

# Perancangan *Zeta Converter* yang dilengkapi *Power Factor Correction* pada Aplikasi Pengaturan Kecepatan Motor *Brushless DC*

Adhika Prajna Nandiwardhana, Heri Suryoatmojo, dan Mochamad Ashari

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: adhikaprajna@gmail.com, suryomgt@gmail.com, asharimd@yahoo.com

**Abstrak**—Penggunaan motor *brushless DC* telah banyak digunakan dalam berbagai bidang seperti peralatan rumah tangga maupun industri dikarenakan motor ini memiliki struktur yang sederhana, efisiensi dan torsi yang tinggi, serta menggunakan konsep komutasi listrik yang berbeda dari motor DC lainnya. Namun pengoperasian pada umumnya yang menggunakan sumber AC, penyearah serta inverter membuat tingginya nilai harmonisa arus (THD) sebesar 73,33% dan *power factor* sebesar 0,803 dimana nilai ini kurang baik dalam pengaplikasiannya. Pada penelitian ini akan dikaji mengenai proses *power factor correction* yang mereduksi harmonisa arus (THD) sumber AC dengan menggunakan *zeta converter* dalam pengaplikasian motor *brushless DC*, serta pengoperasian motor dengan mengamati respon motor terhadap kecepatan referensi yang berubah-ubah dan mengamati kestabilan motor terhadap pembebanan yang bervariasi. Dalam menerapkan metode yang dilakukan pada penelitian ini, pengoperasian motor *brushless DC* yang telah dirancang dapat bekerja dengan baik meliputi respon motor yang dapat mengikuti kecepatan referensi yang berubah-ubah, serta kestabilan motor dalam mempertahankan kecepatannya pada pembebanan yang bervariasi. Proses *power factor correction* dapat meningkatkan kualitas daya pada berbagai kecepatan dan mode penerapan yang berbeda-beda, dimana peningkatan tersebut membuktikan kinerja yang baik dalam sistem ini dan memiliki nilai kualitas daya yang baik.

**Kata Kunci**— *Zeta Converter*, *Brushless DC*, *Power Factor*, Pengaturan Kecepatan, Harmonisa arus

## I. PENDAHULUAN

Motor *Brushless DC* memiliki struktur yang sederhana, efisiensi yang tinggi, torsi yang tinggi, dan sebagainya. Motor ini banyak digunakan pada aplikasi di bidang *aerospace*, robotik, industri proses, peralatan rumah tangga, peralatan mesin yang presisi, dan lain-lain [1]. Konstruksi dari motor *brushless DC* sangat mirip dengan motor sinkron AC. Motor ini memiliki proses pendeteksian posisi dari rotor pada motor (kutub magnet) untuk menghasilkan sinyal yang dapat mengontrol proses komutasi secara listrik. Sensor yang biasa digunakan pada motor ini adalah Hall, tetapi beberapa motor ada yang memakai sensor optik [2].

Dalam pengoperasiannya, motor *brushless DC* biasanya dioperasikan pada metode yang konvensional, dimana menggunakan *diode bridge rectifier* (DBR) dengan nilai kapasitor *dc-link* yang. Akibatnya akan membuat tingginya nilai harmonisa arus (THD) yang ada pada sisi sumber AC. Sehingga nilai-nilai kualitas daya pada sumber AC menjadi perhatian yang semakin bertambah penting [3].

Dalam banyaknya permasalahan dalam kualitas daya, dapat dilakukan pemecahan masalah seperti menggunakan filter pasif, filter aktif dan filter *hybrid* yang biasanya digunakan bersamaan dengan penyearah konvensional.

Metode-metode seperti ini biasa digunakan pada kapasitas daya yang cukup tinggi, dan pada sistem yang telah ada (*existing*). Penggunaan filter seperti ini terlihat cukup mahal, kurang menguntungkan dan bisa saja ada *losses* lainnya yang dapat mengurangi efisiensi dari sistem secara keseluruhan [4]. Cara lain adalah dengan menggunakan konverter *single-stage high power factor*, konverter *power factor correction* (PFC), konverter PFC *single-stage isolated* dengan input universal, dan lain-lain [5]. Pada konverter PFC dapat dioperasikan pada *Continuous Inductor Current Mode* (CICM) atau *Discontinuous Inductor Current Mode* (DICM). Akan tetapi untuk aplikasi daya rendah, mode DICM lebih cocok daripada mode CICM yang lebih cocok untuk aplikasi daya tinggi [6,7]. *Zeta Converter* akan digunakan karena dapat menaikkan maupun menurunkan tegangan dan pengoperasiannya sebagai PFC *Converter* yang baik [8].

Berdasarkan pertimbangan pada permasalahan yang ada, dilakukan penelitian mengenai *Zeta Converter* dalam pengaplikasian motor *brushless DC* yang dapat memperbaiki *power factor* dan mereduksi harmonisa arus, dan juga sebagai kontrol kecepatan motor. Konverter ini digunakan dan dapat dioperasikan dalam dua mode operasi konverter, dan di tiap modusnya akan menggunakan metode kontrol PFC yang berbeda, dan tentunya memiliki karakteristik yang berbeda sesuai kebutuhan aplikasi.

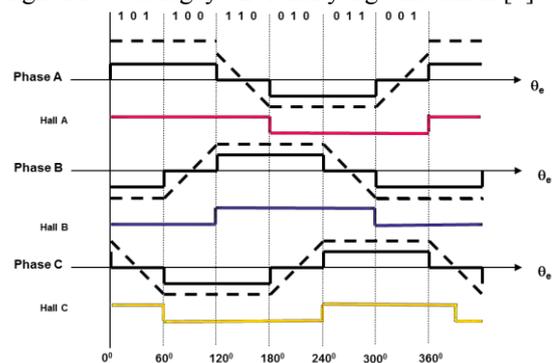
## II. DASAR TEORI

### A. Prinsip Kerja dan Komutasi Motor *Brushless DC*

Pada motor *brushless DC*, interaksi magnet terjadi antara kumparan pada stator, magnet permanen pada rotor, dan struktur besi pada keduanya. Adapun gaya Lorentz yang disebabkan medan magnet:

$$\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B} \tag{1}$$

Dimana, I adalah arus vektor sepanjang kumparan, L adalah panjang konduktor, dan B adalah medan magnet vektor. Sedangkan F adalah gaya Lorentz yang dihasilkan [9].

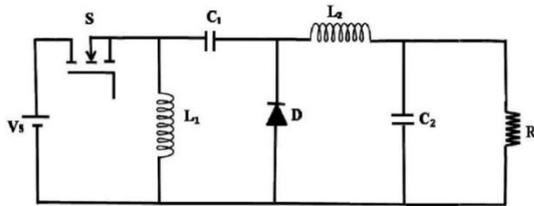


Gambar 2. Bentuk sinyal Hall dan tegangan motor [10]

Proses komutasi elektrik dilakukan dengan menggunakan sensor Hall yang diletakkan pada motor. Secara keseluruhan akan didapat bentuk gelombang tiap sensor dengan lebar pulsa sebesar 180°. Bentuk dari tegangan motor (*trapezoidal*) memiliki beda fasa sebesar 120 dan bergantung pada *sensing* sinyal Hall seperti gambar 2.

**B. Zeta Converter**

*Zeta Converter* merupakan salah satu jenis dari konverter buck-boost, akan tetapi memiliki kelebihan yaitu karena memiliki polaritas output yang tidak terbalik seperti pada gambar 3 [13].



Gambar 3. Skema rangkaian *Zeta Converter* [11]

Pada konverter ini terdapat dua siklus yaitu mode saklar ON dan OFF dimana akan didapat persamaan *duty cycle* serta persamaan nilai komponen tiap konverter berdasarkan analisa rangkaian hukum Kirchhoff.

$$\left(\frac{D}{1-D}\right) = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{I_{in}}{I_o} \tag{2}$$

$$D = \frac{V_o}{V_o + V_{in}} \tag{3}$$

Sesuai dengan penurunan persamaan yang dilakukan pada analisa rangkaian, nilai komponen konverter adalah:

$$L_i = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_{L_i} \cdot f_s} \tag{4}$$

$$L_o = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_{L_o} \cdot f_s} \tag{5}$$

$$C_1 = \frac{V_{DC} \cdot D}{\Delta V_{C_1} \cdot f_s \cdot R_L} \tag{6}$$

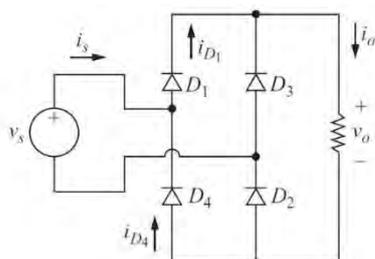
dimana,  $V_{in}$  merupakan tegangan rata-rata (*average*) sumber,  $D$  adalah *duty cycle*,  $f_s$  adalah frekuensi *switching* konverter, dan  $R_L$  adalah beban.

Untuk nilai dari kapasitor *dc-link* memiliki persamaan sebagai berikut [12]:

$$C_d = \frac{P_o}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta V_o \cdot V_o} \tag{7}$$

dimana,  $P_o$  adalah daya yang digunakan,  $f$  adalah frekuensi *line* AC yang digunakan, dan  $V_o$  adalah tegangan output yang ditentukan.

**C. Penyearah Gelombang Penuh**



Gambar 4. Rangkaian penyearah gelombang penuh [13]

Fungsi dari penyearah gelombang penuh secara umum sama seperti penyearah setengah gelombang. Rangkaian dari penyearah gelombang penuh diilustrasikan pada gambar 4 [13]. Persamaan tegangan rata-rata (*average*) pada penyearah ini adalah:

$$V_o = \frac{2V_m}{\pi} \tag{8}$$

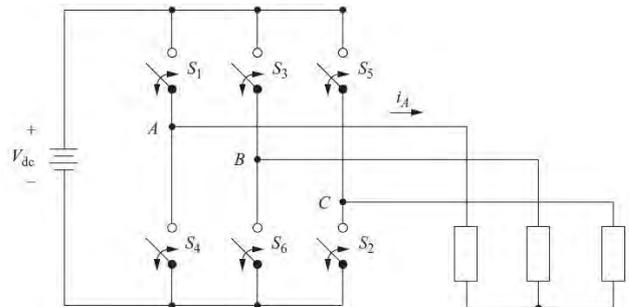
dan tegangan rms yang dihasilkan adalah [14]:

$$V_o = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = 0.707 V_m \tag{9}$$

dimana,  $V_m$  merupakan tegangan puncak dari sumber AC.

**D. Inverter Tiga Fasa**

Saklar pada inverter memiliki urutan konduksi yang berbeda-beda. sebuah proses konduksi terjadi setiap interval waktu  $T/6$ , atau dengan perbedaan sudut sebesar 60°. Saklar  $S_1$  dan  $S_4$ , begitu pula dengan  $S_2, S_5$  dan  $S_3, S_6$  berkonduksi secara berkebalikan, hal ini harus dilakukan agar tidak *close* secara bersamaan. Untuk mengontrol tegangan output inverter *six-step*, tegangan DC input harus diubah-ubah.



Gambar 5. Rangkaian Inverter Tiga Fasa [13]

**E. Filter DC**

Pada rangkaian PFC, digunakan filter DC. Untuk mendapatkan *input displacement factor* (IDF) yang tinggi ( $IDF = \cos \theta$ ), nilai kapasitor harus diminimalisir, sehingga nilai kapasitor maksimum adalah [15]:

$$C_{max} = \frac{I_m}{\omega V_m} \tan(\cos^{-1} IDF) \tag{10}$$

Induktor digunakan untuk mendapat komposisi yang cocok dengan kapasitor pada filter ini [16]:

$$L_f = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_c^2 \cdot C_f} \tag{11}$$

dimana,  $I_m$  dan  $V_m$  adalah arus dan tegangan maksimum sumber AC, dan  $f_c$  adalah frekuensi *cut-off*.

**F. Korelasi Antara Power Factor dengan Harmonisa**

*Total Harmonic Distortion* (THD) merupakan satuan untuk mendefinisikan *distortion factor* dari arus maupun tegangan. Untuk *power factor* dibagi menjadi tiga, yaitu *displacement PF* yang merupakan perbedaan sudut fasa gelombang tegangan dan arus ( $\cos(\delta_1 - \theta_1)$ ), *distortion PF* yang berhubungan dengan harmonisa, dan *true PF* yang merupakan rasio total daya input [17]. Untuk persamaan THD dan PF didapat persamaan sebagai berikut:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{krms}^2}}{I_{1rms}} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_k^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (12)$$

$$PF_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1+(THD\%)^2}} \quad (13)$$

Sehingga untuk mencari nilai *true* PF menggunakan perkalian antara *displacement* PF dengan *distortion* PF [18]:

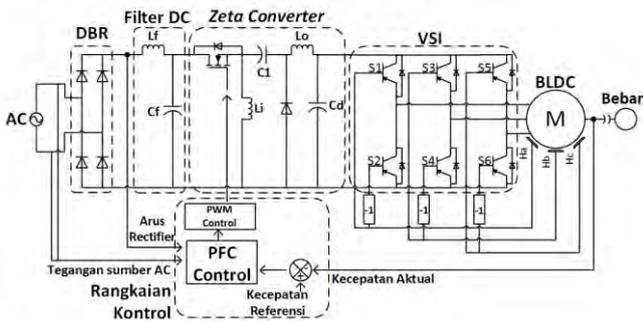
$$PF_{true} = PF_{disp} \cdot PF_{dist} = \frac{P_{avg}}{V_{1rms} I_{1rms}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1+(THD/100)^2}} \quad (14)$$

G. Sistem Kontrol Otomatis

Sistem kontrol otomatis diperlukan untuk menjaga kontinuitas dan kestabilan kecepatan motor dan untuk memperbaiki sinyal *error* dan respon suatu sistem. Terdapat dua kontroler, yang pertama kontroler proporsional yang memiliki fungsi untuk mengubah respon pada saat transien agar sesuai dengan *set point* nya pada kondisi saat *settling time*. Kedua adalah Kontroler integrator yang digunakan untuk menghilangkan *error* pada saat *steady state* dengan menggunakan prinsip pengintegralan. Konstanta pada kontroler integrator ini berpengaruh pada cepat atau lambatnya respon sistem dan dalam menghilangkan *offset* sistem [19].

III. PERANCANGAN ZETA CONVERTER DAN PEMODELAN SISTEM KONTROL KECEPATAN MOTOR BRUSHLESS DC BERBASIS POWER FACTOR CORRECTION

A. Konfigurasi Sistem



Gambar 6. Konfigurasi sistem kontrol kecepatan motor brushless DC

Sistem penggerak motor *brushless* DC ini menggunakan sumber listrik AC, *diode bridge rectifier* (DBR), filter DC, *zeta converter*, dan inverter khususnya *voltage source inverter* (VSI). Tegangan yang digunakan sebesar 220Vrms dengan *Vpeak* sebesar 311.127V dan tegangan sumber minimal sebesar 180Vrms dengan *Vpeak* sebesar 254.558V serta frekuensi sebesar 50Hz.

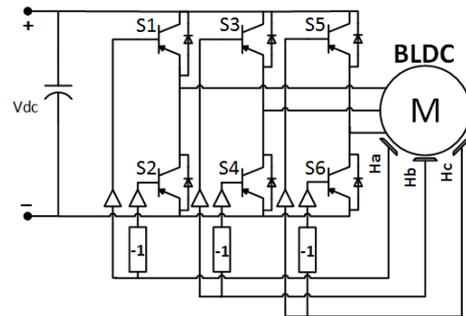
Tabel 1. Parameter Motor Brushless DC

Parameter	Nilai
Voltage	100Vdc
Rated Power	874 W
No Load Speed	2920 rpm
Rated Speed	2820 rpm
Rated Current	10.2 A
Rated Torque	2.9588 Nm
R (resistansi terminal)	0.408Ω
L (induktansi terminal)	1.71mH
Torque Constant (Nm/amp)	0.3269
Speed Constant (rpm/V)	29.2397
No. of Poles (P)	8
Rotor Inertia	0.00049399 kg.m <sup>2</sup>
Mech. Time Constant	1.9ms

*Zeta Converter* digunakan untuk menurunkan tegangan sumber DC yang besarnya adalah 198,71V (*maximum average voltage*) pada kondisi nominal atau 162,139V (*minimum average voltage*) ke tegangan sebesar 100V (*average voltage*). Inverter digunakan untuk menyuplai motor, dan *switching* inverter didapat dari *sensing* sensor Hall pada motor. Sistem kontrol kecepatan dengan kecepatan referensi yang diatur dan dibandingkan dengan sensor-sensor pada sistem ini, dimana kontrol ini akan mengatur *switching* konverter. Motor yang digunakan produk MOOG Components Group dengan tipe BN42-531P kode belitan 03.

B. Pemodelan Kontrol Logika Motor Brushless DC terhadap VSI Berbasis Sensor Hall-Effect

Sinyal yang dihasilkan oleh sensor Hall akan masuk ke On-Off Controller pada rangkaian, dimana tiap sensornya (Ha, Hb, dan Hc) mengirimkan sinyal ke dua gerbang *switching* dengan salah satu gerbang yang sinyal masukannya di *invert*.



Gambar 7. Rangkaian Feedback Motor berbasis Sensor Hall

Sehingga dengan metode kontrol logika yang dirancang akan dihasilkan proses *switching* inverter yang berbeda-beda pada tiap gerbangnya. Proses dari pergantian *switching* tiap gerbang pada inverter dapat ditunjukkan dan dijabarkan pada tabel 2.

Tabel 2. Proses pendeteksian sinyal sensor Hall

Sudut	Ha	Hb	Hc	S1	S2	S3	S4	S5	S6
0-60	0	-1	1	0	0	0	1	1	0
60-120	1	-1	0	1	0	0	1	0	0
120-180	1	0	-1	1	0	0	0	0	1
180-240	0	1	-1	0	0	1	0	0	1
240-300	-1	1	0	0	1	1	0	0	0
300-360	-1	0	1	0	1	0	0	1	0

C. Perancangan Zeta Converter

Pada perancangan ini, ditetapkan daya maksimum yang digunakan sebesar 900W pada kondisi *rated* dan daya minimum sebesar 6,3W. Tegangan DC yang ditentukan adalah 30V (*minimum*) dan 100V (*maksimum*) dan frekuensi *switching* yang digunakan adalah 20kHz.

Nilai induktor input akan dihitung dengan dua mode DCM dan CCM. Nilai dari induktor didapat dari persamaan:

$$L_i = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_{L_i} \cdot f_s} = \frac{V_s^2}{\eta \cdot f_s \cdot \Pi} \left( \frac{V_{dc}}{V_{dc} + V_{in}} \right)$$

Pada mode DCM akan ditentukan nilai *ripple* sebesar 2, dimana ini merupakan nilai kritis pada kondisi DCM:

$$L_{i100} = \frac{V_s^2}{2 \cdot f_s \cdot \Pi} \left( \frac{V_{dc}}{V_{dc} + V_{in}} \right)$$

$$= \frac{V_{avg_{min}}^2}{2 \cdot f_s \cdot P_{max}} \left( \frac{V_{dc_{max}}}{V_{dc_{max}} + V_{avg_{min}}} \right)$$

$$= 0,27857mH$$

$$L_{i30} = \frac{V_{avg_{min}}^2}{2 \cdot f_s \cdot P_{min}} \left( \frac{V_{dc_{min}}}{V_{dc_{min}} + V_{avg_{min}}} \right)$$

$$= 39,787mH$$

Pada mode DCM, nilai induktor yang digunakan pada kondisi:

$$L_i < L_{i100}$$

$$L_i < 0,27857mH$$

Sehingga ditetapkan nilai  $L_i$  mode DCM sebesar  $40\mu H$ .

Dalam mode CCM, ditentukan nilai *ripple* sebesar 0,15 nilai induktor input adalah:

$$L_i = \frac{V_{avg_{min}}^2}{\eta \cdot f_s \cdot P_{max}} \left( \frac{V_{dc_{max}}}{V_{dc_{max}} + V_{avg_{min}}} \right)$$

$$= 3,7143mH$$

Nilai induktor output ( $L_o$ ) dapat ditentukan pula melalui persamaan:

$$L_o = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta I_{L_o} \cdot f_s} = \frac{V_{dc_{max}}}{\eta \cdot V_{avg_{min}} \cdot f_s} \left( \frac{V_{avg_{min}}^2}{P_{max}} \right) \left( \frac{V_{dc_{max}}}{V_{dc_{max}} + V_{avg_{min}}} \right)$$

$$= 2.291mH$$

Untuk nilai kapasitor *intermediate* ( $C_1$ )

$$C_1 = \frac{V_{dc} \cdot D}{\Delta V_{C_1} \cdot f_s \cdot R_L} = \frac{P_{max}}{\eta \cdot (V_{dc_{max}} + V_{avg_{max}})^2 \cdot f_s}$$

$$= 4,05\mu F$$

Sedangkan untuk nilai kapasitor *dc-link* adalah:

$$C_d = \frac{P_i}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta V_{dc} \cdot V_{dc}} = \frac{P_{max}}{2 \cdot \pi \cdot f_{ine} \cdot \eta \cdot V_{dc_{max}}^2}$$

$$= 5,732mF$$

**D. Perancangan Filter DC**

Pada perancangan filter, dihitung nilai kapasitor dengan sudut sebesar  $1^\circ$  dan induktor berdasarkan persamaan:

$$C_{f_{max}} = \frac{(P_{max} / \sqrt{2} \cdot V_s)}{2 \cdot \pi \cdot f_{ine} \cdot V_m} \tan(\theta) = 516,843nF$$

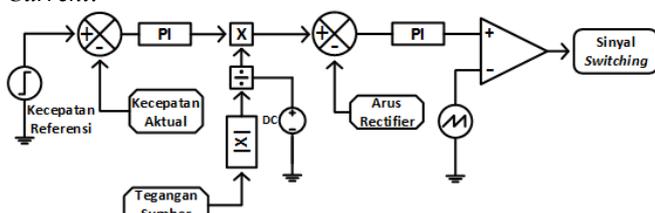
Berdasarkan perhitungan, ditentukan  $C_f$  sebesar 300nF.

$$L_f = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_c^2 \cdot C_f} = 21.13mH$$

Frekuensi *cut-off* yang digunakan adalah  $f_s/10$ .

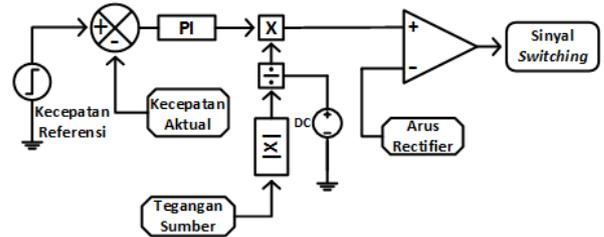
**E. Sistem Kontrol Kecepatan Motor dan PFC untuk Switching Konverter**

Pada sistem kontrol ini, untuk mengontrol pengoperasian motor memerlukan umpan balik (*feedback*) dari motor yang digunakan tersebut untuk mendapatkan nilai yang akan dibandingkan menjadi nilai *error* dan nantinya akan diperbaiki melalui kontroler sehingga motor yang diatur dapat beroperasi sesuai yang diinginkan. Dalam sistem ini digunakan kontrol metode *Average Current* dan *Hysteresis Current*.



Gambar 8. Sistem kontrol metode *Average Current*

Pada kontrol *Average Current* digunakan PI1 dengan konstanta  $K_p = 0,01$  dan  $K_i = 0,1$  serta PI2 dengan konstanta  $K_p = 10$  dan  $K_i = 5$ . Sedangkan pada *Hysteresis Current* menggunakan konstanta  $K_p = 0,01$  dan  $K_i = 0,1$ .

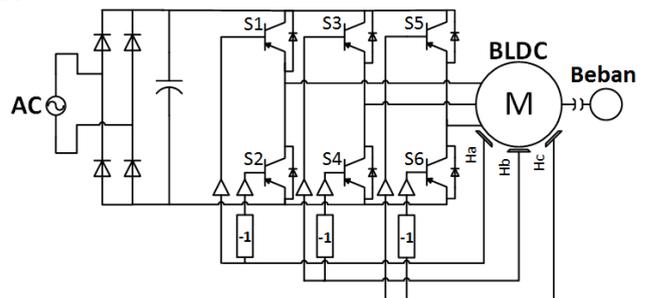


Gambar 9. Sistem kontrol metode *Hysteresis Current*

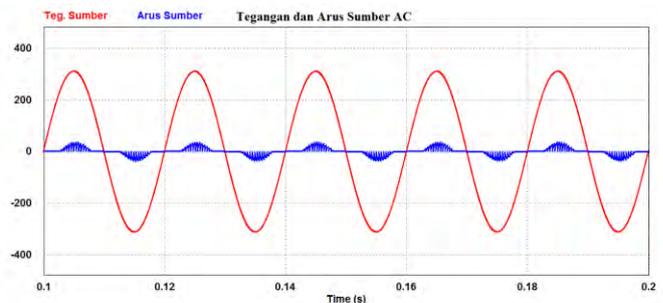
**IV. HASIL SIMULASI SISTEM DAN ANALISIS DATA**

**A. Pengoperasian Motor Brushless DC Metode Konvensional**

Sistem dengan metode konvensional ini menggunakan sumber AC dan penyearah untuk menyearahkan sumber listrik AC tersebut, akan tetapi setelah sumber disearahkan langsung masuk sebagai input dari *inverter*. Pada hasil simulasi metode konvensional ini, diamati tegangan dan arus pada sumber AC seperti yang ditunjukkan pada gambar 11.



Gambar 10. Motor Brushless DC Metode Konvensional



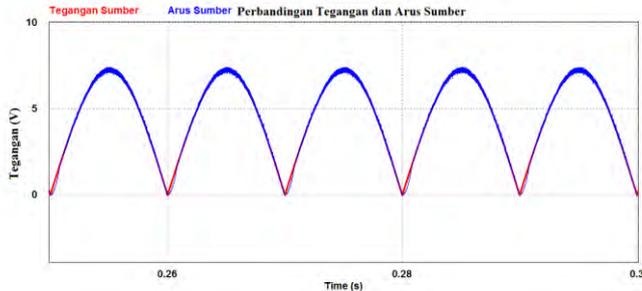
Gambar 11. Gelombang Tegangan dan Arus Sumber AC

Berdasarkan grafik, nilai dari THD arus yang terukur adalah sebesar 73,33% dan *displacement power factor* sebesar 0,8. Setelah dilakukan perhitungan, nilai *true power factor* didapat dari perkalian *displacement power factor* dengan *distortion power factor*, sehingga nilai dari *true power factor* sebesar 0,645. Nilai ini masih tergolong kurang baik dalam pengaplikasiannya.

**B. Analisis Sistem Kontrol Kecepatan Motor Brushless DC dengan Zeta Converter**

Konverter pada sistem ini dioperasikan dalam dua mode, yaitu mode DCM dan CCM. Untuk rangkaian kontrol PFC dirancang untuk mengatur kecepatan dari motor yang digunakan. Menggunakan umpan balik berupa kecepatan

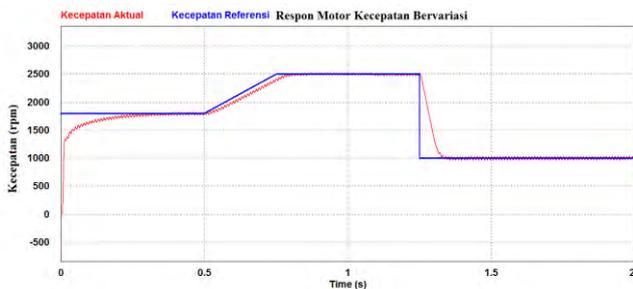
aktual, *sensing* tegangan sumber AC, dan *sensing* arus sumber di sisi DC. Proses *power factor correction* dilakukan perbandingan antara bentuk gelombang tegangan dengan arus pada sumber. Dalam mengolah sinyal kecepatan, dipengaruhi oleh konstanta  $K_p$  dan  $K_i$ , sehingga respon motor dalam mencapai *steady state* kisaran waktu 0,4 sekon. Dalam proses *power factor correction*, dilakukan perbandingan antara tegangan dan arus sumber AC, hasil tersebut dapat terlihat seperti gambar 12.



Gambar 12. Perbandingan Tegangan dan Arus Sumber AC

C. Pengujian Sistem Kontrol Motor Brushless DC dengan Metode yang Berbeda

Pada mode ini akan diamati pengujian motor terhadap kecepatan referensi yang berubah-ubah dan torsi beban yang berubah. Pengujian kecepatan akan diatur mulai kecepatan 1800 rpm ke 2500 rpm lalu 1000 rpm. Respon motor dapat terlihat seperti gambar 13, dimana pada saat perubahan kecepatan referensi, kecepatan motor akan mengikuti referensi tersebut. Pada kedua mode DCM dan CCM, respon motor dalam perubahan kecepatan terbilang sama dengan respon dari 1800 rpm ke 2500 rpm selama 0,075 sekon dan dari 2500 rpm ke 1000 rpm selama 0,1 sekon.

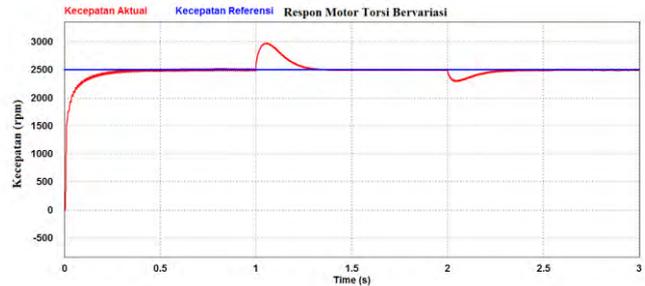


Gambar 13. Respon Motor Dalam Perubahan Kecepatan

Untuk pengujian beban yang berubah-ubah, ditentukan perubahan beban dari sebesar 2,9588 Nm, ke 0,5 Nm lalu ke 1,5 Nm. Respon dari motor terhadap perubahan beban dengan kecepatan yang sama dapat dilihat pada gambar 14. Pada pengujian beban dalam mode DCM, perubahan beban dari 2,9588 Nm ke 0,5 Nm akan dicapai *steady state* dalam waktu 0,45 sekon, sedangkan pada mode CCM dalam waktu 0,35 sekon. Untuk perubahan beban dari 0,5 Nm ke 1,5 Nm pada mode DCM dicapai *steady state* dalam waktu 0,475 sekon, sedangkan pada mode CCM dalam 0,4 sekon.

Pada pengujian beban dalam mode DCM, perubahan beban dari 2,9588 Nm ke 0,5 Nm akan dicapai *steady state* dalam waktu 0,45 sekon, sedangkan pada mode CCM dalam waktu 0,35 sekon. Untuk perubahan beban dari 0,5 Nm ke 1,5 Nm pada mode DCM dicapai *steady state* dalam waktu 0,475 sekon, sedangkan pada mode CCM dalam 0,4 sekon.

Pada pengujian beban ini didapat bahwa mode CCM memiliki respon motor yang lebih cepat dari mode DCM.



Gambar 14. Respon Motor Dalam Perubahan Torsi Beban

D. Perbandingan Sistem Kontrol Kecepatan Motor Brushless DC Menggunakan Zeta Converter dengan Metode Berbeda

Perbandingan yang akan dilakukan adalah performa sistem dalam memperbaiki *power factor* dan mengurangi harmonisa pada arus di sisi sumber AC, dimana pada tiap metode kontrol memiliki performa yang berbeda dengan penggunaan motor dalam kondisi beban *rated*.

Tabel 3. Perbandingan Pada Kecepatan Bervariasi Metode Average Current Mode

Kecepatan (rpm)	DCM		CCM	
	THDi (%)	TPF	THDi (%)	TPF
750	11.4	0.9916	13.9	0.9876
1000	7.63	0.9963	9.48	0.994
1250	5.98	0.9977	7.53	0.9965
1500	4.54	0.9986	6.04	0.9977
1750	3.73	0.999	5.25	0.9983
2000	3.09	0.9993	4.47	0.9987
2250	2.82	0.9994	3.94	0.999
2500	2.66	0.9995	3.51	0.9991

Pada pengujian sistem dengan kecepatan yang bervariasi, seiring dengan naiknya kecepatan, nilai THD pada arus akan semakin rendah begitupun dengan nilai *power factor* yang meningkat meski tidak signifikan. Dalam kondisi ini, mode DCM lebih unggul dibanding mode CCM karena dapat lebih mereduksi THD dan menaikkan *power factor* secara baik.

Tabel 4. Perbandingan Pada Tegangan Sumber Bervariasi Metode Average Current Mode

Tegangan (V)	DCM		CCM	
	THDi (%)	TPF	THDi (%)	TPF
180	3.23	0.9991	3.46	0.9991
200	2.83	0.9994	3.45	0.9992
220	2.66	0.9995	3.51	0.9991

Saat pengujian perbedaan tegangan AC, mode DCM akan memburuk pada tegangan dibawah 220V, sedangkan nilai THD dan *power factor* relatif stabil pada mode CCM, meski performa optimalnya pada tegangan 200V.

Hasil dengan metode *Hysteresis Current* mirip dengan metode sebelumnya, nilai THD arus semakin berkurang dan nilai *power factor* semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan motor. Metode ini sedikit lebih baik pada kondisi kecepatan *rated* dan memiliki *range* performa yang lebih rapat.

**Tabel 5.** Perbandingan Pada Kecepatan Bervariasi Metode *Hysteresis Current Mode*

Kecepatan (rpm)	DCM		CCM	
	THDi (%)	TPF	THDi (%)	TPF
750	8.15	0.9948	12.6	0.9895
1000	6.08	0.9974	8.92	0.9948
1250	4.69	0.9984	6.78	0.997
1500	3.73	0.9990	5.45	0.9981
1750	3.1	0.9993	4.57	0.9987
2000	2.71	0.9994	3.96	0.999
2250	2.48	0.9995	3.6	0.9992
2500	2.37	0.9996	3.33	0.9992

**Tabel 6.** Perbandingan Pada Tegangan Sumber Bervariasi Metode *Hysteresis Current Mode*

Tegangan (V)	DCM		CCM	
	THDi (%)	TPF	THDi (%)	TPF
180	2.95	0.9993	3.1	0.9992
200	2.47	0.9995	3.02	0.9993
220	2.37	0.9996	3.33	0.9992

Pada metode ini, sama seperti metode *average current* yaitu mode DCM lebih baik dari CCM, meski CCM lebih stabil. Hanya saja metode ini sedikit lebih baik performanya dalam mengurangi nilai THD arus dan meningkatkan *power factor*.

V. KESIMPULAN

Sesuai dengan hasil simulasi dan analisis yang telah dilakukan, didapat beberapa kesimpulan:

1. Sistem pengaturan kecepatan motor *brushless* DC menggunakan *zeta converter* dapat memperbaiki kualitas daya dari nilai THD sebesar 73,33% dan *power factor* sebesar 0,803 menjadi nilai THD berkisar antara 2-3% dan *power factor* hingga 0,999.
2. Pengujian sistem pengaturan kecepatan motor *brushless* DC dengan kecepatan referensi yang bervariasi dapat berjalan dengan baik karena putaran motor dapat mengikuti kecepatan referensi.
3. Pengoperasian motor pada kecepatan yang konstan tetap stabil pada pembebanan yang bervariasi.
4. Pengoperasian sistem pada mode DCM lebih unggul dalam memperbaiki *power factor* dibandingkan dengan mode CCM. Tetapi saat pengaturan kecepatan motor, mode CCM memiliki respon yang sedikit lebih cepat dibandingkan mode DCM.
5. Pengujian dengan menggunakan dua metode kontrol PFC yang berbeda menghasilkan perbedaan pula, dimana pada kontrol PFC *hysteresis current* dapat mereduksi harmonisa arus sedikit lebih baik dibandingkan kontrol PFC *average current*.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Xia, C.L., “*Permanent magnet brushless DC motor drives and controls*”, Wiley Press, Beijing, 2012.  
 [2] T. Kenjo dan S. Nagamori, “*Permanent Magnet Brushless DC Motors*”, Clarendon Press, Oxford, U.K., 1985.  
 [3] B. Singh and V. Bist, “*Power quality improvement in a zeta converter for brushless DC motor drives*”, *IET Sci. Meas. Technol.*, Vol. 9, Iss. 3, pp. 351-361, 2015.  
 [4] Singh, B., Singh, B.N., Chandra, A., Al-Haddad, K.,

Pandey, A., Kothari, D.P., “*A review of single-phase improved power quality AC-DC converters*”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 50, no. 5, pp. 962-981, 2003.  
 [5] Singh, B., Singh, S., Chandra, A., Al-Haddad, K., “*Comprehensive study of single-phase AC-DC power factor corrected converters with high-frequency isolation*”, *IEEE Trans. Ind. Inf.*, vol. 7, no. 4, pp. 540-556, 2011.  
 [6] Martins, D.C., “*Zeta converter operating in continuous conduction mode using the unity power factor technique*”, *Proc. IEE PEVSD’96*, 1996, pp. 7-11.  
 [7] D.C Martins, A. Peres dan I. Barbi, “*Zeta converter applied in power factor correction*”, *Proc PESC’94*, Taiwan, pp. 1152-1157.  
 [8] Singh, B., Singh, B.P., Dwivedi, S., “*AC-DC zeta converter for power quality improvement of direct torque controlled PMSM drive*”, *Korean J. Power Electron.*, vol. 6, no. 2, pp. 146-162, April 2006.  
 [9] Case Study, “*Simple Analysis for Brushless DC Motors*”, Massachusetts Institute of Technology (MIT).  
 [10] Rajne, Milan, “*Generate your own commutation table: Trapezoidal control 3-phase BLDC motors using hall sensors*”, <URL: [https://e2e.ti.com/blogs\\_/b/motordrivecontrol/archive/2013/11/08/generate-your-own-commutation-table-trapezoidal-control-3-phase-blcdc-motors-using-hall-sensors](https://e2e.ti.com/blogs_/b/motordrivecontrol/archive/2013/11/08/generate-your-own-commutation-table-trapezoidal-control-3-phase-blcdc-motors-using-hall-sensors)>, November, 2013.  
 [11] P. Ramesh Babu, S.Ram Prasath dan R.Kiruthika, “*Simulation and Performance Analysis of CCM Zeta Converter with PID Controller*”, 2015 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), pp. 1-7, Nagercoil, March 2015.  
 [12] Application Note, “*PFC boost converter design guide*”, Infineon Technologies AG, 2016.  
 [13] W. Hart, Daniel, “*Power Electronics*”, McGraw-Hill, New York, USA, 2011.  
 [14] Rashid, Muhammad H., “*Power Electronics Handbook*”, Academic Press, Florida, USA, 2001.  
 [15] Vlatko Vlatkovic, Dusan Borojevic dan Fred C. Lee, “*Input Filter Design for Power Factor Correction Circuits*”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 11, No. 1, pp. 199-205, January 1996.  
 [16] B. Singh and V. Bist, “*A PFC Based BLDC Motor Drive Using a Bridgeless Zeta Converter*”, *Industrial Electronics Society, IECON 2013*, pp. 2553-2558, Vienna, 2013.  
 [17] Cividino, Lorenzo, “*Power Factor, Harmonic Distortion; Causes, Effects and Consideration*”, *Telecommunications Energy Conference, INTELEC ’92*, pp. 506-513, Washington, DC, Oktober 1992.  
 [18] W. Mack Grady dan Robert J. Gilleskie, “*Harmonics and How They Relate to Power Factor*”, *Proc. Of the EPRI Power Quality Issues & Opportunities Conference (PQA ’93)*, San Diego, CA, November 1993.  
 [19] Fahmi, Ahmad Afif, “*Sistem Pengereman Elektris Brushless DC Motor Menggunakan Bidirectional Inverter Untuk Aplikasi Kendaraan Listrik*”, Laporan Tugas Akhir Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2013.