

Desain *Charging* Baterai dengan Metode PI pada UPS *Offline* menggunakan STS untuk Menjaga Kontinuitas Suplai Daya

Design Of Battery Charging With PI Method In Offline UPS Using STS To Maintain Power Supply Continuity

Ganindra Anggara Putra Akhdan^{1*}, Hendik Eko Hadi Suharyanto², Luki Septya Mahendra³,
Lucky Pradigta Setya Raharja⁴, Yahya Chusna Arif⁵

^{1,2,3,4,5}Teknik Elektro Industri, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya
^{1,2,3,4,5}Jalan Raya ITS, Sukolilo, Surabaya, 60111

ganindra26@gmail.com^{1*}, hendik@pens.ac.id², lukiseptya@pens.ac.id³, lucky@pens.ac.id⁴,
yahyaca@pens.ac.id⁵

Abstrak – Energi listrik dari PLN bisa saja padam atau mengalami gangguan tegangan jatuh dan lebih (*undervoltage* dan *overvoltage*). Oleh karena itu, disusun desain ini untuk membuat simulasi UPS sebagai back-up untuk mencatu beban sensitif apabila terjadi pemadaman dan gangguan sistem. UPS ini dirancang menggunakan sistem charging Baterai 12 V, 18 Ah untuk menyuplai inverter dengan metode arus konstan dan tegangan konstan (CC & CV). Beban akan switch ke inverter apabila terjadi pemadaman atau gangguan tegangan. Sistem yang difokuskan adalah skema STS (*Static Transfer Switch*) menggunakan komponen semikonduktor TRIAC yang dikontrol menggunakan mikrokontroler. Logika *If-Else* digunakan untuk mengontrol penyulutan TRIAC sedangkan logika PI digunakan untuk mengatur sinyal PWM agar tegangan charging dapat stabil 3,6 A saat di kondisi CC dan 13.8 V saat kondisi CV. Hasil menunjukkan program PI dapat mengatur tegangan dan arus secara konstan demi menjaga umur baterai dan STS yang dapat melakukan switching saat terjadi gangguan tegangan.

Kata Kunci: *Static Transfer Switch, UPS, charging, PI, tegangan jatuh, tegangan lebih.*

Abstract – Power from the grid can occasionally fail or experience voltage drops and surges (*undervoltage* and *overvoltage*). This design simulates a UPS as a backup to supply sensitive loads during outages and system disturbances. The UPS uses a 12V, 18Ah battery charging system to supply an inverter with Constant Current and Constant Voltage (CC & CV). The load switches to the inverter during outages or voltage issues. The focus is on a Static Transfer Switch (STS) using TRIAC semiconductors controlled by a microcontroller. *If-Else* logic controls the TRIAC firing, while PI logic regulates the PWM signal to stabilize charging at 3.6 A in CC mode and 13.8 V in CV mode. Results show the PI program effectively maintains constant voltage and current to preserve battery life, and the STS successfully switches during voltage disturbances.

Keywords: *Static Transfer Switch, UPS, charging, PI, undervoltage, overvoltage.*

1. Pendahuluan

Masifnya perkembangan dunia kelistrikan telah meningkatkan kebutuhan akan listrik di segala bidang kehidupan. Namun energi listrik yang disuplai PLN ke konsumen tidak selalu lancar dan sewaktu-waktu bisa terjadi pemadaman listrik karena perbaikan, pekerjaan pemeliharaan, kelebihan beban, dan lain-lain. Misal saja komputer yang berperan sebagai media

pengolahan informasi dan data dalam suatu perusahaan. Kegagalan yang terjadi secara tiba-tiba dapat mengakibatkan kerugian bagi konsumen, antara lain kehilangan data, hilangnya produktivitas, dan kerusakan perangkat keras. Sebuah sistem UPS (*Uninterruptible Power Supply*) dapat menjadi salah satu solusi untuk mengatasi permasalahan ini. Sistem UPS merupakan suatu perangkat yang mampu menyediakan cadangan listrik ketika suatu peralatan elektronik kehilangan energi dari sumber utamanya [1]. UPS dihubungkan dengan beban prioritas sehingga ketika catu daya dari jaringan utama padam, beban-beban prioritas ini tetap mendapatkan catu daya dari UPS [2].

UPS sebagai alat yang siap pakai membutuhkan pertimbangan pentingnya akurasi dalam perencanaan, perhitungan, dan desain sebelum pembuatan *hardware* dalam industri elektronik. Perencanaan berbasis simulasi memainkan peran penting dalam mengurangi kesalahan dan biaya, serta meningkatkan efisiensi sebelum prototipe alat dibuat. Aplikasi PSIM menyediakan berbagai fitur yang lengkap untuk menguji berbagai scenario desain sehingga memungkinkan identifikasi dini atas potensi masalah dan perbaikan yang mungkin diperlukan sebelum memasuki tahap realisasi *hardware*.

Sistem UPS menggunakan sumber dari PLN untuk proses pengisian (*charging*) pada baterai sehingga dapat menyimpan energi listrik. Kapasitas baterai yang digunakan adalah sebesar 12 V 18 Ah. Pada perangkat UPS terdapat *buck converter* yang memegang peranan penting untuk proses *charging* pada baterai. Pada desain ini, *buck converter* menggunakan metode CV (*Constant Voltage*) dan CC (*Constant Current*) dengan *set point* tegangan yang telah ditentukan oleh fungsi PI *controller* sesuai dengan tegangan *charging* baterai. Besar tegangan untuk pengisian baterai tersebut adalah sebesar 13.8 V (115% dari tegangan nominal baterai) [3] atau 2.30/2.35 V per selnya untuk menjaga keawetan dari baterai yang digunakan [4]. Dari sumber baterai digunakan *inverter* satu fasa untuk mencatu beban sensitif ketika suplai utama PLN padam, dalam kasus ini menggunakan komputer. Skema *Static Transfer Switch* (STS) diterapkan sebagai *switching* untuk mengganti catu daya dari PLN ke *inverter* maupun sebaliknya apabila terjadi gangguan seperti *overvoltage*, *undervoltage*, *shag*, *swell* dan *black out* dengan waktu *switch* yang sangat singkat.

Hasil dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Ahmed H.Okilly dengan judul “*Development of a Smart Static Transfer Switch Based on a Triac Semiconductor for AC Power Switching Control*”, menunjukkan hasil bahwa penggunaan TRIAC sebagai STS dapat berfungsi dengan baik sebagai komponen *switching* AC. Namun dalam artikel ini percobaan digunakan menggunakan beban resistif murni dengan daya yang tidak dicantumkan. Penulis juga menggunakan metode *zero crossing detection* secara manual atau menggunakan logika algoritma yang diatur menggunakan mikrokontroler. Dari percobaan tersebut dihasilkan *transition period* sebesar 16.67 ms yang masih tergolong lama karena waktu *switching* hampir menyamai komponen relai SSR [5].

Eko Susanto juga telah melakukan penelitian dengan judul “*Automatic Transfer Switch (Suatu Tinjauan)*” dengan merancang UPS menggunakan ATS sebagai *switching*-nya yang terdiri dari kombinasi rangkaian Relai, MCB, dan TDR. Walaupun tidak ditunjukkan hasil percobaannya namun berdasarkan *datasheet*, relai yang digunakan berjenis MK2P memiliki *time switching* sekitar 20 ms [6].

Dalam penelitian ini, ditunjukkan tahapan mendesain UPS dengan mekanisme STS sebagai sistem *switching*, mencakup perencanaan, perhitungan, dan simulasi menggunakan perangkat lunak PSIM. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis respon waktu *switching* mekanisme STS yang menggunakan TRIAC saat terjadi gangguan pada sumber listrik PLN, seperti *overvoltage*, *undervoltage*, dan *blackout*, dengan beban berupa komputer.

Hipotesis penelitian ini adalah sebagai berikut:

H₀: UPS tidak dapat berfungsi optimal karena keterbatasan komponen dalam melakukan perpindahan daya yang cepat.

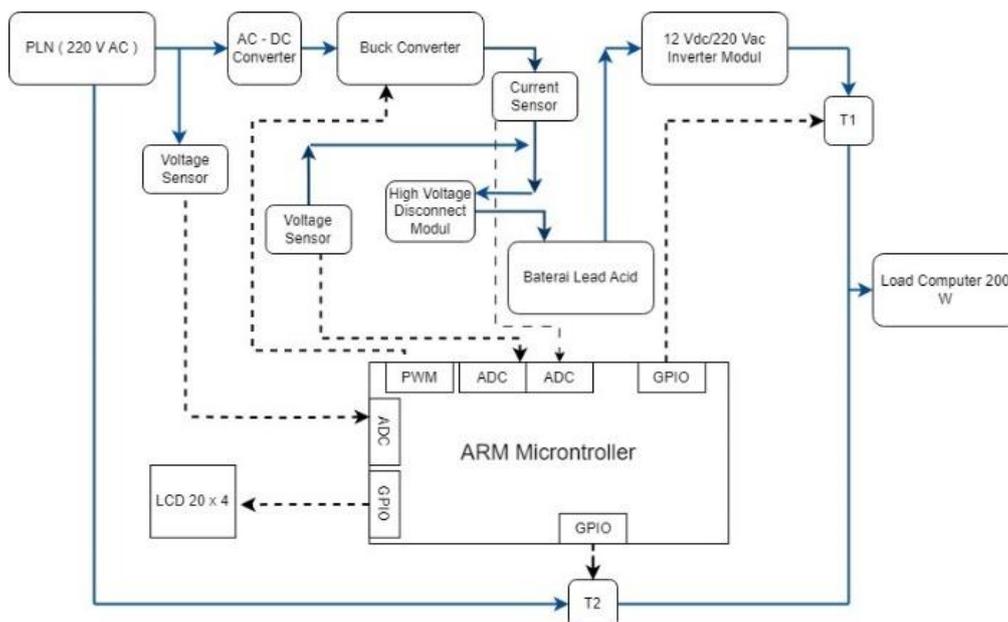
H₀: UPS berfungsi, tetapi memiliki waktu *switching* yang relatif lama, yakni beberapa milidetik, akibat mekanisme *zero-crossing* dan perbedaan fasa antara PLN dan *inverter* saat *switching* daya.

H1: UPS berfungsi dengan baik dengan waktu *switching* yang sangat cepat, yakni dalam kisaran mikrodetik.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan UPS yang lebih responsif dengan menggunakan mekanisme STS berbasis TRIAC, serta memvalidasi desain melalui pengujian menggunakan simulasi PSIM dan perangkat keras nyata.

2. Metode Penelitian

Desain dari sistem yang dibuat terdiri dari *power supply* DC, *buck converter*, mikrokontroler, baterai, *inverter*, *static transfer switch* dan juga komputer yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok diagram desain sistem UPS *offline* dengan STS.

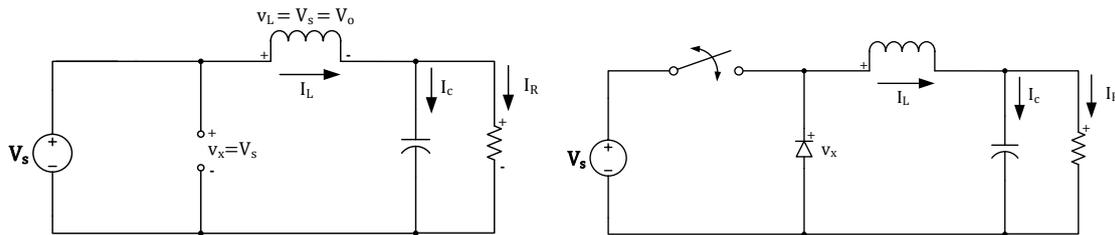
Diagram blok tersebut menunjukkan bagaimana alat ini beroperasi. Pada dasarnya alat ini akan menyediakan 2 sumber ke beban, yakni dari PLN dan *Inverter*:

1. *Tracking Duty Cycle*
Logika PI digunakan untuk *tracking duty cycle* dengan *feedback* sensor tegangan dan arus pada sisi *output buck converter*.
2. *Proses Charging*
Charging process pada sistem ini menggunakan metode *constant current constant voltage*, menggunakan algoritma PI untuk mengatur *setpoint* tegangan dan arus tetap konstan.
3. *Failure Voltage Detection*
Mendeteksi adanya gangguan tegangan seperti *blackout*, *undervoltage*, dan *overvoltage* sesuai standar yang ditetapkan oleh IEEE.
4. *Switching Sumber*
Ketika gangguan terdeteksi maka beban akan secara otomatis berganti suplai dari PLN ke *inverter* untuk menjaga kontinuitas penyalaan daya pada beban itu sendiri.

2.1. Buck Converter

Buck converter adalah konverter DC- DC jenis penurun tegangan atau *step down voltage*. *Buck converter* mampu menghasilkan nilai tegangan maksimal sama dengan tegangan masukannya. Berdasarkan penelitian rata-rata efisiensi *buck converter* berkisar antara 80 – 90 %

[8] [9]. *Buck converter* dapat menurunkan tegangan tanpa membutuhkan trafo [7] [10]. Rangkaian *buck converter* ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian *buck converter*.

Buck converter bekerja pada 2 mode, yakni saat mosfet ON dan mosfet OFF. Saat mosfet ON tegangan pada induktor nilainya sama dengan tegangan masukan. Dioda dalam keadaan pra-tegangan mundur. Di kondisi ini, induktor akan menyimpan energi dalam bentuk energi magnetik. Energi yang tersimpan pada kapasitor digunakan untuk mensuplai beban. Berikut ini dijabarkan penurunan rumus hubungan antara tegangan *output* dan tegangan sumber pada *buck converter*:

Penyelesaian untuk Δi_L pada saat saklar tertutup adalah:

$$(\Delta i_L)_{closed} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT \quad (1)$$

Ketika *switch* terbuka, dioda menjadi bias maju (ON) yang menyebabkan arus induktor mengalir ke sisi beban. Tegangan induktor didapatkan dengan menggunakan persamaan (2).

$$\begin{aligned} V_L &= -V_o \\ V_L &= L \frac{di_L}{dt} \\ \frac{di_L}{dt} &= \frac{-V_o}{L} \end{aligned} \quad (2)$$

Sedangkan untuk mengetahui perubahan arus induktor menggunakan persamaan (3).

$$\begin{aligned} \frac{di_L}{dt} &= \frac{\Delta i_L}{\Delta t} \\ \frac{di_L}{dt} &= \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} \\ \frac{di_L}{dt} &= \frac{-V_o}{L} \end{aligned} \quad (3)$$

Penyelesaian untuk Δi_L pada saat saklar terbuka adalah:

$$(\Delta i_L)_{opened} = -\left(\frac{V_o}{L} \right) (1-D)T \quad (\text{Rashid}) \quad (4)$$

Keterangan:

V_s = Tegangan *Input*

V_o = Tegangan *Output*

L = Induktansi Lilitan

$\frac{di_L}{dt}$ = Perubahan Arus Magnetisasi Induktor tiap satuan waktu

D = *Duty Cycle*

T = Periode

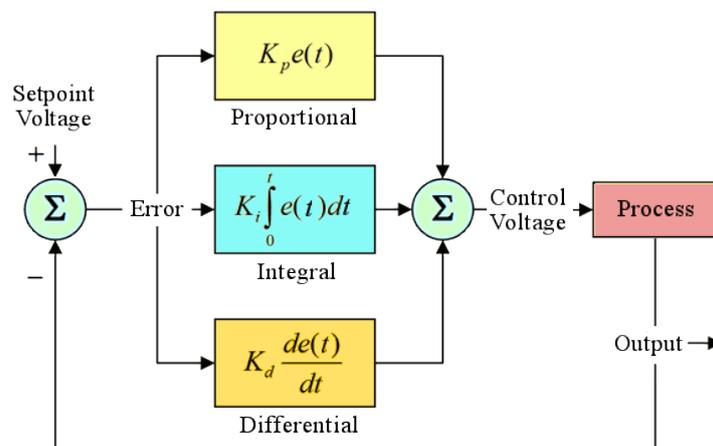
Δi_L = Arus rata-rata Induktor

2.2. Metode PI (Proportional – Integral)

Kontrol PI (*Proportional-Integral*) merupakan salah satu metode kontrol yang banyak digunakan dalam berbagai sistem, termasuk sistem elektronika daya. Kontrol PI bekerja dengan mengatur sinyal kontrol berdasarkan selisih antara *set point* dan sinyal *feedback*. *Set point* adalah nilai ideal yang ingin dicapai, sedangkan sinyal *feedback* adalah nilai aktual yang diukur dari sistem [11]. Ada beberapa metode *tuning Controller* PI yang sering digunakan, seperti *trial-error*, analitik, Ziegler Nichols, dan Cohen-Coon [12]. Dalam percobaan ini penulis menggunakan metode *trial and error* pada penentuan konstanta K_p dan K_i .

Prinsip Kerja Kontrol PI:

1. **Proportional Controller (P):** Menghasilkan sinyal kontrol yang sebanding dengan besarnya eror. Semakin besar eror, semakin besar pula sinyal kontrol yang dihasilkan. *Controller P* efektif untuk mengurangi *error steady state* dan mempercepat *rise time*.
2. **Integral Controller (I):** Menghasilkan sinyal kontrol yang sebanding dengan integral dari eror. Semakin lama eror berlangsung, semakin besar pula sinyal kontrol yang dihasilkan. *Controller I* efektif untuk menghilangkan *error steady state* secara sempurna.



Gambar 3. Flowchart PID controller.

2.3. Metode Osilasi Ziegler Nichols

Metode osilasi merupakan metode *tuning* untuk respon sistem lup tertutup. Metode osilasi ini mempunyai beberapa tahapan dalam melakukan tuning pengendali yaitu sebagai berikut [13]:

1. *Plant* disusun serial dengan pengendali PID
2. Selanjutnya parameter *Integrator* diatur tak berhingga ($T_i = \infty$) dan parameter Derivatif diatur nol ($T_d = 0$)
3. Parameter Proporsional dinaikkan secara bertahap, mulai dari nol sampai mengakibatkan respon sistem berosilasi. Respon sistem harus berosilasi dengan *magnitude* tetap (*sustain osilation*)

Tuning pengendali PID menggunakan metode osilasi menurut metode Ziegler-Nichols, yaitu berdasarkan K_u dan P_u tersebut. Jadi, untuk pemberian parameternya ditetapkan rumus berdasarkan Tabel 1.

Tabel 1. Tabel konstanta Ziegler-Nichols.

Tipe Pengendali	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 K_u$	-	-
PI	$0,45 K_u$	$0,86 P_u$	-
PID	$0,6 K_u$	$0,5 P_u$	$0,125 P_u$

Kontrol PI (*Proportional-Integral*) digunakan untuk menjaga arus dan tegangan agar selalu konstan. Kontrol ini bekerja dengan mengatur sinyal eror berdasarkan selisih antara *set point* arus/tegangan dan sinyal *feedback* dari arus/tegangan yang keluar dari *buck converter*.

Controller P (Proportional) dalam Kontrol PI berfungsi untuk mengurangi *error steady state* dan mempercepat *rise time*. Namun, *Controller P* saja tidak cukup untuk menghilangkan *error steady state* sepenuhnya. Oleh karena itu, *Controller I (Integral)* ditambahkan untuk menghilangkan *error steady state* secara sempurna dan mempercepat *rise time* serta *settling time*. Karakteristik *Controller PI* ditunjukkan pada Tabel 2 [14].

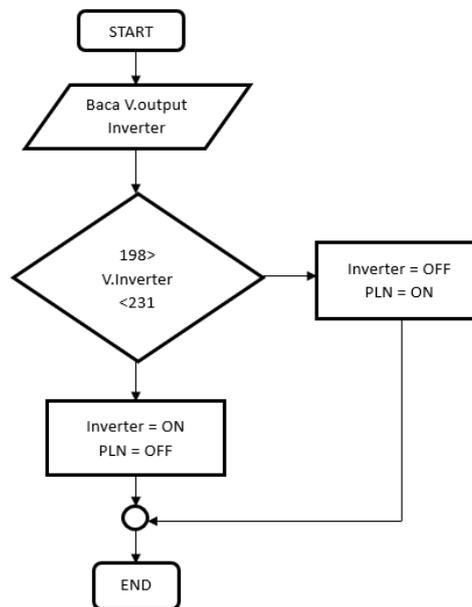
Tabel 2. Karakteristik *Controller PI*.

<i>Parameter</i>	<i>Rise Time</i>	<i>Settling Time</i>	<i>Error Steady State</i>	<i>Overshoot</i>
Kp	Mengurangi	Mengurangi	Mengurangi	Meningkatkan
Ki	Mengurangi	Mengurangi	Menghilangkan	Meningkatkan

2.4. Static Transfer Switch (STS)

Static Transfer Switches (STS) dirancang untuk mengalihkan pasokan antara sumber daya listrik AC satu fase atau tiga fase yang independen. Berbeda dengan saklar transfer otomatis (ATS) tradisional, STS menyediakan transfer beban yang 20 kali lebih cepat yang memastikan operasi yang tidak terputus bahkan untuk peralatan elektronik yang paling sensitif. Retransfer beban ke sumber *input* yang dipilih hampir instan (biasanya sekitar 100 μ s). Aplikasi dasar STS adalah dalam sistem otomatis untuk industri tenaga.

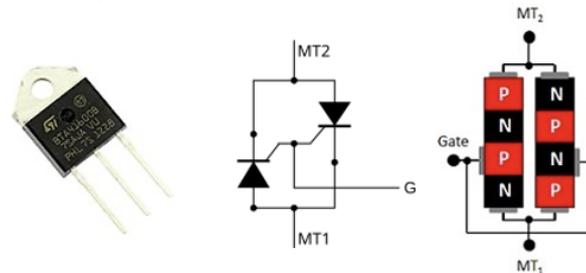
Pada STS komponen pensaklaran yang digunakan adalah komponen TRIAC. TRIAC merupakan komponen elektronika daya yang memanfaatkan teknologi semikonduktor dengan respon kerja tinggi dan cepat [5].

Gambar 4. Struktur *flowchart* rangkaian STS untuk mendeteksi *voltage failure*.

Mengacu pada standar IEEE 1159-1995, tegangan yang diijinkan adalah -10% hingga +5% dari tegangan nominal. Tegangan nominal adalah 220 Volt, batas tegangan yang diijinkan adalah 198 Volt hingga 231 Volt. Terdapat banyak sekali gangguan yang dapat terjadi pada pembangkit listrik yang dibedakan berdasarkan waktu gangguannya diantaranya *undervoltage*, *overvoltage*, *voltage interruption* (yang terjadi selama kurang lebih 1 menit) atau *sag*, *swell*, *interruption* (yang terjadi selama kurang lebih 0.5 siklus gelombang AC/10 ms) [15].

2.5 . TRIAC

TRIAC adalah komponen semikonduktor dengan tiga terminal yang digunakan untuk mengendalikan aliran arus listrik. Nama TRIAC ini merupakan singkatan dari *Triode for Alternating Current* (Trioda untuk arus bolak balik). Pada dasarnya, sebuah TRIAC sama dengan dua buah SCR yang disusun dan disambungkan secara antiparalel (paralel yang berlawanan arah) dengan Terminal Gerbang dihubungkan bersama menjadi satu [2]. TRIAC adalah komponen elektronika yang memiliki struktur terdiri dari empat lapisan semikonduktor dan memiliki tiga terminal. Ketiga terminal ini adalah MT1, MT2, dan *Gate*, MT merupakan singkatan dari *Main Terminal* [10]. Gambar 5 merupakan struktur, simbol, dan karakteristik TRIAC.



Gambar 5. Struktur dan schematic TRIAC.

TRIAC digunakan sebagai saklar elektronis. TRIAC memiliki waktu *switching* yang sangat cepat jauh lebih cepat jika dibandingkan dengan relai mekanis yakni hanya sekitar beberapa *microsecond* saja. Tujuan dari hal ini adalah untuk menjaga beban sensitif tetap tersuplai tegangan pada saat sisi PLN terjadi gangguan, TRIAC pada jalur PLN akan OFF saat terjadi gangguan pada sisi PLN dan TRIAC pada sisi *inverter* akan ON untuk menyuplai tegangan ke beban.

3. Hasil Dan Pembahasan

3.1. Perencanaan Daya Charging Baterai Lead Acid 12 V, 18 Ah

a. Tegangan Pengisian

$$\begin{aligned} V_{\text{charge}} &= 120\% \times V_{\text{batt}} \\ &= 120\% \times 12 \text{ V} \\ &= 14,4 \text{ V} \end{aligned} \quad (4)$$

b. Arus Pengisian (10% - 30%)

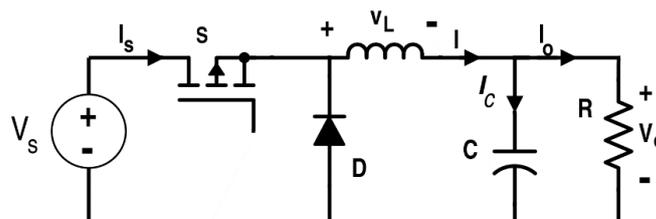
$$\begin{aligned} \text{Arus pengisian pada baterai} \\ I_{\text{charge}} &= 20\% \times \text{Ah} \\ &= 20\% \times 18 \text{ Ah} \\ &= 3,6 \text{ A} \end{aligned} \quad (5)$$

c. Daya Pengisian

$$\begin{aligned} P_{\text{batt}} &= V_{\text{charge}} \times I_{\text{charge}} \\ &= 13,8 \times 3,6 \\ &= 49,68 \text{ Watt} \end{aligned} \quad (6)$$

3.2. Perencanaan DC-DC Buck Converter

Rangkaian *buck converter* ditunjukkan pada Gambar 6 sedangkan spesifikasinya disajikan pada Tabel 3.



Gambar 6. Rangkaian *buck converter*.

Tabel 3. Nilai dari masing-masing komponen *buck converter*.

Paramater	Keterangan
Tegangan masuk (V_{in})	34 V
Tegangan keluaran (V_{out})	14.4 V
Arus Keluaran (I_{out})	1-6 A
Frekuensi <i>Switching</i>	40 KHz
<i>Ripple</i> Tegangan	1 %
<i>Ripple</i> Arus	20 %
Induktor	576 uH
Kapasitor	220 uF

a. Nilai *Duty Cycle*

$$D = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{14,4}{34} = 0,423 \quad (7)$$

b. Nilai Resistor

$$R = \frac{V_o}{I_o} = \frac{14,4}{6} = 2,4\Omega \quad (8)$$

c. Kapasitas Filter Induktor

$$I_{L(avg)} = 30\% \times 18A = 6A \quad (9)$$

Dalam sistem *charging* ini, desain *Ripple Inductor* dengan $I_{L(avg)}$ dimungkinkan memiliki arus sebesar (1 – 6 A). Dalam desain ini untuk menentukan kapasitas induktor ditentukan Arus *ripple* dengan mengambil $I_{L(avg)} = 2 A$

$$L = \left[\frac{1}{f} \right] \times (V_{s(max)} - V_o) \times \left[\frac{V_o + V_f}{V_{s(max)} + V_f} \right] \times \frac{1}{\Delta i_L} \quad (10)$$

$$\Delta I_L = 20\% \times I_{L(avg)} \quad (11)$$

$$\Delta I_L = 20\% \times 2 = 0,4A$$

$V_f = \text{Diode Forward - Voltage}$ (from data sheet of diode red: MUR1560) = 1,5 Volt

$$L = \left[\frac{1}{40k} \right] \times (34 - 14,4) \times \left[\frac{14,4 + 1,5}{34 + 1,5} \right] \times \frac{1}{0.4}$$

$$L = \left[\frac{1}{40k} \right] \times 19.6 \times 0,4479 \times 2.5$$

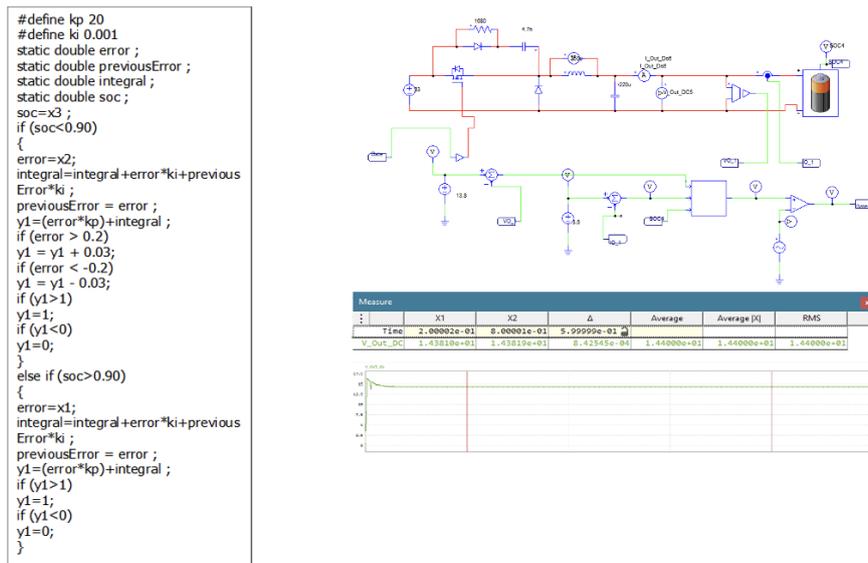
$$L = 0,000025 \times 19.6 \times 0,4479 \times 2.5$$

$$L = 548uH$$

$$I_L = I_{out} \quad (\text{for buck converter})$$

3.3 Simulasi *Charging PI CC dan CV* menggunakan *Software PSIM*

Gambar 7 menunjukkan *code* dan hasil simulasi PI dengan menggunakan *software PSIM*.

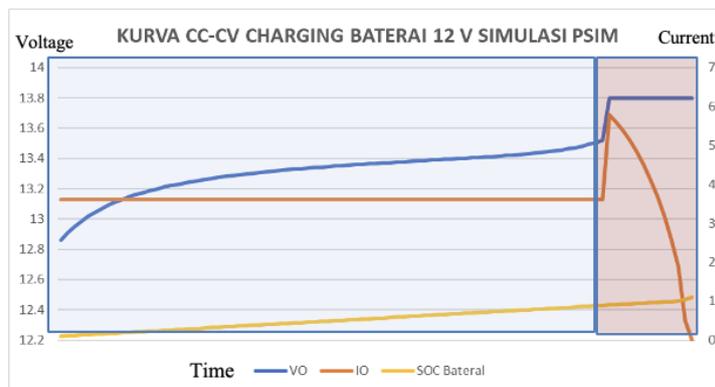


Gambar 7. Code dan hasil simulasi PI menggunakan software PSIM.

Pada simulasi tersebut dikehendaki ketika SOC baterai berada di bawah 90 %, maka *charging* yang dilakukan adalah menggunakan metode CC (*Constant Current*). Setelah SOC baterai berada di atas 90 % maka metode *charging* yang digunakan adalah CV (*Constant Voltage*). Parameter baterai yang diatur pada software PSIM menyesuaikan *datasheet real* baterai SMT Power 12V/18AH. Berikut dipaparkan *source code* dari logika PI yang ditetapkan pada software simulasi PSIM untuk *charging* baterai dimana $y1 = duty\ cycle$ yang akan mengontrol MOSFET [14] [16]. Hasil running rangkaian *charging* baterai menggunakan software PSIM ditunjukkan pada Gambar 8 dan Tabel 4.

Dari hasil *running* didapatkan kurva pengisian *charging* CC-CV Baterai Lead Acid 12 V. Pada kondisi *constant current*, arus dijaga konstan pada nilai 3.6 Ampere dimana tegangan baterai menyesuaikan. Pada kondisi *constant voltage*, tegangan dijaga konstan pada nilai 13.8 V dimana arus menyesuaikan. Dalam proses pengisian baterai ada tiga tahapan yaitu [17]:

- Bulk Charge* adalah keadaan awal pengisian dimana arus diambil secara maksimum dari *battery charger* dan tegangan baterai berangsur-angsur naik mendekati 80 – 90% dari level penuh (dalam simulasi 12.9 – 13.6 V daerah yang diarsir biru).
- Absorption Charge* adalah kondisi kedua, dimana tegangan baterai konstan dan arus pengisian mulai turun. Pada kondisi ini tegangan baterai berada di level 13.8 – 14.4 V.
- Float Charge* adalah keadaan ketiga, dimana tegangan baterai mencapai 85 – 95 % *state of charge* atau di sekitar 13 – 13.8 Volt dan arus pengisian menurun sampai 1% dari kapasitas baterai (daerah yang diarsir merah)



Gambar 8. Kurva hasil running rangkaian charging baterai 12 V CC-CV pada software PSIM.

Tabel 4. Hasil *running* rangkaian *charging* baterai 12 V CC-CV pada *software* PSIM.

SOC	Tegangan (V)	Arus (A)
0.1	12.861	3.6
0.2	13.146	3.6
0.3	13.2543	3.6
0.4	13.3126	3.6
0.5	13.3502	3.6
0.6	13.3784	3.6
0.7	13.4039	3.6
0.8	13.4388	3.6
0.9	13.8	5.78634
0.99	13.8	2.56991
1	13.8	1.89259

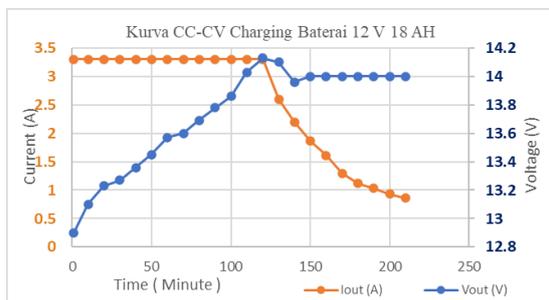
3.4. Pengujian Integrasi *Hardware* Sistem *Charging* CC-CV dengan Logika PI

Pengujian dilakukan dengan mengosongkan baterai hingga mencapai sekitar 20% SOC untuk menjaga performa baterai dalam jangka panjang, sesuai referensi PT. SAMOTO MEGA TEKNOLOGI [3] yang menetapkan 12.1 V sebagai tegangan *open voltage* pada 20% SOC. Setelah pengosongan, baterai diisi kembali menggunakan *buck converter* dengan mode *Constant Current* (CC) hingga tegangan mencapai 13.8 V, kemudian beralih ke *Constant Voltage* (CV) sampai arus mendekati 0 A (0–0.5 A). Parameter Kp dan Ki ditentukan melalui metode *trial and error*, dengan nilai optimal pada mode CC sebesar 0.01 dan 0.02, serta pada mode CV sebesar 0.01 dan 0.01. Data tegangan pengisian ($V_{charging}$), arus pengisian ($I_{charging}$), dan waktu pengisian tercatat dalam tabel dan grafik sebagai hasil pengujian.

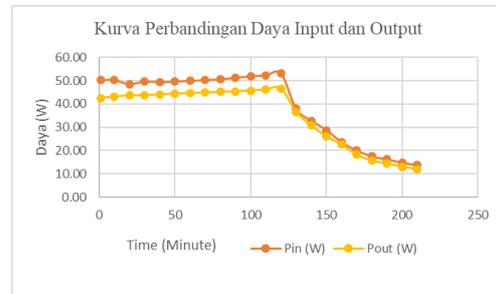
Tabel 5. Hasil pengujian *hardware buck converter* dengan metode CC-CV menggunakan logika PI.

Time (Minute)	Vin (V)	Iin (A)	Vout (V)	Iout (A)	Pin (W)	Pout (W)	Duty (1-100)	Efisiensi (%)
1	28	1.796	12.9	3.3	50.29	42.57	53.00	84.65
10	28	1.795	13.1	3.3	50.26	43.23	53.35	86.01
20	28	1.735	13.23	3.3	48.58	43.66	53.80	89.87
30	28	1.772	13.27	3.3	49.62	43.79	54.00	88.26
40	28	1.763	13.36	3.3	49.36	44.09	54.23	89.31
50	28	1.772	13.45	3.3	49.62	44.39	54.46	89.46
60	28	1.783	13.57	3.3	49.92	44.78	54.71	89.70
70	28	1.796	13.6	3.3	50.29	44.88	55.05	89.25
80	28	1.809	13.69	3.3	50.65	45.18	55.31	89.19
90	28	1.832	13.78	3.3	51.30	45.47	55.89	88.65
100	28	1.855	13.86	3.3	51.94	45.74	55.93	88.06
110	28	1.869	14.03	3.3	52.33	46.30	56.31	88.47
120	28	1.899	14.13	3.3	53.17	46.63	57.74	87.69
130	28	1.356	14.1	2.6	37.97	36.66	55.27	96.55
140	28	1.173	13.96	2.2	32.84	30.71	54.48	93.51
150	28	1.028	14	1.86	28.78	26.04	54.48	90.47
160	28	0.844	14	1.61	23.63	22.54	53.80	95.38
170	28	0.715	14	1.3	20.02	18.20	53.43	90.91
180	28	0.625	14	1.12	17.50	15.68	53.26	89.60
190	28	0.58	14	1.03	16.24	14.42	53.17	88.79
200	28	0.528	14	0.931	14.78	13.03	53.08	88.16
210	28	0.49	14	0.861	13.72	12.05	53.02	87.86
Rata-rata Efisiensi							89.54%	

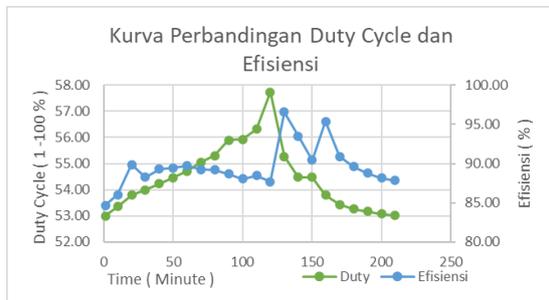
Dari grafik percobaan, pengendali PI terbukti efektif dalam menjaga stabilitas arus dan tegangan sesuai *setpoint* yang diinginkan pada pengisian baterai *lead acid* 12 V – 18 AH dari SOC 20% hingga 100%. Waktu pengisian tercatat sekitar 230 menit (± 3.5 jam) dengan arus CC sebesar 3.3 A dan tegangan CV 14 V. Meskipun tegangan dan arus dapat ditingkatkan hingga 14.4 V dan 5.4 A sesuai *datasheet* untuk mempercepat pengisian, hal ini berpotensi mengurangi siklus umur baterai [4]. Pengaturan K_p dan K_i pada PI *controller mode* CC adalah 1 dan 0.02, sedangkan untuk CV adalah 1 dan 0.01, dengan *steady-state error* $< 1\%$, menunjukkan performa pengendali yang baik. Saat mode CC, arus dijaga konstan, sementara tegangan terus meningkat, dengan *duty cycle* naik dari 53.0 ke 57.4. Pada mode CV, tegangan dijaga stabil pada 14 V, sementara arus menurun seiring SOC baterai meningkat. Rata-rata efisiensi sistem adalah 89.54% dalam rentang *duty cycle* 53–57.4, yang optimal untuk mengurangi rugi-rugi konduksi dan *switching*. Efisiensi ini termasuk baik, berada dalam kisaran normal 80–95% untuk *buck converter*.



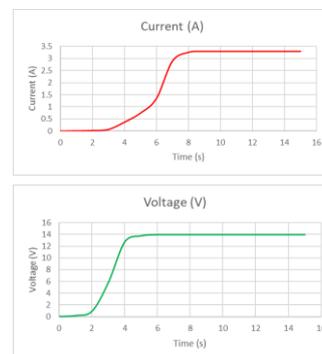
Gambar 9. Kurva CC-CV charging baterai 12 V 18 AH.



Gambar 10. Kurva perbandingan daya *input* dan *output*.



Gambar 10. Kurva perbandingan *duty cycle* dan efisiensi.



Gambar 9. Kurva waktu V dan I dalam mencapai *setpoint*.

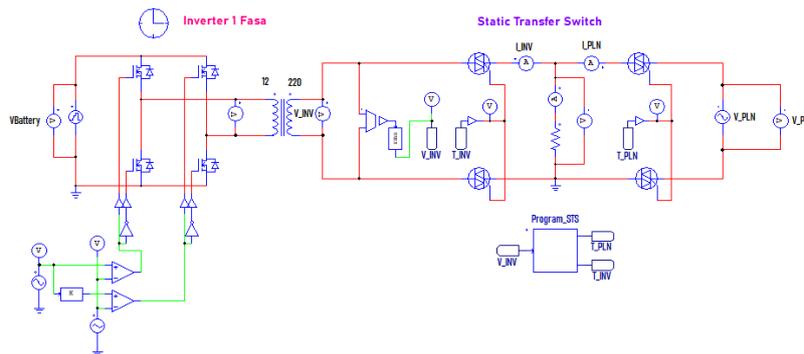
Berdasarkan grafik eksperimen, dapat disimpulkan bahwa logika PI dapat secara efektif mempertahankan kestabilan arus dan tegangan *output* sesuai dengan *setpoint* yang diinginkan. Pengisian baterai asam timbal 12 V – 18 AH dari SOC 20% hingga 100% membutuhkan waktu sekitar 230 menit atau sekitar 4 jam dengan arus tetap (CC) 3,3 A dan tegangan tetap (CV) 13,8 V. Dalam praktiknya, tegangan dan arus pengisian dapat ditingkatkan menjadi 14,4 V dan 5,4 A sesuai dengan lembar data untuk mempercepat pengisian baterai. Namun, hal ini dapat sedikit mempengaruhi siklus pengisian dan pelepasan baterai, menjadikannya lebih sedikit dibandingkan dengan menggunakan arus dan tegangan 3,3 A dan 14 V, meskipun waktu pengisian lebih lama.

3.5. Perencanaan Static Transfer Switch (STS)

Dalam perancangan, dibutuhkan 4 TRIAC yang dipasang secara seri pada masing-masing jalur, yakni sumber PLN dan *Inverter* yang berfungsi sebagai *switching* yang dikontrol oleh *optocoupler* MOC3041 dimana *optocoupler* akan mendapat *trigger* dari mikrokontroler ARM yang telah diprogram. TRIAC pada alat ini berfungsi sebagai piranti *switching* yang dikendalikan oleh rangkaian kontrol *driver* dan mikrokontroler untuk perpindahan sumber daya utama yakni PLN ke sumber daya cadangan (*inverter*) apabila terdapat gangguan pada sumber daya utama (*overvoltage, undervoltage, blackout*).

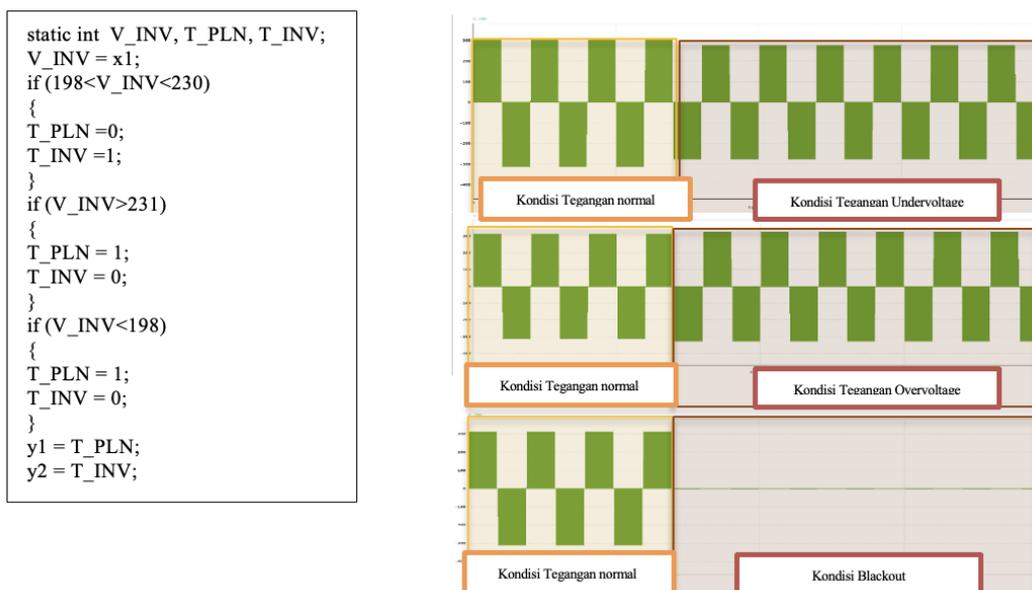
3.6. Simulasi TRIAC Sebagai STS Menggunakan Software PSIM

Rangkaian STS menggunakan *software* PSIM ditunjukkan pada Gambar 13.



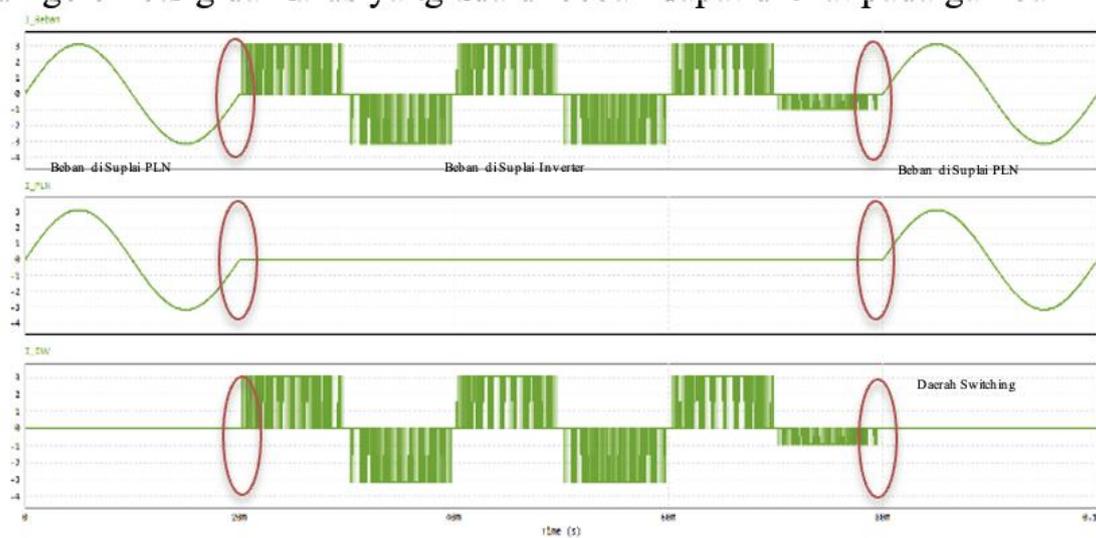
Gambar 11. Simulasi Rangkaian Static Transfer Switch dengan software PSIM.

Pada topologi STS terdapat dua sumber yang dijadikan suplai, yakni sumber dari *inverter* dan juga sumber dari PLN. STS akan berpindah ke sumber cadangan (*inverter*) saat tegangan pada sumber utama (PLN) berada di bawah 198 V (kondisi *undervoltage*) atau berada di atas 231 V (kondisi *overvoltage*). Maka pada simulasi dilakukan *setting* nilai tegangan pada sumber DC yang fungsinya sebagai catu daya *inverter* AC di-*setting* dalam empat kondisi yakni saat tegangan normal dan tegangan di bawah normal (*undervoltage*), tegangan di atas normal (*overvoltage*), dan *blackout* agar tegangan *inverter* tidak di antara 198-231 V, sehingga memicu STS untuk melakukan *switch* ke sumber cadangan. *Output* tegangan saat terjadi *voltage failure* pada beban ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 12. Hasil *output* tegangan pada beban ketika terjadi *voltage failure*.

Untuk mengetahui proses *switching* dari STS, maka akan dilihat pada bagian arus pada beban. Bentuk gelombang dari arus yang ada di beban dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 13. Kondisi gelombang arus *output* pada beban saat terjadi *switching*.

3.7. Proses *Switching* dari Sumber Utama ke Sumber Cadangan

Dari simulasi ini, dapat disimpulkan bahwa STS melakukan *switching* dari sumber *inverter* ke PLN atau PLN ke *inverter* hanya sekitar beberapa mikrodetik saja. Hal ini menunjukkan kecepatan *switching* pada skema STS yang menggunakan komponen semi konduktor TRIAC yang jauh lebih cepat hanya beberapa mikrodetik saja dibandingkan dengan menggunakan relai elektromekanis yang memiliki respon sekitar diatas 20 ms. Dengan demikian skema STS cocok diaplikasikan di dalam beban sensitif untuk menjaga kontinuitas suplai tegangannya saat terjadi gangguan *blackout*, *undervoltage*, dan *overvoltage* sehingga penggunaan topologi STS (*Static Transfer Switch*) ini sangat cocok diterapkan kepada beban-beban sensitif yang membutuhkan kontinuitas suplai daya seperti komputer *server*, *Router/Wi-Fi*, lampu indikator dan lain-lain.

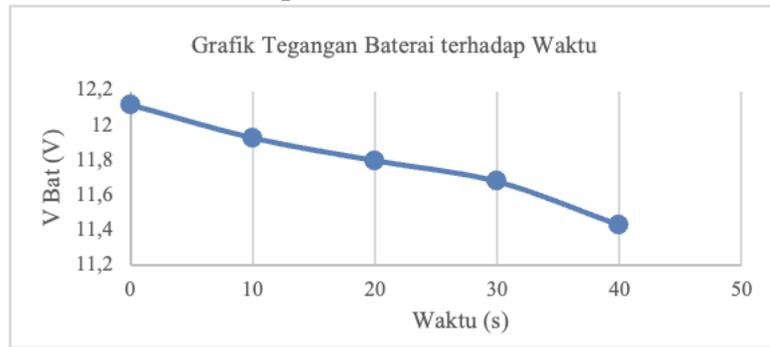
3.8. Pengujian Integrasi Sistem STS dengan Logika If-Else

Pengujian dilakukan dengan menghubungkan dua sumber *input* STS, yaitu PLN dan *inverter*, dengan tegangan 220 V rms. Untuk simulasi kondisi *overvoltage* dan *undervoltage*, PLN digantikan dengan Variac sesuai standar IEEE (*undervoltage*: 90% dari 220 V dan *overvoltage*: 105% dari 220 V, atau rentang tegangan yang diizinkan 198–231 V). Hasil pengujian menunjukkan bahwa rangkaian STS berfungsi optimal sebagai cadangan daya, tanpa *deadtime* signifikan pada beban saat *switching* sumber. Dokumentasi visual percobaan juga mencatat stabilitas kinerja sistem. Status UPS *offline* ditunjukkan pada Tabel 6.

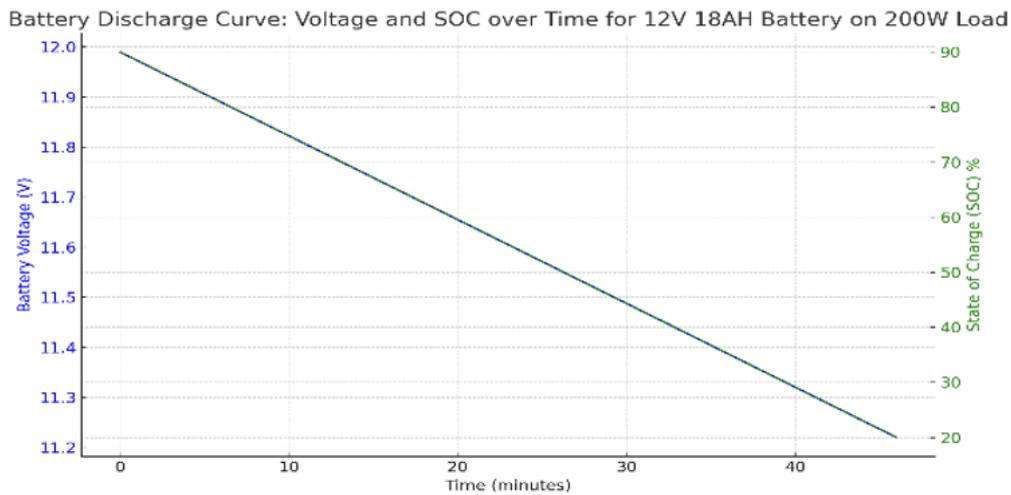
Tabel 6. Status keterangan UPS *offline*

V PLN (V)	V Inverter (V)	PLN	Inverter	V Load (V)	Dead time switching (uS)
<198	220	OFF	ON	220	10
>231	220	OFF	ON	220	10
198-231	220	ON	OFF	198-231	10

Pada penggunaan UPS dengan beban komputer 200 W, kapasitas baterai yang lebih besar diperlukan untuk meningkatkan waktu *backup*. Dengan baterai berkapasitas 18 AH, komputer diperkirakan dapat beroperasi selama 30–45 menit saat disuplai melalui *inverter*. Gambar 16 menunjukkan grafik tegangan baterai terhadap waktu sedangkan Gambar 17 menunjukkan kurva *discharge* baterai.

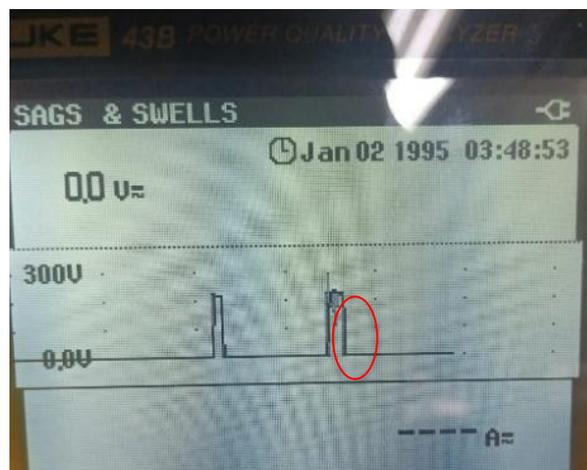


Gambar 14. Grafik tegangan baterai terhadap waktu.

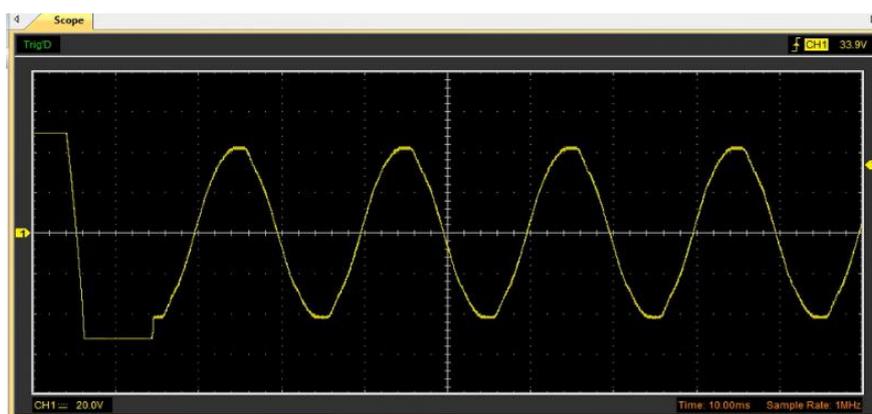


Gambar 17. Grafik tegangan terhadap SOC baterai saat kondisi *discharging*.

Pada Gambar 17 terlihat bahwa baterai *lead acid* 12 V 18 AH dapat menanggung beban sebesar 200 watt selama +40 menit. Hal ini tentu sudah cukup sesuai dimana fungsi utama dari UPS yang dirancang pada alat ini adalah sebagai *backup* komputer apabila terjadi gangguan tegangan sehingga para *user* masih sempat untuk menyimpan atau mem-*backup* pekerjaannya terlebih dahulu. Gambar 18 menunjukkan gelombang *sags* saat *switching* sedangkan Gambar 19 menunjukkan pengamatan gelombang AC saat *switching* menggunakan Oscilloscope.



Gambar 15. Gelombang *sags swells* saat *switching* menggunakan FLUKE43B.



Gambar 19. Pengamatan Gelombang AC saat *switching* menggunakan Oscilloscope.

Pengujian dimulai dengan menggunakan sumber PLN terlebih dahulu. Setelah beberapa detik sumber *inverter* masuk, dan berdasarkan pengamatan terdapat sedikit *spike* tegangan ketika *switching* sumber terjadi (PLN-*Inverter*, *Inverter*-PLN, pada gambar yang dilingkari merah).

4. Kesimpulan

Program PI secara efektif menstabilkan tegangan dan arus dengan memberi *feedback* arus agar arus stabil di 3,6 A dan tegangan dapat stabil di 13,8 V. Tegangan *charging* 13,8 V dipilih menyesuaikan dengan kapasitas tegangan baterai Lead Acid yang digunakan yakni sebesar 12 V. Tujuannya agar kondisi baterai dalam keadaan *charging* tidak mengalami *overheating* akibat kelebihan tegangan dan arus.

Static Transfer Switch dapat bekerja sangat cepat ketika sumber utama PLN mengalami gangguan, beban yang dihubungkan dengan *Static Transfer Switch* akan tetap menyala apabila pada salah satu sumber mengalami gangguan, STS akan otomatis melakukan *switching* sumber menggunakan komponen TRIAC untuk merubah sumber dari yang semula mengalami gangguan ke Sumber yang normal (PLN – *Inverter* atau *Inverter* – PLN). Hal ini disebabkan STS telah menggunakan mekanisme saklar listrik meliputi TRIAC beserta *Driver*-nya sehingga perpindahan catu daya ke beban yang sudah cukup membuat komputer tidak mengalami *shutdown* saat *switching* sumber, hal ini diperkuat dengan dengan data percobaan *hardware* yang telah dilakukan.

Referensi

- [1] Ned Mohan, *Power Electronics a First Course*, University of Minnesota Minneapolis: John Wiley & Sons, Inc., 2012.
- [2] Muhammad H. Rashid, *Power Electronics Handbook*, 4th ed. Florida: Joe Hayton, 2018.
- [3] PT. Samoto Mega Teknologi, “SLA Battery 12Volt 18AH – SMT1218,” Available: <https://samoto.co.id/product/smt1218/>.
- [4] Isidor Buchman, “BU-403: Charging Lead Acid,” Battery University, Available: <https://batteryuniversity.com/article/bu-403-charging-lead-acid>
- [5] A. H. Okilly, N. Kim, J. Lee, Y. Kang, and J. Baek, “Development of a Smart Static Transfer Switch Based on a Triac Semiconductor for AC Power Switching Control,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 1, p. 526, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16010526.
- [6] E. Susanto, “Automatic Transfer Switch (Suatu Tinjauan),” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 5 no. 1, 18-21, 2013, doi: <https://doi.org/10.15294/jte.v5i1.3549>
- [7] Ned Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins, *Power Electronics Converters, Applications, and Design*, 3rd ed. Mineapolis: John Wiley & Sons, 2003.

- [8] C.-C. Wang, C.-L. Chen, G.-N. Sung, and C.-L. Wang, "A high-efficiency DC–DC buck converter for sub- $2\times V_{DD}$ power supply," *Microelectronics Journal*, vol. 42, no. 5, pp. 709–717, May 2011, doi: 10.1016/j.mejo.2011.02.004.
- [9] R. Susana, K. Rosyidi, and D. Nataliana, "Penerapan Teknik MPPT pada Modul Surya menggunakan Konverter DC-DC Topologi Synchronous Buck," *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, vol. 6, no. 3, p. 328, Oct. 2018, doi: 10.26760/elkomika.v6i3.328.
- [10] Daniel W Hart, *Power Electronics*. New York: The McGraw-Hill Companies, Inc, 2011.
- [11] Katsuhiko Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. New Jersey: Prentice Hall, 2010.
- [12] B. Abdelhamid, L. Radhouane, and A. Bilel, "Real time implementation of perturb and observe algorithm and PI controller for DC/DC converter," in *2017 18th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, IEEE, Dec. 2017, pp. 520–526. doi: 10.1109/STA.2017.8314946.
- [13] Finn Haugen, "Ziegler-Nichols' Closed-Loop Method," *Tec Teach*, pp. 1–4, 2010.
- [14] W. D. Mufty, D. O. Angriawan, and M. Z. Efendi, "Baterai Charger Vrla Dengan Metode Constant Current Constant Voltage Berbasis Kontrol PI," *Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV) Ke-6* vol. 6, no. 1, pp. 235-243, 2020.
- [15] "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," in *IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009)* , vol., no., pp.1-98, 13 Aug. 2019, doi: 10.1109/IEEESTD.2019.8796486.
- [16] F. Rahmatullah, "Desain dan Simulasi Battery Charger Metode CC-CV (Constant Current-Constant Voltage) dengan Kontrol Logika Fuzzy Menggunakan MATLAB," *CYCLOTRON*, vol. 4, no. 2, pp. 18-22, Aug. 2021, doi: 10.30651/cl.v4i2.8621.
- [17] Moh. Z. E. Novie Ayub Windarko, *Energi Terbarukan: Teori dan Eksperimen*, 1st ed. Surabaya: deepublishstore, 2023.