

ASESMEN UKURAN DAN LOKASI TAPIS PASIF HARMONIK UNTUK MITIGASI DISTORSI BEBAN TAK LINIER

Agus Ulinuha

Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta
email: Agus.Ulinuha@ums.ac.id

Abstract

The extensive application of nonlinear loads in domestic and industrial activities has introduced a distortion in power system voltage. The nonlinear relation of voltage and current of the devices leads to the existence of higher frequency voltage components causing the system voltage is no longer sinusoidal. These components are called harmonic and the measure of the distortion on system voltage is expressed by Total Harmonic Distortion of Voltage (THDv). The use of the harmonic generating devices may lead to some power quality problems such as additional system loss, destruction of system component, error meter reading, relay failure and uncontrolled voltage increment. It is therefore necessary to block the harmonic components injected by nonlinear loads using harmonic filter and to escape the distortion spreading to the entire system. This paper presents an assessment of filter size and location and its impact on mitigation of harmonic distortion. The filters are tentatively designed and the system improvements are investigated. The strategy is implemented on the IEEE 18-bus distribution system to demonstrate the capability of the filter to suppress the distortion.

Keywords: *Nonlinear load, Harmonic distortion, Harmonic filter*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan sistem kelistrikan secara ekstensif telah sampai pada pemanfaatan secara luas komponen semikonduktor dalam berbagai peralatan pada industri maupun rumah tangga. Sistem kendali motor listrik, penyearah dan inverter merupakan beberapa bentuk pemanfaatan elektronika daya dalam dunia industri. Pada saat ini, pembangkitan daya listrik dari sumber energi terbarukan juga mulai berkembang dan sinkronisasinya terhadap sistem tenaga listrik juga memanfaatkan komponen elektronika daya [1]. Dalam perkantoran dan rumah tangga, berbagai peralatan juga memanfaatkan komponen elektronika semikonduktor yang meskipun nominal daya-nya rendah namun kuantitas peralatannya cukup banyak dengan lokasi pemasangan yang cukup tersebar.

Pemanfaatan komponen elektronika semikonduktor memungkinkan operasional peralatan yang efisien serta kendali peralatan yang mudah [2]. Karenanya pemanfaatan komponen tersebut diperkirakan semakin luas

seiring dengan majunya penelitian pada bidang tersebut. Meskipun demikian, pemanfaatan piranti semikonduktor juga menimbulkan dampak lainnya dalam sistem tenaga listrik. Sejumlah sistem elektronika semikonduktor mempunyai karakteristik tak linier, yang diindikasikan sebagai hubungan antara tegangan dan arus yang tidak linier. Jika piranti tersebut terhubung pada sistem dengan tegangan sinusoidal murni, maka arus yang mengalir pada komponen tersebut tidak lagi berbentuk sinusoidal. Karena arus tersebut mengalir ke sistem melalui berbagai sistem penghantar, maka tegangan sistem juga ikut menjadi tidak sinusoidal.

Analisis spektrum atas bentuk gelombang arus dan tegangan menunjukkan eksistensi komponen frekwensi tinggi. Keberadaan komponen tegangan/arus dengan frekwensi yang lebih tinggi daripada frekwensi fundamentalnya merupakan fenomena harmonisa sistem tenaga. Nilai frekwensi harmonik dinyatakan sebagai kelipatan dari frekwensi fundamentalnya dan nilai kelipatan tersebut disebut sebagai orde harmonik. Untuk

beban tak linier yang berbeda, gelombang-gelombang harmonik yang dibangkitkan juga berbeda. Keberadaan gelombang harmonik yang mendistorsi gelombang fundamentalnya, secara umum bersifat destruktif. Tingkat distorsi sebuah gelombang non-sinusoidal dinyatakan dalam sebuah ukuran *Total Harmonic Distortion* (THD)/Distorsi Harmonik Total. Ukuran tersebut dapat diberlakukan baik untuk arus maupun tegangan. Semakin besar nilai THD-nya semakin tinggi level distorsinya. Dampak distorsi harmonik dapat berupa penambahan susut daya sistem, kenaikan tegangan diluar kendali, kesalahan pembacaan alat ukur, penambahan panas penghantar, kegagalan rele proteksi, pergeseran titik netral sistem 3-fasa 4-kawat dan –pada resonansi yang tajam– dapat menyebabkan kerusakan peralatan.

Karena pemanfaatan piranti/peralatan yang menimbulkan distorsi harmonik semakin ekstensif dan hampir tidak terhindarkan, upaya realistis yang dapat ditempuh adalah meminimalkan dampak distorsi harmonik atau menekan level distorsinya. Menekan level distorsi harmonik dirasakan lebih efektif karena distorsi dari peralatan dapat ditekan sedemikian, sehingga injeksi arus harmonik dapat ditahan untuk tidak menyebar ke seluruh sistem. Cara yang ditempuh adalah dengan memasang tapis harmonik pada tempat yang dipilih sehingga injeksi harmonik dapat ditahan. Nilai tapis dapat dipilih berdasarkan komponen harmonik yang akan di-*block* (ditahan). Jika sejumlah komponen orde tinggi dapat ditahan, maka level distorsinya dapat ditekan. Secara grafis dapat digambarkan bahwa ketika sejumlah gelombang frekwensi tinggi dihilangkan, maka bentuk gelombang sistem akan lebih baik dan lebih mendekati sinusoidal. Penurunan level distorsi akan berimplikasi pada pengurangan dampak destruktif pemanfaatan beban tak linier.

Dalam makalah ini, mitigasi level distorsi harmonik dari beban tak linier akan dilakukan dengan memasang tapis hibrida yang terdiri atas gabungan sejumlah tapis tunggal. Pada setiap tapis tunggal, nilai-nilai komponennya ditala untuk menahan orde harmonik yang dikehendaki. Dengan demikian gabungan sejumlah tapis harmonik akan menahan

sejumlah komponen harmonik dari beban tak linier agar tidak mengalir ke sistem. Pengaruh nilai dan lokasi tapis akan diteliti terkait dengan kemampuannya untuk menurunkan level distorsi harmonik. Perbaikan bentuk gelombang tegangan sistem juga akan ditunjukkan secara komparatif antara sebelum dan sesudah pemasangan tapis.

2. BEBAN TAK LINIER DAN ANALISIS HARMONIK SISTEM

Tujuan operasional sistem tenaga listrik adalah memasok kebutuhan daya konsumen dengan tegangan yang relatif konstan dan bentuk gelombang sinusoidal. Generator (mesin sinkron) pada sistem pembangkit secara umum membangkitkan daya dengan bentuk gelombang tegangan yang mendekati sinusoidal. Pada sejumlah tipe beban listrik, tegangan yang disuplai ke beban tersebut mengakibatkan arus yang mengalir pada beban juga berbentuk gelombang sinusoidal. Beban jenis ini disebut sebagai beban linier karena relasi antara tegangan dengan arus linier. Dalam sistem kelistrikan modern sejumlah jenis beban adalah tak linier. Pada beban tak linier tersebut, tegangan sinusoidal yang disuplai pada beban tersebut akan mengakibatkan arus yang mengalir tidak lagi berbentuk sinusoidal. Bentuk gelombang arus berupa gelombang sinusoidal terdistorsi. Relasi antara tegangan dan arus bersifat tak linier.

Karakteristik tak linier pada beban tersebut berimplikasi pada munculnya arus non-sinusoidal periodik yang dapat diuraikan menurut ekspansi Fourier. Arus tersebut mengalir pada sistem dan menimbulkan tegangan non-sinusoidal periodik yang juga dapat diuraikan menurut ekspansi Fourier. Komponen frekwensi tinggi pada ekspansi Fourier tersebut dinamakan harmonik. Dalam sejumlah kasus, beban tak linier yang terpasang pada sistem memberikan dampak aditif pada tegangan sistem sehingga dapat menimbulkan kenaikan nilai tegangan rms (*root mean square*) yang berpotensi membahayakan sistem. Eksistensi komponen frekwensi tinggi menimbulkan distorsi pada gelombang tegangan dan arus. Studi terhadap distorsi tegangan dan arus dilakukan dengan

menyatakan sumber harmonik kedalam deret Fourier dengan frekwensi fundamental setara pada frekwensi daya dan kemudian menggunakan analisis harmonik untuk investigasi pembangkitan dan propagasi komponen tersebut kedalam sistem.

Pada saat ini, piranti/peralatan yang dapat membangkitkan distorsi harmonik digunakan secara cukup ekstensif. Beberapa diantaranya berupa piranti elektronika daya [3] dan piranti perbaikan faktor daya [4][5]. Beberapa jenis peralatan skala domestik juga berpotensi membangkitkan arus harmonik yang meskipun nilainya kecil namun dampaknya tidak dapat diabaikan karena jumlahnya yang cukup banyak dan pemakaiannya yang tersebar.

Perhitungan harmonik merupakan faktor penting dalam perancangan dan analisis sistem. Perhitungan tersebut dimanfaatkan untuk kuantisasi distorsi pada gelombang tegangan dan arus serta untuk keperluan antisipasi resonansi harmonik yang tajam. Resonansi harmonik merupakan dampak yang paling membahayakan dari beban tak linier. Manfaat lain analisis harmonik adalah pemanfaatannya untuk mitigasi distorsi harmonik. Fenomena ini merupakan tanggapan sistem karena karakteristik inheren sistem yang menyebabkan injeksi arus harmonik menimbulkan kenaikan tegangan yang tajam dan destruktif [6].

Analisis harmonik sistem dapat dilakukan dengan menggunakan perhitungan aliran beban harmonik (*Harmonic Power Flow*). Perhitungan aliran beban pada frekwensi fundamental dapat diperluas menjadi perhitungan harmonik dengan tambahan sejumlah perhitungan iteratif dengan memandang arus injeksi harmonik sebagai sumber arus sistem [7] dan respon sistem dianalisis atas setelah impedansi sistem dimodifikasi untuk frekwensi harmonik [8]. Karakteristik arus injeksi harmonik sangat bergantung pada jenis beban tak linier dan karenanya pemodelan beban tak linier secara proporsional cukup menentukan akurasi perhitungan aliran beban harmonik.

Metode perhitungan aliran beban harmonik secara umum dibedakan menjadi 2 kelompok utama, yaitu kopel dan dekopel. Pendekatan kopel melibatkan secara simultan seluruh orde harmonik yang memberikan hasil perhitungan yang lebih akurat. Implikasi pendekatan ini

adalah beban komputasi yang berat dan ketersediaan model eksak beban tak linier yang terpasang pada sistem. Secara praktis, model yang diperlukan seringkali tidak tersedia, sehingga pendekatan ini seringkali sulit diimplementasikan pada kondisi nyata [9]. Pada sisi lain, pendekatan dekopel memandang bahwa kopling antar orde harmonik dapat dilepas dan karenanya perhitungan dapat dilakukan secara terpisah pada tiap orde. Pendekatan ini memerlukan beban komputasi yang lebih ringan dan dapat menerima model beban tak linier yang diperoleh dari pengukuran sehingga lebih dapat diimplementasikan pada sistem nyata.

Dalam makalah ini analisis aliran beban harmonik dilakukan menggunakan pendekatan dekopel (*Decoupled Harmonic Power Flow/DHPF*). Perhitungan aliran beban pada frekwensi fundamental dilakukan dengan metode Newton-Raphson. Pada frekwensi harmonik, sistem dimodelkan sebagai kombinasi elemen-elemen pasif dengan sumber arus yang diinjeksikan oleh beban tak linier [6]. Pemodelan secara umum yang disarankan untuk beban linier adalah kombinasi paralel antara resistor dan induktor yang merepresentasikan beban aktif dan reaktif pada frekwensi fundamental [10]. Beban tak linier secara umum dinyatakan sebagai sumber arus yang menginjeksikan arus harmonik kedalam sistem. Admitansi sistem dimodifikasi sesuai dengan frekwensi harmonik [11]. Efek kulit (*skin effect*) dapat diabaikan pada frekwensi tinggi. Nilai admitansi beban, kapasitansi kapasitor paralel, admitansi saluran pada orde harmonik ke- h berturut-turut dinyatakan sebagai berikut [8]:

$$y_{li}^h = \frac{P_{li}}{|V_i^1|^2} - j \frac{Q_{li}}{h|V_i^1|^2} \quad (1)$$

$$y_{ci}^h = h y_{ci}^1 \quad (2)$$

$$y_{i,j+1}^h = \frac{1}{R_{i,j+1} + jhX_{i,j+1}} \quad (3)$$

Dengan P_{li} dan Q_{li} masing-masing merupakan beban aktif dan reaktif linier pada bus i . Pada orde harmonik h , injeksi arus harmonik oleh beban tak linier dengan nilai daya aktif P_n dan daya reaktif Q_n yang terpasang pada bus i dinyatakan sebagai berikut:

$$I_i^1 = [(P_{ni} + jQ_{ni}) / V_i^1]^* \quad (4)$$

$$I_i^h = C(h)I_i^1 \quad (5)$$

Dengan I_i^1 merupakan arus fundamental dan I_i^h adalah arus harmonik pada orde harmonik h yang merupakan rasio terhadap arus fundamentalnya dengan faktor pengali $C(h)$. Nilai $C(h)$ dapat diperoleh dari analisis spektrum bentuk gelombang beban tak linier yang menunjukkan keberadaan komponen frekwensi tinggi beserta nilai dan sudut fasanya[12].

Untuk perhitungan aliran beban menggunakan pendekatan dekopel, iterasi dilakukan pada tiap orde yang diperhitungkan. Pada tiap iterasi, admitansi dimodifikasi dengan melibatkan injeksi arus harmonik dan tegangan pada tiap bus dihitung sebagai berikut:

$$Y^h V^h = I^h \quad (6)$$

Pada tiap bus i , nilai tegangan rms didefinisikan sebagai berikut:

$$|V_i| = \left(\sum_{h=1}^H |V_i^h|^2 \right)^{1/2} \quad (7)$$

Dengan H adalah maksimum orde harmonik yang dipertimbangkan. Setelah perhitungan untuk seluruh orde harmonik diselesaikan, nilai distorsi tegangan bus i (THD_{vi}) dapat diperhitungkan sebagai berikut:

$$THD_{vi} (\%) = \left[\frac{\left(\sum_{n \neq 1}^H |V_i^n|^2 \right)^{1/2}}{|V_i^1|} \right] \times 100\% \quad (8)$$

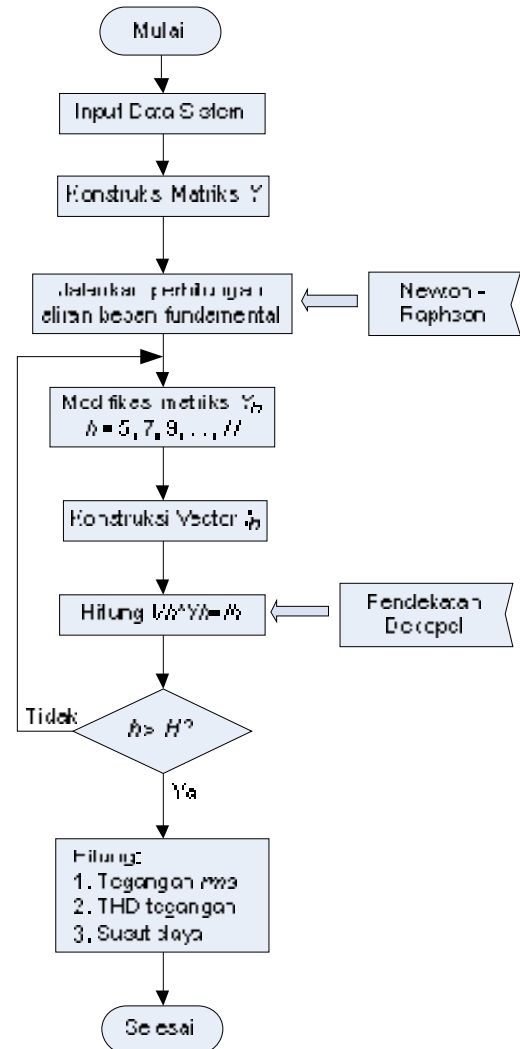
Pada orde harmonik h , susut daya nyata pada saluran antara bus i and $i+1$ dinyatakan sebagai berikut:

$$P_{loss(i,i+1)}^h = R_{i,i+1} \left(\|V_{i,i+1}^h - V_i^h\|_{y_{i,i+1}^h} \right)^2 \quad (9)$$

Susut daya total termasuk susut daya pada frekwensi fundamental dinyatakan sebagai berikut:

$$P_{loss}^h = \sum_{h=1}^H \left(\sum_{i=1}^m P_{loss(i,i+1)}^h \right) \quad (10)$$

Dengan m merupakan jumlah bus. Prosedur komputasi aliran beban harmonik menggunakan pendekatan dekopel adalah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



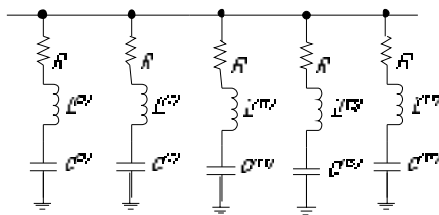
Gambar 1. Prosedur perhitungan aliran beban harmonik dekopel

3. DISAIN DAN ASESMEN TAPIS HARMONIK

Penyedia daya kelistrikan memberikan perhatian yang cukup serius tentang perkembangan yang pesat pemanfaatan piranti/peralatan yang dapat membangkitkan harmonik. Upaya yang ditempuh diantaranya berupa investigasi dampak distorsi beban tak linier terhadap kualitas daya listrik, proteksi sistem dari distorsi harmonik serta mitigasi

sistem terdistorsi. Upaya teknis untuk mitigasi distorsi harmonik adalah dengan pemasangan tapis harmonik. Jika beban tak linier menimbulkan distorsi lokal, maka tapis dapat dipasang pada lokasi yang memungkinkan injeksi harmonik ditahan sehingga tidak mengalir ke seluruh sistem. Dalam konteks ini, tapis pasif merupakan pilihan yang cukup tepat dengan pertimbangan kemudahan disain dan biaya investasi [2].

Filter harmonik pasif terdiri atas sejumlah rangkaian RLC yang terpasang paralel dengan masing-masing cabang rangkaian ditala untuk menahan (mem-block) sinyal harmonik agar tidak mengalir ke sistem. Konfigurasi tapis harmonik tergantung pada spektrum harmonik beban tak linier dan level distorsinya. Dengan demikian, jumlah cabang paralel yang diperlukan tergantung pada orde harmonik yang akan ditahan. konfigurasi tapis harmonik untuk menahan distorsi harmonik orde ke-5, 7, 11, 13 dan 17 adalah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Konfigurasi tapis harmonik pasif untuk orde ke -5, 7, 11, 13, dan 17

Dengan menggunakan perhitungan aliran beban harmonik, asesmen atas ukuran dan lokasi tapis harmonik dapat dilakukan. Dalam makalah ini tapis harmonik ditala dan ditentukan lokasinya kemudian asesmennya dilakukan menggunakan perhitungan aliran beban harmonik.

Untuk menentukan ukuran tapis harmonik, frekwensi resonansi tiap cabang paralel dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\omega_h = 2\pi hf = 1/\sqrt{L^h C^h} \quad (10)$$

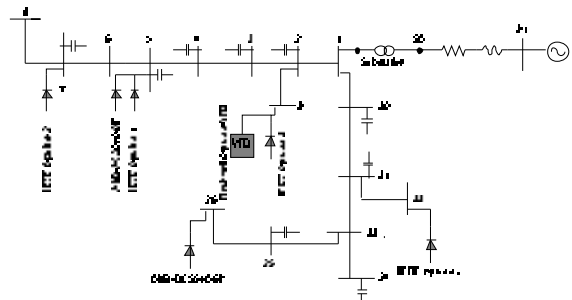
Dengan h adalah orde harmonik yang dilakukan mitigasi distorsinya, f merupakan nilai frekwensi daya (frekwensi fundamental), L^h dan

C_f^h masing-masing merupakan komponen induktor dan kapasitor tapis.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Strategi mitigasi distorsi harmonik menggunakan tapis pasif diimplementasikan pada sistem distribusi IEEE-18 bus [8], sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 3. Selain melayani beban linier, sistem tersebut juga mencakup beban tak linier dalam jumlah besar dengan jenis yang beragam. Sistem yang diperhitungkan ini merupakan sistem dengan taraf distorsi harmonik yang cukup tinggi. Hal ini dimaksudkan untuk menunjukkan kinerja tapis dalam mitigasi distorsi tegangan dan arus.

Dalam sistem juga terpasang sejumlah kapasitor untuk keperluan pengendalian daya reaktif/tegangan serta perbaikan faktor daya. Meskipun kapasitor tidak membangkitkan harmonik namun komponen tersebut dapat menguatkan distorsi.



Gambar 3: Sistem Distribusi IEEE-18 bus dengan 7 beban tak linier

Adapun jenis beban tak linier dan nilai daya yang terkait adalah sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 1. Spektrum dari beban tak linier ditunjukkan pada Tabel 2. Data sistem secara lengkap termasuk data saluran tidak ditampilkan di sini karena persoalan keterbatasan tempat.

Tabel 1: Beban tak linier sistem

Beban Tak Linier		Daya	
Bus	Nama	MW	MVAR
5	IEEE 6-pulse1	1.20	0.75
5	ABB-ACS600-6P	0.75	0.50
7	IEEE 6-pulse2	1.00	0.60
9	Rockwell 6-pulse-VFD	1.50	0.75
9	IEEE 6-pulse3	1.50	0.75

22	IEEE 6-pulse3	0.80	0.50
26	ABB-DCS500-6P	1.00	0.60

A.

Tabel 2: Spektrum beban tak linier

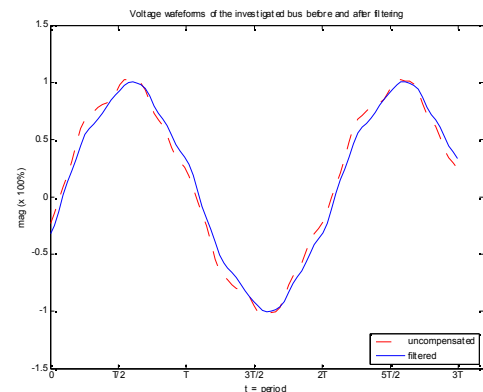
Orde	IEEE 6-Pulse 1		IEEE 6-Pulse 2		IEEE 6-Pulse 3	
	Nilai	Sudut	Nilai	Sudut	Nilai	Sudut
1	100	0	100	0	100	0
5	20	0	19.1	0	20	0
7	14.3	0	13.1	0	14.3	0
11	9.1	0	7.2	0	9.1	0
13	7.7	0	5.6	0	0	0
17	5.9	0	3.3	0	0	0
19	5.3	0	2.4	0	0	0
23	4.3	0	1.2	0	0	0
25	4	0	0.8	0	0	0
29	3.4	0	0.2	0	0	0
31	3.2	0	0.2	0	0	0
35	2.8	0	0.4	0	0	0
37	2.7	0	0.5	0	0	0
41	2.4	0	0.5	0	0	0
43	2.3	0	0.5	0	0	0
47	2.1	0	0.4	0	0	0
49	2	0	0.4	0	0	0

Orde	ABB-ACS600-6P		Rockwell 6-pulse-VFD	
	Nilai	Sudut	Nilai	Sudut
1	100	0	100	0
5	42	0	23.5	111
7	14.3	0	6.08	109
11	7.9	0	4.57	-158
13	3.2	0	4.2	-178
17	3.7	0	1.8	-94
19	2.3	0	1.37	-92
23	2.3	0	0.75	-70
25	1.4	0	0.56	-70
29	0	0	0.49	-20
31	0	0	0.54	7

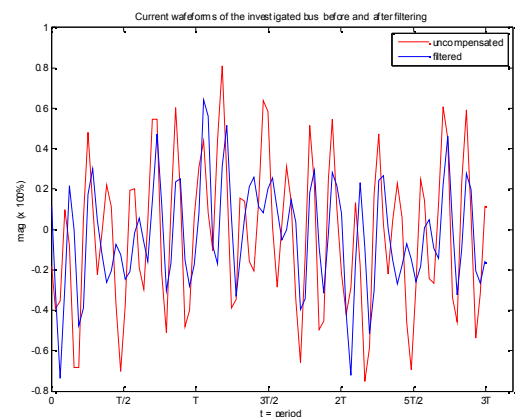
Untuk kondisi sistem tanpa tapis harmonik, sistem memiliki taraf distorsi yang sangat tinggi, dengan THDv tertinggi sebesar 7.2152 % pada bus 24. THDv rata-rata adalah sebesar 4.617 %. Nilai Tegangan rms pada sistem tertinggi adalah 105% (bus 26) dan terendah adalah 98% (bus 51) dengan nilai rata-rata 100,85%. Nilai tegangan sistem masih memenuhi syarat deviasi 5%.

Taraf distorsi untuk sistem tanpa tapis cukup tinggi, melebihi batas maksimal 5%. Untuk keperluan mitigasi distorsi, dipasang 2 buah tapis identik dengan masing-masing 5 cabang paralel untuk menahan injeksi arus harmonik orde ke 5, 7, 11, dan 13. Tapis dipasang pada bus 5 dan 9. Nilai tapis ditentukan $R = 100 \Omega$ dan $L = 100 \text{ mH}$ untuk semua komponen percabangan paralel. Nilai kapasitor untuk tiap orde harmonik dihitung menggunakan pers.

(10) dan diperoleh nilai-nilai: $C^5 = 4,05 \mu\text{F}$, $C^7 = 2,07 \mu\text{F}$, $C^{11} = 0,84 \mu\text{F}$, dan $C^{13} = 0,35 \mu\text{F}$. Terdapat perbaikan sistem dengan THDv tertinggi menjadi sebesar 5,0618 % pada bus 24 dengan rata-rata THDv 2,9398%. Nilai tegangan rms tertinggi 105% (bus 51) dan terendah 95,72 % (bus 26) dengan nilai rata-rata 98,71 %.



(a)



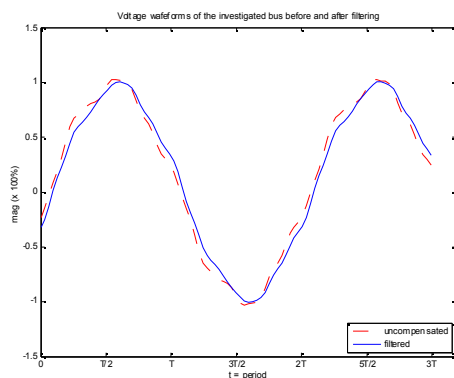
(b)

Gambar 4. Perbaikan bentuk gelombang (a) tegangan dan (b) arus pada bus 24

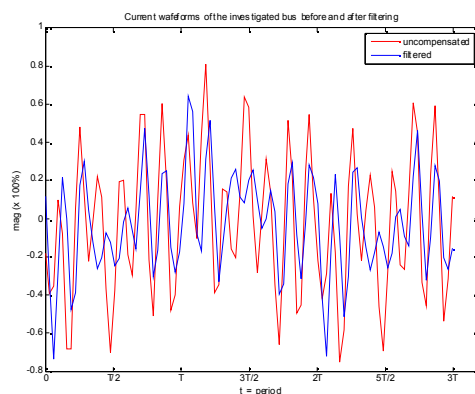
Adapun perbaikan bentuk gelombang tegangan dan arus pada bus dengan tingkat distorsi tertinggi (bus 24) sebelum dan sesudah pemasangan tapis harmonik adalah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. Untuk sistem dengan 2 tapis harmonik, masih teridentifikasi distorsi harmonik tertinggi yang masih berada sedikit di atas nilai maksimum yang diijinkan, sebesar 5%. Dengan demikian perlu dilakukan mitigasi lebih lanjut dengan pemasangan tapis tambahan.

Untuk lebih lanjut menekan taraf distorsi sistem, dilakukan penambahan tapis harmonik. Untuk keperluan tersebut sebuah tapis dengan

ukuran yang sama dipasang pada bus 23. Dengan tapis tambahan tersebut, terdapat perbaikan lebih lanjut atas kondisi sistem yang dapat diidentifikasi. THDv tertinggi sebesar 3,8711 % pada bus 24 dengan rata-rata THDv 2.7922%. Nilai tegangan rms tertinggi 105% (bus 51) dan terendah 86,59 % (bus 26) dengan nilai rata-rata 94,5 %.Dapat diamati bahwa meskipun nilai distorsi dapat diturunkan, nilai tegangan sistem juga mengalami penurunan di bawah nilai tegangan minimal yang diijinkan.Hal ini memberikan indikasi bahwa ukuran tapis maupun lokasinya perlu ditentukan secara hati-hati untuk memperoleh mitigasi distorsi terbaik dengan tanpa menimbulkan dampak ikutan pada sistem. Perbaikan bentuk tegangan dan arus pada bus dengan level distorsi tertinggi (bus 24) sebelum dan sesudah pemasangan 3 tapis harmonik pada bus 5, 9, dan 23 adalah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.



(a)



(b)

Gambar 5. Perbaikan bentuk gelombang (a) tegangan dan (b) arus pada bus 24

Dalam makalah ini ukuran dan lokasi tapis ditentukan secara tentatif. Lokasi tapis dipilih pada bus yang berdekatan dengan beban tak linier dengan jumlah banyak. Hal ini dimaksudkan untuk menahan distorsi harmonik agak tidak mengalir secara luas ke dalam sistem. Pemanfaatan analisis aliran beban harmonik memungkinkan asesmen lokasi dan ukuran tapis harmonik untuk memprediksikan taraf distorsi harmonik dan mitigasinya.

Untuk keperluan komparasi mitigasi distorsi harmonik, Tabel 3 menunjukkan nilai harmonik maksimal dan rata-rata untuk berbagai kondisi yang dianalisis. Nilai tegangan maksimal dan rata-rata pada sistem juga ditunjukkan. Pemasangan tapis dalam jumlah ukuran yang berlebihan dapat menurunkan nilai tegangan sistem. Pemanfaatan algoritma optimisasi dapat memberikan nilai optimal tapis dan lokasi terbaiknya. Perhitungan aliran beban harmonik dapat dimanfaatkan sebagai sub-rutin dalam optimisasi tersebut.

Tabel 3: Komparasi mitigasi distorsi

Nilai (%)	Maksimal	Rata-rata
Tanpa Tapis		
THDv	7.2152	4.617
Tegangan	105	98
2 Tapis (bus 5 dan 9)		
THDv	5,0618	2,9398
Tegangan	105	98,71
3 Tapis (bus 5, 9 dan 23)		
THDv	3,8711	2.7922
Tegangan	105	94,5

1. SIMPULAN

Perhitungan aliran beban harmonik telah dikembangkan dalam makalah ini dengan melibatkan metode Newton-Raphson untuk perhitungan aliran beban fundamentalnya. Perhitungan aliran beban harmonik dapat dimanfaatkan untuk asesmen ukuran dan lokasi pemasangan tapis harmonik. Lokasi dan ukuran tapis ditentukan secara tentatif dan pengaruhnya terhadap kondisi sistem diinvestigasi. Pada sistem tanpa tapis harmonik, sistem mengalami taraf distorsi yang cukup serius. Dengan pemasangan tapis harmonik, level distorsi dapat ditekan. Meskipun demikian pemasangan tapis dalam jumlah yang berlebihan dapat menyebabkan penurunan tegangan. Studi ini

dapat diteruskan dengan pemanfaatan algoritma optimisasi untuk mendapatkan ukuran yang paling tepat dengan lokasi tapis terbaik.

5. REFERENSI

- [S.-W. Kang and K.-H. Kim, "Sliding mode harmonic compensation strategy for power quality improvement of a grid-connected inverter under distorted grid condition," *IET Power Electron.*, vol. 8, no. 8, pp. 1461–1472, Aug. 2015.
- [M. A. S. Masoum, A. Ulinuha, S. Islam, and K. Tan, "Hybrid passive filter design for distribution systems with adjustable speed drives," in *Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, 2007, pp. 1707–1712.
- [W. Xu, Z. Huang, Y. Cui, and H. Wang, "Harmonic Resonance Mode Analysis," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 2, pp. 1182–1190, 2005.
- [M. A. S. Masoum, M. Ladjevardi, A. Jafarian, and E. F. Fuchs, "Optimal Placement, Replacement and Sizing of Capacitor Banks in Distorted Distribution Networks by Genetic Algorithms," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 4, pp. 1794–1801, 2004.
- [M. A. S. Masoum, A. Jafarian, M. Ladjevardi, E. F. Fuchs, and W. M. Grady, "Fuzzy approach for optimal placement and sizing of capacitor banks in the presence of harmonics," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 19, no. 2, pp. 822–829, 2004.
- [H.-C. Chin, "Optimal shunt capacitor allocation by fuzzy dynamic programming," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 35, no. 2, pp. 133–139, 1995.
- [A. Semlyen and M. Shlash, "Principles of modular harmonic power flow methodology," *IEEE Proceedings-Generation, Transm. Distrib.*, vol. 147, no. 1, pp. 1–6, 2000.
- [A. Ulinuha, M. A. S. Masoum, and S. M. Islam, "Harmonic power flow calculations for a large power system with multiple nonlinear loads using decoupled approach," in *2007 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC*, 2007.
- [S. M. Williams, G. T. Brownfield, and J. W. Duffus, "Harmonic propagation on an electric distribution system: field measurements compared with computer simulation," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 8, no. 2, pp. 547–552, 1993.
- [A. Ulinuha and M. A. S. Masoum, "The Accuracy and Efficiency Issues of Decouple Approach for Harmonic Power Flow Calculation," in *Regional Postgraduate Conference on Engineering and Science (RPCES)*, 2006, vol. 1, pp. 213–218.
- [J.-H. Teng and C.-Y. Chang, "Fast harmonic analysis method for unbalanced distribution systems," in *Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE*, 2003, vol. 2, p. 1249 Vol. 2.
- [T. S. Chung and H. C. Leung, "A genetic algorithm approach in optimal capacitor selection with harmonic distortion considerations," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 21, no. 8, pp. 561–569, 1999.