

Teknik Optimasi *Shunt Passive Filter* untuk Memitigasi Distorsi Harmonik

Langlang Gumilar¹, Yogi Dwi Mahandi²

1. Universitas Negeri Malang, Indonesia | langlang.gumilar.ft@um.ac.id

2. Universitas Negeri Malang, Indonesia | yogi.mahandi.ft@um.ac.id

Abstrak

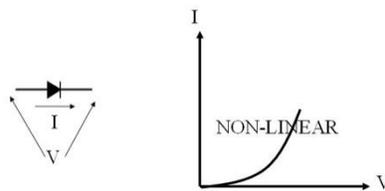
Beban-beban nonlinear selalu diperlukan untuk mengoperasikan peralatan-peralatan listrik. Contohnya *motor drive*, *inverter*, *rectifier*, dan lain-lain. Bagaimanapun beban-beban nonlinear dapat menimbulkan masalah kualitas daya listrik seperti harmonik. Harmonik memiliki dua sumber yaitu sumber tegangan dan sumber arus. Untuk mengurangi distorsi harmonik tegangan dapat menggunakan *shunt passive filter*. Sedangkan untuk mengurangi distorsi harmonik arus dapat menggunakan *series passive filter*. Jurnal ini bertujuan membahas berbagai teknik optimasi pada *shunt passive filter* dalam mengurangi distorsi harmonik. Setiap hasil dari teknik optimasi dibandingkan untuk mencari hasil yang paling efektif. Teknik optimasi *shunt passive filter* dengan kapasitor bank mendapatkan nilai THD 4.13% dan TDD 4.07%. Teknik optimasi *shunt passive filter* dengan *line reactor* mendapatkan nilai THD 2.37% dan TDD 2.14%. *shunt passive filter* dengan *detuned reactor* mendapatkan nilai THD 3.76% dan TDD 3.95%

Kata Kunci

Beban Nonlinear, Harmonik, Arus, Tegangan, Optimasi, *Shunt Passive Filter*.

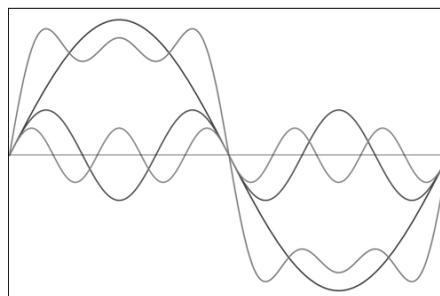
1. Pendahuluan

Pada sistem tenaga listrik sering dijumpai beban-beban nonlinear. Contoh beban-beban linear adalah peralatan *motor drive*, *inverter*, *rectifier*, dan lain-lain. Peralatan-peralatan tersebut terdiri dari komponen-komponen semikonduktor. Contoh komponen semikonduktor adalah *diode*, *transistor*, *thyristor*, dan lain-lain. Bahan semikonduktor dibuat dari pasir silika yang mudah ditemukan pada lingkungan sekitar. Alasan beban-beban tersebut disebut beban nonlinear karena kenaikan arus yang nonlinear terhadap kenaikan tegangan (Lamich dkk, 2014). Kenaikan arus dan tegangan yang tidak linear ditampilkan pada gambar 1.



Gambar 1. Kurva Beban Nonlinear

Keberadaan beban-beban nonlinear pada sistem tenaga listrik dapat menimbulkan harmonik. Harmonik adalah gelombang sinusoidal yang rusak akibat dari bertemunya gelombang-gelombang lain yang memiliki frekuensi yang berbeda-beda (Eghtedarpour dkk, 2014). Resonansi dari gelombang-gelombang tersebut ditampilkan pada gambar 2. Parameter harmonik yang digunakan untuk pengukuran harmonik adalah *Total Harmonic Distortion* (THD), *Individual Harmonic Distortion* (IHD), and *Total Demand Distortion* (TDD). Semua parameter harmonik mempunyai nilai batas toleransi maksimal 5%. Jika parameter lebih dari 5% maka harmonik harus dimitigasi sampai dibawah nilai toleransi.



Gambar 2. Gelombang Harmonik

Penelitian-penelitian yang membahas tentang mitigasi harmonik dengan menggunakan filter aktif dan filter pasif dapat dilihat pada referensi (Zobaa and Aleem, 2014; Tischer and Pfeifer, 2016). Ada beberapa penelitian yang pernah membahas *shunt passive filter C-type* (Aleem dkk, 2012; Lamlom, 2017). Tantangan kedepan untuk aktif dan pasif filter juga pernah dibahas pada

referensi (Motta and Faúndes, 2016). Beban harmonik dapat memberikan dua jenis sumber harmonik. Pertama adalah harmonik sumber tegangan dan kedua adalah harmonik sumber arus. Mitigasi harmonik tegangan dapat menggunakan *shunt passive filter*. Sedangkan mitigasi harmonik arus dapat menggunakan *series passive filter*. Penelitian-penelitian tentang mitigasi harmonik dengan menggunakan metode *harmonic current sharing* atau *power sharing* dapat dilihat pada referensi (Serfontein dkk, 2018; Guan dkk, 2017).

Kontribusi dari jurnal ini adalah memberikan beberapa teknik optimasi pada *shunt passive filter* karena penelitian-penelitian sebelumnya hanya membahas performa *passive filter*. Penting untuk meningkatkan kinerja pasif filter dalam memitigasi atau mengurangi distorsi harmonik. Beban-beban nonlinear semakin banyak digunakan pada sistem tenaga listrik, sehingga sering muncul harmonik yang memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Untuk memitigasi harmonik tersebut diperlukan *passive filter* yang sudah dimodifikasi supaya kinerja filter tersebut semakin baik.

2. Filter Harmonik

Harmonik dapat dikatakan penggabungan gelombang sinusoidal dengan frekuensi yang berbeda-beda. Setiap gelombang mempunyai orde dengan frekuensi kelipatannya masing-masing. Sebagai contoh untuk orde 1 atau disebut gelombang fundamental frekuensinya 50 Hz, sedangkan untuk orde ke 3 mempunyai frekuensi 150 Hz, begitu juga dengan orde ke 5 mempunyai frekuensi 250 Hz, dan orde ke 7 mempunyai frekuensi 350 Hz, dan seterusnya. Penjumlahan dari gelombang-gelombang sinusoidal harmonik dapat dianalisis dengan menggunakan deret Fourier. Fourier menyatakan bahwa setiap fungsi periodik yang berulang dalam interval waktu T dapat direpresentasikan sebagai penjumlahan dari komponen sinusoidal fundamental dengan komponen deret harmonik pada frekuensi yang merupakan hasil kali antara bilangan bulat (integer) dengan frekuensi fundamentalnya. Deret Fourier dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n 2\pi ft - \varphi_n) \quad \text{Pers. (1)}$$

Dimana Y(t) adalah amplitud dari komponen DC biasanya dalam jaringan distribusi bernilai nol. Y_n adalah nilai rms dari harmonik komponen ke-n. f adalah frekuensi fundamental. φ_n adalah sudut fasa dari komponen ke-n. Sedangkan n adalah orde harmonik. Orde harmonik biasanya hanya terjadi pada bilangan ganjil, karena jika bilangan bulat dimasukkan di persamaan Fourier maka hasilnya menjadi 0. Orde harmonik berarti perbandingan frekuensi dasar (fundamental) dengan frekuensi harmonik. Besarnya THD atau distorsi yang ditimbulkan oleh semua komponen harmonik dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$THD = \frac{\sum_{n=2}^{n=\infty} M_n^2}{M_1} \quad \text{Pers. (2)}$$

Dimana M_n adalah nilai rms arus atau tegangan harmonik ke-n. M_1 adalah nilai RMS arus atau tegangan pada frekuensi dasar (fundamental). Sebelum masuk ke tahap desain filter, terlebih dahulu menghitung besarnya daya reaktif yang harus disuplai ke dalam system tenaga listrik untuk memperbaiki faktor daya lama ke factor daya yang baru dengan menggunakan persamaan berikut:

$$Q_{com} = P.(\tan(\cos^{-1}PF_{old}) - \tan(\cos^{-1}PF_{new})) \quad \text{Pers. (3)}$$

dimana Q adalah daya reaktif dalam VAR, P adalah daya nyata dalam Watt, PF adalah factor daya. Di dalam SHPF pemasangan filter satu dengan filter harmonik yang lainnya dipasang secara parallel dan berdasarkan persamaan berikut:

$$Q_{fn} = Q_{com} \frac{V_n}{\sum_{i=1}^n V_n} \quad \text{Pers. (4)}$$

dimana V_h adalah tegangan magnitudo harmonik ke-n dan Q_{fn} adalah kapasitas dari filter harmonik ke-n. Di dalam Q_{fn} terdapat kapasitas kapasitor Q_c dan kapasitas induktor Q_l seperti pada persamaan berikut:

$$Q_c = \frac{n^2}{n^2-1} Q_f \quad \text{Pers. (5)}$$

$$Q_l = Q_c - Q_f \quad \text{Pers. (6)}$$

$$Q_l = \frac{1}{n^2} Q_c \quad \text{Pers. (7)}$$

Berdasarkan besarnya daya reaktif yang dibutuhkan kemudian ditentukan kapasitansi dengan persamaan berikut:

$$X_C = \frac{V_{rated}^2}{Q_c} \quad \text{Pers. (8)}$$

Dimana X_c adalah kapasitansi dalam Ω , dan V adalah tegangan rating pada sistem tenaga listrik dalam Volt. Setelah itu untuk mencari besarnya kapasitor dapat menggunakan persamaan dibawah ini:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad \text{Pers. (9)}$$

Dimana C adalah kapasitor dalam Farad (F). Selanjutnya menentukan besarnya induktansi untuk filter harmonik dengan menggunakan persamaan berikut:

$$X_L = \frac{X_C}{n^2} \tag{Pers. (10)}$$

Dimana X_L adalah induktansi dalam Ω , dan n adalah orde harmonik ke-n. Pengaturan orde yang akan difilter diturunkan sedikit dibawahnya sekitar -0,1. Hal ini perlu dilakukan sebagai toleransi komponen filter untuk mencegah resonansi yang terjadi dalam sistem pada frekuensi yang mengganggu. Selanjutnya menghitung besarnya induktor untuk filter harmonik menggunakan persamaan berikut ini:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \tag{Pers. (11)}$$

Dimana L adalah induktor dalam Henry (H). Selanjutnya menghitung resistansi (R) untuk menentukan faktor kualitas Q dengan menggunakan persamaan berikut:

$$R = \frac{X_n}{Q}, \text{ and } 30 < Q < 50 \tag{Pers. (12)}$$

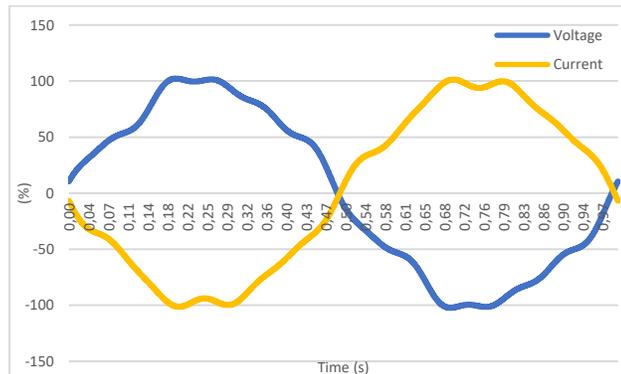
$$X_n = X_{cn} = X_{ln} = \sqrt{X_c X_l} = \sqrt{L/C} \tag{Pers. (13)}$$

3. Teknik Optimasi *Shunt Passive Filter*

Pada bagian ini dibahas beberapa teknik optimasi *shunt passive filter*. Hasil dari teknik optimasi juga ditampilkan supaya dapat dibandingkan dengan teknik lainnya. Data harmonik yang digunakan pada jurnal ini dapat dilihat pada tabel 1 dibawah ini. Data tersebut dapat dikatakan sebagai harmonik sebelum dimitigasi. THD yang terukur adalah 7.34% dan TDD yang terukur adalah 7.87%. Gelombang harmonik tegangan dan arus dapat dilihat pada gambar 3.

Tabel 1. Data Harmonik Sebelum Mitigasi

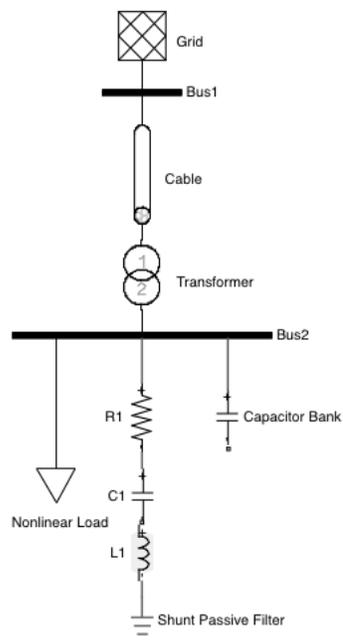
Orde	Harmonik Arus		Harmonik Tegangan	
	Magnitudo (A)	IHD-I	Magnitudo (V)	IHD-V
Fundamental	44.68	100%	380	100%
5	3.185684	7.13%	21.508	5.66%
7	0.8936	2%	8.17	2.15%
11	0.75956	1.70%	10.716	2.82%
13	0.701476	1.57%	11.59	3.05%



Gambar 3. Bentuk Gelombang Harmonik Sebelum dimitigasi

3.1. Kombinasi *Shunt Passive Filter* dan Kapasitor Bank

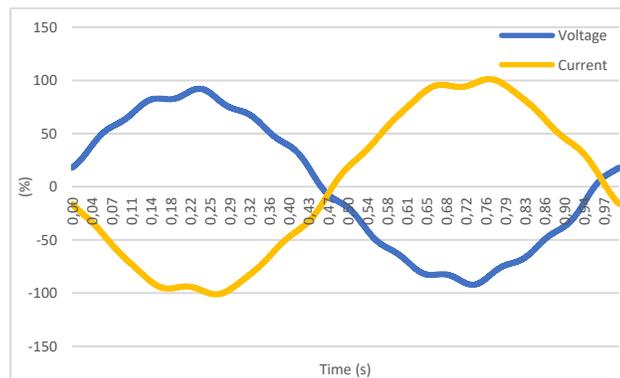
Pada gambar 4 menunjukkan single line diagram yang digunakan pada teknik optimasi ini. *Shunt passive filter* dan kapasitor bank ditempatkan pada bus yang sama dengan beban nonlinear. Tabel 2 menampilkan hasil mitigasi harmonik dengan menggunakan teknik optimasi dari kombinasi shunt pasif filter dan kapasitor bank. Gambar 5 menampilkan bentuk gelombang harmonik tegangan dan arus setelah dimitigasi dengan teknik optimasi ini. Terlihat bentuk gelombang sinusoidal menjadi lebih baik dari pada bentuk gelombang sinusoidal sebelumnya.



Gambar 4. Teknik Optimasi Kombinasi *Shunt Passive Filter* dan Kapasitor Bank

Tabel 2. Data Harmonik Setelah Mitigasi dengan Shunt Pasif Filter dan Kapasitor Bank

Orde	Harmonik Arus		Harmonik Tegangan	
	Magnitudo (A)	IHD-I	Magnitudo (V)	IHD-V
Fundamental	44.68	100%	380	100%
5	1.68	3.78%	13.56	3.57%
7	0.634	1.42%	5.13	1.35%
11	0.043	0.98%	7.29	1.92%
13	0.5	1.12%	9.31	2.45%

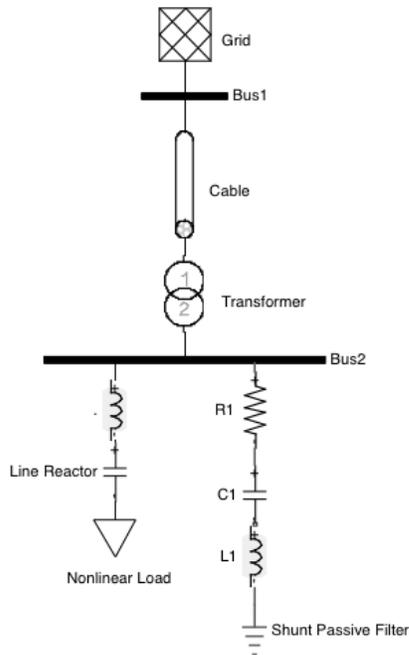


Gambar 5. Bentuk Gelombang Harmonik Setelah Mitigasi dengan *Shunt Passive Filter* dan Kapasitor Bank

Pada teknik optimasi ini, nilai THD yang terukur adalah 4.13% dan nilai TDD yang terukur adalah 4.07%. Nilai THD dan TDD tersebut lebih kecil dibandingkan dengan nilai THD dan TDD sebelum dimitigasi. Nilai THD dan TDD menjadi di batas aman toleransi harmonik. Batas aman harmonik pada sistem tenaga listrik tidak lebih dari 5%.

3.2. Kombinasi *Shunt Passive Filter* dan *Line Reactor*

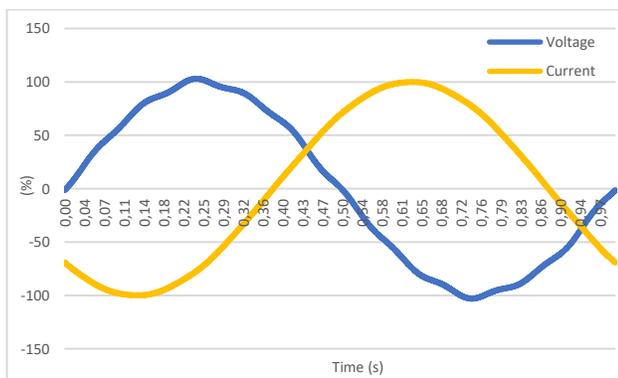
Teknik optimasi ini menggunakan kombinasi *shunt passive filter* dan *line reactor* seperti pada gambar 6. *Line reactor* ditempatkan satu jalur atau terhubung secara seri dengan beban nonlinear. *Shunt passive filter* ditempatkan pada bus yang sama juga dengan *line reactor* dan beban nonlinear. *Line reactor* terdiri dari kapasitor dan induktor yang terhubung secara seri. Fungsi *line reactor* ini dapat membatasi arus harmonik yang berasal dari beban nonlinear, sehingga arus harmonik yang masuk ke dalam sistem tenaga listrik menjadi semakin kecil. Selanjutnya arus tersebut akan difilter oleh *shunt passive filter*. Hasil mitigasi harmonik pada teknik optimasi ini dapat dilihat pada table 3. Pada gambar 7 menampilkan gelombang sinusoidal dengan teknik optimasi ini. Bentuk gelombang terlihat lebih baik dari sebelumnya.



Gambar 6. Teknik Optimasi Kombinasi *Shunt Passive Filter* dan *Line Reactor*

Tabel 3. Data Harmonik Setelah Mitigasi dengan Shunt Pasif Filter dan Line Reactor

Orde	Harmonik Arus		Harmonik Tegangan	
	Magnitudo (A)	IHD-I	Magnitudo (V)	IHD-V
Fundamental	44.68	100%	380	100%
5	0.96	2.15%	7.9	2.08%
7	0.09	0.21%	1.21	0.32%
11	0.089	0.2%	0.684	0.18%
13	0.299	0.67%	2.85	0.75%

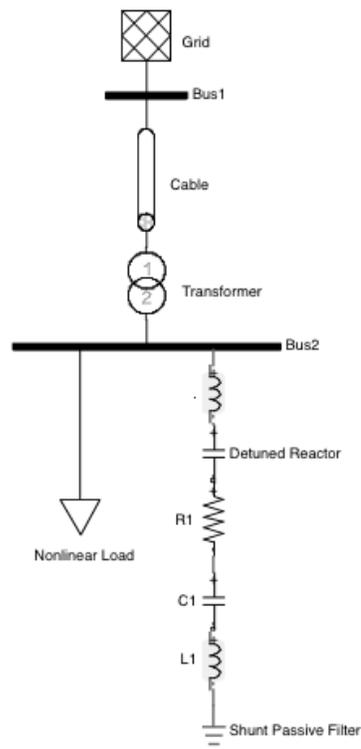


Gambar 7. Bentuk Gelombang Harmonik Setelah Mitigasi dengan *Shunt Passive Filter* dan *Line Reactor*

Pada teknik optimasi ini, nilai THD yang terukur adalah 2.37% dan nilai TDD yang terukur adalah 2.14%. Nilai THD dan TDD tersebut lebih kecil dari teknik optimasi sebelumnya. Kedua nilai tersebut sudah berada pada batas aman toleransi harmonik. Keberadaan line reactor mampu mengurangi arus harmonik yang berasal dari beban nonlinear. Ini sangat membantu untuk meningkatkan performa *shunt passive filter*.

3.3. Kombinasi *Shunt Passive Filter* dan *Detuned Reactor*

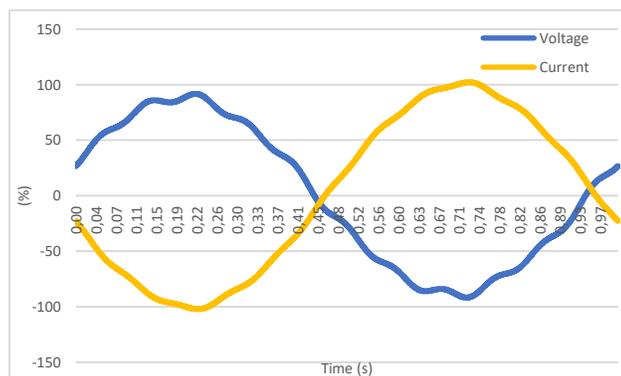
Teknik optimasi ini menggunakan kombinasi *shunt passive filter* dan *detuned reactor*. Secara keseluruhan hampir sama dengan teknik optimasi sebelumnya. Perbedaannya adalah penempatan reactor. Pada teknik optimasi ini *detuned reactor* ditempatkan secara seri dengan *shunt passive filter* seperti pada gambar 8. Penelitian-penelitian sebelumnya menyebutnya dengan *detuned reactor*. *Detuned reactor* dapat membatasi harmonik yang berasal dari *passive filter*. Sebenarnya *passive filter* sendiri menghasilkan arus harmonik, tetapi magnitudonya kecil, sehingga sering diabaikan. Walaupun begitu, arus harmonik tersebut tetap membarikan kontribusi ke sistem tenaga listrik. Tabel 4 menampilkan hasil mitigasi harmonik dengan menggunakan teknik optimasi kombinasi *shunt passive filter* dan *detuned reactor*. Gambar 9 menampilkan bentuk gelombang sinusoidal dari teknik optimasi ini.



Gambar 8. Teknik Optimasi Kombinasi *Shunt PassiveFilter* dan *Detuned Reactor*

Tabel 4. Data Harmonik Setelah Mitigasi dengan Shunt Pasif Filter dan Detuned Reactor

Orde	Harmonik Arus		Harmonik Tegangan	
	Magnitudo (A)	IHD-I	Magnitudo (V)	IHD-V
Fundamental	44.68	100%	380	100%
5	1.46	3.28%	13.98	3.68%
7	0.433	0.97%	3.87	1.02%
11	0.357	0.8%	2.05	0.54%
13	0.317	0.71%	2.16	0.57%



Gambar 9. Bentuk Gelombang Harmonik Setelah Mitigasi dengan *Shunt Passive Filter* dan *Detuned Reactor*

Pada teknik optimasi ini, nilai THD yang terukur adalah 3.76% dan nilai TDD yang terukur adalah 3.95%. Nilai THD dan TDD tersebut lebih baik dari pada teknik optimasi menggunakan kapasitor bak. Tetapi lebih buruk dari pada teknik optimasi menggunakan *line reactor*. Keberadaan detuned reactor hanya membatasi arus harmonik yang berasal dari shunt pasif filter saja, tetapi arus harmonik yang berasal dari beban nonlinear tidak berubah. Sehingga hasil mitigasi harmonik menggunakan detuned reactor tidak bisa mengungguli hasil teknik optimasi menggunakan *line reactor*.

Perbandingan THD dan TDD pada setiap teknik optimasi ditampilkan pada table 5 berikut ini.

Tabel 4. Data Harmonik Setelah Mitigasi dengan Shunt Pasif Filter dan Detuned Reactor

<i>Shunt Passive Filter</i> dan Kapasitor Bank		<i>Shunt Passive Filter</i> dan <i>Line Reactor</i>		<i>Shunt Passive Filter</i> dan <i>Detuned Reactor</i>	
THD	TDD	THD	TDD	THD	TDD
4.13%	4.07%	2.37%	2.14%	3.76%	3.95%

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil semua teknik optimasi, dapat disimpulkan bahwa teknik optimasi menggunakan kombinasi *shunt passive filter* dan *line reactor* memberikan hasil yang paling baik dibandingkan dengan teknik optimasi lainnya. Keberadaan *line reactor* mampu mengurangi arus harmonik yang berasal dari beban nonlinear. Ini sangat membantu untuk meningkatkan performa *shunt passive filter*. Sedangkan Keberadaan *detuned reactor* hanya membatasi arus harmonik yang berasal dari *shunt passive filter* saja, tetapi arus harmonik yang berasal dari beban nonlinear tidak berubah. Keberadaan kapasitor bank yang terhubung sendiri dengan bus tidak dapat membatasi arus yang berasal dari beban nonlinear dan *shunt passive filter*.

Daftar Rujukan

- A. F. Zobaa and S. H. E. Abdel Aleem, "A New Approach for Harmonic Distortion Minimization in Power Systems Supplying Nonlinear Loads," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 1401-1412, May 2014.
- A. Lamlom, A. Ibrahim, M. E. Balci, A. Karadeniz and S. H. E. A. Aleem, "Optimal design and analysis of anti-resonance C-type high-pass filters," *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, Milan, 2017, pp. 1-6.
- D. Serfontein, J. Rens and G. Botha, "Harmonic impedance assessment using prevailing phasors," *2018 18th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Ljubljana, 2018, pp. 1-5.
- H. Tischer and T. Pfeifer, "Hybrid filter for dynamic harmonics filtering and reduction of commutation notches - a case study," *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Belo Horizonte, 2016, pp. 261-265.
- L. Motta and N. Faúndes, "Active / passive harmonic filters: Applications, challenges & trends," *2016 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Belo Horizonte, 2016, pp. 657-662.
- M. Lamich, J. Balcells, M. Corbalan, L. Sainz and C. Fernandez, "Modeling harmonics of networks supplying nonlinear loads," *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, Istanbul, 2014, pp. 2030-2034.
- N. Eghtedarpour, M. A. Karimi and M. Tavakoli, "Harmonic resonance in power systems - a documented case," *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, Bucharest, 2014, pp. 857-861.
- S. H. E. Abdel Aleem, A. F. Zobaa and M. M. Abdel Aziz, "Optimal SC-Type Passive Filter Based on Minimization of the Voltage Harmonic Distortion for Nonlinear Loads," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 1, pp. 281-289, Jan. 2012.
- Y. Guan, J. M. Guerrero, M. Savaghebi, J. C. Vasquez and W. Feng, "A novel harmonic current sharing control strategy for parallel-connected inverters," *2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Cincinnati, OH, 2017, pp. 1602-1607.