

## PENGATURAN PENYEARAH AKTIF MENGGUNAKAN KONTROLLER LOGIKA FUZZY

Saidah<sup>(1,2)</sup>, Muhamad Ashari<sup>(1)</sup>, Mauridhi Hery Purnomo<sup>(1)</sup>

<sup>1)</sup>Jurusan Teknik Elektro-FTI, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)  
Kampus ITS, Keputih Sukolilo, Surabaya-60111

<sup>2)</sup>Jurusan Teknik Elektro -FTI, Institut Teknologi Pembangunan Surabaya (ITPS),  
Jl. Ngagel 89 Surabaya atau Jl. Balongsari Praja V/1 Tandes Surabaya 60186,  
email: sdh\_baisa@yahoo.com

### Abstrak

Pada makalah ini dibahas penyearah aktif tanpa sensor arus, yang dirancang untuk memperoleh unity power factor, arus input sinusoidal, tegangan output DC yang stabil. Pengaturan arus feedforward dan pengaturan modulasi (Space Vector Pulse Width Modulation / SVPWM) dengan mengaplikasikan controller logika fuzzy digunakan dalam model sistem ini, kemudian dianalisa untuk mendapatkan kinerja yang tinggi.

**Kata Kunci:** Penyearah aktif, Logika fuzzy, SVPWM

### 1. Pendahuluan

PWM penyearah aktif bi-directional semakin lama semakin menarik untuk aplikasi *utility interface* dan kinerja tinggi untuk penyetelan speed drive, UPS[1,2] karena penyearah aktif bi-directional mempunyai keistimewaan dapat menghasilkan:

- Pengurangan harmonisa
- Effisiensi yang tinggi
- Kemampuan regenerasi
- Respon dinamik yang cepat
- Bobot yang ringan (dalam penggunaan elemen pasif)

Penyearah aktif bi-directional menggunakan PWM transistor (IGBT) menggantikan diode dan thyristor yang mempunyai banyak kelemahan-kelemahan [3].

Penggunaan Kontrol yang tepat pada penyearah aktif dapat memberikan perbaikan kinerja penyearah dan mengurangi komponen-komponen pasif.

Dalam makalah ini akan digunakan pengaturan arus feedforward tanpa sensor arus dan pengaturan modulasi menggunakan fuzzy Logic, karena dengan controller konvensional (PID) hanya cocok untuk sistem linier dan sistem dengan parameter-parameter yang tidak berubah terhadap waktu.

Beberapa teknik kontrol untuk PWM rectifier adalah:

- Metode yang sedikit dikenal, berdasarkan pada pengaturan daya aktif dan reaktif secara langsung yang dinamakan Direct Power Control (DPC). DPC tidak melakukan pengaturan arus internal dan pengaturan PWM modulasi, karena switching dari konverter dipilih oleh table switching berdasarkan error dan nilai estimasi dari daya aktif dan daya reaktif. Oleh karena itu kunci utama dari

implementasi DPC adalah estimasi yang tepat dan cepat dari daya aktif dan daya reaktif jaringan [4,5]

- Suatu metode yang dikenal baik berdasarkan pada pengaturan daya aktif dan reaktif tidak secara langsung, yaitu berdasarkan pada orientasi vector arus terhadap vector tegangan jaringan. (VOC – Voltage oriented control). Teknik pengaturan ini tergantung pada kualitas dari strategi kontrol arus yang dipakai.

Pertama-tama diperkenalkan penggunaan controller konvensional, yaitu dengan controller Liapunov [6], Sliding-mode [7], controller PID [8]. Penggunaan controller konvensional ini hanya cocok untuk sistem linier dan sistem dengan parameter-parameter yang tidak berubah terhadap waktu.

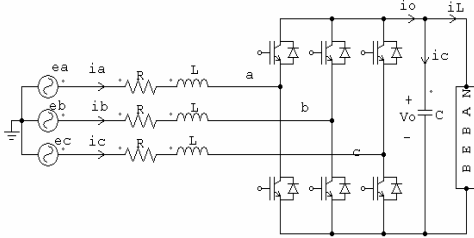
Untuk mengatasi permasalahan-permasalahan tersebut diperkenalkan penggunaan controller logika fuzzy untuk mengidentifikasi sistem non linier, karena dapat menaksir suatu range yang lebar dan dapat mengatasi berubahnya parameter sistem karena temperatur, magnetic saturation [9,10] dll.

Dalam penggunaan logika fuzzy, keterbatasan kemampuan perangkat keras dan besarnya biaya yang harus dikeluarkan untuk implementasi mendorong untuk dicarinya metode yang dapat mengeliminasi perangkat keras tersebut, yaitu menggunakan logika fuzzy untuk pengaturan arus feedforward tanpa sensor arus dan untuk pengaturan space vector modulasinya [11]. Dengan meninggalkan penggunaan sensor arus akan memperbaiki kelayakan sistem dan biaya instalasi menjadi lebih rendah.

### 2. Model Penyearah Aktif

Membuat Model sistem, yang terdiri dari rangkaian 3 fasa yang dinyatakan oleh tiga buah

sumber tegangan yang dihubungkan dengan bintang  $e_i$ , tiga impedansi R-L, penyearah tiga fase dengan PWM kontrol, smoothing kapasitor dan beban



**Gambar 1.** Model rangkaian konverter AC/DC (penyearah) tiga fase

Membuat model matematika sistem tersebut diatas dengan menggunakan analisa space vector[12].

$$\bar{x}(t) = \frac{2}{3} [x_a(t) + \alpha x_b(t) + \alpha^2 x_c(t)] \quad (1)$$

dengan  $\alpha = \exp(j(2\pi/3))$

$x_a(t)$ ,  $x_b(t)$  dan  $x_c(t)$  adalah komponen-komponen tiga fase.

Penyearah aktif dimodel dg memakai 3 fungsi switching continuous  $-1 \leq S_k(t) \leq 1$  ( $k=a,b,c$ ) yang didefinisikan space vektor sebagai:

$$\bar{S}(t) = \frac{2}{3} [s_a(t) + \alpha s_b(t) + \alpha^2 s_c(t)] \quad (2)$$

Persamaan model matematik penyearah yaitu:

$$\bar{v}(t) = \bar{e}(t) - R\bar{i}(t) - L \frac{d\bar{i}(t)}{dt}$$

$$\bar{v}(t) = \frac{1}{2} \bar{s}(t) v_0(t) \quad (3)$$

$$i_0(t) = \frac{3}{4} \text{Re} \{ \bar{s}(t) \bar{i}^+(t) \}$$

$$i_c(t) = C \frac{dv_0(t)}{dt} = i_0(t) - i_L(t)$$

dengan

$\bar{v}(t)$  tegangan input space vektor penyearah (SVM)

$\bar{i}(t)$  arus input space vektor penyearah

$\bar{i}^+(t)$  konjugasi komplek dari  $i(t)$

$\bar{e}(t)$  space vektor dari tegangan input jaringan

$i_0(t)$  arus output penyearah

$i_c(t)$  arus kapasitor

$i_L(t)$  arus beban

Model matematika ditulis dalam bentuk space vektor adalah

$$\frac{dv_0(t)}{dt} = \frac{1}{C} \left\{ \frac{3}{4} \text{Re} \{ \bar{s}(t) \bar{i}^+(t) \} - i_L(t) \right\} \quad (4)$$

$$\frac{d\bar{i}(t)}{dt} = \frac{1}{L} \left\{ -R\bar{i}(t) + \bar{e}(t) - \frac{1}{2} \bar{s}(t) v_0(t) \right\} \quad (5)$$

Jika drop tegangan pada tahanan R diabaikan, maka persamaan (5)

$$\frac{d\bar{i}(t)}{dt} \cong \frac{1}{L} \left\{ \bar{e}(t) - \frac{1}{2} \bar{s}(t) v_0(t) \right\} \quad (6)$$

(4) dan (6) adalah persamaan non linier dan tergantung pada  $\bar{s}(t)$ , sehingga

$$\bar{s}(t) = \frac{2}{v_0(t)} \left[ \bar{e}(t) - L \frac{d\bar{i}(t)}{dt} \right] \quad (7)$$

### 3. Perencanaan Pengendali Logika Fuzzy

Karena implementasi digital, space vector yang dibutuhkan

$$\bar{e}_n = \hat{E} \exp(j\omega t_n)$$

$$\bar{i}_n^* = \hat{I}_n^* \exp(j\omega t_n)$$

$$\bar{s}_n = \hat{S}_n \exp[j(\omega t_n + \varphi_{s,n})] \quad (8)$$

Dengan  $t_n = n T_s$  adalah variabel waktu discrete dan  $T_s$  adalah periode sampling yang dipilih. Vektor switching  $s_n$ , maka persamaan (7) menjadi

$$\bar{s}_n = \frac{2}{v_{0,n}} \left( \bar{e}_n - L \frac{\hat{I}_n - \hat{I}_{n-1} \exp(-j\omega T_s)}{T_s} \exp(j\omega t_n) \right) \quad (9)$$

Dalam frame d-q, persamaan (9) menjadi

$$s_{n,d} \cong \frac{2}{V_{o,n}} \left( \hat{E} - \frac{L}{T_s} (\hat{I}_n - \hat{I}_{n-1} \cos(\omega T_s)) \right) \quad (10)$$

$$s_{n,q} \cong \frac{2}{V_{o,n}} (-\omega L \hat{I}_{(n-1)})$$

Jika  $\omega_s = (2\pi)/T_s \gg \omega$  dan  $\omega T_s = (2\pi\omega/\omega_s) \rightarrow 0$  maka (10) menjadi

$$s_{n,d} \cong \frac{2}{V_{o,n}} \left( \hat{E} - \frac{L}{T_s} \Delta \hat{I}_n \right) \quad (11)$$

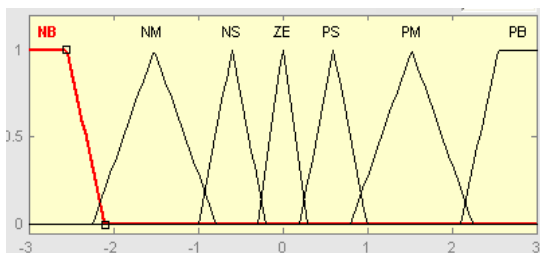
$$s_{n,q} \cong \frac{2}{V_{o,n}} (-\omega L \hat{I}_{(n-1)})$$

Persamaan (11) merupakan dasar interface bukan fuzzy diantara dua pengaturan fuzzy. Dari persamaan (11) jelas menunjukkan bahwa tujuan untuk menghindari vector arus referensi atau tanpa sensor arus dapat terwujud.

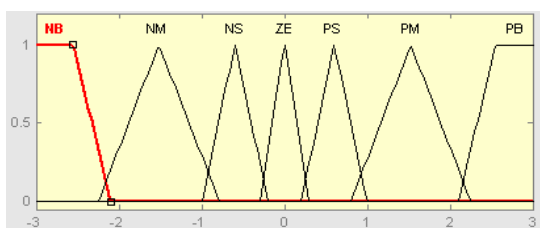
Perencanaan pengaturan meliputi 2 hal:

- Perencanaan pengaturan tegangan output (dc) menggunakan logika fuzzy. Pengaturan ini

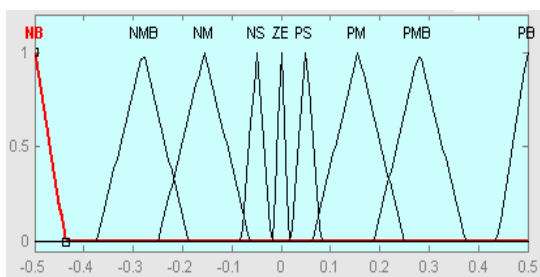
bertujuan untuk meminimasi  $\Delta v_o$  dengan mengatur amplitudo dari  $\hat{\Delta i}_n$ . Perubahan tegangan output  $\Delta v_o$  dan penyimpangannya  $\delta$  ( $\Delta v_o$ ) dipilih sebagai variable input fuzzy dengan fungsi keanggotaan dinyatakan dalam gambar 2 dan 3. Output fuzzy yaitu  $\hat{\Delta i}_n$  dengan fungsi keanggotaan dinyatakan dalam gambar 4 dengan aturan fuzzy dituliskan dalam Tabel 1.



Gambar 2. Fungsi keanggotaan dari  $\Delta V_0$



Gambar 3. Fungsi Keanggotaan dari  $\delta(\Delta V_0)$



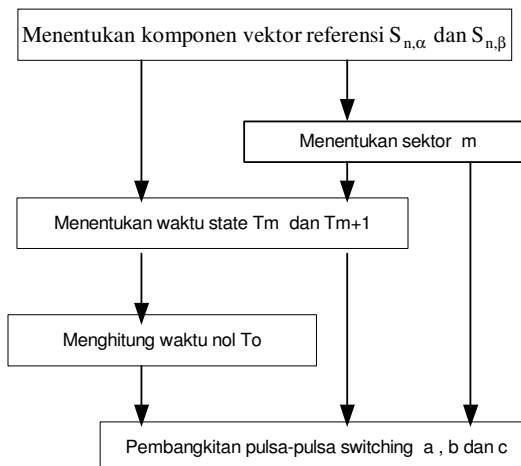
Gambar 4. Fungsi Keanggotaan output fuzzy  $\hat{\Delta i}_n$

Tabel 1. Aturan Fuzzy  $\hat{\Delta i}_n$

$\Delta V_o$ → $\delta \Delta V_o$ ↓	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NMB	NM	NM	NS	NS	ZE
NM	NMB	NM	NM	NS	NS	ZE	PS
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
PM	NS	ZE	PS	PS	PS	PM	PMB
PB	ZE	PS	PS	PM	PM	PMB	PB

- b. Logika Fuzzy untuk Modulasi SVPWM  
Pemilihan pola PWM menggunakan  $S_{n,d}$  dan  $S_{n,q}$  yang ditransformasikan ke dalam frame  $\alpha - \beta$

Algoritma SVPWM (*Space Vector PWM*) dapat dilukiskan dalam bentuk diagram alir sebagaimana terlihat pada gambar 5.



Gambar 5. Algoritma SVPWM

- Menentukan komponen vektor referensi dengan menggunakan komponen-komponen  $[S'_{a,n} \ S'_{b,n} \ S'_{c,n}]$  dari vektor normalisasi  $S'_n = S_n / |S_n|$
- Menentukan sector, dengan Tabel 2.

Tabel 2. Menentukan sector dengan evaluasi tanda  $[S_{ab,n}, S_{bc,n}, S_{ca,n}]$

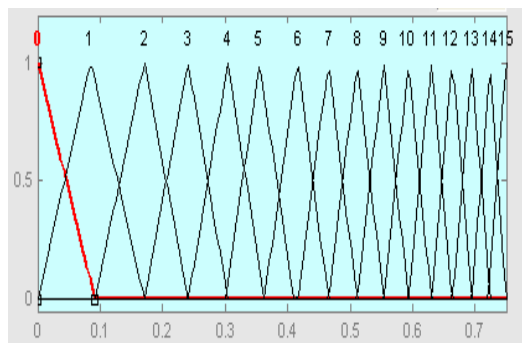
$S_{ab,n}$	$S_{bc,n}$	$S_{ca,n}$	Sektor
+	+	-	$0^\circ < \varphi_n < 60^\circ$
-	+	-	$60^\circ < \varphi_n < 120^\circ$
-	+	+	$120^\circ < \varphi_n < 180^\circ$
-	-	+	$180^\circ < \varphi_n < 240^\circ$
+	-	+	$240^\circ < \varphi_n < 300^\circ$
+	-	-	$300^\circ < \varphi_n < 360^\circ$

- Menentukan waktu state  $T_m$  dan  $T_{m+1}$ .  
Menentukan  $T_{m+1}$  dapat digunakan Tabel 3.

Tabel 3. Mengevaluasi  $T_{m+1}$  dan menghitung input fuzzy modulasi

Sektor	I	II	III	IV	V	VI
$\frac{T_{m+1,n}}{T_s  S_n }$	$\frac{S_{bc,n}}{2}$	$-\frac{S_{ab,n}}{2}$	$\frac{S_{ca,n}}{2}$	$-\frac{S_{bc,n}}{2}$	$\frac{S_{ab,n}}{2}$	$-\frac{S_{ca,n}}{2}$

Menentukan  $T_m$  dengan pengaturan logika fuzzy menggunakan  $S_{ab,n}, S_{bc,n}, S_{ca,n}$  sebagai input fuzzy yang sesuai dengan Tabel 3. diatas. Gambar 6 merupakan fungsi keanggotaan output dari fuzzy dan Tabel 4 merupakan aturan fuzzy.



Gambar 6. Fungsi keanggotaan output  $T_m$

Tabel 4. Aturan Fuzzy untuk  $T_m$

$S_{bc,n}$		$\frac{T_{m,n}}{T_s  S_n }$
0	→	15
1	→	14
2	→	13
3	→	12
4	→	11
5	→	10
6	→	9
7	→	8
8	→	7
9	→	6
10	→	5
11	→	4
12	→	3
13	→	2
14	→	1
15	→	0

4. Menghitung waktu  $T_0 = T_s - T_m - T_{m+1}$

#### 4. Hasil Simulasi

Untuk simulasi, tuning sistem yang dipilih, yaitu:

- Daya input 3,5 kW
- Base impedans 40  $\Omega$
- Tegangan dc output 650 Volt
- Arus beban 5 A

Simulasi dilakukan dengan mengubah parameter-parameter (frekwensi switching, induktor jaringan dan kapasitor output). Hasil analisa dapat dilihat pada Tabel 5 dan 6 dibawah ini.

Tabel 5. Hasil simulasi untuk perubahan nilai induktor

$L$ (%)	3	6	9
$THD$ (%)	9,5	8,3	14
$\Delta I$ (%)	15	0,5	5
$Pf$	0,8865	0,9957	0,9896

Tabel 6. Hasil simulasi untuk perubahan nilai frekwensi switching

$F_{sw}$ (kHz)	3	6	9
$THD$ (%)	9,5	8,3	4,9
$\Delta I$ (%)	15	0,5	0,5
$Pf$	0,9656	0,9957	0,997

Dari Tabel 5 terlihat dengan jelas nilai inductor 6% dari base impedance (8 mH) memberikan perbaikan pada sistem.

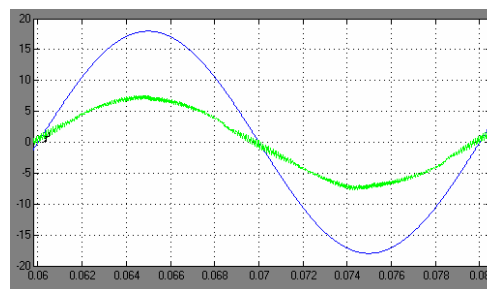
Pada Tabel 6 dengan dipilihnya nilai  $L = 8mH$ , dilakukan analisa dengan mengubah nilai frekwensi switching. Hasilnya menunjukkan, pada  $f_{sw} = 9$  kHz nilai  $THD = 4,96\%$ ,  $\Delta I = 0,5\%$ ,  $Pf = 0,997$ .

Dengan demikian parameter-parameter yang digunakan dalam melakukan simulasi ditampilkan dalam Tabel 7.

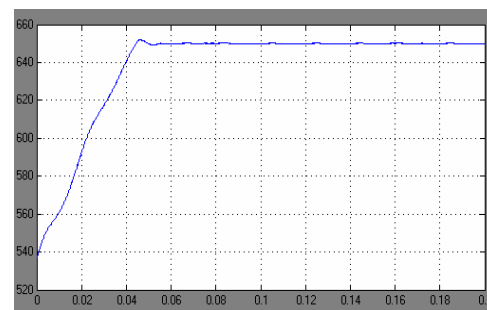
Tabel 7. Nilai dari parameter-parameter rangkaian

Tahanan Jaringan (R)	0,3	[ $\Omega$ ]
Induktor Jaringan (L)	8	[mH]
Kapasitor (C)	1000	[ $\mu F$ ]
Tegangan sumber (rms) (E)	220	[V]
Frekwensi Jaringan (f)	50	[Hz]
Tegangan DC ref.	650	[V]
Frekwensi sampling / switching ( $f_{sw}$ )	9	[kHz]

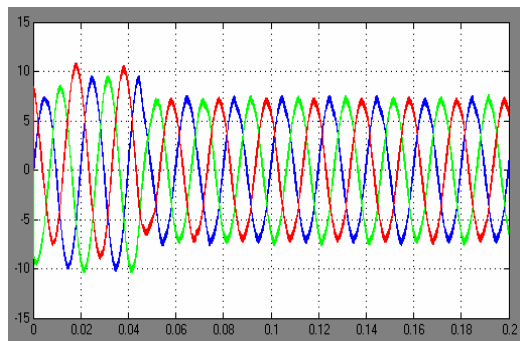
Hasil simulasi yang diperoleh ditampilkan pada gambar 7, 8, 9.



Gambar 7. Tegangan dan arus jaringan



Gambar 8. Tegangan dc (tegangan output)



Gambar 9. Arus jaringan

## 5. Kesimpulan

Dengan pengaturan logika fuzzy tidak membutuhkan sensor arus, sehingga mengurangi biaya dalam melakukan implementasi

Pengaturan arus feedforward menggunakan logika fuzzy untuk regulasi tegangan dc dan modulasi SVPWM telah menghasilkan unity power factor dan THD <5 % dari arus jaringan sinusoida

## Daftar Pustaka

- [1] Ashari, M., W. W. L. Keerthipala dan C. V. Nayar, "A Single Phase Parallely Connected Uninterruptible Power Suply/ Demand Side Management System", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 15, No. 1, March 2000, pp. 97-102
- [2] Nayar, C. V., and M. Ashari, "Phase Power Balancing of a Diesel Generator Using a Bi-Directional PWM Inverter", IEEE Power Engineering Review, vol. 19, no. 11, Nov 1999, pp.46-47.
- [3] Tony Siebert, Anders Troedson, Stephen Ebner, "AC to DC Power Conversion Now and in the Future", Copyright Material IEEE, Paper No. PCIC-2001-14.
- [4] T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, "Direct Power Control of PWM Converter without Power Source Voltage Sensor" IEEE. Trans. Ind. Applicat, May/June 1999.
- [5] M.Sc. Mariusz Malinowski, "Sensorless Control Strategies for Three-Phase PWM Rectifiers", Warsaw University of Technology, Poland 2001.
- [6] Hasan, Osman, "Lipunov-Based Control for three-Phase PWM AC/DC Voltage-Source Converters", IEEE Trans. Power Electronic Sept. 1998.
- [7] J. F. Silva, "Sliding-Mode Control of Boost-Type Unity Power factor PWM Rectifiers", IEEE Trans. Ind Electron, June 1999.
- [8] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Design and Control of an LCL-filter based active rectifier", in Conf. Rec. 36 th IEEE-IAS Annu Meeting, Chicago, IL, Sept. 30-Oct.4, 2001, pp. 297-307.
- [9] Mauridhi Hery Purnomo, "Analisa Converter DC-DC Paralel Non Identik Menggunakan Fuzzy Logic Controller" Seminar Mesin Elektrik dan Elektronika Daya 2001, di Surabaya 2001 (co-author).
- [10] Carlo Cecati, Antonio Dell' Aquila, Marco Liserre and Antonio Ometto, "A Fuzzy Logic-Based Controller for Active Rectifier", IEEE Trans. Ind. Application, vol 39, no. 1 Jan.-Feb. 2003.
- [11] A. Dell'Aquila, L. Caponio, M. Liserre, C. Cecati, and Ometto, "A fuzzy Logic Feedforward Current controller for PWM Rectifier", IEEE IAS, Dec. 2000.
- [12] D. W. Novotny and T. A. Lipo, "Vector Control and Dynamics of AC Drives", Departement of Electrical and Computer Engineering University of Wisconsin-Madison USA., 1996.
- [13] S. B. Dewan and A. Straughen, "Power Semiconductor Circuits", John Wiley & Sons, Inc.1975.
- [14] Muhammad H. Rashid, "Power Electronics Circuits, Devices, and Applications 2<sup>nd</sup> Ed.," Prentice-Hall Internatonal, Inc.1993.