

ABSTRAK

Penelitian ini membahas strategi operasi sistem tenaga listrik dengan kondisi beberapa PLTU mengalami *early retirement*. Terdapat dua cara *retirement* yaitu penggantian PLTU dengan PLTS dan BESS serta *retrofit* PLTU. *Retrofit* PLTU dilakukan dengan memanfaatkan beberapa komponen PLTU dilengkapi komponen penyimpan panas untuk menjadi penyimpan panas dengan menambahkan PLTS sebagai sumber energi, dimana teknologi ini disebut sebagai TSPP. Evaluasi operasi sistem tenaga listrik dilakukan berbasis simulasi UC untuk menunjukkan dampak dari *early retirement* tersebut. Metode yang digunakan dalam simulasi berbasis MILP untuk menentukan jadwal operasi optimal dengan mempertimbangkan kekangan teknis seperti kapasitas generator, karakteristik BESS, karakteristik TSPP, *ramp rate*, *minimum up/down time*, serta persamaan keseimbangan daya dan energi. Untuk menunjukkan usulan penelitian berjalan dengan baik, simulasi dilakukan pada sistem skala kecil dan sistem skala besar. Hasil simulasi menunjukkan bahwa skema penggantian unit PLTU menjadi PLTS-BESS dan *retrofit* PLTU menjadi TSPP sama-sama dapat memenuhi kekangan teknis khususnya fleksibilitas. Dalam penelitian ini BESS memiliki efisiensi *charging* dan *discharging* yang lebih baik walaupun secara operasi lebih mahal dibandingkan dengan TSPP. Meskipun demikian, hasil simulasi sistem kecil menunjukkan bahwa skema berbasis energi terbarukan dan penyimpanan energi masih memiliki BPP yang lebih tinggi dibandingkan sistem konvensional. Pada sistem konvensional, BPP tercatat sebesar Rp1,088/kWh, sedangkan pada skema penggantian unit PLTU menjadi PLTS-BESS meningkat menjadi Rp1,648/kWh dan pada skema *retrofit* PLTU menjadi TSPP mencapai Rp1,584/kWh. Simulasi pada sistem skala besar pun menunjukkan bahwa skema retrofit TSPP dapat diterapkan secara gradual dengan kenaikan BPP yang terkendali (dari Rp1,092.8/kWh menjadi Rp1,176.0/kWh) seiring peningkatan kapasitas PLTU yang dilakukan *retrofit* menjadi TSPP disertai penambahan kapasitas PLTS, yang memvalidasi kelayakan skema ini pada sistem yang lebih kompleks. Meskipun skema berbasis EBT tersebut menunjukkan biaya yang lebih tinggi dari sistem konvensional, dalam rangka mendukung *early retirement* dengan penetrasi EBT dan penyimpanan energi, skema *retrofit* PLTU menjadi TSPP dapat menjadi alternatif yang lebih ekonomis dibandingkan PLTS-BESS. Hasil ini menegaskan bahwa strategi *retrofit* PLTU menjadi TSPP dapat menjadi pendekatan transisi yang lebih efisien dan berkelanjutan, karena mampu memanfaatkan infrastruktur eksisting PLTU diiringi penekanan biaya investasi sistem penyimpanan energi.

Kata kunci—*Battery Energy Storage System, Mixed Integer Linear Programming, Retirement PLTU, Retrofit PLTU, Thermal Storage Power Plant, Unit Commitment.*

ABSTRACT

This study discusses the operational strategy of a power system under conditions where several CFPP undergo early retirement. Two retirement approaches are considered: replacing CFPP with SPP and BESS, and retrofitting the CFPP. The CFPP retrofit involves repurposing several CFPP components, supplemented with heat storage components, to function as thermal storage with adding SPP as the energy source, this technology is referred to as TSPP. The evaluation of the power system's operation is conducted using UC simulations to demonstrate the impact of this early retirement. The simulation method is based on MILP to determine the optimal operational schedule while considering technical constraints such as generator capacity, BESS characteristics, TSPP characteristics, ramp rates, minimum up/down times, and power and energy balance equations. To validate the proposed approach, simulations are performed on both small-scale and large-scale systems. The simulation results indicate that both the scheme of replacing CFPP units with SPP-BESS and retrofitting CFPP into TSPP can satisfy technical constraints, particularly regarding flexibility. In this study, BESS demonstrates higher charging and discharging efficiency, although its operational cost is higher compared to TSPP. Nevertheless, the small-scale system results show that renewable and storage-based schemes still have a higher BPP compared to the conventional system. In the conventional system, the BPP is recorded at Rp1,088/kWh, whereas in the replacement scheme with SPP-BESS, it increases to Rp1,648/kWh, and in the CFPP retrofit scheme to TSPP, it reaches Rp1,584/kWh. Furthermore, simulations on the large-scale system demonstrate that the TSPP retrofit scheme can be implemented gradually, with a controlled BPP increase (from Rp1,092.8/kWh to Rp1,176.0/kWh) corresponding to the increased capacity of CFPPs retrofitted into TSPPs and the addition of SPP capacity, thereby validating the scheme's feasibility in a more complex system. Although these RE-based schemes exhibit higher costs than the conventional system, the CFPP-to TSPP retrofit scheme emerges as a more economical alternative compared to the SPP-BESS configuration for supporting early retirement with RE and energy storage penetration. These findings affirm that the strategy of retrofitting CFPPs into TSPPs can serve as a more efficient and sustainable transition approach, as it leverages existing CFPP infrastructure while reducing the capital investment required for the energy storage system.

Keywords—*Battery Energy Storage System, CFPP Retirement, CFPP Retrofit, Mixed Integer Linear Programming, Thermal Storage Power Plant, Unit Commitment.*