

Evaluasi Harmonisa dan Perencanaan Filter Pasif pada Sisi Tegangan 20 kV Akibat Penambahan Beban pada Sistem Kelistrikan Pabrik Semen Tuban

Willy Prasetyadi, Rony Seto Wibowo, dan Ontoseno Penangsang
Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111
E-mail: ontosenop@ee.its.ac.id

Abstrak— Pabrik Semen Tuban merupakan perusahaan industri yang bergerak dibidang produksi semen. Pada tugas akhir ini dianalisis aliran daya dari sistem kelistrikan Pabrik Semen Tuban. Kemudian akan dilakukan juga analisis harmonisa untuk mengetahui besar distorsi harmonisa yang terjadi. Sistem yang dianalisa adalah sistem kelistrikan Pabrik Semen Tuban setelah dilakukan penambahan beban. Dari hasil simulasi aliran daya permasalahan terjadi pada bus LVS 11.1 dan LVS 11.2 mengalami kondisi undervoltage, sedangkan pada bus Main Substation 3 akan dilakukan perbaikan faktor daya. Dari hasil analisis harmonisanya didapatkan sistem masih dalam keadaan *safe*. Kemudian dari simulasi akan dilakukan desain untuk pemasangan *capacitor bank* maupun filter harmonisa. Hal tersebut dilakukan untuk mengatasi permasalahan yang terjadi didalam kedua bus yang bermasalah. Setelah itu dilakukan analisis kembali terhadap sistem kelistrikan pada kondisi penambahan *capacitor bank* dan kondisi penambahan filter harmonisa. Akan dilakukan perbandingan dari hasil pemasangan *capacitor bank* dan pemasangan filter harmonisa. Hasil perbandingan tadi akan dijadikan acuan untuk pemilihan peralatan yang tepat untuk mengatasi permasalahan yang ada dalam sistem.

Kata Kunci—*Capacitor Bank, Filter Harmonisa, Distorsi Harmonisa, Undervoltage, Faktor Daya*

I. PENDAHULUAN

Pada sistem tenaga listrik arus bolak-balik ideal, energi listrik disalurkan dalam frekuensi tunggal dan pada level tegangan yang konstan. Seiring perkembangan beban listrik yang semakin besar dan semakin kompleks, terutama penggunaan beban *non linier* akan menimbulkan perubahan pada bentuk gelombangnya. Pada industri beban non linear yang menyebabkan distorsi harmonisa diantaranya adalah konverter, tanur busur listrik, transformator, *rectifier*[1]. Bentuk gelombang yang cacat ini merupakan interaksi antara gelombang sinus dan gelombang lain yang mempunyai frekuensi kelipatan integer dari komponen fundamentalnya yang dikenal dengan harmonisa.

Pabrik Semen Tuban I, II dan III adalah sistem kelistrikan yang disuplai oleh PLN untuk memenuhi proses produksinya. Dalam penelitian ini akan dianalisis aliran daya maupun level distorsi harmonisa yang terjadi di dalam sistem. Dalam sistem

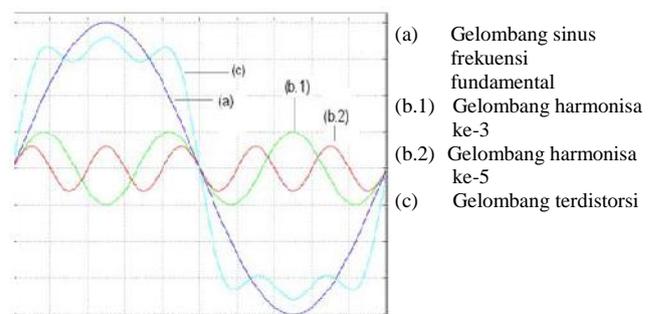
kelistrikan yang mengandung sumber harmonisa, dalam perbaikan faktor daya maupun perbaikan *voltage bus magnitude* tidak bisa dengan menambahkan *capacitor bank*. Penambahan *capacitor bank* pada sistem kelistrikan yang mengandung harmonisa akan menyebabkan penguatan nilai dari distorsi harmonisa. Maka akan didesain filter harmonisa untuk memperbaiki permasalahan faktor daya dan *voltage bus magnitude* yang terjadi pada sistem kelistrikan Pabrik Semen Tuban.

II. HARMONISA

A. Pengertian Harmonisa

Harmonisa dijelaskan sebagai penyimpangan gelombang sinusoidal yang berhubungan dengan arus dan tegangan dari amplitudo dan frekuensi yang berbeda. Perubahan bentuk dari gelombang arus dan tegangan yang disebabkan harmonisa akan mengganggu sistem distribusi listrik dan menurunkan kualitas daya sistem tersebut.

Dalam sistem tenaga listrik, harmonisa dapat dijelaskan sebagai gelombang terdistorsi secara periodik pada kondisi *steady state* disebabkan adanya interaksi antara gelombang sinus sistem pada frekuensi fundamental dengan komponen gelombang lainnya yang merupakan frekuensi kelipatan interger dari frekuensi fundamental sumber[2]. Gambar 1 menjelaskan gambar gelombang sinyal yang terpengaruh adanya harmonisa.



Gambar 1. Gelombang terdistorsi akibat harmonisa

B. Sumber-Sumber Harmonisa

Pada sistem tenaga listrik, harmonisa dapat disebabkan oleh peralatan-peralatan berikut ini[1]:

- Konverter
- Tanur Busur Listrik (*Electric Arc Furnace*)
- Transformator
- Mesin-Mesin Berputar
- *Rectifier*

C. Distorsi Harmonisa

Total Harmonic Distortion (THD) diartikan sebagai persentase total komponen harmonisa terhadap komponen fundamentalnya (dapat berupa tegangan atau arus). *Total Harmonic Distortion* (THD) dituliskan sebagai:

$$THD = \frac{\sum_{n=2}^k U_n^2}{U_1^2} \times 100\% \tag{1}$$

dimana :

- U_n : komponen harmonisa
- U_1 : komponen fundamental
- k : komponen harmonisa maksimum yang diamati

Perhitungannya berbeda untuk setiap negara, tergantung standar yang dipakai. Dalam penelitian ini menggunakan standar dari IEEE Std. 519-1992 seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Limit distorsi tegangan berdasarkan IEEE Std 519-1992

Tegangan Bus Pada PCC	Distorsi Tegangan Individual (%)	THD (%)
69 kV dan ke bawah	3,0	5,0
69,001 kV sampai 161 kV	1,5	2,5
161,001 kV dan ke atas	1,0	1,5

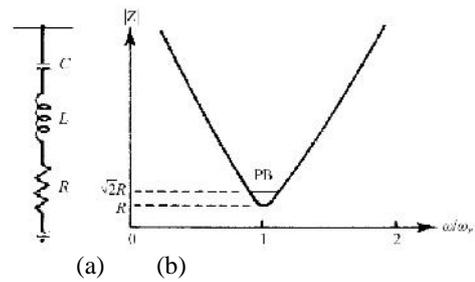
D. Filter Harmonisa

Filter harmonisa didesain dengan tujuan untuk mengurangi amplitudo satu atau lebih frekuensi dari sebuah tegangan atau arus. Dengan pemasangan filter harmonisa pada suatu sistem tenaga kelistrikan yang mengandung sumber harmonisa, maka penyebaran arus harmonisa ke seluruh jaringan dapat ditekan sekecil mungkin. Disisi lain filter harmonisa pada frekuensi fundamental dapat mengkompensasi daya reaktif yang digunakan untuk memperbaiki faktor daya sistem.

E. Perencanaan Single Tuned Filter Orde 11

Filter ini ditala pada salah satu orde harmonisa. Filter ini terdiri dari rangkaian seri kapasitor , reaktor dan resistor (RLC). Impedansi dari rangkaian Gambar 2.a dinyatakan ke dalam persamaan[3] :

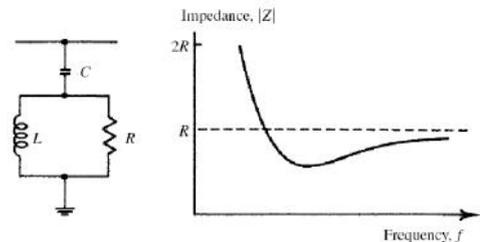
$$Z(\omega) = R + j \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) \tag{2}$$



Gambar 2. Rangkaian *single tuned shunt filter* (a) dan Grafik fungsi frekuensi terhadap impedansi *single tuned shunt filter* (b)

F. Perencanaan High Pass Filter Damped Orde 11

Filter ini digunakan untuk membuat impedansi yang rendah untuk spektrum frekuensi harmonisa yang lebar. Nilai *Quality Factor* (Q) pada *High Pass Damp Filter* bernilai rendah. Tujuannya supaya filter memiliki impedansi yang rendah pada jangkauan frekuensi yang lebar.



Gambar 3. Rangkaian *High Pass Damp Filter* (a) dan Grafik Fungsi Frekuensi Terhadap Impedansi *High Pass Damp Filter* (b)

III. SISTEM KELISTRIKAN EKSISTING

Sistem kelistrikan eksisting disuplai dari PLN dengan tegangan 150 kV dan kapasitas daya terpasang dari PLN adalah 120 MVA. Pada Pabrik Semen Tuban I dan II mengkonsumsi daya sebesar 87 MVA dan Pabrik Semen Tuban III mengkonsumsi daya sebesar 33 MVA. Tegangan 150 kV tersebut diturunkan menjadi 20 kV oleh trafo utama yang berkapasitas 42 MVA.

Penambahan beban terjadi di dalam beberapa *electrical room* Pabrik Semen Tuban. Data penambahan beban dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Penambahan beban pada sistem kelistrikan Pabrik Semen Tuban

Keterangan	Eksisting	Perubahan
Electrical Room 4		317 kW
Electrical Room 4.2		250 kW
• Compressor		
Electrical Room 5		1950 kW
• Motor 341FN6M01	1200 kW	
Electrical Room 6		AC 400 kW
• Motor 441FNS	DC 448 kW	
• Motor 441FNQ	DC 448 kW	
Electrical Room 6 Cooler		1557 kW
Electrical Room 6 EP		540 kW
Electrical Room 1		250 kW
• Motor 241BC4M01	200 kW	
Electrical Room 4.1		800 kW
• Motor 471FN1M01	736 kW	
Electrical Room 5		AC 1200 kW
• Motor 341FN6M01	DC 1041 kW	
• Trafo 504		2.5 MVA
• Compressor	1 MVA	5 x 180 kW

Electrical Room 16 • Trafo 6.3/0.4 kV • Motor Water Pump • Motor Jocky Pump		1 MVA 250 kW 15 kW
Electrical Room 12 • Motor 442FN1 • Motor 442FN2	2500 kW 2500 kW	3650 kW 3650 kW
Electrical Room 13 • Motor 482FN2 • Compressor ABC • Inlet Cooler	75 kW 150 kW	250 kW 110 kW 250 kW
Electrical Room 16 • Compressor		250 kW
New Coal Mill		4350 kW

Distorsi harmonisa yang terjadi pada Pabrik Semen Tuban terjadi akibat beberapa VFD (*Variable Frequency Drive*) dan *charger*. Filter pasif yang terpasang pada sistem menyebabkan distorsi harmonisa dari sistem sudah bernilai di bawah standar IEEE Std. 519-1992.

Saat dilakukan evaluasi, sistem kelistrikan Pabrik Semen Tuban I dan II terjadi kondisi *undervoltage* dan akan dilakukan perbaikan faktor daya. Pada sistem kelistrikan yang mengandung harmonisa tidak boleh dilakukan pemasangan *capacitor bank* untuk mengatasi permasalahan *undervoltage* dan perbaikan faktor daya. Pemasangan *capacitor bank* akan menyebabkan kenaikan nilai dari distorsi harmonisa. Maka akan dilakukan desain filter harmonisa untuk mengatasi permasalahan yang terjadi pada sistem.

IV. HARMONISA, CAPACITOR BANK DAN DESAIN FILTER

A. Simulasi Pada Kondisi Eksisting

Berikut di bawah ini adalah data mengenai total distorsi harmonisa tegangan sistem kelistrikan Pabrik Semen Tuban I dan II .

Tabel 3.

Total distorsi harmonisa tegangan bus utama Pabrik Semen Tuban I dan II

Bus Beban	kV	% kV	THD _v (%)	Standar IEEE (%)	Kondisi
LVS 4.3	0.4	96.81	0.71	5	Safe
LVS 4.4	0.4	96.69	0.70	5	Safe
LVS 11.1	0.4	90.32	2.76	5	Safe
LVS 11.2	0.4	94.22	2.95	5	Safe
MS 101	6.3	96.99	0.33	5	Safe
MS 201	6.3	98.66	0.76	5	Safe
MS 301	6.3	95.09	0.27	5	Safe
MS 301A	6.3	96.24	0.27	5	Safe
MS 601	6.3	99.99	0.31	5	Safe
MS501	6.3	95.53	3.54	5	Safe
MS 401	6.3	98.13	2.12	5	Safe
ER #16	6.3	97.99	2.08	5	Safe
MAIN SUBSTATION 1	20	97.55	0.43	5	Safe
SS #1	20	97.54	0.43	5	Safe
SS #2	20	97.52	0.43	5	Safe
MAIN	20	96.3	0.27	5	Safe

SUBSTATION					
SUBSTATION 2					
SS #3	20	96.24	0.27	5	Safe
SS# 6	20	96.2	0.28	5	Safe
MAIN SUBSTATION 3	20	95.83	2.19	5	Safe
SS #5	20	95.82	2.19	5	Safe
SS #4	20	95.83	2.19	5	Safe
MAIN SUBSTATION TUBAN II	150	99.99	0.34	5	Safe

Berikut di bawah ini adalah data mengenai total distorsi harmonisa tegangan sistem kelistrikan Pabrik Semen Tuban III.

Tabel 4.

Total distorsi harmonisa tegangan bus utama Pabrik Semen Tuban III

Bus Beban	kV	% kV	THD _v (%)	Standar IEEE (%)	Kondisi
MVS 11	6.3	99.44	0.34	5	Safe
MVS 07	6.3	98.15	0.39	5	Safe
MVS 08	6.3	98.84	0.47	5	Safe
MVS 10	6.3	94.98	0.34	5	Safe
MVS 09	6.3	93.67	0.78	5	Safe
HVS 11 SS XI	20	99.88	0.38	5	Safe
HVS 07 SS VII	20	99.76	0.38	5	Safe
HVS 08 SS VIII	20	99.78	0.38	5	Safe
HVS 10 SS X	20	99.8	0.38	5	Safe
HVS 09 SS IX	20	98.17	0.34	5	Safe
HVS 31A MAIN SS	20	99.9	0.38	5	Safe
HVS 31B MAIN SS	20	98.44	0.33	5	Safe
MAIN BUS TUBAN III	150	100	0.08	5	Safe

Pada kondisi eksisting, distorsi tegangan di Pabrik Semen Tuban masih dibawah standar IEEE 519-1992 ($V_{thd} < 5\%$), kecuali pada bus sumber harmonisa.

Pada kondisi eksisting sistem sudah tidak mengalami distorsi harmonisa. Gangguan pada kondisi eksisting terjadi pada sistem kelistrikan Pabrik Semen Tuban I dan II . Terjadi permasalahan *undervoltage* pada bus LVS 11.1 dan LVS 11.2. Perbaikan faktor daya akan dilakukan pada bus Main Substation 3.

Tabel 5.

Permasalahan pada sistem kelistrikan Pabrik Semen Tuban I dan II

Bus Beban	kV	% kV	kW	kVAR	kVA	PF (%)
LVS 11.1	0.4	90.28	718	539	898	80
LVS 11.2	0.4	94.18	823	283	871	94.6
MAIN SUBSTATION 3	20	95.8	23817	11572	26480	89.9
SS #5	20	95.79	23135	11443	25811	89.6

B. Penambahan Capacitor Bank

Untuk mengatasi permasalahan yang terjadi maka didesain *capacitor bank* untuk meningkatkan *voltage bus magnitude* dan perbaikan faktor daya.

Bus LVS 11.1 memiliki faktor daya 80% *lagging* dan *voltage bus magnitude* sebesar 90.28%. *Voltage bus magnitude* dalam kondisi normal bernilai antara 95-105%, sehingga bus LVS 11.1 terjadi *undervoltage*. Perbaikan faktor daya pada bus ini direncanakan hingga mencapai 99%. Daya reaktif yang akan diinjeksikan diperoleh dari perhitungan di bawah ini:

$$\Delta Q = Px(\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

$$\Delta Q = Px(\tan(\cos^{-1} PF \text{ lama}) - \tan(\cos^{-1} PF \text{ baru}))$$

$$\Delta Q = 0.7 x (\tan(\cos^{-1} 0.80) - \tan(\cos^{-1} 0.99))$$

$$\Delta Q = 425.5 \text{ kVAR}$$

Besarnya daya reaktif yang akan diinjeksikan ke bus LVS 11.1 adalah sebesar 425.5 kVAR dan dibulatkan menjadi 426 kVAR.

Perbaikan faktor daya akan dilakukan pada bus Main Substation 3, namun pemasangan *capacitor bank* diletakkan pada Bus SS #5 yang memiliki faktor daya 90.3% *lagging*. Perbaikan faktor daya pada bus ini direncanakan hingga mencapai 97.8%. Daya reaktif yang akan diinjeksikan diperoleh dari perhitungan di bawah ini:

$$\Delta Q = Px(\tan \theta_1 - \tan \theta_2)$$

$$\Delta Q = Px(\tan(\cos^{-1} PF \text{ lama}) - \tan(\cos^{-1} PF \text{ baru}))$$

$$\Delta Q = 23.1 x (\tan(\cos^{-1} 0.903) - \tan(\cos^{-1} 0.978))$$

$$\Delta Q = 6063.63 \text{ kVAR}$$

Besarnya daya reaktif yang akan diinjeksikan ke bus SS #5 adalah sebesar 6063.63 kVAR dan dibulatkan menjadi 6063 kVAR.

Berikut di bawah ini aliran daya bus LVS 11.1 dan SS #5 setelah dilakukan pemasangan *capacitor bank*.

Tabel 6.
Aliran daya bus LVS 11.1 dan SS #5 penambahan *capacitor bank*

Bus Beban	kV	% kV	kW	kVAR	kVA	PF (%)
LVS 11.1	0.4	95.28	732	154.2	751.5	97.6
LVS 11.2	0.4	96.53	830	285	878	94.6
SS #5	20	97.87	23210	5065.3	23747	97.7
MAIN SUBSTATION 3	20	97.88	23896	5155	24445	97.8

Dari Tabel 5 didapatkan bahwa dengan penambahan *capacitor bank* sudah dapat mengatasi permasalahan yang terjadi pada sistem. Selanjutnya akan dilihat pengaruh penambahan *capacitor bank* terhadap distorsi harmonisa.

Tabel 7.
Total distorsi harmonisa tegangan bus LVS 11.1 dan SS #5 setelah pemasangan *capacitor bank*

Bus Beban	kV	% kV	THD _v (%)	Standar IEEE (%)	Kondisi
LVS 11.1	0.4	95.33	3.25	5	Safe
SS #5	20	97.89	2.00	5	Safe

Setelah dilakukan pemasangan *capacitor bank*, terjadi kenaikan THD_v pada LVS 11.1 dan tiga belas bus lainnya.

C. Penambahan Filter Harmonisa

Terjadi kenaikan distorsi harmonisa pada empat belas bus setelah dilakukannya pemasangan *capacitor bank*. Selanjutnya akan dilakukan desain filter harmonisa, kemudian disimulasikan pengaruh dari pemasangan filter harmonisa pada sistem.

Perencanaan Filter Harmonisa Untuk Bus LVS 11.1

Dari perhitungan kapasitor yang akan dikonfigurasi dengan induktor dan resistor, total kapasitor yang dibutuhkan untuk meredam harmonisa bus ini sebesar 426 kVAR. Karena *grounding* terhubung delta maka nilai kompensasi daya reaktif sebesar 142 kVAR.

Pada bus LVS 11.1 akan direncanakan *Single Tuned Filter* Orde 11 menggunakan parameter satu fasa, sehingga kompensasi daya reaktif sebesar 47 kVAR dipasang dengan hubungan *delta*, pada level tegangan fasa 0.23 kV, sistem tiga fasa dan *grounding* terhubung *delta*. Maka didapatkan perhitungan nilai-nilai dari komponen kapasitor, induktor dan resistor adalah sebagai berikut:

Kapasitor (C)

Diketahui frekuensi fundamental sistem kelistrikan Pabrik Semen Tuban I dan II menggunakan 50 Hz.

$$kVAR = \frac{V_{ph}^2}{X_C}$$

$$kVAR = V_{ll}^2 \omega_0 C$$

$$C = \frac{kVAR}{\omega_0 V_{ph}^2}$$

$$C = \frac{47 \times 10^3}{(2 \pi 50)(0.23 \times 10^3)^2} = 2825 \mu F$$

Induktor (L)

Orde harmonisa yang hendak diredam adalah orde 11 sehingga didapat frekuensi *tuning* sebesar 550 Hz. Pemilihan frekuensi *tuning* untuk meredam harmonisa terkadang memerlukan sedikit toleransi, dalam hal ini dipilih frekuensi *tuning* 547 Hz. Pergeseran frekuensi *tuning* ini diperlukan untuk meng-cover frekuensi harmonisa yang akan diredam agar didapat performa maksimum dari filter.

Peredaman harmonisa dengan frekuensi yang akan di-*tuning*, maka harus memenuhi syarat resonansi antara komponen induktor dengan kapasitor. Hal ini diperlukan untuk mendapatkan impedansi yang sekecil-kecilnya untuk *by pass* arus harmonisa menuju *grounding*.

$$X_L = X_C = X_0$$

$$\omega_n L = \frac{1}{\omega_n C}$$

$$L = \frac{1}{(\omega_n)^2 C} = \frac{1}{(2 \pi 547)^2 2825 \times 10^{-6}} = 0,000029 \text{ H}$$

$$X_L = \omega_0 L = 2 \pi 50 (0,000029) = 0.00911 \Omega$$

Resistor (R)

Faktor kualitas filter (Q) untuk jenis *Single Tuned Filter* berada dalam rentang 30 sampai 60 dan dipilih Q = 40. Maka nilai resistornya adalah:

$$X_L = X_C = X_0$$

$$\omega_n L = \frac{1}{\omega_n C}$$

$$Q = \frac{X_0}{R}$$

$$R = \frac{X_L}{Q} = \frac{0.00911}{40} = 0.000227 \Omega$$

Perencanaan Filter Harmonisa Untuk Bus SS #5

Dari perhitungan kapasitor yang akan dikonfigurasi dengan induktor dan resistor, total kapasitor yang dibutuhkan untuk meredam harmonisa bus ini sebesar 6063 kVAR.

Pada bus SS #5 akan direncanakan *High Pass Filter* menggunakan parameter satu fasa, sehingga kompensasi daya reaktif sebesar 2021 kVAR dipasang dengan hubungan bintang (*wye*) pada level tegangan *line to line* 11.54 kV, sistem tiga fasa dan *solid grounding*. Maka perhitungan kapasitor dalam satu fasa, sehingga perhitungan nilai-nilai dari komponen kapasitor, induktor dan resistor adalah sebagai berikut:

Kapasitor (C)

Diketahui frekuensi fundamental sistem kelistrikan Pabrik Semen Tuban I dan II menggunakan 50 Hz.

$$C = \frac{2021 \times 10^3}{(2 \pi 50)(11.54 \times 10^3)^2} = 48.2 \mu F$$

Induktor (L)

Orde harmonisa yang hendak diredam adalah orde tinggi, dalam hal ini diredam mulai orde 11 sehingga didapat frekuensi *tuning* sebesar 550 Hz.

$$L = \frac{1}{(\omega_n)^2 C} = \frac{1}{(2 \pi 550)^2 48.2 \times 10^{-6}} = 0.0017 H$$

$$X_L = \omega_0 L = 2 \pi 50 (0.0017) = 0.545 \Omega$$

Resistor (R)

Faktor kualitas filter (Q) untuk jenis *High Pass Filter* memiliki nilai yang kecil sehingga dipilih Q = 20. Persamaan untuk mendapatkan nilai Q untuk *High Pass Filter* berkebalikan dengan persamaan yang digunakan untuk *Single Tuned Filter*. Maka nilai resistornya adalah:

$$Q = \frac{R}{X_L}$$

$$R = Q X_L = 20 \times 0.545 = 10.90 \Omega$$

Berikut di bawah ini aliran daya bus LVS 11.1 dan SS #5 setelah dilakukan pemasangan filter harmonisa.

Tabel 8.

Aliran daya bus LVS 11.1 dan SS #5 penambahan filter harmonisa

Bus Beban	kV	% kV	kW	kVAR	kVA	PF (%)
LVS 11.1	0.4	95.28	735	156.7	751.5	97.8
SS #5	20	97.89	23218	4952.3	23740.2	97.8

Dari Tabel 7 didapatkan bahwa dengan penambahan filter harmonisa sudah dapat mengatasi permasalahan yang terjadi pada sistem. Selanjutnya akan dilihat pengaruh penambahan capacitor bank terhadap distorsi harmonisa.

Tabel 9.

Total distorsi harmonisa tegangan bus LVS 11.1 dan SS #5 setelah pemasangan filter harmonisa

Bus Beban	kV	% kV	THD _v (%)	Standar IEEE (%)	Kondisi
LVS 11.1	0.4	95.28	95.33	1.50	Safe
SS #5	20	97.89	97.89	1.11	Safe

LVS 11.1	0.4	95.33	1.50	5	Safe
SS #5	20	97.89	1.11	5	Safe

Setelah dilakukan pemasangan filter harmonisa tidak terjadi kenaikan distorsi harmonisa pada bus LVS 11.1 dan SS #5, namun terjadi kenaikan distorsi harmonisa pada empat bus yang lain.

D. Perbandingan Penambahan Capacitor Bank dengan Filter Harmonisa

Berikut di bawah ini adalah Tabel perbandingan total distorsi harmonisa tegangan sistem setelah penambahan capacitor bank dan filter harmonisa.

Tabel 10.

Perbandingan tingkat distorsi harmonisa tegangan pada kondisi *existing* terhadap penambahan capacitor bank maupun filter harmonisa(lanjutan)

Bus Beban	THD _v (%)		
	Existing	Saat Pemasangan Capacitor Bank	Saat Pemasangan Filter
LVS 4.3	0.71	0.73	0.71
LVS 4.4	0.70	0.72	0.70
LVS 11.1	2.76	3.25	1.50
LVS 11.2	2.95	1.85	1.44
MS 101	0.33	0.39	0.35
MS 201	0.76	0.79	0.76
MS 301	0.27	0.27	0.25
MS 301A	0.27	0.29	0.21
MS 601	0.31	0.32	0.27
MS501	3.54	2.05	1.71
MS 401	2.12	1.94	1.08
ER #16	2.08	1.93	1.07
MAIN SUBSTATION 1	0.43	0.50	0.45
SS #1	0.43	0.50	0.45
SS #2	0.43	0.50	0.45
MAIN SUBSTATION 2	0.27	0.29	0.21
SS #3	0.27	0.29	0.21
SS# 6	0.28	0.29	0.21
MAIN SUBSTATION 3	2.19	2.00	1.11
SS #5	2.19	2.00	1.11
SS #4	2.19	2.00	1.11
MAIN SUBSTATION TUBAN II	0.34	0.35	0.19

Dari Tabel 9 tampak bahwa performa filter harmonisa dibandingkan dengan capacitor bank yang dipasang di bus LVS 11.1 dan SS #5 lebih baik. Dapat dilihat terjadi penguatan THD_v di empat belas bus akibat penambahan capacitor bank (gambar diberi *highlight* warna merah), sedangkan untuk pemasangan filter harmonisa hanya terjadi

penguatan THD_V sebanyak empat bus (gambar diberi *highlight* warna kuning).

Untuk bus LVS 11.1 terjadi kenaikan THD_V yang besar saat penambahan capacitor bank, sedangkan saat pemasangan filter harmonisa terjadi penurunan THD_V . Di bus SS #5 penurunan THD_V yang maksimal terjadi saat dilakukan penambahan capacitor bank.

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Sistem kelistrikan Pabrik Semen Tuban I dan IImasi memiliki faktor daya yang baik, namun pada bus LVS 11.1 dan bus Main Substation 3 masi mengalami permasalahan. Pada bus LVS 11.1 terjadi *undervoltage* sedangkan pada bus Main Substation 3 akan dilakukan perbaikan faktor daya.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut didesain *capacitor bank* dan filter harmonisa untuk dipasang pada bus yang bermasalah. Dari Bab 4 bisa dilihat bahwa penambahan filter harmonisa merupakan solusi paling tepat untuk mengatasi permasalahan sistem kelistrikan di Pabrik Semen Tuban I dan II . Hasil simulasi dan analisis pemasangan filter pasif sebagai upaya optimalisasi kualitas daya pada sistem kelistrikan Pabrik Semen Tuban I dan IIdidapat sebagai berikut:

1. *Single Tuned* orde 11 dengan *grounding* terhubung *delta* terpasang pada bus LVS 11.1.
2. *High Pass Damped Filter* dipasangkan pada Bus SS #5.

Pemasangan filter pasif pada sistem kelistrikan Pabrik Semen Tuban I dan II dirasa paling baik, karena sistem kelistrikan Pabrik Semen Tuban I dan IImerupakan sistem yang mengandung harmonisa. Dalam sistem yang mengandung harmonisa apabila ditambahkan *capacitor bank* maka akan terjadi peningkatan distorsi harmonisa.

Untuk sistem kelistrikan Pabrik Semen Tuban III, hasil analisis aliran daya maupun distorsi harmonisa sudah dibawah standar, sehingga untuk Pabrik Semen Tuban III tidak perlu dilakukan perbaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE Std. 1531-2003 - Guide for Application and Specification of Harmonic Filters, (2003).
- [2] J. Arrillaga, D. A. Bradley, P. S. Bodger, "*Power System Harmonics*", John Wiley & Sons, (1985).
- [3] J. C. Das, "*Passive Filters – Potentialities and Limitations*", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, no. 1, (2004, Januari/Februari).