RANCANG BANGUN *BATTERY MANAGEMENT SYSTEM* BERBASIS LiFePO4 UNTUK SISTEM *BACKUP* EMERGENSI DENGAN SUMBER PANEL SURYA PORTABLE DI KELURAHAN CAMPUREJO

Ali Khamdi Nur Fauzi*[1],Isac Ilham Akbar Habibi., S.ST.M.Tr.T[2]
[1,2]Program Studi Teknik Elektronika Kampus Kediri, Politeknik Negeri Malang, Indonesia
Email: [1]alikhamdi03@gmail.com, [2]@gmail.com

Nomor Handphone : 082228276986

Abstrak

Ketidakstabilan pasokan listrik di kawasan pedesaan seperti Desa Campurejo menuntut adanya sistem catu daya cadangan (emergency backup power) yang mandiri dan andal. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) portabel off-grid dengan baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO4) menawarkan densitas energi tinggi dan siklus hidup panjang, namun rentan mengalami kerusakan akibat overcharge, over-discharge, overcurrent, overtemperature, dan ketidakseimbangan sel. Penelitian ini merancang Battery Management System (BMS) cerdas berbasis mikrokontroler ESP32 untuk mengelola battery pack LiFePO4 konfigurasi 8S2P bertegangan nominal 25,6V dan kapasitas 100Ah (2400Wh). Sistem terintegrasi dengan panel surya portabel melalui Solar Charge Controller (SCC) MPPT 40A dan inverter Pure Sine Wave. BMS dilengkapi mekanisme proteksi relay, modul active cell balancing dinamis berbasis photorelay AQY282SX dan switched capacitor, serta instrumentasi presisi modul ADS1115 dan ACS758. Hasil pengujian menunjukkan sistem proteksi bekerja presisi memutus aliran arus saat sel mencapai batas overcharge (3,65V/sel) dan over-discharge (2,50V/sel) dengan waktu respon 110–125 ms. Sirkuit active cell balancing terbukti efektif menekan deviasi tegangan antarsel hingga di bawah 15 mV. Pengukuran tegangan dan arus mencatatkan galat rata-rata di bawah 1,3%. Uji ketahanan pada beban emergensi 300W membuktikan sistem mampu beroperasi mandiri secara kontinu selama lebih dari 7 jam, menjadikannya solusi cadangan energi darurat yang andal dan aplikatif.

.

Kata kunci: Active Balancing, Battery Management System (BMS), LiFePO4, Panel Surya Portabel.

Abstract

The instability of the electricity supply in rural areas such as Campurejo Village calls for a self-sufficient and reliable emergency backup power system. Portable off-grid solar power systems (PLTS) with Lithium Iron Phosphate (LiFePO4) batteries offer high energy density and a long service life, but are susceptible to damage caused by overcharging, over-discharging, overcurrent, overheating and cell imbalance. This research designs an intelligent Battery Management System (BMS) based on the ESP32 microcontroller to manage a LiFePO4 battery pack with an 8S2P configuration, a nominal voltage of 25.6 V and a capacity of 100 Ah (2400 Wh). The system is integrated with a portable solar panel via a 40A MPPT Solar Charge Controller (SCC) and a Pure Sine Wave inverter. The BMS is equipped with a relay protection mechanism, a dynamic active cell balancing module based on the AQY282SX photorelay and switched capacitors, as well as precision instrumentation using the ADS1115 and ACS758 modules. Test results show that the protection system operates with precision, cutting off the current flow when cells reach the overcharge limit (3.65 V/cell) and the over-discharge limit (2.50 V/cell) with

a response time of 110–125 ms. The active cell balancing circuit proved effective in reducing inter-cell voltage deviations to below 15 mV. Voltage and current measurements recorded an average error of less than 1.3 per cent. Endurance testing under a 300W emergency load demonstrated that the system is capable of operating autonomously and continuously for over 7 hours, making it a reliable and practical emergency energy backup solution.

Keywords: Active Balancing, Battery Management System (BMS), LiFePO4, Portable Solar Panel,

This work is an open access article and licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan sistem penyimpanan energi listrik yang andal semakin krusial guna menopang keberlangsungan operasional perangkat vital pada kondisi pemadaman listrik berkala maupun situasi tanggap darurat bencana. Berdasarkan data statistik kelistrikan nasional, sejumlah kawasan pinggiran masih mencatatkan durasi pemadaman listrik berkala rata-rata 4 hingga 6 jam per bulan akibat keterbatasan stabilitas jaringan transmisi. Kondisi tersebut menuntut ketersediaan sistem catu daya cadangan (emergency backup power) yang independen dan ramah lingkungan untuk menjamin kontinuitas suplai daya pada fasilitas pelayanan publik, posko darurat, serta perangkat komunikasi. Pemanfaatan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) portabel mandiri (off-grid) menjadi alternatif solusi terbaik untuk menghasilkan energi terbarukan secara mandiri.

Namun, sifat intermitensi energi matahari menuntut adanya media penyimpan energi elektrokimia yang efisien dan berumur pakai panjang. Baterai Lithium Iron Phosphate (LiFePO4) merupakan kandidat media penyimpan daya yang unggul karena memiliki stabilitas termal struktur olivin yang aman dari risiko thermal runaway, densitas energi tinggi, serta ketahanan siklus pengoperasian mencapai 2000–5000 siklus. Kendati demikian, baterai (LiFePO4) memiliki profil kurva karakteristik tegangan yang sangat landai pada rentang State of Charge (SoC) 10%–90% dan sangat sensitif terhadap kondisi pengoperasian ekstrem. Anomali operasional seperti pengisian berlebih (overcharge), pengosongan berlebih (over-discharge), arus berlebih (overcurrent), kenaikan temperatur drastis (overtemperature), serta deviasi tegangan antar sel (cell imbalance) dapat memicu degradasi kapasitas permanen hingga kegagalan fungsi katastrofik.

Guna menjamin keamanan dan optimalisasi pemanfaatan kapasitas baterai, integrasi Battery Management System (BMS) cerdas mutlak diperlukan. Penelitian terdahulu oleh Kumar dkk. mengonfirmasi bahwa penerapan BMS cerdas berbasis Internet of Things (IoT) pada sistem fotovoltaik mampu memperpanjang masa pakai baterai dan meningkatkan efisiensi pengisian. Selain itu, kajian Chen serta Ramaswamy menunjukkan bahwa metode ekualisasi aktif (active cell balancing) berbasis switched capacitor mampu memindahkan muatan antarsel secara dinamis dengan rugi-rugi daya yang jauh lebih rendah dibandingkan metode disipatif pasif. Namun, sebagian besar modul BMS komersial yang beredar di pasaran memiliki struktur tertutup (black-box), parameter ambang batas yang kaku, serta harga yang relatif tinggi untuk implementasi unit portabel skala rumah tangga.

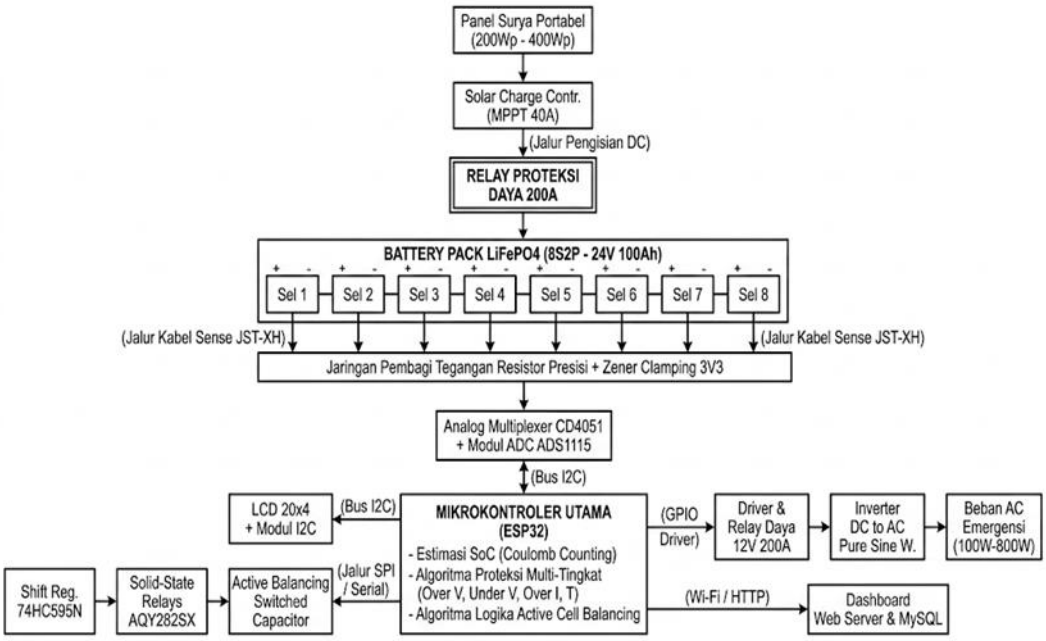
Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan sistem BMS cerdas berbasis mikrokontroler ESP32 untuk mengelola battery pack LiFePO4 berkonfigurasi 8S2P (tegangan nominal 25,6V; kapasitas 100Ah / 2400Wh). Sistem ini dirancang terpadu bersama pengisi daya MPPT 40A, inverter Pure Sine Wave, instrumentasi presisi tinggi (ADC ADS1115 16-bit, sensor arus ACS758, sensor temperatur), proteksi relay contactor, serta sirkuit active cell balancing dinamis berbasis photorelay AQY282SX. Pengujian kinerja dilakukan secara menyeluruh terhadap akurasi sensor, kecepatan respon pemutusan proteksi, pemerataan tegangan sel, hingga uji ketahanan beban emergensi riil di Kelurahan Campurejo.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan menggunakan metode Research and Development (R&D) yang terbagi dalam tahapan studi literatur, penentuan spesifikasi alat, perancangan skematik dan PCB, pemrograman logika firmware, integrasi sistem mekanik-elektrik, kalibrasi instrumen, serta pengujian performa sistem di laboratorium dan lapangan.

A. Arsitektur Sistem Perangkat Keras

Sistem catu daya portabel dirancang dalam satu kesatuan arsitektur modular yang mengintegrasikan unit masukan fotovoltaik, penyimpan energi baterai, subsistem proteksi, modul kendali, dan konversi daya AC. Diagram blok arsitektur sistem ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Sistem

Sumber energi diperoleh dari modul panel surya portabel yang dihubungkan ke Solar Charge Controller (SCC) tipe MPPT 40A untuk mengisi battery pack LiFePO4 8S2P. Tegangan individual tiap sel disadap menggunakan soket JST-XH dan diturunkan melalui jaringan pembagi tegangan resistor presisi (10 kΩ hingga 1,2 MΩ) dengan proteksi dioda Zener 3,3 V. Sinyal analog tersebut diseleksi bergantian oleh multiplexer analog CD4051 dan dikonversi menjadi data digital 16-bit oleh modul ADC ADS1115 melalui jalur I2C. Parameter arus dipantau menggunakan sensor efek Hall linier ACS758, sementara suhu sel baterai dimonitor melalui sensor suhu analog/digital. Mikrokontroler ESP32 bertindak sebagai pengendali utama yang mengeksekusi logika proteksi pada relay contactor, mengelola algoritma penyeimbangan muatan sel melalui register geser 74HC595N dan photorelay solid-state AQY282SX, menyajikan data pada LCD lokal.

B. Formulasi Matematis dan Algoritma Sistem

Pengukuran tegangan simpul (V_{tap_i}) melalui pembagi tegangan resistor dikonversi ke nilai tegangan riil berdasarkan rasio atenuasi:

$$V_{tap_i} = V_{adc} \times \left(\frac{R_{1_i} + R_2}{R_2}\right) \quad (1)$$

di mana V_{adc} adalah tegangan hasil konversi modul ADS1115, R_{1_i} merupakan nilai resistor sisi atas kanal ke-i, dan R_2 bernilai tetap 100kΩ. Tegangan diferensial individual masing-masing sel (V_{cell_i}) dihitung dari selisih tegangan simpul yang bersebelahan:

$$V_{cell_1} = V_{tap_1} \quad (2)$$

$$V_{cell_i} = V_{tap_i} - V_{tap_(i-1)} \quad \text{untuk } i = 2,3,\dots,8 \quad (3)$$

Deviasi tegangan sel maksimum dan minimum ditentukan melalui Persamaan (4):

$$\Delta V_{cell} = V_{max} - V_{min} \quad (4)$$

Sistem proteksi bekerja secara deterministik memutus relay daya utama apabila terpenuhi salah satu kondisi anomali batas kritis operasional berikut:

- Proteksi Overcharge: $V_{cell_i} \geq 3{,}65$ V atau $V_{total} \geq 29{,}2$ V.
- Proteksi Over-discharge: $V_{cell_i} \leq 2{,}50$ V atau $V_{total} \leq 20{,}0$ V.
- Proteksi Overcurrent: $|I_{load}| \geq 40$ A (atau kondisi lonjakan≥ 50 A) kontinu $>$ 500 ms).
- Proteksi Overtemperature: $T_{baterai} \geq 55^{\circ C}$.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Prototipe perangkat keras BMS diintegrasikan ke dalam boks panel kontrol portabel yang menampung baterai LiFePO4 8S2P, papan modul kontrol BMS, modul penurun tegangan XL7015, relay contactor, MPPT 40A, serta inverter gelombang sinus murni. Pada bagian perangkat lunak, antarmuka LCD lokal 16x2 menyajikan parameter tegangan, arus, temperatur, dan status proteksi secara bergantian. Pembacaan data telemetri secara real-time juga dipantau melalui terminal komunikasi serial.

3.1. Pengujian Kinerja Sistem Proteksi

Keandalan mekanisme keselamatan dievaluasi melalui simulasi gangguan terprogram guna mengukur akurasi deteksi dan waktu respon pemutusan relay daya utama. Hasil pengujian proteksi overcharge disajikan pada Tabel 1 dibawah ini:

Table 1. Hasil Pengujian Proteksi *Overcharge* ($\boldsymbol{V_{cell} \geq 3{,}65}$ V)

Kondisi Uji Sel	Tegangan Sel 5 (V)	Status Relay 40A	Respon Waktu (ms)	Keterangan
Normal Charging	3,380	Terhubung	-	Sistem mengisi
Mendekati Batas	3,648	Terhubung	-	Sistem mengisi
Batas Overcharge	3,652	Putus	125	Pemutusan Sukses
Pasca Pemutusan	3,630	Putus	-	Pengisian terhenti

Tabel 1. menunjukkan bahwa ketika tegangan Sel 5 menyentuh nilai 3,652V, sistem BMS secara otomatis memerintahkan pemutusan relay daya dengan waktu respon sebesar 125 ms. Pengujian proteksi batas bawah tegangan (over-discharge) dievaluasi dengan membebankan baterai hingga mencapai batas kritis pelepasan daya 2,50V. Hasil pengujian dirangkum pada Tabel dibawah ini:

Table 2. Hasil Pengujian Proteksi Over-discharge($\boldsymbol{V_{cell} \leq 2{,}50}$ V)

Kondisi Uji Sel	Tegangan Sel 2 (V)	Status Relay 40A	Respon Waktu (ms)	Keterangan
Normal Discharge	3,180	Terhubung	-	Sistem menyuplai
Mendekati Batas	2,510	Terhubung	-	Sistem menyuplai
Batas Over-discharge	2,495	Putus	110	Pemutusan Sukses
Pasca Pemutusan	2,750	Putus	-	Beban mati

Berdasarkan Tabel 2. diatas sistem proteksi berhasil memutus suplai beban saat tegangan Sel 2 turun hingga 2,495V dengan kecepatan respon 110 ms. Seluruh pengujian proteksi menunjukkan waktu respon di bawah 0,2 detik, memenuhi kriteria keselamatan operasional untuk mencegah degradasi sel

yang parah. Pengujian pada kondisi beban lebih membuktikan sirkuit memutus arus saat beban melampaui ambang batas batas kontinu 40A, serta memutus aliran daya saat sensor mendeteksi temperatur sel mencapai $55^{\circ C}$ guna mengantisipasi risiko kegagalan termal.

4. KESIMPULAN

Rancang bangun Battery Management System (BMS) cerdas berbasis mikrokontroler ESP32 untuk battery pack LiFePO4 8S2P (25,6V, 100Ah / 2400Wh) yang terintegrasi dengan sumber pengisian panel surya portabel melalui MPPT 40A telah berhasil direalisasikan dan berfungsi dengan keandalan operasional yang tinggi. Sistem proteksi multi-tingkat terbukti andal dalam menjaga keselamatan paket baterai melalui eksekusi pemutusan sirkuit secara otomatis pada kondisi overcharge (3,652V/sel) dan over-discharge (2,495V/sel) dengan waktu respon pemutusan yang sangat singkat, masing-masing 125 ms dan 110 ms.

Implementasi sirkuit active cell balancing dinamis berbasis photorelay AQY282SX dan switched capacitor secara efektif mampu mempertahankan deviasi tegangan antar sel di bawah 15 mV selama siklus pengisian berlangsung. Hasil pengujian performa riil di Kelurahan Campurejo menunjukkan bahwa sistem mampu menyediakan pasokan listrik darurat secara kontinu selama lebih dari 7 jam untuk menopang beban emergensi 300W, menegaskan kelayakan teknis alat ini sebagai solusi sistem cadangan energi mandiri yang aplikatif bagi masyarakat.

5. DAFTAR PUSTAKA

[1] PT PLN (Persero), Statistik PLN 2023, Jakarta: Sekretariat Perusahaan PT PLN (Persero), 2024.

[2] M. R. Al-Ghamdi and K. E. Addoweesh, "Development of a Standalone Portable Solar Power Station with Pure Sine Wave Inverter for Disaster and Rural Electrification," Applied Energy, vol. 345, p. 121350, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121350.

[3] J. A. Duffie and W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind, 5th ed., Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2020.

[4] T. Khatib and W. Elmenreich, Modeling of Photovoltaic Systems Using MATLAB: Simplified Green Codes, West Sussex, UK: John Wiley & Sons, 2016.

[5] J.-A. Magsumbol, M. Rosales, M. G. B. Palconit, and E. P. Dadios, "Lithium Iron Phosphate (LiFePO4) Battery Management System in Photovoltaic Applications: A Comprehensive Review," IEEE Access, vol. 11, pp. 88120–88139, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3298114.

[6] M. Ramaswamy, "Charge Shuttling: Cell Balancing for Parallel Li-Ion Packs," International Education & Research Journal (IERJ), vol. 10, no. 1, pp. 136–142, Jan. 2024.

[7] A. Kumar, S. R. Mohanty, and N. Kishor, "IoT-Enabled Smart Battery Management System for Residential Solar Storage Applications," IEEE Internet of Things Journal, vol. 11, no. 3, pp. 4110–4122, Feb. 2024, doi: 10.1109/JIOT.2023.3301290.

[8] H. Chen, "Research on Battery Pack Dynamic Equalization Technology with Improved Flying Capacitor," International Journal of Low-Carbon Technologies, vol. 16, no. 1, pp. 199–204, Jan. 2021, doi: 10.1093/ijlct/ctaa044.

[9] D. Andrea, Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs, Norwood, MA, USA: Artech House, 2010.

[10] S. Ghosh, T. Roy, and P. K. Sadhu, "Design and Real-Time Implementation of Coulomb Counting SoC Estimation for LiFePO4 Energy Storage Systems," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 72, pp. 1–11, 2023, doi: 10.1109/TIM.2023.3265112.

[11] M. H. Rashid, Power Electronics: Devices, Circuits, and Applications, 4th ed., Boston, MA, USA: Pearson, 2014.

[12] G. L. Plett, Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling, Norwood, MA, USA: Artech House, 2015.

[13] F. Harahap, D. S. Siregar, and N. P. Gultom, "Performance Evaluation of MPPT-Based Solar Charge Controller on Portable Photovoltaic Systems for Emergency Backup Power," International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), vol. 12, no. 3, pp. 1350–1360, Sep. 2022.

[14] X. Li, L. Rao, and Q. Yue, "Optimal Sizing and Energy Management of Standalone Photovoltaic-Battery Systems Considering Battery Degradation," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 13, no. 2, pp. 934–945, Apr. 2022, doi: 10.1109/TSTE.2021.3134327.

[15] R. Pratama, M. A. Wibowo, dan H. Suryo, "Rancang Bangun Sistem Monitoring Arus dan Tegangan Baterai Multi-Sel Berbasis ADC Eksternal 16-Bit ADS1115 dan Sensor ACS758," Jurnal Otomasi, Kontrol & Instrumentasi (JOKI), vol. 15, no. 1, pp. 45–56, Apr. 2023.

[16] D. S. Widiarso, E. Susanto, dan A. S. Wibowo, "Implementasi Internet of Things (IoT) pada Monitoring dan Proteksi Baterai Menggunakan Mikrokontroler ESP32," Jurnal Rekayasa Elektrika, vol. 18, no. 3, pp. 165–172, Des. 2022.

[17] CALB Co., Ltd., Product Specification of LiFePO4 Lithium Iron Phosphate Battery Cell 3.2V 50Ah (Model CA50), Luoyang, China: CALB Technical Documentation, 2021.