

Analisis Kompensasi Daya Reaktif pada Motor *Slip-Ring* Tiga Fasa Dengan Beban 1,6 Nm dan 2,1 Nm

Ilham Faqih¹, Haris Gibran Rizantha¹, Surojo^{1*}

¹Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung, Sungailiat

*E-mail : surojosurojo70@gmail.com

Received: 15 Agustus 2026; Received in revised form: 16 Agustus 2026; Accepted: 16 Agustus 2026

Abstract

Induction motors are widely used in industrial applications due to their favorable operating characteristics and ease of speed control. However, they exhibit a relatively low power factor caused by a high demand for inductive reactive power. This study aims to improve the power factor of a three-phase slip-ring induction motor through reactive power compensation using a capacitor bank. Tests were conducted at load conditions of 1.6 Nm and 2.1 Nm, utilizing a capacitor bank with eight activation levels and a total capacitance range of 0–30 μF . The results indicate that without compensation, the power factor was 0.29 and 0.33 for the respective load conditions. Optimal compensation was achieved using a combination of switches 2, 3, and 4 (total capacitance of 28 μF), which improved the power factor to 0.83 at a 1.6 Nm load and 0.89 at a 2.1 Nm load, while simultaneously reducing the line current to near-minimum values. Conversely, activating all switches (30 μF capacitance) resulted in over-compensation, causing the load characteristics to become capacitive; consequently, the power factor dropped to 0.50 and 0.43, accompanied by an increase in line current. The findings demonstrate that selecting the appropriate capacitor bank capacity can effectively improve the power factor and reduce line current in slip-ring induction motors.

Keywords: Induction motor; Slip-ring motor; Power factor; reactive power compensation; capacitor bank.

Abstrak

Motor induksi merupakan salah satu mesin listrik yang banyak digunakan dalam aplikasi industri karena memiliki karakteristik operasi yang baik dan kemudahan dalam pengaturan kecepatan. Namun, motor induksi memiliki faktor daya yang relatif rendah akibat tingginya kebutuhan daya reaktif induktif. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan faktor daya motor induksi slip-ring tiga fasa melalui kompensasi daya reaktif menggunakan bank kapasitor. Pengujian dilakukan pada kondisi beban 1,6 Nm dan 2,1 Nm dengan bank kapasitor yang memiliki delapan tingkat aktivasi dan kapasitansi total 0–30 μF . Hasil pengujian menunjukkan bahwa tanpa kompensasi, faktor daya masing-masing sebesar 0,29 dan 0,33 pada kedua kondisi beban. Kompensasi optimal diperoleh melalui kombinasi saklar 2+3+4 dengan kapasitansi total 28 μF , yang meningkatkan faktor daya menjadi 0,83 pada beban 1,6 Nm dan 0,89 pada beban 2,1 Nm, sekaligus menurunkan arus saluran hingga mendekati nilai minimum. Sebaliknya, aktivasi seluruh saklar dengan kapasitansi 30 μF menyebabkan kompensasi berlebih, sehingga karakteristik beban menjadi kapasitif dan faktor daya menurun menjadi 0,50 dan 0,43, disertai peningkatan arus saluran. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemilihan kapasitas bank kapasitor yang tepat dapat meningkatkan faktor daya dan mengurangi arus saluran secara efektif pada motor induksi slip-ring.

Kata kunci: motor induksi, motor slip-ring, faktor daya, kompensasi daya reaktif, bank kapasitor.

1. PENDAHULUAN

Motor listrik tiga fasa banyak digunakan pada sistem industri karena konstruksinya kuat dan mampu menggerakkan berbagai jenis beban. Motor induktif membutuhkan daya reaktif untuk membentuk medan magnet. Berdasarkan definisi besaran daya listrik, faktor daya menunjukkan perbandingan antara daya aktif dan daya semu, sedangkan daya reaktif menambah arus yang mengalir tanpa menghasilkan kerja mekanis secara langsung [1].

Faktor daya yang rendah menyebabkan arus sumber menjadi lebih besar untuk menyalurkan daya aktif yang sama. Kondisi tersebut dapat meningkatkan pembebanan penghantar, transformator, dan peralatan pengaman. Salah satu metode yang umum digunakan untuk memperbaiki kondisi ini adalah memasang kapasitor secara paralel pada beban. Kapasitor menyuplai sebagian kebutuhan daya reaktif secara lokal sehingga daya reaktif dan arus yang diambil dari sumber dapat berkurang [2], [6].

Bank kapasitor bertingkat memberikan fleksibilitas karena kapasitas kompensasi dapat disesuaikan dengan perubahan beban. Namun, kapasitor yang terlalu kecil menghasilkan kompensasi yang belum memadai, sedangkan kapasitor yang terlalu besar dapat menyebabkan sistem berubah dari induktif menjadi kapasitif atau mengalami overcompensation. Pengoperasian bank kapasitor juga harus memperhatikan kondisi switching dan kemungkinan transien [7], [8]. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pemilihan lokasi, kapasitas, dan metode pengendalian kompensator sangat menentukan keberhasilan perbaikan faktor daya [9]–[12].

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan kapasitor bertingkat terhadap faktor daya, daya reaktif, arus utama, dan daya semu pada motor slip-ring tiga fasa. Pengujian dilakukan pada dua tingkat beban mekanis untuk menentukan konfigurasi kapasitor yang memberikan performa terbaik sekaligus mengidentifikasi kondisi kompensasi berlebih.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Peralatan dan Rangkaian Pengujian

Pengujian menggunakan motor slip-ring tiga fasa DL 1022, starter motor, rem magnetik, brake control unit, load cell, catu daya tiga fasa, bank kapasitor DL 2108T20, power meter, power factor meter, serta

amperemeter. Peralatan tersebut merupakan bagian dari sistem pelatihan pengelolaan energi yang mendukung pengukuran daya aktif, daya reaktif, daya semu, faktor daya, dan arus [3]–[5].

2.2. Prosedur Pengujian Sistem

Rangkaian disusun mengikuti diagram topografi pada Gambar 1. dan pengukuran data ditunjukkan gambar 2. Stator motor dihubungkan dalam konfigurasi bintang. Pada saat motor dihidupkan, tahanan starter rotor dipasang pada nilai maksimum kemudian dikurangi secara bertahap seiring kenaikan putaran. Sebelum sistem dijalankan, efek pengereman diatur pada nilai nol dan seluruh sakelar bank kapasitor ditempatkan pada posisi tidak aktif.

Setelah motor mencapai kondisi stabil, beban rem diatur pada torsi sekitar 1,6 Nm dan 2,1 Nm. Pada setiap kondisi beban, kapasitor dihubungkan secara bertahap menggunakan delapan konfigurasi, yaitu level 0, level 1, 1+2, 1+2+3, 1+2+3+4, 2+3+4, 3+4, dan level 4. Nilai kapasitansi masing-masing konfigurasi adalah 0, 2, 6, 14, 30, 28, 24, dan 16 μF .

Untuk setiap konfigurasi dicatat faktor daya, daya reaktif, daya aktif, daya semu, arus utama, arus motor, dan sifat beban. Pengujian menggunakan sumber tiga fasa 380 V dengan frekuensi 50 Hz. Penentuan kondisi terbaik tidak hanya didasarkan pada faktor daya tertinggi, tetapi juga mempertimbangkan besarnya arus sumber dan apakah sistem masih induktif atau telah berubah menjadi kapasitif.

Hubungan ketiga komponen daya tersebut dinyatakan dalam Persamaan (1) hingga (4):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \dots\dots\dots (1)$$

$$\cos \phi = P / S \dots\dots\dots (2)$$

$$Q = P \times \tan \phi \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_c = P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2) \dots\dots\dots (4)$$

dengan S adalah daya semu (VA), P adalah daya aktif (W), Q adalah daya reaktif (var), $\cos \phi$ adalah faktor daya, Q_c adalah daya reaktif kapasitif yang dibutuhkan (var), ϕ_1 adalah sudut fasa awal, dan ϕ_2 adalah sudut fasa yang diinginkan setelah kompensasi.

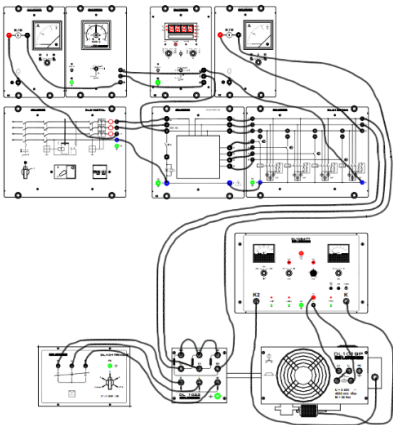
Nilai kapasitansi yang dibutuhkan untuk kompensasi dalam sistem tiga fasa hubungan bintang dihitung menggunakan Persamaan (5) [3]

$$C = \frac{QC}{(2\pi f \times U^2)} \dots\dots\dots (5)$$

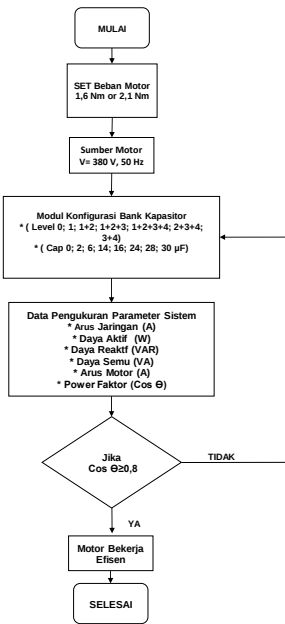
dengan C adalah kapasitansi (F), f adalah frekuensi jaringan (Hz), dan U adalah tegangan jalur (V).

Tabel 1. Spesifikasi peralatan

No.	Kode Alat	Nama Peralatan
1.	DL 1017RHD3	Starter for slip-ring motor
2.	DL 1019P	Magnetic power brake
3.	DL 1022	Slip-ring motor
4.	DL 1054TT	Brake control unit
5.	DL 2006E	Load cell
6.	DL 2031	Optical electronic generator
7.	DL 2108TAL	Three-phase power supply unit
8.	DL 2108T20	Switchable capacitor battery
9.	DL 2109T26	Power meter
10.	DL 2109T27	Power factor meter
11.	DL 2109T2A5	Moving-iron ammeter (2.5 A)



Gambar 1. Rangkaian Pengujian Kompensasi Parameter Sistem Pada Motor Slip-Ring.



Gambar 2. Flow chart Proses Pengujian Dan Pengukuran Parameter Sistem Pada Motor Slip-Ring

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengujian pada Beban 1,6 Nm, tegangan sumber 380V, dan 50Hz

Tabel 2. Hasil Kompensasi Pada Beban Sekitar 1,6 Nm.

Level / C (μ F)	PF	Q (var)	I utama (A)
0 / 0	0,31	363	1,566
1 / 2	0,35	336	1,483
1+2 / 6	0,41	272	1,203
1+2+3 / 14	0,59	156	0,779
1+2+3+4 / 30	0,41	151	0,710
2+3+4 / 28	0,52	125	0,619
3+4 / 24	0,83	105	0,479
4 / 16	0,74	94	0,573

Pada kondisi tanpa kapasitor, faktor daya tercatat sebesar 0,31 dengan daya reaktif 363 var, arus utama 1,566 A, dan daya semu 378,35 VA. Penambahan kapasitor secara bertahap umumnya meningkatkan faktor daya serta menurunkan arus utama dan daya semu. Konfigurasi 3+4 atau 24 μ F menghasilkan faktor daya tertinggi sebesar 0,83 dan arus terendah sebesar 0,479 A. Dibandingkan kondisi awal, arus utama berkurang sekitar 69,4%, daya reaktif berkurang 71,1%, dan daya semu berkurang 72,6%.

Walaupun nilai tersebut menunjukkan pembebanan sumber yang paling rendah,

konfigurasi 3+4 telah menghasilkan sifat kapasitif. Jika pengoperasian mensyaratkan sistem tetap sedikit induktif, penggunaan level 4 atau 16 μ F merupakan pilihan yang lebih aman. Konfigurasi ini menghasilkan faktor daya 0,74, daya reaktif 94 var, dan arus utama 0,573 A. Penggunaan seluruh kapasitor sebesar 30 μ F justru menurunkan faktor daya menjadi 0,41 dan mengubah sifat beban menjadi kapasitif, sehingga menunjukkan terjadinya kompensasi berlebih.

3.2. Hasil Pengujian pada Beban 2,1 Nm, tegangan sumber 380V, dan 50Hz

Tabel 3. Hasil Kompensasi Pada Beban Sekitar 2,1 Nm.

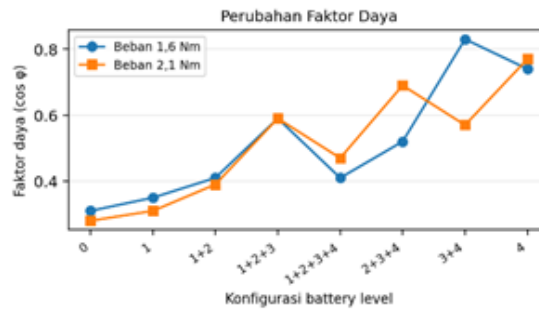
Level / C (μ F)	PF	Q (var)	I utama (A)
0 / 0	0,28	373	1,618
1 / 2	0,31	349	1,498
1+2 / 6	0,39	284	1,264
1+2+3 / 14	0,59	155	0,759
1+2+3+4 / 30	0,47	153	0,682
2+3+4 / 28	0,69	123	0,636
3+4 / 24	0,57	108	0,494
4 / 16	0,77	140	0,571

Pada beban sekitar 2,1 Nm, kondisi awal menghasilkan faktor daya 0,28, daya reaktif 373 var, arus utama 1,618 A, dan daya semu 388,68 VA. Faktor daya meningkat hingga 0,77 pada kapasitor level 4 sebesar 16 μ F. Pada kondisi ini arus utama turun menjadi 0,571 A atau berkurang sekitar 64,7% dari kondisi awal, sedangkan daya semu turun sekitar 62,2%. Sistem juga tetap bersifat induktif sehingga konfigurasi ini dapat

dianggap sebagai kondisi operasi paling stabil pada beban 2,1 Nm.

Konfigurasi 2+3+4 menghasilkan faktor daya 0,69 dan daya reaktif 123 var, tetapi sistem telah bersifat kapasitif. Pada konfigurasi 3+4, arus sumber memang turun menjadi 0,494 A, namun faktor daya hanya 0,57 dan sistem tetap kapasitif. Data tersebut menunjukkan bahwa arus terendah belum

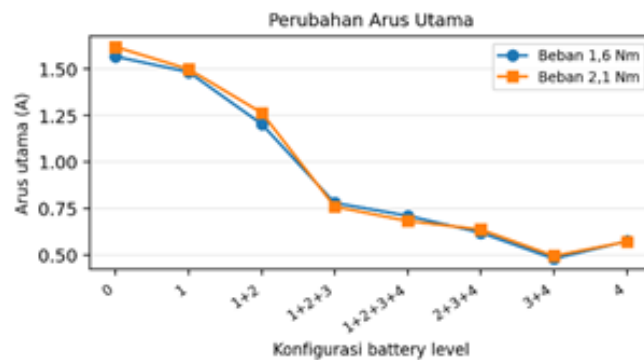
selalu menjadi satu-satunya indikator kondisi kompensasi yang paling sesuai.



Gambar 3. Perbandingan faktor daya pada dua kondisi beban.

Gambar 3 memperlihatkan bahwa peningkatan kapasitansi tidak menghasilkan kenaikan faktor daya secara terus-menerus. Setelah titik tertentu, faktor daya dapat kembali turun karena daya reaktif kapasitif

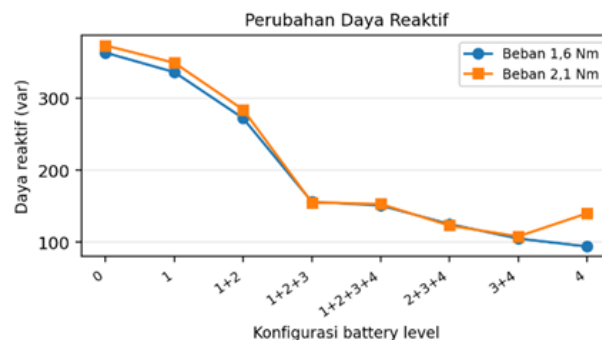
melebihi kebutuhan motor. Perbedaan titik optimum antara beban 1,6 Nm dan 2,1 Nm menegaskan bahwa kapasitas kompensasi harus mengikuti perubahan kebutuhan daya reaktif motor.



Gambar 4. Perbandingan arus utama pada dua kondisi beban.

Arus utama menurun secara nyata setelah kapasitor dihubungkan, seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Penurunan arus terjadi karena sebagian kebutuhan daya reaktif motor dipenuhi oleh kapasitor di dekat beban. Dengan demikian, sumber dan penghantar tidak lagi menyalurkan seluruh

komponen arus reaktif. Hasil ini sejalan dengan penelitian kompensasi kapasitif pada motor yang menunjukkan bahwa arus RMS sumber dapat diminimalkan ketika kapasitas kompensasi mendekati kebutuhan reaktif beban [9], [12].



Gambar 5. Perbandingan daya reaktif pada dua kondisi beban.

Gambar 5 menunjukan daya reaktif yang disalurkan dari sumber cenderung

menurun seiring penambahan kapasitor. Namun, klasifikasi beban QL dan QC

menunjukkan bahwa nilai daya reaktif yang kecil tetap harus dibaca bersama arah atau sifat reaktifnya. Jika kapasitor terlalu besar, sistem akan menyuplai daya reaktif kapasitif berlebih ke jaringan. Kondisi tersebut dapat menyebabkan faktor daya kembali memburuk dan berpotensi menimbulkan kenaikan tegangan atau persoalan switching pada sistem yang lebih besar [7], [10].

4. SIMPULAN

Kompensasi kapasitif terbukti dapat meningkatkan faktor daya serta menurunkan arus utama, daya reaktif, dan daya semu yang harus disuplai sumber. Pada beban sekitar 1,6 Nm, konfigurasi 3+4 sebesar 24 μF menghasilkan faktor daya tertinggi 0,83 dan menurunkan arus utama sekitar 69,4%, tetapi sistem telah bersifat kapasitif. Level 4 sebesar 16 μF menjadi pilihan yang lebih aman jika sistem harus tetap induktif.

Pada beban sekitar 2,1 Nm, konfigurasi level 4 sebesar 16 μF memberikan kondisi terbaik dengan faktor daya 0,77 dan penurunan arus utama sekitar 64,7%. Penggunaan seluruh kapasitor sebesar 30 μF menyebabkan kompensasi berlebih dan menurunkan faktor daya. Dengan demikian, nilai kapasitansi optimal bergantung pada tingkat beban motor, sehingga penggunaan pengendali bank kapasitor otomatis lebih disarankan dibandingkan pemasangan kapasitor tetap.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE, "IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," IEEE Std 1459-2025, 2025.
- [2] IEC, "Shunt Power Capacitors of the Self-Healing Type for A.C. Systems Having a Rated Voltage up to and Including 1 000 V—Part 1: General, Performance, Testing and Rating, Safety Requirements, Guide for Installation and Operation," IEC 60831-1:2014, 2014.
- [3] De Lorenzo S.p.A., "Energy Management—DL GTU104-S," De Lorenzo Training & Didactical Equipment, product documentation.
- [4] De Lorenzo S.p.A., "Slip-Ring Three-Phase Asynchronous Motor DL 1022," De Lorenzo Training & Didactical Equipment, product documentation.
- [5] De Lorenzo S.p.A., "Switchable Capacitor Battery DL 2108T20," De Lorenzo Training & Didactical Equipment, product documentation.
- [6] A. Gligor, C. D. Dumitru, K. Ronay, and R. Muntean, "Microcontroller Based Prototype for Reactive Power Compensation in Local Distribution Networks," *Procedia Engineering*, vol. 181, pp. 746–753, 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.02.461.
- [7] C.-C. Hwang and J. N. Lou, "Transient Analysis of Capacitance Switching for Industrial Power System by PSpice," *Electric Power Systems Research*, vol. 45, no. 1, pp. 29–38, 1998, doi: 10.1016/S0378-7796(97)01218-2.
- [8] E. Irmak, R. Bayındır, and A. Köse, "Design and Experimental Analysis of an Advanced Static VAR Compensator with Computer Aided Control," *ISA Transactions*, vol. 64, pp. 384–393, 2016, doi: 10.1016/j.isatra.2016.05.005.
- [9] V. Kazakbaev, S. Oshurbekov, V. Prakht, and V. Dmitrievskii, "Feasibility Study of Direct-on-Line Energy-Efficient Motors in a Pumping Unit, Considering Reactive Power Compensation," *Mathematics*, vol. 9, no. 18, p. 2196, 2021, doi: 10.3390/math9182196.
- [10] S. A. Giha Yidi, V. Sousa Santos, K. Berdugo Sarmiento, J. E. Candelo-Becerra, and J. de la Cruz, "Comparison of Reactive Power Compensation Methods in an Industrial Electrical System with Power Quality Problems," *Electricity*, vol. 5, no. 3, pp. 642–661, 2024, doi: 10.3390/electricity5030032.
- [11] H. Dirik, C. Gezegin, and H. S. Dirik, "Reactive Power Compensation with Hybrid Compensator Combining a Synchronous Motor and Switched Capacitors," *Electric Power Systems Research*, vol. 216, p. 109010, 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2022.109010.
- [12] G. Kosobudzki, D. Dusza, M. P. Ciurys, and A. Leicht, "Reactive Power Compensation for Single-Phase AC Motors Using Integral Power Theory," *Energies*, vol. 18, no. 10, p. 2641, 2025, doi: 10.3390/en18102641.