

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Dharmawan, "Pengendalian Motor Brushless DC dengan Metode PWM Sinusoidal menggunakan ATMEGA16," Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok, 2009.
- [2] J. C. Gamazo, E. Vazquez dan J. Gomez, "Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends," *Sensors*, pp. 6901-6947, 2010.
- [3] R. J. Masood, D. B. Wang, Z. A. Ali dan K. Babar, "DDC Control Techniques for Three-Phase BLDC Motor Position Control," *Algorithms*, 2017.
- [4] S. C. S. dan J. T. Kuncheria, "Modelling and Simulation of Four Quadrant Operation of Three Phase Brushless DC Motor With Hysteresis Current Controller," *IJAREEIE*, vol. 2, no. 6, pp. 2320-3765, 2013.
- [5] A. P. C. Rao, Y. P. Obulesh dan C. S. Babu, "Mathematical Modeling of BLDC Motor with Closed Loop Speed Control Using PID Controller Under Various Conditions," *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 7, pp. 1321-1328, 2012.
- [6] A. Tashakori, M. Ektesabi dan N. Hosseinzadeh, "Modeling of BLDC Motor with Ideal Back-EMF for Automotive Applications," dalam *World Congress on Engineering*, London, 2011.

- [7] R. Parikh, "Operation Overview of Three Phase Inverter with 120o, 150o, and 180o Conduction Mode," *International Journal For Technological Research in Engineering*, pp. 33-36, 2017.
- [8] A. M. Ahmed, M. S. Elksasy, A. Ali-Eldin dan F. F. Freed, "Brushless DC Motor Speed Control using both PI Controller and Fuzzy PI Controller," *International Journal of Computer Applications*, vol. 109, pp. 29-35, 2015.
- [9] M. B. Hamed dan L. Sbita, "Digital Phase Locked Loop Induction Motor Speed Controller: Design and Experiments," *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, no. 20, pp. 159-174, 2012.
- [10] M.-F. Tsai, T. P. Quy, B.-F. Wu dan C.-S. Tseng, "Model Construction and Verification of a BLDC Motor Using MATLAB/SIMULINK and FPGA Control," dalam *6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Beijing, 2011.
- [11] J. D. Irwin, *Power Electronics Handbook*, Florida: Academic Press, 2001.

LAMPIRAN

Sistem Kendali Kecepatan Motor *Brushless DC* (BLDC) dengan Pengendali PI

Andi Fauzan Alim¹
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Gowa, Sulawesi Selatan

A. Ejah Umreaini S.²
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Gowa, Sulawesi Selatan

Rhiza S. Sadjad³
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin
Gowa, Sulawesi Selatan

Abstrak— Motor BLDC banyak digunakan di berbagai bidang seperti bidang otomasi industri, otomotif, komputer, penerbangan, dan peralatan rumah tangga karena memiliki efisiensi yang tinggi, kepadatan daya yang tinggi, umur operasi yang panjang, dan biaya perawatan yang rendah. Motor BLDC bekerja tanpa menggunakan sikat sebagai alat komutasinya, tetapi menggunakan komutasi elektronik. Hal ini mengakibatkan motor BLDC membutuhkan sistem pengendalian yang lebih kompleks. Pada penelitian ini dilakukan pemodelan sistem kendali motor BLDC dengan pengendali PI pada *Simulink/MATLAB*. Struktur pengendali PI yang digunakan mengadopsi struktur sistem PLL, dimana sinyal *feedback* dan sinyal referensi yang digunakan berupa sinyal pulsa. Metode komutasi yang digunakan yaitu metode *six step commutation*. Pencarian nilai K_p dan K_i terbaik yaitu dengan metode nilai optimal fungsi tujuan dimana nilai K_p dan K_i terbaik adalah nilai K_p dan K_i yang menghasilkan nilai optimal fungsi. Dari hasil simulasi pengujian yang telah dilakukan, didapatkan nilai K_p dan K_i terbaik yaitu $K_p = 1,1$ dan $K_i = 0,2$ dengan nilai $J = 0,412679$. Berdasarkan hasil simulasi, dengan nilai K_i dan K_p tersebut performa sistem dengan pengendali PI lebih baik dibandingkan dengan sistem tanpa pengendali PI.

Kata kunci—motor BLDC, pengendali PI, *six step commutation*, fungsi tujuan.

I. PENDAHULUAN

Seiring bertambah pesatnya perkembangan teknologi, kebutuhan akan penggunaan motor BLDC sebagai aktuator pada suatu sistem semakin meningkat. Motor BLDC telah banyak digunakan di berbagai bidang, seperti otomasi industri, komputer, otomotif, penerbangan, dan peralatan rumah tangga [1] [2], karena memiliki kepadatan daya, keandalan, dan efisiensi yang tinggi, perawatan yang rendah, tingkat kebisingan rendah dan umur operasi yang lebih panjang dibanding motor lainnya [3].

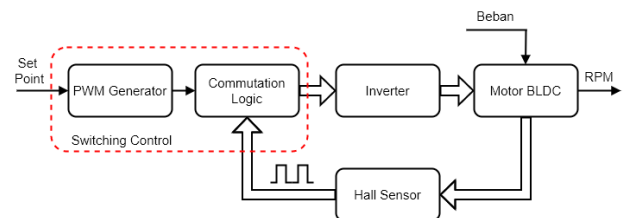
Tidak seperti motor DC pada umumnya, motor BLDC memiliki sistem pengendalian yang lebih kompleks karena motor BLDC bekerja tanpa menggunakan sikat sebagai alat komutasi yang bekerja secara mekanis, tetapi dikendalikan secara elektronik menggunakan *controller* dan inverter sebagai catu dayanya [4] [5]. Oleh karena itu, dibuatlah model simulasi untuk memudahkan dalam mempelajari dan menganalisis karakteristik dari motor BLDC. Sehingga dapat dihasilkan model yang akurat dan skema pengendalian yang tepat [4].

Dalam jurnal penelitian ini akan dibahas mengenai pemodelan sistem kendali motor BLDC pada aplikasi

Simulink/MATLAB dan perancangan pengendali PI sebagai pengendali kecepatan motor daur tertutup.

II. RANCANGAN SISTEM

Secara umum, motor dengan magnet permanen dibedakan jadi dua jenis yaitu motor BLAC dan motor BLDC. Perbedaan antara keduanya yaitu terletak pada karakteristik *back EMF* motor. Motor BLDC termasuk dalam jenis *permanent magnet synchronous motor* (PMSM) dengan karakteristik *back EMF* berbentuk trapezoid [2] [6]. Teknik dalam pengendalian motor BLDC dibedakan menjadi dua berdasarkan cara mendeteksi posisi rotor, yaitu menggunakan sensor atau tanpa menggunakan sensor (*sensorless*) [4]. Pada penelitian ini, digunakan motor yang dilengkapi dengan *hall sensor* untuk mendeteksi posisi rotor. Berikut ini merupakan diagram blok sistem penggerak motor BLDC secara umum.



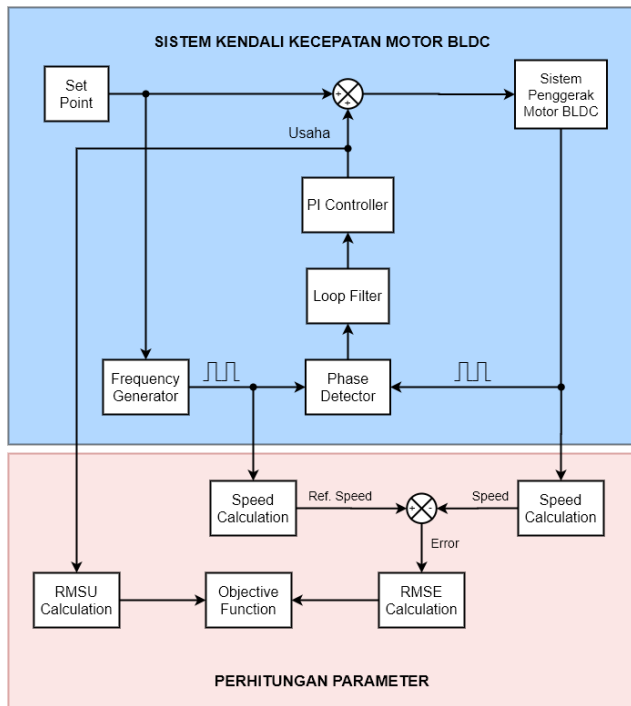
Gambar 1. Diagram blok sistem penggerak motor BLDC

Motor BLDC ini menggunakan inverter tiga fasa sebagai catu daya untuk menghasilkan *quasi-square wave* [2] yang pola pensaklarannya ditentukan berdasarkan sinyal dari *hall sensor*. *Hall signal* dibangkitkan berdasarkan posisi rotor pada motor. *Hall signal* ini kemudian digunakan dalam proses komutasi elektronik yang diatur pada blok *Commutation Logic*.

Dapat dilihat pada diagram di atas terdapat blok *PWM Generator*. Blok *PWM Generator* ini berfungsi untuk membangkitkan sinyal PWM dimana *duty cycle* sinyal PWM yang dibangkitkan diatur oleh nilai tegangan *Set Point*. Sinyal PWM ini kemudian diteruskan ke enam buah MOSFET yang terdapat pada *inverter* oleh blok *Commutation Logic*. Sinyal PWM akan digunakan untuk memodulasi tegangan input yang akan masuk ke motor dari blok *Inverter*.

Algoritma pengendalian kecepatan dengan pengendali PI kemudian disematkan pada sistem penggerak motor BLDC tersebut sebagai pengendali daur tertutup untuk mengendalikan kecepatan motor pada saat motor menerima gangguan beban. Struktur pengendali kecepatan motor

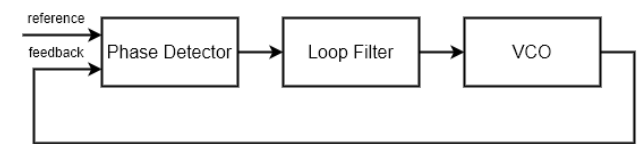
BLDC daur tertutup menggunakan pengendali PI ditunjukkan pada Gambar 2 berikut ini.



Gambar 2. Struktur pengendali kecepatan motor BLDC dengan pengendali PI

Pada struktur diatas sistem kendali dan perhitungan parameter dipisah. Sehingga perhitungan parameter terjadi di luar sistem. Struktur sistem kendali tersebut mengadopsi struktur kendali *phase locked loop* (PLL) yang banyak digunakan pada bidang telekomunikasi untuk penyesuaian fasa dan frekuensi sinyal. Struktur dasar dari PLL yaitu terdiri dari: (1) *phase detector*, berfungsi untuk mendeteksi perbedaan fasa antara sinyal referensi dengan sinyal *feedback*; (2) *loop filter*, berfungsi untuk mengubah sinyal eror yang berasal dari *phase detector* menjadi sinyal tegangan DC; dan (3) *voltage controlled oscillator* (VCO),

sebagai pembangkit sinyal dimana frekuensi sinyal yang dihasilkan sebanding dengan tegangan inputnya [7].

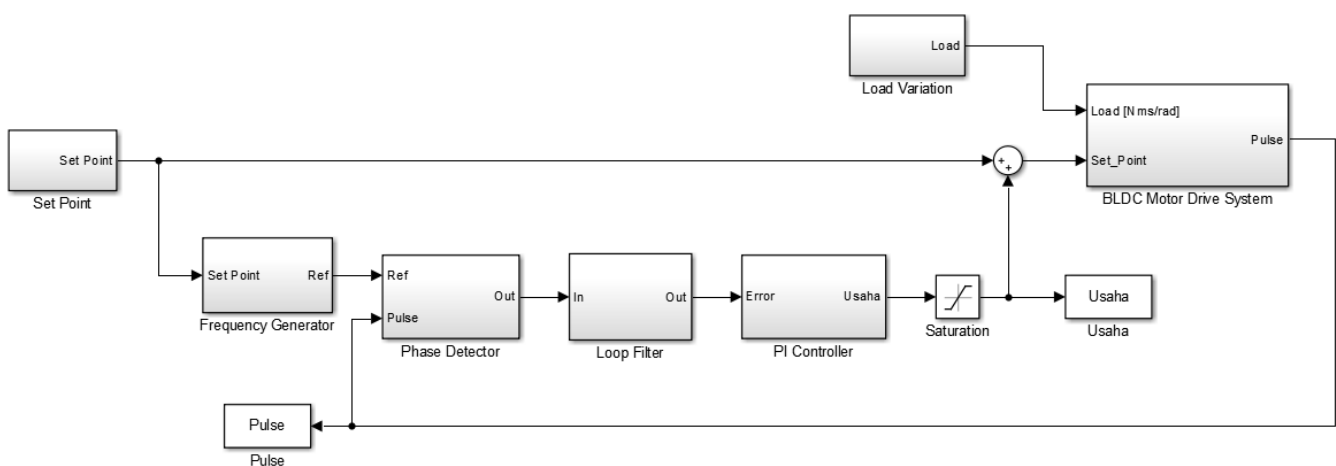


Gambar 3. Struktur dasar PLL

Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa blok *BLDC Motor Drive System* berperan sebagai VCO pada struktur PLL seperti pada Gambar 3 dimana input dari *BLDC Motor Drive System* berupa tegangan dan outputnya berupa sinyal pulsa. *Feedback* dan sinyal referensi yang digunakan pada sistem ini berupa sinyal pulsa. Sinyal *feedback* ini berasal dari sinyal *hall sensor* pada blok *BLDC Motor Drive System*. Sedangkan sinyal referensi berasal dari blok *Frequency Generator*. Block *Frequency Generator* berfungsi sebagai pembangkit sinyal pulsa dimana frekuensi sinyal pulsa yang dihasilkan diatur berdasarkan nilai tegangan *Set Point*. Sinyal *feedback* dan sinyal referensi kemudian dibandingkan menggunakan blok *Phase Detector*. Jika sinyal *feedback* tidak sesuai dengan sinyal referensi, maka *Phase Detector* akan mengeluarkan sinyal eror berupa pulsa. Sinyal eror ini kemudian diubah menjadi bentuk sinyal tegangan DC lalu menuju blok *PI controller*. Keluaran dari blok *PI controller* ini akan mengubah besar tegangan *set point* berdasarkan sinyal eror yang diterima.

III. PEMODELAN SISTEM

Pemodelan sistem kendali motor BLDC dibangun berdasarkan karakteristik dinamik tiap komponen sehingga dihasilkan model yang tepat dan dapat merepresentasikan kondisi sistem yang sesungguhnya. Gambar 4 berikut ini merupakan model sistem kendali motor BLDC dengan pengendali PI secara keseluruhan.



Gambar 4. Model sistem kendali kecepatan motor BLDC

A. BLDC Motor Drive System

Blok *BLDC Motor Drive System* merupakan blok penggerak motor BLDC yang terdiri atas empat blok

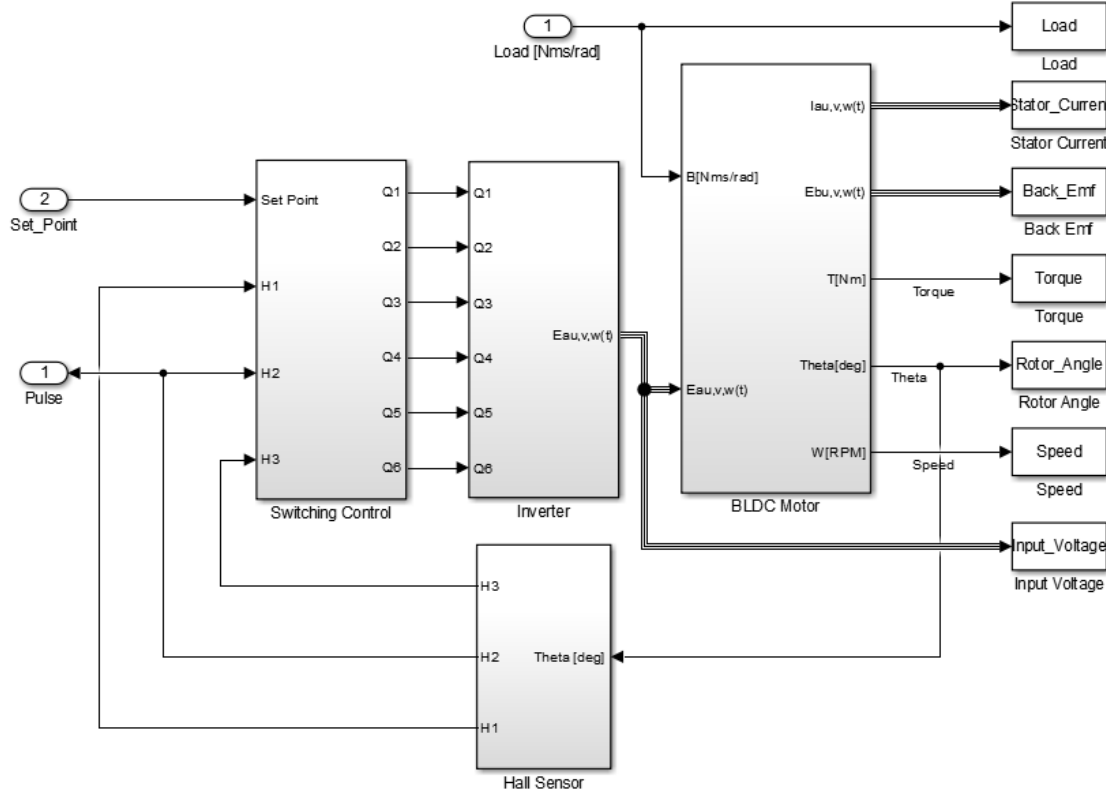
subsistem yaitu blok Motor BLDC, blok Inverter, blok *Hall Sensor*, dan blok *Switching Control*. Blok *BLDC Motor Drive System* ini memiliki dua buah input yaitu *Load* atau

beban dan *Set Point*, dan satu output yaitu *Pulse* yang berupa sinyal pulsa yang berasal dari *Hall Sensor*. Berikut ini merupakan model blok *BLDC Motor Drive System*.

1) *Motor BLDC*

Motor yang dimodelkan pada penelitian ini yaitu motor BLDC dengan kumparan yang dihubungkan *wye* dan dengan

tegangan induksi balik yang berbentuk trapezoid (*trapezoidal back EMF*). Model ini dibangun dengan mengasumsikan bahwa rugi *hysteresis* dan *Eddy current* pada motor diabaikan, *self induction* dan *mutual induction* motor dianggap sama dan konstan, dan *back EMF* berbentuk trapezoid ideal [4].

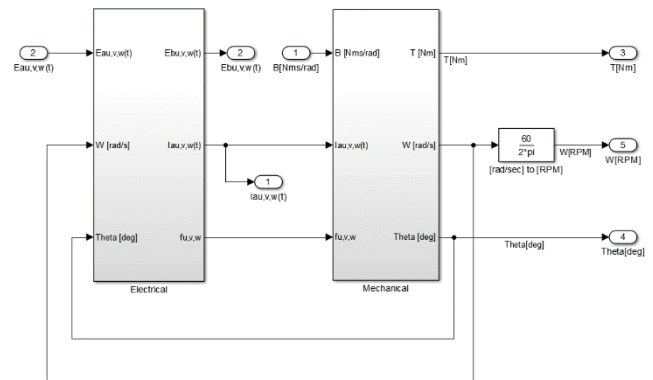


Gambar 5. Model blok *BLDC Motor Drive System*

Model motor BLDC ini dibuat dalam model persamaan diferensial yang terbagi atas dua komponen yaitu komponen elektrik dan mekanik. Masing-masing persamaan tersebut menggambarkan karakteristik motor secara riil [8]. Berikut ini adalah implementasi model motor BLDC pada Simulink/MATLAB.

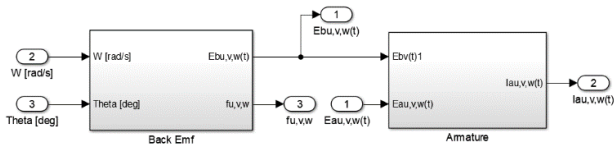
TABEL 1. SPESIFIKASI MOTOR BLDC [9]

<i>Speed, RPM</i>	3000 rpm
<i>DC Voltage, V_{dc}</i>	310
<i>Poles, P</i>	4
<i>Inertia, J</i>	0.00035 Nms ² /rad
<i>Voltage constant, K_b</i>	0.7452 Vs/rad
<i>Torque constant, K_m</i>	0.74 Nm/A
<i>Phase resistance, R_a</i>	2.3 Ohm
<i>Phase Inductance, L_a</i>	0.00768 H
<i>Friction constant, B</i>	0.0001 Nms/rad



Gambar 6. Model blok motor BLDC

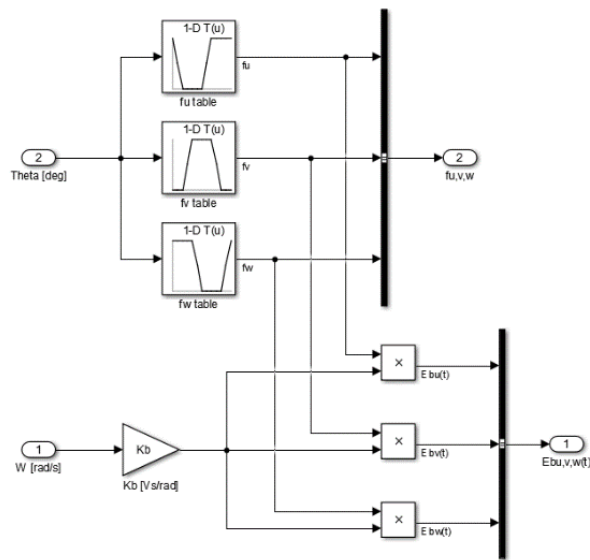
Model elektrik motor BLDC dibangun menggunakan dua blok yaitu blok *armature* dan blok *back EMF*. Blok *armature* berisi model persamaan diferensial komponen elektrik dari motor BLDC [4]. Sedangkan blok *back EMF* berisi model *back EMF* motor BLDC yang merupakan fungsi sudut rotor yang berbentuk trapezoid [10]. Berikut ini adalah tabel fungsi *back EMF* sebagai fungsi sudut rotor.



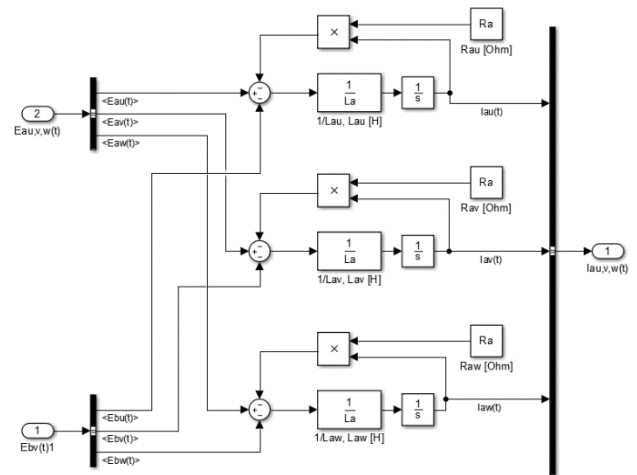
Gambar 7. Model blok komponen elektrik

TABEL 2.
MODEL *BACK EMF* SEBAGAI FUNGSI SUDUT ROTOR [10]

θ_r	$f_u(\theta_r)$	$f_v(\theta_r)$	$f_w(\theta_r)$
$0^\circ - 60^\circ$	$1 - \frac{6\theta_r}{\pi}$	-1	1
$60^\circ - 120^\circ$	-1	$\frac{6\theta_r}{\pi} - 3$	1
$120^\circ - 180^\circ$	-1	1	$5 - \frac{6\theta_r}{\pi}$
$180^\circ - 240^\circ$	$\frac{6\theta_r}{\pi} - 7$	1	-1
$240^\circ - 300^\circ$	1	$9 - \frac{6\theta_r}{\pi}$	-1
$300^\circ - 360^\circ$	1	1	$\frac{6\theta_r}{\pi} - 11$

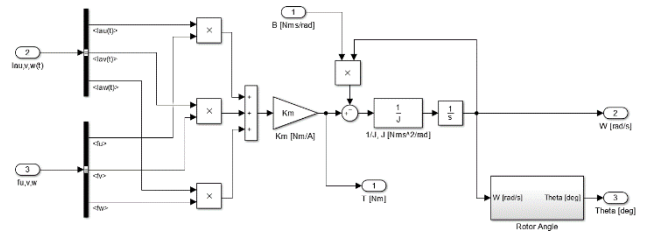


Gambar 8. Model blok *back EMF*

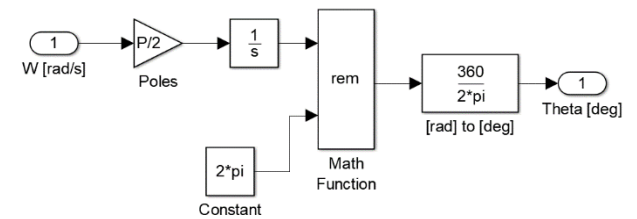


Gambar 9. Model blok armature

Model mekanik motor BLDC berisi persamaan diferensial komponen mekanik motor [4]. Pada model blok mekanik, terdapat blok rotor angle untuk mendapatkan nilai sudut rotor. Nilai sudut rotor ini digunakan sebagai input blok back EMF yang merupakan fungsi sudut rotor. Berikut ini adalah gambar model mekanik motor BLDC.



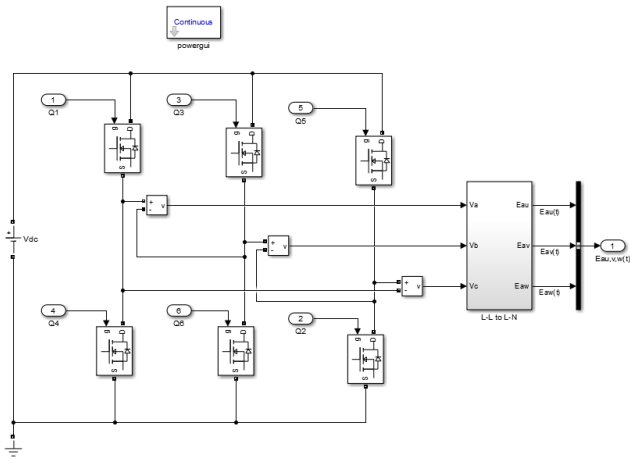
Gambar 10. Model blok komponen mekanik



Gambar 11. Model blok *rotor angle*

2) Inverter

Catu daya pada motor BLDC menggunakan inverter tiga fasa. Inverter tiga fasa terdiri atas enam buah *MOSFET* yang dirangkai berpasangan sehingga menghasilkan keluaran tegangan tiga fasa. Pola pensaklaran keenam *MOSFET* ini diatur oleh blok *Commutation Logic* berdasarkan *hall signal*. Berikut ini adalah model blok inverter tiga fasa.



Gambar 12. Model blok inverter

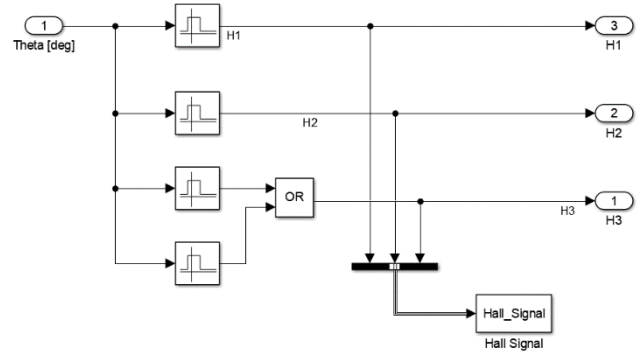
Seperti yang terlihat pada Gambar 12, tegangan keluaran dari inverter berupa tegangan *line to line*, sedangkan untuk menggerakkan beban motor yang terhubung *wye* dibutuhkan tegangan *line to neutral*. Oleh karena itu dibutuhkan blok *LL to LN* untuk mengubah tegangan *line to line* menjadi *line to neutral* [11].

3) Hall Sensor

Terdapat tiga buah *hall sensor* yang digunakan untuk mendeteksi posisi rotor yang masing-masing terpisah sebesar 120° elektrik. Blok *hall sensor* dimodelkan sebagai fungsi dari sudut rotor. TABEL 3 berikut menyajikan model *hall sensor* sebagai fungsi sudut rotor dan Gambar 13 menunjukkan model blok *Hall Sensor*.

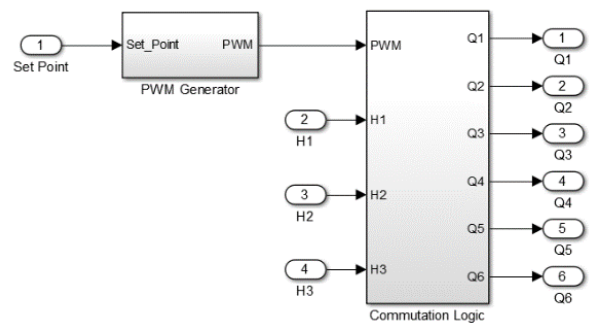
TABEL 3.
MODEL HALL SENSOR SEBAGAI FUNGSI SUDUT ROTOR [10]

θ_e	H ₁	H ₂	H ₃
0° – 60°	1	0	1
60° – 120°	1	0	0
120° – 180°	1	1	0
180° – 240°	0	1	0
240° – 300°	0	1	1
300° – 360°	0	0	1



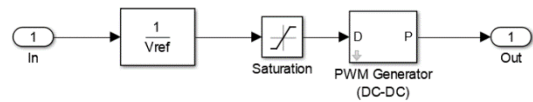
Gambar 13. Model blok *hall sensor*

4) Switching Control

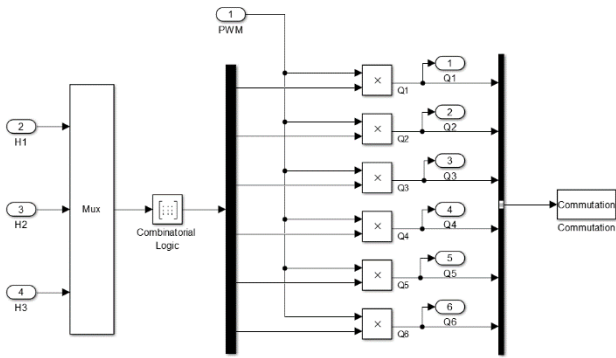


Gambar 14. Model blok *Switching Control*

Pada blok *Switching Control* terdapat dua blok subsistem yaitu blok *PWM Generator* dan blok *Commutation Logic*. Blok *PWM Generator* berfungsi sebagai pembangkit sinyal PWM yang akan digunakan untuk memodulasi tegangan pada inverter. Blok *Commutation Logic* berfungsi untuk mengatur pola komutasi atau pola pensaklaran inverter. Metode komutasi yang digunakan untuk menggerakkan motor BLDC ini yaitu metode *six step commutation* dimana komutasi dilakukan dengan mengaktifkan enam buah *MOSFET* pada inverter secara bergantian dalam enam tahap untuk menghasilkan satu siklus elektrik. Gambar berikut ini menampilkan model blok *PWM Generator* dan model blok *Commutation Logic*.



Gambar 15. Model blok *PWM Generator*



Gambar 16. Model blok Commutation Logic

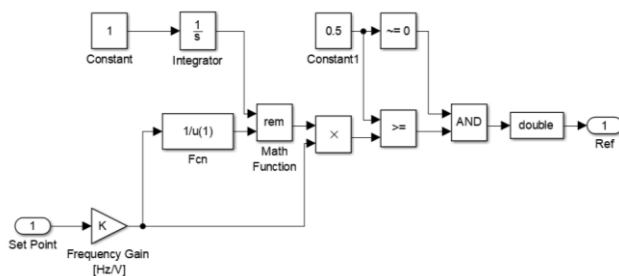
Pada blok *Commutation Logic* akan dihasilkan enam buah output berupa sinyal PWM yang akan menjadi sinyal kontrol dari enam buah MOSFET pada inverter. Pola keluaran dari enam sinyal output ini ditentukan berdasarkan *hall signal*. *Hall signal* ini membawa informasi mengenai posisi sudut rotor. Berikut ini adalah tabel pola komutasi motor BLDC berdasarkan *hall signal*.

TABEL 4.
POLA KOMUTASI MOTOR BLDC

Hall Signal			Controller Output					
H1	H2	H3	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
1	0	1	0	0	0	1	1	1
1	0	0	0	0	1	1	1	0
1	1	0	0	1	1	1	0	0
0	1	0	1	1	1	0	0	0
0	1	1	1	1	0	0	0	1
0	0	1	1	0	0	0	1	1

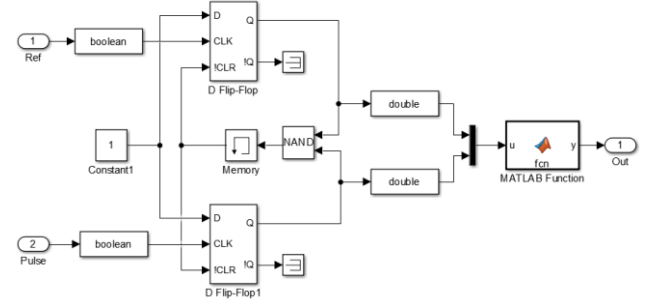
B. Frequency Generator

Blok frekuensi generator ini berfungsi untuk menghasilkan sinyal pulsa dengan frekuensi tertentu yang besarnya ditentukan berdasarkan nilai input *Set Point*. Berikut ini merupakan model blok *frequency generator*.



C. Phase Detector

Gambar 17 berikut ini merupakan model blok *Phase Detector*.

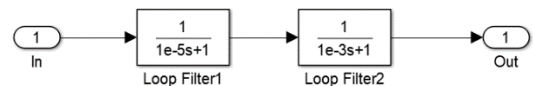


Gambar 17. Model blok Phase Detector

Blok *Phase Detector* berfungsi untuk mendeteksi perbedaan fasa antara sinyal referensi dengan sinyal *feedback*. Blok ini dibangun menggunakan dua buah *D-flip flop* yang berfungsi untuk mendeteksi apakah frekuensi sinyal *feedback* lebih besar atau lebih kecil dari sinyal referensi. Kemudian terdapat blok *MATLAB function* yang berfungsi untuk mengatur agar sinyal keluaran *Phase Detector* bernilai negatif apabila frekuensi sinyal *feedback* lebih besar dari frekuensi sinyal referensi dan sebaliknya. Sehingga keluaran blok *Phase Detector* menghasilkan sinyal pulsa dengan rentang nilai -1 sampai 1.

D. Loop Filter

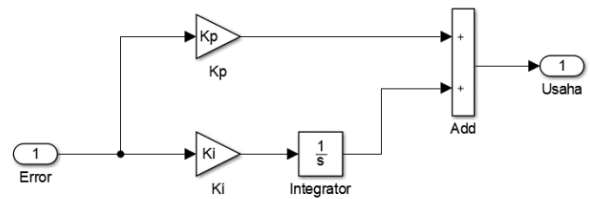
Loop filter pada sistem PLL berfungsi untuk mengubah nilai error sehingga berupa tegangan DC. Pada blok ini digunakan dua buah *low pass filter* orde satu.



Gambar 18. Model blok Loop Filter

E. PI Controller

Blok *PI Controller* ini dibangun menggunakan dua buah blok gain dan sebuah blok *integrator* sebagai komponen pengendali. Blok ini akan menghasilkan usaha berupa tegangan berdasarkan sinyal error yang diterimanya.



Gambar 19. Model blok PI Controller

IV. HASIL

A. Hasil Pencarian Nilai Parameter Pengendali PI

Dalam pencarian parameter pengendali PI, dilakukan simulasi pengujian gangguan dimana motor diberikan

gangguan berupa variasi beban dengan nilai *Set Point* konstan. Pada simulasi tersebut, dilakukan pengukuran dua parameter yaitu eror dan usaha. Eror adalah selisih antara nilai kecepatan referensi dengan kecepatan yang sebenarnya dan usaha adalah usaha yang diberikan oleh pengendali PI untuk mengurangi nilai eror.

Kemudian untuk menentukan nilai K_p dan K_i terbaik, dibuat fungsi tujuan J berdasarkan nilai RMS dari Eror dan Usaha. Nilai K_p dan K_i yang terbaik adalah nilai K_p dan K_i yang menghasilkan nilai J yang paling kecil. Berikut ini adalah fungsi tujuan J .

$$J = \sqrt{(p \times RMSE)^2 + (q \times RMSU)^2} \quad (1)$$

Keterangan:

J = fungsi tujuan

RMSE = nilai RMS dari Eror (rpm)

RMSU = nilai RMS dari Usaha (V)

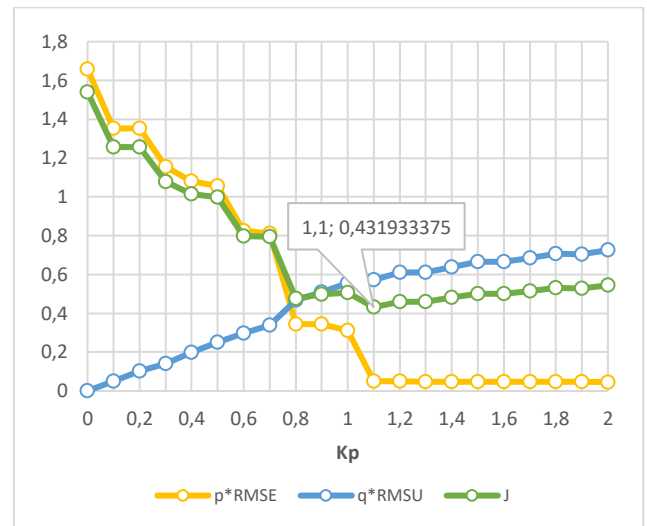
p = koefisien RMSE = $1/Er_{max}$

q = koefisien RMSU = $1/Us_{max}$

Berikut ini adalah tabel dan grafik hasil pencarian nilai K_p dan K_i terbaik.

TABEL 5.
DATA HASIL PENCARIAN PARAMETER K_p

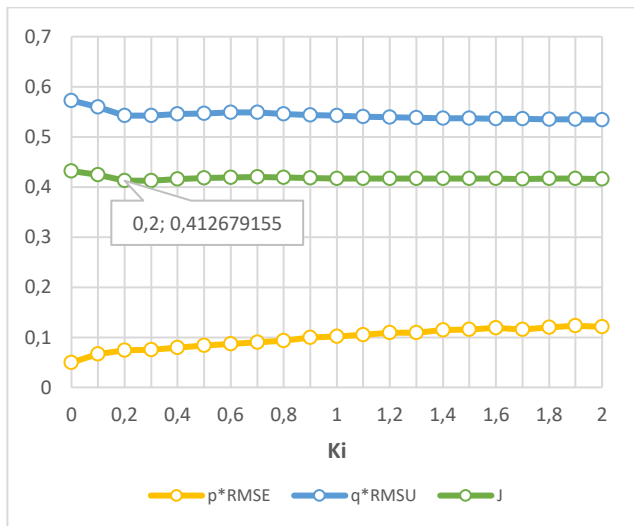
No	K_p	K_i	p^*RMSE	q^*RMSU	J
1	0	0	1,658833	0	1,540345
2	0,1	0	1,352257	0,05085	1,256246
3	0,2	0	1,352257	0,101701	1,257981
4	0,3	0	1,154997	0,139608	1,077596
5	0,4	0	1,08082	0,199476	1,014708
6	0,5	0	1,057544	0,250094	0,999758
7	0,6	0	0,825884	0,297872	0,79877
8	0,7	0	0,812507	0,33898	0,796154
9	0,8	0	0,345294	0,467587	0,475171
10	0,9	0	0,345423	0,508291	0,498205
11	1	0	0,310135	0,557051	0,507426
12	1,1	0	0,049661	0,57262	0,431933
13	1,2	0	0,049503	0,611333	0,460798
14	1,3	0	0,047712	0,61047	0,459991
15	1,4	0	0,047966	0,637822	0,480436
16	1,5	0	0,047476	0,666155	0,501558
17	1,6	0	0,046524	0,665608	0,501072
18	1,7	0	0,04631	0,685345	0,515804
19	1,8	0	0,046148	0,707695	0,532498
20	1,9	0	0,046594	0,703639	0,5295
21	2	0	0,045498	0,725896	0,546059



Gambar 20. Grafik K_p terhadap p^*RMSE , p^*RMSU , dan J pada pencarian nilai K_p

TABEL 6.
DATA HASIL PENCARIAN PARAMETER K_i

No	K_p	K_i	p^*RMSE	q^*RMSU	J
1	1,1	0	0,049661	0,57262	0,431933
2	1,1	0,1	0,066975	0,559118	0,423925
3	1,1	0,2	0,073848	0,542589	0,412679
4	1,1	0,3	0,074803	0,542769	0,41296
5	1,1	0,4	0,079068	0,545348	0,415548
6	1,1	0,5	0,083407	0,547077	0,417554
7	1,1	0,6	0,086735	0,548303	0,41904
8	1,1	0,7	0,09054	0,548479	0,419863
9	1,1	0,8	0,093531	0,545794	0,418457
10	1,1	0,9	0,099681	0,543696	0,418146
11	1,1	1	0,101339	0,541952	0,417215
12	1,1	1,1	0,104713	0,540576	0,416928
13	1,1	1,2	0,108662	0,539508	0,417021
14	1,1	1,3	0,109335	0,538383	0,416355
15	1,1	1,4	0,114125	0,537635	0,416919
16	1,1	1,5	0,115567	0,536931	0,416751
17	1,1	1,6	0,118455	0,536388	0,417057
18	1,1	1,7	0,115209	0,535643	0,415732
19	1,1	1,8	0,119364	0,53535	0,41653
20	1,1	1,9	0,123136	0,534902	0,417153
21	1,1	2	0,121017	0,5344	0,416255

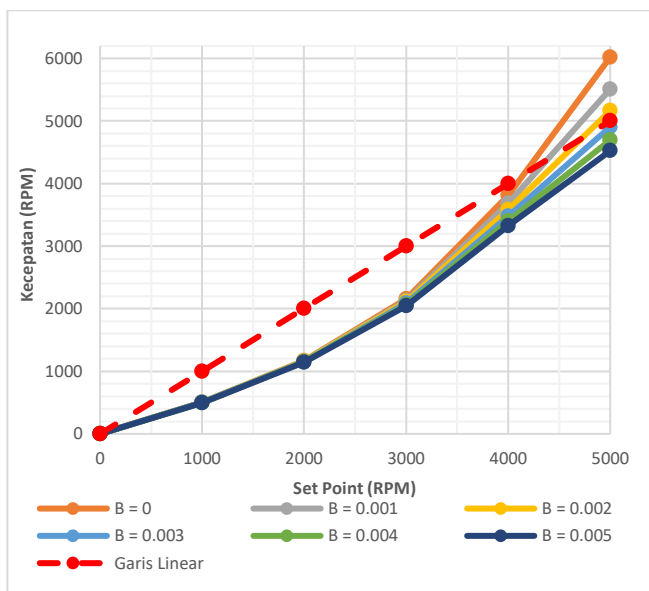


Gambar 21. Grafik Ki terhadap RMSE, RMSU, dan J pada pencarian parameter Ki

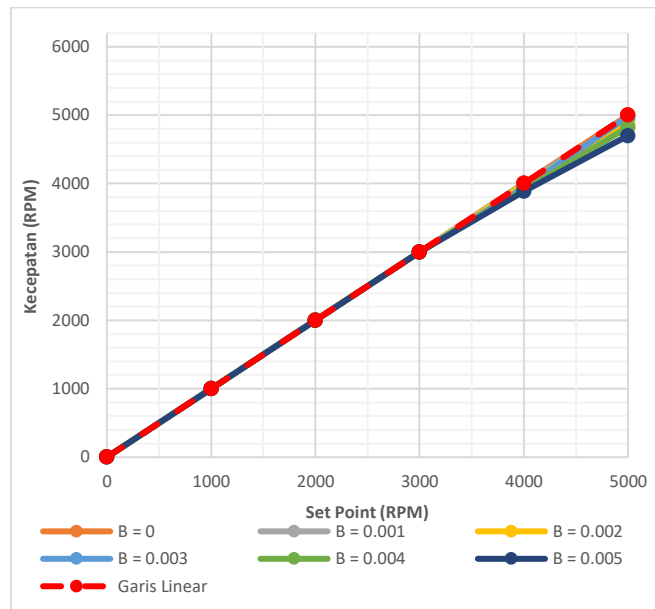
Dilihat dari TABEL 5 dan TABEL 6., nilai parameter K_p dan K_i terbaik berdasarkan fungsi tujuan J yaitu $K_p = 1,1$ dan $K_i = 0,2$.

B. Pengujian Karakteristik Pembebanan Motor

Pengujian ini dilakukan dengan menyimulasikan motor pada rentang kecepatan tertentu pada nilai beban yang berbeda-beda pada kondisi tanpa pengendali PI dan dengan pengendali PI. Berikut ini adalah perbandingan karakteristik pembebanan motor BLDC tanpa menggunakan pengendali PI dengan menggunakan pengendali PI.



Gambar 22. Grafik karakteristik pembebanan motor BLDC tanpa pengendali PI

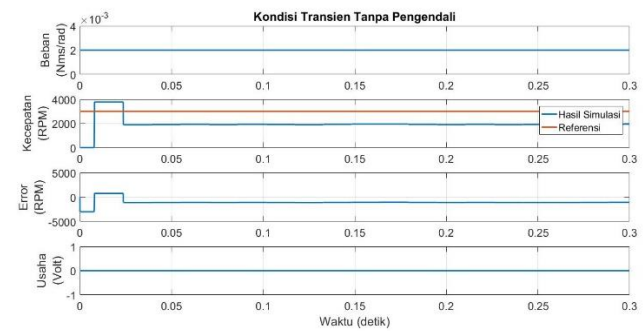


Gambar 23. Grafik karakteristik pembebanan motor BLDC dengan pengendali PI

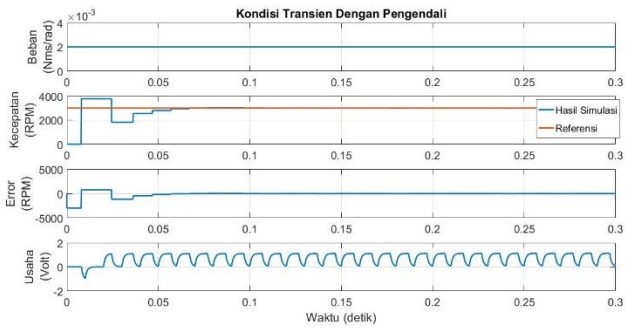
Pada Gambar 22 terlihat bahwa motor tidak linear dimana grafik menjauhi garis linear. Sedangkan pada Gambar 23 grafik merapat menuju ke garis linear pada rentang kecepatan 0 - 3000 rpm. Kemudian terjadi sedikit perbedaan pada rentang kecepatan 3000 - 5000 rpm untuk beban 0,004 Nms/rad dan 0,005 Nms/rad. Hal ini menunjukkan bahwa pengendali yang disematkan pada sistem telah berhasil melinearkan motor.

C. Pengujian Kondisi Transien

Dari pengujian akan didapatkan perbandingan respon transien motor pada saat tanpa pengendali PI dengan pada saat tanpa pengendali PI.



Gambar 24. Hasil simulasi kondisi transien motor BLDC tanpa pengendali PI

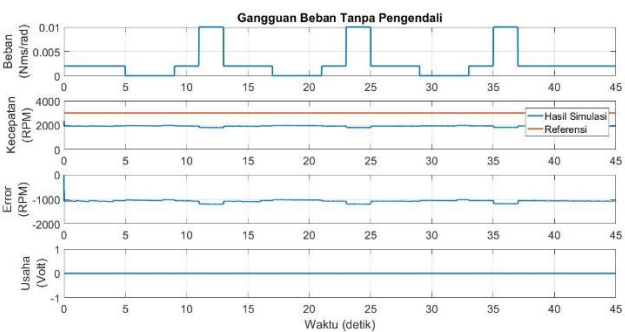


Gambar 25. Hasil simulasi kondisi transien motor BLDC dengan pengendali PI

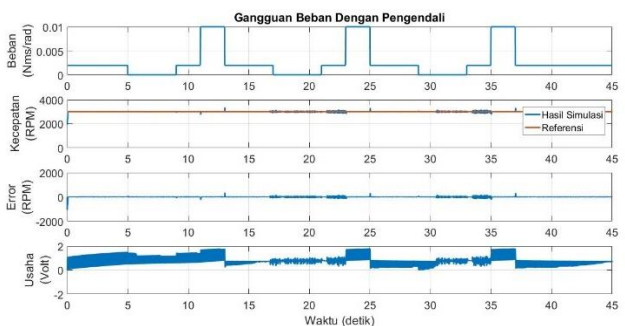
Pada Gambar 25 terlihat bahwa nilai *steady state error* dari sistem setelah menggunakan pengendali PI lebih baik dibandingkan dengan tanpa pengendali PI dimana nilainya menurun dari 2000 rpm menjadi 0 rpm, tetapi memiliki waktu respon yang lebih lama dibanding tanpa pengendali PI dimana waktu respon sistem dengan pengendali PI yaitu sebesar 0,07 detik sedangkan waktu respon tanpa pengendali PI yaitu sebesar 0,025 detik.

D. Pengujian dengan Gangguan

Berikut ini adalah adalah hasil simulasi gangguan tanpa pengendali PI dan hasil simulasi dengan pengendali PI dengan menggunakan nilai K_p dan K_i terbaik.



Gambar 26. Hasil simulasi gangguan tanpa pengendali PI

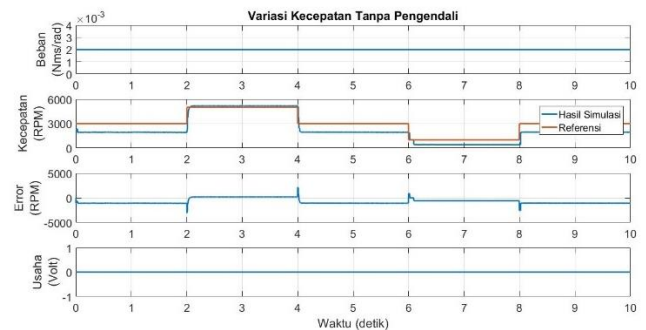


Gambar 27. Hasil simulasi gangguan dengan pengendali PI

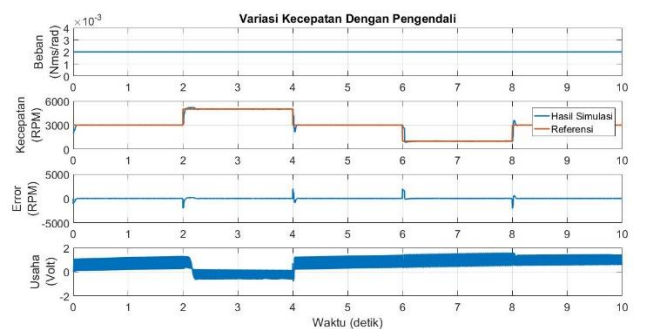
Gambar di atas menunjukkan perubahan yang signifikan terhadap respon kecepatan motor BLDC setelah menggunakan pengendali PI dimana RMSE berubah dari 1078,242 menjadi 48,001.

E. Pengujian Variasi Kecepatan

Pada pengujian ini diterapkan *Set Point* berubah untuk memberikan kecepatan referensi yang berubah sepanjang simulasi. Tujuan pengujian ini adalah untuk melihat respon kecepatan motor terhadap perubahan referensi kecepatan.



Gambar 28. Hasil simulasi variasi kecepatan tanpa pengendali PI



Gambar 29. Hasil simulasi pengujian kecepatan dengan pengendali PI

Dapat dilihat pada Gambar 28 dan Gambar 29 perbandingan hasil simulasi variasi kecepatan tanpa pengendali dan dengan pengendali, respon kecepatan motor BLDC tanpa pengendali tidak dapat mengikuti perubahan referensi kecepatan yang diberikan. Lalu kemudian respon kecepatan motor BLDC menjadi lebih baik setelah penambahan pengendali PI pada sistem.

V. KESIMPULAN

Setelah melakukan penelitian sistem kendali kecepatan motor BLDC, maka dihasilkan kesimpulan sebagai berikut:

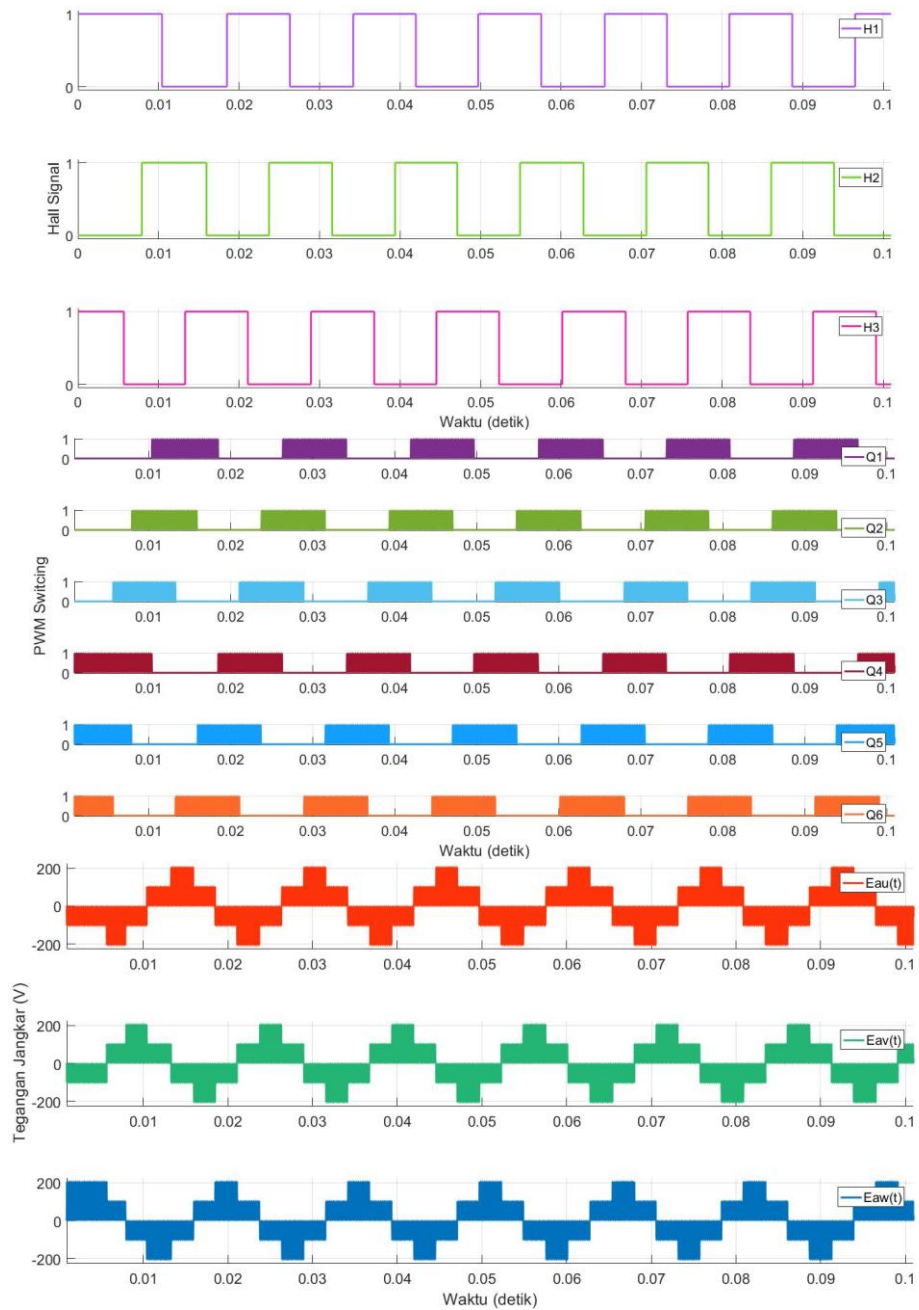
1. Telah dihasilkan model sistem kendali kecepatan motor BLDC dengan metode komutasi *six step* dan dengan menyematkan pengendali PI dengan struktur PLL sebagai pengendali kecepatan daur tertutup.
2. Nilai K_p dan K_i terbaik yang didapatkan berdasarkan nilai J yang terkecil yaitu $K_p = 1,1$ dan $K_i = 0,2$ dengan $J = 0,412679$.
3. Respon terhadap gangguan menjadi lebih baik dimana RMSE turun dari 1078,242 menjadi 48,001.
4. Nilai *steady state error* pada kondisi transien menurun dari 2000 rpm menjadi 0 rpm sedangkan kecepatan respon lebih lambat dari 0,0025 detik menjadi 0,007 detik.

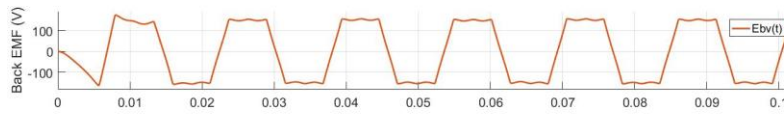
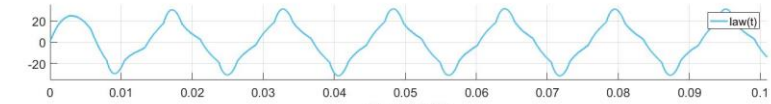
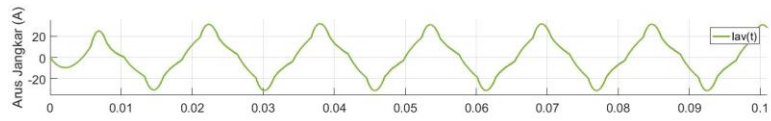
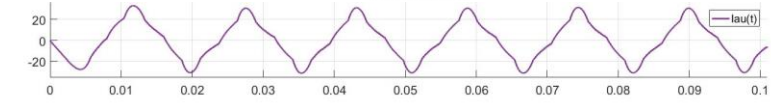
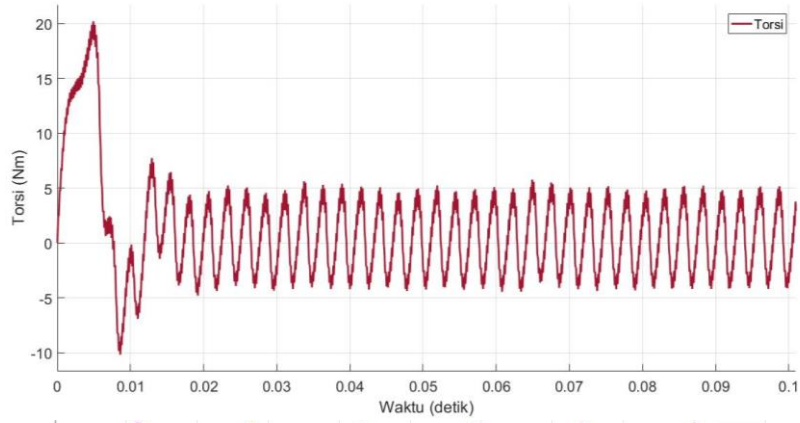
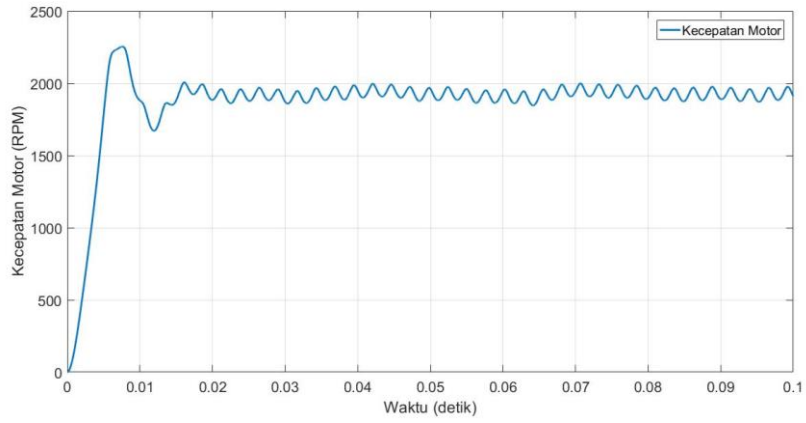
5. Respon terhadap variasi kecepatan menjadi lebih baik dengan nilai RMSE berubah dari 890,2436 menjadi 192,0067.
6. Penggunaan pengendalian PI dapat melinearkan motor.

REFERENSI

- [1] S. C. S. dan J. T. Kuncheria, "Modelling and Simulation of Four Quadrant Operation of Three Phase Brushless DC Motor With Hysteresis Current Controller," *IJAREEIE*, vol. 2, no. 6, pp. 2320-3765, 2013.
- [2] J. C. Gamazo, E. Vazquez dan J. Gomez, "Position and Speed Control of Brushless DC Motors Using Sensorless Techniques and Application Trends," *Sensors*, pp. 6901-6947, 2010.
- [3] R. J. Masood, D. B. Wang, Z. A. Ali dan K. Babar, "DDC Control Techniques for Three-Phase BLDC Motor Position Control," *Algorithms*, 2017.
- [4] A. Tashakori, M. Ektesabi dan N. Hosseinzadeh, "Modeling of BLDC Motor with Ideal Back-EMF for Automotive Applications," dalam *World Congress on Engineering*, London, 2011.
- [5] A. P. C. Rao, Y. P. Obulesh dan C. Saibabu, "Mathematical Modeling of BLDC Motor with Closed Loop Speed Control Using PID Controller Under Various Loading Conditions," *APRN Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 7, pp. 1321-1328, 2012.
- [6] A. Dharmawan, "Pengendalian Motor Brushless DC dengan Metode PWM Sinusoidal menggunakan ATMEGA16," Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok, 2009.
- [7] M. B. Hamed dan L. Sbita, "Digital Phase Locked Loop Induction Motor Speed Controller: Design and Experiments," *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, no. 20, pp. 159-174, 2012.
- [8] V. Hubik, M. Sveda dan V. Singule, "On The Development of BLDC Motor Control Run-Up Algorithms for Aerospace Application," dalam *13th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Poznan, 2008.
- [9] B. Singh dan R. Kumar, "Solar PV Array Fed Brushless DC Motor Driven Water Pump," dalam *IEEE 6th International Conference on Power System (ICPS)*, Delhi, 2016.
- [10] M.-F. Tsai, T. P. Quy, B.-F. Wu dan C.-S. Tseng, "Model Construction and Verification of a BLDC Motor Using MATLAB/SIMULINK and FPGA Control," dalam *6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Beijing, 2011.
- [11] J. D. Irwin, *Power Electronics Handbook*, Florida: Academic Press, 2001.

Lampiran 2. Grafik keluaran motor BLDC





Lampiran 3. Perbandingan pengendali motor BLDC

Perbandingan pengendali motor BLDC telah dilakukan oleh Ahmed M. Ahmed, dkk. dalam jurnal yang berjudul “*Brushless DC Motor Speed Control using Both PI Controller and Fuzzy PI Controller*”, 2015 (referensi [8]). Pada penelitian tersebut dilakukan studi perbandingan antara pengendali *PI Controller* dan *Fuzzy PI Controller*. Respon transien motor diukur pada perubahan kecepatan 0-700 rpm dan 700-900 rpm. Berikut hasil perbandingan respon transien pengendali *PI Controller* dan *Fuzzy PI Controller* serta hasil skenario transien pada penelitian ini.

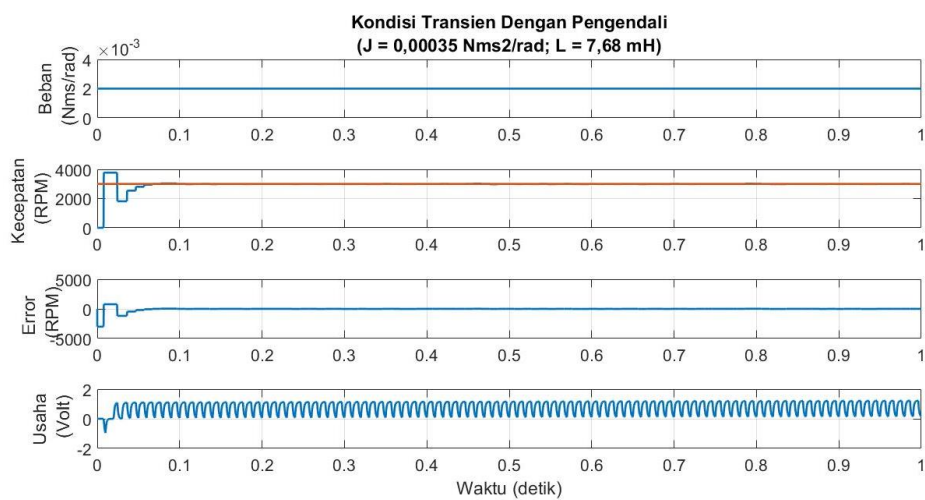
1. Referensi [8]			
PI Controller			
Kecepatan Awal (rpm)	Kecepatan Akhir (rpm)	Respon Transien (detik)	Steady State Error (%)
0	700	0,025	0
700	900	0,005	0
Fuzzy + PI Controller			
Kecepatan Awal (rpm)	Kecepatan Akhir (rpm)	Respon Transien (detik)	Steady State Error (%)
0	700	0,023	0,7
700	900	0,005	0,7
2. Rancangan Pengendali Pada Penelitian Ini			
PLL + PI Controller			
Kecepatan Awal (rpm)	Kecepatan Akhir (rpm)	Respon Transien (detik)	Steady State Error (%)
0	3000	0,05	0,1
3000	5000	0,15	0,16
5000	3000	0,06	0,1
3000	1000	0,11	0,3
1000	3000	0,06	0,1

Lampiran 4. Respon transien motor BLDC

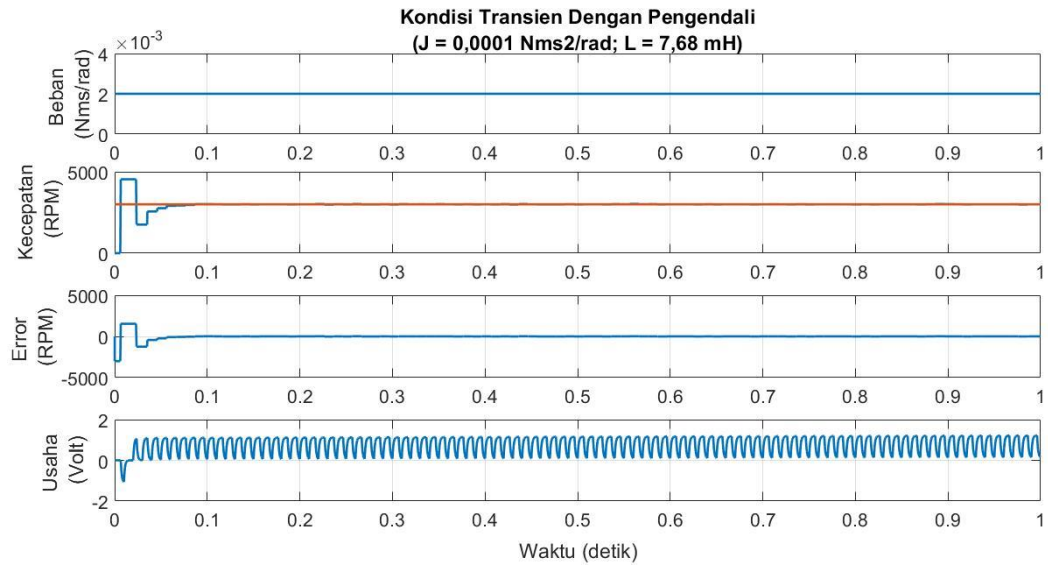
Respon transien motor BLDC dipengaruhi momen inersia dan induktansi motor. Semakin besar momen inersia motor, maka respon transien motor akan lebih lambat. Sebaliknya, semakin besar induktansi motor, maka respon transien motor akan lebih cepat. Hal tersebut dapat dilihat pada grafik dibawah ini.

1. Perubahan momen inersia

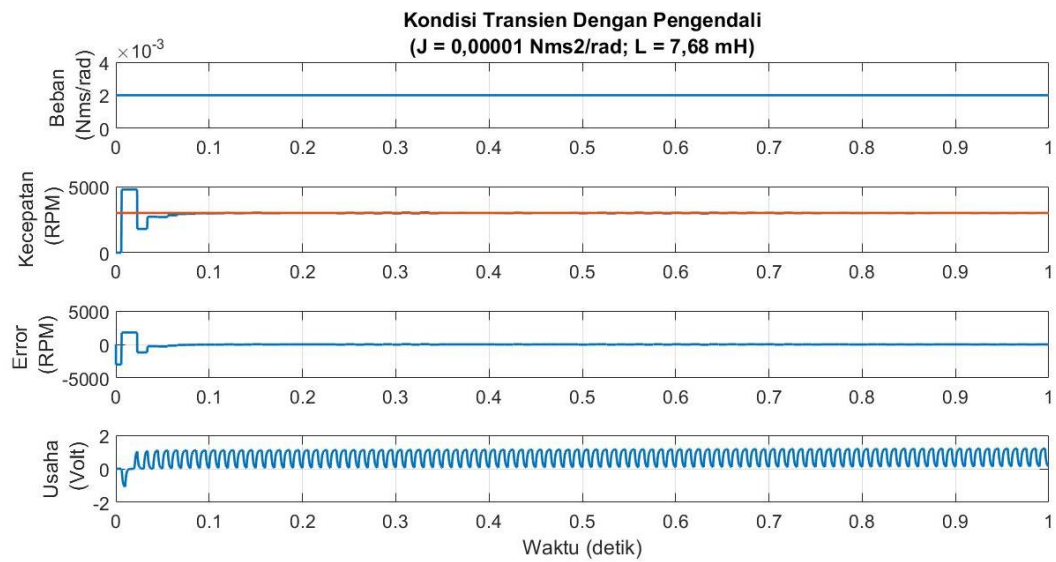
- Kondisi Awal ($J = 0,00035 \text{ Nms}^2/\text{rad}$). $T_s = 0,05$ detik



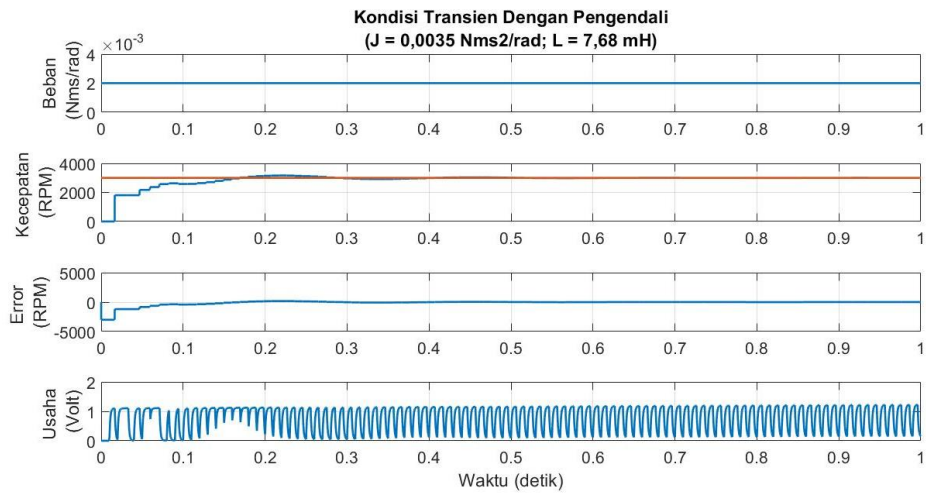
- ($J = 0,00001 \text{ Nms}^2/\text{rad}$). $T_s = 0,004$ detik



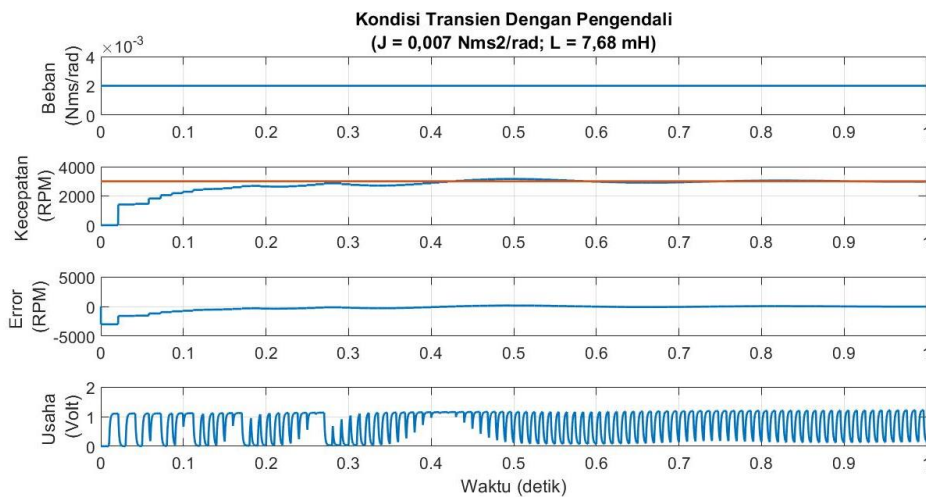
- ($J = 0,0001 \text{ Nms}^2/\text{rad}$). $T_s = 0,0035$ detik



- ($J = 0,0035 \text{ Nms}^2/\text{rad}$). $T_s = 0,15$ detik

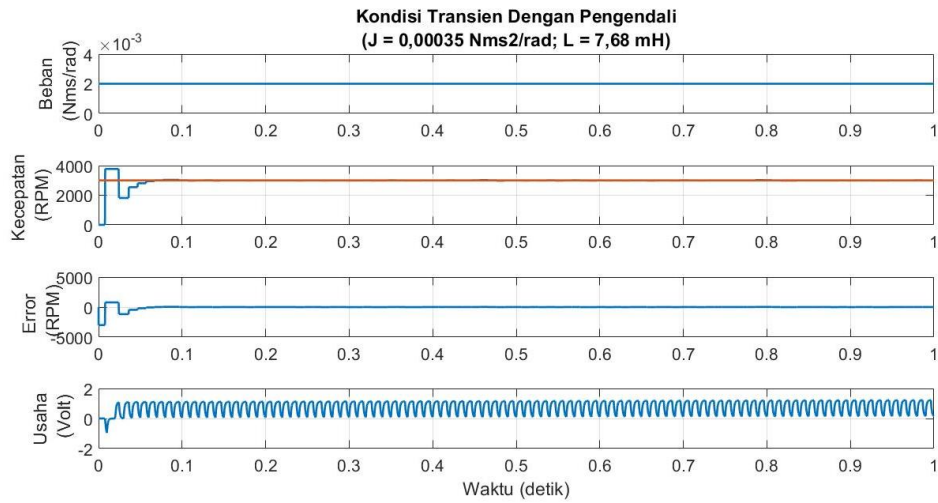


- ($J = 0,007 \text{ Nms}^2/\text{rad}$). $T_s = 0,35$ detik

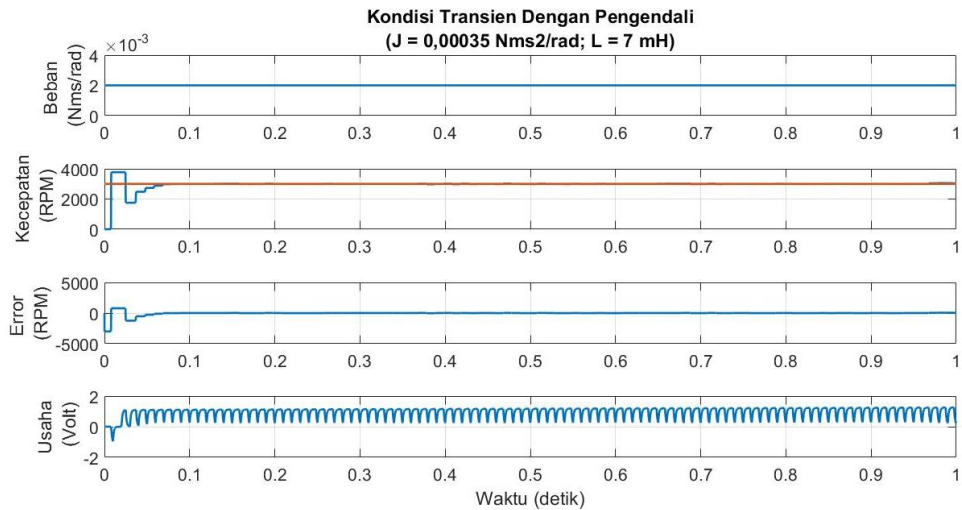


2. Perubahan induktansi

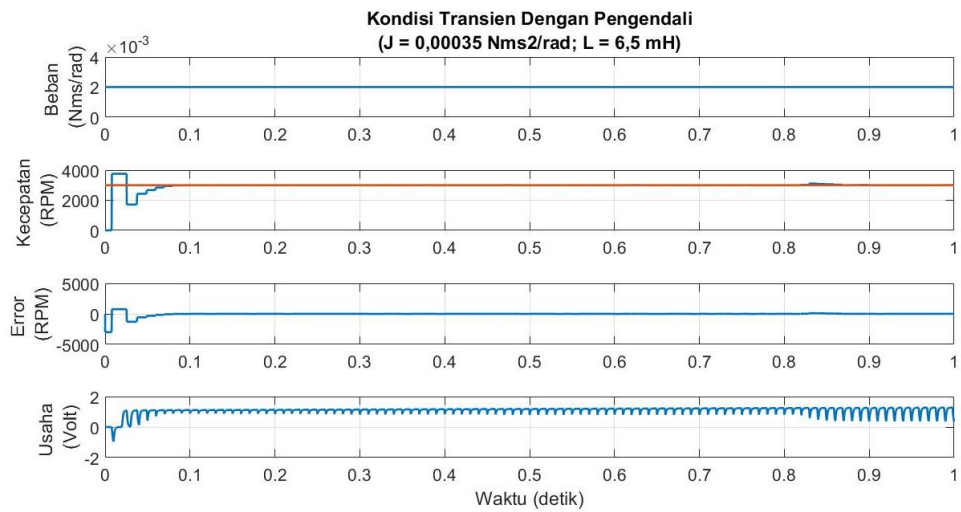
- Kondisi Awal ($L = 7,68$ mH). $T_s = 0,05$ detik



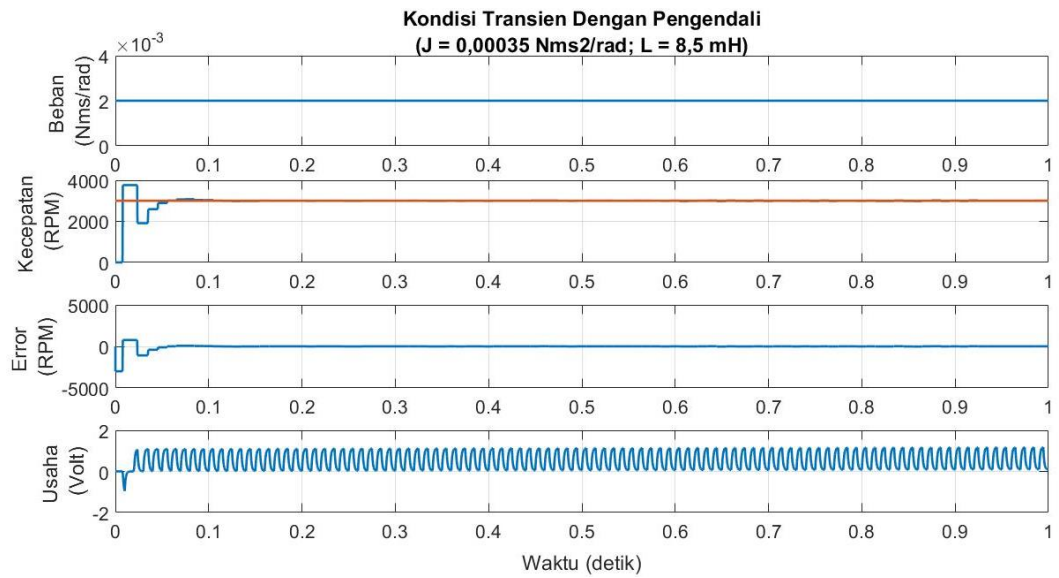
- ($L = 7$ mH). $T_s = 0,07$ detik



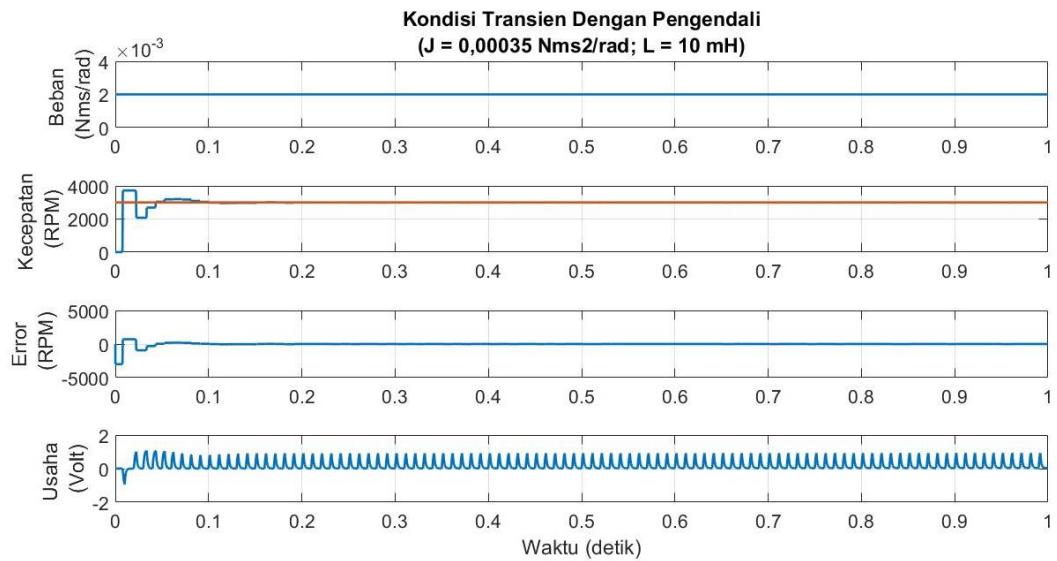
- ($L = 6,5 \text{ mH}$). $T_s = 0,075 \text{ detik}$



- ($L = 8,5 \text{ mH}$). $T_s = 0,045 \text{ detik}$



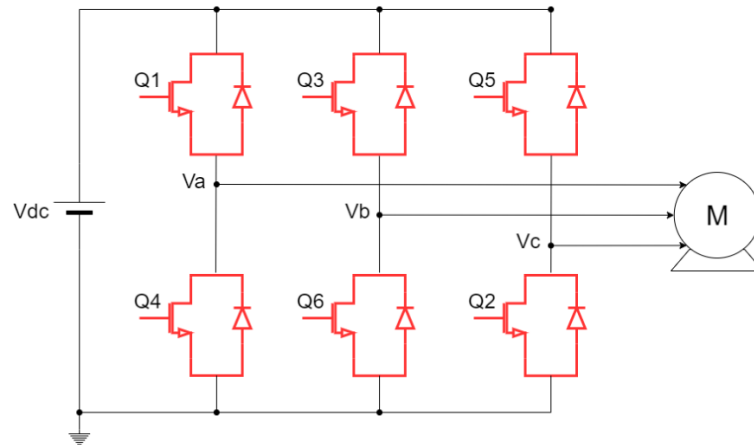
- ($L = 10 \text{ mH}$). $T_s = 0,035 \text{ detik}$



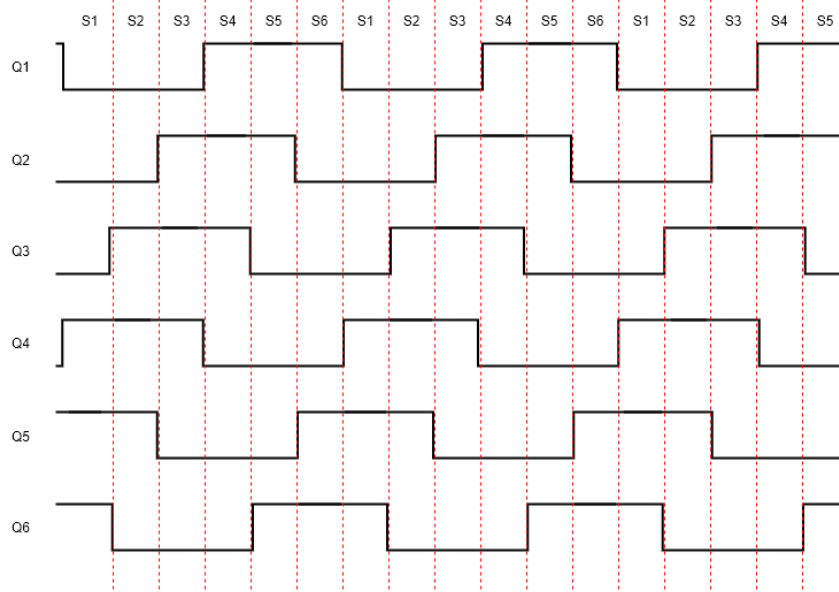
Pada grafik diatas terlihat bahwa respon transien dipengaruhi oleh parameter momen inersia dan induktansi motor. Untuk nilai parameter yang digunakan pada penelitian ini terlihat bahwa respon transien motor sangat cepat yaitu berkisar antara 0,005-0,4 detik. Karakteristik repon yang serupa juga terlihat pada referensi [5], [6], dan [8] pada penelitian ini dimana respon transien motor yang dihasilkan kurang dari 0,1 detik.

Lampiran 5. Pengendalian Frekuensi Motor BLDC

Berikut ini adalah skema perubahan komutasi motor BLDC.

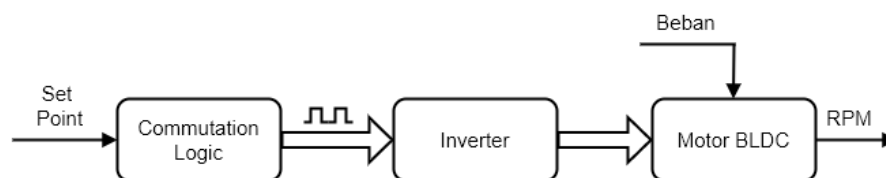


	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Q1	0	0	0	1	1	1
Q2	0	0	1	1	1	0
Q3	0	1	1	1	0	0
Q4	1	1	1	0	0	0
Q5	1	1	0	0	0	1
Q6	1	0	0	0	1	1

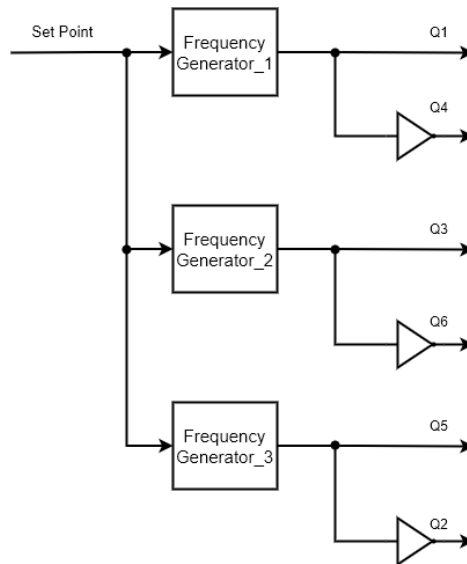


Pada rangkaian inverter terdapat enam buah mosfet yang dirangkai saling berpasangan yaitu rangkaian sisi atas dan rangkaian sisi bawah. Sinyal control gate pada mosfet rangkaian sisi atas dan rangkaian sisi bawah saling berlawanan. Sinyal tersebut dapat dilihat pada tabel di atas.

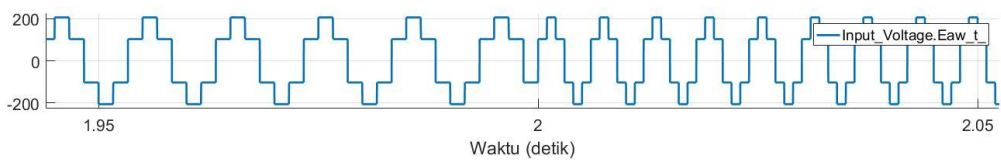
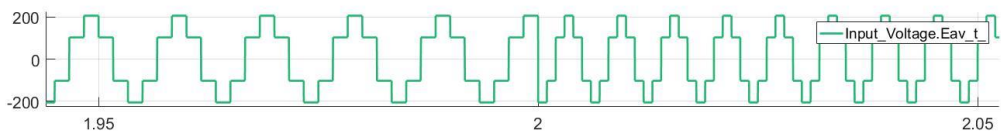
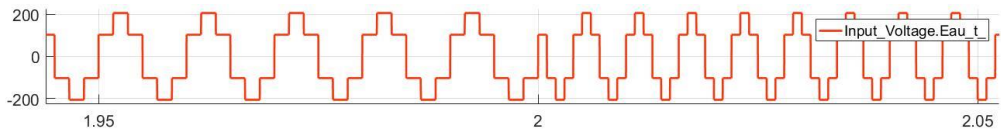
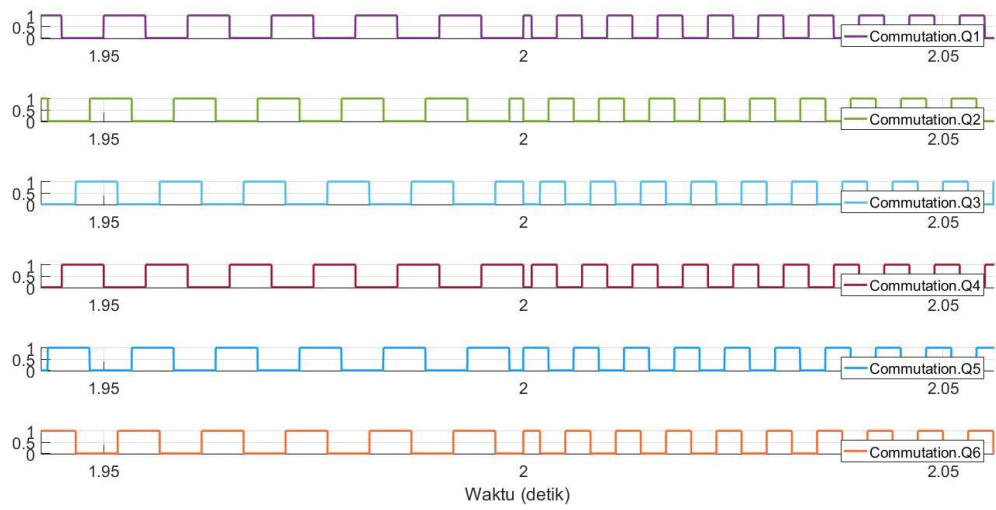
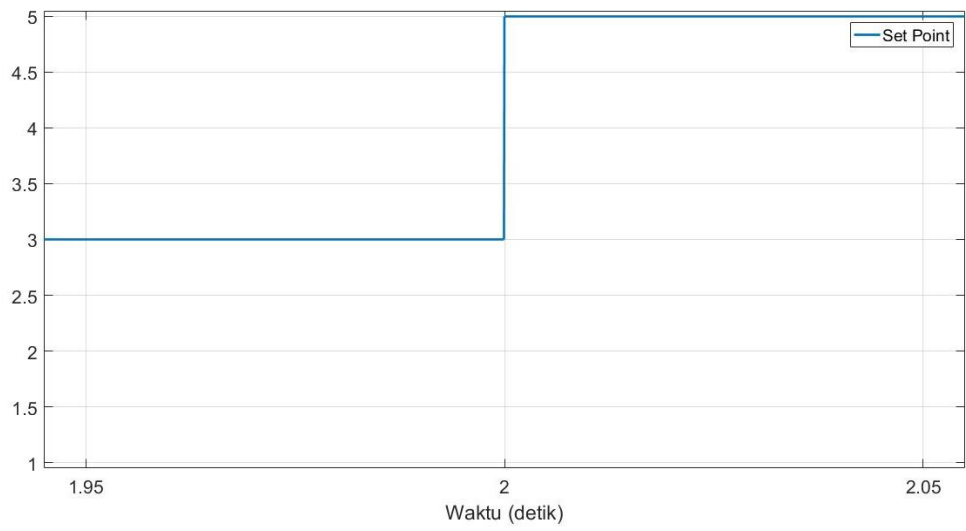
Pola komutasi motor BLDC diatur berdasarkan sinyal yang diterima oleh gate Mosfet pada inverter. Dapat dilihat bahwa untuk mendapatkan satu putaran penuh motor, terdapat enam tahap kombinasi. Kecepatan motor BLDC dapat diubah dengan mengubah frekuensi setiap sinyal control gate tersebut. Semakin besar frekuensi sinyal kontrol *gate*, semakin cepat pula pola komutasi berubah dan kecepatan motor BLDC akan meningkat. Blok diagram pengendalian kecepatan motor BLDC ini dapat dilihat pada gambar berikut.



Pada gambar di atas, dapat dilihat terdapat blok *commutation logic* yang berfungsi untuk mengatur pola komutasi motor BLDC dengan membangkitkan sinyal kontrol gate mosfet sesuai dengan pola pada tabel di atas. Blok diagram *commutation logic* dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Commutation logic dapat dibangun dengan menggunakan tiga buah *frequency generator* dan tiga buah gerbang not. *Frequency generator* merupakan pembangkit sinyal pulsa dimana frekuensi sinyal pulsa yang dihasilkan sebanding dengan tegangan inputnya. Blok *frequency generator* akan menghasilkan sinyal Q1, Q3, dan Q5. Sedangkan gerbang not menghasilkan sinyal kebalikan dari Q1, Q3, dan Q5, yaitu Q4, Q6, dan Q2. Dimana Q4 adalah kebalikan dari Q1, Q6 adalah kebalikan dari Q3, dan Q2 adalah kebalikan dari Q5. Berikut ini adalah grafik sinyal keluaran *commutation logic* dan sinyal keluaran inverter.



Pada grafik di atas, terjadi perubahan kecepatan komutasi ketika *set point* diubah sehingga menyebabkan kecepatan frekuensi tegangan keluaran inverter juga berubah. Model seperti ini apabila diimplementasikan pada model motor BLDC, maka dapat mengubah kecepatan putaran motor berdasarkan perubahan kecepatan komutasi tersebut.