

Rancang Bangun Sistem Monitoring dan Pengendalian Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terintegrasi dengan Charging Station Berbasis Metode PID menggunakan MPPT

Bilal Mubasyir Fahkri Raihan¹, Ir. Ridwan, S.ST., [M.Tr.](#)², Dr. Iman Fahrudi, S.T., M.T.³, Illa Aryeni, S.T., M.T.⁴

^{1,2,3,4} Program Studi Teknologi Rekayasa Elektronika, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Batam, Batam, Indonesia

Email penulis : bilalmubasyir.fr@gmail.com,

Abstrak

Peningkatan kebutuhan listrik mendorong transisi ke energi terbarukan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), namun fluktuasi daya panel surya memerlukan sistem pengaturan pengisian baterai yang efisien dan terpantau secara real-time. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun sistem konverter daya Buck Converter mandiri yang dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 menggunakan metode PID untuk menjaga stabilitas pengisian baterai Lead-Acid 6V serta integrasi monitoring berbasis Internet of Things (IoT). Metode penelitian meliputi perancangan perangkat keras menggunakan MOSFET IRF3205 dan driver IR2104, serta pengembangan perangkat lunak yang mengimplementasikan algoritma kendali PID dengan Median Filter untuk mereduksi derau sensor. Penelitian ini mengimplementasikan metode kendali hibrida (Hybrid Control) yang menggabungkan algoritma MPPT Perturb and Observe (P&O) untuk optimalisasi daya panel surya dan kendali PID sebagai pembatas arus (Current Limiter). Hasil pengujian menunjukkan pembacaan sensor arus (INA219) cukup stabil dengan rata-rata error sekitar 0,26%. Algoritma PID berhasil menjaga stabilitas arus pada setpoint 1300 mA (fase Bulk) dan 800 mA (fase Absorption) secara presisi dengan steady-state error hanya 2–4 mA serta overshoot di bawah 1,8%. Otomatisasi transisi fase pengisian bekerja akurat berdasarkan ambang batas tegangan 6,62V dengan fitur keselamatan cut-off pada 6,90V. Sistem manajemen termal dan antarmuka web dashboard juga berfungsi optimal untuk pemantauan kinerja sistem secara jarak jauh.

Kata kunci: Solar Charge Controller, MPPT, Kendali PID, ESP32, Internet of Things.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan populasi manusia. Ketergantungan terhadap energi fosil yang tidak terbarukan berisiko menimbulkan dampak lingkungan negatif, sehingga mendorong peralihan ke sumber energi terbarukan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Namun, karakteristik daya keluaran panel surya bersifat fluktuatif karena sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari, arah penyinaran, dan suhu lingkungan.

Solar Charge Controller (SCC) berperan penting dalam mengontrol pengisian daya dari panel surya ke baterai. Tipe SCC konvensional berbasis Pulse Width Modulation (PWM) memiliki efisiensi konversi yang relatif rendah. Sebaliknya, tipe Maximum Power Point Tracking (MPPT) mampu mengoptimalkan penyerapan daya secara maksimal. Kendati demikian, SCC pabrikan umumnya memiliki parameter terisolasi (black-box). Oleh karena itu, penelitian ini merancang Buck Converter mandiri (custom-built) yang dikendalikan oleh mikrokontroler ESP32 menggunakan metode kendali hibrida (Hybrid Control).

Metode kendali hibrida ini menggabungkan algoritma MPPT Perturb and Observe (P&O) untuk pencarian titik daya maksimum dan kendali Proportional-Integral-Derivative (PID) yang berfungsi sebagai pembatas arus (Current Limiter). Pengendali PID mengatur duty cycle MOSFET IRF3205 secara linier dan dinamis.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Karakteristik Modul PV dan MPPT P&O

Daya keluaran modul *Photovoltaic* (PV) bersifat non-linear dan dipengaruhi oleh tingkat iradiansi serta suhu lingkungan. Untuk memaksimalkan penyerapan energi, dibutuhkan metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Algoritma *Perturb and Observe* (P&O) digunakan karena strukturnya yang sederhana dan efisien. Algoritma ini bekerja dengan memberikan variasi *duty cycle* (ΔD) secara periodik dan mengamati perubahan daya (ΔP) serta tegangan (ΔV) untuk mengarahkan sistem ke titik daya maksimum (P_{max}).

2.2 Topologi Buck Converter dan IR2104 Gate Driver

Buck Converter berfungsi menurunkan tegangan masukan DC dari modul PV ke level tegangan pengisian baterai. Komponen utamanya meliputi MOSFET IRF3205 ($R_{ds(on)} = 8 \text{ m}\Omega$), Induktor Toroid $100 \mu\text{H}$, dan Dioda *Schottky* SR5100. Untuk mengendalikan pemunculan *gate* MOSFET *high-side*, digunakan IC *Gate Driver* IR2104 dengan teknik *bootstrapping* (Dioda 1N4148 dan Kapasitor $1 \mu\text{F}$) agar menghasilkan tegangan V_{gs} yang stabil.

2.3 Kendali PID Current Limiter

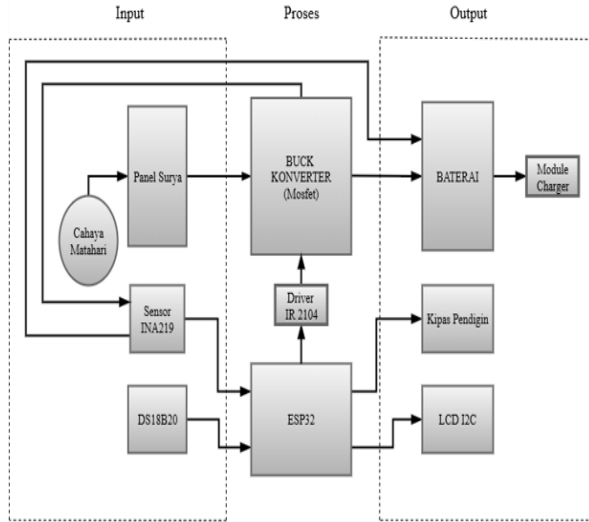
Algoritma PID (*Proportional-Integral-Derivative*) diterapkan sebagai pembatas arus (*Current Limiter*) untuk mencegah lonjakan arus (*overcurrent*) yang dapat merusak baterai. Berdasarkan galat arus ($e[k] = I_{\text{setpoint}} - I_{\text{aktual}}$), PID memproses kombinasi aksi Proporsional (K_p) untuk mempercepat respon, Integral (K_i) untuk mengeliminasi *steady-state error*, dan Derivatif (K_d) untuk meredam *overshoot*, sehingga arus pengisian tetap stabil pada target yang ditentukan.

3. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian mencakup perancangan hardware konverter daya, perancangan software kendali hibrida, perakitan, dan pengujian laboratorium.

3.1 Arsitektur Sistem dan Perangkat Keras

Sistem Perancangan ini terdiri dari tiga blok utama:



Gambar 3.1 Desain Sistem

Arsitektur keras terdiri dari Panel Surya (12–21V), Buck Converter mandiri, mikrokontroler ESP32, sensor daya INA219, sensor suhu DS18B20, serta baterai Lead-Acid 6V. MOSFET IRF3205 dipicu oleh Gate Driver IR2104 dengan teknik bootstrapping (dioda 1N4148 dan kapasitor 1μF) untuk mengendalikan penyakelaran sisi tinggi (High-Side).

3.2 Strategi Kendali Hibrida (Hybrid Control)

Algoritma utama beroperasi berdasarkan komparasi antara arus aktual (I_{aktual}) dan arus target (I_{setpoint}):

- Mode MPPT (P&O):** Aktif jika $I_{\text{aktual}} < I_{\text{setpoint}}$. Algoritma memberikan penambahan/pengurangan *duty cycle* (ΔD) secara sistematis berdasarkan gradien $\Delta P / \Delta V$ untuk melacak titik P_{max} .
- Mode PID Current Limiter:** Aktif jika $I_{\text{aktual}} \geq I_{\text{setpoint}}$. Kontroler PID mengambil alih kendali PWM untuk membatasi lonjakan arus dengan persamaan:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

3.3 Manajemen Pengisian 3-Tahap dan Filtering

Tahapan pengisian baterai *Lead-Acid* 6V diatur secara terstruktur:

- Bulk Stage:** $V_{\text{bat}} < 6,62 \text{ V} \rightarrow I_{\text{setpoint}} = 1300 \text{ mA}$.
- Absorption Stage:** $6,62 \text{ V} \leq V_{\text{bat}} < 6,90 \text{ V} \rightarrow I_{\text{setpoint}} = 800 \text{ mA}$.
- Full / Cut-off:** $V_{\text{bat}} \geq 6,90 \text{ V} \rightarrow I_{\text{setpoint}} = 0 \text{ mA}$ (PWM = 0).

Data mentah arus dari sensor INA219 diproses menggunakan **Median Filter** dengan *window size* 10

sampel guna menghilangkan *spike noise* akibat frekuensi *switching* PWM.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengujian Kalibrasi dan Akurasi Sensor

Pengujian akurasi pembacaan sensor INA219 dibandingkan terhadap pembanding standar Multimeter Digital Fluke. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata galat (error) pembacaan sebesar 0,26%, yang membuktikan bahwa pemrosesan Median Filter berhasil mempertahankan presisi pembacaan data tanpa delay kritis.

4.2 Pengujian Respon Transien Kendali PID

Pengujian performa kendali PID dilakukan pada dua skenario *setpoint* arus pengisian:

- Parameter Respon Fase Bulk ($I_{\text{target}} = 1300 \text{ mA}$):**

- Rise Time (t_r):** Mampu dicapai dalam waktu $\approx 1,2$ detik.
- Overshoot:** Mampu diredam hingga $< 18\%$ saat kondisi transisi awal.
- Steady-State Error (e_{ss}):** Tercatat hanya sebesar 15,0 mA atau setara dengan $< 1,5\%$.

- Parameter Respon Fase Absorption ($I_{\text{target}} = 800 \text{ mA}$):**

- Rise Time (t_r):** Mampu dicapai dalam waktu $\approx 1,1$ detik.
- Overshoot:** Mampu diredam hingga $< 15\%$.
- Steady-State Error (e_{ss}):** Tercatat sebesar 10,0 mA atau setara dengan $< 1,25\%$

4.3 Pengujian Transisi Pengisian dan Sistem IoT

Sistem berhasil melakukan transisi pengisian secara otomatis dari *Bulk* ke *Absorption* saat tegangan baterai menyentuh 6,62 V. Ketika baterai penuh ($V_{\text{bat}} \geq 6,90 \text{ V}$), *duty cycle* diputus secara total (0%) sehingga proses pengisian berhenti aman. Pemantauan parameter seperti V_{PV} , I_{charge} , SoC, dan suhu berjalan stabil pada *web dashboard* berbasis IoT.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan perancangan, pengujian, dan analisis data yang telah dilakukan pada sistem pengkondisi daya PLTS berbasis *Hybrid Control*, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama:

- Keberhasilan Rancang Bangun Hardware:**

Rangkaian *Buck Converter* mandiri (*custom design*) terintegrasi mikrokontroler ESP32 dan *Gate Driver* IR2104 berhasil dibangun dan berfungsi optimal menggantikan *Solar Charge Controller* (SCC) konvensional. Rangkaian mampu menahan beban pengisian baterai dengan efisiensi konversi yang stabil.

2. Efektivitas Pemrosesan Sinyal Digital:

Penerapan algoritma *Median Filter* dengan *window size* 10 sampel terbukti sangat efektif menekan *spike noise* dan interosilasi akibat frekuensi *switching* PWM pada sensor INA219. Hal ini dibuktikan dengan tingkat akurasi pembacaan arus dan tegangan yang presisi dengan rata-rata galat (*error*) hanya sebesar **0,26%**.

3. Performa Kendali Hibrida (MPPT P&O dan PID Limiter):

- Integrasi metode kendali hibrida bekerja secara transisi otomatis tanpa kendala: **Mode MPPT (P&O)** berhasil mengekstrak daya puncak dari panel surya saat kondisi arus belum mencapai ambang batas.
- **Mode PID Current Limiter** mampu membatasi dan menstabilkan arus pengisian dengan *rise time* yang cepat ($\approx 1,1 - 1,2$ detik) dan nilai *overshoot* di bawah 18%.
- Kinerja kondisi tunak (*steady-state*) kontroler PID sangat presisi, ditunjukkan oleh *steady-state error* sebesar **15,0 mA** ($< 1,5\%$) pada fase *Bulk* (1300 mA) dan **10,0 mA** ($< 1,25\%$) pada fase *Absorption* (800 mA).

4. Otomatisasi Sistem Proteksi dan Monitoring:

Logika manajemen pengisian 3-tahap (*Bulk*, *Absorption*, dan *Cut-off*) berjalan 100% sesuai perancangan, di mana arus diputus total saat tegangan baterai menyentuh 6,90 V untuk mencegah *overcharging*. Proteksi termal histeresis berbasis sensor DS18B20 ($T \geq 45^\circ\text{C}$) serta sistem pemantauan *real-time* via *web dashboard* IoT terintegrasi dengan lancar tanpa koneksi terputus.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] X. Wu, J. Hu, J. Lu, and J. Lin, "Application of PID control in battery charging process based on particle swarm optimization," *Journal of Power Electronics*, vol. 11, no. 4, pp. 520-526, 2011.
- [2] D. Hidayanti, R. Nugraha, and S. Santoso, "Optimization of solar panel output power using single axis tracker and PID-controlled MPPT," *Journal of Renewable Energy*, 2021.
- [3] Pamuji, F. A., Waskito, I. S., Suryoatmojo, H., Sudarmanta, B., Effendi, M. K., & Arumsari, N. (2023). Design and implementation of 3 phase inverter for brushless DC motor using six-step commutation method with ripple suppression. *Przegląd Elektrotechniczny*, 99.
- [4] Suyanto and B. Hermanto, "Comparison of PWM and MPPT solar charge controllers for battery charging efficiency," *Journal of Electrical Power*, vol. 12, no. 1, 2019.
- [5] N. Raharja and T. Sutikno, "Implementation of Bisection MPPT with Interleaved Boost Converter for battery charging," *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 2021.
- [6] S. Kumar and R. Mittal, "Design of Buck DC-DC Converter for portable electric vehicle charging applications," *Energy Reports*, vol. 9, 2023.
- [7] DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer," Datasheet, 2019.
- [8] Toar, H., Alfi, W., Aryeni, I., Prebianto, N. F., Maulidiah, H. M., Nasution, M. K. A., & Tomas, M. (2025). Implementasi Algoritma PID untuk Pengontrolan Suhu Pada Mesin Pengering Cabai. *Journal of Applied Electrical Engineering*, 9(1), 72-81.
- [9] International Rectifier, "IR2104 High and Low Side Driver," Datasheet, 2005.