

Simulasi dan Analisa Performansi Buck Converter Dengan Pengendali Dua Derajat Kebebasan

Heru Dibyo Laksono, Firmansyah Saputra, dan Ismail*

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas

*Corresponding author, e-mail: is.ismail024@gmail.com

Abstrak— Kebutuhan catu daya DC yang semakin tinggi dewasa ini menyebabkan banyaknya kebutuhan akan suatu sistem yang dapat mengkonversikan tegangan DC dari suatu tingkat tegangan tertentu ke tingkat tegangan lain. Salah satu catu daya DC adalah buck converter yang berfungsi untuk menurunkan tegangan. Agar sistem buck converter ini memiliki tanggapan tegangan keluaran yang baik maka perlu dikembangkan dengan pengendali PID Dua Derajat Kebebasan. Ada banyak sistem kendali yang telah dikembangkan untuk mengendalikan tegangan keluaran switching converter, tetapi pada penelitian ini bertujuan untuk menganalisa salah satu tipe pengendali yaitu pengendali PID Dua Derajat Kebebasan. Pengendali PID Dua Derajat Kebebasan merupakan pengendali dengan parameter-parameter kendali proporsional, integral dan derivative. Analisa pada pengendali dilakukan dengan bantuan perangkat lunak MATLAB. Analisa pertama yang dilakukan yaitu menganalisa sistem buck converter tanpa pengendali, dari analisa tersebut didapatkanlah kriteria perancangan yang diinginkan. Kemudian dirancang sistem buck converter dengan pengendali Dua Derajat Kebebasan tipe parallel, feedforward, feedback dan filter. Dari semua tipe pengendali tersebut maka didapatkan bahwa pengendali Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama (PDF) tipe feedforward dengan nilai $K_p = 171$, $K_d = 0.00545$, $T_f = 4.88e-07$ dan pengendali Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama (PDF) tipe feedbaack dengan nilai $K_p = 171$, $K_d = 0.00545$, $T_f = 4.88e-07$ adalah pengendali yang memenuhi kriteria yang diinginkan. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem kendali buck converter dengan pengendali dua derajat kebebasan dapat menghasilkan sistem buck converter yang memiliki performansi yang memuaskan daripada buck converter tanpa pengendali.

Kata Kunci : Buck converter, PID Dua Derajat Kebebasan, sistem kendali, performansi domain waktu

Abstract— DC power supply are commonly used to convert DC voltage level to another level. One type of DC power supply is a buck converter that is used to lower a voltage level. In order to have a proper feedback of voltage output in buck converter system, it will be controlled by a Two Degrees of Freedom PID Controller. This research aim to analyze the performance of the buck converter that have a Two Degrees of Freedom PID Controller. Two Degrees of Freedom Controller has proportional, integral and derivative control parameters. The simulation of the system is made with the help of software MATLAB. The first simulation and analysis is buck converter system without controller. From the analysis, the desired criteria is obtained . Then a buck converter system was designed. It is controlled using a parallel type of Two Degrees of Freedom PID Controller as well as feedforward, feedback, and filter. From all these types of controllers, it showed that the first order of Proportional Differential Filter (PDF) feedforward type with the value of $K_p = 171$, $K_d = 0.00545$, $T_f = 4.88e-07$ and the first order of PDF feedback type with the value of $K_p = 171$, $K_d = 0.00545$, $T_f = 4.88e-07$ was considered as the proper controller that matched with the characteristic. Therefore, it could be concluded that the buck converter controlling system with Two Degrees of Freedom PID Controller could produce a buck converter system with a good performance compared to buck converter without any controllers.

Keywords : Buck converter, Two Degrees of Freedom PID Controller, control system, time domain performance.

1. Pendahuluan

Saat ini hampir seluruh komponen elektronik memerlukan catu daya DC. Kebutuhan catu daya DC ini mulai dari skala tegangan rendah seperti yang digunakan pada mikroprosesor dan IC,

tegangan menengah seperti pada motor-motor listrik dan generator, sampai pada skala tegangan tinggi untuk transmisi listrik tegangan tinggi. Karena penggunaan catu daya DC yang luas ini, diperlukan suatu sistem yang dapat

Received date 2017-11-21, Revised date 2018-5-27, Accepted date 2018-5-27

<https://doi.org/10.25077/jnte.v7n2.508.2018>

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

mengkonversikan tegangan DC dari suatu tingkat tegangan tertentu ke tingkat tegangan lain sesuai kebutuhan pemakaian. Sistem ini harus dapat bekerja secara efisien dan keluaran tegangannya pun harus memiliki kualitas yang baik.

Pada umumnya terdapat dua tipe untuk mengkonversi tegangan DC yaitu tipe linear dan tipe peralihan. Pada tipe linear menggunakan transistor untuk mengatur arus beban. Dengan mengatur arus basis transistor, tegangan keluaran dapat diatur dari tegangan 0 volt sampai dengan tegangan masukan. Ketika terjadi perubahan tegangan atau beban, arus basis diatur untuk menghasilkan keluaran tegangan yang diinginkan. Rangkaian semacam ini dinamakan *Linear Voltage Regulator* karena transistor bekerja pada daerah linear, bukan pada daerah *cut-off* atau saturasi. Akibatnya transistor bekerja seperti resistor variabel. Kekurangan dari tipe linear ini diantaranya adalah ukurannya yang besar dan efisiensi yang kurang baik. Untuk tipe peralihan dikenal juga dengan sebutan *DC Chopper* dimanfaatkan terutama untuk penyediaan tegangan keluaran DC yang bervariasi besarnya sesuai dengan permintaan pada beban. Pada *Switching Converter*, transistor yang digunakan beroperasi sebagai *switching*, yaitu dengan sepenuhnya *on* atau sepenuhnya *off*. *Switching Converter* memiliki kelebihan berupa efisiensinya yang lebih tinggi dan ukurannya yang dapat jauh lebih kecil dari pada *Linear Voltage Regulator*.

Sistem *Buck converter* merupakan salah satu jenis *DC Chopper* yang memiliki fungsi menstabilkan tegangan dengan menurunkan tegangan dimana tegangan keluaran lebih rendah dari tegangan masukan tanpa harus menghilangkan daya yang relatif besar dari pada converter tipe *linear*. *Buck converter* ini memiliki tegangan keluaran yang diinginkan yang akan dibandingkan dengan tegangan keluaran dari sensor. Perbedaan yang didapatkan dari kedua tegangan keluaran ini adalah *error* tegangan yang akan dikompensasi oleh kompensator untuk mengatur penyalan *switching* dengan menggunakan *Pulse Width Modulator* (PWM).

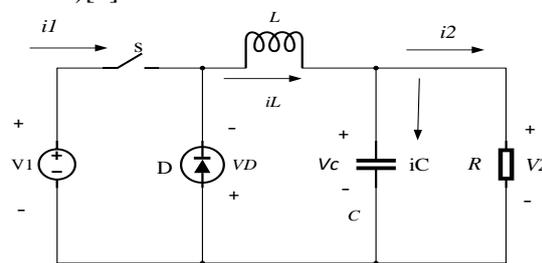
Ada banyak sistem kendali yang telah dikembangkan untuk mengendalikan tegangan keluaran *switching converter*, tetapi tulisan bertujuan untuk menganalisa salah satu tipe *pengendali* yaitu menggunakan pengendali *PID Dua Derajat Kebebasan*. Pengendali *PID Dua*

Derajat Kebebasan merupakan pengendali dengan parameter-parameter kendali *proportional, integral* dan *derivative*.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Prinsip Kerja *Buck converter*

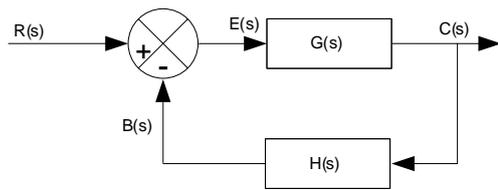
Operasi dasar dari *buck converter* adalah arus dalam sebuah induktor dikendalikan oleh dua switch (biasanya transistor dan dioda). Dalam converter ideal, semua komponen dianggap sempurna. Secara khusus, saklar dan dioda memiliki drop tegangan nol saat *on* dan arus nol ketika *off* dan induktor memiliki resistansi seri nol. Selanjutnya, diasumsikan bahwa tegangan input dan output tidak berubah selama siklus (ini akan menyiratkan kapasitansi keluaran adalah tak terbatas)[1].



Gambar 1. *Buck converter* [2]

Sistem kendali merupakan bagian yang terintegrasi dari sistem kehidupan modern saat ini. Untuk analisis dan desain sistem kendali, sistem fisis harus dibuat model fisisnya. Model fisis ini harus dapat menggambarkan karakteristik dinamis sistem tersebut secara memadai. Dari model fisis diturunkan model matematis. Model matematis diartikan sebagai hubungan matematik yang menghubungkan keluaran sistem dengan masukannya. Dengan menggunakan transformasi Laplace diperoleh nantinya fungsi alih dan persamaan keadaan dari suatu sistem kendali. Setiap sistem kendali dapat dinyatakan dengan suatu diagram blok yang terdiri dari beberapa blok, titik penjumlahan dan titik cabang [3].

Adapun diagram blok sistem lingkaran tertutup diperlihatkan pada Gambar 2 :



Gambar 2. Sistem Lingkaran Tertutup [4]

2.2 Analisa Peralihan

Bentuk standar fungsi alih orde kedua dinyatakan oleh persamaan (1) berikut :

$$G(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \tag{1}$$

Dimana

ζ : rasio redaman

ω_n : frekuensi alamiah tidak teredam

Tanggapan peralihan sistem terhadap masukan undak satuan bergantung pada syarat awal. Untuk memudahkan perbandingan terhadap peralihan berbagai macam sistem, hal yang biasa dilakukan adalah menggunakan syarat awal standar yaitu sistem mula-mula keadaan diam sehingga keluaran dan semua turunan waktunya pada awal tanggapan sama dengan nol, selanjutnya karakteristik tanggapan secara mudah dapat dibandingkan. Tanggapan peralihan sistem kendali praktis sering menunjukkan osilasi teredam sebelum mencapai keadaan mantap. Dalam menentukan karakteristik tanggapan peralihan sistem kendali terhadap masukan undak satuan biasanya ditentukan parameter sebagai berikut.

2.2.1 Waktu puncak (t_p)

Waktu puncak adalah waktu yang diperlukan tanggapan untuk mencapai puncak lewatan pertama kali. Karena waktu puncak berkaitan dengan lewatan puncak pertama maka diperoleh persamaan (2) berikut :

$$\omega_d t_p = \pi \rightarrow t_p = \frac{\pi}{\omega_d} \tag{2}$$

Selain itu waktu puncak ini bisa juga dihitung dengan persamaan (3) berikut :

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \tag{3}$$

Adapun satuan waktu puncak ini dinyatakan dalam detik. Agar sistem kendali mempunyai

performansi yang baik maka diusahakan nilai waktu puncak mempunyai nilai yang kecil.

2.2.2 Lewatan maksimum (M_p)

Lewatan maksimum adalah harga puncak maksimum dari kurva tanggapan yang diukur dari satu. Jika harga keadaan mantap tanggapan tidak sama dengan satu maka biasa digunakan persentase lewatan maksimum yang dinyatakan dengan persamaan (4) berikut [5][6]:

$$M_p = \frac{c(t_p) - c(\infty)}{c(\infty)} \times 100\% \tag{4}$$

Selain itu persentase lewatan maksimum bisa juga dihitung dengan persamaan (5) berikut:

$$M_p = e^{-\left(\frac{\sigma}{\omega_d}\right)\pi} \times 100\% \tag{5}$$

Adapun satuan lewatan maksimum, ini dinyatakan dalam persen. Agar sistem kendali mempunyai performansi yang baik maka lewatan maksimum harus kurang dari 20%.

2.2.3 Waktu Keadaan Mantap (t_s)

Waktu penetapan adalah waktu yang diperlukan kurva tanggapan untuk mencapai dan menetap dalam daerah di sekitar harga akhir yang ukurannya ditentukan dengan persentase mutlak dari harga akhir biasanya 2%, 5% dan 0.5%. Waktu penetapan ini dihitung untuk ($0 < \zeta < 0.9$) digunakan kriteria lebih kurang 2% maka penetapan mendekati empat kali konstanta waktu dengan rumusan pada persamaan (6) berikut:

$$t_s \approx \frac{4}{\zeta\omega_n} \tag{6}$$

Untuk kriteria $\pm 5\%$ berlaku persamaan (7) berikut:

$$t_s \approx \frac{3}{\zeta\omega_n} \tag{7}$$

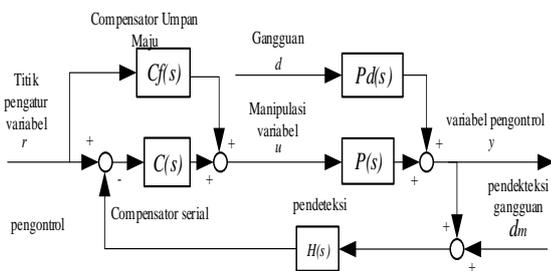
Untuk kriteria $\pm 0.50\%$ berlaku persamaan (8) berikut :

$$t_s \approx \frac{5}{\zeta\omega_n} \tag{8}$$

2.3 PID Dua Derajat Kebebasan

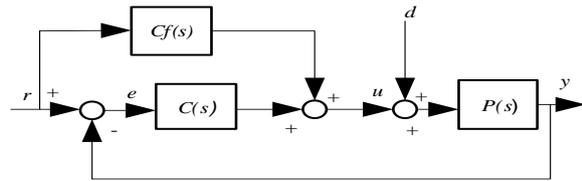
Derajat kebebasan dari sistem kontrol sebagai jumlah fungsi transfer lingkaran tertutup yang dapat disesuaikan atau diatur secara terpisah. Sistem kontrol dua derajat kebebasan secara alami memiliki keunggulan dibandingkan dengan sistem kontrol satu derajat kebebasan [7][8]. Pengendali PID Dua Derajat Kebebasan yang digunakan pada tipe paralel yaitu pengendali Proporsional Derivative (PD), pengendali Proporsional Derivative Filter Orde Pertama (PDF), pengendali Proporsional Integral (PI), pengendali Proporsional Integral Derivative (PID) dan pengendali Proporsional Integral Derivative Filter Orde Pertama (PIDF). Untuk tipe Feedforward yaitu pengendali Proporsional Derivative Filter Orde Pertama (PDF), pengendali Proporsional Integral (PI), pengendali Proporsional Integral Derivative (PID) dan pengendali Proporsional Integral Derivative Filter Orde Pertama (PIDF). Pada tipe filter yaitu pengendali Proporsional Derivative (PD), pengendali Proporsional Derivative Filter Orde Pertama (PDF), pengendali Proporsional Integral (PI), pengendali Proporsional Integral Derivative (PID) dan pengendali Proporsional Integral Derivative Filter Orde Pertama (PIDF).

Adapun blok diagram PID dua derajat kebebasan secara umum diperlihatkan pada Gambar 3

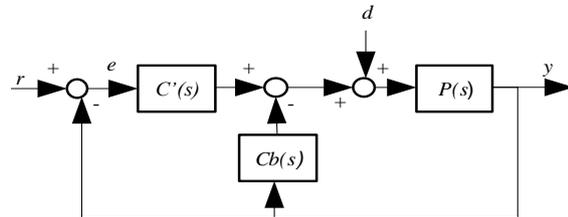


Gambar 3. Blok diagram PID dua derajat kebebasan [1].

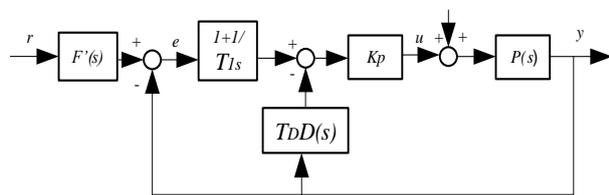
Untuk diagram blok diagram PID dua derajat kebebasan tipe paralel, feedforward dan filter diperlihatkan pada Gambar 4,5 dan 6



Gambar 4. Blok diagram pengendali dua derajat kebebasan tipe paralel [1].



Gambar 5. Pengendali dua derajat kebebasan tipe feedforward [1].



Gambar 6. Pengendali dua derajat kebebasan tipe filter [1].

3. Metoda

Penelitian ini adalah jenis penelitian studi literatur dan simulasi model. Simulasi model dilakukan dengan bantuan software Matlab. Studi literatur dilakukan untuk mencari data sekunder yang akan mendukung data penelitian, juga diperlukan untuk mengetahui sampai kemana ilmu yang berhubungan dengan penelitian telah berkembang, sampai ke mana terdapat kesimpulan sehingga situasi yang diperlukan dapat diperoleh.

a. Langkah-langkah Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan pada penelitian ini yaitu studi literatur, pemodelan sistem menjadi model matematis yang bertujuan untuk mendapatkan fungsi alih dalam pembuatan program. Kemudian dirancanglah sistem *buck converter* tanpa pengendali dan menggunakan pengendali. Langkah terakhir yaitu menganalisa

sistem buck converter dengan cara membandingkan perancangan mana yg lebih baik.

b. Pemodelan Matematis Sistem Buck Converter

Pada bagian ini dilakukan pemodelan matematis elemen – elemen dari sistem *buck converter*. Hasil dari pemodelan matematis elemen – elemen dari sistem *buck converter* ini dalam bentuk persamaan diferensial linear kemudian dengan bantuan transformasi Laplace diperoleh fungsi alih sistem *buck converter* dengan keluarannya berupa tegangan dan masukan berupa tegangan referensi[9][10].

Berikut fungsi transfer *buck converter* berdasarkan Gambar 1 yang digunakan dalam simulasi program. Parameter-parameter yang digunakan sebagai berikut[11][12] :

Tabel 1. Parameter-Parameter *Buck Converter*

Parameter	Nilai
Tegangan input	40V
Induktor	250 x 10 ⁻⁶ H
Tahanan Induktor	0 ohm
Kapasitor	60 x 10 ⁻⁶ F
Resistor	10 ohm
Frekuensi	20 kHz
Gain	0.4
Tegangan Output	0.4 x 40V
Arus Induktor	1.6 A
I2	1.6 A
I1	0.64 A

Dari nilai yang ada pada Tabel 1 didapat persamaan-persamaan sebagai berikut:

$$PE = V_1 I_1 T = 40 \times 0.64 \times 50 \mu = 1.28 \text{mJ} \tag{9}$$

$$W_C = \frac{1}{2} C V_C^2 = 0.5 \times 60 \mu \times 16^2 = 7.68 \text{mJ} \tag{10}$$

$$W_L = \frac{1}{2} L I_L^2 = 0.5 \times 250 \mu \times 1.6^2 = 0.32 \text{mJ} \tag{11}$$

$$SE = W_L + W_C = 0.32 + 7.68 = 8 \text{mJ} \tag{12}$$

$$CIR = \frac{W_C}{W_L} = \frac{7.68}{0.32} = 24 \tag{13}$$

$$EF = \frac{SE}{PE} = \frac{8}{1.28} = 6.25 \tag{14}$$

$$EL = P_{loss} \times T = 0 \text{mJ} \tag{15}$$

$$\eta = \frac{P_0}{P_0 + P_{loss}} = 1 \tag{16}$$

$$\tau = \frac{2T \times EF}{1 + CIR} \left(1 + CIR \frac{1 - \eta}{\eta} \right) = 25 \mu\text{s} \tag{17}$$

$$\tau_d = \frac{2T \times EF}{1 + CIR} \frac{CIR}{CIR(1 - \eta)} = 625 \mu\text{s} \tag{18}$$

$$\xi = \frac{\tau_d}{\tau} = \frac{CIR}{\eta \left(1 + CIR \frac{1 - \eta}{\eta} \right)^2} = 25 \gg 0.25 \tag{19}$$

Dari nilai-nilai yg didapat pada persamaan (9)-(19). Maka diperoleh fungsi transfer yang pada persamaan (20) dan persamaan (21):

$$G(s) = \frac{M}{1 + s\tau + s^2 \tau \tau_d} = \frac{M / \tau \tau_d}{(s + s_1)(s + s_2)} \tag{20}$$

$$G(s) = \frac{M}{1 + s\tau + s^2 \tau \tau_d} = \frac{0.4}{1.5 \times 10^{-8} s^2 + 2.5 \times 10^{-5} s + 1.4} \tag{21}$$

4. Hasil dan Pembahasan

Pada bagian ini akan menjelaskan tentang simulasi dan analisa tanggapan tegangan sistem *buck converter* tanpa dan dengan pengendali terhadap masukan undak satuan. Adapun parameter yang diamati meliputi waktu puncak (Tp), waktu keadaan mantap (Ts) dan lewatan maksimum (Mp). Adapun hasil simulasi tanggapan tegangan sistem *buck converter* tanpa pengendali diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Simulasi Sistem *Buck Converter* Tanpa Pengendali

Kriteria	Tanpa Pengendali
Tp (detik)	0.00032519
Ts (detik)	0.0046162
Mp (%)	76.18

Berdasarkan hasil simulasi sistem *buck converter* tanpa pengendali diperoleh informasi bahwa tanggapan tegangan sistem *buck converter* mempunyai nilai lewatan maksimum yang cukup tinggi dan berakibat pada performansi dari sistem *buck konverter* akan menjadi kurang baik. Untuk itu perlu dirancang suatu pengendali dengan menggunakan kriteria perancangan tertentu. Pengendali yang digunakan adalah pengendali 2 derajat kebebasan dan kriteria perancangan yang

diinginkan adalah waktu keadaan mantap kecil dari 0.004 detik, waktu puncak kecil dari 0.003 detik dan lewatan maksimum kecil dari 20 %. Dengan kriteria perancangan yang ditentukan tersebut diharapkan performansi dari sistem *buck konverter* akan menjadi lebih baik.

Setelah ditentukan kriteria perancangan, maka dilanjutkan dengan perancangan pengendali 2 derajat kebebasan sistem *buck konverter* dengan berbagai tipe pengendali. Adapun tipe pengendali yang digunakan meliputi tipe paralel, tipe feedforward, tipe feedback dan tipe filter.

Untuk pengendali 2 derajat kebebasan tipe paralel, jenis – jenis pengendali yang dirancang meliputi pengendali Proporsional Derivative (PD), pengendali Proporsional Derivative Filter Orde Pertama (PDF), pengendali Proporsional Integral (PI), pengendali Proporsional Integral Derivative (PID) dan pengendali Proporsional Integral Derivative Filter Orde Pertama (PIDF). Adapun hasil simulasi tanggapan tegangan sistem *buck konverter* dengan pengendali 2 derajat kebebasan tipe paralel ini ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Simulasi Sistem Buck Converter Dengan Pengendali 2 Derajat Kebebasan Tipe Paralel

Jenis Pengendali	Tp (detik)	Ts (detik)	Mp(%)
PD	8.6e-5	0.00461	9.3191
PDF	0.0001	7.3e-05	0.5835
PI	0.0059	0.0049	0.6558
PID	0.0002	0.0002	70.5
PIDF	0.0002	0.0002	4.7567

Hasil simulasi pada Tabel 3 menunjukkan pengendali PDF dan PIDF memenuhi kriteria perancangan. Hasil ini diperoleh untuk pengendali PDF dengan nilai $K_p = 171$, $K_d = 0.00545$, $T_f = 4.88e-07$ dan PIDF dengan nilai $K_p = 20.1$, $K_i = 5.59e+04$, $K_d = 0.00128$, $T_f = 2.31e-07$ yang

Untuk pengendali 2 derajat kebebasan tipe feedforward, jenis – jenis pengendali yang dirancang meliputi pengendali Proporsional Derivative Filter Orde Pertama (PDF), pengendali Proporsional Integral (PI), pengendali Proporsional Integral Derivative (PID) dan pengendali Proporsional Integral Derivative Filter Orde Pertama (PIDF). Adapun hasil simulasi tanggapan tegangan sistem *buck*

converter dengan pengendali 2 derajat kebebasan tipe feedforward ini ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Simulasi Sistem Buck Converter Dengan Pengendali dua Derajat Kebebasan Tipe Feedforward

Jenis Pengendali	Tp (detik)	Ts (detik)	Mp(%)
PDF	0.0001	7.3e-05	0
PI	0.0059	0.0049	0.65567
PID	0.0002	0.0002	2.863
PIDF	0.0002	0.0002	4.7447

Berdasarkan hasil simulasi yang diperlihatkan pada Tabel 4 maka performa yang yang memenuhi kriteria perancangan adalah pengendali PDF, PID dan PIDF. Pengendali PDF dengan nilai $K_p = 171$, $K_d = 0.00545$, $T_f = 4.88e-07$ dan pengendali PID dengan nilai $K_p = 19.5$, $K_i = 5.79e+0.4$, $K_d = 0.00129$ serta pengendali PIDF dengan nilai $K_p = 20.1$, $K_i = 5.59e+0.4$, $K_d = 0.00128$, $T_f = 2.31e-0.7$

Untuk pengendali 2 derajat kebebasan tipe feedback, jenis – jenis pengendali yang dirancang meliputi pengendali Proporsional Derivative Filter Orde Pertama (PDF), pengendali Proporsional Integral (PI), pengendali Proporsional Integral Derivative (PID) dan pengendali Proporsional Integral Derivative Filter Orde Pertama (PIDF). Adapun hasil simulasi tanggapan tegangan sistem *buck konverter* dengan pengendali dua derajat kebebasan tipe feedback ini ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Simulasi Sistem Buck Converter Dengan Pengendali dua Derajat Kebebasan Tipe Feedback

Jenis Pengendali	Tp (detik)	Ts (detik)	Mp(%)
PDF	0.0001	7.3e-05	0
PI	0.0059	0.0049	0.6557
PID	0.0002	0.0002	2.863
PIDF	0.0002	0.0002	4.7447

Berdasarkan hasil simulasi yang diperlihatkan pada Tabel 5 terlihat bahwa dengan pengendali Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama (PDF) dengan nilai $K_p = 171$, $K_d = 0.00545$, $T_f = 4.88e-07$ dan pengendali Proporsional Integral Diferensial (PID) dengan nilai $K_p = 19.5$, $K_i = 5.79e+0.4$, $K_d = 0.00129$ serta pengendali Proporsional Integral Diferensial Filter Orde Pertama (PIDF) dengan nilai $K_p = 19.5$, $K_i =$

5.79e+0.4, $K_d = 0.00129$ yang memenuhi kriteria perancangan.

Untuk pengendali 2 derajat kebebasan tipe filter, jenis – jenis pengendali yang dirancang meliputi pengendali Proporsional Derivative (PD), pengendali Proporsional Derivative Filter Orde Pertama (PDF), pengendali Proporsional Integral (PI), pengendali Proporsional Integral Derivative (PID) dan pengendali Proporsional Integral Derivative Filter Orde Pertama (PIDF). Adapun hasil simulasi tanggapan tegangan sistem buck converter dengan pengendali kebebasan tipe filter ini ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Simulasi Sistem Buck Converter Dengan Pengendali dua Derajat Kebebasan Tipe Filter

Jenis Pengendali	T_p (detik)	T_s (detik)	M_p (%)
PD	8.4e-5	9.2e-05	2.3016
PDF	0.0002	0.0001	0
PI	0.0059	0.0049	0.6558
PID	0.0003	0.007	6.613
PIDF	0.0003	0.0008	10.29

Berdasarkan hasil simulasi yang diperlihatkan pada Tabel 6 terlihat bahwa dengan pengendali dua derajat kebebasan tipe filter, pengendali Proporsional Diferensial (PD) dengan nilai $K_p = 173$, $K_d = 0.00303$ dan pengendali Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama (PDF) dengan nilai $K_p = 171$, $K_d = 0.00545$, $T_f = 4.88e-07$ yang memenuhi kriteria perancangan.

Hasil rancangan pengendali dua derajat kebebasan dengan berbagai tipe yang sudah memenuhi kriteria perancangan ini, kemudian dibandingkan satu sama lain untuk mendapatkan informasi pengendali yang memiliki performansi yang paling baik diantara pengendali – pengendali tersebut. Hasil yang diperoleh adalah pengendali Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama (PDF) tipe feedforward dan tipe feedback yang paling baik performansinya dengan waktu puncak 0.0001 detik, waktu keadaan mantap 0.000073 detik dan lewatan maksimum 0 %

5. Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Sistem kendali *buck converter* dengan pengendali dua derajat kebebasan memiliki performansi yang lebih baik dibandingkan dengan performansi sistem kendali *buck converter* tanpa pengendali
- b. Hasil simulasi juga memperlihatkan bahwa pengendali Proporsional Diferensial Filter Orde Pertama (PDF) tipe feedforward dan tipe feedback yang mempunyai performansi yang paling baik diantara pengendali–pengendali yang memenuhi kriteria perancangan.

Daftar Pustaka

- [1] M. A. Taguchi and Hidefumi, "Two Degree of Freedom" *PID Controllers*," International Journal of Control, Automation, and Systems, pp. 401-403, 2003.
- [2] H. Y. Fang Lin Luo and M. Rashid, *Digital Power Electronics and Applications*, California: ELsevier Academic Press, 2005.
- [3] H. D. Laksono, *Sistem Kendali*, Padang: Graha Ilmu, 2013.
- [4] K. Ogata, *Sistemas de Control En Tiempo Discreto*, California: Pearson Education, 1996.
- [5] H. D. Laksono, Muhammad Fajra, Aidil Danas, Wayu Diafridho A, *Analisa Peralihan Deviasi Frekuensi Sistem Kendali Frekuensi Tenaga Listrik Dengan Metoda Kendali Optimal*, Jurnal Rekayasa ElektriKa Volume 12 No. 01 April 2016, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Syiah Kuala NAD, 2016.
- [6] H. D. Laksono, dan Adry Febrianda, *Analisa Performansi Tanggapan Tegangan Sistem Eksitasi Generator Terhadap Perubahan Parameter*, Jurnal Nasional Teknik Elektro Volume 04 No. 01, Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas, 2015.
- [7] I. M. Horowitz, and M. Sidi *Synthesis of Feedback Systems*, Academic Press, 1963.
- [8] H. Muazzam, U. F. Gaur, Ghulam Abbas and M. U. Asad, "Comparative Analysis of Analog Controllers for DC-DC *Buck converter*," *Journal of Automation and Control Engineering* , 2015.
- [9] H. D. Laksono, *Kendali Sistem Tenaga Listrik Dengan Matlab*, Padang: Graha Ilmu, 2014.
- [10] H. D. Laksono, *Pengantar Pemrograman Matlab (Aplikasi Pada Matematika*

- Rekayasa*), Padang: Andalas University Press, 2015.
- [11] F. L. Luo and H. Ye, "*Energy Factor and Mathematical Modelling for Power DC/DC Converters*," IEE-Proc EPA, vol. Vol. 152, no. No. 2, pp. 233-248, 2005.
- [12] H. Y. Fang Lin Luo, "*Mathematical Modeling of Power DC/DC Converters*," International Conference on Power System Technology - POWERCON 2004, pp.17-22, 2004.