

Simulasi dan Analisis Sistem Pengatur Tegangan DC Menggunakan Rangkaian Push-Pull Converter

Feri Yusivar¹, Lintang Hapsari Wilujeng²

Abstract—A problem that often encountered in sources voltage especially DC (Direct Current) voltage sources are far below the working voltage levels that are generally used in residential electrical grid system. To handling the problems of the DC voltage source, one way that can be taken is to implement a DC voltage converter circuit or DC-DC Converter.

In this paper, a series of isolated type DC-DC Converters, namely Push-Pull Converter, is being promoted. The Selection of Push-Pull Converter based on reliability and quality of generated power among others, ease of applicability and the most important is the robustness of the interference that may occur.

The system is controlled by a simple linear controller, such as Proportional Integral (PI) controller or Integral Proportional (IP) controller. System's stability is also tested using Bode plots. From simulation results and stability analysis, it can be conclude that the Push-Pull converter circuit resists against disturbance.

Intisari— Sumber tegangan listrik merupakan salah satu kebutuhan primer modern di masa sekarang. Sumber tegangan listrik mutlak dibutuhkan untuk menjamin tetap bekerjanya peralatan tersebut. Namun masalah yang seringkali dihadapi adalah sumber-sumber tegangan, terutama sumber tegangan searah DC, memiliki tegangan yang jauh dibawah level tegangan kerja yang umumnya digunakan pada sistem jaringan listrik perumahan. Untuk mengatasi permasalahan sumber tegangan DC tersebut, salah satu cara yang dapat diambil adalah dengan mengimplementasikan sebuah rangkaian pengubah nilai tegangan DC atau DC-DC Converter.

Pada tulisan ini dibahas dan dianalisa kinerja rangkaian DC-DC Converter dari tipe terisolasi, yaitu Push-Pull Converter. Pemilihan Push-Pull Converter dilakukan atas beberapa alasan antara lain kehandalan, kualitas daya yang dihasilkan, kemudahan untuk diaplikasikan serta yang paling penting adalah ketahanan dari gangguan yang mungkin terjadi.

Sistem dikendalikan dengan menggunakan pengendali yang sederhana, yaitu Pengendali Proportional Integral (PI) dan Integral Proportional (IP) serta diuji kinerjanya dengan menggunakan Diagram Bode. Hasil simulasi serta analisa kestabilan menunjukkan bahwa Rangkaian Push-Pull adalah rangkaian yang tahan terhadap gangguan.

Kata Kunci— Tegangan DC, Push-Pull Converter, Teknik Pensaklaran, Pengendali PI, Pengendali IP.

I. PENDAHULUAN

Terdapat dua jenis sumber tegangan listrik yaitu tegangan listrik searah DC (*Direct Current*) dan tegangan listrik bolak-balik AC (*Alternating Current*). Dibanyak Negara, termasuk Indonesia, tegangan listrik yang umum digunakan adalah tegangan AC. Namun seiring berjalannya waktu serta

berkembangnya teknologi dibanyak negara sudah mulai diterapkan sumber tegangan DC sebagai sumber listrik utama pada sistem kelistrikan rumah.

Dalam menggunakan sumber tegangan DC, selain yang disediakan oleh penyedia jasa listrik, sumber tegangan listrik DC sudah mulai banyak dihasilkan oleh sumber energi listrik alternatif seperti panel surya dan biofuel. Namun masalah yang sering dihadapi seringkali adalah sumber-sumber energi alternatif tersebut dibangkitkan dalam nilai yang jauh dibawah level tegangan kerja yang umumnya digunakan pada sistem jaringan listrik perumahan [1].

Untuk mengatasi permasalahan sumber tegangan DC, salah satu cara yang dapat diambil adalah dengan mengimplementasikan sebuah rangkaian pengubah nilai tegangan DC atau DC-DC Converter. Perubahan nilai tegangan DC tersebut bisa menaikkan ataupun menurunkan nilai tegangan DC [2,3].

Pada makalah ini, dirancang sebuah Rangkaian yang berfungsi untuk menaikkan tegangan keluaran pada jaringan listrik perumahan. Ada beberapa pilihan yang bisa digunakan, salah satu yang paling umum dipilih adalah menggunakan Boost Converter. Selain mudah dalam perancangannya, Boost Converter juga ringkas dan sudah banyak diaplikasikan pada sistem dengan sumber energi terbarukan. Namun Boost Converter memiliki masalah keandalan.

Tidak jarang sumber tegangan listrik DC yang ingin dinaikkan nilainya berasal dari sumber tegangan AC. Permasalahan muncul ketika sumber tegangan yang tersedia jauh dari bentuk ideal. Sumber tegangan AC sering tidak sinusoidal, berfluktuasi, dan tidak setimbang. Sumber tegangan DC sering berfluktuasi dan mengandung riak frekuensi rendah. Tegangan AC yang tidak setimbang atau tegangan DC yang mengandung riak bisa menyebabkan arus keluaran converter mengandung riak frekuensi rendah yang susah ditapis [4,5].

Untuk mengatasi hal tersebut, ditawarkan rangkaian DC-DC Converter dari tipe terisolasi, yaitu Push-Pull Converter. Pemilihan Push-Pull Converter dilakukan atas beberapa alasan antara lain keandalan, kualitas daya yang dihasilkan, kemudahan untuk diaplikasikan serta yang paling penting adalah ketahanan dari gangguan yang mungkin terjadi.

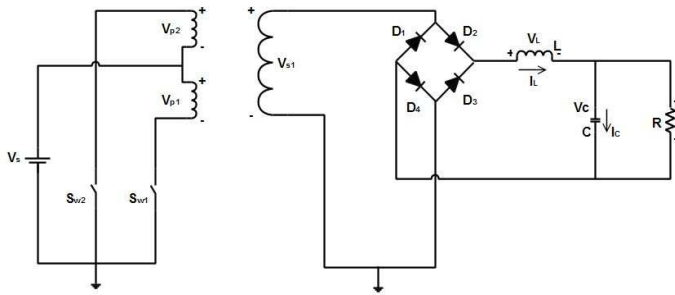
II. RANGKAIAN PUSH-PULL CONVERTER

Push-pull converter adalah konverter DC-DC yang menggunakan transformator untuk mengubah level tegangan DC yang dibutuhkan serta menghasilkan isolasi galvanis terhadap beban [6].

Push-Pull converter termasuk kedalam jenis indirect converter. Push-pull converter digunakan karena memiliki efisiensi keluaran yang tinggi dan mampu menyediakan jangkauan daya keluaran yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan menggunakan flyback [7].

¹Dosen, Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok16424 INDONESIA (telp: 021-7270078; fax: 021-7270077; e-mail: yusivar@eng.ui.ac.id)

²Mahasiswa, Departemen Teknik Elektro Universitas Indonesia, Kampus Baru UI Depok 16424 INDONESIA (telp: 021-7270077, ext131; e-mail: lintang.hapsariw@gmail.com)



Gbr. 1. Rangkaian Push-Pull Converter

Prinsip kerja dari rangkaian Push-Pull Converter berdasarkan kerja dari setiap saklar dengan analisis rangkaian ketika saklar tertutup dan terbuka [4].

Dalam analisis terdapat asumsi yang digunakan sebagai berikut: Periode dari pensaklaran adalah T dimana saklar tertutup selama waktu DT dan terbuka selama waktu (1-D)T dengan D sebagai duty cycle. Arus yang melalui induktor adalah arus kontinyu. Transformator yang digunakan adalah transformator ideal. Saklar tidak boleh bekerja pada posisi ON secara bersamaan.

A. Kondisi Kerja Push-Pull Converter

Sesuai dengan kondisi nomor 4 dimana saklar 1 dan 2 pada rangkaian tidak boleh bekerja secara bersamaan maka ada tiga kondisi kerja yang dapat di definisikan pada rangkaian Push-Pull Converter, yaitu:

- 1) *Kondisi saklar 1 ON* : Ketika saklar 1 bekerja, maka lilitan primer Vp1 akan mendapatkan arus yang berasal dari Vs. Sehingga nilai Vp1 akan sama dengan Vs.

$$V_{p1} = V_s \tag{1}$$

Sesuai dengan prinsip kerja transformator dimana kumparan primer akan menginduksi kumparan sekundernya, maka Vs1 akan bernilai:

$$V_{s1} = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \tag{2}$$

$$V_x = V_L + V_C \tag{3}$$

$$V_L = V_x - V_C \tag{4}$$

$$V_L = L \frac{diL_x}{dt} \tag{5}$$

$$\frac{\Delta iL_x}{\Delta t} = \frac{\Delta iL_x}{DT} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_x - V_o}{L} \tag{6}$$

Dimana

$$V_x = \frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_o}{L} \tag{7}$$

Sehingga dapat diperoleh nilai ΔiLx pada saat saklar tertutup adalah sebagai berikut:

$$(\Delta iL_x)_{closed} = \frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_o}{L} . DT \tag{8}$$

- 2) *Kondisi saklar 2 ON* : Ketika saklar 2 bekerja, maka lilitan primer Vp2 akan mendapatkan arus yang berasal dari Vs. Sehingga nilai Vp2 akan sama dengan -Vs.

$$V_{p2} = -V_s \tag{10}$$

Sesuai dengan prinsip kerja transformator dimana kumparan primer akan menginduksi kumparan sekundernya, maka Vs1 akan bernilai:

$$V_{s1} = V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \tag{11}$$

$$V_x = V_L + V_C \tag{12}$$

$$V_L = V_x - V_C \tag{13}$$

$$V_L = L \frac{diL_x}{dt} \tag{14}$$

$$\frac{\Delta iL_x}{\Delta t} = \frac{\Delta iL_x}{DT} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_x - V_o}{L} \tag{15}$$

Sehingga dapat diperoleh nilai ΔiLx pada saat saklar tertutup adalah sebagai berikut:

$$(\Delta iL_x)_{closed} = \frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_o}{L} . DT \tag{16}$$

- 3) *Kondisi saklar 1 dan 2 OFF* : Ketika saklar 1 dan 2 berada pada kondisi OFF maka tidak ada arus yang mengalir pada kedua lilitan primer. Sehingga tidak ada induksi pada lilitan sekunder.

$$V_x = 0 \tag{17}$$

$$V_L = V_x - V_C = -V_C \tag{18}$$

Namun karena arus yang mengalir bersifat kontinyu maka pada induktor nilai -Vc akan menyebabkan penurunan arus pada induktor secara linear.

$$(\Delta iL_x)_{open} = \frac{-V_o}{L} . (1 - D)T \tag{19}$$

Pada kondisi tunak, total perubahan arus harus bernilai nol, maka dari persamaan dapat diperoleh:

$$(\Delta iL_x)_{closed} + (\Delta iL_x)_{open} = 0 \tag{20}$$

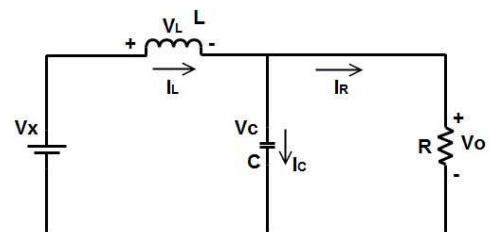
$$(\Delta iL_x)_{closed} + (\Delta iL_x)_{open} = \frac{V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) - V_o}{L} . DT + \frac{-V_o}{L} . (1 - D)T \tag{21}$$

Sehingga didapat nilai Vo senilai:

$$V_o = 2V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) D \tag{22}$$

B. Analisis Kerja Push-Pull Converter

Dari persamaan yang didapat dari rangkaian dan telah dibagi kedalam 3 kondisi kerja akan dimodelkan untuk mendapatkan persamaan fungsi alih dari Push-Pull Converter. Penurunan matriks ruang keadaan sistem dilakukan dengan metode *State Space Averaging*.



Gbr. 2. Keluaran Push-Pull Converter pada Kondisi Saklar Tertutup

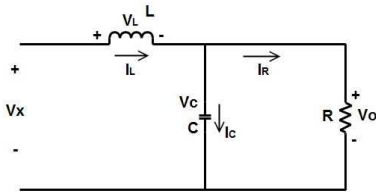
V_x diasumsikan sebagai tegangan sekunder transformator yang telah melewati penyearah dioda. Dari persamaan, dengan memperhitungkan besar *duty cycle* maka didapat nilai V_x sebesar:

$$V_x = V_{s1} = 2 \cdot V_s \left(\frac{N_s}{N_p} \right) \cdot D \quad (23)$$

Pada saat saklar tertutup, didapat matriks ruang keadaan seperti persamaan di bawah:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c}{L} & \frac{c}{RL} \\ \frac{1}{c} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_x}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Sedangkan untuk persamaan keadaan dari rangkaian Push-Pull Converter ketika saklar terbuka digambarkan seperti rangkaian Gbr. 3



Gbr. 3. Keluaran Push-Pull Converter pada Kondisi Saklar Terbuka

Sedangkan saat saklar terbuka, didapat matriks ruang keadaan seperti persamaan di bawah:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c}{L} & \frac{c}{RL} \\ \frac{1}{c} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Sehingga matriks ruang keadaan yang dihasilkan menjadi:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c}{L} & \frac{c}{RL} \\ \frac{1}{c} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ V_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{V_x}{L} \\ 0 \end{bmatrix} (D) \quad (26)$$

Matriks persamaan ruang keadaan di atas ditransformasikan menjadi persamaan fungsi alih menjadi persamaan berikut:

$$G(s) = \frac{V_c(s)}{D(s)} = \frac{\frac{1}{c}}{s^2 + s \left(\frac{L+RC^2}{RLC} \right)} \cdot \frac{V_x}{L} \quad (27)$$

Tegangan keluaran pada Push-Pull Converter dijaga konstan dengan nilai V_o . Tegangan yang umum diterima oleh beban pada sistem jaringan listrik di Indonesia adalah listrik AC dengan nilai maksimal 220V dan minimal -220V. Dari nilai maksimal dan minimal tersebut maka rentang nilai yang dihasilkan adalah sebesar 440V. Agar mampu menghasilkan nilai tegangan sebesar 440V secara konstan maka nilai tegangan keluaran dijaga konstan pada nilai 400VDC dengan daya yang diharapkan sebesar 2000W.

Dalam menghasilkan sinyal keluaran yang diinginkan, *duty cycle* yang digunakan adalah sebesar 0.3. Nilai induktor, digunakan sebesar 100×10^{-6} H sehingga diharapkan induktor dapat tahan terhadap lebih banyak variasi nilai beban. Sama halnya dengan penentuan nilai induktor, penentuan nilai kapasitor juga dilakukan dengan dasar memperkecil nilai *ripple* tegangan yang muncul. Nilai kapasitor yang digunakan pada rangkaian adalah sebesar 5×10^{-3} F. Untuk merangkum

penjelasan di atas, Tabel I menampilkan nilai-nilai variabel tetap yang digunakan pada rangkaian Push-Pull Converter.

TABEL I
VARIABEL TETAP PUSH-PULL CONVERTER

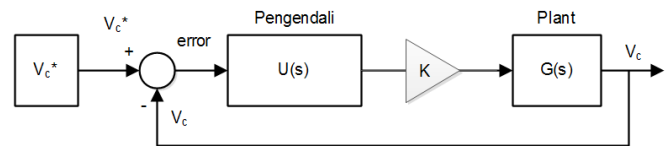
No	Variabel	Nilai
1	Frekuensi Kerja Transformator	10 kHz
2	V_p Transformator	12 V
3	V_s Transformator	400 V
4	L	100×10^{-6} H
5	C	5×10^{-3} F
6	R	80Ω
7	K	0.3

III. SIMULASI RANGKAIAN PUSH-PULL CONVERTER

A. Kondisi Beban Standar

Simulasi dilakukan dengan membandingkan tiga jenis pengendali yang berbeda. Tujuan dari simulasi adalah untuk melihat perbandingan kerja dari ketiga pengendali dan untuk melihat kerja dari pengendali sehingga dapat dilihat pengendali mana yang paling baik digunakan untuk berbagai jenis tujuan. Ketiga jenis pengendali yang digunakan adalah Pengendali PI dengan metode penalaan Ciancone-Marlin, Pengendali PI dengan metode penalaan Heuristik, dan Pengendali IP dengan metode penalaan Heuristik.

Pemilihan pengendali PI dan Pengendali IP didasarkan atas pertimbangan bahwa bentuk perbaikan yang paling dibutuhkan dalam rangkaian push-pull adalah perbaikan nilai tegangan output terhadap tegangan referensi. Selain itu sistem push-pull sudah memiliki respon yang cepat sehingga tidak membutuhkan kendali diferensial untuk mempercepat respon output. Disamping itu kedua tipe pengendali ini adalah pengendali yang paling mudah dan murah untuk diterapkan dalam penerapan riil.



Gbr. 4. Blok Diagram Sistem Lingkaran Tertutup

Gbr. 4 menunjukkan blok diagram sistem lingkaran tertutup. Sistem lingkaran tertutup terdiri dari *plant* yang diserikan dengan pengendali. Hasil keluaran pengendali diserikan dengan penguatan, K. Sehingga masukkan bagi *plant* adalah nilai *duty cycle* yang sudah dikalikan dengan nilai penguatan K. Berdasarkan Gbr. 4, dapat dinyatakan persamaan lingkaran terbuka (28) dan persamaan lingkaran tertutup sistem (29).

$$G_{OL(s)} = \frac{V_c(s)}{e(s)} \quad (28)$$

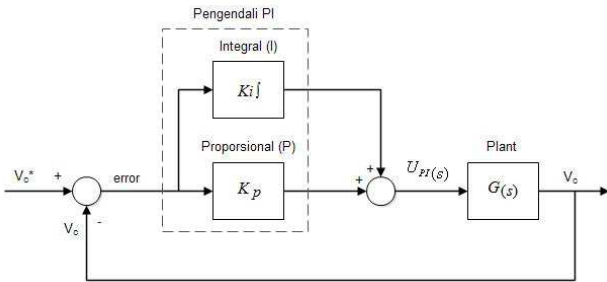
$$G_{CL(s)} = \frac{V_c(s)}{V_c^*(s)} = \frac{G_{OL(s)}}{1 - G_{OL(s)}} \quad (29)$$

Pada persamaan (27) telah dinyatakan persamaan fungsi alih untuk rangkaian Push-Pull Converter. Dengan memasukkan nilai-nilai parameter dan juga nilai-nilai tiap variabel tetap pada rangkaian Push-Pull Converter seperti

yang tertera pada Tabel I, maka fungsi alih dari Push-Pull Converter pada kondisi beban standar dapat diperoleh, yaitu:

$$G(s) = \frac{144028800}{s^2 + 52,5s} \quad (30)$$

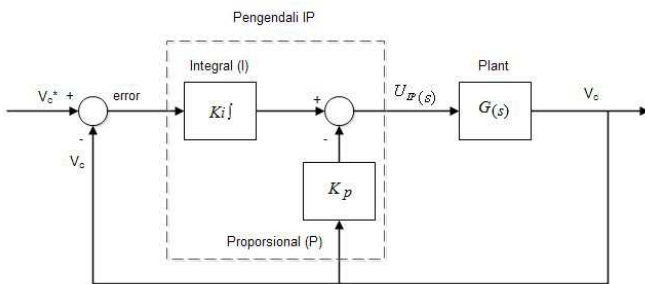
Persamaan (28) merupakan fungsi alih dari sistem rangkaian Push-Pull Converter tanpa pengendali. Sedangkan sesuai Gbr. 4, sistem lingkaran terbuka memiliki persamaan fungsi alih Push-Pull Converter yang diserikan dengan fungsi alih dari pengendali. Gbr. 5 menjelaskan diagram blok dari pengendali PI dan Gbr. 6 menjelaskan diagram blok dari pengendali IP.



Gbr. 5. Blok Diagram Sistem Lingkaran Tertutup [8]

Dari Gbr. 5 dapat dihasilkan persamaan fungsi alih untuk pengendali PI sebagai berikut:

$$U_{PI(s)} = \left(\frac{K_i}{s} + K_p \right) (V_c^* - V_c) \quad (31)$$



Gbr. 6. Blok Diagram Sistem Lingkaran Tertutup [9]

Dari Gbr. 6 dapat dihasilkan persamaan fungsi alih untuk pengendali IP sebagai berikut:

$$U_{IP(s)} = \frac{K_i}{s} (V_c^* - V_c) - (K_p V_c) \quad (32)$$

Sehingga fungsi alih system lingkaran terbuka berdasarkan persamaan fungsi alih rangkaian Push-Pull Converter dan fungsi alih pengendali yang telah didapatkan untuk tiap-tiap pengendali dengan kondisi beban standar adalah sebagai berikut:

Fungsi Alih Push-Pull Converter dengan Pengendali PI Ciancone-Marlin:

$$G_{OL PI Ciancone(s)} = \frac{234766,944 s + 1003880,736}{s^3 + 52,5 s^2} \quad (33)$$

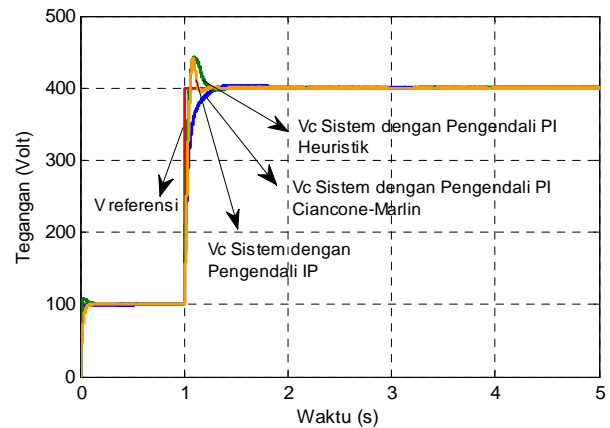
Fungsi Alih Push-Pull Converter dengan Pengendali PI Heuristik

$$G_{OL PI Heuristik(s)} = \frac{504100,8 s + 9361872}{s^3 + 52,5 s^2} \quad (34)$$

Fungsi Alih Push-Pull Converter dengan Pengendali IP

$$G_{OL IP(s)} = \frac{36007200}{s^3 + 52,5 s^2 + 720144 s} \quad (35)$$

Gbr. 7 akan menunjukkan grafik respon tegangan dari ketiga pengendali yang digunakan:



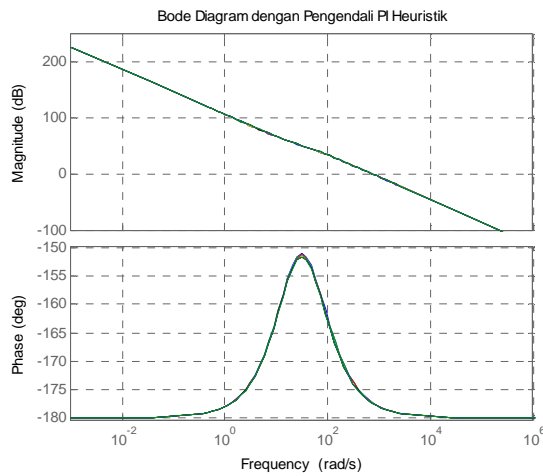
Gbr. 7. Vc(t) pada Sistem dengan Seluruh Pengendali

Gbr. 7 menunjukkan grafik hasil simulasi dari sistem untuk setiap jenis pengendali yang digunakan. Terdapat 4 buah grafik yang masing-masing menunjukkan grafik keluaran untuk setiap sistem dengan pengendali yang diujikan. Tabel II menunjukkan parameter respon waktu dari tegangan keluaran dengan tiga pengendali berbeda.

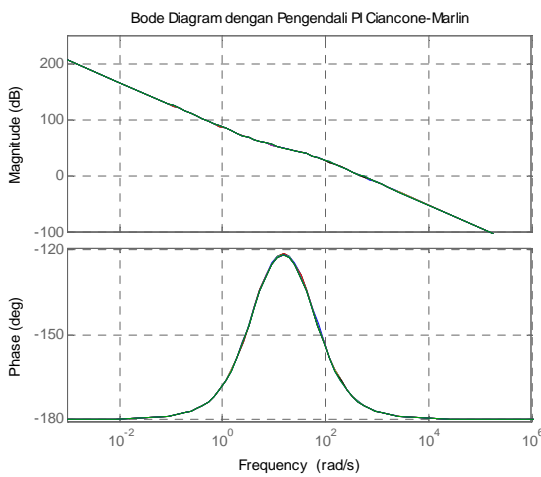
Dengan didapatkannya masing-masing fungsi alih lingkaran terbuka $G_{ol}(s)$ untuk setiap sistem, maka kestabilan sistem dapat dianalisis menggunakan Diagram Bode. Gbr. 8, Gbr. 9, dan Gbr. 10 menunjukkan diagram bode dari setiap system dengan tiga jenis pengendali yang berbeda.

TABEL II
PARAMETER RESPON WAKTU TEGANGAN SAAT BEBAN TETAP 80Ω

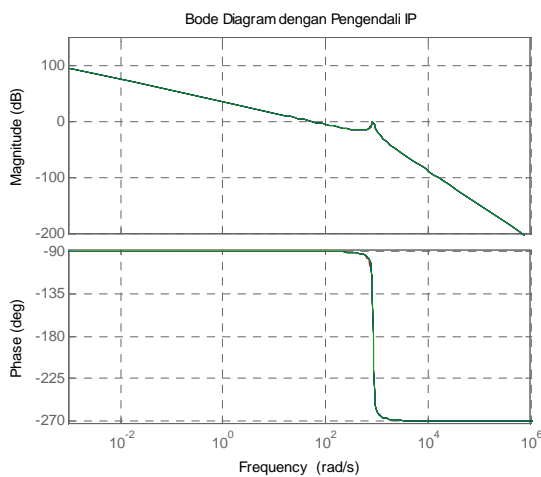
No	Variabel	Pengendali		
		PI Ciancone-Marlin	PI Heuristik	IP Heuristik
1	Rise Time	2.24 s	1.2 s	1.144 s
2	Settling Time	2.744 s	1.53 s	1.4014 s
3	Peak Time	1.5 s	1.094 s	1.08 s
4	% Overshoot	1.07%	9.69 %	10 %
5	Steady State Error	0	0	0
6	Phase Margin	2.73°	1.5°	89.8°
7	Gain Margin	36.8 dB	26.6 dB	0.424 dB



Gbr. 8. Diagram Bode Push-Pull Converter pada Sistem dengan Pengendali PI Ciancone-Marlin



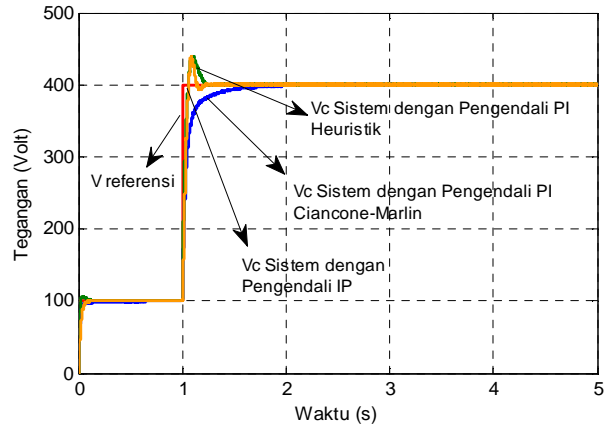
Gbr. 9. Diagram Bode Push-Pull Converter pada Sistem dengan Pengendali PI Heuristik



Gbr. 10. Diagram Bode Push-Pull Converter pada Sistem dengan Pengendali IP Heuristik

B. Kondisi Beban berubah

Pada bagian ini akan diperlihatkan mengenai hasil simulasi dengan melakukan perubahan beban pada sistem. Beban diubah menjadi 60Ω dan 100Ω. Kedua nilai beban akan diujikan melalui simulasi kedalam sistem dengan tiga jenis pengendali yang berbeda. Hasil simulasi sistem dengan beban konstan 60Ω ditunjukkan pada Gbr. 11.

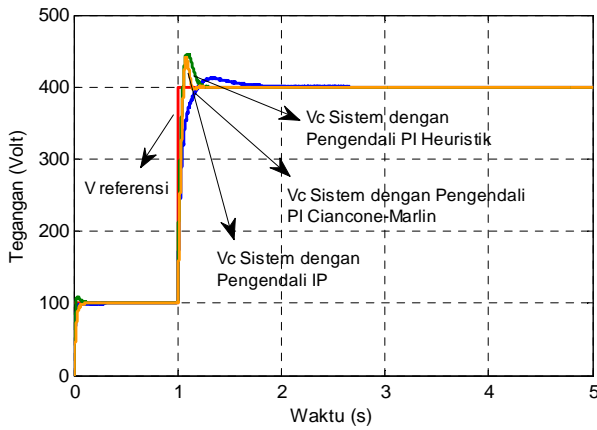


Gbr. 11. $V_c(t)$ pada Beban konstan 60Ω

Tabel III menunjukkan parameter respon waktu dari tegangan dengan tiga pengendali berbeda pada kondisi beban 60Ω. Kemudian hasil selanjutnya adalah hasil simulasi dengan menggunakan beban sebesar 100Ω. Gbr. 12 menunjukkan respon tegangan dari simulasi dengan beban 100Ω. Tabel IV menunjukkan parameter respon waktu dari tegangan dengan tiga pengendali berbeda pada kondisi beban 100Ω

TABEL III
PARAMETER RESPON WAKTU TEGANGAN SAAT BEBAN TETAP 60Ω

No	Variabel	Pengendali		
		PI Ciancone-Marlin	PI Heuristik	IP Heuristik
1	Rise Time	1.88 s	1.12 s	1.04 s
2	Settling Time	2.303 s	1.372 s	1.274 s
3	Peak Time	2.3461 s	1.0981 s	1.0861 s
4	% Overshoot	0.09 %	9.1%	8.87%
5	Steady State Error	0	0	0
6	Phase Margin	2.8°	1.54°	89.8°
7	Gain Margin	36.8 dB	26.6 dB	0.562 dB



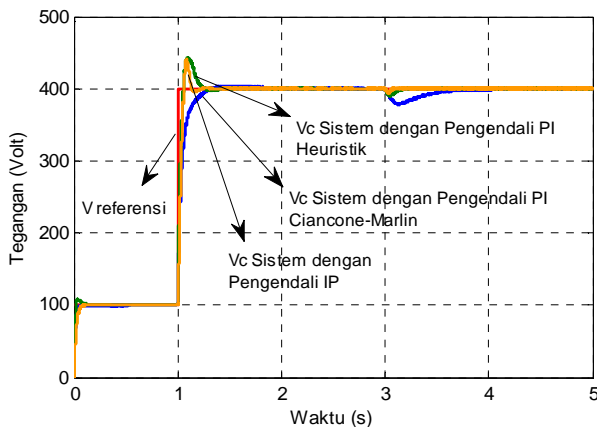
Gbr. 12. Vc(t) pada Beban konstan 100Ω

TABEL IV
PARAMETER RESPON WAKTU TEGANGAN SAAT BEBAN TETAP 100Ω

No	Variabel	Pengendali		
		PI Ciancone-Marlin	PI Heuristik	IP Heuristik
1	Rise Time	2.08 s	1.04 s	1.04 s
2	Settling Time	2.548 s	1.274 s	1.274 s
3	Peak Time	1.3381 s	1.1021 s	1.0851 s
4	% Overshoot	3.06 %	10.29 %	9.37 %
5	Steady State Error	0	0	0
6	Phase Margin	2.69°	1.48°	89.8°
7	Gain Margin	2.08 s	1.04 s	1.04 s

C. Kondisi Beban Standar dengan Perubahan Pengendali

Bagian ini akan diperlihatkan mengenai hasil simulasi pada kondisi beban standar 80Ω dengan perubahan beban menjadi 60Ω dan 100Ω. Kedua nilai beban akan diujikan melalui simulasi kedalam sistem dengan tiga jenis pengendali yang berbeda. Hasil grafik pada Gbr. 13 akan menunjukkan respon tegangan pada perubahan beban 60Ω.



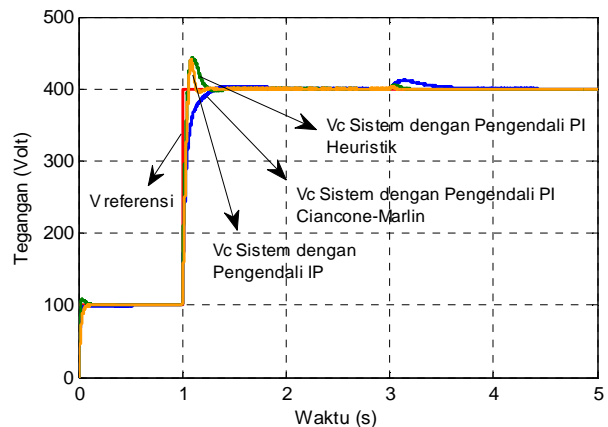
Gbr. 13. Vc(t) pada Perubahan Beban 60Ω

Selanjutnya Tabel V akan menunjukkan parameter kestabilan dari ketiga respon tegangan dengan tiga pengendali berbeda:

TABEL V
PARAMETER RESPON WAKTU TEGANGAN SAAT PERUBAHAN BEBAN 80 Ω MENJADI 60Ω

No	Variabel	Pengendali		
		PI Ciancone-Marlin	PI Heuristik	IP Heuristik
1	Rise Time	1.12 s	0.2 s	0.08 s
2	Settling Time	4.372 s	3.245 s	3.098 s
3	Peak Time	3.1389 s	3.0489 s	3.0269 s
4	% Overshoot	5.73 %	2.55 %	1.58 %
5	Steady State Error	0	0	0

Hasil selanjutnya adalah hasil simulasi dengan menggunakan perubahan beban dari 80 Ω menjadi 100Ω pada detik ketiga. Gbr. 14 menunjukkan respon tegangan dari simulasi dengan perubahan beban dari 80 Ω menjadi 100Ω. Tabel VI menunjukkan parameter respon waktu dari ketiga respon tegangan dengan tiga pengendali berbeda.



Gbr. 14. Vc(t) pada Perubahan Beban 80 Ω menjadi 100Ω

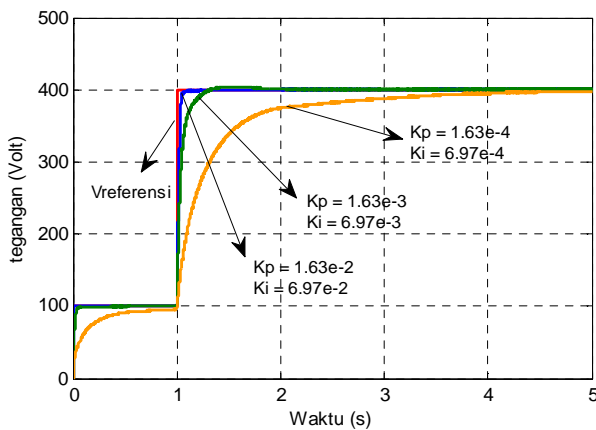
TABEL VI
PARAMETER RESPON WAKTU TEGANGAN SAAT PERUBAHAN BEBAN 80Ω MENJADI 100Ω

No	Variabel	Pengendali		
		PI Ciancone-Marlin	PI Heuristik	IP Heuristik
1	Rise Time	0.8 s	0.16 s	0.064 s
2	Settling Time	3.98 s	3.196 s	3.0748 s
3	Peak Time	3.1371 s	3.0491 s	3.0261 s
4	% Overshoot	3.01 %	1.4 %	0.9 %
5	Steady State Error	0	0	0

D. Kondisi Beban Standar dengan Perubahan Konstanta Pengendali

Percobaan selanjutnya adalah dengan memvariasikan nilai konstanta pengendali. Simulasi ini bertujuan untuk melihat sejauh mana perubahan nilai konstanta pengendali mampu mempengaruhi kestabilan sistem. Pada percobaan ini hanya nilai konstanta dari ketiga pengendali yang diubah sementara nilai beban yang digunakan adalah tetap sebesar 80Ω.

1) *Pengendali PI Ciancone-Marlin* : Simulasi pertama dari perubahan parameter pengendali adalah simulasi dengan menggunakan perubahan parameter pengendali PI Ciancone-Marlin. Gbr. 15 menunjukkan respon tegangan dari simulasi dengan perubahan parameter pengendali PI Ciancone-Marlin. Dilanjutkan dengan Tabel VII yang menunjukkan parameter kestabilan dari ketiga respon tegangan dengan tiga parameter pengendali yang berbeda.

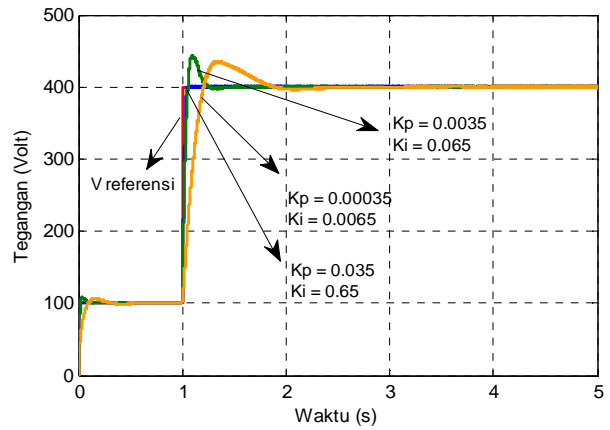


Gbr. 15. Vc(t) pada Perubahan Konstanta Pengendali PI Ciancone-Marlin

TABEL VII
PARAMETER RESPON WAKTU TEGANGAN SAAT PERUBAHAN KONSTANTA PENGENDALI PI CIANCONE-MARLIN

No	Variabel	Konstanta Pengendali		
		Kp = 1.63e-2 Ki = 6.97e-2	Kp = 1.63e-3 Ki = 6.97e-3	Kp = 1.63e-4 Ki = 6.97e-4
1	Rise Time	0.4 s	1.2 s	2.72 s
2	Settling Time	1.49 s	1.47 s	4.312 s
3	Peak Time	3.3231 s	1.4961 s	4.9991 s
4	% Overshoot	0.12 %	1.07 %	0.6 %
5	Phase Margin	1.8°	5.7°	17.8°
6	Gain Margin	32.8 dB	52.7 dB	72.8 dB

2) *Pengendali PI Heuristik* : Hasil selanjutnya adalah hasil simulasi dengan menggunakan perubahan parameter pengendali PI Heuristik. Gbr. 16 menunjukkan respon tegangan dari simulasi dengan perubahan parameter pengendali PI Heuristik. Dilanjutkan dengan Tabel VIII yang menunjukkan parameter kestabilan dari ketiga respon tegangan dengan tiga parameter pengendali yang berbeda.

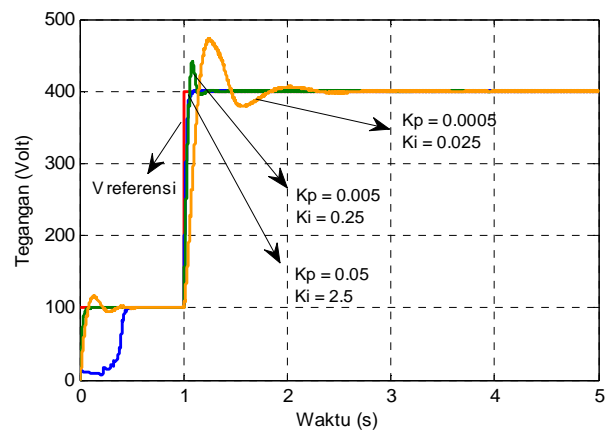


Gbr. 16. Vc(t) pada Perubahan Konstanta Pengendali PI Heuristik

TABEL VIII
PARAMETER RESPON WAKTU TEGANGAN SAAT PERUBAHAN KONSTANTA PENGENDALI PI HEURISTIK

No	Variabel	Konstanta Pengendali		
		Kp = 0.035 Ki = 0.65	Kp = 0.0035 Ki = 0.065	Kp = 0.00035 Ki = 0.0065
1	Rise Time	0.32 s	0.32 s	1.2 s
2	Settling Time	1.392 s	1.392 s	1.47 s
3	Peak Time	1.0731 s	1.0931 s	1.3371 s
4	% Overshoot	0.13 %	9.69 %	8.11 %
5	Phase Margin	0.866 °	2.73 °	8.53°
6	Gain Margin	17.3 dB	37.3 dB	57.3 dB

3) *Pengendali IP* : Simulasi terakhir adalah simulasi dengan menggunakan perubahan parameter pengendali IP Heuristik. Gbr. 17 menunjukkan respon tegangan dari simulasi dengan perubahan parameter pengendali IP Heuristik. Dilanjutkan dengan Tabel IX yang menunjukkan parameter kestabilan dari ketiga respon tegangan dengan tiga parameter pengendali yang berbeda.



Gbr. 17. Vc(t) pada Perubahan Konstanta Pengendali IP

TABEL IX
PARAMETER RESPON WAKTU TEGANGAN SAAT PERUBAHAN
KONSTANTA PENGENDALI IP

No	Variabel	Konstanta Pengendali		
		K _p = 0.05 K _i = 2.5	K _p = 0.005 K _i = 0.25	K _p = 0.0005 K _i = 0.025
1	Rise Time	0.32 s	0.24 s	1.2 s
2	Settling Time	1.392 s	1.294 s	1.47 s
3	Peak Time	1.1191 s	1.0831 s	1.1921 s
4	% Overshoot	0.16 %	9.14 %	15.91 %
5	Phase Margin	90°	89.8°	87.7°
6	Gain Margin	0.424 dB	0.424 dB	0.424 dB

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil simulasi, rangkaian Push-Pull Converter yang dirancang merupakan rangkaian yang tahan terhadap gangguan atau *robust*. Analisa kestabilan sistem Push-Pull Converter dengan menggunakan ketiga pengendali menunjukkan bahwa sistem yang dibangun semuanya stabil. Sistem dengan menggunakan pengendali IP memiliki gain margin yang cukup besar ($\sim 90^\circ$) dibandingkan sistem dengan menggunakan pengendali PI ($\sim 10^\circ$). Hal ini menunjukkan sistem dengan pengendali IP memiliki tingkat kestabilan yang lebih baik. Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan dengan membandingkan respon tegangan dari sistem dengan ketiga pengendali yang digunakan, disimpulkan bahwa Pengendali IP adalah pengendali yang paling baik diterapkan pada sistem Push-Pull Converter yang dirancang ini.

Pada simulasi dengan kondisi beban berubah ketika beban dirubah menjadi 60Ω dan 100Ω , pengendali IP adalah pengendali yang menghasilkan respon tegangan yang paling baik yang ditandai dengan munculnya overshoot namun waktu respon yang paling cepat diantara seluruh pengendali yang digunakan.

Sedangkan pada seluruh simulasi dengan perubahan beban juga masih memperlihatkan pengendali IP sebagai pengendali yang paling baik. Ditandai dengan kemunculan overshoot sebesar namun dengan tetap menghasilkan waktu pulih yang paling cepat diantara ketiga pengendali lainnya.

Pada simulasi dengan kondisi beban standar dengan perubahan konstanta pengendali menghasilkan hasil yang

berbeda untuk setiap pengendali yang digunakan. Untuk pengendali PI Ciancone-Marlin, nilai konstanta yang terbaik dihasilkan pada nilai $K_p=1.63e-2$ dan $K_i=6.97e-2$ yang ditandai dengan nilai rise time yang paling singkat dan overshoot yang paling rendah. Sedangkan untuk pengendali PI Heuristik nilai konstanta terbaik dihasilkan oleh konstanta $K_p=0.035$ dan $K_i=0.65$. Meskipun nilai konstanta ini memiliki nilai rise time yang sama dengan respon dengan konstanta $K_p=0.0035$ dan $K_i=0.065$, namun dengan nilai overshoot yang jauh lebih kecil yaitu sebesar 0.13%. Dan untuk pengendali PI nilai konstanta terbaik dihasilkan oleh konstanta $K_p=0.005$ dan $K_i=0.25$ yang ditandai nilai nilai rise time yang paling singkat meskipun nilai overshootnya lebih besar jika dibandingkan dengan respon dengan nilai konstanta $K_p=0.05$ dan $K_i=2.5$.

Hasil simulasi sistem rangkaian Push-Pull Converter yang dibangun juga menunjukkan kemampuan merespon perubahan kondisi lingkungan pada saat operasi dan tetap mampu memberikan tegangan kerja optimal sesuai dengan kebutuhan sistem.

REFERENSI

- [1] Guerrero, Joseph M., Kai Sun, Li Zing, Yan Xing. (2011). *A Distributed Control Strategy Based on DC Bus Signaling for Modular Photovoltaic Generation Systems with Battery Energy Storage*. IEEE: IEEE Transactions on Power Electronics Vol. 26 No. 10.
- [2] T.Patarau, D.Petreus, S.R. Daraban, R.A. Munteanu, D. Moga, A. Rusu. (2011). *Analysis And Design Of A Bidirectional Dc-Dcconverter With Current Doubler Rectifier Used In Smart Grid*. IEEE: Acemp – Electromotion.
- [3] Patarau, Toma., Petreus, Dorin., Etz, Radu., Cirstea, Marcian., Daraban, Stefan. (2012). *Digital control of bidirectional DC-DC converters in Smart Grids*. IEEE.
- [4] Pekik, Wulandari. (2004). *Perbaikan Kinerja Pengendali Arus Keluaran Konverter Daya dengan Menggunakan Induktor Virtual*. Politeknik Negeri Surabaya: IES.
- [5] Erickson, Robert W., Maksimovic, Dragan. (2001). *Fundamentals of Power Electronics Second Edition*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- [6] Argo Dahono, Pekik (2010). *Bahan Ajar Elektronika Daya: Konverter DC-DC*. Bandung: ITB.
- [7] Hart, Daniel W. (1997). *Introduction to Power Electronics (International Edition)*. Indiana: Prentice Hall International Edition.
- [8] Nise, Norman S. (2003). *Control System Engineering 4th Edition*. Wiley.
- [9] F I Ahmed, A M El-Tobshy, A A Mahfouz, and M M Ibrahim. (1998). *(I-P) Adaptive Controller for DC Motor Drives: A Hardware and Software Approach*. UKACC International Conference on CONTROL, Conference Publication No. 455, IEE.