

# Pengaturan Arus Feed-Forward pada PWM Rectifier menggunakan Fuzzy Logic

*By Saidah Saidah*

# Pengaturan Arus *Feed-Forward* pada PWM Rectifier menggunakan *Fuzzy Logic*

Saidah

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, UBHARA Surabaya  
Jl. A. Yani 114 Surabaya, Telp/Fax : 031-8285602 / 031-8291107  
Email : [sdhbaisa61@yahoo.com](mailto:sdhbaisa61@yahoo.com)

## Abstrak

Penelitian ini menampilkan metode pengaturan untuk PWM (Pulsa Width Modulation) rectifier. Tujuan utama mengatur arus masukan dari jaringan pada PWM rectifier (arus *feed-forward*) untuk memperoleh *unity power factor*, arus masukan sinusoidal dan tegangan output konstan. Pengaturan arus masukan ini menggunakan *Fuzzy logic* berdasarkan pada error yang terjadi pada tegangan output. Pengaturan dilakukan dengan memilih pola switching dan duty cycle pada PWM rectifier. Simulasi dilakukan dengan software MATLAB dan menghasilkan karakteristik yang baik serta diharapkan akan memperkecil biaya apabila dilakukan implementasi.

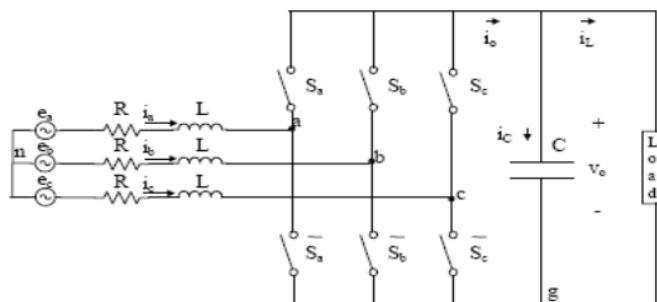
Kata kunci : PWM, *Fuzzy Logic*

## 1. Pendahuluan

Tujuan utama dari pengaturan arus *feed forward* pada PWM rectifier adalah untuk memperoleh kinerja yang baik dari PWM rectifier, yaitu *unity power factor*, arus masukan sinusoidal dan tegangan output konstan yang tidak tergantung pada perubahan beban. Pada penelitian sebelumnya telah banyak dilakukan untuk memperoleh kinerja yang baik dari PWM rectifier diantaranya dengan metode Lyapunov [2], Sliding Mode [3], pengaturan arus *feed forward* [4]. Metode-metode tersebut telah menghasilkan kinerja yang baik dari PWM rectifier, tetapi persoalannya bagaimana bila dilakukan implementasi secara real time dengan mikrokontroler.

Biasanya teknik yang dilakukan dengan metode tersebut terdiri dari dua kontrol loop baik pengaturan pada tegangan output DC maupun pada arus input sehingga membutuhkan sensor tegangan maupun sensor arus. Dengan adanya metode pengaturan arus *feed forward* yang tidak menggunakan sensor arus disamping mengurangi biaya untuk implementasi juga menyederhanakan PWM rectifier. Dengan alasan ini, maka penelitian ini dilakukan. Pengaturan arus *feed forward* sekaligus juga menentukan pola switching dan duty cycle dari Space vector PWM. Setelah gambaran detail dari metode pengaturan *feed forward* ditampilkan didalam paper, kemudian dilakukan simulasi dengan menggunakan MATLAB.

## 2 Analisa Sistem



Gambar 1. PWM Rectifier Tiga Fasa

Switch  $S_j$  dan  $\bar{S}_j$  menyatakan tertutup dan terbuka atau sebaliknya.

$P_j$  sebagai fungsi switching dengan switch  $S_j$

- $P_j = +$  jika  $S_j$  tertutup dan  $\bar{S}_j$  terbuka
- $P_j = -$  jika  $S_j$  terbuka dan  $\bar{S}_j$  tertutup ( $j=a,b,c$ )

Tegangan phasa netral 
$$V(t) = K \cdot p(t) V_0(t) \quad (1)$$

Dengan 
$$V(t) = [V_{an}(t) \ V_{bn}(t) \ V_{cn}(t)]^T$$
  

$$p(t) = [p_a(t) \ p_b(t) \ p_c(t)]^T$$
  

$$K = \frac{1}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Jika  $i_a + i_b + i_c = 0$ , maka besar arus beban 
$$i_0 = \frac{1}{2} p(t) \cdot i(t) \quad (3)$$
  

$$i(t) = [i_a(t) \ i_b(t) \ i_c(t)]^T$$

Maka persamaan tegangan 
$$V(t) = e(t) - L \frac{di(t)}{dt} - Ri(t) \quad (4)$$
  

$$e(t) = [e_a(t) \ e_b(t) \ e_c(t)]^T \quad (5)$$

Substitusi (1) dan (4) 
$$\frac{di(t)}{dt} = -\frac{R}{L} i(t) + \frac{1}{L} e(t) - \frac{1}{L} K \cdot p(t) V_0(t) \quad (6)$$

Arus yang melewati kapasitor 
$$i_c(t) = C \frac{dv_0(t)}{dt} = i_0(t) - i_L(t) \quad (7)$$

Substitusi (3) dan (7) 
$$\frac{dv_0(t)}{dt} = \frac{1}{2C} p(t) \cdot i(t) - \frac{1}{C} i_L(t) \quad (8)$$

### 3. Strategi Pengaturan

Diasumsikan tegangan sumber sebagai :

$$\begin{cases} e_a = \hat{E} \cos(\omega t) \\ e_b = \hat{E} \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ e_c = \hat{E} \cos(\omega t - \frac{4}{3}\pi) \end{cases} \quad (9)$$

Vektor 
$$\bar{e} = \frac{2}{3} (e_a(t) + \alpha \cdot e_b(t) + \alpha^2 \cdot e_c(t)) = \hat{E} e^{j\omega t} \quad (10)$$

Dengan  $\alpha = \exp(j\frac{2}{3}\pi)$

Karena arus input yang diinginkan sinusoidal dan mempunyai fasa yang sama dengan tegangan, vektor arus yang dikehendaki dalam kondisi steady state adalah

$$\bar{i}^* = \frac{2}{3} (i_a^* + \alpha \cdot i_b^* + \alpha^2 i_c^*) = \hat{I} e^{j\omega t} \quad (11)$$

$$\bar{i}^* = \hat{I}(t) e^{j\omega t} \quad (12)$$

Tegangan input space vector

$$\bar{V} = \frac{1}{2} \bar{S}(t) v_0(t) \quad (13)$$

Dengan  $\bar{S}(t)$  adalah vektor switching

$$\bar{S} = \frac{2}{3} (S_a + \alpha \cdot S_b + \alpha^2 S_c) = \hat{I} e^{j\omega t} \quad (14)$$

Dan  $-1 \leq S_j \leq 1$  ( $j = a, b, c$ ) merupakan fungsi switching

Bila R diabaikan, maka persamaan menjadi

$$\frac{d}{dt} \bar{i} \cong \frac{1}{L} \bar{e} - \frac{1}{2L} \bar{S} v_0 \quad (15)$$

Untuk mencapai power factor (PF=1) dan arus sinusoidal, space vector  $\bar{S}$  menjadi

$$\bar{S} = \hat{S}(t) e^{j(\omega t + \alpha)} = \frac{2}{v_0} \left( \bar{e} - L \frac{d\bar{i}}{dt} \right) \quad (16)$$

Agar tercapai pengaturan arus feed forward,  $\bar{S}$  diperoleh sebagai fungsi dari vektor arus  $\bar{i}^*$

$$\bar{S} = \hat{S}(t) e^{j(\omega t + \alpha)} = \frac{2}{v_0} \left( \bar{e} - L \frac{d\bar{i}^*}{dt} \right) \quad (17)$$

Dengan menganggap waktu sampling  $T_s$ , maka

$$\begin{aligned} \bar{e}_n &= \hat{E} \\ \bar{i}_n^* &= \hat{I}_n e^{j\omega t_n} \\ \bar{S}_n &= \hat{S}_n e^{j(\omega t_n + \alpha)} \end{aligned} \quad (18)$$

Dengan subscript "n" menentukan  $t_n = n T_s$

$\Delta \bar{i}^*$  merupakan perubahan arus input reference diantara dua waktu sampling

$$\Delta \bar{i}^* = (\hat{I}_n e^{j\omega t_n} - \hat{I}_{n-1} e^{j\omega(t_n - T_s)}) = (\hat{I}_n - \hat{I}_{n-1} e^{-j\omega T_s}) e^{j\omega t_n} \quad (19)$$

Dengan vektor switching  $\bar{S}_n$  dapat dinyatakan sebagai

$$\bar{S}_n = \frac{2}{v_{on}} \left( \bar{e}_n - L \frac{\Delta \bar{i}^*}{\Delta t} \right) \quad (20)$$

Dari (19) dan (20)

$$\bar{S}_n = \frac{2}{v_{on}} \left( \hat{E} - \frac{L}{T_s} (\hat{I}_n - \hat{I}_{n-1} e^{-j\omega T_s}) \right) e^{j\omega t_n} = \frac{2}{v_{on}} \bar{a}_n e^{j\omega t_n} \quad (21)$$

$$\bar{a}_n = \left( \hat{E} - \frac{L}{T_s} (\hat{I}_n - \hat{I}_{n-1} e^{-j\omega T_s}) \right) \quad (22)$$

Dan

$$Re(\bar{a}_n) = \left( \hat{E} - \frac{L}{T_s} (\hat{I}_n - \hat{I}_{n-1} \cos(\omega T_s)) \right)$$

$$Im(\bar{a}_n) = \left( -\frac{L}{T_s} \cdot \hat{I}_{n-1} \sin(\omega T_s) \right)$$

Karena  $\omega_s = \frac{2\pi}{T_s} \gg \omega$ ,  $\omega T_s = \frac{2\pi\omega}{\omega_s} \rightarrow 0$  dan persamaan diatas menjadi

$$Re(\bar{a}_n) = \left( \hat{E} - \frac{L}{T_s} \nabla \hat{I}_n \right) \quad (23)$$

$$Im(\bar{a}_n) \cong -L\omega \cdot \hat{I}_{n-1}$$

Bagian real dan Imaginer dari  $\bar{a}_n$  tergantung pada

1. Perbedaan diantara magnitudo arus pada saat  $t_n$  dan  $t_{n-1}$  ( $\Delta \hat{I}_n$ )
2. Magnitudo arus pada  $t_{n-1}$

$$Re(\bar{S}_n) = \frac{2}{v_{on}} [Re(\bar{a}_n) \cos(\omega \cdot t_n) - Im(\bar{a}_n) \sin(\omega \cdot t_n)] \quad (24)$$

$$Im(\bar{S}_n) = \frac{2}{v_{on}} [Im(\bar{a}_n) \cos(\omega \cdot t_n) + Re(\bar{a}_n) \sin(\omega \cdot t_n)]$$

3. Langkah pertama menentukan sektor (vektor switching reference  $\bar{S}_n$ ) dengan melalui tabel switching  $S_{ab} = S_a - S_b$ ;  $S_{bc} = S_b - S_c$ ;  $S_{ca} = S_c - S_a$

Table I -  $\bar{S}_n$  sextant through  $[s_{ab}, s_{bc}, s_{ca}]$  signs evaluation

$\bar{S}_n$ sextant	( $s_{ab}$ ) sign	( $s_{bc}$ ) sign	( $s_{ca}$ ) sign
$0^\circ < \omega t < 60^\circ$	+	+	-
$60^\circ < \omega t < 120^\circ$	-	+	-
$120^\circ < \omega t < 180^\circ$	-	+	+
$180^\circ < \omega t < 240^\circ$	-	-	+
$240^\circ < \omega t < 300^\circ$	+	-	+
$300^\circ < \omega t < 360^\circ$	+	-	-

Jika  $\bar{S}_n$  terdeteksi, duty cycles dari modulasi space vektor diperoleh

$$\frac{T_{1,n}}{T_s|S_n|} = \frac{3}{4} \left( \cos(\varphi_n - \frac{\sin \varphi_n}{\sqrt{3}}) \right) \quad (25)$$

$$\frac{T_{2,n}}{T_s|S_n|} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi_n$$

Sudut  $\varphi = \arcsin\left(\frac{S_{bc}}{\sqrt{3}}\right)$

Maka  $\left(\frac{T_{2,n}}{T_s|S_n|}\right)$  dapat diperoleh sebagai fungsi dari  $S_{bc}$  dan  $\frac{T_{1,n}}{T_s|S_n|}$  dapat diperoleh dari Tabel II

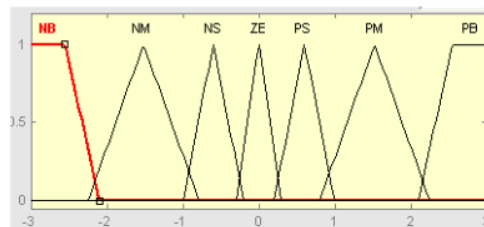
**Table II –  $T_1/(T_s|S_n|)$  evaluation through  $s_{bc}$**

$s_{bc}$	$\varphi$	$T_1/(T_s S_n )$
0.0	0.00°	0.75
0.1	3.31°	0.72
0.2	6.63°	0.69
0.3	9.98°	0.66
0.4	13.35°	0.63
0.5	16.78°	0.59
0.6	20.27°	0.55
0.7	23.84°	0.51
0.8	27.51°	0.46
0.9	31.31°	0.42
1.0	35.26°	0.36
1.1	39.43°	0.30
1.2	43.85°	0.24
1.3	48.64°	0.17
1.4	53.93°	0.09
1.5	60.00°	0.00

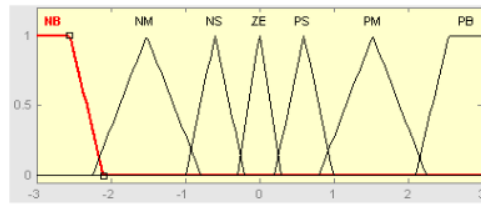
#### 4. Pengaturan Logika Fuzzy

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  $\Delta V_o$



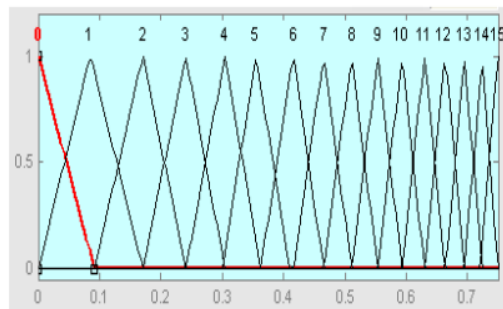
Gambar 3 Fungsi Keanggotaan dari  $\delta(\Delta V_0)$

Tabel III. Aturan fuzzy pada  $\Delta \hat{f}$

$\Delta \hat{f}$ $\delta(\Delta v_o)$	$\Delta V$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB		NB	NMG	NM	NM	NS	NS	ZE
NM		NMG	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	FMB
PB		ZE	PS	PS	PM	PM	FMB	PB

Tabel IV Menentukan  $T_2$

Sextant	I	II	III	IV	V	VI
$\frac{T_2}{T_s  s_n }$	$\frac{s_{bc}}{2}$	$-\frac{s_{ab}}{2}$	$\frac{s_{ca}}{2}$	$-\frac{s_{bc}}{2}$	$\frac{s_{ab}}{2}$	$-\frac{s_{ca}}{2}$



Gambar 4. Fungsi keanggotaan output  $T_2$

Tabel 4. Aturan Fuzzy untuk  $T_2$

$S_{bc,n}$		$\frac{T_{m,n}}{T_s  S_n }$
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. 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 <sub>sw</sub> (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.

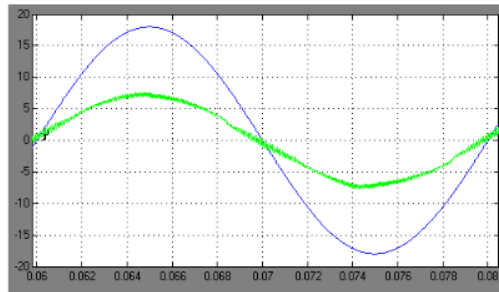
Pada Tabel 6 dengan dipilihnya nilai L = 8mH, dilakukan analisa dengan mengubah nilai frekwensi switching. Hasilnya menunjukkan, pada f<sub>sw</sub> = 9 kHz nilai THD = 4,96 % ,  $\Delta I$  = 0,5 % , Pf = 0,997

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

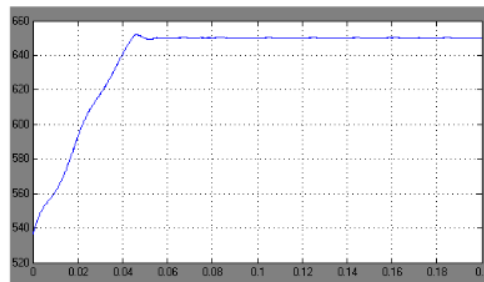
Tabel 7. Nilai dari parameter-parameter rangkaian

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]
<b>Frekwensi sampling / switching (f<sub>sw</sub>)</b>	<b>9</b>	<b>[kHz]</b>

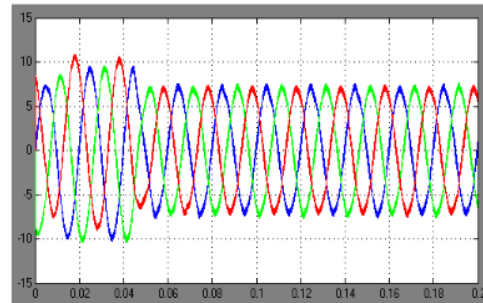
Hasil simulasi yang diperoleh ditampilkan pada gambar 7, 8, 9



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*”, Warsawa University of Technology, Poland 2001.
- [6] Hasan, Osman, “*Liapunov-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.

# Pengaturan Arus Feed-Forward pada PWM Rectifier menggunakan Fuzzy Logic

---

ORIGINALITY REPORT

---

6%

SIMILARITY INDEX

---

## PRIMARY SOURCES

---

1	<a href="http://nssdcftp.gsfc.nasa.gov">nssdcftp.gsfc.nasa.gov</a> Internet	32 words — 2%
2	<a href="http://www.scribd.com">www.scribd.com</a> Internet	12 words — 1%
3	<a href="http://docplayer.com.br">docplayer.com.br</a> Internet	9 words — 1%
4	C. Cecati, A. Dell'Aquila, M. Liserre, A. Ometto. "A low cost fuzzy logic active rectifier", Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting (Cat. No.01CH37248), 2001 Crossref	8 words — 1%
5	<a href="http://www.jatit.org">www.jatit.org</a> Internet	8 words — 1%
6	<a href="http://www.labplan.ufsc.br">www.labplan.ufsc.br</a> Internet	8 words — 1%

---

EXCLUDE QUOTES OFF

EXCLUDE BIBLIOGRAPHY ON

EXCLUDE SOURCES OFF

EXCLUDE MATCHES OFF