

Thomas Budiarto, Irsyad Nashirul Haq, Justin Pradipta, Edi Leksono, Putu Handre Kertha Utama, Trendy Prima Wijaya, Robi Sobirin, Muhammad Farhan Rasyidnianto, Sisqina Ummi Sukmawati, Angga Indra Putra, Frans Edison, Timothy Taro Tarigan.

Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung

Abstrak

Sistem Penyimpanan Energi Baterai (SBPE) membutuhkan pemodelan parameter internal yang akurat, khususnya Open Circuit Voltage (OCV) berkaitan dengan kapasitas energi baterai. Untuk mengatasi tantangan nonlinieritas dan hysteresis pada karakteristik OCV, penelitian ini menerapkan pendekatan data-driven yang dengan informasi berbasis prinsip fisika (physics-informed) pada data time-series baterai LFP uji. Rekayasa fitur dilakukan dengan mengintegrasikan variabel fisik seperti OCV rekonstruksi dan energi baterai sebagai masukan untuk model pembelajaran mendalam (DNN, RNN, LSTM). Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan fitur physics-informed meningkatkan akurasi prediksi, dengan model RNN mencatat performa terbaik ($R^2 = 0.98$, MAPE = 4.08%). Model OCV yang dikembangkan kemudian diintegrasikan dan divisualisasikan dalam prototipe Digital Twin SBPE, yang menampilkan parameter penting seperti SoC dan tegangan, ringkasan arus serta power. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan physics-informed data-driven efektif dalam memodelkan dinamika OCV dan mendukung pengembangan digital twin untuk analisis dan pemantauan SBPE.

Keyword: SBPE, Digital Twin, Estimasi SoC, OCV, Hysteresis.

Pendahuluan

Masalah: Metode pengukuran langsung (sensor) rentan gangguan lingkungan, sedangkan model analitik murni sulit beradaptasi pada kondisi degradasi.

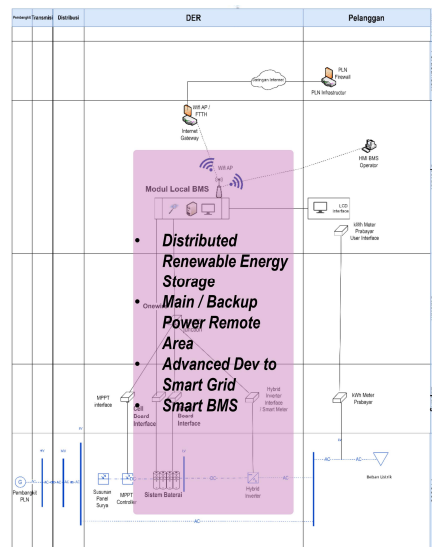
Tujuan: Mengembangkan model data-driven yang diperkaya prinsip fisika (physics-informed) untuk estimasi SoC yang presisi dan mengimplementasikannya ke dalam Digital Twin.

Metodologi Penelitian

Penelitian ini menerapkan metode Physics-Informed Data-Driven Modelling yang mengintegrasikan pembelajaran mesin dengan prinsip-prinsip dasar fisika untuk estimasi OCV dan hysteresis tegangan baterai. Tahapan pelaksanaan riset terdiri dari:

1. Eksperimen & Akuisisi Data: Dilakukan pengujian siklus charge-discharge pada Sistem Baterai Penyimpanan Energi (SBPE) untuk mengakuisisi data operasional mencakup tegangan terminal, arus, temperatur, dan State of Charge (SoC) secara real-time.
2. Pengembangan Model (Physics-Informed): Membangun model berbasis data menggunakan algoritma Deep Learning (khususnya Long Short-Term Memory / LSTM) yang dirancang untuk menangkap ketergantungan jangka panjang (long-term dependencies) pada fenomena hysteresis baterai, yang sulit dimodelkan secara analitik konvensional.

3. Pelatihan & Evaluasi Model: Data eksperimen dibagi untuk proses pelatihan (training) dan pengujian (testing). Kinerja model dievaluasi berdasarkan deviasi kesalahan (error deviation) antara prediksi model dan data pengukuran aktual untuk memastikan akurasi estimasi.



Gambar 1. Konteks Smart BMS dalam ekosistem energi terbarukan.

4. Implementasi Digital Twin: Model yang telah divalidasi diintegrasikan ke dalam arsitektur Microgrid Digital Twin berbasis Big Data Platform. Proses ini memungkinkan simulasi dan pemantauan kondisi baterai secara real-time pada lapisan operasi jaringan cerdas (Smart Grid Architectural Model).



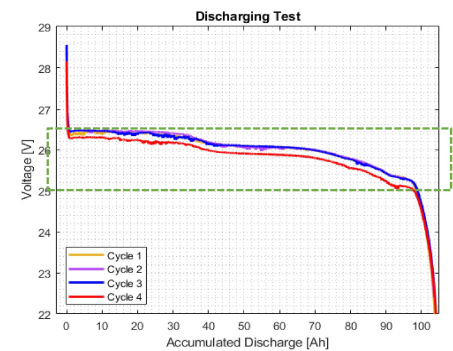
Gambar 2. Sarana eksperimen

Hasil & Diskusi

Analisis Fitur: Ditemukan bahwa arus listrik memiliki korelasi lemah dengan SoC, sedangkan fitur fisika (OCV dan Energi) memiliki korelasi sangat kuat, meningkatkan sensitivitas model terhadap perubahan kapasitas.

Performa Model: Pada pengujian validasi dengan profil arus dinamis, algoritma RNN unggul dibandingkan DNN dan LSTM.

Implementasi Digital Twin: Model berhasil diintegrasikan ke dashboard pemantauan. Platform menampilkan status real-time per modul (Tegangan, SoC).



Gambar 3. Data hasil uji baterai

Kesimpulan

Pendekatan Physics-Informed (menggunakan OCV dan Energi sebagai fitur) telah diterapkan untuk mendukung fungsi estimasi SoC baterai, yang dikombinasikan dengan algoritma RNN untuk menangani dinamika beban baterai yang fluktuatif. Implementasi model pada Digital Twin SBPE dilakukan untuk menguji pendekatan ini dalam pemantauan sistem energi cerdas di lingkungan operasional.



Gambar 4. Antarmuka Digital Twin SBPE - Laboratorium Manajemen Energi, Teknik Fisika, ITB