

# Desain Kontrol Kecepatan Motor Brushless DC Berbasis *Power Factor Correction* (PFC) Menggunakan *Single Ended Primary Inductance Converter* (SEPIC)

Nanda Redha Arsyana<sup>(1)</sup>, Heri Suryoatmojo<sup>(2)</sup>, dan Sjamsjul Anam<sup>(3)</sup>

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

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111

E-mail: arsyanaanda19@gmail.com<sup>(1)</sup>, suryomgt@ee.its.ac.id<sup>(2)</sup>, anam@ee.its.ac.id<sup>(3)</sup>

**Abstrak**— Motor brushless DC sudah diaplikasikan secara luas pada skala rumah tangga maupun industri karena kelebihan yang dimiliki seperti efisiensi tinggi dan rugi-rugi mekanik yang rendah karena tidak menggunakan *brush* seperti motor DC. Pengaplikasian motor brushless DC tersebut menggunakan sumber AC 220 rms yang diserahkan untuk meminimalisir penggunaan baterai. Namun, penggunaan motor brushless DC dan rangkaian penyearahnya menyebabkan buruknya nilai faktor daya dan harmonik. Nilai faktor daya hanya mencapai 0.58 sedangkan THD arus mencapai 73%. Nilai tersebut berada diluar batas toleransi yang diijinkan. Penelitian ini bertujuan untuk memperbaiki nilai faktor daya maupun THD arus akibat pengoperasian motor brushless DC menggunakan konverter SEPIC. Selain itu, tujuan dari penelitian ini adalah motor mampu dioperasikan pada berbagai tingkat kecepatan dan pembebanan yang bervariasi. Hasil dari simulasi dari desain yang telah dibuat adalah motor dapat merespon variasi kecepatan referensi yang diberikan dengan baik. Rangkaian kontrol juga mampu membuat motor mempertahankan kecepatan dengan perubahan beban setiap waktunya. Faktor daya yang diamati pada sumber mengalami kenaikan hingga 0.999 pada berbagai tingkat kecepatan. Selain itu, THD arus memiliki rata-rata nilai 2% pada berbagai tingkat kecepatan. Kedua parameter ini berada didalam toleransi yang diperbolehkan oleh standar.

**Kata Kunci**— *brushless DC, SEPIC, faktor daya, THD arus.*

## I. PENDAHULUAN

MOTOR brushless DC sering digunakan untuk aplikasi rumah tangga maupun industri karena memiliki rasio torsi/inersia dan efisiensi yang tinggi. Pada umumnya, sumber motor brushless DC adalah dengan menggunakan baterai. Seiring dengan berjalannya waktu, sumber yang digunakan untuk pengoperasian motor brushless DC adalah sumber AC 220 volt karena lebih murah dan praktis. Contoh penerapan motor brushless DC dalam kehidupan sehari-hari adalah sebagai pompa. Motor brushless DC merupakan motor yang terkomutasi secara elektrik dan membutuhkan informasi posisi rotor sebagai sinyal masukan *Voltage Source Inverter* (VSI). Pada motor brushless DC konvensional yang menggunakan sumber AC 220 volt, *drive* hanya berupa *rectifier* (penyearah) dan kapasitor DC link. Pada perkembangannya, skema pengaturan kecepatan telah dikembangkan dengan memberikan input *Pulse Width Modulation* (PWM) pada VSI. Pada skema ini, PWM yang digunakan untuk mengatur kecepatan menyebabkan terjadinya *losses* pada *switch* VSI dikarenakan frekuensi *switching* yang tinggi. Selain itu, *drive* ini menyebabkan tingginya nilai *Total Harmonic*

*Distortion* (THD) dan rendahnya faktor daya. Standar faktor daya internasional tidak merekomendasikan metode ini[1].

Menanggapi permasalahan tersebut, rangkaian *Power Factor Correction* (PFC) digunakan untuk mengatasi buruknya faktor daya akibat penggunaan motor brushless DC. Mode yang digunakan pada konverter PFC ada dua jenis yaitu *Continuous Current Mode* (CCM) dan *Discontinuous Current Mode* (DCM). Mode CCM maupun DCM yang dimaksud adalah arus induktor pada konverter. Ada bermacam-macam jenis *DC to DC converter* yang digunakan untuk aplikasi motor brushless DC[2]. Tujuan dari penelitian ini adalah merancang *drive* brushless DC menggunakan *Single Ended Primary Inductor Converter* (SEPIC) dengan respon kecepatan yang baik dan memiliki performansi kualitas daya yang tinggi. Kontrol kecepatan yang didesain diharapkan bisa dijadikan acuan untuk penerapan secara langsung pada motor brushless DC dengan spesifikasi yang telah ditentukan.

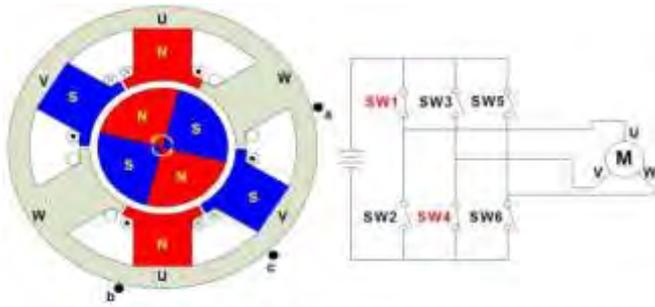
## II. DASAR TEORI

### A. Motor Brushless DC

Motor brushless DC telah digunakan secara luas untuk kebutuhan rumah tangga, otomotif, medis, maupun industri. Berbeda dengan motor DC, motor brushless DC tidak menggunakan *brush* (sikat) sebagai media komutasinya melainkan terkomutasi secara elektrik. Motor brushless DC memiliki beberapa keuntungan dibandingkan dengan motor DC atau motor induksi diantaranya memiliki keandalan dan efisiensi yang tinggi, *noise* akustik yang rendah, dan memiliki *range* kecepatan yang tergolong tinggi[3]. Motor brushless DC satu fasa memiliki satu belitan stator sedangkan motor brushless DC tiga fasa memiliki tiga belitan stator yang dihubungkan *wye* (Y). Motor brushless DC juga dapat digolongkan berdasarkan jenis belitan statornya. Ada dua jenis belitan stator yaitu trapezoidal dan sinusoidal yang mengacu pada bentuk sinyal *Back Electromotive Force* (BEMF). Bentuk BEMF ditentukan oleh bentuk interkoneksi kumparan dan jarak *air gap*-nya. Selain itu, bentuk arusnya juga mengikuti bentuk sinusoidal ataupun trapezoidal.

Rotor dari motor brushless DC merupakan magnet permanen. Rotor motor brushless DC terdiri dari sebuah *shaft* dan *hub* dengan magnet permanen yang disusun dua hingga delapan pasang. Brushless DC tiga fasa beroperasi dengan memanfaatkan tarikan dan tolakan kutub-kutub magnet. Ketika arus melalui salah satu dari ketiga fasa, maka akan menghasilkan medan magnet dan menarik medan magnet permanen (rotor) yang memiliki polaritas yang

berbeda. Sehingga rotor akan bergerak sesuai dengan arah medan statornya. Perubahan medan magnet stator akan menyebabkan rotor bergerak mengikuti statornya secara konstan.

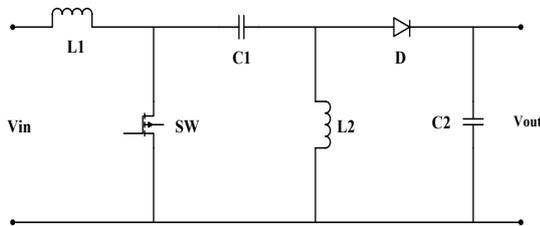


Hall sensor value: abc=001

Gambar 1. Salah satu fase pada pengoperasian motor brushless DC tiga fasa dengan 4 pole[3]

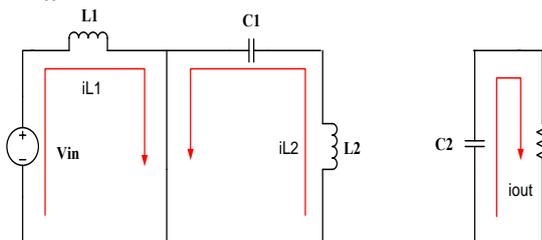
**B. Single Ended Primary Inductance Converter (SEPIC)**

Single Ended Primary Inductance Converter (SEPIC) merupakan salah satu konverter DC to DC yang memiliki nilai output positif dengan nilai yang bervariasi kurang atau lebih dari nilai inputnya.



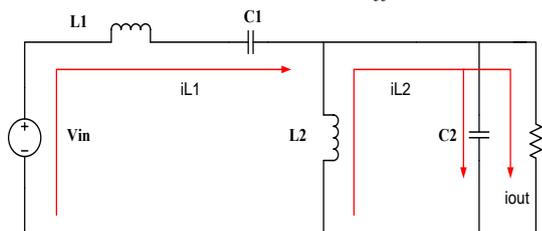
Gambar 2. Konfigurasi Single Ended Primary Inductance Converter[6]

Gambar 2 menunjukkan rangkaian dari SEPIC. Menurut Ebrahim[6], SEPIC memiliki beberapa komponen seperti induktor input ( $L_1$ ), induktor output ( $L_2$ ), switch ( $SW$ ), kapasitor intermediat ( $C_1$ ), dioda ( $D_1$ ), dan kapasitor output ( $C_2$ ). SEPIC merupakan salah satu jenis dari konverter buck-boost. Berikut adalah kondisi ketika switch dalam keadaan on dan off:



Gambar 3. Mode operasi SEPIC ketika switch on

Ketika switch dalam keadaan on, energi yang disimpan pada kapasitor input akan disalurkan ke  $L_1$  sementara energi pada kapasitor intermediat akan disalurkan ke  $L_2$ . Berikut adalah keadaan ketika switch dalam keadaan off:



Gambar 4. Mode operasi SEPIC ketika switch off

Ketika switch dalam keadaan off, arus pada  $L_1$  akan dialirkan ke  $C_1$  dan  $D_1$ , menuju  $C_2$  dan beban.  $C_2$  dan  $C_1$  akan terisi kembali dan akan men-charge  $L_2$  ketika switch kembali on. Proses bekerjanya switch tersebut tergantung dari seberapa besar duty cycle ( $D$ ) dalam satu periode[7]. Berikut merupakan persamaan untuk nilai komponen yang digunakan:

Tabel 1. Penentuan Parameter Komponen

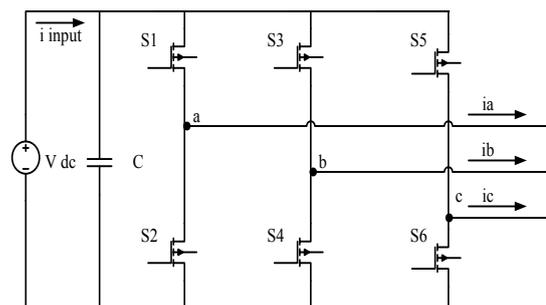
Komponen	Persamaan
Induktor input ( $L_1$ )	$L_1 = \frac{Vs \times D}{\Delta I_{L1} \times f}$
Induktor output (CCM) ( $L_2$ )	$L_2 = \frac{Vs \times D}{\Delta I_{L2} \times f}$
Induktor output (DCM) ( $L_c$ )	$L_c = \frac{V_{in}^2}{P_{min}} \times \frac{V_{dc\_min}}{2\sqrt{2}V_{in}f} \times \frac{V_{dc\_min}}{\sqrt{2}V_{in} + V_{dc\_min}}$
Kapasitor Intermediat ( $C_1$ )	$C_1 = \frac{P_{max}}{K \times f_s \times (\sqrt{2}V_{in} + V_{dc\_link})^2}$
Kapasitor output ( $C_2$ )	$C_2 = \frac{P_{rating}}{2 \times \omega \times \%ripple \times V_{dc\_rating}^2}$

**C. Teknik Kontrol Kecepatan dan PFC**

Ada bermacam-macam kontrol PFC yang dapat digunakan untuk motor. Salah satu teknik kontrol faktor daya adalah kontrol arus. Tujuan dari kontrol arus adalah untuk mendapatkan bentuk arus pada sisi masukan sesuai dengan bentuk tegangannya sehingga didapatkan nilai faktor daya mendekati satu. Langkah pertama untuk melakukan teknik kontrol arus adalah dengan mengetahui bentuk tegangan masukan, arus setelah dioda fullbridge, dan bentuk tegangan keluaran. Ada bermacam-macam teknik kontrol arus seperti kontrol arus rata-rata, teknik kontrol arus puncak dengan frekuensi yang berubah-ubah, teknik kontrol arus puncak dengan frekuensi tetap, teknik kontrol hysteresis, teknik kontrol arus charging, dan kontrol NLC (non linear carrier).

**D. Voltage Source Inverter (VSI)**

Inverter merupakan rangkaian elektronik yang berfungsi untuk mengubah sinyal listrik searah menjadi sinyal listrik bolak-balik[11]. Suatu topologi digolongkan VSI apabila inverter tersebut digunakan untuk mengatur bentuk tegangan outputnya, sedangkan topologi digolongkan CSI apabila bentuk sinyal arus yang dikontrol. Secara umum sistem jaringan dan beban membutuhkan sinyal listrik bolak-balik. Agar sumber listrik dengan sinyal searah dapat disuntikkan ke sistem jaringan atau beban digunakan inverter untuk mendapatkan sinyal listrik bolak-balik. Topologi standar dari inverter 3 fasa dapat dilihat pada Gambar 5 sedangkan kondisi pensaklaran yang valid dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 5. Rangkaian Voltage Source Inverter (VSI)

Gambar 5 di atas menunjukkan bahwa topologi standar inverter 3 fasa terdiri dari enam saklar yang dapat dikendalikan. Setiap fasa tersusun atas dua buah saklar. Dengan demikian arus yang dialirkan pada setiap fasa dapat diatur. Ada dua jenis inverter yang umum digunakan berdasarkan jenis konduksinya. Mode konduksi inverter yaitu 180 derajat dan 120 derajat. Mode konduksi 120 derajat digunakan didalam penelitian ini. Berikut skema pensaklaran VSI dengan beban motor brushless DC pabrikan MOOG.

Tabel 2. Urutan Pensaklaran

Interval switching	Urutan	Sensor Hall			Switch ON	
		H1	H2	H3		
0°-60°	0	1	0	0	Q1	Q4
60°-120°	1	1	1	0	Q1	Q6
120°-180°	2	0	1	0	Q3	Q6
180°-240°	3	0	1	1	Q3	Q2
240°-300°	4	0	0	1	Q5	Q2
300°-360°	5	1	0	1	Q5	Q4

E. Pengaruh THD terhadap Faktor Daya

Faktor daya merupakan seberapa efektif beban menyerap daya untuk bekerja. Semakin besar faktor daya, maka kerja beban semakin efektif dengan nilai tegangan dan arus tertentu. Faktor daya dapat dinyatakan sebagai perbandingan antara daya aktif dan daya nyata. Daya nyata merupakan penjumlahan vector daya aktif dan daya reaktif. Berikut adalah persamaan dari faktor daya:

$$pf = \cos \theta = \frac{P}{S} = \frac{P}{P + iQ} \quad (1)$$

Satuan dari daya aktif (P) adalah Watt (W), daya reaktif (Q) adalah VAR, sedangkan daya nyata (S) adalah VA. Sudut  $\theta$  merupakan sudut selisih antara arus dan tegangan atau disebut *displacement angle*. Definisi lain untuk  $\cos \theta$  adalah *displacement power factor* (dPF). Semakin besar nilai daya reaktif, maka semakin besar nilai dPF nya. dPF hanya berlaku untuk beban linear saja. Apabila suatu rangkaian mengandung beban non-linear, maka nilai faktor daya tidak hanya ditentukan dengan dPF saja.

Berikut merupakan persamaan faktor daya karena adanya beban non-linear:

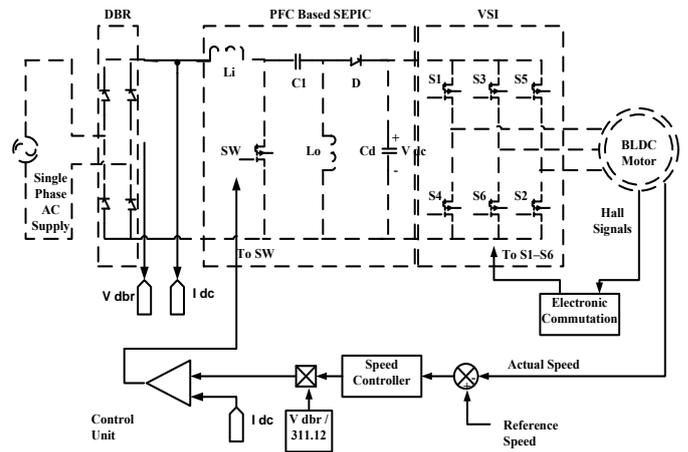
$$True PF = Displacement PF \times Distortion PF \quad (2)$$

$$True PF = \frac{P_{avg}}{V_{1rms} I_{1rms}} \times \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{THD_I}{100})^2}} \quad (3)$$

III. DESAIN KONTROL KECEPATAN DAN PFC

A. Konfigurasi Kontrol Kecepatan Berbasis Power Factor Correction

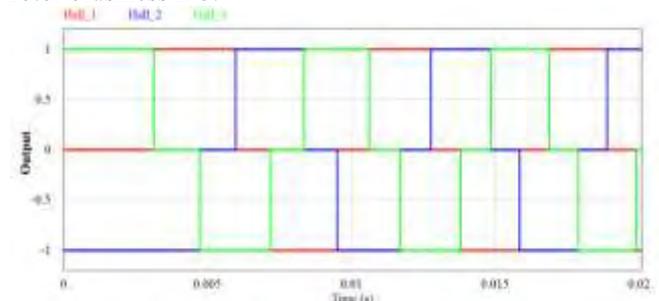
Rangkaian kontrol yang dirancang menggunakan referensi berupa kecepatan aktual motor brushless DC. Kecepatan yang dikontrol kemudian dikonversi menjadi bentuk *Pulse Width Modulation* (PWM) yang kemudian menuju ke *switch* pada SEPIC *converter*. Sementara enam *switch* pada VSI mendapat masukan sinyal biner hasil sensor posisi hall. Rangkaian PFC SEPIC yang diaplikasikan pada motor brushless DC ditunjukkan oleh Gambar 3.1 dibawah ini.



Gambar 6. Rangkaian PFC SEPIC dengan metode hysteresis current control

B. Desain Kontrol Logika Hall Effect ke VSI

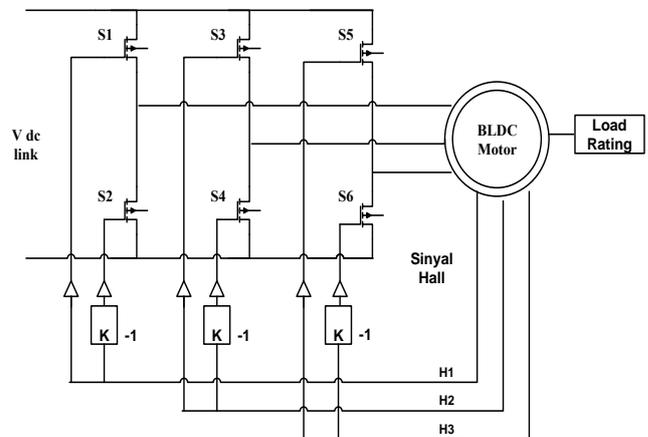
Sinyal hasil sensing dari Hall sensor akan dibaca oleh rangkaian encoder sebagai sinyal digital bernilai 0, 1, dan -1. Hall sensor yang dipasang pada stator motor brushless DC akan mensensing posisi rotornya setiap 60 derajat. Berikut adalah sinyal hall sensor karena ada pergerakan dari rotor brushless DC:



Gambar 7. Hasil sinyal keluaran sensor hall

Berdasarkan sinyal di atas ada nilai yang bernilai negatif, sedangkan VSI tidak beroperasi dengan sinyal *switch* negatif (*switch* VSI bekerja dengan rating nilai 0 hingga 1). Oleh karena itu dibutuhkan rangkaian tambahan antara sensor hall menuju VSI. Gambar 8 menunjukkan rangkaian yang bisa mengubah nilai sinyal hall sensor menjadi biner (0 dan 1):

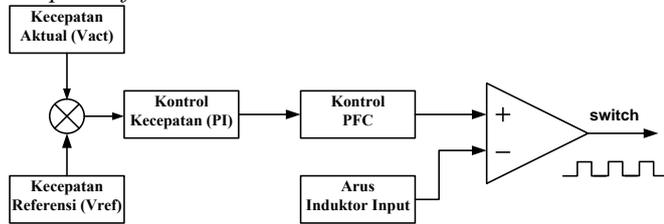
Dalam setiap perubahan sensing akan ada dua *switch* yang bekerja. Oleh karena itu diperlukan suatu encoder yang bisa menjalankan perintah tersebut.



Gambar 8. Perancangan rangkaian logika sinyal hall ke VSI

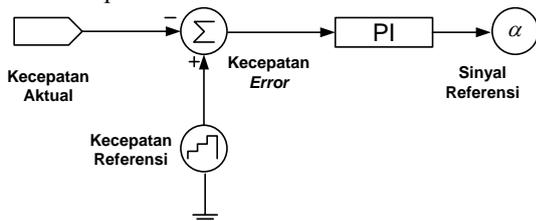
C. Merancang Kontrol Kecepatan dan PFC untuk Motor Brushless DC

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merancang kontrol agar motor brushless DC dapat merespon adanya perubahan kecepatan referensi dengan tetap mempertahankan faktor daya sesuai dengan yang diperbolehkan oleh standar internasional. Untuk mencapai tujuan tersebut, diperlukan dua kontrol utama yaitu kontrol kecepatan dan kontrol *power factor correction*. Berikut ini merupakan desain rangkaian keseluruhan kontrol kecepatan dan *power factor correction*:



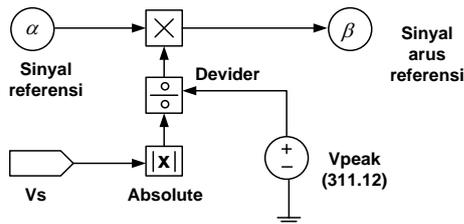
Gambar 9. Rangkaian kontrol metode *hysteresis current control*

Kontrol kecepatan didesain agar motor dapat menyesuaikan kecepatan yang diberikan sebagai referensi. Kontrol kecepatan yang dirancang adalah dengan cara membandingkan kecepatan aktual menggunakan *speed sensor* dengan kecepatan referensi. Perbedaan nilai kecepatan sensing dan referensi akan diolah oleh kontroler proporsional integral agar nilai kecepatan aktualnya bisa mengikuti referensinya. Berikut merupakan skema kontrol kecepatan dari penelitian ini:



Gambar 9. Rangkaian kontrol kecepatan

Teknik kontrol *power factor correction* yang adalah teknik kontrol arus. Berikut adalah desain dari kontrol arus yang digunakan.



Gambar 9. Rangkaian kontrol PFC

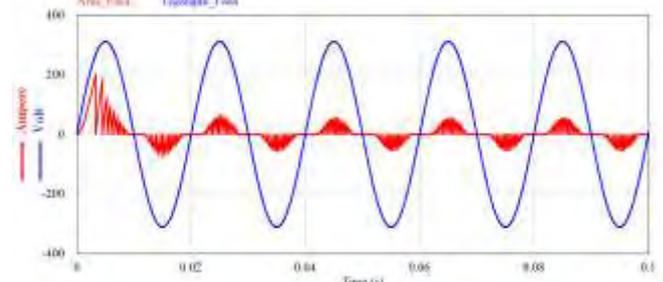
Prinsip dari teknik kontrol arus ini adalah dengan membandingkan bentuk sinyal tegangan dan arus pada input. Tegangan yang disensing adalah tegangan pada sinyal fasa input sedangkan sensing arus pada *line* setelah *dioda bridgeless* (DBR). Sensing tegangan dimutlakan agar membentuk tegangan *fullwave* yang kemudian dibandingkan dengan sinyal arus yang sudah berbentuk *fullwave* karena telah dilewatkan ke DBR. Permasalahan yang muncul adalah amplitudo sinyal tegangan yang jauh berbeda dengan sinyal arusnya. Oleh karena itu amplitudo tegangan dibagi dengan nilai tegangan maksimalnya yaitu 311.12 agar memiliki nilai yang tidak jauh berbeda dengan sinyal arusnya. Akibat pembagian tersebut sinyal tegangan

memiliki amplitudo satu (1). Nilai amplitudo tersebut tidak jauh berbeda dengan nilai amplitudo arusnya. Sinyal tegangan dan arus dengan bentuk *fullwave* kemudian dibandingkan menggunakan komparator dengan sinyal arus induktor input. Langkah terakhir adalah pensaklaran menuju *switch* dari konverter SEPIC. Sinyal yang dihasilkan merupakan sinyal biner nol dan satu dengan *duty cycle* yang bervariasi untuk kemudian diteruskan menuju *switch*. Berikut ini merupakan skema membandingkan sinyal referensi dan arus induktor sebagai kontrol pensaklaran:

IV. PENGUJIAN SISTEM KONTROL

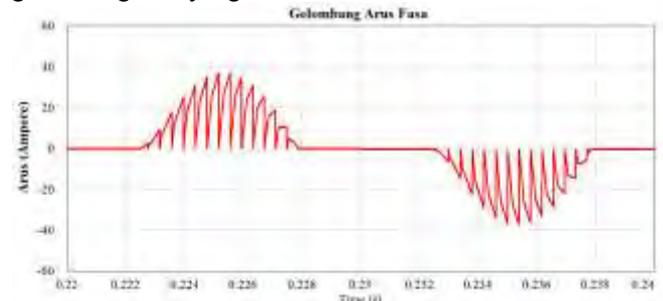
A. Nilai PF Tanpa Kontrol PFC

Pola arus dan tegangan memiliki pola yang berbeda sehingga memiliki faktor daya yang rendah. Berikut merupakan perbandingan bentuk gelombang arus dan tegangan di sisi sumber.



Gambar 10. Sinyal tegangan dan arus fasa sebelum dikontrol

Gelombang diatas menunjukkan bahwa sinyal arus yang berwarna memiliki *ripple* yang tinggi. Nilai *ripple* tersebut disebabkan karena tidak ada rangkaian kontrol yang mengatur agar bentuk gelombang arus sama dengan bentuk gelombang tegangannya. Berikut merupakan bentuk gelombang arus yang terdistorsi:

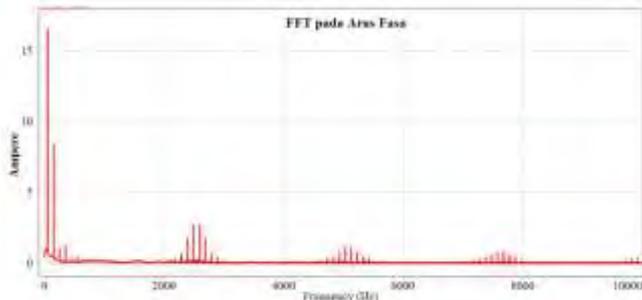


Gambar 11. Sinyal arus fasa yang terdistorsi

Simulasi diatas menunjukkan bahwa apabila mengoperasikan motor brushless DC dengan menggunakan sumber AC 220 rms, maka kecepatan yang dihasilkan memiliki karakteristik *ripple* yang besar serta nilai faktor daya dan THD yang berada diluar batas toleransi. Faktor daya yang terjadi sumber adalah 0.732 sedangkan nilai THD arus 74.39%. telah diketahui bahwasanya batas nilai faktor daya minimal yang diijinkan PLN adalah sebesar 0.85.

Nilai faktor daya pada hasil simulasi tersebut tidak merepresentasikan nilai faktor daya sebenarnya. Berikut merupakan nilai faktor daya setelah mempertimbangkan nilai *distortion power factor*.

Sebelum mengetahui nilai factor daya yang sebenarnya, maka harus dilakukan pengamatan (*Fast Fourier Transform*) FFT. Berikut merupakan hasil FFT:



Gambar 12. Komponen arus harmonik menggunakan FFT

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.10 dan persamaan 2.47, maka dapat diketahui nilai THD arus adalah sebagai berikut:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{krms}^2}}{I_{I_{rms}}} \times 100\% \quad (4)$$

Nilai THD arus dapat diketahui melalui hasil simulasi yaitu sebesar 74,39 %. Sehingga nilai *distortion pf* adalah sebagai berikut menurut persamaan 2.45 dan 2.51:

$$Distortion PF = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2}} = 0.8 \quad (5)$$

Sehingga nilai faktor daya yang sebenarnya (*True pf*) menurut persamaan 2.45 adalah sebagai berikut:

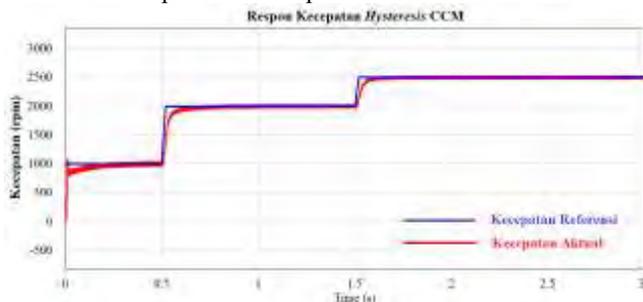
$$\begin{aligned} True PF &= Displacement PF \times Distortion PF \quad (6) \\ True PF &= 0.732 \times 0.8 \\ True PF &= 0.58 \end{aligned}$$

Berdasarkan analisa diatas dapat diketahui bahwa nilai faktor daya yang sebenarnya adalah 0.58. nilai THD arus yang tinggi dapat memperburuk nilai faktor daya.

**B. Hasil Pengujian Pada Kecepatan Bervariasi dan Beban Bervariasi**

Skenario kecepatan referensi yang diinginkan adalah kecepatan yang bervariasi. Untuk mengetahui respon kecepatan, beban diasumsikan tetap pada keadaan ratingnya yaitu 2.9588 Nm. Setting waktu yang digunakan adalah sebesar 3 detik.

Berikut merupakan grafik kecepatan referensi yang diberikan dan respon dari kecepatan aktual:



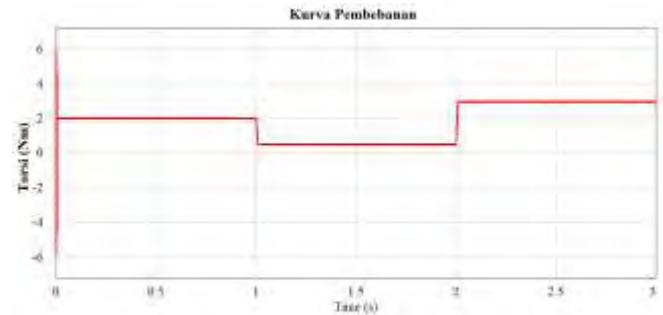
Gambar 13. Respon kecepatan terhadap referensi

Berdasarkan hasil simulasi didapatkan bahwa kecepatan aktual dapat mengikuti kecepatan referensi yang diinginkan. Selain itu, pada grafik dapat dilihat *overshoot* yang dihasilkan tidak terlalu besar dan terjadi dalam waktu yang singkat.

Selain respon terhadap perubahan referensi kecepatan, diharapkan motor juga dapat memberikan respon yang baik apabila terdapat perubahan beban setiap waktunya.

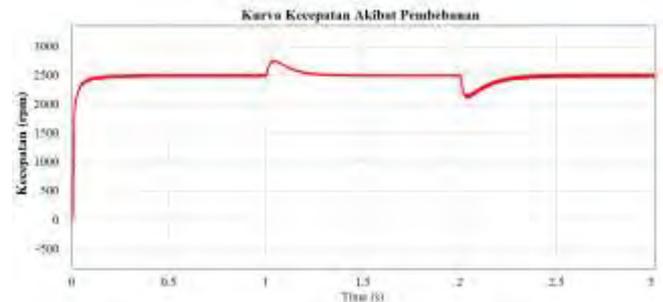
Pembebanan pada penelitian ini divariasikan setiap detiknya untuk mengetahui respon kecepatan pada saat diberi beban yang tidak melebihi ratingnya. Pada detik

pertama, motor brushless DC diberi beban sebesar 2 Nm, kemudian 0.5 Nm, dan 2.9588 pada detik berikutnya secara berurutan. Berikut merupakan grafik pembebanan motor brushless DC:



Gambar 14. Kurva pembebanan motor

Dengan beban bervariasi yang diberikan pada motor brushless DC, berikut merupakan respon dari motor tersebut:



Gambar 15. Respon kecepatan terhadap perubahan torsi beban

Berdasarkan gambar dapat dilihat pada detik pertama motor brushless DC diberikan beban sebesar 2 Nm. Pembebanan 2 Nm yang masih dibawah dari rating beban tidak mempengaruhi motor berputar pada kecepatan referensinya. Motor membutuhkan waktu kurang dari 0.2 detik untuk mencapai kecepatan referensinya yaitu 2500 rpm. Kemudian pada detik ke dua beban diturunkan menjadi 0.5 Nm. Akibat pembebanan yang jauh dibawah ratingnya, kecepatan motor sempat melonjak beberapa detik namun masih bisa kembali ke kecepatan referensinya. Begitu juga pada detik ke tiga, ketika diberi beban rating sebesar 2.9588 Nm, kecepatan motor brushless DC juga dapat menyesuaikan kecepatan referensinya. Berdasarkan grafik ini dapat disimpulkan kontrol kecepatan dapat berfungsi dengan baik.

**C. Perbandingan Nilai PF dan THD Arus pada Metode Current Control Mode CCM dan DCM**

Mode operasi dari konverter SEPIC yang digunakan juga mempengaruhi nilai *power factor* pada sistemnya. Ada dua mode kontrol arus yang digunakan untuk memperbaiki nilai faktor daya dan THD arus di dalam penelitian ini. Metode kontrol PFC tersebut adalah *Hysteresis Current Control* dan *Average Current Control*. Berikut merupakan perbandingan penggunaan mode CCM dan DCM dengan berbagai kecepatan referensi dilihat dari segi faktor dayanya. Pada pengujian perbandingan performansi dalam hal nilai faktor daya dibawah ini, nilai pembebanan dibuat tetap pada beban ratingnya yaitu 2.9588 Nm. Data dalam pengujian ini diambil pada keadaan tunak.

Berikut merupakan tabel hasil pengujian nilai faktor daya dengan menggunakan Metode *Hysteresis Current Control*:

**Tabel 3.** Perbandingan Nilai PF CCM dan DCM Menggunakan *Hysteresis Current Control*

Kecepatan Referensi (rpm)	Faktor Daya	
	CCM	DCM
300	0.9640	0.9782
600	0.9893	0.9959
900	0.9964	0.9987
1200	0.9984	0.9994
1500	0.9992	0.9997
1800	0.9995	0.9998
2100	0.9997	0.9998
2300	0.9997	0.9998
2500	0.9998	0.9999

Selain nilai faktor daya, nilai yang mempengaruhi nilai faktor daya adalah harmonik yang disebabkan oleh komponen non-linear pada suatu sistem. Pada pengaturan kecepatan motor brushless DC ini terdapat beberapa komponen non-linear seperti dioda dan *rectifier* yang berpengaruh terhadap nilai faktor daya. Berikut merupakan tabel mengenai nilai THD (*Total Harmonic Distortion*) arus dalam beberapa nilai kecepatan referensi:

**Tabel 4.** Perbandingan Nilai THD Arus CCM dan DCM Menggunakan *Hysteresis Current Control*

Kecepatan Referensi (rpm)	THD Arus	
	CCM (%)	DCM (%)
300	18.66	20.15
600	11.58	8.50
900	6.92	4.69
1200	4.59	3.00
1500	3.39	2.19
1800	2.62	1.68
2100	2.14	1.41
2300	1.85	1.30
2500	1.65	1.24

Metode yang dibahas sebelumnya merupakan *metode hysteresis current control* yang dioperasikan secara CCM maupun DCM. Selain metode *hysteresis current control*, metode lain yang bisa digunakan untuk perbaikan faktor daya adalah metode *average current control*. Berikut merupakan perbandingan faktor daya dari metode *average current control* pada saat mode CCM dan DCM:

**Tabel 5.** Perbandingan Nilai PF CCM dan DCM Menggunakan *Average Current Control*

Kecepatan Referensi (rpm)	Faktor Daya	
	CCM	DCM
300	0.8463	0.7103
600	0.9887	0.9147
900	0.9962	0.9238
1200	0.9983	0.9893
1500	0.9991	0.9978
1800	0.9995	0.9990
2100	0.9996	0.9993
2300	0.9997	0.9994
2500	0.9998	0.9995

Berikut merupakan nilai THD arus dengan menggunakan Metode *Average Current Control* baik mode CCM maupun DCM:

**Tabel 6.** Perbandingan Nilai THD Arus CCM dan DCM Menggunakan *Average Current Control*

Kecepatan Referensi (rpm)	THD Arus	
	CCM (%)	DCM (%)
300	26.86	89.79
600	10.88	33.58
900	7.08	44.70
1200	4.91	13.93
1500	3.69	8.16
1800	2.87	4.76
2100	2.33	3.43
2300	2.06	3.79
2500	1.84	2.85

V. KESIMPULAN

1. Pada pengujian kecepatan, sistem kontrol yang didesain bisa membuat kecepatan motor brushless DC mengikuti kecepatan referensi yang diberikan.
2. Pada pengujian pembebanan yang diberikan, motor brushless DC bisa mempertahankan kecepatannya sekalipun adanya lonjakan kecepatan maupun penurunan kecepatan sesaat.
3. Konverter SEPIC berbasis *power factor correction* dapat memperbaiki faktor daya pada sistem dari 0.58 menjadi 0.999 pada kecepatan dan beban rating.
4. Konverter SEPIC berbasis *power factor correction* dapat menurunkan nilai THD arus dari 74.39% menjadi 1.24%.
5. Metode *hysteresis current control* mode DCM memberikan performansi yang paling baik dibandingkan metode *average current control* dan mode CCM.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bhim, V., Singh, B., "Reduced Sensor Configuration of a Power Factor Correction Based Single-Ended Primary Inductance Converter Fed Brushless DC Motor Drive", IET Power Electron, Vol. 8, Iss. 9, pp. 1606-1615, March, 2015
- [2] Madani, S.M., Lei, H., Toliyat, H.A., "A Low-cost Four Switch BLDC Motor Drive with Active Power Factor Correction", 28<sup>th</sup> Annual IEEE Conf. of Industrial Electronics Society (IECON), vol. 1, pp. 579-584, November, 2002
- [3] Jian, Z., Yangwei, Y., "Brushless DC Motor Fundamental Application Node" MPS Module, 2014
- [4] Hanselman, D., "Brushless Permanent Magnet Motor Design", Magna Physics Publishing, 2006
- [5] Balduresson, S., "BLDC Motor Modelling and Control- A Matlab/Simulink Implementation", International master program Chalmer Tekniska, May, 2005
- [6] Ebrahim, B., "Calculation of Output Voltage Ripple and Design Consideration of SEPIC Converter", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 3, March, 2014
- [7] Hart, D.W., "Power Electronics", New York: McGraw-Hill, 2010
- [8] Sharma, R., Haque, A., "Simulation and Analysis of Power Factor Correction in Electric Control System for Metal Halide High Intensity Discharge Lamps", Advance in Electronic and Electrical Engineering, ISSN 2231-1297, Vol 4, Number 2, pp. 185-192, 2014
- [9] Rames, C.P., "Introduction to PID Controllers – Theory, Tuning and Application to Frontier Areas", Rijeka: In Tech, 2012
- [10] Mustoko, D.N., "Desain dan Analisis Konverter DC-DC Multi-input Bidirectional Untuk Aplikasi Kendaraan Listrik", Tugas Akhir Teknik Elektro, Juni 2014
- [11] Sunil P., Anupam M., Srinivas B., "Control of Voltage Source Inverters using PWM/SPWM for Adjustable Speed Drive Application", Departemen of Electrical Engineering National Institute of Technology Rourkela, May, 2009
- [12] Grady, M., Robert, J.G., "Harmonics and How They Relate to Power Factor", EPRI Power Quality Issues and Opportunities Conferences, San Diego, November, 1993
- [13] Motion Technology Catalog. "Brushless and Brush Motors, Drive Electronics, Gearheads and Position Sensors", MOOG Components Group