

ANALISIS PENERAPAN *DUAL CONVERTER* SEBAGAI PENGATUR TEGANGAN *OUTPUT* GENERATOR TURBIN ANGIN

(Analysis of Dual Converter Application as Output Voltage Regulator for Wind Turbin Generator)

Ario Sutanto, P. Tahir Ursam, Harlianto Tanudjaja*

Power Electronic Research Group
Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya
Jl. Jendral Sudirman 51, Jakarta Selatan 12930
*hl_ft@yahoo.com

Abstract

Perangkat beban non-linier dapat mempengaruhi masalah harmonik yang dapat menyebabkan arus sumber fundamental tidak murni sinusoidal. Terdapat banyak metode yang digunakan untuk menghilangkan masalah harmonik, salah satunya menggunakan *filter hybrid* aktif. Metode ini menggabungkan *filter* pasif dan *filter* aktif *shunt*. Prinsip kerja sistem dengan *filter* aktif *shunt* menghasilkan arus harmonisa terkompensasi yang berbeda fasa 180 ° dari gelombang arus harmonik yang dihasilkan oleh penyearah, untuk dimasukkan ke terminal *input* penyearah. Tujuannya adalah untuk membuat gelombang arus harmonik yang dihasilkan oleh penyearah dapat dilawan dengan kompensasi gelombang arus yang dihasilkan oleh *filter* aktif *shunt*. Gelombang arus fundamental saat ini, yang akan terdistorsi oleh gelombang arus harmonik dari penyearah dapat dibatalkan, sehingga arus yang mengalir ke sumber tetap berbentuk sinusoidal murni.

Kata Kunci: *filter* pasif, *filter* aktif *shunt*, penyearah, arus harmonik

Abstract

Non-linear load device can affect harmonic problem that can cause fundamental current flow not purely sinusoidal. There are many methods used to eliminate harmonic problems, one of which is by using active filter hybrid. This method combines shunt passive and active filters. Applying the principle of shunt active filters working system results in compensated harmonic current with the different phase of 180° from the harmonic current produced by the rectifier to be injected to the rectifier input terminal. The purpose is to make the harmonic current wave produced by the rectifier to be overcome by compensated current wave as a result of shunt active filter. The current fundamental wave that will further be distorted by the harmonic current wave from the rectifier can be cancelled in order for the current flowing to the source remain purely sinusoidal.

Keywords: *passive filter, active shunt filter, rectifier, harmonic current*

Tanggal Terima Naskah : 23 September 2013
Tanggal Persetujuan Naskah : 14 Oktober 2013

1. PENDAHULUAN

Salah satu kendala dalam peralatan mesin-mesin listrik yang digunakan pada industri adalah masalah harmonisa. Hal ini dikarenakan beban yang digunakan merupakan beban yang non linear. Peralatan elektronika daya yang digunakan pada industri, seperti *rectifier*, *inverter*, dan *chopper*, umumnya terhubung dengan beban yang bersifat resistif atau konduktif, dimana beban ini bersifat non linear. Beban yang bersifat non linear dapat menimbulkan masalah harmonisa. Harmonisa akan menimbulkan panas dan ketidakstabilan dari sistem, sehingga harus diusahakan dibuang melalui suatu sistem *filter*.

Harmonisa adalah gelombang yang besarnya di atas frekuensi dasar 50 Hz, Frekuensi di atas 50 Hz ini menimbulkan distorsi, baik pada sinyal/gelombang arus atau gelombang tegangan *fundamental*, sehingga bentuk gelombang *fundamental* menjadi cacat atau tidak berbentuk *sinusoidal* murni. Gelombang harmonisa ditimbulkan oleh peralatan beban *non*-linier R dan L. Gelombang harmonisa dapat mengganggu jaringan kelistrikan ke arah sumber [1]. Untuk menghilangkannya dapat digunakan *filter*. Dalam hal ini, umumnya digunakan *filter* pasif resonansi LC untuk mengatasi masalah gelombang harmonisa. Penggunaan *filter* ini dikarenakan mudah dan murah dalam operasionalnya, namun *filter* ini masih memiliki banyak kekurangan. *Filter* aktif *shunt* memiliki beberapa keuntungan yang dapat menutupi kelemahan dari *filter* pasif LC resonansi untuk mengatasi masalah harmonisa tersebut. *Fliter* aktif *hybrid* dengan kombinasi *filter* pasif LC resonansi dan *filter* aktif *shunt*, merupakan salah satu solusi yang dapat digunakan untuk mengurangi distorsi gelombang harmonisa. Pada *paper* ini akan dibahas perancangan *filter hybrid* yang akan digunakan sebagai *filter* frekuensi harmonis pada *rectifier* tiga fasa berbeban motor arus searah (DC) eksitasi bebas [2].

2. KONSEP DASAR

Konsep dasar merupakan teori-teori pendukung yang diperlukan untuk analisis matematis dan rangkaian listrik dari sistem keseluruhan.

2.1 Rectifier Tiga Fasa

Rectifier yang digunakan adalah *rectifier* tiga fasa enam pulsa yang terdiri atas enam buah dioda yang akan konduksi jika tegangan anoda mempunyai potensial yang lebih positif daripada tegangan katoda dan tidak konduksi bila anoda mempunyai potensial yang lebih negatif daripada tegangan katoda [3]. Tegangan keluaran dari *rectifier* DC murni, dapat dihitung sebagai berikut:

$$V_{dc1} = \frac{p\sqrt{3}}{\pi} V_m \sin\left(\frac{\pi}{p}\right) \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan:

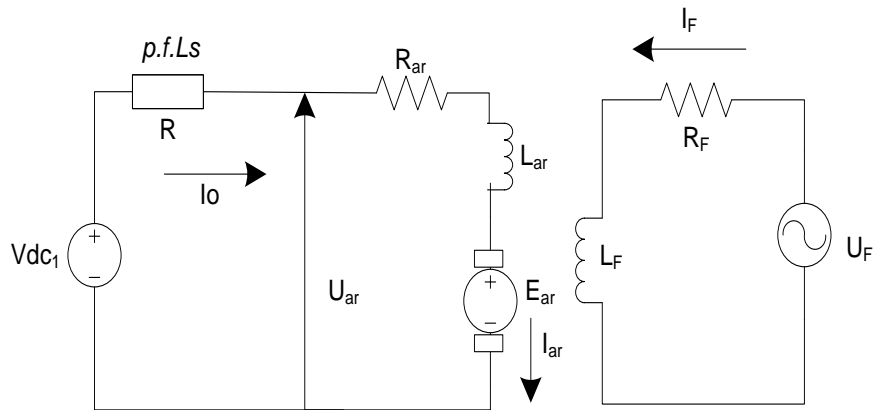
V_{dc1} = Tegangan keluaran *rectifier* (Volt)

V_m = Tegangan maksimum per fasa (Volt)

P = Jumlah pulsa

2.2 Motor Arus Searah Eksitasi Bebas

Tegangan keluaran *rectifier* (V_{dc1}) menjadi sumber tegangan untuk tegangan masukan motor (U_{ar}). Tegangan masukan (U_{ar}) dan tegangan eksitasi (U_F) yang diberikan untuk motor arus searah eksitasi bebas ini bernilai konstan, sehingga motor akan berputar konstan pada satu *level* kecepatan tertentu [4].



Gambar 1. Rangkaian ekivalen motor DC

Gambar 1 memperlihatkan rangkaian ekivalen motor arus searah eksitasi bebas, didapat persamaan berikut:

$$E_{ar} = V_{dc1} - I_{ar}(p.f.Ls + R_{ar}) \dots\dots\dots (2)$$

$$E_{ar} = C.n_1.\phi \dots\dots\dots (3)$$

$$\phi = k_f . I_F \dots\dots\dots (4)$$

$$K = C . k_f \dots\dots\dots (5)$$

$$C.\phi = K.I_F = \frac{P_{out}}{I_{ar}.n_1} \dots\dots\dots (6)$$

$$I_F = \frac{P_F}{U_F} \dots\dots\dots (7)$$

Jika persamaan (2) sampai persamaan (7) disubstitusi ke persamaan (1) maka dapat dihitung kecepatan putaran motor DC, sebagai berikut:

$$n_2 = \frac{V_{dc1} - I_{ar}(p.f.Ls + R_{ar})}{C.\phi} = \frac{V_{dc1} - I_{ar}(p.f.Ls + R_{ar})}{\underbrace{C.k_f.I_f}_K} \dots\dots\dots (8)$$

Berikut adalah spesifikasi data motor dc eksitasi bebas yang digunakan dalam analisis:

- Buatan : ABB
- Tipe : FR157201FC
- Kecepatan Maksimal (nmax): 3500 rpm
- Kecepatan Minimal (nmin): 40 rpm
- Momen Inersia : 0,25 kgm²
- Konstanta motor (K): 0,065
- Daya eksitasi (PF) : 1250 W
- Tegangan *armature* maks (Uar_{max}):550 V
- Tegangan Eksitasi (UF): 110 – 440 V
- Resistansi Armatur (Rar): 0,25 Ω
- Induktasi Armatur (Lar): 4,50 mH (0Hz)

Tabel 1. *Data sheet* motor DC

Uar (V)	Rar (Ω)	Iar (A)	n ₁ (rpm)	Pout (KW)	Eff (%)
400	0,25	127	1800	45,2	86,9
420	0,25	127	1895	47,7	87,4
440	0,25	127	1995	50,2	87,9
470	0,25	127	2145	53,9	88,5
520	0,25	125	2390	59,2	89,4
550	0,25	124	2540	62,4	89,8

2.3 Filter Aktif Hybrid

Filter aktif *hybrid* merupakan kombinasi dari *filter* pasif LC resonansi yang dirangkai seri dengan *filter* aktif *shunt*. *Filter* aktif *hybrid* ini dipasang secara paralel pada terminal masukan *rectifier* [5].

2.3.1 Filter Pasif LC Resonansi

Filter pasif LC terdiri dari komponen L_f (induktor) dan komponen C_f (kapasitor), yang dirangkai secara paralel, yang akan diresonansikan kemudian dirangkai seri dengan Induktor (L_{fs}). Kinerja *filter* pasif LC resonansi ini akan beresonansi pada frekuensi *fundamental* atau berimpedansi tak hingga (hubung terbuka) jika dilewati arus yang berfrekuensi *fundamental* (50Hz).

Filter pasif LC yang terdiri dari komponen L_f (induktor) dan komponen C_f (kapasitor), yang dirangkai secara paralel dapat diatur nilai komponennya untuk diresonansikan pada satu frekuensi tertentu menggunakan persamaan frekuensi resonansi, seperti pada persamaan (9).

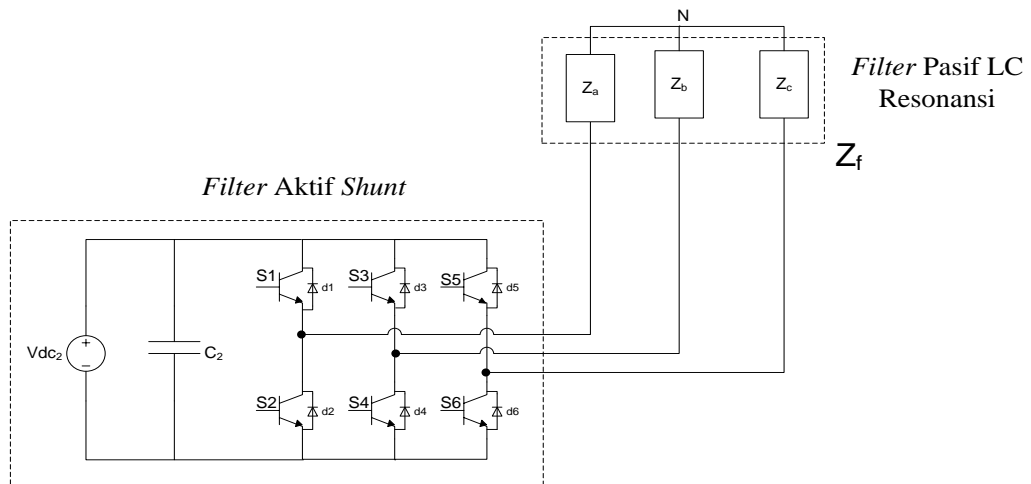
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan:

- f_r = Frekuensi resonansi (50Hz)
- L_f = Induktor *filter* pasif (mH)
- C_f = Kapasitor *filter* pasif (mF)

2.3.1 Filter Aktif Shunt

Filter aktif *shunt* terdiri dari enam buah transistor (*IGBT*) yang berfungsi sebagai *switching* dan enam buah dioda yang dipasang secara anti paralel yang berfungsi sebagai pengalir arus sisa dan proteksi transistor [6]. Kinerja *filter* aktif *shunt* ini sama seperti prinsip kerja *inverter* tiga fasa [1]. Melalui pengaturan *controller* picuan yang tepat, *filter* aktif *shunt* akan dipicu untuk menghasilkan arus kompensasi harmonisa dengan beda fasa 180° dari arus harmonisa yang ditimbulkan oleh *rectifier*. Arus hasil kompensasi harmonisa tersebut kemudian diinjeksikan kembali ke terminal masukan *rectifier*, sehingga arus *fundamental* yang akan didistorsi oleh gelombang harmonisa dapat dibatalkan oleh arus kompensasi yang dihasilkan oleh *filter* aktif *shunt* [7]. Bentuk gelombang arus yang kembali ke sumber dan yang mensuplai *rectifier* menjadi tetap sinusoidal murni (50 Hz).



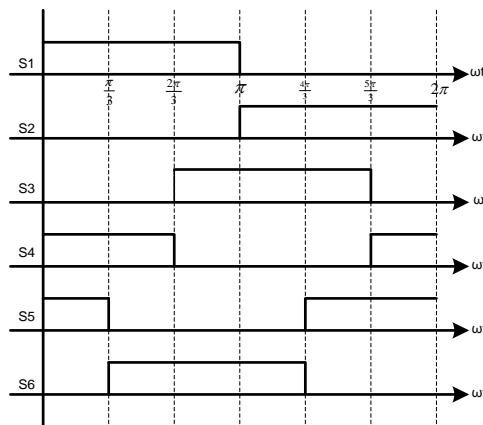
Gambar 2. Filter aktif shunt

Urutan picu transistor:

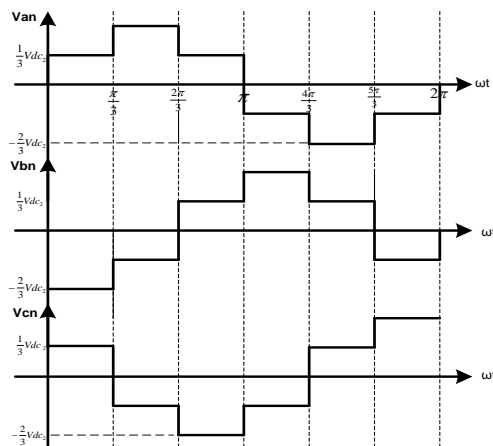
S1 – S6 – S3 – S2 – S5 – S4

Urutan konduksi transistor:

(S1,S4,S5) – (S1,S4,S6) – (S1,S3,S6) – (S2,S3,S6) – (S2,S3,S5) – (S2,S4,S5)



Gambar 3. Urutan konduksi transistor



Gambar 4. Tegangan keluaran FAS

Dalam menganalisis harmonisa sebagai *tool* digunakan deret *fourier*:

$$f(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(\omega_0 n \omega t) + b_n \sin(\omega_0 n \omega t)) \dots\dots\dots(10)$$

$$C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \dots\dots\dots(11)$$

$$f(\omega t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (c_n \sin(\omega_0 n \omega t + \varphi_n)) \dots\dots\dots(12)$$

dengan:

$$a_0 = \frac{2}{\omega T} \int_0^{\omega T} f(\omega t) d(\omega t) \dots\dots\dots(13)$$

$$a_n = \frac{2}{\omega T} \int_0^{\omega T} f(\omega t) \cos(\omega_0 n \omega t) d(\omega t) \dots\dots\dots(14)$$

$$b_n = \frac{2}{\omega T} \int_0^{\omega T} f(\omega t) \sin(\omega_0 n \omega t) d(\omega t) \dots\dots\dots(15)$$

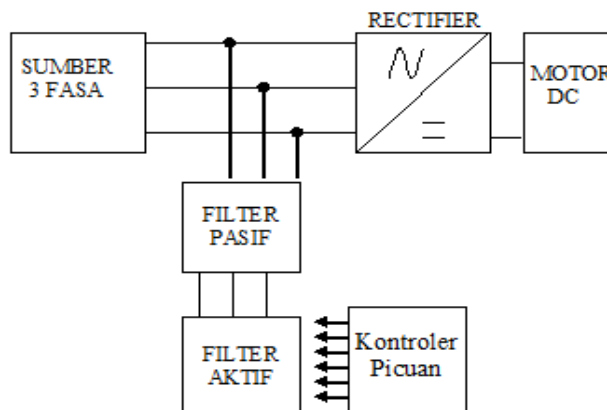
$$\varphi_n = \arctan\left(\frac{a_n}{b_n}\right) \dots\dots\dots(16)$$

n = index harmonik 1,2,3,...40

3. ANALISIS DAN PERHITUNGAN

3.1 Blok Diagram Sistem

Diagram blok dari sistem yang dianalisis dapat dilihat pada Gambar 5. Sistem terdiri dari sumber tiga fasa, *rectifier* motor DC, dan rangkaian *filter* aktif serta pasif. Gambar 6 memperlihatkan rangkaian sistem keseluruhan.

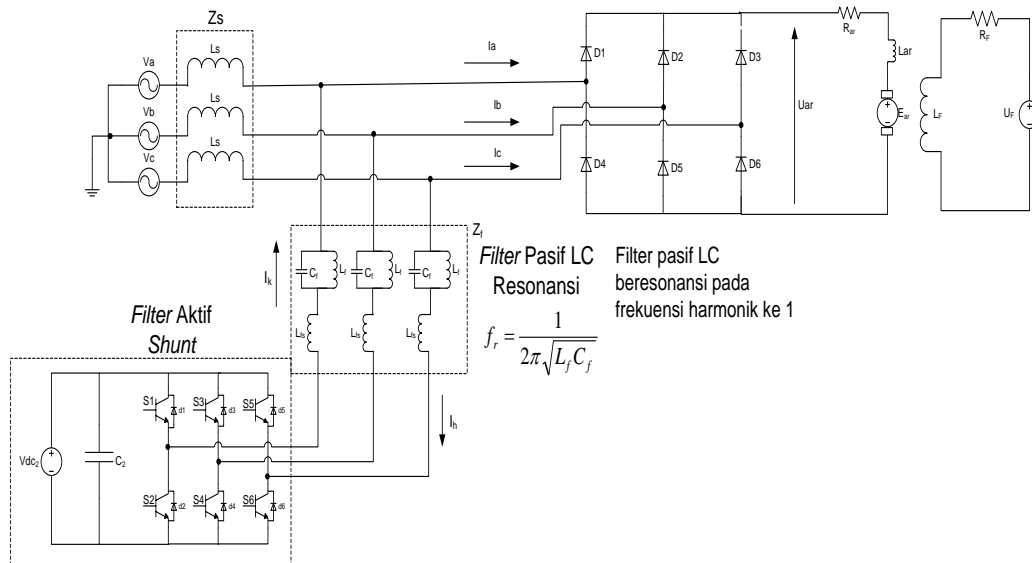


Gambar 5. Diagram blok sistem

Uraian kerja sistem berdasarkan Gambar 6 berikut ini adalah arus harmonik pertama yang berfrekuensi *fundamental* (50Hz) langsung mengalir dari sumber menuju ke *rectifier*, dan kemudian kembali ke sumber tanpa melewati *filter* aktif *hybrid*. Hal ini disebabkan karena *filter* pasif LC resonansi bersifat *open circuit* untuk arus sumber berfrekuensi *fundamental* (50Hz), kemudian pada keluaran *rectifier* dihasilkan tegangan dan arus searah sebagai *supply armature* motor arus searah eksitasi bebas.

Untuk arus harmonisa yang berfrekuensi (>50Hz) dari sumber dan dari *rectifier* akan cenderung mengalir ke *filter* aktif *hybrid*, karena impedansi sumber (Z_s) lebih besar

nilainya dari pada besarnya impedansi *filter* pasif (Z_f). Setelah arus harmonisa melewati *filter* pasif LC resonansi, dan setelah dianalisis, bentuk gelombang arus harmonisa yang terjadi, maka *filter* aktif *shunt* akan dipicu untuk menghasilkan arus kompensasi harmonisa dengan beda fasa 180° dari arus harmonisa yang ditimbulkan oleh *rectifier*. Arus kompensasi harmonisa yang dihasilkan oleh *filter* aktif *shunt* kemudian diinjeksikan kembali ke terminal masukan *rectifier* sehingga arus *fundamental* yang akan didistorsi oleh gelombang harmonisa dapat dibatalkan oleh arus kompensasi harmonisa yang dihasilkan oleh *filter* aktif *shunt*, sehingga bentuk gelombang arus yang kembali ke sumber dan yang mensuplai ke *rectifier* menjadi tetap sinusoidal murni (50 Hz).



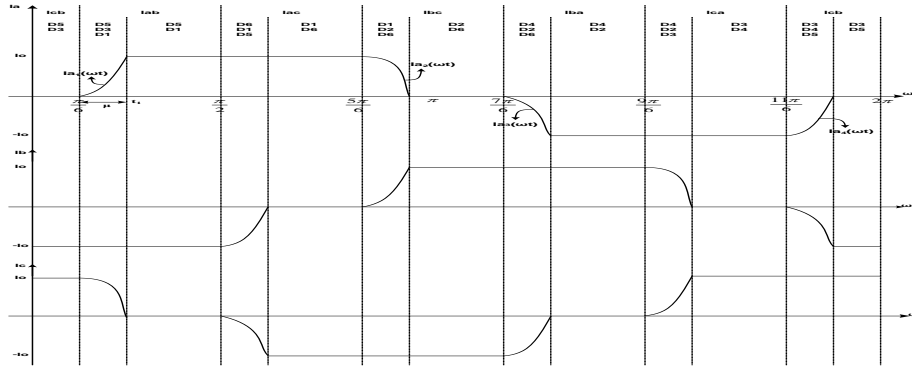
Gambar 6. Rangkaian keseluruhan

3.2 Analisis Arus Masukan *Rectifier*

Pada gelombang arus masukan *rectifier*, terjadi sudut tunda berhenti konduksi/sudut komutasi (μ)/sudut *overlap* /daerah peralihan dioda, seperti diperlihatkan pada Gambar 7, dimana tiga dioda aktif bersama-sama. Sudut komutasi ini akibat dari pengaruh induktansi sumber (L_s). Komutasi adalah perpindahan arus dari satu dioda ke dioda lainnya atau perioda dimana dua/tiga dioda konduksi bersama-sama pada daerah peralihan, akibat dari komutasi induktansi sumber akan menimbulkan reaktansi komutasi yang akan mengurangi tegangan keluaran rata-rata *rectifier*, sehingga daya *output rectifier* ke beban (motor arus searah) menjadi berkurang.

Untuk menganalisis besarnya daerah peralihan atau sudut komutasi (μ) pada Gambar 4, maka diambil contoh daerah komutasi $\frac{\pi}{6} < \omega t < t_1$, terjadi tiga dioda (D3,D5,D1) aktif bersamaan, perpindahan dioda dari D3 menjadi D1, dari tegangan V_c ke V_a , dan dari arus $I_a(t)$ yang awalnya sebesar 0 menjadi sebesar I_o . berikut adalah rumus untuk menghitung besarnya sudut komutasi (μ):

$$\mu = \cos^{-1} \left(1 - \frac{2L_s \omega I_o}{V_m \sqrt{3}} \right) \dots\dots\dots (17)$$



Gambar 7. Arus masukan *rectifier*

Untuk mempermudah dalam menghitung dan menganalisis besarnya gelombang arus harmonisa masukan *rectifier*, maka hanya satu fasa saja yang dihitung, yaitu pada fasa A, dari Gambar 7, dengan menggunakan persamaan (10) sampai (16). Besarnya arus harmonisa masukan *rectifier* sampai harmonik ke-40, dapat dihitung, seperti pada Tabel 2.

Besarnya sudut komutasi (μ) dapat dihitung. Berdasarkan Persamaan (17), maka besarnya sudut komutasi (μ) dapat sebesar: $\mu = 56,316^\circ$ atau $\mu = 0,983$ rad .

Tabel 2. Perhitungan arus harmonis masukan *rectifier*

Harmonik	φ_{theff}	$ I_{heff} $	Harmonik	φ_{theff}	$ I_{heff} $
1	323,019	96,353	21	40,833	0
2	101,310	0	22	180	0
3	200,854	0	23	230,744	0,362
4	206,565	0	24	152,799	0
5	344,480	9,546	25	122,875	0,304
6	34,509	0	26	262,837	0
7	238,747	3,487	27	347,010	0
8	357,274	0	28	181,358	0
9	48,531	0	29	73,234	0,223
10	136,219	0	30	297,414	0
11	186,360	1,712	31	324,256	0,199
12	343,132	0	32	44,519	0
13	80,171	1,081	33	117,158	0
14	126,244	0	34	92,359	0
15	291,825	0	35	275,877	0,151
16	198,513	0	36	161,737	0
17	28,447	0,682	37	165,719	0,140
18	224,138	0	38	5,286	0
19	281,530	0,520	39	165,588	0
20	153,083	0	40	264,640	0

Dengan tambahan data lain sebagai berikut:

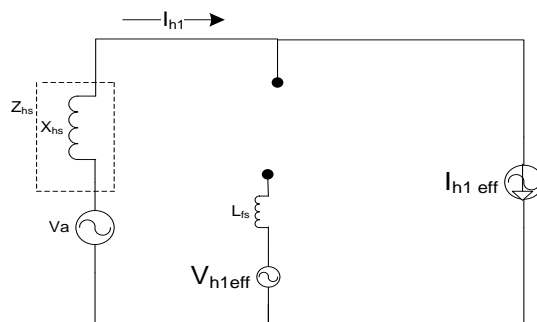
- V_m = Tegangan fasa netral maksimum ($220\sqrt{2}$ V)
- V_{dc2} = Tegangan searah *filter* aktif *shunt* (630 V)
- C_1 = Kapasitor DC *filter* aktif *shunt* (3 mF)
- L_s = Induktansi sumber (3 mH)
- C_f = Kapasitor *filter* pasif (0.1 mF)
- L_{fs} = Induktor *filter* aktif *shunt* (3,2 mH)
- L_f = Induktor *filter* pasif (102 mH).

3.3 Analisis Menggunakan *Filter Aktif Hybrid*

Untuk mempermudah dalam menganalisis sistem maka dibuat analisis rangkaian satu fasa, seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Arus harmonisa dari *rectifier* dapat dipandang sebagai sumber arus harmonisa efektif (I_{heff}). Berdasarkan prinsip kerja, analisis matematis, dan analisis rangkaian Gambar 9, *filter* aktif *hybrid* dapat dipandang sebagai sumber tegangan harmonisa efektif (V_{hfeff}).

Arus dari sumber berfrekuensi *fundamental* (50 Hz) langsung mengalir ke *rectifier* dan kembali ke sumber, tanpa melewati *filter* aktif *hybrid* karena *filter* pasif LC beresonansi (*open circuit*) untuk harmonik ke-1 yang berfrekuensi 50 Hz, seperti ditunjukkan Gambar 8.

Untuk mempermudah dalam menganalisis arus harmonisa (I_{heff}) dari *rectifier*, maka digunakan metode superposisi yang pertama, yaitu dengan mematikan satu sumber dan menghidupkan sumber yang lain. Pada kasus ini sumber yang dihidupkan adalah sumber arus harmonik pertama dari *rectifier* (I_{h1eff}), dan sumber tegangan harmonisa pertama *filter* aktif *hybrid* (V_{h1eff}), namun karena *filter* pasif LC beresonansi (*open circuit*) untuk frekuensi harmonik ke-1 (50 Hz), maka arus harmonik pertama (I_{h1eff}) dari *rectifier* langsung mengalir ke sumber (V_a), sedangkan sumber yang dimatikan adalah sumber arus harmonik ke-2, ke-3, ke-4, dst. (I_{h2eff} , I_{h3eff} , I_{h4eff} , dst) dari *rectifier*, dan sumber tegangan harmonisa ke-2, ke-3, ke-4, dst. (V_{h2eff} , V_{h3eff} , V_{h4eff} , dst) dari *filter* aktif *hybrid*.



Gambar 8. Rangkaian superposisi pertama I_{h1}

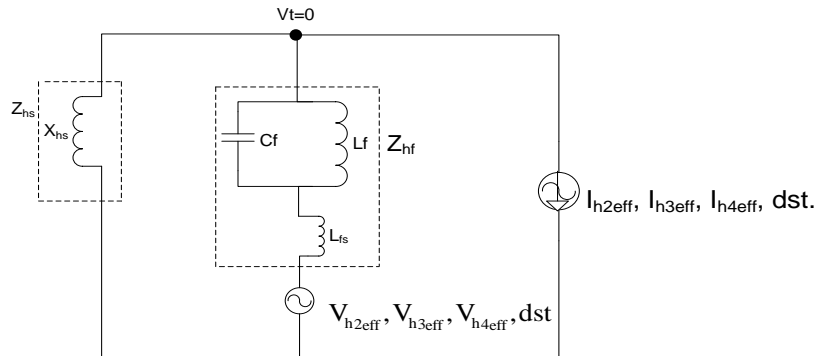
Analisis terhadap arus harmonisa dari *rectifier*, yang berfrekuensi $> 50\text{Hz}$ (I_{h2eff} , I_{h3eff} , I_{h4eff} , dan seterusnya), lebih cenderung mengalir melewati *filter* aktif *hybrid*, hal ini dikarenakan:

- 1) *Filter* pasif tidak diresonansikan untuk ferkuensi harmonisa $> 50\text{Hz}$
- 2) Tegangan di terminal masukan *rectifier* dibuat mendekati nol ($V_t \approx 0$)
- 3) Impedansi sumber lebih besar dari impedansi *filter* pasif ($Z_s > Z_f$).

Untuk arus harmonisa dari *rectifier*, yang berfrekuensi $> 50\text{Hz}$ (I_{h2eff} , I_{h3eff} , I_{h4eff} , dan seterusnya), tidak ada arus yang mengalir ke sumber, sehingga tegangan sumber

dapat dianggap mati karena arus harmonisa (I_{h2eff} , I_{h3eff} , I_{h4eff} , dan seterusnya) yang berfrekuensi $>50\text{Hz}$ tidak mengalir ke sumber.

Untuk mempermudah dalam menganalisis arus harmonisa ke-2, ke-3, ke-4, dan seterusnya (I_{h2eff} , I_{h3eff} , I_{h4eff} , dan seterusnya) dari *rectifier*, maka digunakan metode superposisi yang kedua, yaitu dengan mematikan satu sumber dan menghidupkan sumber yang lain. Pada kasus ini sumber yang dimatikan adalah sumber arus harmonik pertama dari *rectifier* (I_{h1eff}) dan sumber tegangan harmonisa pertama *filter* aktif *hybrid* (V_{h1eff}), sedangkan sumber yang dihidupkan adalah sumber arus harmonik ke-2, ke-3, ke-4, dan seterusnya. (I_{h2eff} , I_{h3eff} , I_{h4eff} , dan seterusnya) dari *rectifier* dan sumber tegangan harmonisa ke-2, ke-3, ke-4, dan seterusnya. (V_{h2eff} , V_{h3eff} , V_{h4eff} , dan seterusnya) dari *filter* aktif *hybrid*. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 9.



Gambar 9. Superposisi kedua

Sumber tegangan harmonik ke-2, ke-3, ke-4, dan seterusnya. (V_{h2eff} , V_{h3eff} , V_{h4eff} , dan seterusnya) yang dihasilkan oleh *filter* aktif *hybrid* berdasarkan hukum thevenin-norton, dapat ditransformasi/diubah menjadi sumber arus kompensasi harmonik ke-2, ke-3, ke-4, dan seterusnya. (I_{k2eff} , I_{k3eff} , I_{k4eff} , dan seterusnya), caranya yaitu dengan membagi sumber tegangan harmonik ke-2, ke-3, ke-4, dan seterusnya. (V_{h2eff} , V_{h3eff} , V_{h4eff} , dan seterusnya) yang ditimbulkan oleh *filter* aktif *hybrid*, dengan impedansi harmonik ke-2, ke-3, ke-4, dan seterusnya. (Z_{h2f} , Z_{h3f} , Z_{h4f} , dan seterusnya) dari *filter* pasif, seperti ditunjukkan Persamaan (18).

$$I_{k\text{ eff}} = \left| \frac{V_{h\text{ eff}}}{Z_{h\text{ f}}} \right| \dots\dots\dots (18)$$

Keterangan:

$I_{k\text{ eff}}$ = Arus kompensasi harmonisa dari *filter* aktif *hybrid*

$V_{h\text{ f eff}}$ = Tegangan harmonisa dari *filter* aktif *hybrid*

$Z_{h\text{ f}}$ = Impedansi harmonisa *filter* pasif.

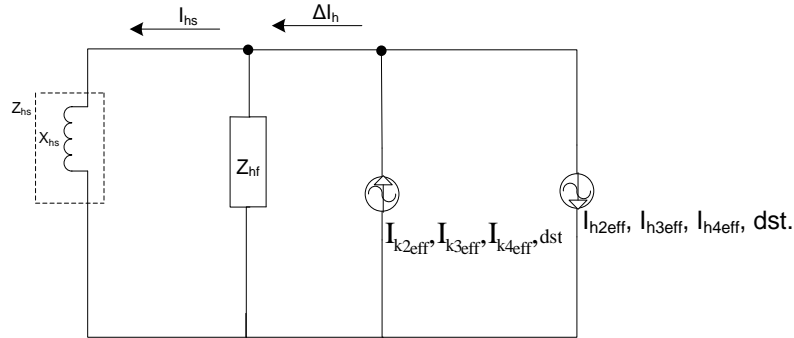
Arus kompensasi harmonisa ke-2, ke-3, ke-4, dan seterusnya (I_{k2eff} , I_{k3eff} , I_{k4eff} , dan seterusnya), yang dihasilkan oleh *filter* aktif *hybrid*, merupakan hasil transformasi dari sumber tegangan harmonisa ke-2, ke-3, ke-4, dan seterusnya (V_{h2eff} , V_{h3eff} , V_{h4eff} , dan seterusnya), yang dibagi dengan impedansi harmonik ke-2, ke-3, ke-4, dan seterusnya (Z_{h2f} , Z_{h3f} , Z_{h4f} , dan seterusnya) dari *filter* pasif, seperti ditunjukkan Gambar 10.

Supaya arus harmonisa ke-2, ke-3, ke-4, dan seterusnya (I_{h2eff} , I_{h3eff} , I_{h4eff} , dan seterusnya) yang ditimbulkan oleh *rectifier*, dapat dilawankan dengan arus kompensasi harmonisa ke-2, ke-3, ke-4, dan seterusnya (I_{k2eff} , I_{k3eff} , I_{k4eff} , dan seterusnya), yang ditimbulkan oleh *filter* aktif *hybrid*, syaratnya adalah tegangan di terminal masukan *rectifier* harus dibuat mendekati nol ($V_t \approx 0$), sehingga arus harmonisa ke-2, ke-3, ke-4, dan seterusnya (I_{h2eff} , I_{h3eff} , I_{h4eff} , dan seterusnya), yang ditimbulkan oleh *rectifier* akan sama dengan arus kompensasi harmonisa ke-2, ke-3, ke-4, dan seterusnya (I_{k2eff} , I_{k3eff} , I_{k4eff} ,

dan seterusnya), yang ditimbulkan oleh *filter aktif hybrid*, sehingga akan saling meniadakan. Selain itu, tujuan dari tegangan di terminal masukan *rectifier* harus dibuat mendekati nol ($V_t \approx 0$), dimaksudkan agar semua arus harmonisa berfrekuensi >50 Hz mengalir ke *filter aktif hybrid*.

Selisih dari arus kompensasi harmonisa ke-2, ke-3, ke-4, dan seterusnya (I_{k2eff} , I_{k3eff} , I_{k4eff} , dan seterusnya), yang ditimbulkan oleh *filter aktif hybrid*, dengan arus harmonisa ke-2, ke-3, ke-4, dan seterusnya (I_{k2eff} , I_{k3eff} , I_{k4eff} , dan seterusnya), yang ditimbulkan oleh *rectifier*, disebut delta I harmonik (ΔI_h). Seperti ditunjukkan pada Persamaan (19) dan ditampilkan pada Gambar 10

$$\Delta I = |I_{k\text{eff}} - I_{h\text{eff}}| \dots\dots\dots (19)$$



Gambar 10. Rangkaian transformasi

Untuk mengetahui berapa besarnya arus harmonik yang mengalir ke sumber (I_{hs}), dari Gambar 10, dapat digunakan rumus pembagi arus seperti ditunjukkan pada Persamaan (20) berikut.

$$I_{hs} = \frac{Z_{hf}}{Z_{hf} + X_{hs}} \cdot \Delta I_h \dots\dots\dots (20)$$

Jadi untuk menganalisis Gambar 10, harus ditentukan persamaan impedansi harmonik *filter pasif* (Z_{hf}) dari Gambar 9, sebagai berikut:

$$Z_{hf} = \frac{-j\omega n L_f}{\omega^2 n^2 C_f L_f - 1} + j\omega n L_{fs} \dots\dots\dots (21)$$

Keterangan:

- L_f = Induktor *filter pasif*
- C_f = Kapasitor *filter pasif*
- L_{fs} = Induktor *filter aktif shunt*

Syarat *filter pasif LC resonansi*, supaya dapat beresonansi pada harmonik pertama ($n=1$), terdapat pada Persamaan (9), maka dapat ditentukan nilai komponen L_f dari *filter pasif*, sebagai berikut:

$$L_f = \frac{1}{\omega^2 C_f} \dots\dots\dots (22)$$

3.5 Arus Kompensasi *Filter Aktif Hybrid*

Dengan menggunakan Persamaan (10) sampai (16), dan Persamaan (18) sampai (21), maka besarnya arus kompensasi harmonisa dari *filter aktif hybrid* (I_{keff}) dan ϕ_{Ikeff} dapat dihitung, seperti pada Tabel 3.

Tabel 3. Arus kompensasi FAH

h	$ I_{keff} $	$\varphi_{I_{keff}}$	h	$ I_{keff} $	$\varphi_{I_{keff}}$
2	0	289,654	21	0	163,344
3	0	317,325	22	0	315,994
4	0	43,919	23	0,106	270
5	10,324	90	24	0	287,432
6	0	23,015	25	0,089	270
7	2,737	270	26	0	285,143
8	0	151,280	27	0	222,175
9	0	257,489	28	0	184,681
10	0	280,265	29	0,066	270
11	0,580	270	30	0	33,461
12	0	171,106	31	0,057	270
13	0,380	270	32	0	139,112
14	0	337,62	33	0	27,677
15	0	65,168	34	0	167,890
16	0	240,803	35	0,044	270
17	0,205	270	36	0	169,909
18	0	32,103	37	0,040	270
19	0,160	270	38	0	333,83
20	0	200,258	39	0	131,731

3.6 Perbandingan Arus Harmonik

Berdasarkan Tabel 2, Tabel 3, maka dapat dibuat perbandingan nilai I_{heff} , $\varphi_{I_{heff}}$ dengan I_{keff} , $\varphi_{I_{keff}}$, seperti pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Perbandingan arus harmonik *rectifier* dengan arus kompensasi FAH

H	$ I_{heff} $	$\varphi_{I_{heff}}$	$ I_{keff} $	$\varphi_{I_{keff}}$	H	$ I_{heff} $	$\varphi_{I_{heff}}$	$ I_{keff} $	$\varphi_{I_{keff}}$
1	96,353	323,019	-	-	21	0	40,833	0	163,344
2	0	101,310	0	289,654	22	0	180,000	0	315,994
3	0	200,854	0	317,325	23	0,362	230,744	0,106	270
4	0	206,565	0	43,919	24	0	152,799	0	287,432
5	9,546	344,480	10,324	90	25	0,304	122,875	0,089	270
6	0	34,509	0	23,015	26	0	262,837	0	285,143
7	3,487	238,747	2,737	270	27	0	347,010	0	222,175
8	0	357,274	0	151,280	28	0	181,358	0	184,681
9	0	48,531	0	257,489	29	0,223	73,234	0,066	270
10	0	136,219	0	280,265	30	0	297,414	0	33,461
11	1,712	186,360	0,580	270	31	0,199	324,256	0,057	270
12	0	343,132	0	171,106	32	0	44,519	0	139,112
13	1,081	80,171	0,380	270	33	0	117,158	0	27,677
14	0	126,244	0	337,62	34	0	92,359	0	167,890
15	0	291,825	0	65,168	35	0,151	275,877	0,044	270
16	0	198,513	0	240,803	36	0	161,737	0	169,909
17	0,682	28,447	0,205	270	37	0,140	165,719	0,040	270
18	0	224,138	0	32,103	38	0	5,286	0	333,83
19	0,520	281,530	0,160	270	39	0	165,588	0	131,731
20	0	153,083	0	200,258	40	0	264,640	0	263,66

3.7 Arus I_{h5eff} *Rectifier* Dilawankan dengan I_{k5eff} *Filter Aktif Hybrid*

Untuk dapat membuat arus harmonik ke-5 (I_{h5eff}), berdasarkan Tabel 4 merupakan arus harmonisa yang paling besar dari *rectifier*, dapat saling meniadakan dengan arus kompensasi harmonik ke-5 (I_{k5eff}) dari *filter aktif hybrid*, maka sudut φ_{lk5eff} harus berbeda 180° dari φ_{lh5eff} caranya dengan menambahkan sudut φ_{lk5eff} sebesar 265°, sehingga didapatkan nilai selisih arus harmonik (ΔI_h) yang terkecil.

Tabel 5. Pergeseran sudut φ_{lkeff} 256° pada arus harmonik kompensasi *filter aktif hybrid*

h	$ I_{heff} $	φ_{lheff}	$ I_{keff}'$	φ'_{lkeff}	$ \Delta I_h $	h	$ I_{heff} $	φ_{lheff}	$ I_{keff}'$	φ'_{lkeff}	$ \Delta I_h $
1	96,353	323,019	-	-	-	21	0	40,833	0	65,237	0
2	0	101,310	0	178,130	0	22	0	180,000	0	216,244	0
3	0	200,854	0	219,718	0	23	0,362	230,744	0,106	170	0,231
4	0	206,565	0	293,69	0	24	0	152,799	0	176,455	0
5	9,546	344,480	10,324	350	1,412	25	0,304	122,875	0,089	170	0,195
6	0	34,509	0	292,915	0	26	0	262,837	0	184,76	0
7	3,487	238,747	2,737	170	0,406	27	0	347,010	0	124,301	0
8	0	357,274	0	55,695	0	28	0	181,358	0	83,865	0
9	0	48,531	0	158,227	0	29	0,223	73,234	0,066	170	0,143
10	0	136,219	0	177,184	0	30	0	297,414	0	292,499	0
11	1,712	186,360	0,580	170	0,983	31	0,199	324,256	0,057	170	0,129
12	0	343,132	0	70,830	0	32	0	44,519	0	40,580	0
13	1,081	80,171	0,380	170	0,607	33	0	117,158	0	286,854	0
14	0	126,244	0	239,55	0	34	0	92,359	0	67,525	0
15	0	291,825	0	324,121	0	35	0,151	275,877	0,044	170	0,096
16	0	198,513	0	139,946	0	36	0	161,737	0	69,679	0
17	0,682	28,447	0,205	170	0,430	37	0,140	165,719	0,040	170	0,091
18	0	224,138	0	292,459	0	38	0	5,286	0	233,257	0
19	0,520	281,530	0,160	170	0,323	39	0	165,588	0	31,816	0
20	0	153,083	0	101,099	0	40	0	264,640	0	167,526	0

3.8 Perbandingan Total Distorsi Harmonik (THD)

Perbandingan total distorsi harmonisa yang dimaksudkan adalah perbandingan total distorsi arus harmonisa dari *rectifier* sebelum direduksi dengan menggunakan *filter aktif hybrid* dengan total distorsi harmonisa dari *rectifier* yang mengalir ke sumber (I_{hs}) setelah direduksi menggunakan *filter aktif hybrid*, seperti ditunjukkan pada Tabel 6 perbandingan THD.

Tabel 6. Perbandingan THD

Arus harmonisa dari <i>rectifier</i> sebelum direduksi	Arus harmonisa dari <i>rectifier</i> setelah direduksi
$I_h = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} (I_{heff})^2} = 10,411$	$I'_h = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} (I_{hs})^2} = 4,27$
$THD = \frac{I_h}{ I_{h1eff} } \times 100\% = 10,805\%$	$THD' = \frac{I'_h}{ I_{h1eff} } \times 100\% = 4,431\%$

Tabel 6. Perbandingan THD (lanjutan)

Arus harmonisa dari <i>rectifier</i> sebelum direduksi	Arus harmonisa dari <i>rectifier</i> setelah direduksi
$\% \text{Reduksi} = \frac{(\text{THD} - \text{THD}')}{\text{THD}} \times 100\%$	
$\% \text{Reduksi} = \frac{(10,805 - 4,431)}{10,805} \times 100\% = 59\%$	

3.9 Menghitung Besarnya Kecepatan Putaran Motor DC Eksitasi Bebas

Berdasarkan Persamaan (1), maka besarnya V_{dc1} dapat dihitung sebagai berikut:

$$V_{dc1} = \frac{6 \cdot \sqrt{3} \cdot 220 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) = 514,6 \text{ volt}$$

Berdasarkan Persamaan (8) maka besarnya kecepatan putaran motor DC eksitasi bebas dapat dihitung sebagai berikut:

$$n_2 = \frac{514,6 - 127(6.50.3.10^{-3} + 0,25)}{0,065.3.125}$$

$$n_2 = 1814,4 \text{ rpm}$$

Sehingga besarnya tegangan masukan *armature* motor DC eksitasi bebas berdasarkan Persamaan (8), dapat dihitung sebagai berikut:

$$U_{ar} = V_{dc1} - I_{ar}(p.f.L_s)$$

$$U_{ar} = 514,6 - 127(6.50.3.10^{-3}) = 400,3 \text{ volt}$$

Jadi berdasarkan Tabel 1 *datasheet* motor, kecepatan motor arus searah eksitasi bebas dengan kecepatan sebesar 1814,4 rpm, diperlukan tegangan masukan *armature* (U_{ar}) sebesar 400,3 Volt.

4. KESIMPULAN

Dengan menggunakan *filter* aktif *hybrid*, maka arus harmonisa ke-5 ($I_{h5\text{eff}}$) dari *rectifier* dapat dilawankan dengan arus kompensasi harmonisa ke-5 ($I_{k5\text{eff}}$) dari *filter* aktif *hybrid*, sehingga didapat selisih nilai arus harmonisa ke-5 (ΔI_{h5}) yang sekecil mungkin, dengan perbandingan THD arus harmonisa sebelum direduksi menggunakan *filter* aktif *hybrid* sebesar 10,805%, dan THD arus harmonisa setelah direduksi dengan menggunakan *filter* aktif *hybrid* sebesar 4,43%. Hasil reduksi menggunakan *filter* aktif *hybrid* dapat mengurangi arus harmonisa dari *rectifier* sebesar 59% dari arus harmonisa sebelum direduksi menggunakan *filter* aktif *hybrid*, seperti ditunjukkan pada Tabel 6.

REFERENSI

- [1]. Benjamin, Daniel Doniga, et al. 2005. Control Strategies of Active Filters The Context of Power Conditioning. Romania: University of Bucharest.
- [2]. Batarseh, Issa. 2004. Power Electronics Circuit. United Kingdom: John Wiley & Sons.
- [3]. Rashid, Muhammad. 1999. Elektronika Daya. Jakarta: Prenhallindo.
- [4]. PC, Sen. 1997. Principles Of Electric Machine and Power Electronics. United Kingdom: Jhon Wiley & Sons.

- [5]. Salam, Zainal, et al. 2006. Harmonic Using Active Power Filter: A Technological Review. Malaysia: Universiti Teknologi Malaysia.
- [6]. Vazquez, Jesus R, et al. 2004. A Hybrid Approach to Compensate Non-linear Loads in Electrical Power System. Spanyol: Universidad de Huelva.
- [7]. Yiauw, K. H, Khanniche, M. S .2001. A Novel Three-Phase Active Power Filter. United Kingdom: University of Wales.