

Optimalisasi Sistem Kelistrikan melalui Penggunaan Capacitor Bank

Reza Maulidin¹⁾, Adhi Kusmanto²⁾,

¹⁾Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Semarang

¹⁾Email : rezamaulidin@upgris.ac.id

²⁾ Email : adhiits17@yahoo.com

Abstrak – Capacitor bank berfungsi sebagai perangkat penting dalam sistem kelistrikan untuk menyimpan dan melepaskan energi listrik, dengan tujuan mengompensasi daya reaktif yang dihasilkan oleh beban induktif seperti motor dan transformator. Melalui prinsip kerjanya, capacitor bank mampu meningkatkan faktor daya, mengurangi rugi-rugi daya, serta menjaga stabilitas tegangan, sehingga memastikan efisiensi operasional sistem kelistrikan. Komponen utama capacitor bank meliputi kapasitor, fuse/MCB, busbar, kabel dan konektor, sistem pendingin, serta enclosure yang dirancang untuk mendukung fungsionalitas dan perlindungan sistem secara menyeluruh. Rangkaian capacitor bank diatur dengan jalur terpisah untuk setiap komponen, sehingga menciptakan aliran arus yang optimal dan efisien. Artikel ini mengulas prinsip kerja, komponen, dan desain sirkuit capacitor bank dalam meningkatkan performa sistem kelistrikan.

Kata Kunci : *Capacitor bank, Sistem kelistrikan, Faktor daya, Stabilitas tegangan.*

PENDAHULUAN

Dengan perkembangan pesat industri, tuntutan akan sistem kelistrikan yang stabil dan andal semakin meningkat, terutama untuk mendukung operasional mesin-mesin industri yang memerlukan suplai daya besar dan stabil. Sistem distribusi listrik yang kurang optimal dapat meningkatkan risiko gangguan operasional, seperti kerusakan peralatan atau waktu henti produksi (downtime), yang pada akhirnya berdampak negatif terhadap produktivitas dan efisiensi perusahaan. Dalam konteks ini, *capacitor bank* berperan krusial dalam menjaga kestabilan tegangan serta mengurangi fluktuasi daya, sehingga membantu melindungi peralatan industri dari kerusakan.

Permintaan daya di seluruh dunia meningkat dengan cepat, yang secara signifikan memengaruhi keandalan, stabilitas, dan kualitas daya yang disuplai. , skema perencanaan watt dan volt-ampere reaktif (VAR) diusulkan dengan menggunakan kombinasi sistem penyimpanan energi baterai (BESS) dan kompensator untuk mengatasi kerentanan jaringan terhadap penurunan tegangan dan ketidakefisienan sistem. Kombinasi sistem penyimpanan energi baterai dan kapasitor shunt yang hemat biaya kemudian akan dianalisis untuk menunjukkan manfaat dari skema yang diusulkan (Islam et al. 2021) . konverter tegangan kapasitor sakelar (SC) pada chip yang dapat dikonfigurasi ulang yang ditujukan untuk aplikasi daya sangat rendah. Konverter tegangan memberikan keuntungan tambahan berupa penghematan energi selama transisi tidur ke aktif dan aktif ke tidur. Ini dilakukan dengan menggabungkan dua teknik, yang disebut, pengisian kapasitor terpisah (pengisian bertahap), dan daur ulang energi. Pengisian kapasitor terpisah terbukti mengurangi kehilangan energi selama transisi tidur ke aktif hingga 66%. Teknik daur ulang energi simetris yang ada memulihkan 75% energi dari bank kapasitor dengan mengorbankan riak tegangan keluaran yang besar (Shah, Arslan, and Kim 2018). algoritma grey wolf yang disempurnakan (EGWA) untuk penempatan unit pembangkit terdistribusi (DGUs) yang bekerja sama dengan kapasitor bank (CBs) dan regulator tegangan (VRs) untuk meningkatkan kinerja sistem distribus . Algoritma EGWA diuji pada dua sistem distribusi di Mesir dan menunjukkan hasil yang sangat baik dalam mengurangi kerugian daya, meningkatkan tegangan minimum, serta kapasitas beban. Hasil analisis membuktikan bahwa EGWA memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan metode optimasi lainnya (Mehmood et al. 2018). Capacitor Bank (CB) dalam sistem distribusi menggunakan Algoritma Genetika (GA) dan Analisis Sensitivitas (SA). Metode SA digunakan untuk mengevaluasi solusi

secara langsung tanpa perlu menggunakan metode iteratif seperti Load Flow atau Optimal Power Flow (OPF). Metode ini diterapkan pada dua sistem yang masing-masing memiliki 34 dan 70 bus, dengan dua unit CB ditempatkan di setiap sistem. Hasil perbandingan dengan teknik pencarian ekstensif menunjukkan penghematan waktu pemrosesan komputasi (Anon n.d.). Meningkatkan kinerja sistem distribusi adalah tujuan utama bagi operator system. mengusulkan algoritma grey wolf yang disempurnakan (Enhanced Grey Wolf Algorithm/EGWA) untuk penempatan unit pembangkit terdistribusi (DGUs) yang bekerja sama dengan kapasitor bank (CBs) dan regulator tegangan (VRs). EGWA diterapkan untuk menyelesaikan masalah alokasi optimal pada dua sistem distribusi di Mesir. Hasil simulasi menunjukkan bahwa EGWA efektif dalam mengalokasikan CBs, DGUs, dan VRs secara terkoordinasi. Pengurangan kerugian daya yang signifikan tercapai, dengan peningkatan tegangan minimum dan kapasitas beban (Shaheen and El-Sehiemy 2021). pemasangan kapasitor bank yang bertujuan untuk meningkatkan faktor daya. Dan dengan melakukan simulasi Simulink dapat diketahui efisiensi dari pemasangan kapasitor bank sebagai bahan pertimbangan untuk memperbaiki faktor daya pada PT. Bogowonto Primalaras (Dan Simulasi Pengaruh Pemasangan and Uli Ulya 2019). Dengan meningkatnya penggunaan energi angin, kebutuhan akan produksi energi angin yang andal dan efisien secara biaya menjadi semakin penting. Saat ini, sistem turbin yang menggunakan generator induksi berpenguatan ganda (doubly-fed induction generator) banyak digunakan dan mendominasi pasar energi angin. Penelitian ini menyajikan pendekatan analitis untuk mengevaluasi keandalan kapasitor daya, baik pada kapasitor bank DC-link maupun kapasitor bank filter di sisi AC (Zhou et al. 2019)

Berdasarkan penelitian sebelumnya yang berfokus pada peningkatan kinerja sistem distribusi untuk mengatasi masalah daya reaktif dan stabilitas tegangan, penelitian ini berfokus pada Optimalisasi Penggunaan Capacitor Bank sebagai perangkat penting dalam sistem kelistrikan untuk menyimpan dan melepaskan energi listrik, dengan tujuan mengompensasi daya reaktif yang dihasilkan oleh beban induktif seperti motor dan transformator.

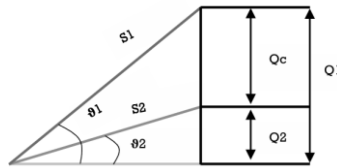
METODE

Beban listrik dapat dikategorikan menjadi tiga jenis berdasarkan sifatnya, yaitu beban resistif, induktif, dan kapasitif. Beban resistif, yang memiliki karakteristik serupa dengan resistor, akan mengalirkan arus listrik sesuai dengan arus nominal dan memiliki nilai tetap tanpa mempengaruhi pengoperasian beban. Contoh beban resistif meliputi lampu pijar, setrika, dan pemanas air, yang umumnya ditemukan pada peralatan rumah tangga. Beban induktif, seperti motor listrik, kipas angin, dan mesin cuci, memiliki sifat mirip dengan inductor (L), di mana arus listrik yang mengalir disimpan dalam bentuk medan magnet. Ketika motor listrik dihidupkan, arus startnya akan lebih besar dibandingkan arus nominal, namun setelah beroperasi, arus akan kembali ke nilai nominal. Beban induktif banyak dijumpai pada mesin industri dengan kapasitas besar. Sedangkan beban kapasitif, yang memiliki sifat serupa dengan kapasitor (C), berfungsi untuk menyimpan energi listrik dalam bentuk medan listrik. Beban kapasitif banyak diterapkan pada industri besar yang menggunakan motor listrik, di mana kapasitor diperlukan untuk efisiensi daya. Beban ini mampu menyimpan energi listrik sementara, di mana daya aktif diserap dan daya reaktif akan hilang.

Perbaikan Faktor daya

Perbaikan faktor daya merupakan salah satu aspek krusial dalam meningkatkan efisiensi sistem kelistrikan, terutama untuk mengurangi pemborosan daya reaktif yang tidak berkontribusi terhadap pekerjaan mekanis. Dalam konteks ini, upaya perbaikan faktor daya dilakukan dengan cara mengoptimalkan keseimbangan antara daya aktif dan daya reaktif, yang dapat dicapai melalui penggunaan komponen seperti kapasitor bank, pengatur beban, atau teknologi lainnya. Dengan memperbaiki faktor daya, sistem kelistrikan dapat mengurangi kerugian daya, mengoptimalkan penggunaan energi, serta mengurangi beban pada jaringan listrik. Selain itu, perbaikan faktor daya juga berkontribusi pada peningkatan stabilitas tegangan, pengurangan

biaya operasional, dan peningkatan umur peralatan listrik, sehingga memperkuat keberlanjutan dan keandalan sistem kelistrikan secara keseluruhan.



Gambar 1. Prinsip Perbaikan Faktor Daya

Berdasarkan gambar 2, perhitungan nilai kapasitansi dapat dilakukan dengan terlebih dahulu menentukan nilai daya reaktif kompensator (Q_c). Secara prinsip, tujuan utama dari perbaikan faktor daya adalah untuk mencapai nilai faktor daya (**PF**) yang mendekati atau sama dengan 1. Dalam sistem kelistrikan, daya reaktif yang dihasilkan oleh kapasitor (Q_c) harus memiliki nilai yang setara dengan daya reaktif (Q) dari sistem yang akan diperbaiki faktor dayanya. Hal ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P = S_1 \cdot \cos(\phi_1) \quad (1)$$

Dimana:

p = Daya aktif(watt)

s_1 = Daya semu sebelum perbaikan (VA)

ϕ_1 = Sudut fase sebelum perbaikan faktor daya

Daya reaktif sebelum perbaikan dihitung dengan rumus:

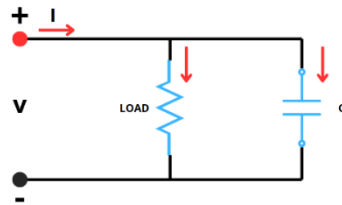
$$Q_1 = S_1 \cdot \sin(\phi_1) = p \cdot \tan(\phi_1) \quad (2)$$

digunakan untuk menghitung daya reaktif Q_1 dalam suatu sistem kelistrikan. Dalam rumus ini, S_1 merupakan daya semu sebelum perbaikan faktor daya, ϕ_1 adalah sudut fase pada kondisi awal, dan P adalah daya aktif. Persamaan pertama, $Q_1 = S_1 \cdot \sin(\phi_1)$, menghubungkan daya semu dan sudut fase untuk menghitung daya reaktif, sementara persamaan kedua, $Q_1 = P \cdot \tan(\phi_1)$, menghubungkan daya aktif dengan sudut fase untuk menghasilkan nilai daya reaktif yang sama, yang menggambarkan daya reaktif sebelum dilakukan perbaikan faktor daya. Rumus ini sangat penting untuk menganalisis jumlah daya reaktif dalam sistem sebelum dilakukan upaya perbaikan faktor daya.

Kapasitor bank

Kapasitor bank merupakan perangkat Listrik pasitif yang berfungsi untuk menyeimbangkan beban induktif. Salah satu manfaat penggunaan kapasitor adalah untuk meningkatkan profil tegangan, memperbaiki faktor daya ($\cos \phi$), mengurangi kerugian daya, menghilangkan biaya berlebih (kVARh), serta mencegah terjadinya penurunan tegangan pada saluran.

Dalam penelitian ini, kapasitor akan digunakan untuk memperbaiki faktor daya. Kapasitor tersebut akan dipasang secara paralel terhadap beban induktif, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 2. Rangkaian Beban Induktif Menggunakan Kapasitor Bank

Dalam upaya memperbaiki faktor daya dan menjaga kestabilan tegangan pada sistem kelistrikan yang melibatkan berbagai beban induktif, memanfaatkan kapasitor bank dengan sistem reaktifnya. Pemasangan kapasitor bank merupakan langkah untuk menyediakan daya reaktif, sehingga penggunaan kapasitor bank dapat mengurangi penyerapan daya reaktif oleh beban. Langkah ini bertujuan untuk mengurangi penurunan tegangan dan kerugian daya pada jaringan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Beban listrik dalam suatu sistem kelistrikan dapat dibedakan menjadi tiga jenis berdasarkan sifatnya, yaitu beban resistif, induktif, dan kapasitif. Beban resistif, yang berfungsi seperti resistor, memiliki arus yang mengalir sesuai dengan arus nominal tanpa mengubah nilai daya yang digunakan. Contoh dari beban ini antara lain lampu pijar, setrika, dan pemanas air yang umumnya ditemukan di peralatan rumah tangga. Beban induktif, seperti motor listrik, kipas angin, dan mesin cuci, menyimpan energi dalam bentuk medan magnet. Saat motor listrik mulai beroperasi, arus yang digunakan lebih besar dibandingkan arus nominal, namun setelah mencapai kecepatan penuh, arus kembali ke nilai nominal. Beban induktif banyak dijumpai pada mesin-mesin industri dengan kapasitas besar. Beban kapasitif, yang mirip dengan kapasitor, berfungsi untuk menyimpan energi listrik dalam bentuk medan listrik dan banyak diterapkan pada industri besar yang menggunakan motor listrik untuk efisiensi daya.

Perbaikan faktor daya merupakan aspek yang sangat penting dalam meningkatkan efisiensi sistem kelistrikan. Tujuan utamanya adalah untuk mengurangi pemborosan daya reaktif yang tidak berkontribusi terhadap kerja mekanis. Dalam sistem kelistrikan, faktor daya yang rendah dapat menyebabkan kerugian daya yang signifikan. Oleh karena itu, untuk memperbaiki faktor daya, diperlukan penyeimbangan antara daya aktif dan daya reaktif, yang dapat dicapai melalui penggunaan kapasitor bank atau teknologi lainnya. Perbaikan faktor daya tidak hanya mengurangi kerugian daya dan mengoptimalkan penggunaan energi, tetapi juga meningkatkan stabilitas tegangan, mengurangi biaya operasional, dan memperpanjang umur peralatan listrik.

Gambar 2 menggambarkan prinsip perbaikan faktor daya yang dilakukan dengan menambah daya reaktif kompensator (Q_c) untuk mencapai faktor daya yang lebih mendekati 1. Dalam hal ini, daya reaktif

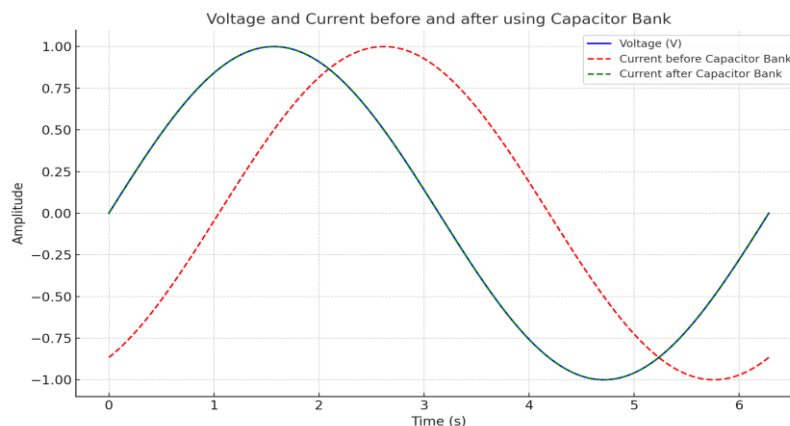
sebelum dan sesudah perbaikan dihitung dengan rumus yang melibatkan daya semu (S) dan sudut fase (ϕ), sehingga daya reaktif dapat disesuaikan untuk meningkatkan efisiensi sistem. Persamaan (2).

digunakan untuk menghitung daya reaktif yang dihasilkan sebelum perbaikan dilakukan, di mana P adalah daya aktif dan (ϕ) adalah sudut fase pada kondisi awal.



Gambar 3. Capacitor Bank yang terpasang Pada Panel kelistrikan

Gambar 3 adalah kapasitor bank yang berfungsi sebagai perangkat untuk menyeimbangkan beban induktif dengan menyediakan daya reaktif yang dibutuhkan. Penggunaan kapasitor bank dapat memperbaiki faktor daya, mengurangi kerugian daya, dan meningkatkan profil tegangan pada sistem kelistrikan. Pemasangan kapasitor bank yang dipasang secara paralel dengan beban induktif akan mengurangi penyerapan daya reaktif oleh beban tersebut, sehingga membantu mengurangi penurunan tegangan dan kerugian daya pada jaringan distribusi. Dengan demikian, kapasitor bank berperan penting dalam menjaga kestabilan tegangan dan efisiensi operasional sistem kelistrikan yang melibatkan banyak beban induktif



Gambar 4. Gelombang Listrik Sebelum dan sesudah Menggunakan Capacitor Bank

Gambar 4 menggambarkan perbandingan gelombang listrik sebelum dan setelah pemasangan kapasitor bank dalam sistem kelistrikan. Sebelum kapasitor bank dipasang, gelombang listrik menunjukkan adanya pembebanan daya reaktif dari beban induktif, yang menyebabkan penurunan faktor daya, penurunan stabilitas tegangan, dan kerugian daya dalam sistem. Setelah kapasitor bank dipasang, gelombang listrik menunjukkan perbaikan faktor daya, dengan tegangan dan arus menjadi lebih sejajar, mengurangi pemborosan daya reaktif, dan meningkatkan stabilitas tegangan. Hal ini mengarah pada penurunan kerugian daya, peningkatan efisiensi operasional, dan kualitas daya yang lebih baik, yang pada akhirnya meningkatkan kinerja keseluruhan sistem kelistrikan

KESIMPULAN

Dalam sistem kelistrikan, penerapan *capacitor bank* memiliki peranan yang sangat vital dalam meningkatkan efisiensi operasional, menjaga kestabilan tegangan, serta mengoptimalkan pemanfaatan energi. Beban listrik pada suatu sistem dapat dikelompokkan menjadi tiga jenis, yaitu beban resistif, induktif, dan kapasitif, yang masing-masing memiliki sifat dan dampak terhadap faktor daya. Beban induktif, seperti motor listrik yang banyak digunakan pada peralatan industri besar, dapat menyebabkan pemborosan daya reaktif. Oleh karena itu, penggunaan *capacitor bank* sebagai solusi untuk perbaikan faktor daya terbukti efektif. Dengan memanfaatkan *capacitor bank*, daya reaktif yang dihasilkan oleh beban induktif dapat dikompensasi, sehingga faktor daya dapat diperbaiki menuju angka yang lebih optimal, mendekati nilai 1, yang pada gilirannya akan mengurangi kerugian daya dan meningkatkan efisiensi sistem kelistrikan secara keseluruhan. Selain itu, pemasangan *capacitor bank* secara paralel dengan beban induktif juga membantu menjaga kestabilan tegangan dan mencegah terjadinya penurunan tegangan yang dapat merugikan sistem distribusi. Secara keseluruhan, penggunaan *capacitor bank* tidak hanya efektif dalam memperbaiki faktor daya, namun juga meningkatkan kualitas daya, mengurangi biaya operasional, serta memperpanjang umur peralatan listrik, yang pada akhirnya berkontribusi pada keberlanjutan dan keandalan sistem kelistrikan dalam jangka panjang.

SARAN

Saran yang dapat diberikan dalam penelitian ini adalah perlunya implementasi yang lebih luas mengenai penggunaan *capacitor bank* di berbagai sistem kelistrikan industri untuk meningkatkan efisiensi operasional dan menjaga kestabilan tegangan. Mengingat peran penting *capacitor bank* dalam memperbaiki faktor daya dan mengurangi kerugian daya, disarankan untuk melakukan pemantauan dan evaluasi berkala terhadap performa *capacitor bank* yang telah dipasang, guna memastikan bahwa kapasitas dan konfigurasinya tetap sesuai dengan kebutuhan sistem kelistrikan yang terus berkembang. Selain itu, bagi industri dengan beban induktif besar, penggunaan *capacitor bank* harus dipertimbangkan dalam desain awal sistem kelistrikan, dengan memperhatikan kapasitas yang tepat agar perbaikan faktor daya dapat dicapai secara maksimal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada CV Bintang Anugerah Electric atas kesempatan yang diberikan untuk melaksanakan kegiatan magang di perusahaan ini. Pengalaman berharga yang saya peroleh selama magang telah memperkaya pengetahuan dan keterampilan saya di bidang teknik kelistrikan. Saya juga mengucapkan terima kasih atas izin yang diberikan untuk menggunakan laporan hasil magang sebagai bahan artikel ini. Dukungan dan kepercayaan yang diberikan oleh CV Bintang Anugerah Electric sangat berarti dalam kelancaran penelitian ini. Semoga kerja sama yang telah terjalin dapat terus berlanjut, dan perusahaan ini semakin sukses serta berkembang di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Anon. n.d. 'Optimal Allocation of Capacitor Banks Using Genetic Algorithm and Sensitivity Analysis.' Dan Simulasi Pengaruh Pemasangan, Analisis, and Amiq Uli Ulya. 2019. 'MENGUNAKAN SIMULINK PADA SISTEM TENAGA LISTRIK DI PT. BOGOWONTO PRIMALARAS'. *Media Elekrika* 12(1).
- Islam, F. R., A. Lallu, K. A. Mamun, K. Prakash, and N. K. Roy. 2021. 'Power Quality Improvement of Distribution Network Using BESS and Capacitor Bank'. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 9(3):625–32. doi: 10.35833/MPCE.2019.000304.
- Mehmood, Khawaja Khalid, Chul Hwan Kim, Saad Ullah Khan, and Zunaib Maqsood Haider. 2018. 'Unified Planning of Wind Generators and Switched Capacitor Banks: A Multiagent Clustering-Based Distributed Approach'. *IEEE Transactions on Power Systems* 33(6):6978–88. doi: 10.1109/TPWRS.2018.2854916.
- Shah, Syed Asmat Ali, Saad Arslan, and Hyungwon Kim. 2018. 'A Reconfigurable Voltage Converter with Split-Capacitor Charging and Energy Recycling for Ultra-Low-Power Applications'. *IEEE Access* 6:68311–23. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2879471.

- Shaheen, Abdullah M., and Ragab A. El-Sehiemy. 2021. 'Optimal Coordinated Allocation of Distributed Generation Units/ Capacitor Banks/ Voltage Regulators by EGWA'. *IEEE Systems Journal* 15(1):257–64. doi: 10.1109/JSYST.2020.2986647.
- Zhou, Dao, Yipeng Song, Yang Liu, and Frede Blaabjerg. 2019. 'Mission Profile Based Reliability Evaluation of Capacitor Banks in Wind Power Converters'. *IEEE Transactions on Power Electronics* 34(5):4665–77. doi: 10.1109/TPEL.2018.2865710.