. Ata, "Experimental evaluation of dynamic performance of three-phase AC-DC PWM rectifier with PD-type-2 fuzzy neural network controller," *IET Power Electron.*, vol. 12, no. 4, pp. 693–702, 2019, doi: 10.1049/iet-pel.2018.5006.
- [8] M. Pourmahdi-torghabe, "Fuzzy-based Model Predictive Control for Three-Phase Rectifier," pp. 4–6, 2020.
- [9] H. Acikgoz, A. Kumar, H. Beiranvand, and M. Sekkeli, "Hardware implementation of type-2 neuro-fuzzy controller-based direct power control for three-phase active front-end rectifiers," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 29, no. 10, pp. 1–14, 2019, doi: 10.1002/2050-7038.12066.
- [10] A. Mansouri, A. El Magri, R. Lajouad, and F. Giri, "Control design and multimode power management of WECS connected to HVDC transmission line through a Vienna rectifier," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 155, no. PB, p. 109563, 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109563.
- [11] A. Ali, J. Chuanwen, Z. Yan, S. Habib, and M. M. Khan, "An efficient soft-switched vienna rectifier topology for EV battery chargers," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 5059–5073, 2021, doi: 10.1016/j.egy.2021.08.105.
- [12] H. Teng, Y. Zhong, and H. Bai, "SiC + Si three-phase 48 V electric vehicle battery charger employing current-SVPWM controlled SWISS AC/DC and variable-DC-bus DC/DC converters," *IET Electr. Syst. Transp.*, vol. 8, no. 4, pp. 231–239, 2018, doi: 10.1049/iet-est.2017.0083.
- [13] M. Ali, Y. Haitao, Z. Che, and Z. Din, "Control of Free Piston Stirling Linear Generator system connected with dc/dc converter for energy storage

- applications based on SVPWM Rectification Method,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 15421–15435, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.11.095.
- [14] T. Song, P. Wang, Y. Zhang, F. Gao, Y. Tang, and S. Pholboon, “Suppression Method of Current Harmonic for Three-Phase PWM Rectifier in EV Charging System,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 69, no. 9, pp. 9634–9642, 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.3005173.
- [15] X. Ge, F. W. Ahmed, A. Rezvani, N. Aljojo, S. Samad, and L. K. Foong, “Implementation of a novel hybrid BAT-Fuzzy controller based MPPT for grid-connected PV-battery system,” *Control Eng. Pract.*, vol. 98, no. September 2019, p. 104380, 2020, doi: 10.1016/j.conengprac.2020.104380.
- [16] T. Wang, C. Lin, K. Zheng, W. Zhao, and X. Wang, “Research on Grid-Connected Control Strategy of Photovoltaic (PV) Energy Storage Based on Constant Power Operation,” *Energies*, vol. 16, no. 24, 2023, doi: 10.3390/en16248056.
- [17] S. Dadfar, K. Wakil, M. Khaksar, A. Rezvani, M. R. Miveh, and M. Gandomkar, “Enhanced control strategies for a hybrid battery/photovoltaic system using FGS-PID in grid-connected mode,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 44, no. 29, pp. 14642–14660, 2019, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.04.174.
- [18] S. Li, T. A. Haskew, and L. Xu, “Control of HVdc light system using conventional and direct current vector control approaches,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 12, pp. 3106–3118, 2010, doi: 10.1109/TPEL.2010.2087363.
- [19] S. Li, T. A. Haskew, Y. K. Hong, and L. Xu, “Direct-current vector control of three-phase grid-connected rectifier-inverter,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 2, pp. 357–366, 2011, doi: 10.1016/j.epsr.2010.09.011.
- [20] M. Z. Hossain, N. A. Rahim, and J. a/l Selvaraj, “Recent progress and development on power DC-DC converter topology, control, design and applications: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, no. January 2017, pp. 205–230, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.07.017.
- [21] C. P. Iván Andrade, Rubén Pena, Ramón Blasco-Gimenez, Javier Riedemann, Werner Jara, “An Active/Reactive Power Control Strategy for Renewable,” *Electronics*, vol. 10, pp. 1–19, 2021.
- [22] C. J. O’Rourke, M. M. Qasim, M. R. Overlin, and J. L. Kirtley, “A Geometric Interpretation of Reference Frames and Transformations: Dq0, Clarke, and Park,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 34, no. 4, pp. 2070–2083, 2019, doi: 10.1109/TEC.2019.2941175.
- [23] L. Zhan, Y. Liu, and Y. Liu, “A Clarke transformation-based DFT phasor and frequency algorithm for wide frequency range,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 1, pp. 67–77, 2018, doi: 10.1109/TSG.2016.2544947.