

# Kendali Kecepatan Motor DC dengan *Buck Converter* menggunakan *Full State Feedback-Pole Placement*

NUR SULISTYAWATI, FAHMIZAL, IOTA NATHASYA

Departemen Teknik Elektro dan Informatika, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Indonesia  
Email: nsulis@ugm.ac.id

*Received* 20 November 2020 | *Revised* 28 Desember 2020 | *Accepted* 31 Januari 2020

## ABSTRAK

*Makalah ini menyajikan penjelasan tentang penerepan full state feedback menggunakan metode pole placement pada sistem buck converter dengan Motor DC. Penambahan komponen buck converter diharapkan dapat membantu menaikkan nilai efisiensi sistem dan memperpanjang umur komponen switch yang digunakan. Namun terkadang sistem ini masih memerlukan kendali untuk dapat memaksimalkan performa sistem baik dari segi rising time, settling time maupun error steady state dari sistem. Simulasi kendali full state feedback menggunakan pole placement disimulasikan dengan pemodelan buck converter dan motor DC menggunakan Simscape dan Simulink pada Matlab. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa kendali pole placement mampu menghasilkan kondisi rising time 1.4508s, settling time 2.5729s sedangkan kendali LQR lebih lambat 0.9524s untuk rising time dan 4.3603s untuk settling time saat diuji dengan sinyal step. Selain itu, penambahan pre compensator (Nbar) telah membuat sistem mampu mencapai nilai referensi yang diharapkan (error steady state menuju nol).*

**Kata kunci:** Motor DC, Buck Converter, Pole Placement.

## ABSTRACT

*This paper presents an explanation of the advanced full state feedback using the pole placement method in a buck converter system with a DC motor. The addition of buck converter components is expected to help increase the value of system efficiency and extend the life of the switch components used. However, sometimes this system still requires control to be able to maximize system performance in terms of both the rising time, the settling time and the steady state error of the system. Full state feedback control simulation using pole placement is simulated by modeling the buck converter and DC motor using Simscape and Simulink in Matlab. The simulation results show that the pole placement control is capable of producing a rising time of 1.4508s, settling time of 2.5729s, while LQR control is 0.9524s slower for rising time and 4.3603s for settling time when tested with step signals. In addition, the addition of a pre compensator (Nbar) has made the system able to reach the expected reference value (steady state error goes to zero).*

**Keywords:** DC Motor, Buck Converter, Pole Placement.

## 1. PENDAHULUAN

Motor *Direct Current* (DC) atau motor listrik DC sesuai dengan namanya untuk berputar memerlukan tegangan DC atau arus searah. Dalam kehidupan sehari – hari, motor DC merupakan salah satu jenis motor yang paling sering digunakan. Sehingga pada penggunaannya sering diperlukan untuk melakukan pengendalian baik pada kecepatan ataupun posisi sudut dari motor tersebut (sebagai *servo* motor) **(Bae, dkk, 2020) (Chotai & Narwekar, 2018) (Aravind, dkk, 2017)**.

Motor DC yang menggunakan magnet permanen akan menghasilkan medan magnet yang relatif tetap. Oleh karena itu, pengendalian kecepatan pada motor DC dapat dilakukan dengan cara mengatur tegangan pada kumparan jangkar. Umumnya motor DC jenis ini, untuk mengendalikan kecepatan menggunakan sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) **(Liu & Jiang, 2011) (Tadrist & Zeroug, 2014) (Yurkevich & Stepanov, 2014)**. Namun adanya kesulitan dalam melakukan *switching*, membuat performa sistem menjadi tidak maksimal dikarenakan proses *switching* tersebut yang mengasilkan *noise* dan membuat motor bekerja terlalu keras. Hal tersebut dapat menyebabkan *brush* pada motor menjadi mudah cepat rusak. Sehingga penambahan *buck converter* dapat membantu meningkatkan performa **(Roy, dkk, 2017) (Dhanasekar, dkk, 2019) (El Fadil & Giri, 2006)**. Mengingat bahwa *buck converter* jenis ini memiliki dua tempat penyimpanan energi seperti lilitan dan kapasitor sehingga rangkaian dapat menghasilkan tegangan dengan *ripple* yang lebih sedikit. Selain itu *buck converter* juga merupakan konverter yang memiliki efisiensi yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan konverter yang serupa.

Efisiensi yang terdapat pada sifat rangkaian *buck converter* adalah "*continuous mode*" sehingga arus dari induktor akan terus diupayakan agar tidak mencapai nol sebelum adanya proses penyimpanan selanjutnya **(Fardoun, dkk, 2014)**. Namun penggunaan *buck converter* tersebut juga perlu dibantu dengan adanya pengendali tambahan. Kendali tambahan ini diharapkan mampu memberikan performa yang lebih dari sistem yang sudah ada. Seperti penelitian yang dilakukan oleh **(Seshagiri, dkk, 2016)** menggunakan kendali *Linear Quadratic Regulator* (LQR) untuk mengendalikan *buck converter* dalam mode *Continuous-Conduction Mode* (CCM). Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh **(Lindiya, dkk, 2016)** juga menggunakan LQR dengan menggunakan pendekatan deterministik dalam hal mendapatkan parameter matriks Q dan R. Dan penelitian oleh **(Srivastava, dkk, 2013)** menggunakan kendali LQR untuk men-*tuning* parameter kendali PID. Beberapa peneliti juga menggunakan kendali kecerdasan buatan seperti algoritma genetika (GA) **(Lefranc, dkk, 2012)** dan logika *fuzzy* **(Swathy, dkk, 2018)**.

Pada makalah ini diusulkan simulasi perancangan kendali kecepatan motor DC dengan *buck converter* menggunakan *full state feedback* dengan metode *pole placement*. Simulasi dibangun menggunakan *Simscape* dan *Simulink* pada Matlab. Kendali *full state feedback* bekerja dengan melakukan umpan balik nilai *gain* K yang sudah ditentukan baik menggunakan teknik *pole placement* atau dengan metode LQR. *Gain* K sebagai umpan balik akan membuat sistem memperbaiki kinerja sesuai dengan kriteria yang diharapkan. Makalah ini akan menjabarkan penggunaan metode *pole placement* dalam mencari *gain* K. Metode *pole placement* adalah sebuah teknik dalam memindahkan nilai *pole* awal sistem ke *pole* baru yang berada di sebelah kiri sumbu *real* dan *imaginer*.

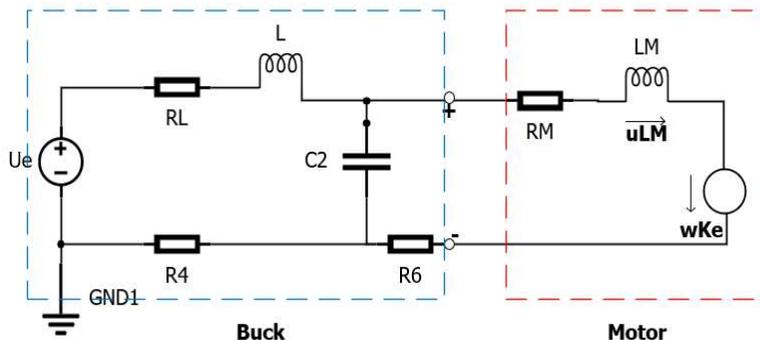
Makalah ini disusun menjadi empat bagian. Pada bagian 2, membahas tentang metodologi dalam penelitian ini. Di bagian 3, simulasi sistem dengan menggunakan metode *pole placement* dijelaskan berikut dengan hasil perbandingan dengan kendali lainnya seperti menggunakan LQR. Dan bagian 4 adalah kesimpulan dari penelitian ini.

## 2. METODE PENELITIAN

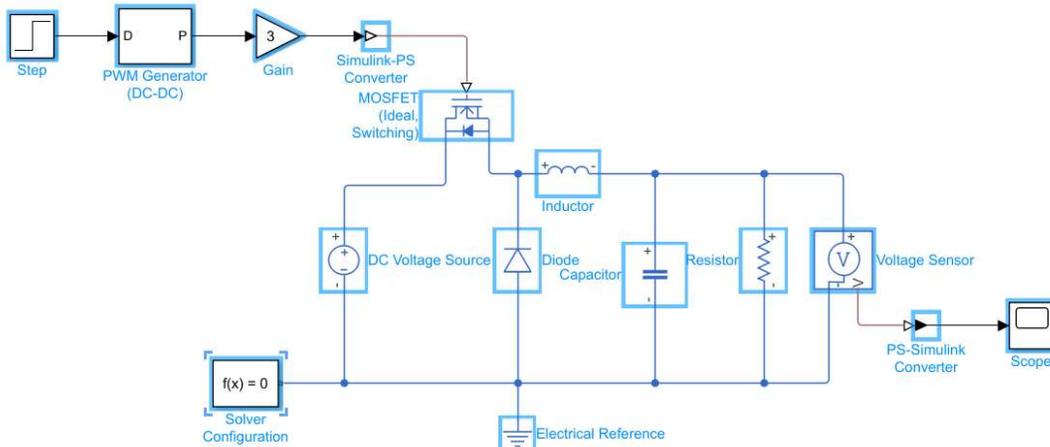
Bagian ini akan menjelaskan mengenai pemodelan sistem yang dibagi menjadi dua bagian yaitu pemodelan sistem dan desain teknik kendali sistem.

### 2.1 Pemodelan Sistem

Desain rancangan sistem *buck converter* disajikan pada Gambar 1 merujuk pada penelitian yang dilakukan oleh **(Ismail, dkk, 2009)**. Proses *switching* dari sistem ini sudah digantikan dengan *switched voltage source* yang disimbolkan dengan *variable*  $U_e$  dengan *switching variable*  $\in \{0,1\}$ . Motor DC yang digunakan dimodelkan pada Gambar 1 pada blok motor dimana nilai  $R_M$  dan  $L_M$  merupakan nilai resistansi dan induktansi dari motor dan sumber tegangan elektromagnetiknya dengan  $w_{Ke}$ . Nilai  $L_M = 8.9$  mH,  $R_M = 6$  ohm dan  $K_e = 0.0517$  V/rad/s. Sedangkan untuk *converter*-nya menggunakan *switching* dengan frekuensi  $f = 45$  kHz. Tegangan *input*-nya menggunakan 24 V atau setara dengan tegangan maksimal dari motor DC. Dengan mengacu pada skematik sistem pada Gambar 1, selanjutnya pada penelitian ini dirancang menggunakan *Simscape* seperti pada Gambar 2. Dengan menggunakan *Simscape*, model fisik sebuah sistem dapat dimodelkan dalam lingkungan Simulink Matlab. *Simscape*, membangun model fisik komponen sebuah sistem berdasarkan koneksi antar fisik baik dalam bentuk elektrik dan mekanik yang langsung terintegrasi dalam bentuk diagram blok. Selain itu, *Simscape* memodelkan suatu sistem melalui susunan model mekanik atau elektriknya dan bukan melalui penurunan model secara matematis.



Gambar 1. Rangkaian Rancangan Sistem *Buck Converter* secara Umum



Gambar 2. Rangkaian Rancangan Sistem *Buck Converter* menggunakan *Simscape*

Pemodelan matematis suatu sistem dapat diperoleh melalui hubungan antara nilai *input* dari motor DC yang berupa *duty cycle* dan *output*-nya berupa kecepatan putar dari motor DC. Dari skema rangkaian pada Gambar 1, model *state space* sistem dengan persamaan mekanik yang menjelaskan dinamika poros motor, dan persamaan hubungan elektrik sistem dapat disajikan pada Persamaan (1) dan (2).

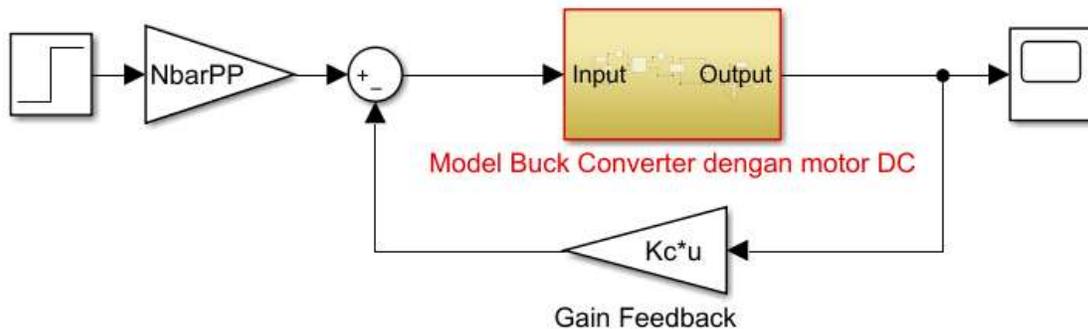
$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + D \end{aligned} \quad (1)$$

Dimana,

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} -\frac{R_L}{L} & -\frac{1}{L} & 0 & 0 \\ \frac{1}{C} & 0 & -\frac{1}{C} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_M} & -\frac{R_M}{L_M} & -\frac{K_E}{L_M} \\ 0 & 0 & \frac{K_M}{J} & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{U_e}{L} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T u \\ y &= [0 \ 0 \ 0 \ 1]x + 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Vektor *state* sistem secara urut berisi,  $x = [i_L \ u_C \ i_a \ \omega]^T$ . Rangkaian *buck*-nya menggunakan  $L = 1.33 \text{ mH}$ ,  $R = 10 \text{ ohm}$  dan  $C = 470 \text{ uF}$ . Momen inersia dari motor sudah ditentukan yaitu sebesar  $J = 7.95 \times 10^{-6}$  dengan  $K_M = 0.0517 \text{ Nm/A}$ . Untuk masukan tegangan pada *buck converter* berupa masukan diskrit  $u \in \{0,1\}$  yang dapat diganti dengan menggunakan strategi *switching* PWM.

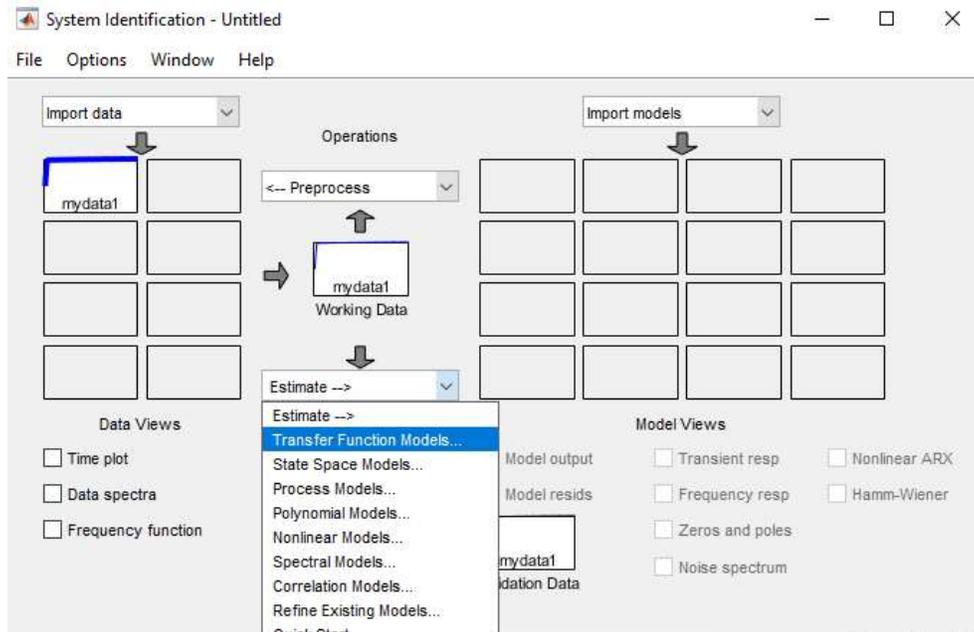
Pada penelitian ini, pegujian kendali dan model sistem *buck converter* disimulasikan menggunakan *Simscape* seperti yang disajikan pada Gambar 2 dan alir penelitiannya disajikan pada Gambar 3.



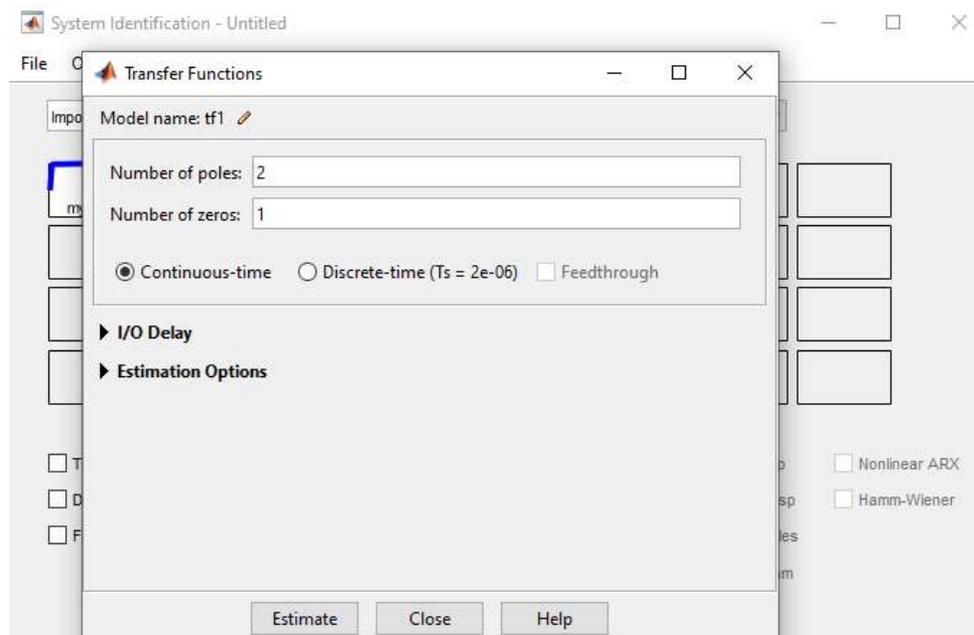
**Gambar 3. Alir Penelitian Kendali Sistem *Buck Converter* menggunakan *Simscape***

Selain dengan cara penurunan persamaan matematis hubungan *input* dan *output* suatu sistem, pemodelan suatu sistem dapat dilakukan dengan cara pendekatan (estimasi) model dengan menggunakan fitur "*system identification*" yang dimiliki oleh Matlab seperti yang disajikan pada Gambar 4. Langkah awal, lakukan proses penyimpanan data *input* dan *output* dalam *domain time series*, bila sudah lalu memilih *transfer function models* maka akan keluar jendela baru untuk mengatur jumlah *pole* dan *zero* dari model yang akan diestimasi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

## Kendali Kecepatan Motor DC dengan *Buck Converter* menggunakan *Full State Feedback-Pole Placement*



**Gambar 4. Proses Identifikasi Sistem dengan Pendekatan *Transfer Function Model***



**Gambar 5. Jendela *Estimate -> Transfer Function Models***

Pada penelitian ini, asumsi estimasi model *buck converter* pada Gambar 2 menggunakan acuan data yang disajikan pada Tabel 1. Langkah selanjutnya adalah mengatur parameter sesuai yang ingin diestimasi. Pada penelitian ini, estimasi menggunakan parameter *default*, artinya tidak ada yang diubah. Untuk proses estimasi klik tombol "Estimate" pada jendela tersebut, lalu tunggu beberapa saat sampai proses selesai. Tanda proses selesai seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

**Tabel 1. Spesifikasi Komponen *Buck Converter* pada *Simscape***

Komponen	Parameter	Nilai
<i>Step</i>	<i>Step time</i>	$1/50000 \cdot 100/2$
	<i>Initial value</i>	0
	<i>Final value</i>	0.5
	<i>Sample time</i>	0
<i>PWM Generator (DC-DC)</i>	<i>Switching frequency (Hz)</i>	50000
	<i>Sample time</i>	0
<i>Gain</i>	<i>Gain</i>	3
<i>DC Voltage Source</i>	<i>Constant value, DC</i>	20
<i>Diode</i>	<i>On resistance</i>	0.01
<i>MOSFET (Ideal, Switching)</i>	<i>Threshold voltage, Vth</i>	2
<i>Inductor</i>	<i>Inductance</i>	2.00E-05
	<i>Series resistance</i>	0.01
<i>Capacitor</i>	<i>Capacitance</i>	6.00E-05
<i>Resistor</i>	<i>Resistance</i>	1

Plant Identification Progress

Transfer Function Identification  
 Estimation data: Time domain data mydata1  
 Data has 1 outputs, 1 inputs and 1001 samples.  
 Number of poles: 2, Number of zeros: 1  
 Initialization Method: "iv"

Estimation Progress

Algorithm: Nonlinear least squares with automatically chosen line search method

Iteration	Cost	Norm of step	First-order optimality	Improvement (%) Expected	Improvement (%) Achieved	Bisections
0	0.00276751	-	1.41e-05	8.86e-11	-	-
1	0.00276751	2.63e-05	1.06	8.86e-11	9.4e-14	0

Estimating parameter covariance...  
done.

Result

Termination condition: Near (local) minimum, (norm(g) < tol)..  
 Number of iterations: 1, Number of function evaluations: 29

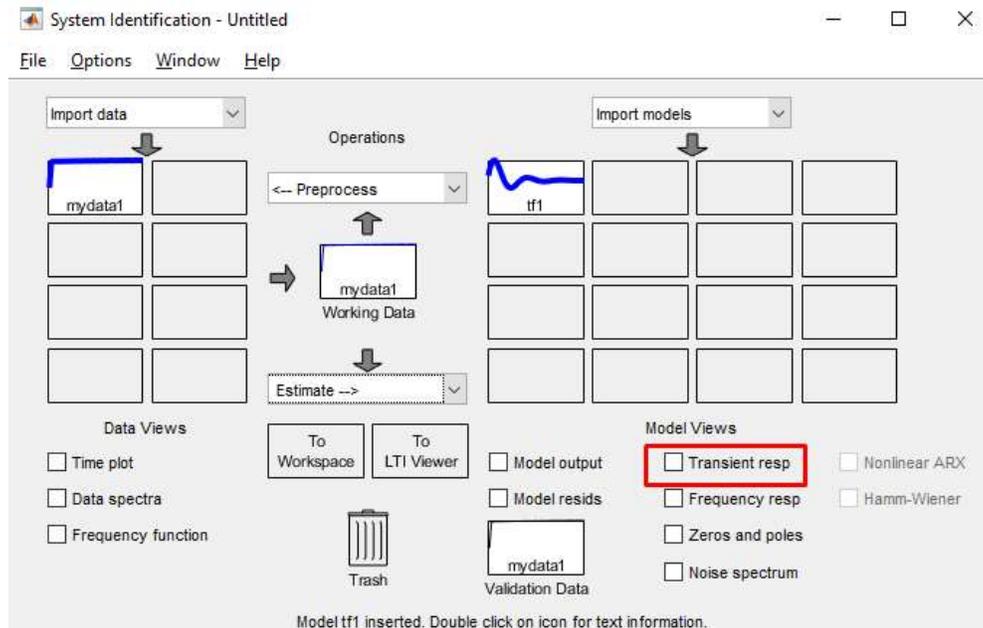
Status: Estimated using TFEST  
 Fit to estimation data: 98.91%, FPE: 0.00280089

Stop Close

**Gambar 6. Proses Identifikasi (Estimasi) telah Selesai**

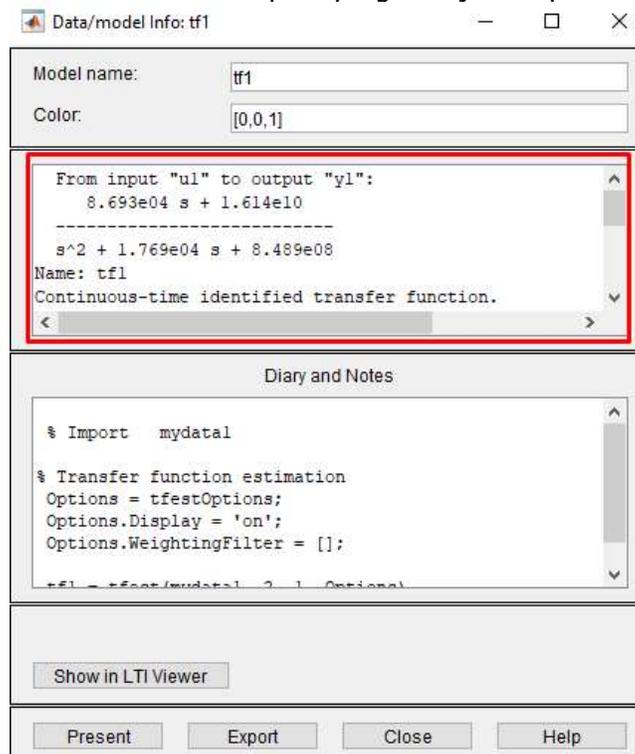
Bila sudah akan muncul model baru bernama "tf1" pada tabel yang berada di bagian kanan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7 dan untuk melihat ss *transient* "tf1" dapat di-klik *check box* yang kotak merah.

Kendali Kecepatan Motor DC dengan *Buck Converter* menggunakan *Full State Feedback-Pole Placement*

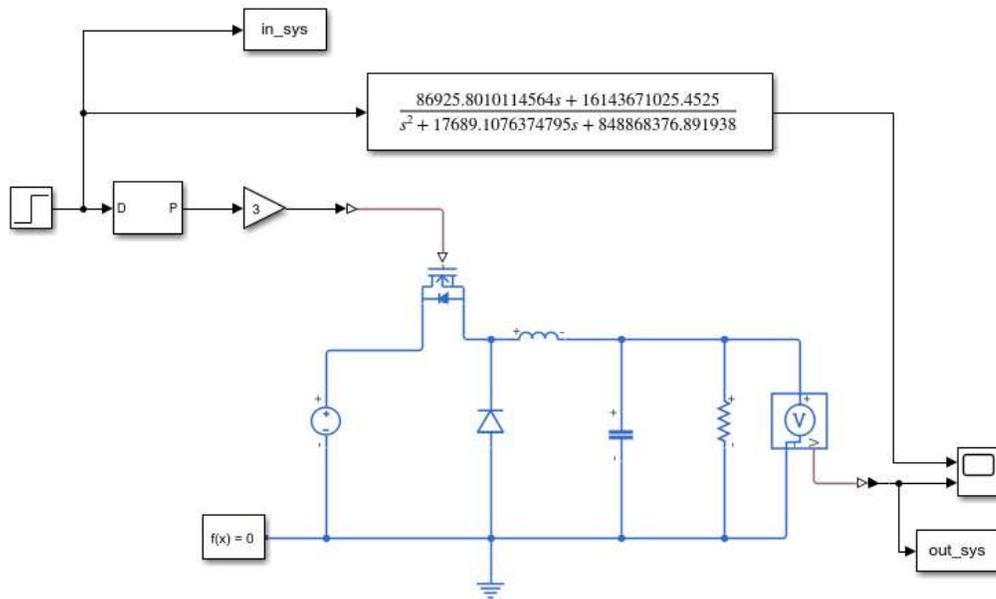


**Gambar 7. Hasil Proses Identifikasi (Estimasi) untuk Melihat Respons *Transient***

Selanjutnya, untuk melihat hasil *transfer function* pada "tf1", caranya adalah klik dua kali "tf1". Hasil estimasi *transfer function* ada di dalam kotak merah pada Gambar 8 **Error! Reference source not found.** Hal berikutnya adalah memverifikasi model estimasi tersebut pada Simulink. Langkah untuk memverifikasi adalah dengan membuat blok *transfer function* pada Simulink, *output* dari *transfer function* dihubungkan dengan *scope* yang sama dengan tegangan keluaran dari *buck converter* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9.



**Gambar 8. Hasil Proses Identifikasi (Estimasi) dalam Bentuk *Transfer Function***



**Gambar 9. Verifikasi Hasil Estimasi *Transfer Function* dengan *Model Buck Converter* pada *Simscape***

Selanjutnya, untuk keperluan proses penerapan kendali dalam bentuk *full state feedback*, maka model sistem *buck converter* yang diperoleh dari proses pendekatan *transfer function models* diubah ke dalam bentuk *state space* dengan bantuan Matlab seperti pada Persamaan (3).

$$A = \begin{bmatrix} -17690 & -848900000 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C = 1.0e+10 * [0 \quad 1.6140], \quad D = 0$$

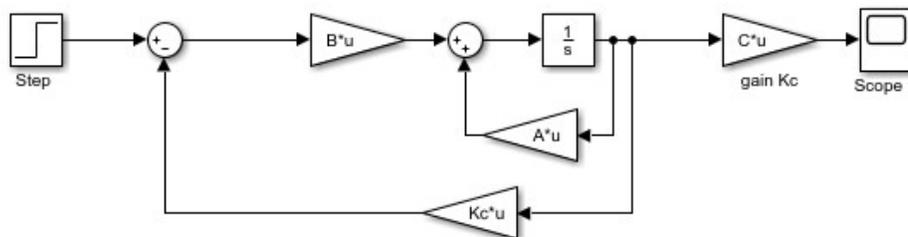
## 2.2 Perancangan Kendali *Pole Placement* dengan Pre Kompensator

*Controllability* merupakan sifat yang harus dimiliki oleh sistem jika ingin dikendalikan dengan kendali *full state feedback* sedangkan *observability* merupakan sifat yang menunjukkan bahwa sistem memiliki semua informasi *state* dari sistem yang akan dikendalikan (Fahmizal, dkk, 2019). Sehingga pengecekan terhadap kedua hal tersebut harus dilakukan terlebih dahulu. Selanjutnya matriks sistem pada (3) perlu dicari nilai determinannya (*positive*) dan diamati *rank* matriksnya dan diperoleh  $\text{rank}=2$ . Dengan kondisi seperti ini dapat disimpulkan sistem dapat dipindah nilai *pole*-nya dengan melakukan perkalian *state* sistem dengan *gain*  $K$  yang didapatkan dengan metode *pole placement*. Selanjutnya sistem akan dikatakan *observability* apabila *rank* dan nilai  $n$  ukuran matriks sistem pada (3) bernilai sama. Sehingga berdasarkan hal tersebut didapatkan bahwa sistem juga termasuk *observability* dan mampu mengalikan setiap *state* yang ada dengan *gain*  $K$  yang diperoleh dengan metode *pole placement*.

Kendali dengan metode *pole placement* merupakan suatu kendali yang digunakan untuk mengubah *pole* secara langsung ke titik yang diinginkan dengan bantuan *feedback gain*  $K_c$  seperti yang disajikan pada Gambar 10. Pada bagian ini digunakan bantuan Matlab untuk melakukan perubahan nilai *pole*. *Pole* yang digunakan adalah bernilai pada Persamaan (4).

Kendali Kecepatan Motor DC dengan *Buck Converter* menggunakan *Full State Feedback-Pole Placement*

$$P1 = -2+1j; P2 = -2-1j; \quad (4)$$

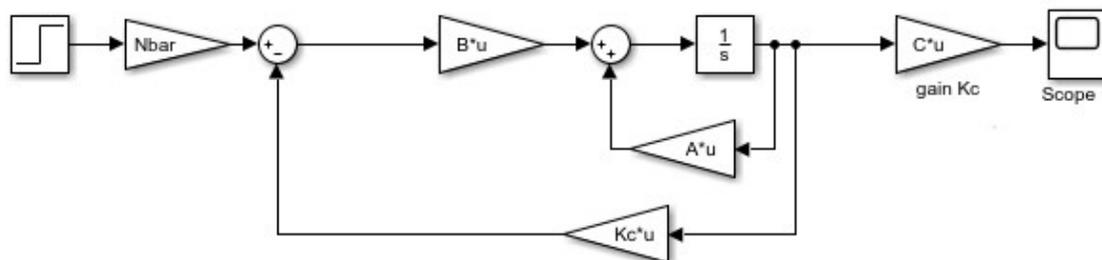


**Gambar 10. Rancangan Kendali *Full State Feedback* dengan Teknik *Pole Placement***

Berdasarkan nilai *pole* pada Persamaan (3) maka akan didapatkan nilai *gain*  $K_c$  yang disajikan pada Persamaan (5). Selanjutnya dilakukan penambahan  $N_{bar}$  atau *pre compensator* seperti yang disajikan pada Gambar 11 sehingga didapatkan Persamaan (6). Penambahan  $N_{bar}$  ini bertujuan untuk menghilangkan kondisi *error steady state* sistem.

$$K_c = \begin{bmatrix} -17686 & -848899995 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$u = -K_c x + N_{bar} \quad (6)$$



**Gambar 11. Rancangan Kendali *Pole Placement* dengan Tambahan Pre Kompensator ( $N_{bar}$ )**

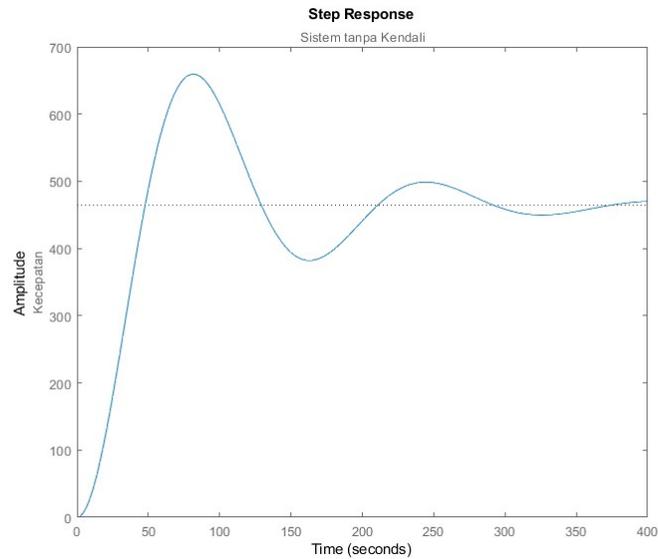
Nilai  $N_{bar}$  didapatkan melalui penjumlahan terhadap nilai  $N_u$  dengan perkalian *gain*  $K$  dengan  $N_x$  seperti pada Persamaan (7) yang sudah dihitung dengan bantuan Matlab. Sehingga dari hasil perhitungan akan didapatkan nilai  $N_{bar}$  adalah  $3.0979e-10$ .

$$N_{bar} = N_u + K N_x \quad (7)$$

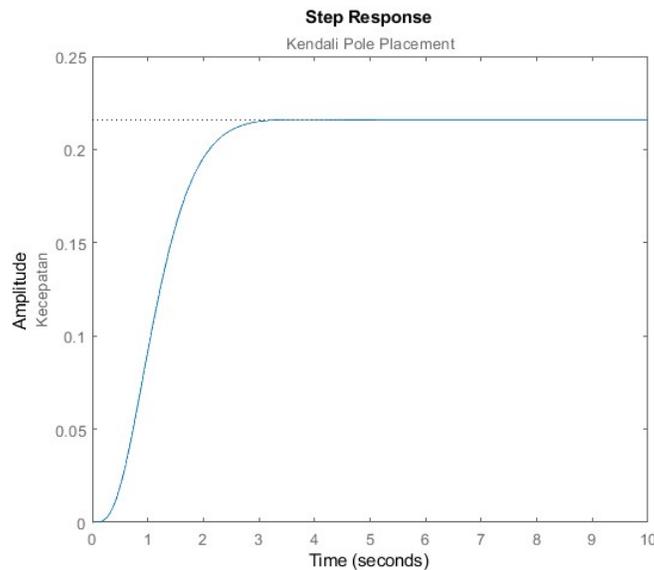
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada sub bab ini akan disampaikan hasil percobaan sistem tanpa kendali dan perbandingannya setelah ditambahkan kendali *full state feedback* dengan menggunakan metode *pole placement*. Gambar 12 merupakan hasil respons sistem tanpa kendali setelah diberi sinyal uji

berupa sinyal step. Berdasarkan respons sistem tersebut didapatkan bahwa sistem memiliki karakteristik sebagai berikut; *rising time* pada 53.2482 s, *overshoot* pada 42.0114 s, dan *settling time* yang cukup lama yaitu sekitar 349.7471 s. Sehingga dari respons sistem dapat disimpulkan sistem sangat lama menuju stabil dan dengan kondisi masih terdapat kondisi *error steady state* yang besar. Selanjutnya dilakukan penambahan kendali *full state feedback* dengan metode *pole placement* yang *pole*-nya diletakkan sesuai pada Persamaan (4). Hasil respons sistem setelah ditambah kendali *pole placement* disajikan pada Gambar 13.



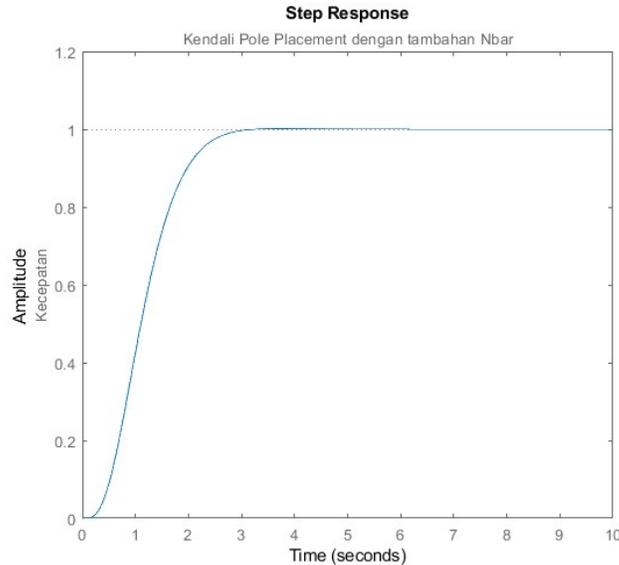
**Gambar 12. Sistem tanpa Kendali (*open loop*)**



**Gambar 13. Respons Sistem dengan Kendali *Pole Placement***

Dari Gambar 13, diperoleh respons sistem memiliki kondisi *rising time* 1.4508 s, *settling time* 2.5729 s dan masih memiliki respons yang belum mencapai 1 (sinyal step) sebagai

referensi/acuan pada *input*-nya. Untuk menghilangkan kondisi *error steady state* ini, maka dilakukan penambahan pre kompensator (Nbar) untuk mencapai nilai referensi yang digunakan berupa sinyal step. Berikut merupakan hasil respons sistem dengan tambahan Nbar seperti yang disajikan pada Gambar 14.



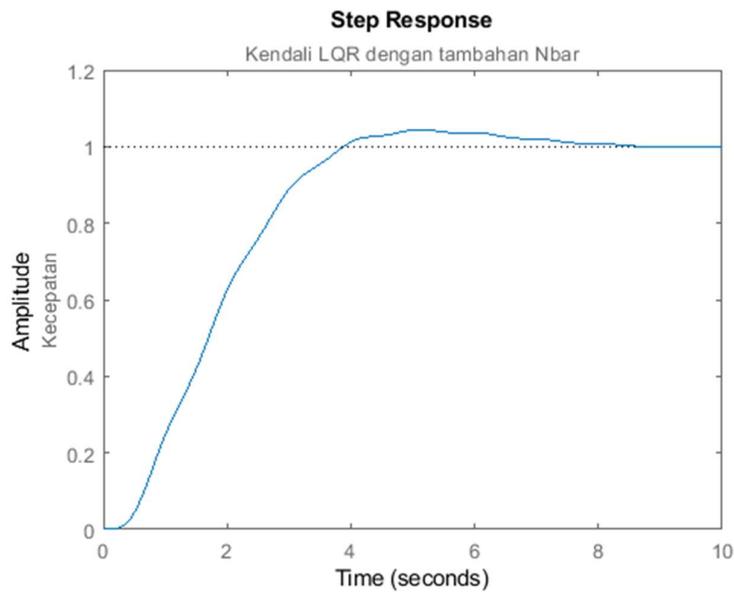
**Gambar 14. Respons Sistem Kendali *Pole Placement* dengan Tambahan Nbar**

Dari Gambar 14, dapat dilihat bahwa sistem sudah tidak memiliki *error steady state*. Selanjutnya dilakukan perbandingan dengan menggunakan kendali *full state feedback* LQR dan dengan tambahan Nbar. Kendali LQR adalah sebuah kendali optimal yang bertujuan mengubah *state* akhir ke titik nol dengan cara meminimalkan *cost function*, dengan indeks performansi pada Persamaan (8). Pembobotan matriks Q dan R menentukan *gain* K. Kondisi yang terjadi bila semakin besar nilai matriks Q maka semakin besar nilai elemen *gain* K sehingga mempercepat sistem untuk mencapai keadaan tunak (*steady state*). Bila nilai R diperbesar, maka nilai *gain* K akan mengecil dan keadaan tunak melambat. Pada percobaan ini, *tuning* matriks pembobot Q dan R dilakukan dengan memberikan nilai pembobot seperti pada Persamaan (9) dengan hasil respons sistem disajikan pada Gambar 15. Berdasarkan nilai matriks Q dan R tersebut maka akan didapatkan nilai *gain*  $K_{LQR}$  yang disajikan pada Persamaan (10).

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^T \{x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)\} dt \quad (8)$$

$$\begin{aligned} Q &= C^T C \\ R &= 1 \end{aligned} \quad (9)$$

$$K_{LQR} = 1.0e+10 \begin{bmatrix} 0.0000 & 1.5313 \end{bmatrix} \quad (10)$$

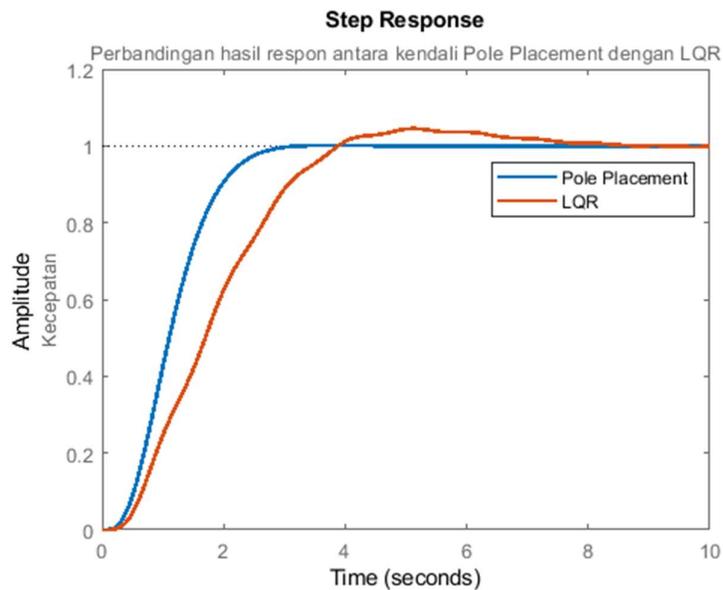


**Gambar 15. Respons Sistem Kendali LQR dengan Tambahan Nbar**

**Tabel 2. Perbandingan Respons Sistem antara Kendali *Pole Placement* dengan LQR**

Jenis Kendali	<i>Rising Time</i>	<i>Settling Time</i>	ISE
<i>Pole Placement</i>	1,4508 s	2,5729 s	0,8706
LQR	2,4032 s	6,9332 s	1,2695

Dari Gambar 15, diperoleh respons sistem memiliki kondisi *rising time* 2.4032 s, *settling time* 6.9332 s dan mengalami *overshoot* sebesar 0.1385. Tabel 2 merupakan hasil perbandingan hasil respons antara kendali *pole placement* dengan LQR dengan hasil *integral of squared error* (ISE) pada *pole placement* lebih kecil dari pada menggunakan LQR. Gambar 16 merupakan perbandingan grafik respons dari Tabel 2.



**Gambar 16. Perbandingan Grafik Respons antara Kendali *Pole Placement* dengan LQR**

#### 4. KESIMPULAN

Dari hasil pengamatan simulasi model *buck converter* dengan motor DC menggunakan Simscape dan Simulink pada Matlab, diperoleh simpulan bahwa kendali *full state feedback* dengan *gain* K yang diperoleh menggunakan metode *pole placement* sudah mampu memberikan performa yang lebih baik bila dibandingkan dengan sistem yang dioperasikan tanpa menggunakan kendali (*open loop*). Kendali *full state feedback* digunakan untuk menentukan nilai *gain* K pada sistem *closed loop* yang digunakan untuk memindah *pole* pada bidang sebelah kanan (daerah tidak stabil) menuju bidang sebelah kiri (daerah stabil). Metode *pole placement* adalah salah satu teknik yang tepat dikarenakan teknik ini langsung memindahkan *pole* sistem sesuai dengan titik *pole* yang diinginkan seperti pada Persamaan (4). Hal berbeda bila menggunakan kendali LQR yang mempertimbangkan energi saat memindahkan *pole* sistem. Energi ini sangat dipengaruhi oleh nilai *tuning* pada Matriks Q dan R. Dari hasil percobaan simulasi dengan sinyal uji step, kendali *pole placement* mampu menghasilkan kondisi *rising time* 1.4508 s, *settling time* 2.5729 s sedangkan kendali LQR lebih lambat 0.9524 s untuk *rising time* dan 4.3603 s untuk *settling time* saat Matriks Q dan R di *tuning* sesuai pada Persamaan (9). Selanjutnya, penambahan *pre compensator* (Nbar) telah membuat sistem mampu mencapai nilai referensi/acuan yang diharapkan (*error steady state* menuju nol).

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Instrumentasi dan Kendali Departemen Teknik Elektro dan Informatika Sekolah Vokasi Universitas Gadjah Mada atas dukungan yang telah diberikan kepada penulis.

#### DAFTAR RUJUKAN

- Aravind, M. A., Saikumar, N., & Dinesh, N. S. (2017). Optimal position control of a DC motor using LQG with EKF. *2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering, ICMSC 2017*, (pp. 149–154). <https://doi.org/10.1109/ICMSC.2017.7959461>
- Bae, J., Cho, K., & Lee, D. H. (2020). Parallel position control scheme of permanent magnet DC motors with a low-resolution sensor. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology, 2020-February*, (pp. 199–204). <https://doi.org/10.1109/ICIT45562.2020.9067269>
- Chotai, J., & Narwekar, K. (2018). Modelling and position control of brushed DC motor. *International Conference on Advances in Computing, Communication and Control 2017, ICAC3 2017*, (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/ICAC3.2017.8318792>
- Dhanasekar, R., Kumar, S. G., & Rivera, M. (2019). Third order sliding mode control of buck converter fed permanent magnet DC motor. *IEEE ICA-ACCA 2018 - IEEE International Conference on Automation/23rd Congress of the Chilean Association of Automatic Control: Towards an Industry 4.0 - Proceedings*, (pp. 17–20).

- <https://doi.org/10.1109/ICA-ACCA.2018.8609812>
- El Fadil, H., & Giri, F. (2006). Robust control of DC motor velocity through DC-DC Buck Power Converter. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, (pp. 1563–1568). <https://doi.org/10.1109/IECON.2006.347286>
- Fahmizal, Arrofiq, M., Adrian, R., & Mayub, A. (2019). Robot Inverted Pendulum Beroda Dua (IPBD) dengan Kendali Linear Quadratic Regulator (LQR). *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 7(2), 224. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v7i2.224>
- Fardoun, A. A., Member, S., Ismail, E. H., Member, S., Khraim, N. M., Sabzali, A. J., & Al-saffar, M. A. (2014). Bridgeless High-Power-Factor Buck-Converter Voltage Mode, *5(5)*, 3457–3467.
- Ismail, R. M. T. R., Ahmad, M. A., & Ramli, M. S. (2009). Speed control of buck-converter driven Dc motor based on smooth trajectory tracking. *Proceedings - 2009 3rd Asia International Conference on Modelling and Simulation, AMS 2009*, (pp. 97–101). <https://doi.org/10.1109/AMS.2009.100>
- Lefranc, P., Jannot, X., & Dessante, P. (2012). Virtual prototyping and pre-sizing methodology for buck DC-DC converters using genetic algorithms. *IET Power Electronics*, 5(1), 41–52. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2010.0284>
- Lindiya, S. A., Vijayarekha, K., & Palani, S. (2016). Deterministic LQR controller for DC-DC Buck converter. *2016 - Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy, PESTSE 2016*. <https://doi.org/10.1109/PESTSE.2016.7516450>
- Liu, Z., & Jiang, L. (2011). PWM speed control system of DC motor based on AT89S51. *Proceedings of 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology, EMEIT 2011*, (pp. 1301–1303). <https://doi.org/10.1109/EMEIT.2011.6023332>
- Roy, T. K., Pervej, M. F., Tumpa, F. K., & Paul, L. C. (2017). Nonlinear adaptive controller design for velocity control of a DC motor driven by a DC-DC buck converter using backstepping approach. *ICECTE 2016 - 2nd International Conference on Electrical, Computer and Telecommunication Engineering*, (pp. 8–10). <https://doi.org/10.1109/ICECTE.2016.7879598>
- Seshagiri, S., Block, E., Larrea, I., & Soares, L. (2016). Optimal PID design for voltage mode control of DC-DC buck converters. *2016 Indian Control Conference, ICC 2016 - Proceedings*, (pp. 99–104). <https://doi.org/10.1109/INDIANCC.2016.7441112>

- Srivastava, S., Kumar, Y., Misra, A., Thakur, S. K., & Pandit, V. S. (2013). Optimum design of buck converter controller using LQR approach. *2013 15th International Conference on Advanced Computing Technologies, ICACT 2013*.  
<https://doi.org/10.1109/ICACT.2013.6710514>
- Swathy, K., Jantre, S., Jadhav, Y., Labde, S. M., & Kadam, P. (2018). Design and Hardware Implementation of Closed Loop Buck Converter Using Fuzzy Logic Controller. *Proceedings of the 2nd International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology, ICECA 2018*, (pp. 175–180).  
<https://doi.org/10.1109/ICECA.2018.8474570>
- Tadrist, N., & Zeroug, H. (2014). Development of brushless DC motor drive system for teaching purposes using various PWM control techniques for speed control. *2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics, COMPEL 2014*, (pp. 4–7).  
<https://doi.org/10.1109/COMPEL.2014.6877150>
- Yurkevich, V. D., & Stepanov, N. A. (2014). PWM speed control of DC motor based on singular perturbation technique. *International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops 2015*, (pp. 434–440).  
<https://doi.org/10.1109/ICUMT.2014.7002140>