

Kendali Berbasis Decision Tree untuk Kompensasi Daya Reaktif pada Sistem Automatic Power Factor Correction

Decision Tree-Based Control for Reactive Power Compensation in Automatic Power Factor Correction Systems

Alief Nur Aisyi Maulidhia^{*1}, Aulia Rahma Annisa², Evi Nafiatu Sholikhah³, Purwidi Asri⁴, Aprilia Rahmayanti⁵, Andhika Putra Rizal⁶

^{1,2,3,4,6}*Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya
Jl. Teknik Kimia, Kampus ITS Sukolilo*

⁵*Teknik Elektro, Universitas Negeri Jakarta
Jl. Rawamangun Muka, RT.11/RW14, Rawamangun, Pulo Gadung,*

^{*}aliefnur@ppns.ac.id, ²auliaannisa@ppns.ac.id, ³evinafiatu@ppns.ac.id, ⁴purwidiasri@ppns.ac.id,
⁵Aprilia.Rahmayanti@unj.ac.id, ⁶andhikaputra@student.ppns.ac.id

Received on 30-04-2026, accepted on 15-07-2026, published on 31-07-2026

Abstrak

Efisiensi energi merupakan salah satu aspek penting dalam sistem tenaga listrik karena dominasi beban induktif menyebabkan meningkatnya kebutuhan daya reaktif, yang berdampak pada penurunan faktor daya, peningkatan rugi-rugi daya, dan berkurangnya efisiensi sistem. Sistem Automatic Power Factor Correction (APFC) telah banyak diterapkan sebagai solusi untuk melakukan kompensasi daya reaktif, namun sebagian besar masih menggunakan metode penyaklaran kapasitor secara sekuensial tetap sehingga kurang adaptif terhadap perubahan kondisi beban. Penelitian ini mengusulkan kendali berbasis Decision Tree untuk menentukan kebutuhan kompensasi daya reaktif pada sistem APFC berbasis Programmable Logic Controller (PLC). Model Decision Tree dibangun menggunakan data hasil pengujian mode manual dengan parameter daya reaktif total sebagai atribut utama, kemudian aturan keputusan yang dihasilkan diimplementasikan ke dalam program Ladder Diagram pada PLC. Sistem memperoleh data parameter kelistrikan dari power meter digital melalui komunikasi Modbus RTU dan secara otomatis menentukan kombinasi step kapasitor sesuai kondisi beban. Pengujian dilakukan pada sistem tiga fasa 380 V menggunakan variasi beban resistif dan induktif pada mode manual maupun otomatis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan kompensasi daya reaktif secara konsisten sehingga faktor daya meningkat sesuai kebutuhan kompensasi pada setiap kondisi pengujian. Selain itu, hasil validasi power meter terhadap alat ukur referensi menunjukkan tingkat akurasi yang memadai sehingga data pengukuran dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pada sistem kendali yang diusulkan. Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan Decision Tree pada sistem APFC berbasis PLC layak digunakan sebagai pendekatan data-driven untuk pengendalian kompensasi daya reaktif.

Kata kunci: Automatic Power Factor Correction (APFC), Kompensasi Daya Reaktif, Decision Tree, Programmable Logic Controller (PLC), Modbus RTU.

Abstract

Energy efficiency is a critical aspect of electrical power systems, as the dominance of inductive loads increases reactive power demand, resulting in a lower power factor, higher power losses, and reduced system efficiency. Automatic Power Factor Correction (APFC) systems have been widely implemented to compensate for reactive

power; however, most conventional systems employ fixed sequential capacitor switching, which is less adaptive to dynamic load variations. This study proposes a Decision Tree-based control strategy for reactive power compensation in an APFC system using a Programmable Logic Controller (PLC). The Decision Tree model was developed using data obtained from manual operating tests, where the total reactive power was selected as the primary input attribute. The resulting decision rules were then implemented into a PLC Ladder Diagram to determine the appropriate capacitor bank switching configuration automatically. Electrical parameters were acquired from a digital power meter through Modbus RTU communication, enabling real-time decision making based on the system operating conditions. Experimental validation was conducted on a 380 V three-phase laboratory-scale APFC system under various resistive and inductive loading conditions in both manual and automatic operating modes. The experimental results demonstrate that the proposed control strategy consistently performs reactive power compensation and improves the power factor according to the compensation requirements under different loading conditions. Furthermore, validation of the digital power meter against a reference measuring instrument indicates satisfactory measurement accuracy, ensuring reliable data acquisition for the proposed control system. These findings demonstrate the feasibility of integrating a Decision Tree-based data-driven control strategy into PLC-based APFC systems for reactive power compensation.

Keywords: Automatic Power Factor Correction (APFC), Decision Tree, Programmable Logic Controller (PLC), Reactive Power Compensation, Modbus RTU.

I. PENDAHULUAN

Peningkatan konsumsi energi listrik pada sektor industri, komersial, dan infrastruktur modern mendorong perlunya sistem tenaga listrik yang lebih efisien dan andal. Sebagian besar peralatan listrik, seperti motor induksi, transformator, dan ballast elektronik, merupakan beban induktif yang membutuhkan daya reaktif selama proses operasinya. Kebutuhan daya reaktif yang tinggi menyebabkan penurunan faktor daya (power factor), sehingga arus yang mengalir pada sistem meningkat, rugi-rugi daya bertambah, kapasitas saluran berkurang, serta dapat menimbulkan biaya penalti akibat rendahnya faktor daya. Oleh karena itu, kompensasi daya reaktif menjadi salah satu strategi penting untuk meningkatkan efisiensi sistem tenaga listrik dan menjaga kualitas penyaluran daya.

Salah satu metode yang umum digunakan untuk mengurangi kebutuhan daya reaktif adalah pemasangan capacitor bank yang dikendalikan oleh sistem Automatic Power Factor Correction (APFC). Sistem APFC bekerja dengan menyesuaikan kombinasi penyalan kapasitor sesuai perubahan kondisi beban sehingga faktor daya tetap berada pada rentang yang diinginkan. Dalam implementasinya, Programmable Logic Controller (PLC) banyak digunakan sebagai pengendali APFC karena memiliki tingkat keandalan yang tinggi, kemudahan pemrograman, serta kompatibilitas dengan sistem otomasi industri. Namun demikian, sebagian besar sistem APFC konvensional masih menerapkan strategi penyaliran kapasitor secara berurutan (sequential switching) atau berdasarkan batas ambang (threshold-based control), sehingga kemampuan adaptasinya terhadap perubahan beban masih terbatas.

Tabel 1 Perbandingan Metode Kendali APFC pada Penelitian Terdahulu

Ref	Decision Method	PLC	Direct Ladder Implementation	Experimental Validation	Adaptive Switching
[14]	Fuzzy Logic	✓	✗	✓	✓
[15]	ANN	✗	✗	✓	✓
[1]	Rule-Based	✓	✓	✓	✗
[6]	Conventional	✓	✓	✓	✗
This Work	Decision Tree	✓	✓	✓	✓

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk meningkatkan kinerja sistem APFC melalui penerapan metode kecerdasan buatan maupun strategi kendali berbasis aturan (rule-based control). Metode Fuzzy Logic banyak digunakan karena mampu menangani ketidakpastian pada kondisi pembebanan [14], namun memerlukan proses perancangan fungsi keanggotaan dan basis aturan yang relatif kompleks. Pendekatan Artificial Neural Network (ANN) menawarkan kemampuan prediksi yang baik terhadap perubahan kondisi sistem [15], tetapi membutuhkan jumlah data pelatihan yang besar serta sumber daya komputasi yang lebih tinggi. Di sisi lain, beberapa penelitian masih menggunakan metode Rule-Based [1] maupun Rotary

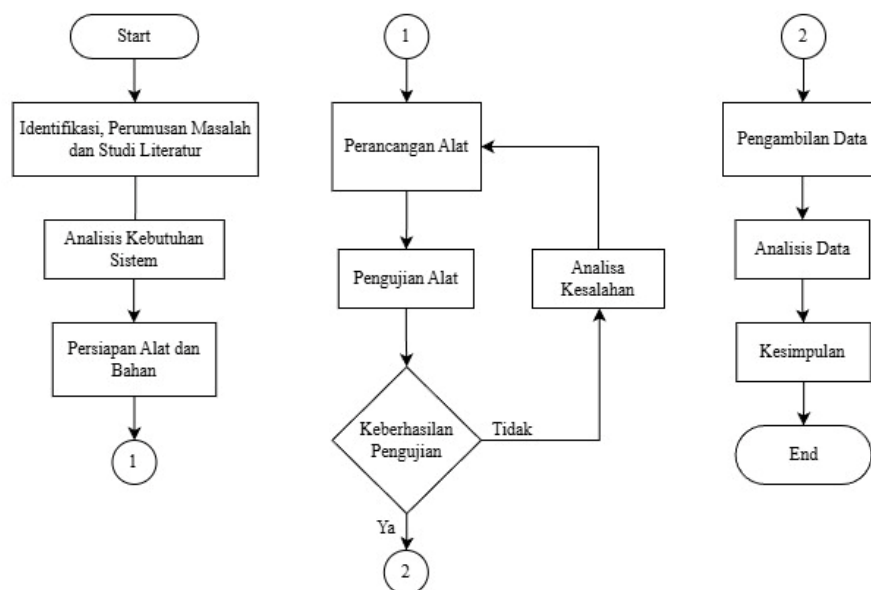
Controller [6] karena implementasinya sederhana, meskipun fleksibilitasnya terhadap perubahan karakteristik beban relatif terbatas.

Berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu, sebagian besar pengembangan sistem APFC masih berfokus pada penggunaan metode konvensional maupun algoritma kecerdasan buatan dengan kompleksitas komputasi yang relatif tinggi. Selain itu, implementasi model kecerdasan buatan secara langsung ke dalam Ladder Diagram PLC masih sangat terbatas, sehingga proses integrasi antara algoritma pengambilan keputusan dan sistem kendali industri belum banyak dibahas. Padahal, implementasi algoritma yang ringan, mudah diinterpretasikan, dan kompatibel dengan PLC menjadi aspek penting untuk mendukung penerapan APFC pada sistem otomasi industri.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini mengusulkan kendali berbasis Decision Tree untuk kompensasi daya reaktif pada sistem Automatic Power Factor Correction (APFC) berbasis Programmable Logic Controller (PLC). Model Decision Tree dibangun menggunakan data hasil pengujian sistem pada mode manual dengan parameter daya reaktif sebagai atribut utama, kemudian aturan keputusan yang dihasilkan diterjemahkan ke dalam Ladder Diagram PLC untuk menentukan kombinasi penyalan kapasitor secara otomatis. Sistem selanjutnya divalidasi melalui pengujian eksperimental menggunakan variasi beban resistif dan induktif pada mode manual maupun otomatis. Kontribusi utama penelitian ini meliputi: (1) pengembangan strategi kendali kompensasi daya reaktif berbasis Decision Tree, (2) implementasi aturan Decision Tree ke dalam Ladder Diagram PLC, dan (3) validasi eksperimental pada sistem APFC berbasis PLC menggunakan variasi kondisi pembebanan.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan melalui serangkaian tahapan yang disusun secara sistematis untuk mengembangkan strategi kendali berbasis Decision Tree pada sistem Automatic Power Factor Correction (APFC). Metodologi penelitian mencakup identifikasi permasalahan, studi literatur, perancangan sistem, pengembangan model Decision Tree, implementasi algoritma ke dalam Programmable Logic Controller (PLC), serta validasi sistem melalui pengujian eksperimental. Rangkaian tahapan penelitian tersebut dirangkum dalam diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

Sesuai dengan gambar 1 diatas untuk setiap tahapan dalam pembuatan penjelasanya sebagai berikut.

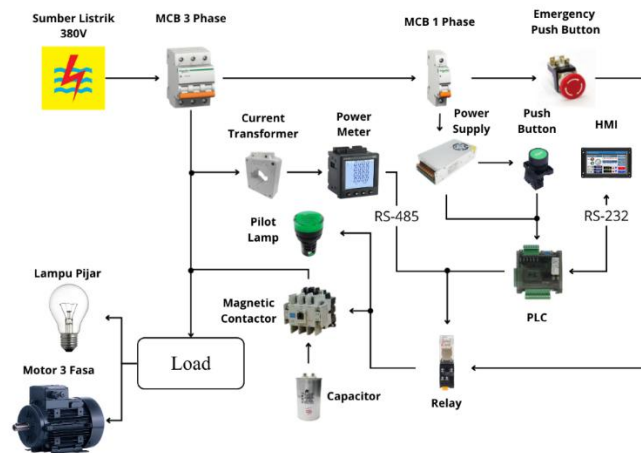
A. Identifikasi, Perumusan Masalah dan Studi Literatur

Penelitian diawali dengan proses identifikasi permasalahan yang berfokus pada keterbatasan metode pengendalian Automatic Power Factor Correction (APFC) konvensional dalam menentukan kebutuhan kompensasi daya reaktif secara adaptif. Berdasarkan permasalahan tersebut, dilakukan studi literatur untuk memperoleh landasan teoritis mengenai kompensasi daya reaktif, sistem APFC, komunikasi Modbus RTU,

implementasi Programmable Logic Controller (PLC), serta penerapan algoritma Decision Tree pada sistem kendali. Selanjutnya dilakukan proses perancangan sistem yang meliputi penyusunan arsitektur perangkat keras dan perangkat lunak, pengembangan model Decision Tree berdasarkan data hasil pengujian, implementasi aturan keputusan ke dalam Ladder Diagram PLC, serta integrasi dengan sistem monitoring berbasis Human Machine Interface (HMI). Tahap akhir penelitian berupa pengujian eksperimental menggunakan berbagai kondisi pembebanan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam melakukan kompensasi daya reaktif secara otomatis.

B. Perancangan dan Pembuatan Alat

Perancangan sistem dilakukan untuk mengintegrasikan perangkat keras dan perangkat lunak dalam membentuk sistem Automatic Power Factor Correction (APFC) berbasis Programmable Logic Controller (PLC). Sistem dirancang agar mampu melakukan kompensasi daya reaktif secara otomatis berdasarkan hasil pengukuran parameter kelistrikan yang diperoleh secara real-time. Arsitektur sistem terdiri atas sumber daya tiga fasa, panel APFC, capacitor bank, power meter digital, PLC, Human Machine Interface (HMI), serta beban listrik sebagai objek pengujian. Diagram blok sistem yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Skema Perancangan Alat

Power meter digital berfungsi sebagai perangkat akuisisi data yang mengukur parameter kelistrikan meliputi tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, daya semu, frekuensi, dan power factor. Seluruh parameter dikirimkan menuju PLC melalui komunikasi Modbus RTU menggunakan antarmuka RS-485 sehingga PLC memperoleh data pengukuran secara periodik sebagai dasar pengambilan keputusan.

Selanjutnya, PLC memproses data hasil pengukuran menggunakan aturan keputusan (decision rules) yang dihasilkan oleh algoritma Decision Tree. Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, PLC menentukan kombinasi penyalan setiap step capacitor bank untuk menghasilkan kapasitas kompensasi daya reaktif yang sesuai dengan kondisi pembebanan. Selain mengendalikan kontaktor kapasitor, PLC juga mengirimkan informasi parameter kelistrikan, status operasi sistem, serta kondisi penyalan masing-masing step kapasitor menuju HMI sehingga proses monitoring dapat dilakukan secara real-time.

Implementasi sistem dirancang menggunakan enam step capacitor bank yang dikendalikan secara independen oleh PLC. Konfigurasi tersebut memungkinkan sistem menghasilkan beberapa kombinasi kapasitas kompensasi sehingga proses pengendalian daya reaktif dapat dilakukan secara lebih fleksibel dibandingkan penyalan kapasitor secara tunggal.

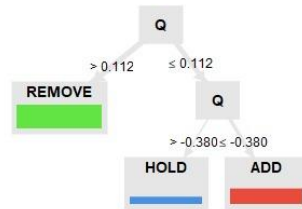
C. Perancangan Algoritma Decision Tree

Model Decision Tree dikembangkan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam menentukan kebutuhan kompensasi daya reaktif pada sistem Automatic Power Factor Correction (APFC). Dataset yang digunakan diperoleh dari hasil pengujian sistem pada mode manual dengan berbagai variasi kondisi pembebanan. Seluruh parameter kelistrikan direkam menggunakan power meter digital sehingga diperoleh data pengukuran yang merepresentasikan karakteristik operasi sistem.

Pada penelitian ini, parameter daya reaktif digunakan sebagai atribut utama dalam proses pembentukan model karena secara langsung merepresentasikan kebutuhan kompensasi daya reaktif pada sistem tenaga

listrik. Dataset yang telah diperoleh kemudian diproses menggunakan perangkat lunak RapidMiner untuk menghasilkan model Decision Tree berdasarkan hubungan antara nilai daya reaktif dan kombinasi penyalaan capacitor bank.

Proses pelatihan menghasilkan struktur pohon keputusan (decision tree) yang terdiri atas sejumlah aturan keputusan (if-then rules). Setiap aturan menunjukkan batas nilai daya reaktif yang digunakan sebagai dasar penentuan jumlah kapasitas kompensasi yang harus diaktifkan. Struktur Decision Tree hasil pelatihan ditunjukkan pada Gambar 3.



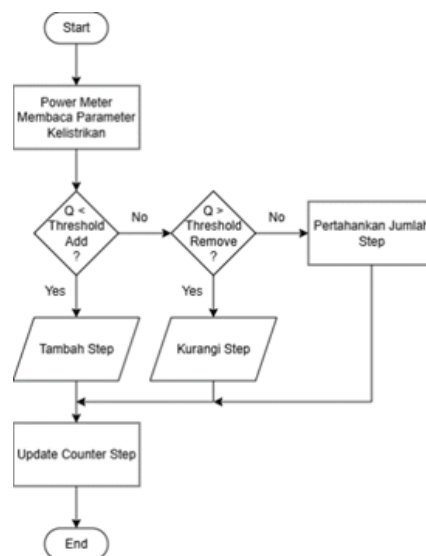
Gambar 3 Algoritma Decision Tree

D. Implemen Decision Tree pada PLC

Aturan keputusan yang dihasilkan oleh model Decision Tree selanjutnya diterjemahkan ke dalam bentuk Ladder Diagram agar dapat dijalankan secara langsung oleh Programmable Logic Controller (PLC). Setiap percabangan pada Decision Tree dikonversi menjadi logika if-then yang menentukan kombinasi penyalaan capacitor bank berdasarkan nilai daya reaktif hasil pengukuran.

PLC memperoleh data parameter kelistrikan dari power meter digital melalui komunikasi Modbus RTU menggunakan antarmuka RS-485. Data yang diterima kemudian dibandingkan dengan batas keputusan yang telah ditentukan pada model Decision Tree. Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, PLC secara otomatis mengaktifkan atau menonaktifkan setiap step capacitor bank sehingga kapasitas kompensasi daya reaktif selalu menyesuaikan kondisi pembebanan.

Implementasi Decision Tree ke dalam Ladder Diagram memungkinkan proses pengambilan keputusan dilakukan secara langsung di dalam PLC tanpa memerlukan komputasi tambahan selama sistem beroperasi. Diagram alir implementasi serta contoh Ladder Diagram yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Diagram Alir Implementasi Decision Tree pada Ladder Diagram PLC

E. Skema Pengujian dan Pengambilan Data

Pengujian dilakukan untuk memvalidasi kemampuan sistem Automatic Power Factor Correction (APFC) berbasis Decision Tree dalam menentukan kebutuhan kompensasi daya reaktif pada berbagai

kondisi pembebanan. Seluruh pengujian dilaksanakan pada sistem tenaga listrik tiga fasa 380 V menggunakan variasi beban resistif dan induktif. Selain mengevaluasi kinerja sistem kendali, pengujian juga bertujuan untuk memverifikasi akurasi data pengukuran yang digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan oleh PLC.

Spesifikasi beban yang digunakan selama proses pengujian disajikan pada Tabel 1. Variasi beban dipilih untuk merepresentasikan karakteristik pembebanan yang umum dijumpai pada sistem tenaga listrik, sehingga kemampuan sistem dalam melakukan kompensasi daya reaktif dapat dievaluasi pada kondisi operasi yang berbeda.

Tabel 2 Spesifikasi Komponen Beban Pengujian

No	Jenis Beban	Komponen	Daya	Jumlah	Konfigurasi
1	Resistif	Lampu pijar	100 W	3	Hubung bintang
2	Induktif	Motor induksi tiga fasa	5,5 kW	2	Hubung bintang

Pengujian dilakukan dalam dua tahap, yaitu mode manual dan mode otomatis. Pada mode manual, setiap kombinasi step capacitor bank diaktifkan secara langsung untuk memperoleh karakteristik perubahan parameter kelistrikan terhadap variasi pembebanan. Data hasil pengujian manual selanjutnya digunakan sebagai dataset dalam proses pembentukan model Decision Tree.

Setelah model Decision Tree diperoleh, aturan keputusan yang dihasilkan diimplementasikan ke dalam Programmable Logic Controller (PLC) menggunakan Ladder Diagram. Pada mode otomatis, PLC membaca parameter kelistrikan dari power meter melalui komunikasi Modbus RTU, kemudian menentukan kombinasi penyalan capacitor bank berdasarkan aturan Decision Tree yang telah dibentuk.

Untuk mengevaluasi performa sistem secara menyeluruh, penelitian ini terdiri atas beberapa skenario pengujian yang dirangkum pada Tabel 3.

Tabel 3 Skenario Pengujian Sistem

No	Skenario Pengujian	Tujuan
1	Pengujian beban resistif	Mengevaluasi respons sistem pada kondisi beban dengan kebutuhan daya reaktif yang rendah
2	Pengujian beban induktif	Mengevaluasi kemampuan sistem dalam melakukan kompensasi daya reaktif
3	Pengujian mode otomatis	Memvalidasi implementasi Decision Tree pada PLC

Selama proses pengujian, parameter kelistrikan yang direkam meliputi tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, daya semu, frekuensi, serta power factor. Seluruh data diperoleh menggunakan power meter digital dan digunakan sebagai dasar analisis performa sistem pada bagian Results and Discussion.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian Operasi Mode Manual

Pengujian mode manual dilakukan sebagai tahap awal untuk memperoleh karakteristik sistem Automatic Power Factor Correction (APFC) pada berbagai kondisi pembebanan. Pada tahap ini, setiap step capacitor bank diaktifkan secara manual sehingga perubahan parameter kelistrikan akibat variasi kapasitas kompensasi daya reaktif dapat diamati secara langsung. Data hasil pengujian ini selanjutnya digunakan sebagai dataset dalam proses pembentukan model Decision Tree.

Pengujian dilakukan menggunakan dua jenis beban, yaitu beban resistif dan beban induktif. Pemilihan kedua jenis beban tersebut bertujuan untuk merepresentasikan karakteristik pembebanan yang berbeda terhadap kebutuhan kompensasi daya reaktif. Beban resistif digunakan untuk mengevaluasi kondisi sistem dengan kebutuhan daya reaktif yang relatif kecil, sedangkan beban induktif digunakan untuk merepresentasikan kondisi yang memerlukan kompensasi daya reaktif secara signifikan.

1. Pengujian pada Beban Resistif

Pengujian beban resistif dilakukan menggunakan variasi kombinasi step capacitor bank mulai dari kondisi tanpa kompensasi hingga seluruh kapasitor diaktifkan.



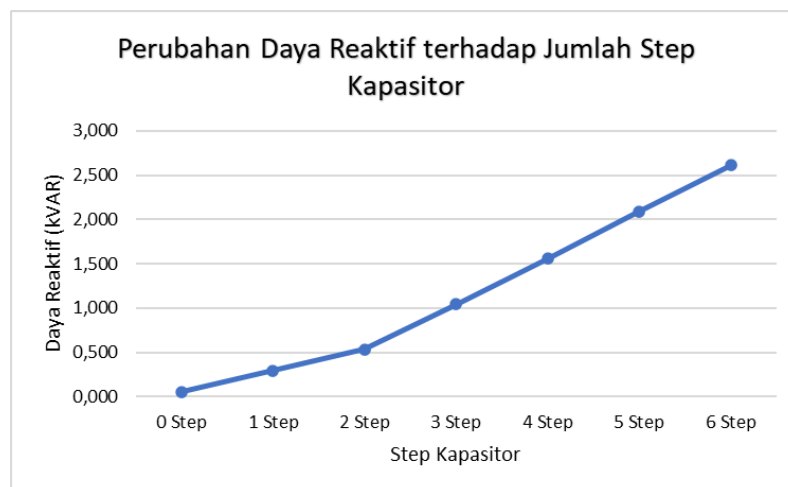
Gambar 5 Pengujian Manual pada Beban Resistif

Parameter kelistrikan yang diamati meliputi tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, daya semu, serta power factor pada setiap kondisi pengujian. Hasil pengukuran disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4 Hasil Pengujian Beban Resistif (Mode Manual)

Step Kapasitor	Tegangan (V_{L-L})	Arus (A)	Daya		Faktor Daya ($\cos \phi$)	Keterangan
			Aktif (kW)	Reaktif (kVAR)		
0 Step	409,08	0,440	0,300	0,058	1,000	Kondisi awal
1 Step	409,13	0,570	0,272	0,292	-0,682	Leading
2 Step	409,20	0,840	0,251	0,535	-0,425	Leading
3 Step	409,20	1,518	0,212	1,045	-0,199	Overcompensation
4 Step	409,33	2,230	0,177	1,559	-0,112	Overcompensation
5 Step	409,28	2,978	0,144	2,088	-0,068	Overcompensation
6 Step	409,25	3,720	0,113	2,615	-0,043	Overcompensation

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sebelum proses kompensasi dilakukan (0 Step), sistem telah memiliki power factor sebesar 1.000 dengan kebutuhan daya reaktif yang relatif kecil, yaitu 0.058 kVAR. Kondisi ini menunjukkan bahwa beban resistif pada dasarnya tidak memerlukan kompensasi daya reaktif karena arus dan tegangan berada pada kondisi yang hampir sefasa.



Gambar 6 Grafik Perubahan Daya Reaktif terhadap Step Kapasitor (Beban Resistif)

Ketika capacitor bank diaktifkan secara bertahap, nilai daya reaktif meningkat secara hampir linier sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6. Namun demikian, peningkatan kapasitas kompensasi tersebut menyebabkan sistem memasuki kondisi leading power factor, bahkan mengalami overcompensation mulai pada Step 3. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas reaktif yang disuplai oleh kapasitor telah melebihi kebutuhan daya reaktif beban.

Fenomena tersebut mengindikasikan bahwa beban resistif tidak memerlukan kompensasi daya reaktif dalam jumlah besar. Oleh karena itu, penggunaan Decision Tree diharapkan mampu menghindari aktivasi capacitor bank yang tidak diperlukan dengan menentukan kombinasi step capacitor sesuai kebutuhan daya reaktif aktual. Data hasil pengujian ini selanjutnya digunakan sebagai bagian dari dataset pelatihan dalam proses pembentukan model Decision Tree.

2. Pengujian pada Beban Induktif (1 Motor 3 Fasa)

Pengujian manual pada beban motor induksi tiga fasa dilakukan untuk memperoleh karakteristik perubahan daya reaktif terhadap variasi kapasitas kompensasi yang diberikan oleh capacitor bank.



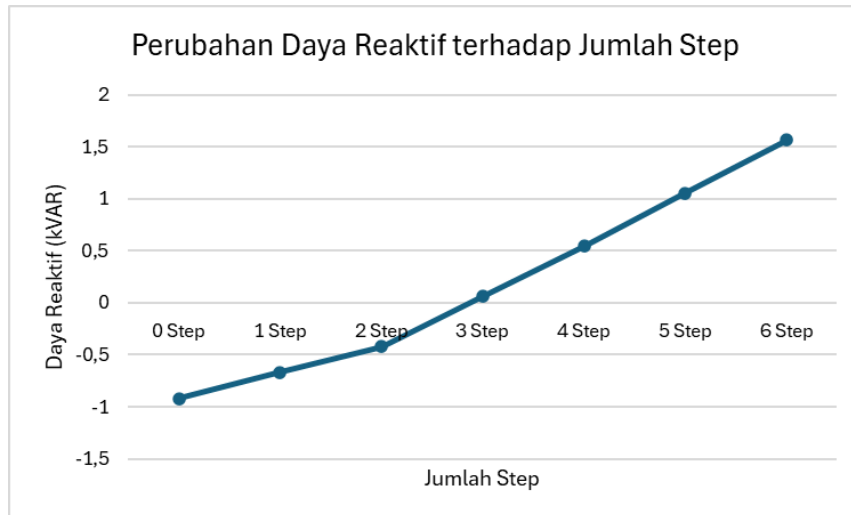
Gambar 7 Pengujian Manual pada Beban Induktif (1 Motor 3 Fasa)

Hasil pengujian disajikan pada Tabel 5

Tabel 5 Hasil Pengujian Beban Induktif 1 Motor 3 Fasa (Mode Manual)

Step Kapasitor	Tegangan (V_{L-L})	Arus (A)	Daya		Faktor Daya ($\cos \phi$)	Keterangan
			Aktif (kW)	Reaktif (kVAR)		
0 Step	404,9	1,37	0,264	-0,919	0,276	Kondisi awal (lagging)
1 Step	404,4	1,02	0,241	-0,668	0,340	Kompensasi sebagian
2 Step	404,6	0,69	0,215	-0,421	0,456	Kompensasi meningkat
3 Step	406,5	0,31	0,134	0,062	1,000	Kompensasi optimum
4 Step	406,2	0,85	0,073	0,547	-0,132	Overcompensation
5 Step	406,3	1,56	0,026	1,057	-0,024	Overcompensation
6 Step	406,2	2,30	0,014	1,568	-0,009	Overcompensation

Pada kondisi awal (Step 0), sistem memiliki nilai reactive power sebesar -0.919 kVAR dengan power factor sebesar 0.276, yang menunjukkan bahwa beban motor induksi memerlukan daya reaktif yang cukup besar. Kondisi ini sesuai dengan karakteristik motor induksi yang membutuhkan daya reaktif untuk membentuk medan magnet selama proses operasi.



Gambar 8 Grafik Perubahan Daya Reaktif terhadap Step Kapasitor (Beban Induktif 1 Motor)

Seiring dengan bertambahnya jumlah capacitor step, kebutuhan daya reaktif dari sumber mengalami penurunan secara bertahap hingga mendekati nol. Kondisi kompensasi optimum diperoleh pada Step 3, di mana nilai reactive power mencapai 0.062 kVAR dan power factor meningkat menjadi 1.000. Hasil ini menunjukkan bahwa kapasitas kompensasi yang diberikan oleh capacitor bank hampir sepenuhnya memenuhi kebutuhan daya reaktif beban tanpa menyebabkan kompensasi berlebih.

Namun demikian, penambahan kapasitas kompensasi setelah Step 3 menyebabkan sistem memasuki kondisi overcompensation, yang ditandai dengan perubahan nilai reactive power menjadi positif dan power factor berubah menjadi leading. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kapasitor telah menyuplai daya reaktif melebihi kebutuhan beban sehingga tidak lagi memberikan peningkatan performa sistem.

Karakteristik perubahan daya reaktif yang diperoleh dari pengujian ini menunjukkan adanya hubungan yang jelas antara kebutuhan kompensasi daya reaktif dan kombinasi capacitor step. Hubungan tersebut kemudian dimanfaatkan sebagai dasar pembentukan aturan keputusan pada model Decision Tree, sehingga sistem mampu menentukan kombinasi kapasitor yang sesuai berdasarkan kondisi operasi yang terukur.

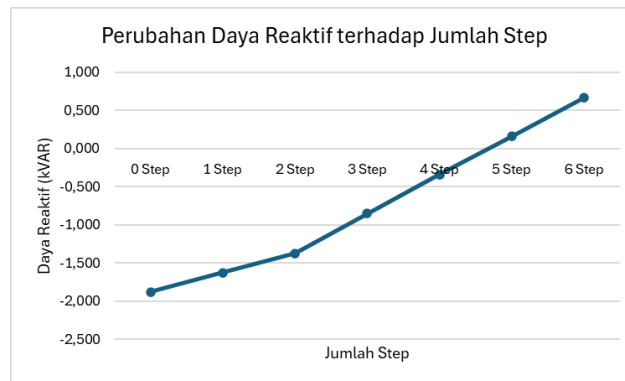
3. Pengujian pada Beban Induktif (2 Motor 3 Fasa)

Pengujian manual pada beban dua motor induksi tiga fasa dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik sistem pada kondisi pembebanan yang lebih tinggi dibandingkan pengujian sebelumnya. Penambahan jumlah motor menyebabkan kebutuhan daya reaktif meningkat sehingga diperlukan kapasitas kompensasi yang lebih besar untuk memperbaiki power factor. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 6

Tabel 6 Hasil Pengujian Beban Induktif 2 Motor 3 Fasa (Mode Manual)

Step Kapasitor	Tegangan (V_{L-L})	Arus (A)	Daya		Faktor Daya ($\cos \phi$)	Keterangan
			Aktif (kW)	Reaktif (kVAR)		
0 Step	407,4	2,742	0,449	-1,881	0,232	Kondisi Awal Lagging
1 Step	407,4	2,388	0,434	-1,627	0,257	Kompensasi Sebagian
2 Step	407,5	2,042	0,418	-1,375	0,291	Kompensasi Meningkat
3 Step	407,4	1,340	0,378	-0,852	0,405	Kompensasi Meningkat
4 Step	407,6	0,742	0,447	-0,339	0,696	Mendekati Optimum
5 Step	407,6	0,626	0,259	0,161	-0,850	Overcompensation
6 Step	407,6	1,134	0,210	0,667	-0,300	Overcompensation

Sebelum dilakukan kompensasi (Step 0), sistem memiliki reactive power sebesar -1.881 kVAR dengan power factor sebesar 0.232, lebih rendah dibandingkan kondisi satu motor tiga fasa. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah beban induktif secara langsung meningkatkan kebutuhan daya reaktif yang harus disuplai oleh sumber, sehingga kualitas faktor daya sistem mengalami penurunan.



Gambar 9 Grafik Perubahan Daya Reaktif terhadap Step Kapasitor (Beban Induktif 2 Motor)

Peningkatan jumlah capacitor step secara bertahap mengurangi kebutuhan daya reaktif dari sumber, yang ditunjukkan oleh kenaikan nilai reactive power menuju titik nol. Hingga Step 4, sistem mencapai kondisi yang mendekati kompensasi optimum dengan reactive power sebesar -0.339 kVAR dan power factor meningkat menjadi 0.696 . Berbeda dengan pengujian satu motor tiga fasa yang mencapai kondisi optimum pada Step 3, pengujian ini menunjukkan bahwa beban yang lebih besar memerlukan kapasitas kompensasi yang lebih tinggi untuk mendekati kondisi operasi optimum.

Ketika kapasitor ditambah hingga Step 5 dan Step 6, sistem mulai mengalami overcompensation, yang ditandai dengan perubahan reactive power menjadi positif sebesar 0.161 kVAR dan 0.667 kVAR, disertai perubahan power factor ke kondisi leading. Fenomena ini menunjukkan bahwa kapasitas kompensasi telah melampaui kebutuhan daya reaktif beban sehingga tidak lagi memberikan peningkatan kualitas sistem.

Hasil pengujian ini memperlihatkan bahwa kebutuhan kompensasi daya reaktif sangat dipengaruhi oleh tingkat pembebanan. Semakin besar beban induktif yang terhubung, semakin besar pula kapasitas capacitor bank yang diperlukan untuk memperoleh kondisi operasi yang optimal. Karakteristik hubungan antara tingkat pembebanan, kebutuhan daya reaktif, dan kombinasi capacitor step inilah yang menjadi dasar pembentukan aturan keputusan pada model Decision Tree, sehingga sistem mampu menentukan strategi kompensasi yang sesuai secara otomatis.

B. Decision Tree Training and PLC Implementation

Pengujian mode manual dilakukan untuk memperoleh dataset yang digunakan pada proses pelatihan model Decision Tree. Pengujian dilaksanakan pada tiga kondisi pembebanan, yaitu beban resistif, beban satu motor induksi tiga fasa, dan beban dua motor induksi tiga fasa. Pada setiap kondisi pembebanan, kombinasi capacitor step diaktifkan secara bertahap mulai dari Step 0 hingga Step 6, kemudian parameter kelistrikan direkam menggunakan power meter digital.

Parameter yang digunakan sebagai atribut utama dalam proses pembentukan model meliputi nilai reactive power, sedangkan label kelas ditentukan berdasarkan kombinasi capacitor step yang menghasilkan kondisi kompensasi paling sesuai. Ringkasan dataset hasil pengujian disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7 Dataset Pelatihan Model Decision Tree

Daya Reaktif	Step optimal	Step Aktif	Output	Daya Reaktif	Step optimal	Step Aktif	Output	Daya Reaktif	Step optimal	Step Aktif	Output
0,058	0	0	HOLD	-0,919	3	0	ADD	-1,881	4	0	ADD
0,292	0	1	REMOVE	-0,668	3	1	ADD	-1,627	4	1	ADD
0,535	0	2	REMOVE	-0,421	3	2	ADD	-1,375	4	2	ADD
1,045	0	3	REMOVE	0,062	3	3	HOLD	-0,852	4	3	ADD
1,559	0	4	REMOVE	0,547	3	4	REMOVE	-0,339	4	4	HOLD
2,088	0	5	REMOVE	1,057	3	5	REMOVE	0,161	4	5	REMOVE
2,615	0	6	REMOVE	1,568	3	6	REMOVE	0,667	4	6	REMOVE

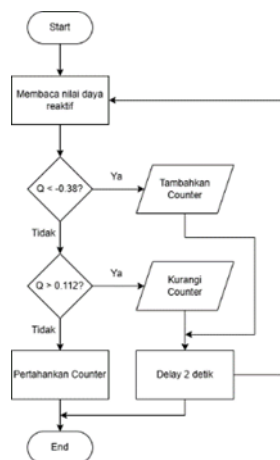
Dataset yang diperoleh menunjukkan variasi kebutuhan kompensasi daya reaktif pada setiap kondisi pembebanan. Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai training dataset dalam proses pembentukan model Decision Tree menggunakan perangkat lunak RapidMiner.

Model Decision Tree dibangun menggunakan dataset hasil pengujian mode manual. Proses pelatihan dilakukan menggunakan algoritma Decision Tree pada perangkat lunak RapidMiner sehingga diperoleh model klasifikasi berdasarkan hubungan antara nilai reactive power dan kombinasi capacitor step.

Struktur pohon keputusan hasil pelatihan ditunjukkan pada Gambar 3.

Hasil pelatihan menghasilkan beberapa decision threshold yang membagi rentang nilai reactive power menjadi beberapa kelas keputusan. Setiap percabangan pada pohon keputusan menghasilkan aturan if-then yang digunakan untuk menentukan kombinasi capacitor step sesuai kondisi pembebanan.

Aturan keputusan yang dihasilkan oleh model Decision Tree selanjutnya diterjemahkan ke dalam logika Ladder Diagram PLC. Proses implementasi diawali dengan pembacaan nilai reactive power dari power meter melalui komunikasi Modbus RTU. Nilai tersebut kemudian dibandingkan terhadap batas keputusan (decision threshold) yang diperoleh dari proses pelatihan.



Gambar 10 Diagram Keputusan Threshold Decision Tree pada PLC

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10, apabila nilai reactive power lebih kecil dari -0.38 kVAR, PLC akan menambahkan satu capacitor step untuk meningkatkan kapasitas kompensasi. Sebaliknya, apabila nilai reactive power lebih besar dari 0.11 kVAR, sistem akan mengurangi satu capacitor step guna menghindari kondisi overcompensation. Apabila nilai reactive power berada di antara kedua batas tersebut, kombinasi kapasitor dipertahankan tanpa perubahan.

Untuk mencegah proses penyalaan dan pelepasan kapasitor secara berulang (hunting), setiap perubahan kondisi diberikan delay selama 5 detik sebelum PLC melakukan evaluasi kembali terhadap nilai reactive power. Strategi ini menghasilkan proses kompensasi yang lebih stabil sekaligus meningkatkan keandalan operasi sistem APFC.

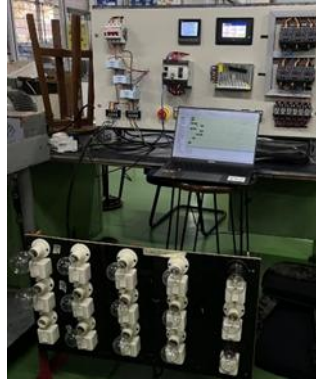
C. Pengujian Operasi Mode Otomatis

Setelah model Decision Tree berhasil diimplementasikan ke dalam Programmable Logic Controller (PLC), dilakukan pengujian mode otomatis untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menentukan kapasitas kompensasi daya reaktif secara mandiri. Berbeda dengan pengujian manual yang digunakan sebagai proses pembentukan dataset, pada tahap ini seluruh keputusan penyalaan dan pelepasan capacitor bank dilakukan secara otomatis berdasarkan nilai reactive power yang dibaca oleh power meter melalui komunikasi Modbus RTU.

Pengujian dilakukan menggunakan skenario pembebanan yang sama dengan proses pengambilan dataset, yaitu beban resistif, satu motor induksi tiga fasa, dan dua motor induksi tiga fasa. Tujuannya adalah untuk memverifikasi bahwa aturan keputusan yang dihasilkan oleh model Decision Tree mampu menghasilkan strategi kompensasi yang sesuai pada berbagai kondisi operasi.

1. Pengujian mode Otomatis terhadap Beban Resistif

Pengujian otomatis pada beban resistif dilakukan untuk memverifikasi kemampuan sistem dalam mempertahankan kondisi operasi ketika tidak diperlukan kompensasi daya reaktif.



Gambar 11 Pengujian Mode Otomatis pada Beban Resistif

Hasil pengujian disajikan pada Tabel 8, yang menunjukkan bahwa sistem menghasilkan keputusan yang konsisten selama lima kali percobaan.

Tabel 8 Hasil Pengujian Mode Otomatis pada Beban Resistif

Trial	Selected Capacitor Step	Power Factor	Controller Decision
1	0	1.000	Hold
2	0	1.000	Hold
3	0	1.000	Hold
4	0	1.000	Hold
5	0	1.000	Hold

Pada seluruh percobaan, Decision Tree memilih Step 0 sebagai kondisi operasi dan PLC mempertahankan keputusan tersebut (hold state) tanpa mengaktifkan capacitor bank. Nilai power factor tetap berada pada 1.000, yang menunjukkan bahwa beban resistif telah beroperasi pada kondisi mendekati ideal sehingga tidak memerlukan tambahan daya reaktif. Secara statistik, kelima percobaan menghasilkan tegangan rata-rata 408,66 V dengan simpangan baku hanya 0,15 V (koefisien variasi 0,04%), arus rata-rata 0,432 A dengan simpangan baku 0,004 A (0,9%), dan daya aktif rata-rata 0,2954 kW dengan simpangan baku 0,0005 kW (0,17%). Nilai simpangan baku yang sangat kecil pada seluruh parameter ini secara kuantitatif menegaskan tingkat repeatability keputusan Decision Tree pada PLC.

Konsistensi hasil pengujian menunjukkan bahwa implementasi Decision Tree pada PLC mampu menghindari penyalaan kapasitor yang tidak diperlukan. Dengan demikian, sistem tidak hanya mampu melakukan kompensasi ketika dibutuhkan, tetapi juga mampu mempertahankan kondisi operasi tanpa melakukan unnecessary switching, sehingga risiko overcompensation dan frekuensi penyaklaran kontaktor dapat diminimalkan.

2. Pengujian mode Automatis terhadap Beban Induktif

Untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam merespons perubahan kondisi pembebanan, dilakukan pengujian otomatis menggunakan skenario perubahan beban secara dinamis.



Gambar 12 Skenario Pengujian Dinamis pada Beban Induktif

Pengujian diawali dengan satu motor induksi tiga fasa (Skema 1), kemudian ditambahkan satu motor sehingga menjadi dua motor (Skema 2), dan diakhiri dengan pelepasan salah satu motor sehingga sistem kembali beroperasi dengan satu motor (Skema 3). Hasil pengujian disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9 Hasil Pengujian Mode Otomatis pada Beban Induktif

Trial	Load Condition	Selected Step	Controller Action	Power Factor
1	1 Motor	3	ADD (3 Step)	1.000
	2 Motors	5	ADD (2 Step)	-0.824
	Back to 1 Motor	3	REMOVE (2 Step)	1.000
2	1 Motor	3	ADD (3 Step)	1.000
	2 Motors	5	ADD (2 Step)	-0.833
	Back to 1 Motor	3	REMOVE (2 Step)	1.000
3	1 Motor	3	ADD (3 Step)	1.000
	2 Motors	5	ADD (2 Step)	-0.829
	Back to 1 Motor	3	REMOVE (2 Step)	1.000

Pada Skema 1, sistem mendeteksi kebutuhan daya reaktif sebesar sekitar -0.09 kVAR dan secara otomatis mengaktifkan 3 capacitor steps, sehingga power factor meningkat menjadi 1.000. Ketika beban ditambah menjadi dua motor (Skema 2), kebutuhan daya reaktif meningkat menjadi sekitar -0.17 kVAR. Berdasarkan aturan Decision Tree, PLC menambahkan 2 capacitor steps, sehingga jumlah kapasitor aktif menjadi 5 steps.

Selanjutnya, ketika salah satu motor dilepaskan (Skema 3), kebutuhan daya reaktif kembali menurun hingga mendekati kondisi awal. Sistem kemudian mengurangi 2 capacitor steps, sehingga jumlah kapasitor aktif kembali menjadi 3 steps. Hasil ini menunjukkan bahwa strategi kendali berbasis Decision Tree mampu menyesuaikan kapasitas kompensasi secara otomatis mengikuti perubahan kondisi pembebanan tanpa memerlukan intervensi operator.

Selain menghasilkan keputusan yang sesuai, hasil pengujian juga menunjukkan bahwa seluruh tiga kali percobaan menghasilkan pola penyalan kapasitor yang identik. Konsistensi tersebut mengindikasikan bahwa implementasi algoritma Decision Tree pada PLC memiliki repeatability yang baik dalam merespons perubahan beban yang sama. Sebagai ilustrasi kuantitatif, nilai power factor pada Skema 2 (ADD 5 step) di ketiga trial menghasilkan rata-rata -0.829 dengan simpangan baku hanya 0.004 (koefisien variasi 0.4%), menunjukkan variasi antar pengulangan yang sangat kecil.

IV. CONCLUSION

Penelitian ini berhasil mengembangkan strategi Decision Tree-Based Reactive Power Compensation Control pada sistem Automatic Power Factor Correction (APFC) berbasis Programmable Logic Controller (PLC). Model Decision Tree dibangun menggunakan dataset hasil pengujian mode manual dan menghasilkan aturan keputusan yang dapat diterjemahkan secara langsung ke dalam Ladder Diagram PLC untuk mengendalikan penyalan capacitor bank secara otomatis berdasarkan nilai reactive power.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menentukan kapasitas kompensasi yang sesuai pada berbagai kondisi pembebanan. Pada pengujian satu motor induksi tiga fasa, sistem berhasil meningkatkan power factor dari 0.276 menjadi 1.000 dengan menurunkan reactive power dari -0.919 kVAR menjadi 0.062 kVAR melalui aktivasi 3 capacitor steps. Pada kondisi dua motor induksi tiga fasa, sistem secara otomatis meningkatkan jumlah kapasitor aktif dari 3 menjadi 5 steps ketika beban bertambah, kemudian kembali menjadi 3 steps setelah salah satu motor dilepaskan, sehingga menunjukkan kemampuan adaptasi terhadap perubahan kebutuhan kompensasi daya reaktif.

Selain itu, seluruh skenario pengujian otomatis menghasilkan pola keputusan yang konsisten pada setiap percobaan, menunjukkan bahwa implementasi Decision Tree pada PLC memiliki repeatability yang baik dalam menentukan strategi kompensasi daya reaktif. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan yang diusulkan mampu mengintegrasikan algoritma Decision Tree dengan sistem kendali industri berbasis PLC secara sederhana, mudah diinterpretasikan, dan sesuai untuk diterapkan pada sistem Automatic Power Factor Correction skala laboratorium.

Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada pengujian sistem menggunakan variasi pembebanan yang lebih kompleks, implementasi pada sistem tenaga dengan skala yang lebih besar, serta perbandingan performa Decision Tree dengan metode kecerdasan buatan lainnya, seperti Fuzzy Logic atau Artificial Neural Network, untuk mengevaluasi efektivitas metode pada berbagai kondisi operasi. Penelitian ini juga

memiliki sejumlah keterbatasan yang perlu diperhatikan. Pengujian dilakukan pada skala trainer kit laboratorium dengan durasi pengamatan yang relatif singkat, sehingga keandalan sistem dalam operasi jangka panjang belum dapat dipastikan. Selain itu, aspek non-ideal pada sistem tenaga listrik seperti harmonisa, gangguan noise pada sensor, keterlambatan komunikasi data, serta ketidakseimbangan beban antar fasa belum dianalisis secara khusus, sehingga menjadi arah penelitian lanjutan yang penting untuk memvalidasi performa sistem pada kondisi operasi industri yang sesungguhnya. Perbandingan kuantitatif waktu tanggap (response time) terhadap metode rotary konvensional secara langsung juga belum dilakukan pada penelitian ini dan direkomendasikan sebagai pengujian lanjutan.

REFERENCES

- [1] M. Kokate, S. O. Bhoyar, and S. A. Sawarkar, "Industrial Power Penalty Reduction by Engaging APFC Unit," *IJIREICE*, vol. 4, no. 2, pp. 81–85, 2016, doi: 10.17148/ijireeice.2016.4222.
- [2] M. Ali, F. Rashid, and S. Rasheed, "Power factor improvement for a three-phase system using reactive power compensation," *Indonesian J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 24, no. 2, pp. 715–727, 2021, doi: 10.11591/ijeecs.v24.i2.pp715-727.
- [3] A. Yadav and S. P. Makhija, "Passive power factor correction using capacitor Bank in MATLAB," *Int. J. Res. Publ. Rev.*, vol. 6, no. 6, pp. 820–828, 2025, doi: 10.55248/gengpi.6.0625.2026.
- [4] K. Agung Syahputra and F. R. A Bukit, "Perancangan HMI (Human Machine Interface) Sebagai Pengontrol Dan Pendeteksi Dini Kerusakan Kapasitor Bank Berbasis PLC," *J. Energy Electr. Eng. (JEEE)*, vol. 101, 2022.
- [5] S. Marpaung and M. Mungkin, "Implementation of an Automatic Capacitor Bank Control System Using PLC For Power Factor Optimization," *Int. J. Econ. Technol. Soc. Sci.*, vol. 5, pp. 267–276, 2024.
- [6] A. R. R. Asefi, "Rancang bangun trainer kit capacitor bank untuk perbaikan faktor daya berbasis PLC dan HMI dengan metode rotary," *Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya*, 2024.
- [7] H. K. M. Paredes, "Decision Tree Based Expert System for Power Factor Improvement Under Distorted and Unbalanced Current Conditions," no. 11, pp. 109–114, 2015, doi: 10.15199/48.2015.11.29.
- [8] Y. Panggei, Y. Rombe Pasalli, F. Yudo, S. Paisey, and A. B. Rehiara, "Power factor correction for energy efficient at public hospital of Manokwari," *JIMESE*, vol. 1, no. 1, pp. 20–34, 2023, doi: 10.61511/jimese.v1i1.
- [9] F. Toba, V. A. Suoth, S. Kolibu, and A. Pandara, "Analisis Perbandingan Daya Listrik saat Sebelum dan Sesudah Variasi Kapasitor pada Beban listrik Rumah Tangga," *J. MIPA*, vol. 13, no. 1, pp. 11–17, 2024.
- [10] J. C. Nogueira, B. da G. D. Rodrigues, A. T. D. R. Fernandes, W. D. de Oliveira, and U. H. Bezerra, "Comparison between decision tree and optimal power flow techniques applied to voltage corrective control in electric systems," *J. Eng. Technol. Ind. Appl.*, vol. 6, no. 21, pp. 4–12, 2020, doi: 10.5935/2447-0228.20200001.
- [11] M. Harahap, Y. T. Nugraha, M. Adam, and M. S. Nasution, "Pengaruh Perubahan Variasi Eksitasi Tegangan Terhadap Daya Reaktif Pada Generator," *Rekayasa Elektr. dan Energi*, vol. 3, pp. 71–76, 2021, doi: 10.30596/rele.
- [12] A. Sarkar and B. Pal, "An Overview of Experimental Study Based Performance on Power Factor Improvement in More Effective and Efficient Way," *J. Recent Trends Electr. Eng.*, vol. 1, no. 2, pp. 17–37, 2025.
- [13] D. B. Stiawan and Y. S. Nugroho, "Perbandingan Performa Algoritma Decision Tree untuk Klasifikasi Penerima Beasiswa Bank Indonesia," *Indonesian J. Comput. Sci.*, vol. 12, no. 4, p. 2108, 2023.
- [14] J. Jamaaluddin, "Automatic Power Factor Correction Using Fuzzy Inference System for Power Quality Improvement," *J. FORTEI-JEERI*, vol. 6, no. 1, pp. 20–35, 2025.
- [15] Ş. Sağıroğlu, I. Colak, and R. Bayındır, "Power factor correction technique based on artificial neural networks," *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 18–19, pp. 3204–3215, 2006, doi: 10.1016/j.enconman.2005.12.010.