

Studi Ekonomis Implementasi Kapasitor Dengan Detuned Reactor Untuk Meningkatkan Efisiensi Faktor Daya

Chandra Wiharya^{a)} Sigit Setya Wiwaha^{a)}, Hanifiyah Darna Fidya Amaral^{a)}, Budi Eko Prasetyo^{a)}

(Received 21 Desember 2023 || Revised 22 Januari 2023 || Accepted 22 Februari 2024)

Abstract: The use of electrical energy plays a vital role in supporting the continuity of production processes in industrial environments. One critical area that heavily relies on electrical power supply is in the planning of installing a capacitor bank with a detuned reactor. The primary objective of this planning is to enhance the power factor ($\cos \phi$) from 60% to 85.2% during full-load operations and up to 94% when operating as per demand simulations. The evaluation of power quality from the implementation of the Capacitor with Detuned Reactor is conducted through simulations using ETAP 12.6.0 software. The simulation results from ETAP 12.6.0 produce comparative graphs between buses equipped with the Capacitor with Detuned Reactor and buses without it, both during full-load operational conditions and when only operating in simulations. The information derived from the simulation provides a deeper insight into the impact of installing the capacitor with detuned reactor on power factor and power quality within this industrial environment. With this understanding, further steps can be taken to optimize the electrical power system within the industrial setting.

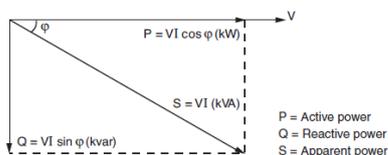
Keywords : Power factor, Capacitor bank, Electrical energy

1. Pendahuluan

Harmonisa adalah fenomena yang muncul akibat pengoperasian beban non-linear, menyebabkan bentuk gelombang tidak lagi bersifat sinusoidal murni dengan kelipatan dari frekuensi fundamental. Distorsi harmonisa umumnya mengakibatkan peningkatan panas dan kerugian energi pada komponen peralatan dalam sistem distribusi tenaga listrik, termasuk transformator, kabel, dan peralatan lainnya[1]. Fenomena ini mengurangi kualitas daya listrik dalam sistem, yang berdampak buruk pada instalasi tersebut. Untuk mengatasi harmonisa yang diakibatkan oleh beban non-linear, pemasangan kapasitor detuned reaktor, terutama pada setiap Sub Distribution Panel (SDP), dapat digunakan. Pengukuran menunjukkan bahwa harmonisa, terutama Total Harmonic Distortion (THDi) di setiap panel SDP, melebihi standar yang diizinkan, seperti R=19,0%, S=12,4%, T=42,3% (sesuai IEEE 519:1992, standar adalah 7%)[2].

2.1 Teori dasar

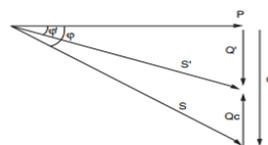
Komponen yang sefase dengan tegangan dan komponen yang berbeda fase 90^0 dengan tegangan seperti yang ditunjukkan pada gambar



GAMBAR 2. 1 DIAGRAM DAYA[3]

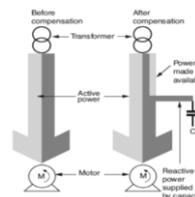
2.2 Perbaikan Faktor Daya

Seperti diketahui bahwa besar kecilnya faktor daya berhubungan erat dengan kebutuhan beban akan daya reaktif. Hal ini dapat ditunjukkan pada gambar vector di bawah ini



GAMBAR 2. 1 FAKTOR DAYA KOREKSI DENGAN PENAMBAHAN KVAR [4]

Dari gambar vector diatas terlihat bahwa semakin besar sudut , maka semakin besar pula daya reaktif yang dibutuhkan beban untuk suatu daya tertentu. Untuk mengatasi keadaan tersebut, diperlukan sumber daya reaktif diharapkan dapat memperbaiki faktor daya yang rendah. Salah satu alat yang umum digunakan untuk memperbaiki faktor daya tersebut adalah kapasitor. Kapasitor yang dipasang dan disusun membentuk sebuah tumpuk kapasitor (kapasitor bank) merupakan sumber energy reaktif. Maka dikatakanlah sistem ini sebagai kompensasi energi reaktif.



GAMBAR 2. 2 SEBELUM DAN SESUDAH KOMPENSASI

2.3 Penentuan Kebutuhan Daya Reaktif

Perhitungan daya reaktif harus dilakukan dengan cermat. Kelebihan kompensasi akan menyebabkan jaringan menjadi kapasitif. Hal ini, selain akan menyebabkan/ meningkatkan suhu pada jaringan, arus dan tegangannya meningkat. Ada beberapa cara mudah untuk menentukan daya reaktif (Qc).

a. Metode sederhana

Metode ini digunakan agar dapat cepat bias menentukan daya reaktif. Biasanya dilakukan untuk memperkirakan besarnya investasi yang akan dilakukan. Angka yang harus diingat : 0,84

*Korespondensi: Chandra.wiharya@polinema.ac.id

a) Prodi Sistem Kelistrikan, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Malang, Jalan Sukarno Hatta no.9 Kota Malang, Jawa Timur Indonesia

untuk setiap KW beban. Yaitu diambil dari :Perkiraan rata rata faktor daya suatu instalasi : 0,6Faktor daya akan ditingkatkan menjadi : 0,9Maka dari tabel cos φ (tabel 4.1) didapat angka : 0,84

Contoh :

Untuk menghindari denda PLN suatu instalasi dengan beban 100 kW memerlukan daya reaktif (Qc) sebesar = 0,84 x 100 kW = 84 kVAR

b. Metode Kwitansi PLN

$$Q_c = \frac{kVArh}{waktu\ pemakaian} \tag{2.1}$$

$$Q_c = \frac{1740}{24\ jam \times 30\ hari/bulan} = 1252.800\ kVAR$$

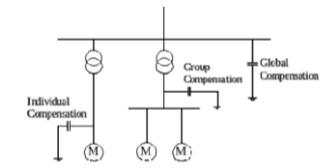
c. Metode Cos φ

Contoh :Sebuah pabrik memiliki faktor daya : 0,70 untuk beban puncak 600 kW. Untuk meningkatkan faktor daya menjadi 0,93 diperlukan daya kapasitor sebesar :Dari data tabel Cos φ (tabel 4.1) didapat angka : 0,62

$$\begin{aligned} \text{Maka daya reaktif yang diperlukan} &= 0,62 \times 600\ kW \\ &= 327\ kVAR \end{aligned} \tag{2.2}$$

2.4 Metode Penempatan Kapasitor

Metode penempatan dan hubungan kapasitor tergantung dari mana kita akan menggunakan kapasitor tersebut dan berapa output kapasitor yang kita perlukan. Ada tiga jenis dasar dalam merencanakan penempatan kapasitor yaitu *Global Compensation, Individual Compensation, Group Compensation*



GAMBAR 2. 3 METODE PEMASANGAN INSTALASI KAPASITOR BANK [3]

1. Global Compensation

Dengan metode ini kapasitor dipasang di induk panel(MDP). Arus yang turun dari pemasangan model ini hanya di penghantar antara panel MDP dan transformator. .

2. Group Compensation

Dengan metoda ini kapasitor yang terdiri dari beberapa panel kapasitor dipasang dipanel SDP. Cara ini cocok diterapkan pada industri dengan kapasitas beban terpasang besar sampai ribuan kva dan terlebih jarak antara panel MDP dan SDP cukup berjauhan.

3. Individual Compensation

Dengan metoda ini kapasitor langsung dipasang pada masing masing beban khususnya yang mempunyai daya yang besar. Disamping itu jika mesin yang dipasang sampai ratusan buah berarti *total cost* yang di perlukan lebih besar dari metode diatas.

2. Metode Penelitian

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

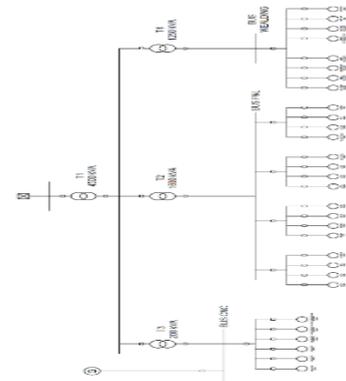
Pelaksanaan penelitian dan pengambilan data dilakukan pada:

Waktu Pelaksanaan : 1 Februari – 1 Juni 2021

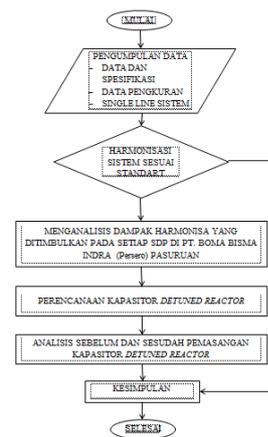
Tempat Pelaksanaan : PT.Boma Bisma Indra (Persero) Pasuruan

2.2 Flow Chart Penelitian

Dalam melakukan penelitian ini semua tahapan kegiatan diatur sedemikian rupa agar mudah dalam proses pengerjaan. Untuk memudahkan dala penyusunannya maka diaplikasikan dengan *flow chart* seperti di bawah ini.



GAMBAR 3. 1 SINGLE LINE DIAGRAM



GAMBAR 3. 2 FLOW CHART PENELITIAN

3. Hasil dan Pembahasan

4.1 Perhitungan Daya Kapasitor

4.2.1 Perhitungan daya menentukan Capacitor Utama

Total daya aktif (P) = P (SPD1) + P (SDP2) + P (SDP3) + P (SDP4) 61,3 + 78,5 + 99,6 + 80 = 319,4Kw

Total daya reaktif Q = P (SPD1) + P (SDP2) + P (SDP3) + P (SDP4) 104 + 134 + 169 + 136 = 543 kVAR

Total daya semu (S) di dapatkan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} &\sqrt{P^2 + Q^2} \\ &= \sqrt{319,4^2 + 543^2} = \sqrt{102016,36 + 285156} = \sqrt{360172.36} \\ &= 600,14\ kVA \end{aligned}$$

Sedangkan pada pengukuran power faktor didapatkan PF sebesar 0.6 Cos¹

$$(0.6) = 53.13^\circ$$

Untuk mendapatkan power faktor dari 0.6 ke 0.95 maka

dibutuhkan nilai kapasitor sebesar:

$$\cos^{-1}(0,6) = 53,13^\circ (\tan \varphi_1)$$

$$\cos^{-1}(0,95) = 18,195^\circ (\tan \varphi_2) \text{ nilai power factor yang ingin}$$

dicapai Maka,

$$\begin{aligned} Q_2 &= P (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \\ &= 319,4 (\tan 53,13 - \tan 18,195) \\ &= 319,4 (1,33 - 0,33) \\ &= 319,4 (1) \\ &= 319,4 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

Maka dibutuhkan kapasitor sebesar,

$$\begin{aligned} Q_C &= Q_1 - Q_2 \\ &= 543 - 319,4 \\ &= 223,6 \text{ kVAR} \end{aligned}$$

Menggunakan step 2x25 + 4x50

4.3 Penentuan Kapasitor Detuned Reaktor

4.3.1 Perhitungan Kapasitor

Diketahui :

$$U_s (\text{sistem voltage}) = 400V$$

$$Q_s (\text{reques rektive power}) = 223,6 \text{ kVAR}$$

TABEL 4. 1 TABEL PEMILIHAN ORDE [3]

Relative Impedance (%)	Tuning orde	Tuning Frequency @50 (Hz)	Tuning Frequency @60 (Hz)
5.7	4.2	210	250
7	3.8	190	230
14	2.7	135	160

Orde tuning di orde 5, tetapi harus ada toleransi, jadi penulis memakai orde 4.2 untuk tuning ordenya. Table di atas adalah *relative impedance* (%) yang akan dipakai penulis. P (relative impedance) = 5.7 % = 0.057

Un (capasitor rated voltage)

Qn (capasitor rated power)

TABEL 4. 2 TABEL PEMILIHAN VOLTAGE [4]

capacitor rated voltage (Un) V	network service voltage (Un) V	network service voltage (Un) V				
		50Hz		60Hz		
		400	690	400	480	600
realitive impedance (%)	5.70%	480	830	480	575	690
	7%					
	14%	480		480		

Dari keterangan yang diketahui pada katalog dan refrensi *Schneider Electric Indonesia* penulis dapat mencari rating kapasitor dan nilai rating kapasitor, dan penulis bisa menunjukkan kapasitor yang dipakai. Rumus rumus – rumus yang didapat pada buku *Schneider Electric Indonesia* seperti :

Step 1 rating voltage

$$U_c = U_s / (1 - P)$$

$$U_c = 400 / (1 - 0,057)$$

$$U_c = 424,2 V$$

Kapasitor akan dipilih dengan Un = 480V. (Jika kurang Ketat nilai dapat diadopsi berdasarkan kondisi jaringan)

step 2 rating power

$$Q_c = Q_s / (1 - P) @U_c$$

$$Q_c = 57,24 / (1 - 0,057) @U_c$$

$$Q_c = 60,69$$

Nilai kapasitor @Un

$$Q_n = Q_s / (U_n / U_s)$$

$$Q_n = 60,69 / (480 / 424,2)^2$$

$$Q_n = 77,71$$

Dari yang diketahui penulis dan dua step di atas penulis memilih kapasitor detuned reactor

TABEL 4. 3 TABEL PEMILIHAN CAPASITOR DETUNED REACTOR

detuned reaktor for 400V - 50Hz network					
tuning orde: 4.3 (215Hz)					
power restored by the assembly reactor				power losses	ref.
-				(W)	
Capasitor	L (mH)	I (A)	(W)		
6.25 Kvar/400V-50Hz	4.71	9	100		51573
12.5 Kvar/400V-50Hz	2.37	17.9	150		52404
25 Kvar/400V-50Hz	1.18	35.8	200		52405
50 Kvar/400V-50Hz	0.592	71.7	320		52406
100 Kvar/400V-50Hz	0.296	143.3	480		52407

$$\begin{aligned} X_c &= \frac{(0,4)^2 \times 1000}{100} \\ &= \frac{160}{100} = 1,6 \Omega \end{aligned}$$

Dengan melihat perhitungan diatas diketahui nilai Xc sebesar 1.6 Ω,

Dari perhitungan capasitor diatas dapat dilanjutkan untuk perhitungan induktor. Dibawah ini adalah rumus untuk mencari nilai parameter induktor.

$$X_L = \frac{X_c}{Orde \text{ tunig}}$$

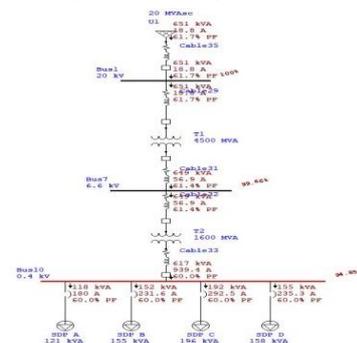
$$X_L = \frac{1,6}{(4,3)^2} = 0,086$$

Dari perhitungan diatas dapat dilihat nilai X_L adalah 0.086 dari nilai tersebut penulis bisa memasukkan nilai parameter induktor untuk disimulasikan menggunakan *software* ETAP 12.6.0.

4.4 Dampak Kualitas Daya Sebelum Dan Sesudah Perbaikan

4.4.1 Sebelum Menggunakan Kapasitor Bank Detuned Reaktor

Gambar di bawah ini adalah menunjukkan bagaiman keadaan kualitas daya menggunakan *software* ETAP 12.6.0, untuk lebih jelasnya perhatikan gambar di bawah ini.



GAMBAR 4. 1 LOAD FLOW SEBELUM PERBAIKAN KUALITAS DAYA

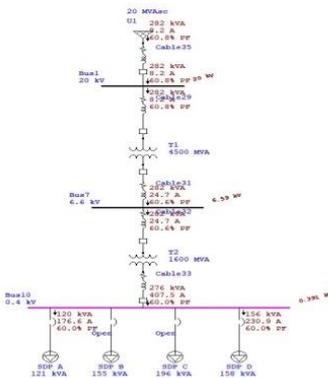
Gambar 4.2 adalah gambar simulasi load flow single line diagram pada keseluruhan sistem sebelum penggunaan kapasitor bank detuned reaktor. Simulasi tersebut bertujuan untuk melihat perbandingan kualitas daya pada setiap SDP di PT. Boma Bisma Indra

Dari gambar simulasi diatas dapat dilihat bahwasannya nilai pembenan pada saat sebelum dipasang filter yaitu pada Bus 10 dengan SDP A sebesar 118 Kva dengan arus arus 180 A, SDP B sebesar 152 kVA dengan arus arus 231,6 A, SDP C sebesar 192 kVA dengan arus arus 295,5 A, SDP D sebesar 155 kVA dengan arus arus 235,5 A, dengan masing – masing PF 60 % , dimana nilai – nilai tersebut dapat dikatakan kurang handal,, data dapat dilihat ada di bawah ini.

TABEL 4. 4 TABEL ALIRAN DAYA

Bus ID	Nominal kV	Voltage	kW Loading	kvar Loading	%PF
Bus1	20	20	402	512	61,7%
Bus7	6.6	6.577	398	512	61,4%
Bus10	0.4	0.379	370	494	60,0%

Dari tabel di atas bisa di lihat Pada Bus 10 nilai pembenan sebesar 0,4kV, 0,379V, 370kW, 494kVAR, PF 60% dimana ketika semakin besar Kvar tangan semakin besar dan PF semakin turun



GAMBAR 4. 2 LOAD FLOW SEBELUM PERBAIKAN KUALITAS DAYA SAAT BEKERJA

Pada gambar di atas di asumsikan pabrik bekerja dengan dua beban yaitu SDP A dan SDP D dimana beban pada bus 10 yaitu 276 kVA dengan PF 60%. Pada kondisinya ditinjau dari nilai PFnya masih tidak memenuhi standart Peraturan menteri ESDM No.09 tahun.2011

Dikatakan bahwa “nilai power faktor sekurang-kurangnya $\geq 0,85$. Sedangkan di tinjau dari profil tegangannya yaitu sebesar 0,391kV atau sebesar 97,75% dari tegangan nominalnya. Kondisi ini tegangan sudah memenuhi standart SPLN 1:1995 dikatakan “minimum nilai tegangan sebesar 90% dari nominalnya dan maksimal nilai tegangannya sebesar 105% dari nilai nominalnya.

TABEL 4. 5 TABEL ALIRAN DAYA

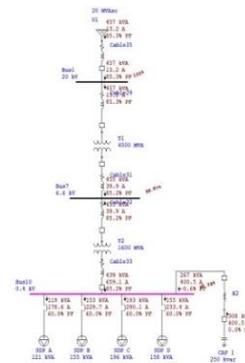
Bus ID	Nominal kV	Voltage	kW Loading	kvar Loading	%PF
Bus1	20	20	172	224	60,8%
Bus7	6.6	6.59	171	224	60,6%

Bus10	0.4	0.391	166	221	60,0%
-------	-----	-------	-----	-----	-------

Dari tabel di atas bisa di lihat Pada Bus 10 maka dapat di tarik kesimpulan, bahwa meskipun nilai profit tegangan sudah sesuai dengan SPLN 1:1995 akan tetapi nilai PF tidak sesuai dengan peraturan menteri ESDM No.9 tahun 2011. Maka pada kondisi ini industri akan di kenakan denda/ biaya tambahan karena rendahnya nilai Power Faktor [5]-[8].

4.4.3 Setelah Pemasangan Kapasitor Bank Detuned Reaktor

Gambar di bawah ini adalah menunjukkan bagaimana keadaan kualitas daya sesudah pemasangan filter pasif menggunakan software ETAP 12.6.0, untuk lebih jelasnya perhatikan gambar di bawah ini.



GAMBAR 4. 3 LOAD FLOW SESUDAH PERBAIKAN KUALITAS DAYA SECARA TERPUSAT

Gambar 4.3 adalah gambar simulasi load flow single line diagram pada keseluruhan sistem sesudah penggunaan filter secara terpusat atau pada MDP.

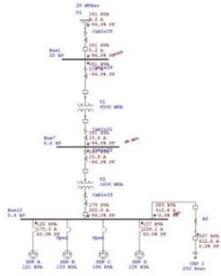
TABEL 4. 6 TABEL ALIRAN DAYA

Bus ID	Nominal kV	Voltage	kW Loading	kvar Loading	%PF
Bus1	20	20	389	239	85,3%
Bus7	6.6	6.578	388	239	85,2%
Bus10	0.4	0.384	374	496	85,2%

Dapat di lihat pada tabel di atas setelah pemasangan capacitor pada bus 10 nilai Dapat di tarik kesimpulan pada saat pemasangan capacitor di sini nilai PF semakin membaik dengan di tandai nilai daya kW semakin besar dari pada sebelum pemasangan, sehingga nilai PF semakin membaik sebanding dengan suplay daya reaktifv dari capcitor, semakin besar suplay capacitor maka semakin besar nilai PFnya, dengan profil tegangan 0,384kV

4.4.4 Setelah Pemasangan Kapasitor Bank Detuned Reaktor dan Pengaplikasian saat Pabrik Berkerja

keadaan kualitas daya sesudah pemasangan filter pasif saat SDP B dan SDP C dimatikan, karena pabrik hanya menggunakan alat sesuai dengan pemesanan dari konsumen, yaitu pemakasin SPD A dan SDP D.



GAMBAR 4. 4 LOAD FLOW SESUDAH PERBAIKAN KUALITAS DAYA SAAT PABRIK BEKERJA

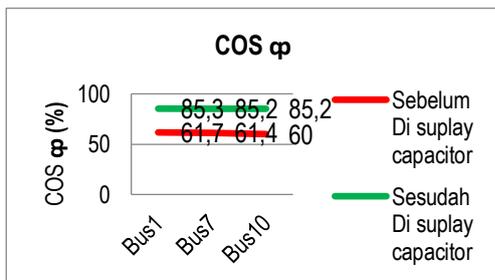
Gambar 4.4 adalah gambar simulasi load flow single line diagram pada keseluruhan sistem sesudah penggunaan filter secara terpusat dan saat industri sedang bekerja.

TABEL 4. 7 TABEL ALIRAN DAYA

Bus ID	Nominal kV	Voltage	kW Loading	kvar Loading	%PF
Bus1	20	20	171	59.688	94,4%
Bus7	6.6	6.591	170	59.694	94,4%
Bus10	0.4	0.396	168	283	94,0%

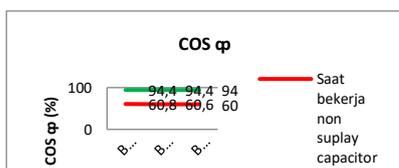
Dilihat dari tabel pada bus 10 nilai pembeban sebesar 0,4kV, 0,369V, 168kW, 283kVAR, PF 94,0% dimana pada saat industri bekerja disini PFnya semakin bagus sesuai dengan pertauran menteri ESDM No.9 tahun 2011. Dengan profit tegan 0,936kW Disini nilai kW semakin kecil pada saat pemasangan dan bekerja [9]-[10]

4.5 Hasil Perbandingan Sebelum dan Sesudah Perbaikan Daya
4.5.1 Simulasi Pada Cos ϕ



GAMBAR 4. 5 GRAFIK PERUBAHAN COS ϕ DARI PENGOPERASIAN CAPASITOR BANK DETUNED REAKTOR

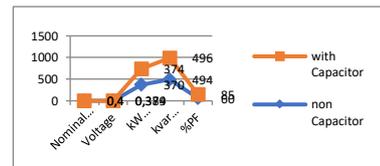
Dari data grafik pada gambar 4.5 dapat diketahui bahwa penggunaan kapasitor bank mempunyai pengaruh terhadap cos ϕ (%). Pada grafik tersebut, cos ϕ menunjukkan kenaikan karena pengaruh pemasangan kapasitor bank. Terutama pada BUS 10 (MDP) yaitu Cos ϕ sebelumnya 60% menjadi 5,2%



GAMBAR 4. 6 GRAFIK PERUBAHAN COS ϕ DARI PENGOPERASIAN CAPASITOR BANK DETUNED REAKTOR SAAT PABRIK BEKERJA

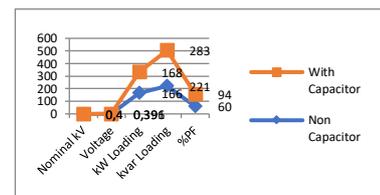
Dari data grafik pada gambar 4.6 dapat diketahui pengaruh pemasangan capacitor bank detuned reactor sangat berpengaruh saat pabrik sedang bekerja. Dengan di ketahuinya dari grafik perubahan cos ϕ (%). Yang sangat signifikan yaitu pada BUS 10 (MDP) dari cos ϕ (%) 60% menjadi 94% yang di mana sudah memenuhi standart sesuai dengan peraturan ESDM No.9 tahun 2011.

4.5.2 Simulasi Aliran Daya Pada Setiap kondisi



GAMBAR 4. 7 GRAFIK PERUBAHAN POWER QULITY PADA BUS 10

Dapat di lihat dari gambar 4.7 bahwasannya perbandingan kualitas daya saat pemasanga cappacitor detuned reactor di bus 10 (MDP) dengan sebelum dipasang sangatlah terlihat, dimana saat beban penuh tegangan yang awalnya 0,379kV menjadi 0,384kV dan dapat dilihat PF yang awalnya 60% menjadi 85%. Terjadi perubahan yang signifikan.



GAMBAR 4. 8 GRAFIK PERUBAHAN POWER QULITY SAAT PABRIK BEKERJA PADA BUS 10

Dari gambar 4.8 di jelaskan dimana pada bus 10 (MDP) terlihat lebih bagus setelah pasang capacitor detuned reactor saat pabrik sedang bekerja, dimana PF sudah sesuai dengan pertauran ESDM No.9 tahun 2011 yaitu dari PF 60% menjadi 94%. Dan tegangan yang awalnya 0.391kV menjadi 0,396kV .

4.6 Perencanaan Panel Kapasitor

Perencanaan panel melibatkan pertimbangan mekanik dan elektrik serta berbagai faktor seperti keandalan, keamanan, kemudahan pengoperasian, ekonomi, dan estetika[11]-[12].

Kontaktor kapasitor dipilih berdasarkan arus nominal kapasitor dan faktor pengali yang sesuai dengan standar IEEE.

$$I_n = Qc Vn \sqrt{3} \quad I_n = 100 \cdot 0,4 \cdot \sqrt{3} = 144.33 \text{ A}$$

Dari persamaan diatas maka dapat diketahui nilai I_n kontaktor adalah 144.33 A dan faktor kali (fk) kapasitor itu sendiri adalah 2.5. Rating kontaktor = $fk \times I_n$ kontaktor Rating kontaktor = $2.5 \times 144.33 = 360.84 \text{ A}$

$$\text{KHA busbar maksimal} = fk \times I_n$$

$$\text{KHA busbar maksimal} = 1.5 \times 144.33 = 216.49$$

- Kapasitor bank 25kvar 2 pcs, 50kvar 4pcs
- MCCB EZC400n 300A 1pcs
- MCCB EZC100F 60A 6pcs

- Power Factor 6 step 1pcs - Box Panel free standing 160 x 60 x 60- exhaust fan Panasonic 4" 1pcs- push button LED on 6pcs- push button LED off 6pcs- Lampu indikator RST 3pcs- Control relay omron + socket 1lot- thermostat 1pcs- wiring + accessories 1 lot
Perhitungan estimasi biaya + jasa pemasangan 75 juta Berdasarkan harga di market place[13]-[15].

4.7 Analisis Ekonomi

Dengan asumsi bahwa kapasitor bank dioperasikan selama 24 jam sehari, penghitungan penghematan energi akan menjadi:

Penghematan Energi (kWh) = Pengurangan Daya Semu (kVA) x Waktu Penggunaan (jam)
 $\text{Penghematan Energi (kWh)} = 97 \text{ kVA} \times 24 \text{ jam} = 2,328 \text{ kWh}$
 Selanjutnya, kita akan menghitung penghematan tagihan listrik: $\text{Penghematan Tagihan Listrik} = \text{Penghematan Energi (kWh)} \times \text{Harga Tarif Listrik (per kWh)}$ [13]-[15].

$\text{Penghematan Tagihan Listrik} = 2,328 \text{ kWh} \times \text{Rp } 1.522 \text{ per kWh} = \text{Rp } 3,541,416$
 Dengan pengoperasian kapasitor bank selama 24 jam sehari, penghematan tagihan listrik per bulan adalah sekitar Rp 3,541,416. Untuk menghitung Return on Investment (ROI), kita dapat menggunakan data penghematan tagihan listrik dan biaya investasi sebagai berikut: $\text{ROI} = (\text{Penghematan Tagihan Listrik} - \text{Biaya Investasi}) / \text{Biaya Investasi}$
 $\text{ROI} = (\text{Rp } 3,541,416 - \text{Rp } 75 \text{ juta}) / \text{Rp } 75 \text{ juta}$
 $\text{ROI} \approx \text{Rp } 3,541,416 / \text{Rp } 75 \text{ juta}$
 $\text{ROI} \approx 0.0472$ atau sekitar 4.72%

Dengan asumsi bahwa kapasitor bank dioperasikan selama 24 jam sehari, ROI sekitar 4.72%. Artinya, biaya investasi sebesar Rp 75 juta diharapkan akan terbayar dalam beberapa tahun dengan penghematan tagihan listrik yang dihasilkan. Untuk menghitung kembali periode pengembalian investasi (payback period) setelah perubahan pengurangan daya semu dan penghematan tagihan listrik, kita akan menggunakan data berikut:

Pengurangan Daya Semu: 97 kVA
 Penghematan Tagihan Listrik per bulan: Rp 3,541,416
 Payback Period = $\text{Biaya Investasi} / \text{Penghematan Bulanan}$
 $\text{Payback Period} = \text{Rp } 75 \text{ juta} / \text{Rp } 3,541,416$
 per bulan
 $\text{Payback Period} \approx 21.15 \text{ bulan}$
 $\text{Payback Period} \approx 21.15 / 12 \approx 1.76 \text{ tahun}$
 Periode pengembalian investasi (payback period) adalah sekitar 1.76 tahun dengan asumsi bahwa kapasitor bank dioperasikan selama 24 jam sehari. Ini berarti bahwa biaya investasi sebesar Rp 75 juta diperkirakan akan kembali dalam waktu sekitar 1 tahun dan 9 bulan dengan penghematan tagihan listrik yang dihasilkan.

4. Kesimpulan

Pemasangan kapasitor bank dengan detuned reactor telah berhasil meningkatkan faktor daya dari level sekitar 60% menjadi sekitar 85.2% hingga 94%, tergantung pada kondisi operasional. Return on Investment (ROI) sebesar 4.72% menunjukkan bahwa investasi ini menghasilkan keuntungan, meskipun tingkat pengembalian ini mungkin dianggap rendah tergantung pada tujuan dan standar industri. Periode pengembalian investasi (payback period) diperkirakan sekitar 1.76 tahun, yang merupakan periode relatif singkat.

Referensi

[1] Kusko, M., & Božek, P. Power factor correction and harmonics filtering in electrical power system. In 2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) IEEE. (pp. 682-687). (017).

[2] Saad, H., & Farag, H. E.. Power factor correction in electric power systems: A review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 105, 256-267. 2019.

[3] Y.-T. Hsiao, "Design of Filters for Reducing Harmonic Distortion and Correcting Power Factor in Industrial Distribution Systems," *Tamkang Journal of Science and Engineering*, vol. 4, pp. 193-199, Sep. 2001.

[4] Hossain, M. S., & Negnevitsky, M. Integration of a hybrid energy storage system and capacitor banks for power factor correction and energy management in a distribution network. *Applied Energy*, 173, 99-108. 2016.

[5] Thallam Tharun Kumar, & D. C. Kiran Kumar.. Power Factor Correction Using Capacitor Banks. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 4(3), 366-372. 2016.

[6] Das, S. K., & Deb, S. Design and analysis of harmonic filters for power factor improvement in a steel industry. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 7(6), 392-397. 2016.

[7] Angrish, R., & Bhatia, M. S. Power factor correction in electrical distribution system: A case study. *Procedia Technology*, 25, 507-514. 2016.

[8] Saini, J. S., & Saini, A. Simulation and design of power factor correction with passive filters. *International Journal of Computer Applications*, 118(22). 2015

[9] Singh, K. K., & Singh, R. K. Review on power factor improvement techniques. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4(1), 1404-1407. (2015).

[10] Rashidi, J., & Fahri, A. Economic analysis of power factor correction using capacitor bank for industrial loads. In 2014 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Asia and Pacific (T&D Asia) (pp. 1829-1833). IEEE. 2014.

[11] R. A. Ananto, R. Duanaputri, A. H. Santoso, and M. F. Hakim, "Perencanaan Desain Single Tuned Passive Filter Harmonisa Pada AC Microgrid Turbin Tenaga Angin," *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, vol. 10, no. 1, pp. 78-81, 2023.

[12] W. Ko and M. Tuomainen, "Design and application of a single-tuned passive harmonic filter to suppress harmonic distortion and resonance for railway traction power systems—A case study," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 12, no. 2, pp. 153-164, 2022.

[13] V. N. Jayasankar and U. Vinatha, "Backstepping controller with dual self-tuning filter for single-phase shunt active power filters under distorted grid voltage condition," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 6, pp. 7176-7184, 2020.

[14] D. Melo, J. L. R. Pereira, A. M. Variz, and P. F. Ribeiro, "Allocation and sizing of single tuned passive filters in three-phase distribution systems for power quality improvement," *Electric power systems research*, vol. 180, p. 106128, 2020.

[15] M. H. A. Aziz, M. M. Azizan, Z. Sauli, and M. W. Yahya, "A review on harmonic mitigation method for non-linear load in electrical power system," in *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing, 2021.