

Simulasi Sistem Bi-Directional Inverter pada Baterai On-Grid Terhadap Pembangkit Listrik Hibrid PLTMH dan PLTS Gunung Halu

1st Salman Alfa Rafli
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

salmanalf@student.telkomuniversity.a
c.id

2nd Kharisma Bani Adam
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

kharismaadam@telkomuniversity.ac.id

3rd Bandiyah Sri Aprillia
Fakultas Teknik Elektro
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

bandiyah@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Energi listrik merupakan hal yang diperlukan manusia untuk melakukan aktivitas keseharian. Di Desa Tangsi Gunung Halu terdapat sebuah Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) yang mampu memberikan kapasitas daya maksimal sebesar 18kW kepada beban. Akan tetapi, kebutuhan beban rumah tangga meningkat, lalu diperlukan sebuah solusi peningkatan daya listrik. Penerapan konsep hibrid antara PLTMH dengan PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) dan baterai merupakan solusi yang terbaik. Baterai digunakan sebagai sumber listrik cadangan yang mampu memberikan pasokan energi ke warga jika terjadinya kendala terhadap Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PLTH). Grid yang akan digunakan pada PLTH ini adalah grid AC, maka baterai harus memiliki sifat fleksibel untuk mengubah arus AC menjadi DC, dan sebaliknya. Bi-directional inverter bersama dengan buck-boost converter dapat memberikan kemampuan fleksibilitas tersebut. Landasan penanggulangan masalah tersebut adalah penyusunan simulasi. Simulasi bermanfaat untuk mengetahui kelayakan dari konsep. Pengujian telah dilakukan terhadap simulasi yang telah dirangkai. Dari pengujian tersebut diketahui bahwa konsep penerapan bi-directional inverter dan baterai mampu untuk dapat menjadi sumber untuk grid, serta menerima energi dari kedua pembangkit listrik. Dari pengujian telah diperoleh nilai sebesar 0,07% penurunan SOC dalam rentan 3 detik ketika discharging, lalu telah diperoleh nilai sebesar 0,33% peningkatan SOC dalam rentan 3 detik.

Kata Kunci — Baterai, bi-directional, converter

I. PENDAHULUAN

Energi listrik adalah salah satu jenis energi utama yang diperlukan manusia untuk dapat menggunakan peralatan listrik bagi manusia. Listrik adalah energi yang tersimpan dalam arus dengan satuan ampere (A) dan tegangan listrik

dengan satuan volt (V) dengan ketentuan kebutuhan konsumsi daya listrik dengan satuan Watt (W) untuk lampu penerangan, memanaskan, mendinginkan atau menggerakkan suatu peralatan.

Oleh sebab itu, Manusia memerlukan energi listrik untuk kehidupan sehari-hari mereka. Tanpa energi listrik yang mencukupi, kegiatan manusia dapat terhambat. Maka, diperlukan sebuah pembangkit listrik yang bertujuan untuk memproduksi energi listrik untuk mencukupi kebutuhan manusia.

Dalam sebuah studi kasus terdapat sebuah desa di daerah Tangsi Gunung Halu yang mengalami kekurangan energi tersebut. Desa tersebut juga sudah memiliki Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH) sendiri yang memiliki kapasitas maksimum sebesar 18kW. Akan tetapi, dikarenakan peningkatan penduduk sekitar yang meningkat secara pesat, maka diperlukannya sebuah peningkatan energi listrik dari pembangkit tersebut [1].

Oleh sebab itu, diterapkan sebuah konsep Pembangkit Listrik Tenaga Hibrid (PLTH) antara PLTMH dengan PLTS (Pembangkit Listrik tenaga Surya) dan Baterai. Penggunaan baterai dalam konsep hibrid ini bertujuan untuk dapat menjadi sumber daya cadangan untuk penduduk sekitar, jika kedua pembangkit tidak dapat beroperasi dengan benar. Selain itu baterai juga dapat diisi ulang dengan menggunakan energi yang diproduksi oleh kedua pembangkit.

Terlepas dari itu, digunakan juga grid AC yang menyambungkan antara kedua pembangkit. Oleh sebab itu baterai perlu dapat fleksibel untuk mengubah arus DC menjadi AC dan sebaliknya. Bi-directional inverter merupakan perangkat yang cocok untuk diintegrasikan bersama baterai untuk dapat mewujudkan fleksibilitas yang diinginkan.

Dalam permasalahan ini telah ditemukannya sebuah konsep untuk penanggulangan, tetapi diperlukan pendekatan bertahap untuk mencapai hasil akhir solusi ketika dilapangan. Penyusunan simulasi merupakan pendekatan yang mampu memberikan gambaran yang mendekati tujuan yang diinginkan. Keuntungan utama dari penyusunan simulasi terlebih dahulu sebagai landasan riset adalah untuk

memberikan gambaran dan kelayakan terhadap konsep yang diusulkan sebagai solusi.

II. KAJIAN TEORI

A. MATLAB Simulink

Simulink adalah aplikasi yang terintegrasi dalam MATLAB yang memungkinkan pengguna untuk merancang model simulasi sistem teknis. Simulink menggunakan diagram blok yang dapat disusun dan dikonfigurasi parameternya untuk menghasilkan sinyal dan data keluaran dinamis ketika simulasi sedang berjalan. Simulink juga menyediakan toolbox dan blokset yang memadai untuk menyiapkan konfigurasi sistem yang kompleks dalam pengujian oleh pengguna [2].

B. Boost Converter

Boost Converter adalah DC/DC converter yang menggunakan sistem Switch Mode Power Supply (SMPS). Converter ini digunakan untuk step-up tegangan keluaran yang lebih tinggi dibandingkan dengan tegangan sumber DC masukannya [3]. Penyusunan rangkaian ini menggunakan empat komponen utama, yaitu induktor, switch, dioda, dan kapasitor.

C. Buck Converter

Buck Converter adalah DC/DC converter yang memiliki fungsi yang berkebalikan dengan boost converter. Buck converter berfungsi untuk step-down sumber tegangan masukan menjadi tegangan keluaran tegangan yang lebih rendah. Sama seperti boost converter, buck converter menggunakan SMPS bertujuan untuk regulasi tegangan sistem menggunakan Pulse Width Modulation (PWM) generator pada switch [4].

D. Buck-Boost Converter

Buck-boost converter adalah perangkat elektronik yang memiliki fungsi gabungan antara buck converter dengan boost converter. Oleh sebab itu, buck-boost converter memiliki fungsi yang dapat mengubah suatu nilai tegangan menjadi nilai lebih besar atau lebih kecil, maka converter ini dapat disebut memiliki sifat yang fleksibel. Converter ini sering digunakan dalam pengaplikasian pembangkit sumber daya energi terbarukan [5].

E. Inverter

Inverter adalah perangkat elektronik yang mengubah arus searah (DC) menjadi arus bolak-balik (AC). Inverter bekerja dengan memotong arus DC menjadi beberapa bagian untuk dimodulasi menggunakan teknik Pulse Width Modulation (PWM) untuk menghasilkan gelombang AC [6]. Arus DC biasanya dihasilkan oleh Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan baterai, maka diperlukan sebuah inverter untuk mengubah arus DC tersebut menjadi arus AC yang dapat digunakan beban rumah tangga.

F. Rectifier

Rectifier adalah perangkat elektronik yang mengubah arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC). Rectifier menggunakan jembatan dioda dikarenakan komponen ini hanya dapat melewatkan arus yang mengalir satu arah (DC).

Dioda berfungsi sebagai switch yang dapat ON ketika arus positif, lalu OFF ketika arus bernilai nol [7]. Oleh sebab itu, rectifier dapat membantu untuk mengubah sumber tegangan yang bersifat AC, contohnya seperti keluaran Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro (PLTMH), menjadi arus DC untuk dapat menyimpan energi yang dihasilkan.

G. Baterai Lithium-Ion

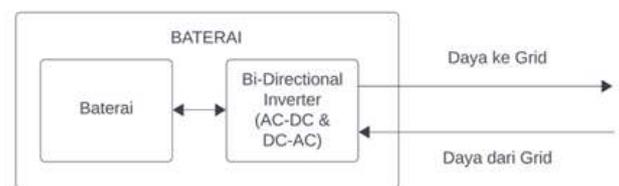
Baterai lithium ion adalah jenis baterai isi ulang yang menggunakan bahan aktif ion lithium. Keuntungan dari baterai ini adalah jangka umur yang dimiliki cukup panjang, serta tidak memiliki bahan yang membahayakan lingkungan. Kekurangan dari baterai ini adalah harga yang relatif tinggi di pasar, serta sensitif terhadap terjadinya overcharging [8].

III. PERANCANGAN SISTEM

A. Perancangan Desain Simulasi

Simulasi didesain dengan bantuan aplikasi Matlab/Simulink dengan cara penyusunan blok-blok elemen dan fungsi yang tersedia. Berdasarkan latar-belakang dan spesifikasi yang diinginkan, simulasi ini akan menjadi sebuah sistem konservasi baterai yang dapat charging dan discharging arus listrik. Terlepas dari itu, sistem ini juga diharapkan untuk mampu mengkonservasi sumber tegangan AC dan mendistribusi arus menuju load melalui grid AC. Hal tersebut dapat diwujudkan dengan penerapan bi-directional inverter pada sistem yang didesain.

B. Diagram Blok Sistem Konservasi Energi



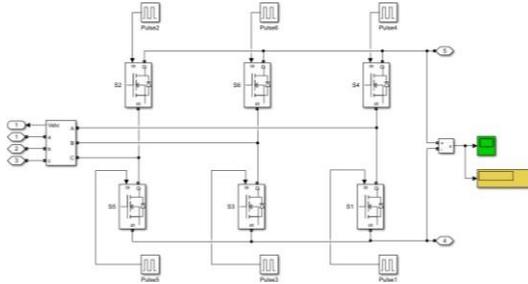
GAMBAR 1
Diagram Blok Sistem Konservasi Baterai

Gambar 1 adalah diagram blok yang dimiliki oleh sistem konservasi baterai. Berdasarkan diagram blok, baterai memiliki tidak memiliki input secara langsung yang memasuki baterai, melainkan baterai memiliki input daya dari grid AC. Daya grid AC awalnya akan diolah bi-directional inverter untuk diubah jenis arusnya dari AC menjadi DC, lalu menurunkan tegangan dari sumber grid tersebut agar bisa sesuai dengan tegangan baterai. Sebaliknya, keluaran dari sistem konservasi baterai adalah daya yang menuju grid. Keluaran ini diolah juga menggunakan bi-directional inverter yang akan mengubah arus DC baterai menjadi arus AC untuk grid, serta meningkatkan tegangan yang mengalir menuju grid.

C. Subsistem dan Kendali Sistem Konservasi Baterai

Sistem konservasi baterai memerlukan beberapa perangkat tersendiri dalam desainnya untuk dapat menjadi sebuah bi-directional inverter. Perangkat yang sangat penting dalam desain ini adalah buck-boost DC-DC converter, inverter, rectifier, dan baterai. Terlepas dari itu, diperlukan sebuah sistem kontrol yang dapat mengendalikan input yang telah diolah masing-masing subsistem untuk dapat menghasilkan nilai output yang diinginkan.

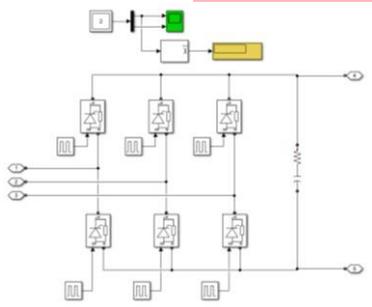
1. Desain Inverter



GAMBAR 2
Desain Rangkaian Inverter

Gambar 2 adalah desain akhir inverter sistem konservasi baterai yang telah disusun. Pada rangkaian ini, input arus DC baterai sebagai input, lalu outputnya adalah arus AC yang mampu memberikan energi menuju load melalui grid. Inverter menggunakan jembatan MOSFET untuk mengolah jenis arus DC yang masuk untuk dapat menjadi keluaran yang diinginkan.

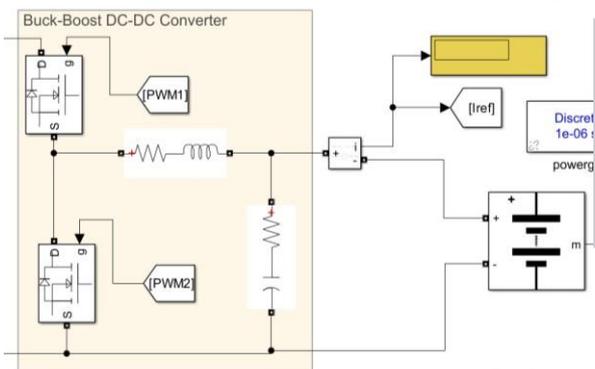
2. Desain Rectifier



GAMBAR 3
Desain Rangkaian Rectifier

Gambar 3 adalah rangkaian rectifier dari sistem konservasi baterai yang telah disusun. Rangkaian rectifier ini menunjukkan bahwa inputnya berasal dari grid tiga fasa, lagi akan menghasilkan keluaran arus DC yang tersambung ke baterai. Rectifier yang digunakan pada rangkaian ini menggunakan jembatan thyristor untuk mengubah arus AC menjadi arus DC.

3. Desain Buck-Boost Converter



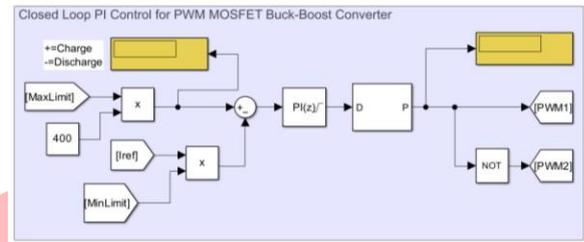
GAMBAR 4
Desain Rangkaian Buck-Boost Converter

Gambar 4 adalah rangkaian buck-boost DC-DC converter yang bertujuan untuk meningkatkan atau menurunkan tegangan input. Cara kerja buck-boost converter pada utamanya menggunakan saklar (MOSFET) yang pada kondisi ON

akan mengalirkan arus pada suatu sumber tegangan di dalam induktor dan dioda, lalu mengisi induktor, lalu ketika saklar dalam kondisi OFF, energi magnetik dalam induktor akan mengalir melalui kapasitor dan resistor.

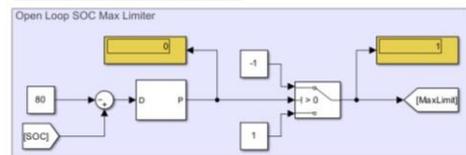
Dalam rangkain ini buck-boost DC-DC converter digunakan untuk penerapan mode discharging dan charging. Mode charging dan discharging dapat bertransisi secara otomatis tergantung pada input PWM dari MOSFET dengan bantuan sistem kendali PI closed loop. Iref merupakan keluaran nilai arus dari buck-boost DC-DC converter yang akan digunakan pada sistem kendali.

4. Sistem Kendali



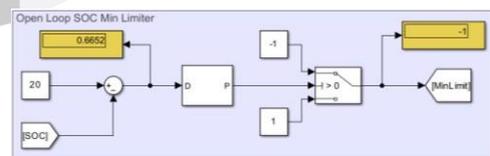
GAMBAR 5 Kendali PI Closed Loop Baterai

Gambar 5 adalah rangkaian sistem kendali PI closed loop yang digunakan untuk sistem konservasi baterai. Rangkaian memiliki nilai konstan yang diinginkan sebesar 400, lalu nilai konstan tersebut akan dibandingkan dengan keluaran Iref dari buck-boost converter sebagai input. Setelah Iref dibandingkan dengan nilai konstan, maka akan dilanjutkan menuju proses pengolahan keluaran PWM dengan bantuan kontrol PI dan PWM generator. Selanjutnya, Keluaran dari PWM1 dan PWM2 akan digunakan kembali sebagai input gate MOSFET dari buck-boost converter. Nilai konstan 400 adalah nilai arus yang ingin disesuaikan untuk dikeluarkan ataupun dimasukkan kedalam baterai.



GAMBAR 6
Kendali Open Loop Batas Maksimal

Gambar 6 adalah kendali open loop yang menggunakan input konstan bernilai 80. Hal tersebut dikarenakan baterai lithium ion ingin dibatasi batas maksimal pengisiannya sebesar 80%. Setelah itu, nilai keluaran untuk pembatasan sudah diperoleh, maka nilai tersebut akan dijadikan input perbandingan untuk kendali closed loop.

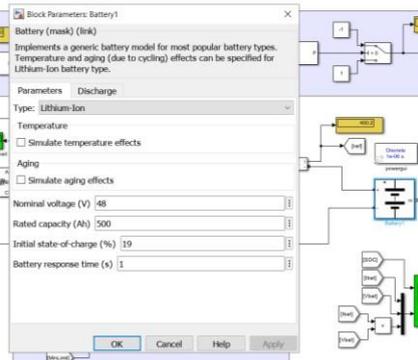


GAMBAR 7
Kendali Open Loop Batas Minimal

Gambar 7 adalah kendali open loop yang menggunakan input konstan bernilai 20. Hal tersebut dikarenakan baterai lithium ion ingin dibatasi batas minimum penghabisannya sebesar 20%. Setelah itu, nilai keluaran untuk pembatasan

sudah diperoleh, maka nilai tersebut akan dijadikan input perbandingan untuk kendali closed loop.

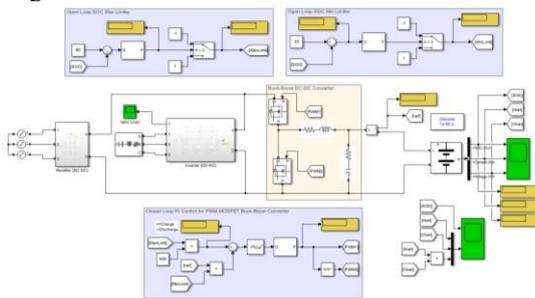
5. Baterai



GAMBAR 8 Parameter Baterai Lithium Ion

Gambar 8 adalah spesifikasi parameter yang ditentukan untuk menjalankan simulasi dengan simulink. Berdasarkan gambar tersebut baterai yang digunakan adalah baterai lithium-ion dikarenakan jangka umur yang panjang, ramah lingkungan, dan pemilihan spesifikasi kapasitas yang jauh lebih banyak di pasar. Nilai utama yang digunakan sebagai parameter adalah tegangan nominal yang bernilai 48V dan kapasitas rata-rata yang bernilai 500Ah.

D. Integrasi Sistem



GAMBAR 9 Integrasi Sistem Konservasi baterai

Gambar 9 adalah integrasi akhir dari seluruh perangkat yang bersangkutan untuk dapat menjalankan sistem konservasi baterai dengan optimal. Berdasarkan desain integrasi sistem, grid AC yang bernilai 240V dengan frekuensi 50Hz pada rangkaian ini akan mengalirkan arus AC melalui rectifier untuk dapat diubah menjadi arus DC, lalu disambungkan dengan buck-boost DC-DC converter untuk memberikan keluaran Iref untuk sistem kendali PI. Ketika baterai dalam kondisi charging, maka energi yang berasal dari grid AC akan menjadi sumber tegangan untuk mengisi baterai.

Hasil integrasi rangkaian juga terdapat perangkat inverter yang bertujuan untuk mengubah arus DC dari baterai menjadi arus AC untuk dapat diberikan kepada load. Load yang digunakan pada rangkaian percobaan ini memiliki daya sebesar 21kW, Vrms sebesar 385V, frekuensi sebesar 50Hz. Integrasi Inverter disambungkan dengan buck-boost DC-DC converter untuk dapat menjalankan kondisi discharging. Dalam kondisi discharging, baterai akan menjadi sumber tegangan yang akan mengalirkan daya menuju beban AC rumah tangga.

Perangkat inverter dan rectifier akan selalu tersambung dengan buck-boost DC-DC converter dikarenakan diperlukannya sebuah keluaran Iref yang menjadi input untuk sistem kendali PI, lalu diperlukannya pengolahan pengolahan tegangan yang sesuai dengan baterai. Grid AC memiliki tegangan sebesar 240V maka diperlukan kemampuan penurunan tegangan dari buck-boost, sebaliknya dikarenakan baterai memiliki tegangan sebesar 48V, maka diperlukan kemampuan peningkatan tegangan dari buck-boost untuk memberikan daya ke beban yang memiliki Vrms sebesar 385V.

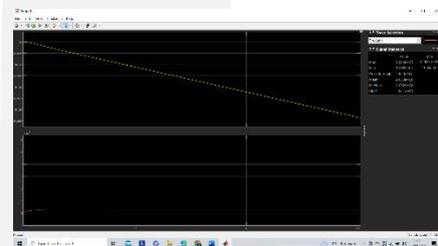
E. Pengujian

Sistem yang telah terintegrasi akan dilakukan beberapa pengujian untuk dapat memastikan kinerja dari sistemnya. Pengujian ini juga dilakukan untuk mengukur kemampuan dari baterai dalam kondisi-kondisi nya. Dalam pengujian ini, baterai akan dilakukan percobaan dalam kondisi charging dengan sumber AC terhadap waktu, lalu baterai akan dilakukan percobaan dalam kondisi discharging sebagai sumber untuk memasok beban dengan daya terhadap waktu.

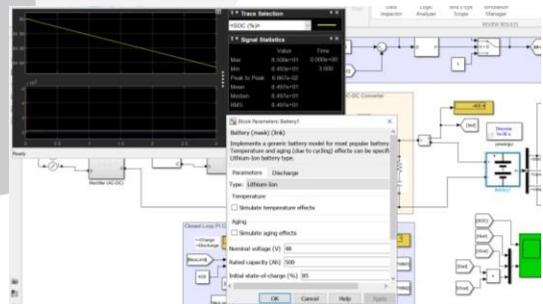
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian akan dilakukan dengan tujuan untuk memastikan kinerja kemampuan dari baterai untuk dapat charging menggunakan sumber AC dan discharging sebagai sumber untuk load AC rumah tangga. Setelah itu, akan dilakukan analisis dan pembahasan terhadap keluaran data dan sinyal yang telah diuji.

A. Pengujian Sistem Charging Baterai



GAMBAR 10 Sinyal Discharging Baterai dalam 1,5 Detik



GAMBAR 11 Sinyal Discharging Baterai dalam 3 Detik

TABEL 1 Discharging Baterai Terhadap Waktu

Discharging Baterai				
Waktu (s)	Kuat Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (W)	SOC (%)
0,5	400	51,44	20570	84,98

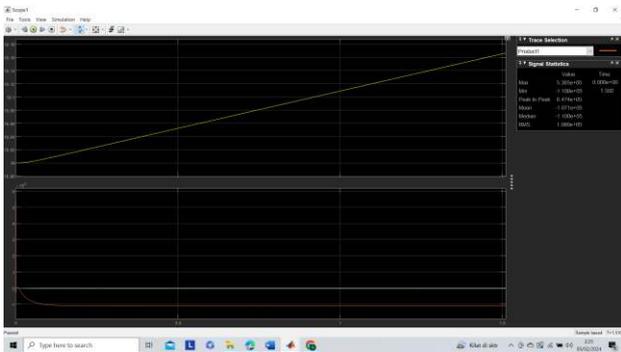
1	400	51,37	20550	84,97
1,5	400	51,34	20530	84,96
2	400	51,32	20530	84,95
2,5	400	51,31	20520	84,94
3	400	51,30	20520	84,93

Pengujian pertama dimulai dengan penentuan spesifikasi parameter yang diinginkan pada baterai. Pengujian discharging memiliki tujuan untuk mengetahui kemampuan baterai sebagai sumber yang memasok beban AC rumahtangga. Dalam Gambar 11, kondisi discharging baterai dalam kondisi 85% SOC (State of Charge), tegangan bernilai 48V, dan kapasitas rata-rata bernilai 500Ah.

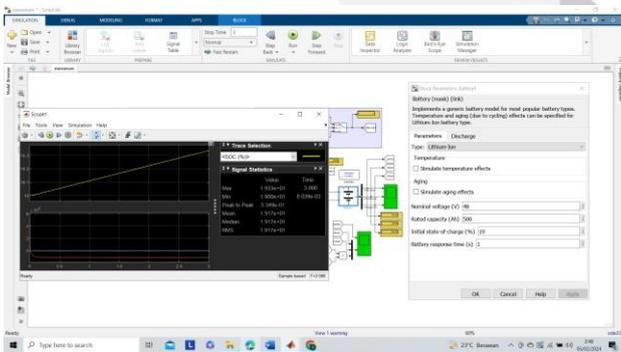
Berdasarkan tabel 1 kemampuan discharging baterai diuji dalam rentan waktu 0-3 detik. Data dan sinyal dari keluaran dapat dianalisis melalui blok scope yang terdapat pada simulink. Pengujian ini juga menggunakan nilai rata-rata dari kuat arus, tegangan, dan daya.

Dapat dianalisis bahwa nilai kuat arus sepanjang 3 detik bernilai 400. Hal ini dikarenakan sistem kendali closed loop yang memiliki nilai konstan sebesar 400. Selanjutnya untuk nilai tegangan, daya, dan SOC sepanjang 3 detik menurun, hal ini disebabkan karena nilai kapasitas rata-rata di dalam baterai yang terus menurun dikarenakan nilai kuat arus yang konstan. Maka, dalam waktu 3 detik kapasitas rata-rata yang terkuras dalam baterai akan berkurang sebanyak 0,07%.

B. Pengujian Sistem Discharging Baterai



GAMBAR 12 Sinyal Charging Baterai dalam 1,5 Detik



GAMBAR 13 Sinyal Charging Baterai dalam 3 Detik

TABEL 2 Charging Baterai Terhadap Waktu

Charging Baterai

Waktu (s)	Kuat Arus (A)	Tegangan (V)	Daya (W)	SOC (%)
0,5	-1893	53,24	-10110	19,05
1	-1963	53,68	-10550	19,11
1,5	-1986	53,88	-10710	19,17
2	-1998	53,98	-10790	19,22
2,5	-2005	54,05	-10840	19,28
3	-2009	54,10	-10880	19,33

Pengujian kedua akan dimulai juga dengan penentuan parameter pada baterai. Pengujian charging memiliki tujuan untuk mengetahui kemampuan baterai untuk dapat menerima daya dari sumber AC, serta mengetahui durasi sebuah baterai dapat terisi dalam sebuah rentan waktu. Gambar ... bertujuan untuk menentukan parameter yang akan digunakan dalam pengujian ini. Pengujian menggunakan parameter kondisi baterai sebesar 19% SOC, tegangan bernilai 48V, dan kapasitas rata-rata bernilai 500Ah. Bedanya dari pengujian sebelumnya adalah baterai dalam kondisi 19%, dalam kondisi ini baterai melalui kendali open loop akan mengirimbkan keluaran untuk closed loop yang akan charging baterai.

Berdasarkan tabel 2 kemampuan charging baterai diuji dalam rentan 0-3 detik. Sinyal dan data keluaran dari simulasi yang telah dijalankan dapat dianalisis menggunakan blok yang tersedia dari simulink. Pengujian yang dijalankan menggunakan nilai rata-rata yang telah dihitung otomatis oleh simulink.

Dapat dianalisis bahwa nilai kuat arus bernilai negatif, hal ini dikarenakan terdapat arus yang memasuki baterai, yaitu arus dari grid AC sebesar 240V yang telah diubah menjadi arus DC menggunakan rectifier. Dengan berubahnya nilai SOC yang meningkat, maka nilai kapasitas rata-rata di dalam baterai akan meningkat juga. Hal mengakibatkan peningkatan terhadap tegangan dan daya. Dalam rentan 3 detik, baterai mampu terpenuhi hingga 0,33%.

Dalam hasil pengujian terdapat suatu eror terhadap nilai kuat arus, hal tersebut karena dalam kendali closed loop telah ditentukan nilai konstan sebesar 400 untuk arusnya. Hal ini disebabkan karena terjadinya eror dalam kendali open loop pembatas minimumnya.

V. KESIMPULAN

Dapat disimpulkan melalui kedua pengujian yang telah dicoba bahwa bi-directional inverter yang telah diterapkan dapat berfungsi dengan benar untuk mengubah arus DC menjadi AC. Maupun arus AC menjadi arus DC. Pengujian pertama yang dicoba pada baterai mampu untuk discharging daya yang terdapat pada baterai kepada beban AC. Pengujian kedua juga mengindikasikan keberhasilan baterai untuk menerima sumber energi dari grid AC, namun terdapat sebuah eror dalam sistem kendalinya yang menyebabkan terjadi kuat arus yang berbeda dengan nilai konstan kendali closed loop yang telah ditentukan, solusi penanganannya adalah dengan mengatur kembali kendali open loop dari pembatasan minimum baterai. Terlepas dari itu, ketika baterai dalam kondisi discharging, baterai mampu mengeluarkan daya sebesar 0,07% SOC dalam 3 detik, serta

dalam kondisi charging, baterai mampu untuk menerima daya dari grid sebanyak 0,33% SOC dalam waktu 3 detik.

REFERENSI

- [1] "PLTMH Gunung Halu Terangi Warga di Perbukitan Bandung Barat." [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/pltmh-gunung-halu-terangi-warga-di-perbukitan-bandung-barat>
- [2] L. Nguyen, "MATLAB Simulink Simulation Platform for Photonic Transmission Systems," 2009. [Online]. Available: <http://www.SciRP.org/journal/ijcns/>
- [3] IEEE Power Engineering Society., IEEE Industry Applications Society., and IEEE Industrial Electronics Society., *Power System Conference, 2008. MEPCON 2008, 12th International Middle-East*. [IEEE], 2008.
- [4] M. S. Rahman, "Buck Converter Design Issues Master thesis performed in division of Electronic Devices," 2007.
- [5] A. Ajami, H. Ardi, and A. Farakhor, "Design, analysis and implementation of a buck-boost DC/DC converter," *IET Power Electronics*, vol. 7, no. 12, pp. 2902–2913, Dec. 2014, doi: 10.1049/iet-pel.2013.0874.
- [6] C. M. Liaw, Y. M. Lin, C. H. Wu, and K. I. Hwu, "Analysis, Design, and Implementation of a Random Frequency PWM Inverter," 2000.
- [7] H. R. E. Schadet, "Analysis of Rectifier Operation*." Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2016 4th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT): 25-27 May 2016*.
- [8]