

## ANALISA ARUS PENYEARAH SUMBER TEGANGAN TIGA PHASA PADA UPS RSG-GAS

Yan Bony Marsahala

### ABSTRAK

#### ANALISIS ARUS PENYEARAH SUMBER TEGANGAN TIGA-PHASA.

Pengenalan konverter sumber tegangan tiga-fasa, akan memberikan suatu solusi yang dapat mereduksi arus harmonisa (*harmonic current*) pada tingkat yang relatif aman karena bentuk gelombang tegangan dan arus yang dihasilkan oleh inverter dengan suplai tegangan DC dua tingkat dapat menghasilkan tegangan AC dengan bentuk gelombang tegangan mendekati gelombang sinusoidal. Untuk keperluan analisis dapat dilakukan dengan menganalisa tiga moda rangkaian yang dinyatakan dengan kondisi kesinambungan suplai arus. Hasil analisis akan dibandingkan dengan hasil percobaan yang dilakukan untuk tiap moda yang diperkenalkan. Dasar rangkaian konverter menggunakan dioda jembatan penuh dengan filter kapasitor pada sisi keluaran. Untuk membangkitkan gelombang dua tingkat diperlukan rangkaian tambahan (berfungsi sebagai sirkuit kontrol) yang dihubungkan pada sisi keluaran konverter, dan dengan menggunakan bantuan komputer sebagai pemicu. Rangkaian pensakelaran ditambahkan ke konverter dioda sebagai filter aktif dan rangkaian komutasi paksa untuk sistem-sistem dioda.

### ABSTRACT

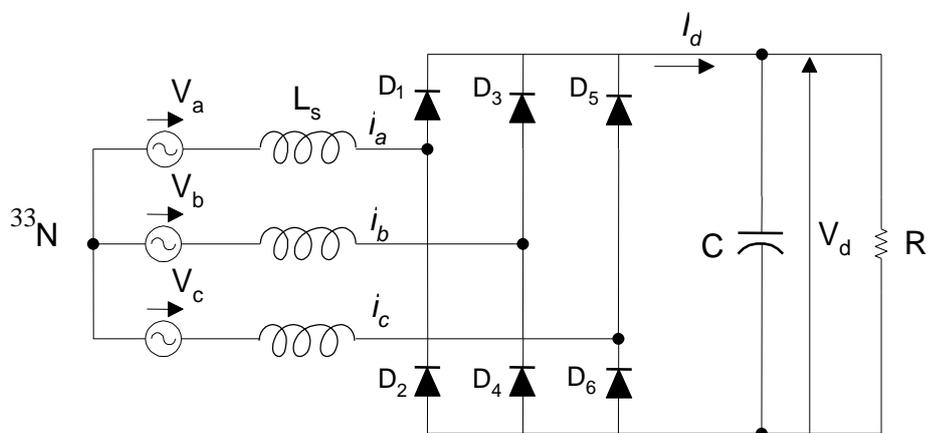
#### THREE PHASE VOLTAGE SOURCE CONVERTER CURRENT ANALYSIS.

The proposed rectifier system consists of a three-phase diode bridge circuit as a main power circuit, AC reactors, and an additional circuit, which serves as an active filter with low switching frequencies and a forced-commutation circuit for the diodes. These papers describe the operation principle, analysis of the waveforms of input voltage and current, the calculated of AC input current, multiple phase-shifted systems, and the experimental result. A very conventional method was employed to analyze the input current equation; in that, the ripple output was neglected. The theory developed in this paper was verified twice: by calculation result and experiments. The calculated AC input the simple program using the algorithm of current equations calculated current waveforms presented in this paper. A switching circuit has been added to the diode rectifier, serving as an active filter and a forced-commutation circuit for diodes systems.

## 1. PENDAHULUAN

Metoda konvensional yang telah dilakukan sejak lama sebagai alat untuk mengkonversi daya arus bolak balik (AC) menjadi daya arus searah (DC) adalah dengan menggunakan dioda hubungan jembatan. Namun sangat disayangkan bahwa metoda konvensional ini akan membangkitkan arus harmonisa (*harmonic current*) yang cukup besar pada pemasok arus (sumber catu daya). Jenis konverter tersebut dinamai dengan konverter sumber tegangan gelombang segi empat. Pada tulisan ini diperkenalkan jenis konverter yang menggunakan dioda hubung jembatan dengan bentuk gelombang dua tingkat. Rangkaian dasar yang menjadi kerangka pembentukan sirkuit konverter adalah dioda hubungan jembatan penuh dengan menambahkan filter kapasitor berkapasitas besar pada terminal keluaran rangkaian. Untuk memperoleh gelombang tegangan dua tingkat diperlukan sirkuit tambahan yang dihubungkan pada tiap titik simpul dari terminal sumber catu daya ke dioda jembatan. Pola bentuk gelombang tegangan yang diperlukan tersebut dapat dilakukan dengan bantuan komputer personal (PC). Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan suatu bentuk gelombang arus fasa yang mendekati bentuk gelombang sinusoidal yang dapat diperoleh secara perhitungan teoritis dan hasilnya diuji dengan melakukan percobaan di laboratorium.

Untuk menganalisa rangkaian dimaksud, ditetapkan asumsi bahwa riak arus (*current ripple*) keluaran yang mengalir pada kapasitor C cukup kecil dan dapat diabaikan. Kemudian diasumsikan bahwa semua dioda yang digunakan merupakan dioda ideal. Tegangan fasa AC tiga fasa masing-masing  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$  dipasok ke dioda jembatan melalui komponen induktansi  $L_s$  seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram konverter dioda jembatan penuh

## 2. METODOLOGI

Metodologi yang digunakan untuk mendapatkan hasil penelitian agar sesuai dengan tujuan yang ditetapkan adalah dengan melaksanakan beberapa tahapan penyelesaian yang harus ditempuh seperti:

- a) Menentukan diagram ekivalen dari rangkaian berdasarkan kondisi operasi rangkaian yang ditentukan dari operasional dioda;
- b) Mencari persamaan arus phasa dan persamaan tegangan DC pada terminal kapasitor C;
- c) Mencari korelasi antara sudut beban;
- d) Menentukan rangkaian percobaan;
- e) Melakukan pengujian di laboratorium;
- f) Membandingkan bentuk gelombang arus phasa yang diperoleh secara teoritis dengan hasil percobaan.

Karakteristik komponen AC pada rangkaian konverter seperti pada Gambar 1, diselesaikan dengan beberapa asumsi sebagai berikut:

- 1) Arus keluaran DC konstan, karena adanya pemasangan kapasitor C yang sangat besar yang berfungsi sebagai filter DC.

2) Dengan mengabaikan tahanan (resistansi) pada sisi AC.

Selanjutnya untuk menyederhanakan perhitungan, maka operasional konverter tersebut dibagi dalam tiga moda operasi, yaitu:

- 1) Moda 1, adalah moda operasi dimana baik arus AC maupun arus DC terputus-putus (*discontinuous*).
- 2) Moda 2, adalah moda operasi dimana arus DC sinambung dan arus AC terputus-putus.
- 3) Moda 3, adalah moda operasi dimana baik arus AC maupun arus DC sinambung.

Operasi dari setiap moda tersebut di atas, dianalisis dengan menggunakan rangkaian ekuivalen seperti yang diberikan masing-masing pada Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4. Parameter rangkaian seperti tegangan fasa  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$  adalah konstan, sedangkan induktor  $L_s$  memiliki nilai yang sama besar pada tiap fasa,  $C$  adalah kapasitor yang berfungsi sebagai filter DC, dan  $R$  merupakan representasi beban. Dengan mengubah-ubah besarnya sudut beban  $\theta$ , komponen AC dapat dianalisis seperti berikut.

#### Analisis arus fasa pada Moda 1

Rangkaian ekuivalen Moda 1, digambarkan seperti pada Gambar 2, dimana pada moda ini terdapat tiga kondisi operasi yang dibedakan dari sudut beban terdiri dari :

- 1) kondisi pertama :  $0 \leq \theta \leq \theta_1$
- 2) kondisi kedua :  $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2$ ; dan
- 3) kondisi ketiga :  $\theta_2 \leq \theta \leq \pi/3$ .

#### Kondisi Pertama: $0 \leq \theta \leq \theta_1$

Menggambarkan keadaan operasi pada saat  $t = 0$ , dimana dioda  $D_1$  dan  $D_6$  terhubung, dan arus DC,  $i_d$  menjadi nol sebelum  $D_3$  mulai terhubung.

Persamaan arus fasa pada kondisi satu adalah sebagai berikut:

$$i_{a1}(\theta) = \sqrt{6}V_s/2X_s \{ \sin \theta + \cos(\theta_2 + \pi/6) \} - \cos(\theta + \pi/6) \} - V_d/2X_s (\theta + \theta_3 - \theta_2)$$

$$i_{b1}(\theta) = 0 \quad (1)$$

$$i_{c1}(\theta) = -i_{b1}(\theta)$$

**Kondisi Kedua:  $(\theta_1 \leq \theta \leq \theta_2)$**

Ditunjukkan pada Gambar 2b menggambarkan suatu keadaan dimana pada waktu sudut beban  $\theta = \theta_2$ , dioda  $D_3$  dan dioda  $D_6$  terhubung karena  $V_d = V_{bc}$ . Dengan demikian persamaan tegangan keluaran DC,  $V_d$  dapat didefinisikan sebagai:

$$V_d = \sqrt{6} V_s \sin(\theta_2 + \pi/6) \quad (2)$$

Persamaan arus fasa pada kondisi ini, dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut:

$$i_{a2}(\theta) = i_{b2}(\theta) = i_{c2}(\theta) \quad (3)$$

**Kondisi Ketiga:  $\theta_2 \leq \theta \leq \pi/3$**

Seperti pada diagram ekivalen Gambar 2c, dimana hanya fasa b dan fasa c yang mengalirkan arus, sedangkan fasa a tidak. Persamaan arus fasa pada kondisi ini dapat dituliskan dalam bentuk persamaan berikut:

$$\begin{aligned} i_{a3}(\theta) &= 0 \\ i_{b3}(\theta) &= \sqrt{6} V_s / X_s \{ \cos(\theta + \pi/6) - \cos(\theta + \pi/6) \} - V_d / 2X_s (\theta - \theta_2) \\ i_{c3}(\theta) &= -i_{b3}(\theta) \end{aligned} \quad (4)$$

Dari persamaan-persamaan arus fasa yang diberikan di atas, dapat dilihat bahwa arus fasa tergantung pada beberapa parameter yang belum diketahui yaitu, sudut beban  $\theta_1$  dan  $\theta_2$ , dan tegangan  $V_d$  pada terminal kapasitor C. Dengan demikian untuk menggambarkan bentuk gelombang arus fasa tersebut, terlebih dahulu harus dicari korelasi antara sudut beban  $\theta_1$  dan  $\theta_2$ , dan besarnya  $V_d$ .

**Korelasi sudut beban  $\theta_1$ , dengan  $\theta_2$**

Korelasi sudut beban  $\theta_1$ , dan sudut beban  $\theta_2$  diperoleh dari kondisi tak sinambung arus  $I_d$ , yang terjadi pada saat  $i_{a1}(\theta_1) = i_{a2}(\theta_1) = 0$ . Dari hasil perhitungan matematis diperoleh persamaan berikut:

$$\sin \theta_1 = (\theta_1 + \pi/3 - \theta_2) \sin(\theta_2 + \pi/6) - \cos(\theta_2 + \pi/6) \quad (5)$$

**Analisis arus fasa Moda 2**

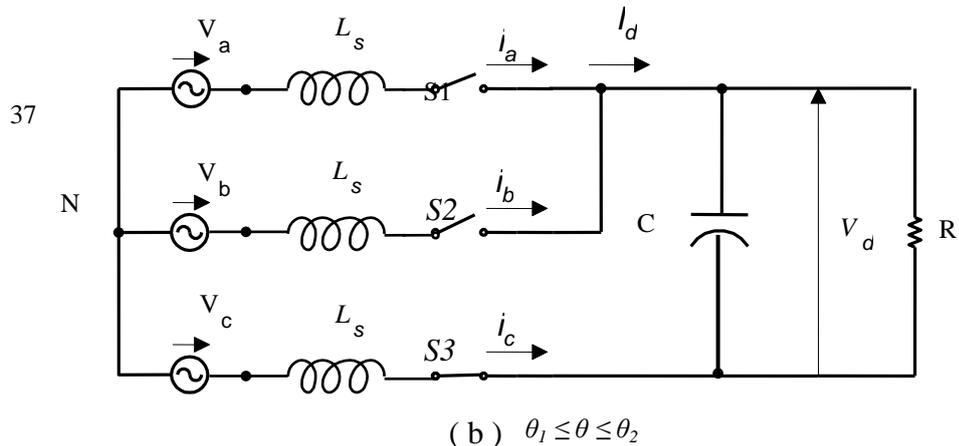
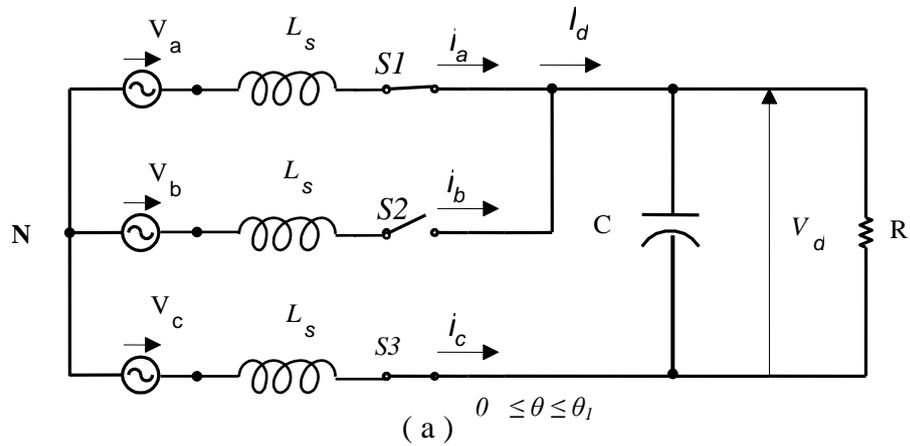
Operasi rangkaian konverter moda 2, ditandai dengan aliran arus fasa yang terputus-putus, sementara arus DC sinambung. Hal ini terjadi bilamana sudut beban  $\theta_1$  sama atau lebih besar dari sudut beban  $\theta_2$ . Pada moda 2 ini, terdapat tiga kondisi operasi yang diatur sesuai dengan besar sudut beban, yaitu:

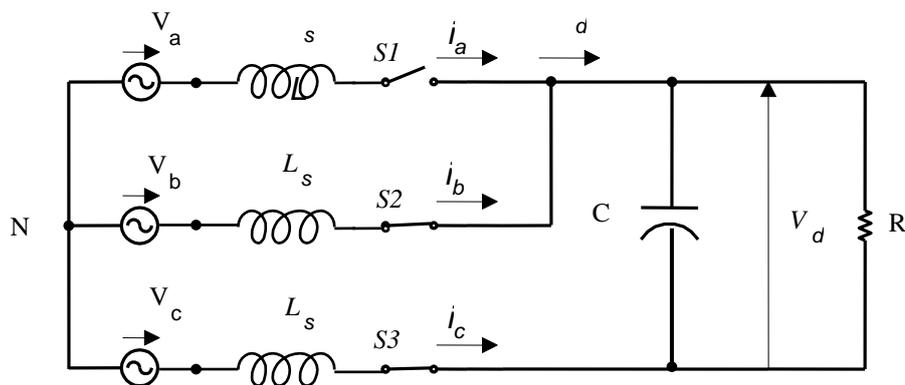
- 1) Kondisi pertama :  $0 \leq \theta \leq \theta_2$
- 2) Kondisi kedua :  $\theta_2 \leq \theta \leq \theta_2 + \mu$
- 3) Kondisi ketiga :  $\theta_2 + \mu \leq \theta \leq \pi/3$

Kondisi pertama:  $0 \leq \theta \leq \theta_2$

Pada saat  $t = 0$ , dioda  $D_1, D_6$  terhubung, kondisi ini dapat digambarkan dalam rangkaian ekivalen seperti pada Gambar 3a. Solusi persamaan arus fasa pada kondisi ini dituliskan seperti pada persamaan berikut.

$$\begin{aligned}
 i_{a1}(\theta) &= \sqrt{2}V_s/X_s \{ \text{Cos}\theta_2 - \text{Cos}(\theta_2 + \mu) \} - \sqrt{6}V_s/2X_s \text{Sin}(\theta_2 + \mu - \pi/3) \\
 &\quad - \text{Sin}\theta - V_d/6X_s (\pi - 3\theta_2 - \mu + 3\theta) \\
 i_{b1}(\theta) &= 0 \\
 i_{c1}(\theta) &= -i_{a1}(\theta)
 \end{aligned}
 \tag{6}$$





(c)  $\theta_2 \leq \theta \leq \pi/3$

**Kondisi Kedua:  $\theta_2 \leq \theta \leq \theta_2 + \mu$**

Pada saat sudut beban  $\theta_2$ , dioda  $D_3$  mulai memimpin sementara  $D_1$ ,  $D_6$ , dan  $D_3$  masih tetap terhubung. Pada kondisi ini, arus fasa AC dapat dicari dengan rangkaian ekuivalen seperti pada Gambar 3.b. Persamaan arus fasa AC pada kondisi ini dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$\begin{aligned}
 i_{a2}(\theta) &= \sqrt{2}V_s/X_s \{ \text{Cos}\theta_2 - \text{Cos}(\theta_2 + \mu) \} - \text{Sin}(\theta + \pi/6) - \text{Sin}(\theta_2 + \pi/6) \} \\
 &\quad - \sqrt{6}V_s/2X_s \{ \text{Sin}(\theta_2 + \mu - \pi/3) - \text{Sin}\theta_2 \} - V_d/6X_s (\pi - \mu + 2\theta - 2\theta_2) \\
 i_{b2}(\theta) &= \sqrt{2}V_s/X_s \{ \text{Sin}(\theta - \pi/2) - \text{Sin}(\theta_2 - \pi/2) \} - V_d/3X_s (\theta - \theta_2) \\
 i_{c2}(\theta) &= -\{ i_{a2}(\theta) + i_{b2}(\theta) \}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

**Kondisi Ketiga:  $\theta_2 + \mu \leq \theta \leq \pi/3$**

Pada saat  $\theta = \theta_2 + \mu$ , sementara dioda  $D_3$  dan  $D_6$  memimpin, dioda  $D_1$  off. Kondisi operasi ini digambarkan dalam rangkaian ekivalen seperti Gambar 4c. Persamaan arus fasa pada kondisi ini dituangkan dalam persamaan berikut:

$$\begin{aligned} i_{a3}(\theta) &= 0 \\ i_{b3}(\theta) &= \sqrt{6}V_s/2X_s \text{Sin}(\theta - \pi/3) - V_d/2X_s (\theta - \pi/3) \\ i_{c3}(\theta) &= -i_{b3}(\theta) \end{aligned} \tag{8}$$

**Komponen DC**

Tegangan keluaran DC,  $V_d$  pada operasi Moda 2 diperoleh pada saat  $\theta = \theta_2$ , dioda  $D_3$  mulai memimpin sehingga  $V_d = V_{bc}$ . Dimana tegangan keluaran  $V_d$  dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

$$V_d = \sqrt{6}V_s \text{Cos}(\theta_2 - \pi/3) \tag{9}$$

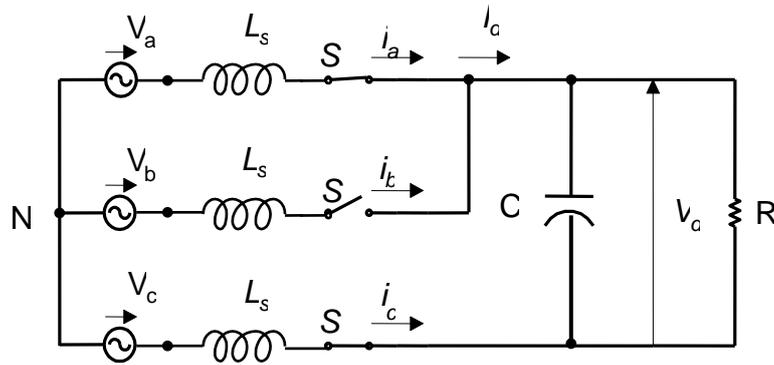
Hubungan antara sudut beban  $\theta_2$  dengan sudut *overlapping*  $\mu$  diperoleh berdasarkan ketidak-sinambungan arus fasa.

Dimana pada saat  $\theta = \theta_2 + \mu$ , maka:  $i_{a2}(\theta + \mu) = i_{a3}(\theta + \mu) = 0$ , karena  $D_1$  di off kan.

Pada kondisi operasi 2 ditemukan persamaan arus untuk  $i_{a2}(\theta)$ . Dengan demikian persamaan tegangan keluaran DC dapat dituliskan dalam persamaan berikut:

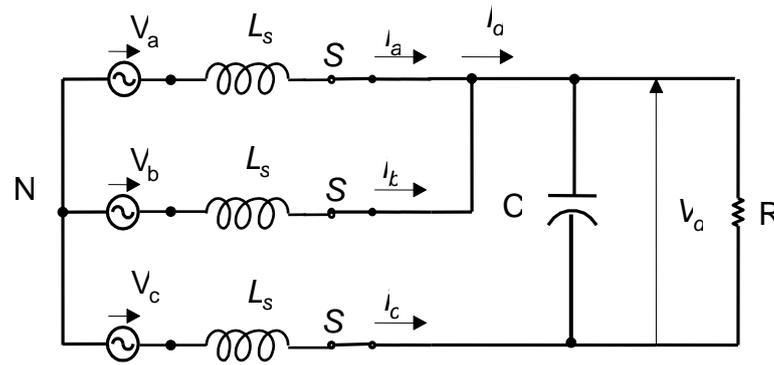
$$\text{Cos } \theta_2 = (\pi + \mu) \text{Sin } \theta_2 + \sqrt{3}/2 \text{Sin}(\theta_2 + \mu) + 1/5 \text{Cos}(\theta_2 + \mu) \tag{10}$$

Dari per.10 terdapat dua parameter dalam satu persamaan, maka untuk menyelesaikan persamaan tersebut dapat digunakan bantuan komputer. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 2.

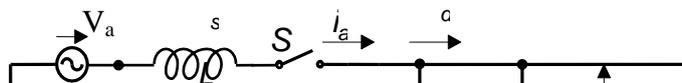


( a ).  $0 \leq \theta \leq \theta_2$

39



( b ).  $\theta_2 \leq \theta \leq \theta_2 + \mu$



### Analisis Moda 3

Pada moda operasi 3, terdapat dua kondisi operasi yang memungkinkan tercapainya sinambungitas baik arus phasa maupun arus DC. Kedua kondisi operasi tersebut terjadi pada saat sudut beban berada pada posisi:

- 1) kondisi pertama:  $0 \leq \theta \leq \theta_1$
- 2) kondisi kedua :  $\theta_1 \leq \theta \leq \pi/3$

#### Kondisi Pertama.

Unjuk kerja dioda adalah sebagai berikut, dimana dioda  $D_1$ ,  $D_4$ , dan  $D_6$  memimpin. Kondisi operasi 1 ini ditunjukkan dalam rangkaian ekivalen pada Gambar 4a. Solusi persamaan arus phasa dituliskan dalam persamaan berikut:

$$i_{a1}(\theta) = \sqrt{2}V_s/X_s \sin(\theta + \pi/6) - V_d/3X_s (2\theta - 2\theta_1 + \pi/3)$$

$$i_{b1}(\theta) = \sqrt{2}V_s/X_s \sin(\theta - \pi/2) + V_d/3X_s (\theta - \theta_1 + 2\pi/3) \quad (11)$$

$$i_{c1}(\theta) = \sqrt{2}V_s/X_s \sin(\theta - \pi/6) + V_d/3X_s (\theta - \theta_1 - \pi/3)$$

**Kondisi Kedua.**

Pada saat sudut beban  $\theta = \theta_1$ , arus fasa  $i_b$  menjadi nol dan polaritasnya berganti. Dengan demikian, dioda  $D_3$  memimpin. Solusi persamaan arus dapat diberikan dalam persamaan berikut:

$$i_{a2}(\theta) = \sqrt{2}V_s/X_s \sin(\theta + \pi/6) - V_d/3X_s (\theta - \theta_1 + \pi/3)$$

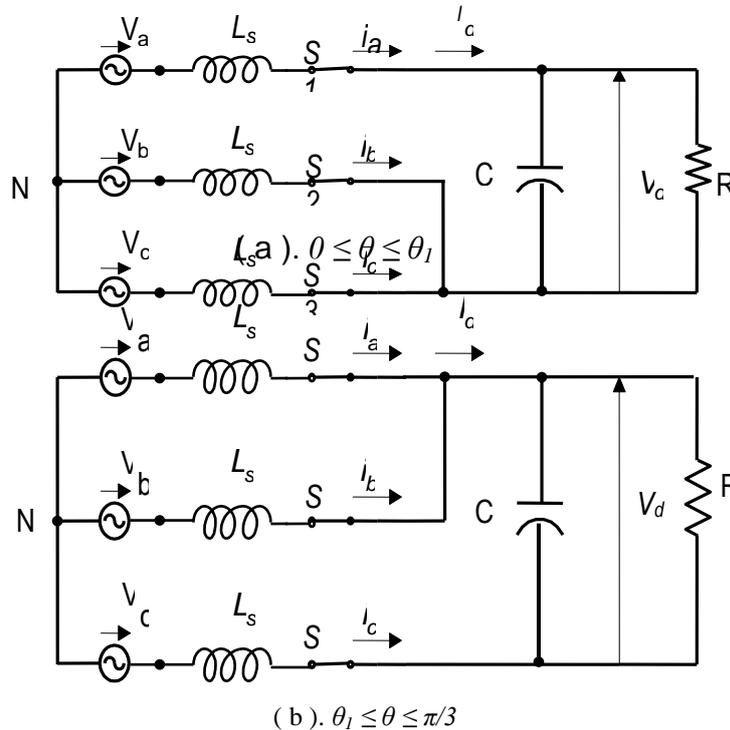
$$i_{b2}(\theta) = \sqrt{2}V_s/X_s \sin(\theta - \pi/2) - V_d/3X_s (\theta - \theta_1 - 2\pi/3) \quad (12)$$

$$i_{c2}(\theta) = \sqrt{2}V_s/X_s \sin(\theta - 7\pi/6) + V_d/3X_s (2\theta - 2\theta_1 - \pi/3)$$

**Komponen DC**

Persamaan tegangan keluaran DC pada terminal kapasitor,  $V_d$  diperoleh dari kondisi saat dioda  $D_3$ , yaitu:

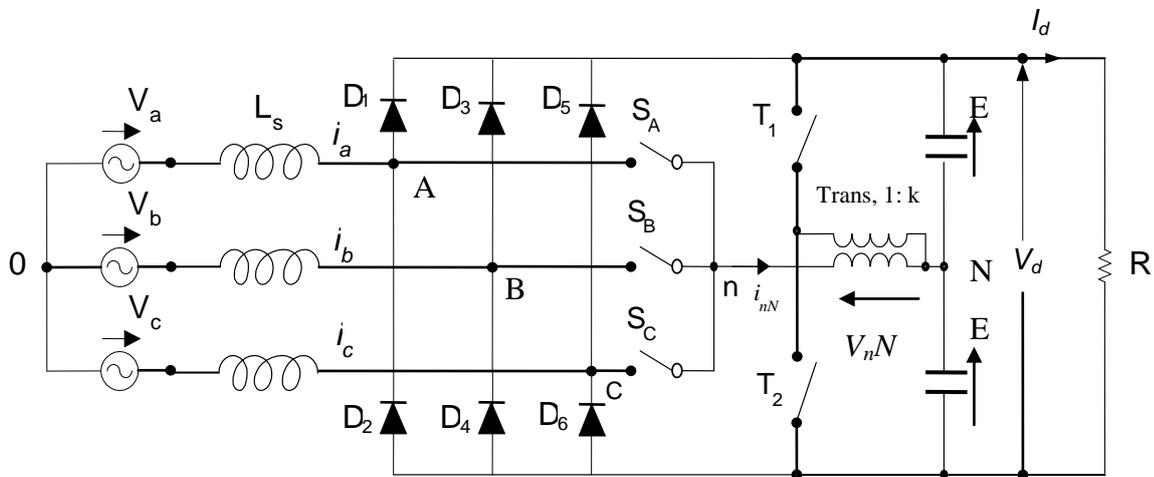
$$V_d = -9\sqrt{2}/2\pi V_a \cos \theta_1 \quad (13)$$



Gambar 4. Rangkaian ekivalen Moda 3

### 3. RANGKAIAN PERCOBAAN

Untuk mendapatkan bentuk gelombang tegangan dan arus pada konverter sumber tegangan dua tingkat dilakukan pengujian dengan rangkaian percobaan seperti pada Gambar 5.



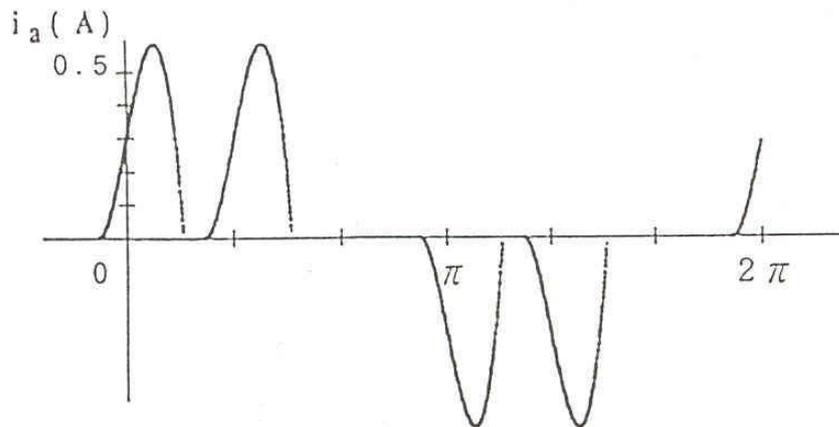
Gambar 5. Diagram tiga garis dengan sirkuit kontrol

#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

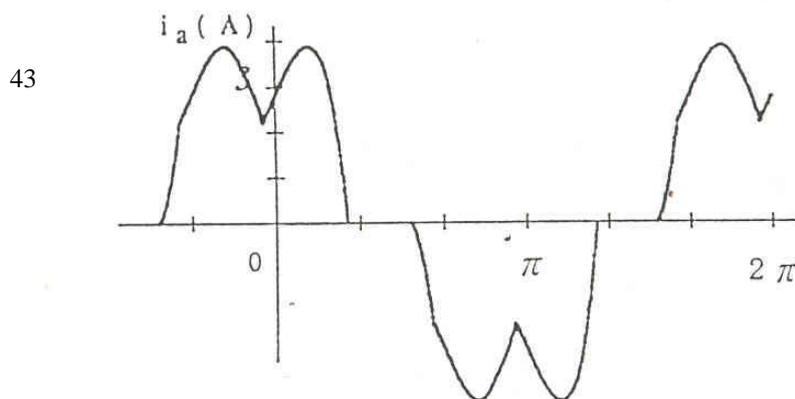
Untuk mendapatkan bentuk gelombang komponen AC dari rangkaian konverter yang diberikan, terlebih dahulu harus dicari korelasi antara sudut beban pada tiap moda yang diberikan. Korelasi antara sudut beban  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  dihitung dengan menggunakan persamaan (5). Korelasi sudut beban  $\theta_2$  dan  $\mu$  pada operasi moda 2, dihitung dengan menggunakan persamaan (10).

##### Gelombang Arus Fasa Teoritis

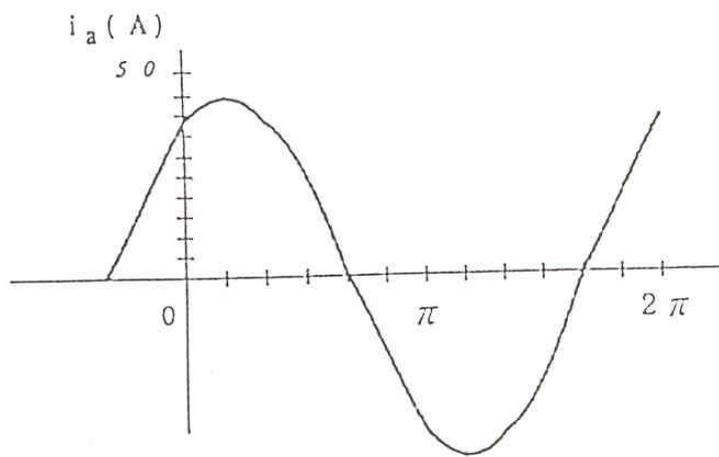
Bentuk gelombang arus fasa secara teoritis, digambarkan berdasarkan persamaan yang telah diberikan untuk tiap kondisi operasi yaitu moda operasi I, moda operasi 2, dan moda operasi 3. Dalam hal ini sebagai contoh perhitungan kita gambarkan bentuk gelombang arus fasa a. Dengan demikian pada setiap moda, arus fasa a merupakan hasil penjumlahan dari arus fasa a untuk setiap kondisi operasi. Hasil ini menyatakan bentuk gelombang arus fasa dalam satu periode.



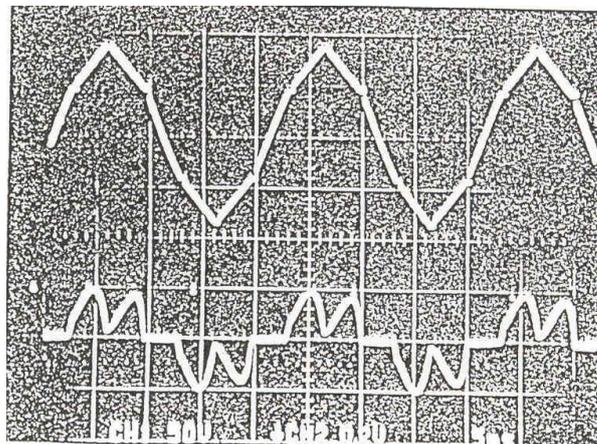
( a ) Moda 1, sudut beban:  $\theta_1 = 32.0806^\circ$ , dan  $\theta_2 = 44^\circ$



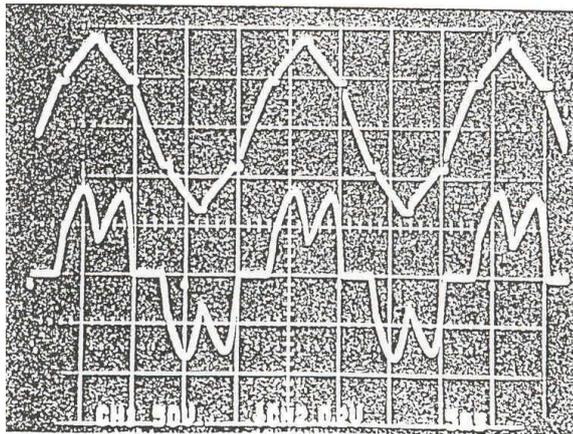
( b ) Moda 2, sudut beban:  $\theta_2 = 36^0$ , dan  $\mu = 15.2303^0$



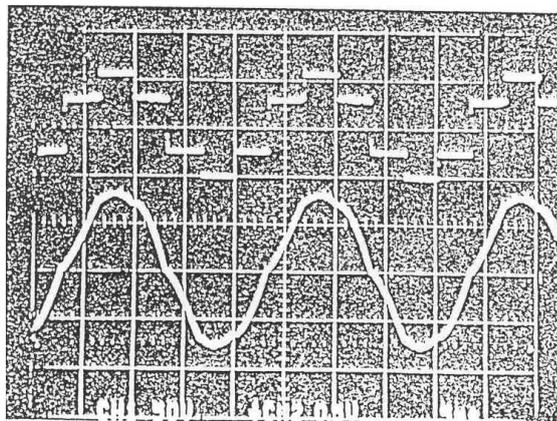
Gambar 6. Bentuk gelombang arus phasa, teoritis



(a). Moda 1.



(b). Moda 2.



## (c). Moda 3

Gambar 7. Bentuk gelombang arus fasa, hasil percobaan  
 Trace bagian atas adalah tegangan fasa-fasa  $V_{ao}$  (50 V/div.)  
 Trace bagian bawah adalah arus fasa  $i_a$  (25 A/div.)  
 Skala waktu: 5 ms/div;  $V_S = 100/\sqrt{3}$  volt,  $L_S = 5$  mH.

Grafik gelombang arus fasa, diperoleh dengan cara berikut:

- Grafik gelombang arus fasa pada moda 1, diperoleh dari persamaan (1), (2), (3), dan (4) yaitu:  $I_a(\theta) = i_{a1}(\theta) + i_{a2}(\theta) + i_{a3}(\theta)$ . Dari hasil perhitungan diperoleh bahwa untuk sudut beban  $\theta_1 = 44^\circ$ , maka  $\theta_2 = 32.0806^\circ$ .
- Pada rangkaian moda 2, diperoleh dari persamaan 6, persamaan 7, persamaan 8, dan persamaan 9 seperti:  $I_a(\theta) = i_{a1}(\theta) + i_{a2}(\theta) + i_{a3}(\theta)$ . dari hasil perhitungan diperoleh bahwa untuk sudut beban  $\theta_2 = 36^\circ$ , maka  $\mu = 15.2303^\circ$ .
- Selanjutnya bentuk gelombang arus fasa pada moda 3, diperoleh dari persamaan 11, persamaan 12, dan persamaan 13 misalnya bila  $I_a(\theta) = i_{a1}(\theta) + i_{a2}(\theta)$ , maka besarnya sudut beban  $\theta_1 = 60^\circ$ .

Dari hasil perhitungan di atas, maka bentuk gelombang arus fasa untuk tiap moda operasi dapat dilihat pada Gambar 6.

## 5. KESIMPULAN

Bentuk gelombang arus fasa teoritis diperoleh berdasarkan hasil perhitungan untuk tiap moda operasi. Pada operasi moda 3, bentuk gelombang arus fasa baik yang didapatkan berdasarkan perhitungan maupun dari hasil pengujian di laboratorium

menunjukkan bahwa arus fasa yang diperoleh dengan rangkaian yang diberikan menghasilkan arus sinambung dengan bentuk gelombang mendekati sinusoidal.

Bentuk gelombang tersebut baik digunakan untuk pengaturan kendali motor induksi, khususnya motor berkapasitas besar. Karena semakin baik bentuk gelombang yang digunakan, akan semakin kecil arus harmonisa yang dibangkitkannya.

## **6. DAFTAR PUSTAKA**

- 1) Yan Bony Marsahala, "Characteristics of Two-and Multi-level Voltage Source Converter", Thesis, Ibaraki University, Hitachi, Japan 1993.
- 2) Ned Mohan, Tore M. Underland and William P. Robin, "Power Electronics: Converter, Application, and Design", John Wiley & Sons.
- 3) K. Oguchi and Y. Maki, "Proposal of a multilevel voltage source bridge circuit as a main circuit", Trans. IEEE Japan, vol. 112, D. no. 5. Pp.101-102, 1992 (in Japan)