

PENINGKATAN KUALITAS DAYA LISTRIK DENGAN MENGGUNAKAN BANK KAPASITOR DAN FILTER PADA KAJI STATION PT. MEDCO E&P

Henri Matius Naibaho^{*)}, Agung Warsito, and Susatyo Handoko

Departemen Teknik Elektro, Universitas Diponegoro, Semarang
Jl. Prof. Sudharto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang 50275, Indonesia

^{*)}Email: Henrimatius.naibaho@gmail.com

Abstrak

Permasalahan yang biasa terjadi dalam penggunaan listrik untuk level industri adalah nilai dari perbaikan faktor daya untuk mencegah penalti dari kurangnya efisiensi dari sistem tenaga tersebut. Tingkat harmonisa tegangan dan arus dalam suatu sistem kelistrikan harus memenuhi standar yang disyaratkan dalam IEEE Std 519-1992. Hal ini dikarenakan efek harmonisa akan menyebabkan rugi-rugi daya yang tinggi, pemanasan berlebih pada sistem, dan rendahnya faktor daya pada sistem. Pada penelitian ini dilakukan perbaikan faktor daya dan harmonisa sistem pada Kaji Station A&B PT. Medco E&P Indonesia sebagai upaya yang dilakukan untuk memperbaiki sistem tenaga listrik. Pemodelan kasus didasarkan pada 3 bagian utama. Dimana, sistem berjalan secara normal tanpa adanya perbaikan yang dilakukan, perbaikan sistem dengan penempatan kapasitor bank, dan perbaikan sistem dengan penempatan bank kapasitor dan filter. Analisa sistem ini didasarkan pada analisis aliran daya, faktor daya, analisis harmonisa, dan analisis gelombang resonansi. Pemasangan bank kapasitor dan filter harmonisa akan meningkatkan kualitas daya listrik dan nilai faktor daya dari sistem tersebut hingga mencapai 0,95 pada kaji station A dan B PT. Medco E&P Indonesia dan mengurangi harmonisa THD sistem yang berjalan hingga ambang 5% dengan melakukan pemasangan filter dan bank kapasitor pada sistem, dengan mengurangi dampak resonansi yang diakibatkan oleh instalasi sistem pada pembangkit.

Kata Kunci : Faktor Daya, Filter, bank kapasitor, harmonisa, Daya Aktif, Daya Reaktif

Abstract

The problem that usually happens in the electrical usage for industry level is the value of power factor correction to prevent the penalty of the low efficiency from the power system. The disturbance rate of the electrical system for voltage and current must fulfill the standard that stated in IEEE Std 519-1992. This is because the harmonic effect will cause high power losses, overheating in the system, and low value of power factor in the system. In this research, the correction for power factor and system's harmonic done as the maximum effort to improve the electrical power system at Kaji Station A&B PT. Medco E&P Indonesia. The case modeling will be made based on 3 models. Where system runs normally without any correction made, correction with power bank, and system correction with capacitor and filter placement. These systems will be based on load flow analysis, power factor, harmonic analysis, and resonance wave analysis. The placement of capacitor bank and filter will increase the power quality and the power factor until 0.95 and decrease the system's harmonic THD down to 5% by installing filter and capacitor bank at Kaji Station A&B Medco E&P Indonesia, by also decreasing the resonance effect that cause by system installation.

Key words: Power Factor, Filter, Bank Capacitor, Harmonic, Active power, Reactive Power

1. Pendahuluan

Untuk mendesain suatu solusi perbaikan kualitas daya dengan baik, dibutuhkan beberapa langkah. Diperlukan pengukuran harmonisa, faktor daya dan resonansi yang timbul pada sistem. Selanjutnya diperlukan simulasi komputer dari efek harmonisa, faktor daya dan resonansi pada sistem tenaga yang ditunjukkan[1]. Berdasarkan permasalahan yang biasa terjadi dalam penggunaan listrik pada industri, penurunan faktor daya bisa terjadi akibat

adanya pengaruh rugi rugi daya dan penempatan beban yang tidak seimbang dalam sistem kelistrikan tersebut[2]. Rugi-rugi daya mempengaruhi kualitas daya dan efisiensi dari kinerja suatu pembangkit secara keseluruhan di perusahaan tersebut[3].

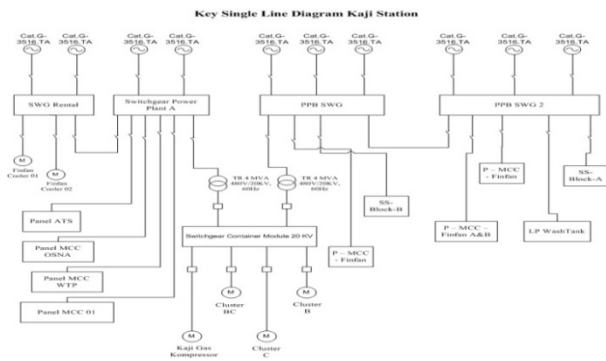
Penurunan kualitas daya dalam sistem kelistrikan ditimbulkan oleh adanya beban-beban *converter* yang menarik arus non-sinusoidal dari sumber tegangan[4]. Tingkat distorsi terhadap tegangan dan arus dalam suatu

sistem kelistrikan harus memenuhi standar yang disyaratkan dalam IEEE Std 519-1992[5].

Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan perbaikan faktor daya dan harmonisa dengan software etap 12.6 dengan menggunakan bank kapasitor dan filter. Setelah pemasangan bank kapasitor dan filter ini, diharapkan peningkatan kualitas daya listrik pada sistem Kaji Station A dan B Medco E&P Indonesia.

2. Metode

2.1. Single Line Diagram utama kaji Station



Gambar 1. Single line diagram utama Kaji Station

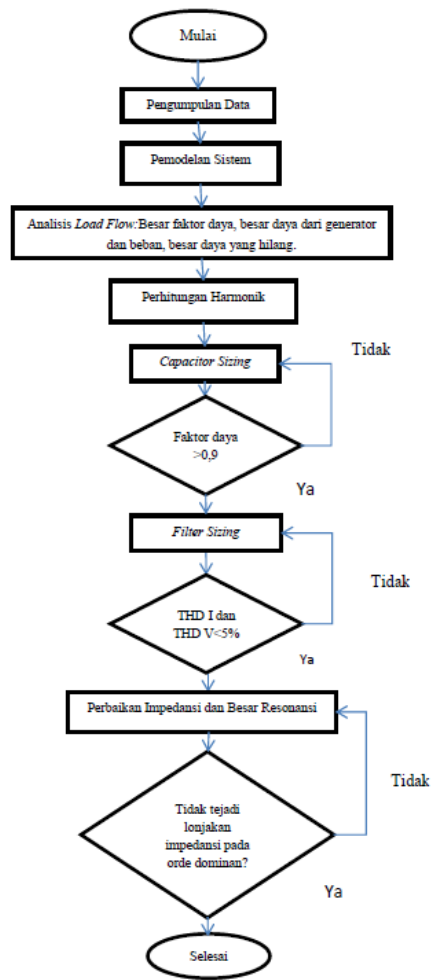
2.2. Langkah Penelitian

Dengan mengacu pada data-data faktor daya, harmonisa, dan total beban, maka dilakukan pemodelan sistem. Pemodelan sistem yang dilakukan difokuskan pada aliran daya, faktor daya, gelombang harmonisa, dan dampak yang diakibatkan oleh pemasangan bank kapasitor pada sistem. Frekuensi yang digunakan di lapangan kaji berdasarkan standar amerika yaitu 60 Hz, karena sebelum diakuisisi oleh PT Medco E&P Indonesia, lapangan kaji dikelola oleh perusahaan amerika yaitu PT Stanvac Oil Company. Pada sistem kelistrikan, beban-beban *non-linier* yang merupakan sumber harmonisa dimodelkan sebagai sebuah sumber arus. Sumber arus tersebut menginjeksikan arus yang mempunyai frekuensi kelipatan dari frekuensi fundamental (60 Hz). Sebagai akibatnya arus total yang mengalir pada jaringan mempunyai bentuk gelombang yang terdistorsi. Ketika arus yang terdistorsi mengalir melalui sebuah impedansi, maka bentuk tegangan pada impedansi tersebut juga mengalami distorsi.

Pemodelan juga dilakukan pada penempatan bank kapasitor dan filter. Setelah dilakukan penempatan bank kapasitor, maka selanjutnya dilakukan analisis faktor daya, apakah sudah mencapai 0,95. Selanjutnya dapat dilakukan *sizing filter* untuk menyelesaikan permasalahan harmonisa dan resonansi pada sistem.

2.3. Flowchart Koreksi Faktor Daya dan Peredaman Harmonisa

Untuk memperbaiki faktor daya dan meredam harmonisa pada sistem kelistrikan (*Block Rimau Kaji Station A*), Langkah pertama yang dilakukan adalah mengumpulkan data-data yang dibutuhkan, setelah data yang diperlukan untuk penelitian sudah terkumpul selanjutnya membuat *single line diagram* pada software *ETAP Power Station 12.6*. Kemudian, melakukan analisis *load flow* untuk mengetahui konsumsi daya dan faktor daya dan melakukan *sizing capacitor*. Langkah selanjutnya adalah melakukan *harmonic load flow* untuk menganalisis harmonisa yang terjadi pada sistem kelistrikan dan melakukan perhitungan *filter sizing* untuk menentukan spesifikasi filter yang akan di *install* pada sistem, dan yang terakhir menganalisis nilai factor daya, THD arus dan tegangan, serta resonansi sebelum dan sesudah pemasangan filter. Berikut ini adalah diagram alir/ *flowchart* yang digunakan pada penelitian :



Gambar 2. Diagram alir langkah – langkah peredaman harmonisa

3. Hasil dan Analisa

3.1. Analisis Nilai Faktor Daya pada Sistem kelistrikan Power Plant Kaji Station

Rendahnya faktor daya pada sistem perlu perbaikan faktor daya agar faktor daya sistem kembali mencapai 0,95. Pada sistem secara keseluruhan, pembebanan sebesar 80% pada setiap beban. Pada lokasi yang terdapat motor ESP pembebanan dioperasikan pada KS 236 sebesar 50%, dioperasikan pada KS 35 sebesar 70%, dan dioperasikan pada KS 264 sebesar 100%. Sistem membutuhkan daya reaktif sebesar 2,917 MVAR. Hal ini didapatkan dari perhitungan jumlah daya reaktif dari yang dibutuhkan sistem untuk mencapai faktor daya sebesar 0,95. Jika dilihat dari faktor daya nya, *power plant kaji station* tidak cukup baik karena nilai faktor daya hanya berkisar 0,698

Penggunaan beban non-linier pada sistem menyebabkan rendahnya faktor daya. Hal ini menyebabkan terlalu borosnya konsumsi daya yang diperlukan oleh generator, hingga membuat sistem bekerja secara bersamaan dan terjadinya *overload* pada generator. Pada penelitian ini, diharapkan sistem mampu bekerja secara independen, dimana *kaji station A* dan *B* dapat bekerja secara terpisah dengan pembebanan yang sama.

Berikut data faktor daya pada *kaji station A* dan *B*

Tabel 1. Tabel data faktor daya *kaji station A* dan *B*

Generator	Faktor Daya	Kondisi Beban	Lokasi
CAT.G-3156-01	0	Spare (off)	Kaji Station A
CAT.G-3156-02	0,698	Swing	Kaji Station A
CAT.G-3156-03	0,9	PF Control	Kaji Station A
CAT.G-3156-04	0,698	Swing	Kaji Station A
CAT.G-3156-05	0,9	PF Control	Kaji Station B
CAT.G-3156-06	0,698	Swing	Kaji Station B
CAT.G-3156-07	0,698	Swing	Kaji Station B
CAT.G-3156-08	0,698	Swing	Kaji Station B
CAT.G-3156-09	0	Spare (off)	Kaji Station B
CAT.G-3156-10	0,698	Swing	Kaji Station B

Dari tabel diatas dapat dilihat bahwa sebagian besar generato memiliki faktor daya sebesar 0.698. Namun, terdapat dua generator yang memiliki faktor daya yang tinggi (0.9). Hal ini dikarenakan generator CAT.G-3156-03 dan CAT.G-3156-05 disetting sebagai generator *PF control*. Generator *PF control* berfungsi untuk menjaga faktor daya yang sistem, sesuai dengan faktor daya yang ditentukan. Pada *kaji station A* dan *B*, hanya 2 generator tersebut yang dioperasikan sebagai *PF control*. Hal ini membuat generator lain yang terhubung pada sistem masih memiliki faktor daya yang rendah, dan berbahaya untuk sistem.

Berikut kondisi sistem yang didapatkan pada simulasi *ETAP 12.6*

Device ID	Type	Condition	Rating/Limit	Operating	% Operating
Cable%264-2	Cable	Overload	122.942 Amp	145.483	118.3
CAT.G.315604	Generator	Over Excited	0.538 Mvar	0.701	130.1
CAT.G.315610	Generator	Over Excited	0.538 Mvar	0.701	130.1
CAT.G.315617	Generator	Over Excited	0.538 Mvar	0.701	130.1
CAT.G.315602	Generator	Over Excited	0.538 Mvar	0.701	130.1
CAT.G.315616	Generator	Over Excited	0.538 Mvar	0.701	130.1
CAT.G.315608	Generator	Over Excited	0.538 Mvar	0.701	130.1
TRAFU STEP-UP ESP 264	Transformer	Overload	0.1 MVA	0.106	106.1
TRAFU STEP-DOWN ESP 264	Transformer	Overload	0.1 MVA	0.111	110.6
VSD2	VFD	Overload	120.8 Amp	145.483	120.4

Gambar 3. Screenshot kondisi sistem pada simulasi *ETAP 12.6*

Berdasarkan *screenshot* diatas, dapat terlihat bahwa terjadi pembebanan berlebih dan eksitasi berlebih pada sistem. Hal ini disebabkan tidak seimbangnnya daya yang berada pada sisi kirim dan sisi terima. Faktor daya yang rendah, menyebabkan daya yang mengalir dari sisi kirim ke sisi terima tidak sebanding dengan yang diperlukan dari beban di sisi terima.

3.2. Perencanaan Bank Kapasitor sebagai Korektor Faktor daya

Setelah diketahui karakteristik dari konsumsi daya dan faktor daya dari sistem, maka langkah selanjutnya adalah merencanakan spesifikasi untuk kapasitor yang akan digunakan untuk meningkatkan faktor daya. Pada penelitian ini akan ditetapkan batasan perencanaan kapasitor daya dan penggunaan *software* yang akan digunakan untuk simulasi perencanaan bank kapasitor, yaitu hingga faktor daya minimal mencapai 0,95. Kapasitor akan dipasang paralel pada sistem.

Dua kapasitor akan dipasang secara terpisah untuk memastikan bahwa sistem dapat berjalan secara independen, baik *Kaji station A* maupun *Kaji station B*. Namun, pada simulasi pemasangan bank kapasitor, sistem akan dijalankan secara terintegrasi. Hal ini disebabkan, pemasangan sistem secara independen hanya dilakukan pada saat terjadi pemutusan atau pengecekan pada salah satu sistem pembangkit. Pada *Kaji station A*, faktor daya awal = 0,74 dan faktor daya target = 0,95, daya aktif = 2207 KW, yang merupakan total daya aktif dari beban pada *Kaji Station A* :

Maka, terlebih dahulu masukkan data perhitungan cari nilai $\cos\phi$ dengan rumus[6]

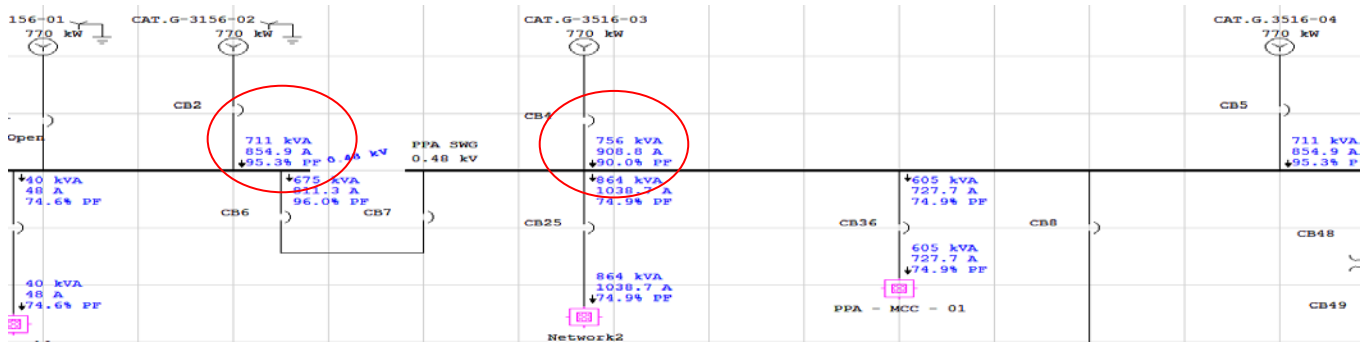
$$\begin{aligned} \cos\phi &= P : S \\ &= 2207 : 2983 \\ &= 0,74 \end{aligned}$$

Setelah itu, maka kita dapat mencari nilai Q_{var} pada sistem

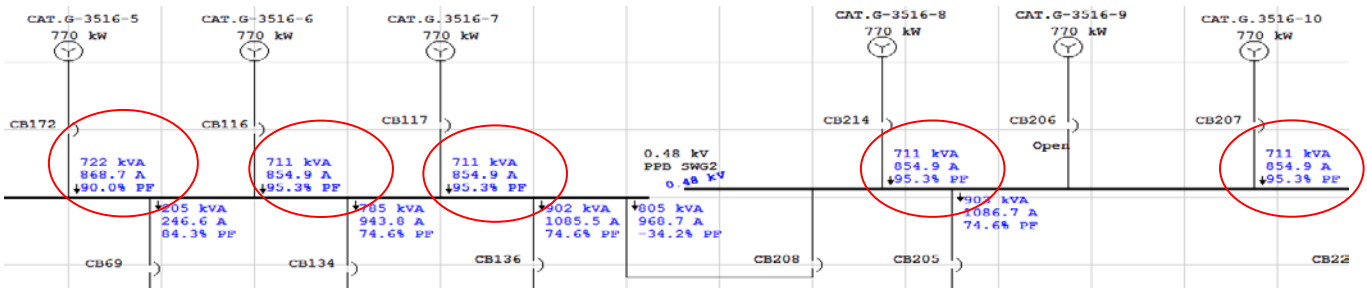
$$\begin{aligned} Q &= S \times \sin(\arccos 0.74) \\ &= 2983 \times 0.67 \\ &= 2006 \end{aligned}$$

Setelah itu, untuk mencari nilai kVAR yang dimasukkan dalam kapasitor, maka kita gunakan rumus

$$\begin{aligned} Q_c &= P \tan\phi_{awal} - P \tan\phi_{target} \\ &= 2006 - 870,004 \\ &= 1136 \text{ KVAR} \end{aligned}$$

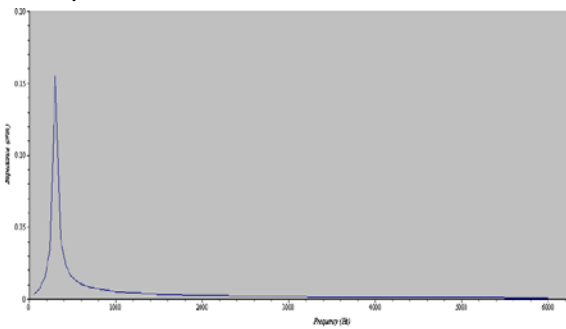


(a)



Gambar 4. (a) hasil simulasi setelah pemasangan bank kapasitor kaji station A (b) hasil simulasi setelah pemasangan bank kapasitor kaji station B

3.3. Pengaruh Pemasangan Bank Kapasitor pada Efek Resonansi pada Sistem



Gambar 5 Gelombang resonansi yang timbul pada orde 5

Tabel 2. Tabel hasil dampak resonansi dengan simulasi sistem di ETAP 12.6

#	X	Y
0	60	3.31625e-03
1	120	7.53483e-03
2	180	1.47559e-02
3	240	3.41454e-02
4	300	0.154843
5	360	4.19369e-02
6	420	2.29555e-02
7	480	1.62156e-02
8	540	1.27238e-02
9	600	1.05631e-02
10	660	9.0807e-03

Dari Screenshot hasil simulasi diatas, dapat terlihat bahwa terjadi lonjakan impedansi pada saat frekuensi sistem mencapai nilai 300Hz. Terjadi lonjakan nilai impedansi hingga mencapai 0,15483Ω pada orde 5, dimana pada gambar, orde dilambangkan dengan tanda “#”, dan orde 1 dimulai dari urutan 0. Penurunan impedansi akan menurunkan besar tegangan harmonisa yang dibebankan pada sistem. Hal ini disebabkan besarnya nilai impedansi berbanding lurus dengan besar tegangan harmonisa. Dengan semakin kecilnya tegangan harmonisa, maka semakin besar efisiensi yang dimiliki sistem.

Berikut perhitungan frekuensi dimana terjadinya resonansi:

$$\begin{aligned} \text{Resonansi } X_L &= X_C \\ 2\pi f_R L &= \frac{1}{2\pi f_R C} \\ f_R &= \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \\ f_R &= \frac{1}{2 \times 3,14 \times \sqrt{4,36 \times 10^{-3} \times 6,46 \times 10^{-5}}} \\ &= 300,23 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan diatas, dapat kita lihat bahwa orde dominan dari resonansi berada pada orde ke 5 (f=300hz). Hal ini dikarenakan frekuensi dominan berada paling dekat pada orde ke 5 frekuensi.

Berikut perhitungan impedansi akibat resonansi pada keseluruhan busbar

$$\begin{aligned} X_{L1} &= 2\pi fL \\ &= 2 \times 3,14 \times 300 \times 0,0000646 \text{ H} \\ &= 121,7 \text{ m}\Omega \\ X_{C1} &= \frac{1}{2\pi fC} \\ &= \frac{1}{2 \times 3,14 \times 300 \times 0,00436 \text{ F}} \\ &= 121,74 \text{ m}\Omega \end{aligned}$$

$$X_{L2} = 2\pi fL = 2 \times 3,14 \times 300 \times 0,000016484 \text{ H} = 31,055 \text{ m}\Omega$$

$$X_{C2} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 300 \times 0,008715 \text{ F}} = 60,9 \text{ m}\Omega$$

$$X_{L3} = 2\pi fL = 2 \times 3,14 \times 300 \times 0,000014 \text{ H} = 26,376 \text{ m}\Omega$$

$$X_{C3} = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \times 3,14 \times 300 \times 0,021 \text{ F}} = 25,27 \text{ m}\Omega$$

$$X_L \text{ Total} = (121,7 + 31,055 + 26,376) \text{ m}\Omega = 179,1374 \text{ m}\Omega$$

$$X_C \text{ Total} = (121,7 + 60,9 + 25,27) \text{ m}\Omega = 207,9098 \text{ m}\Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{X_L \times X_C}{X_C - X_L}\right)^2} = \sqrt{0,0122^2 + \left(\frac{207,9098 \times 179,1374}{207,9098 - 179,1374}\right)^2} = 154,8 \text{ m}\Omega = 0,155 \Omega$$

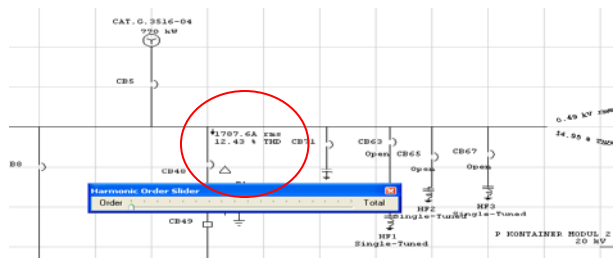
Resonansi paralel menghasilkan impedansi yang tinggi pada frekuensi resonansi. Umumnya sumber harmonisa dianggap sebagai sumber gangguan pada frekuensi orde tertentu yang menaikkan tegangan harmonisa dan arus harmonisa yang tinggi pada setiap lengan impedansi paralel[7].

Resonansi paralel dapat terjadi pada beberapa cara. Pada sistem ini, resonansi paralel terjadi ketika kapasitor dihubungkan paralel pada busbar yang samadengan sumber harmonisa. Sebuah resonansi paralel terjadi antara sumber dan kapasitor

3.4. Analisis Nilai Harmonisa Pada Sistem Kelistrikan Power Plant Kaji Station

3.4.1. Analisis Harmonisa Arus pada Switchgear Power Plant Kaji Station

Berikut adalah gambar hasil simulasi harmonisa arus pada switchgear power plant :



Gambar 6. simulasi harmonisa arus Kaji Station

Pada gambar 6 terlihat nilai harmonisa arus yang terdapat pada switchgear power plant A sebesar 12,43%. Berdasarkan standar IEEE-519, besar harmonisa arus pada sistem tidak boleh melewati 5%. Berikut tabel hasil dari simulasi sistem pada kaji station A.

Tabel 3. Simulasi harmonisa pada PPA-SWG

Keterangan	Operasi	Rating
I rms Primer	1787,6 A	4 MA
I rms Sekunder	42 A	115,5 A
%THDI	12,43%	-

Tabel 4. IHD arus pada PPA-SWG

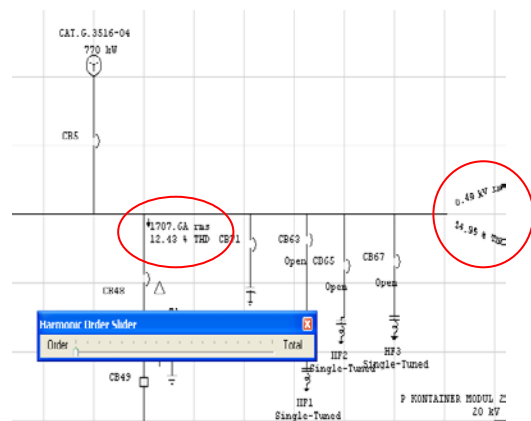
Orde	%IHD
1	100
5	12,1
7	2,5
11	1,0
13	0,8
17	0,5
19	0,4
23	0,1
25	0,1
29	0,0
31	0,0

Dari hasil simulasi diatas dapat dilihat, harmonisa yang dominan terjadi pada orde 5 dimana pada gambar, orde dilambangkan dengan tanda “#”, dan orde 1 dimulai dari urutan 0. Orde lainnya yaitu orde 11, 13, 17 dan 19 tidak dominan dan tidak melebihi batas standar IEEE std 519-1992 yaitu 5%.

3.4.2. Harmonisa Tegangan

Pada tabel 5 merupakan hasil running dan simulasi harmonisa tegangan pada bus PPA-SWG. Pada gambar 7 terlihat nilai harmonisa tegangan yang terdapat pada switchgear power plant A sebesar 14,95%. Berdasarkan standar IEEE-519, besar harmonisa tegangan pada sistem tidak boleh melewati 5%. Berikut tabel hasil dari simulasi sistem pada kaji station A.

Berikut adalah gambar hasil simulasi harmonisa tegangan pada switchgear power plant A:



Gambar 7. Harmonisa tegangan pada Kaji Station

Dari hasil simulasi pada gambar 7 diatas dapat dilihat, harmonisa tegangan yang berada diatas standar adalah pada orde 5. Dari simulasi, didapatkan THD tegangan bus

PPA-SWG adalah 14,95%. Maka, THD tegangan juga sudah diatas 5%. Tegangan rms pada bus PPA-SWG adalah 0,48 kV rms. THD tegangan yang melebihi standar akan mempengaruhi besar daya yang diperlukan dari generator sistem.

Tabel 5. IHD tegangan pada PPA-SWG

Orde	%IHD
1	100
5	12,33
7	3,09
11	0,96
13	0,67
17	0,34
19	0,27
23	0,18
25	0,15
29	0,11
31	0,1
35	0,08
37	0,07
41	0,06
43	0,05
47	0,04
49	0,04

3.4.3. Analisis Pengaruh Pemasangan Filter Pasif Terhadap Faktor Daya dan Harmonisa

Pemasangan filter pasif pada bus yang memiliki harmonisa arus dan tegangan besar akan memberikan pengaruh pada kualitas daya pada sistem. Pada penelitian ini, pemasangan filter dikhususkan hanya untuk perbaikan harmonisa dan penurunan efek resonansi. Kapasitor yang digunakan didasarkan pada *sizing* bank kapasitor yang sebelumnya. Berikut adalah perhitungan *sizing filter* pada sistem:

Pada Orde 5:

Nilai reaktansi kapasitor :

$$X_c = \frac{V^2}{Q_c}$$

$$X_c = \frac{480^2 \text{ V}}{379 \text{ kVAR}}$$

$$X_c = 0,608 \Omega$$

Setelah menentukan reaktansi kapasitor, selanjutnya adalah menghitung kapasitansi kapasitor, dengan menggunakan rumus berikut :

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} \text{ dimana } f \text{ adalah frekuensi fundamental } 60\text{Hz}$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 60 \times 0,608} \quad C = 0,00436 \text{ F}$$

Setelah menentukan kapasitansi kapasitor, selanjutnya menghitung impedansi reaktor filter dengan menggunakan persamaan berikut :

$$X_L = \frac{X_c}{n^2}$$

$$X_L = \frac{0,608 \Omega}{5^2}$$

$$X_L = 0,0243 \Omega$$

Dimana n adalah orde harmonisa arus yang akan di *tuned*. Besar induktansi induktor dapat dihitung melalui persamaan berikut :

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \text{ f adalah frekuensi fundamental sistem } 60 \text{ Hz}$$

$$L = \frac{0,0243 \Omega}{2\pi \times 60}$$

$$L = 6,46 \times 10^{-5} \text{ H}$$

Setelah menentukan nilai induktansi, maka kita tentukan besar resistansi pada filter. Besar resistansi dapat kita tentukan dengan rumus

$$R = \sqrt{\left(\frac{L}{C}\right)} : Q_{\text{factor}}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{0,0000646}{0,00436}\right)} : 10 = 0,0122$$

Pada orde 7:

Nilai reaktansi kapasitor :

$$X_c = \frac{V^2}{Q_c}$$

$$X_c = \frac{480^2 \text{ V}}{757 \text{ kVAR}}$$

$$X_c = 0,30436 \Omega$$

Setelah menentukan reaktansi kapasitor, selanjutnya adalah menghitung kapasitansi kapasitor, dengan menggunakan rumus berikut :

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} \text{ dimana } f \text{ adalah frekuensi fundamental } 60\text{Hz}$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 60 \times 0,30436} \quad C = 0,008715 \text{ F}$$

Setelah menentukan kapasitansi kapasitor, selanjutnya menghitung impedansi reaktor filter dengan menggunakan persamaan berikut :

$$X_L = \frac{X_c}{n^2}$$

$$X_L = \frac{0,30436 \Omega}{7^2}$$

$$X_L = 0,006211 \Omega$$

Dimana n adalah orde harmonisa arus yang akan di *tuned*

Besar induktansi induktor dapat dihitung melalui persamaan berikut :

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \text{ f adalah frekuensi fundamental sistem } 60 \text{ Hz}$$

$$L = \frac{0,006211 \Omega}{2\pi \times 60}$$

$$L = 1,6484 \times 10^{-5} \text{ H}$$

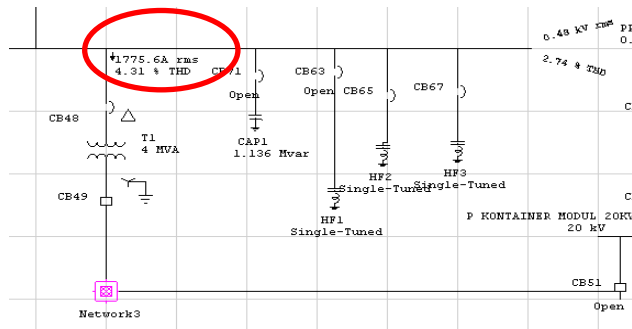
Setelah menentukan nilai induktansi, maka kita tentukan besar resistansi pada filter. Besar resistansi dapat kita tentukan dengan rumus

$$R = \sqrt{\left(\frac{L}{C}\right)} : Q_{\text{factor}}$$

$$= \sqrt{\left(\frac{0,000016}{0,008715}\right)} : 10 = 0,0052$$

3.4.3.1. Pengaruh Pemasangan Filter Pasif Terhadap Harmonisa Arus

Berikut adalah hasil simulasi *harmonic load flow* pada *etap power station 12.6* pada bus PPA-SWG :



Gambar 8. THD arus pada bus PPA-SWG setelah pemasangan filter

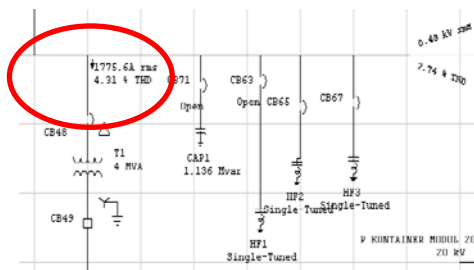
Tabel 6. Perbandingan THD I sebelum dan sesudah pemasangan Filter

Kondisi	THD I
Sebelum pemasangan filter	12,43 %
Setelah pemasangan filter	4,31 %

Dari gambar 8 dapat dilihat bahwa nilai total distorsi arus pada bus PPA-SWG adalah 4,31%. Besar THD arus setelah pemasangan filter telah berada dibawah standar aman (5%) sesuai IEEE-519. Dari tabel 4.10 dan gambar 4.11, terlihat perbandingan antara nilai THD I pada saat sebelum dan sesudah pemasangan filter. Terjadi penurunan nilai THD I pada sistem. Dari hal ini dapat terlihat bahwa pemasangan filter telah berhasil mengurangi harmonisa arus pada sistem.

3.4.3.2. Pengaruh Pemasangan Filter Pasif Terhadap Harmonisa Tegangan

Berikut adalah hasil simulasi *harmonic load flow* pada *etap power station 12.6* pada bus PPA-SWG :



Gambar 9. THD tegangan pada bus PPA-SWG setelah pemasangan filter

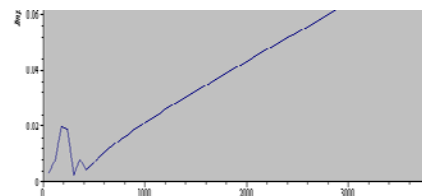
Tabel 7. Perbandingan THD V sebelum dan sesudah pemasangan Filter

Kondisi	THD V
Sebelum pemasangan filter	14,95 %
Setelah pemasangan filter	2,74 %

Dari gambar 9 dapat dilihat bahwa nilai total distorsi arus pada bus PPA-SWG adalah 2,74%. Dari tabel 7 dan gambar 11, terlihat perbandingan antara nilai THD V pada saat sebelum dan sesudah pemasangan filter. Terjadi penurunan nilai THD V pada sistem. Besar THD tegangan setelah pemasangan filter telah berada dibawah standar aman (5%) sesuai IEEE-519. Dari hal ini dapat terlihat bahwa pemasangan filter telah berhasil mengurangi harmonisa dan memperbesar kapasitas secara bersamaan.

3.4.3.3. Pengaruh Pemasangan Filter Pasif Terhadap Efek Resonansi

Berikut adalah hasil simulasi *frequency scan* pada *etap power station 12.6* pada bus PPA-SWG :

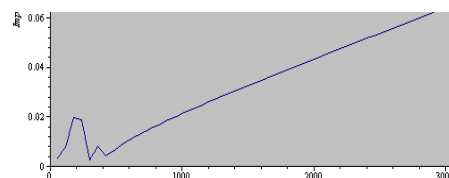


Gambar 10. Gelombang resonansi pada bus PPA-SWG setelah pemasangan filter

Tabel 8. Hasil simulasi resonansi pada bus PPA-SWG setelah pemasangan filter

#	X	Y
0	60	3.34236e-03
1	120	7.82015e-03
2	180	1.94639e-02
3	240	1.88467e-02
4	300	2.72589e-03
5	360	8.03008e-03
6	420	4.46279e-03
7	480	6.12924e-03
8	540	8.55785e-03
9	600	1.05894e-02
10	660	1.24096e-02
11	720	1.41047e-02
12	780	1.57173e-02
13	840	1.72709e-02

Berikut adalah hasil simulasi *frequency scan* pada *etap power station 12.6* pada bus PPA-SWG :



Gambar 13. Gelombang resonansi pada bus PPB-SWG setelah pemasangan filter

Dari gambar 10, 11, tabel 8 dan tabel 9 dapat dilihat bahwa terjadi penurunan nilai impedansi dari sistem, bahkan tidak ada yang mencapai 0,1. Dari hal ini dapat terlihat bahwa pemasangan filter telah mengurangi

efek resonansi yang timbul akibat adanya pemasangan bank kapasitor. Penambahan hambatan induktasi dan resistansi pada sistem menyebabkan semakin besarnya selisih antar besar X_C dan X_L dan memperkecil impedansi yang timbul pada *kaji station* A dan B[4]. Efek dari pengurangan nilai impedansi resonansi pada sistem dapat terlihat dari perbaikan nilai THD V dan THD I dari harmonisa pada pembahasan sebelumnya. Akan tetapi, masih terlihat terdapat sedikit terjadi lonjakan pada orde 1,2,8,9, dan 10. Hal ini disebabkan filter yang dipasang hanya diinjeksikan pada frekuensi orde ke 5 dan orde ke 7 yang merupakan orde dominan. Hal ini menyebabkan terjadi penurunan namun kurang signifikan pada orde lain yang tidak dominan.

Disamping itu, perbaikan kualitas daya juga dapat dilihat lewat terjadinya kenaikan faktor daya pada sistem. Berikut perbandingan faktor daya saat terjadi

Tabel 9. Hasil simulasi resonansi pada bus PPB-SWG setelah pemasangan filter

#	X	Y
0	60	3.34236e-03
1	120	7.82015e-03
2	180	1.94639e-02
3	240	1.88467e-02
4	300	2.72589e-03
5	360	8.03008e-03
6	420	4.46279e-03
7	480	6.12924e-03
8	540	8.55785e-03
9	600	1.05894e-02
10	660	1.24096e-02
11	720	1.41047e-02
12	780	1.57173e-02
13	840	1.72709e-02

Tabel 10. Perbandingan nilai faktor daya awal, saat dipasang kapasitor, dan filter

Generator	Faktor daya awal	Faktor daya saat dipasang kapasitor	Faktor daya saat dipasang filter
CAT.G-3156-01	0	0	0
CAT.G-3156-02	0,698	0,953	0,961
CAT.G-3156-03	0,9	0,9	0,9
CAT.G-3156-04	0,698	0,953	0,961
CAT.G-3156-05	0,9	0,9	0,9
CAT.G-3156-06	0,698	0,953	0,961
CAT.G-3156-07	0,698	0,953	0,961
CAT.G-3156-08	0,698	0,953	0,961
CAT.G-3156-09	0	0	0
CAT.G-3156-10	0,698	0,953	0,961

Dari tabel 10 dapat terlihat perbandingan nilai faktor daya awal, setelah pemasangan bank kapasitor, dan setelah pemasangan filter. Terlihat kenaikan nilai faktor daya saat dilakukan pemasangan bank kapasitor dan setelah dilakukan peredaman nilai harmonik dan efek resonansi. Hal ini dikarenakan harmonisa sistem, dan lonjakan impedansi akan menimbulkan penurunan daya yang dapat disalurkan sistem dari generatr ke beban. Penurunan daya yang dapat disalurkan oleh sistem akan memperkecil faktor daya yang dihasilkan oleh sistem secara keseluruhan, dimana seperti yang kita ketahui bahwa faktor daya didapatkan lewat rumus $\cos\phi = \frac{P}{S}$ [5]. Hal ini membuat perbaikan resonansi yang dilakukan pada *kaji station* A dan B secara langsung menaikkan nilai faktor daya keseluruhan pada sistem.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi menggunakan ETAP 12.6, berdasarkan standard distorsi harmonisa, target faktor daya yang dicapai, dan penurunan efek resonansi, maka dapat disimpulkan bahwa dengan pemasangan kapasitor bank pada *Kaji Station* A sebesar 1136 KVAR dan *Kaji Station* B sebesar 1781,1 KVAR, maka terjadi kenaikan faktor daya sistem hingga mencapai 0,953 dan dapat beroperasi tanpa terintegrasi. Penurunan efek resonansi dan penurunan tingkat harmonisa pada sistem, maka terjadi kenaikan faktor daya hingga mencapai 0,961. Pemasangan *filter* pada sistem dapat mereduksi harmonisa arus sebesar 8,1% dan mereduksi harmonisa tegangan sebesar 12,2%. Pemasangan *filter* pada sistem dapat mereduksi efek resonansi yang diakibatkan oleh pemasangan bank kapasitor.

Referensi

- [1]. Geradino A, Pete "Electronic Power System Manual". USA : McGraw-Hill.1992
- [2]. Chattopadhyay, Surajit., Sengupta, Samarjit, dan Mitra, Madhuchhanda. "Electric Power Quality". Springer. United States of America. 2011.
- [3]. Skvarenina, Timothy L. THE POWER ELECTRONICS HANDBOOK. CRC Press. New York: 2002
- [4]. Mcgraw-Hill. "Electrical Power System Quality". Digital Engineering Library. Second edition.
- [5]. Datasheet IEEE-519
- [6]. Tribuana, wanhar "Pengaruh Harmonik pada transformator". 1999
- [7]. Wildi, theodore. "Electrical Machines, drives and power systems". 2002