

ABSTRAK

Penetrasi *variable renewable energy* (VRE) terus meningkat seiring dengan komitmen global terhadap transisi energi berkelanjutan. Namun, sifat *intermittent* dari VRE memunculkan tantangan baru dalam operasi dan perencanaan sistem tenaga, terutama dalam menjaga keseimbangan antara beban dan pembangkitan. Penetrasi VRE yang tinggi ke dalam jaringan sistem tenaga listrik dapat menyebabkan perubahan kebutuhan kapasitas *ramping* sistem. Kapasitas *ramping* sistem ini merupakan salah satu indikator penting fleksibilitas sistem tenaga listrik untuk mendukung penetrasi VRE yang tinggi. Untuk mendukung kebutuhan fleksibilitas tersebut, salah satu solusi yang dapat diterapkan adalah integrasi teknologi *battery energy storage system* (BESS). Meskipun demikian, implementasi BESS menghadapi masalah berupa degradasi baterai yang sering terabaikan dalam perencanaan BESS. Aspek degradasi baterai yang tidak dipertimbangkan dalam perencanaannya dapat mengakibatkan kapasitas dan efisiensi yang menurun, biaya operasional yang lebih tinggi, dan masa pakai baterai yang lebih pendek. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan optimasi ukuran dan lokasi BESS yang tidak hanya mempertimbangkan fleksibilitas sistem, tetapi juga aspek degradasi baterai guna mendukung penetrasi VRE. Penelitian disertasi ini bertujuan untuk mengembangkan model degradasi baterai berbasis *data-driven* menggunakan *artificial neural network* (ANN) yang diinterpretasikan ke dalam persamaan regresi polinomial orde dua. Model ini dirancang untuk menangkap sifat nonlinear degradasi baterai berdasarkan parameter seperti *state of charge* (SOC) dan *depth of discharge* (DOD). Model degradasi ini kemudian diintegrasikan ke dalam optimasi ukuran dan lokasi BESS menggunakan *mixed integer linear programming* (MILP) dengan prosedur *unit commitment* (UC) *direct current optimal power flow* (DC-OPF). Studi kasus dilakukan pada sistem kelistrikan Lombok, yang memiliki potensi VRE tinggi di Indonesia. Sistem kelistrikan Lombok memiliki total kapasitas pembangkit terpasang sebesar 486,69 MW, dengan beban puncak pada tahun 2023 mencapai 358 MW. Penelitian disertasi ini mengevaluasi tiga skema optimasi: (1) tanpa penggunaan BESS atau sebagai *baseline*, (2) menggunakan BESS berbasis *second-life battery* (SLB) tanpa model degradasi baterai, dan (3) menggunakan BESS berbasis SLB dengan model degradasi baterai yang diusulkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa skema kedua dan ketiga secara signifikan dapat meningkatkan penetrasi maksimum VRE hingga 67%, dibandingkan dengan skema *baseline* yang hanya 6,28%. Total kapasitas optimal BESS berbasis SLB untuk *rating* energi 1746,22 MWh dan *rating* daya 150,07 MW, yang ditempatkan di bus GI Kuta sebagai solusi strategis untuk meningkatkan fleksibilitas sistem tenaga listrik. Penggunaan BESS berbasis SLB juga mampu mengurangi total biaya sebesar 13,18% dibandingkan dengan skema *baseline*. Hal ini menegaskan bahwa integrasi BESS berbasis SLB secara efektif dapat mendukung penetrasi VRE. Selain itu, model degradasi baterai yang diusulkan juga memiliki performa yang sangat baik, dengan nilai *mean absolute percentage error* (MAPE) sebesar 0,75% lebih rendah dibandingkan dengan model regresi polinomial 1,12% dan *R-squared* sebesar 0,98 yang nilainya sama dengan regresi polinomial. Nilai MAPE yang rendah menunjukkan tingkat kesalahan prediksi yang minimal, sementara *R-squared* yang tinggi menunjukkan adanya korelasi yang kuat antara parameter seperti SOC dan DOD dengan degradasi baterai. Penerapan model degradasi ini juga terbukti memperpanjang masa pakai BESS hingga 16 tahun, yang memberikan manfaat teknis berupa pengurangan frekuensi penggantian baterai. Secara keseluruhan, hasil penelitian disertasi ini memberikan kontribusi nyata dalam optimasi ukuran dan lokasi BESS dengan mempertimbangkan model degradasi baterai yang akurat. Pendekatan ini mampu meningkatkan penetrasi VRE ke dalam jaringan sistem tenaga listrik, mengoptimalkan masa pakai baterai, dan mendukung transisi energi berkelanjutan melalui implementasi sistem penyimpanan energi yang lebih efisien.

Kata kunci: *variable renewable energy*, *intermittent*, *battery energy storage system*, fleksibilitas, degradasi baterai, *mixed integer linear programming*, *unit commitment*, *direct current optimal power flow*.

ABSTRACT

The penetration of variable renewable energy (VRE) continues to rise, driven by global commitments to a sustainable energy transition. However, the intermittent nature of VRE introduces new challenges in power system operations and planning, particularly in maintaining the balance between load and generation. High VRE penetration in power grids significantly alters the system's ramping capacity requirements, which serve as a critical indicator of the power system's flexibility to accommodate high VRE levels. To address these flexibility needs, integrating battery energy storage systems (BESS) has emerged as a potential solution. Nonetheless, the implementation of BESS is often hindered by battery degradation, a factor frequently overlooked in BESS planning. Neglecting battery degradation can result in reduced capacity and efficiency, higher operational costs, and shorter battery lifespan. Therefore, an optimized approach to sizing and locating BESS is essential, considering both system flexibility and battery degradation to support VRE penetration. This dissertation aims to develop a data-driven battery degradation model using artificial neural networks (ANN), interpreted into a second-order polynomial regression equation. The model captures the nonlinear nature of battery degradation based on parameters such as state of charge (SOC) and depth of discharge (DOD). This degradation model is integrated into the optimization of BESS sizing and placement using mixed-integer linear programming (MILP) with a unit commitment (UC) direct current optimal power flow (DC-OPF) procedure. A case study was conducted on the Lombok power system, which has significant VRE potential in Indonesia. The Lombok power system features a total installed capacity of 486.69 MW, with a peak load of 358 MW in 2023. The dissertation evaluates three optimization schemes: (1) baseline without BESS, (2) second-life battery (SLB)-based BESS without a degradation model, and (3) SLB-based BESS incorporating the proposed degradation model. Results reveal that the second and third schemes significantly increase maximum VRE penetration to 67%, compared to only 6.28% in the baseline scenario. The optimal SLB-based BESS capacity comprises 1746.22 MWh energy rating and 150.07 MW power rating, strategically located at the Kuta GI bus to enhance power system flexibility. The use of SLB-based BESS also reduces total costs by 13.18% compared to the baseline scheme, underscoring its effectiveness in supporting VRE penetration. Moreover, the proposed battery degradation model demonstrates excellent performance, with a mean absolute percentage error (MAPE) of 0.75%, lower than the conventional regression model (1.12%), and an R-squared value of 0.98, comparable to the conventional regression model. The low MAPE indicates minimal prediction error, while the high R-squared signifies a strong correlation between parameters such as SOC and DOD with battery degradation. Implementing this degradation model extends the BESS lifespan to 16 years, providing technical benefits by reducing battery replacement frequency. Overall, the findings of this dissertation offer a substantial contribution to optimizing BESS sizing and placement, incorporating an accurate battery degradation model. This approach enhances VRE penetration into power grids, optimizes battery lifespan, and supports a sustainable energy transition through more efficient energy storage systems.

Keywords: variable renewable energy, intermittency, battery energy storage system, flexibility, battery degradation, mixed integer linear programming, unit commitment, direct current optimal power flow.