

TESIS

**PENINGKATAN KINERJA SISTEM KENDALI MOTOR *BRUSHLESS* DC
MENGUNAKAN KENDALI *ADAPTIVE* PID**

*Improved Performance Of DC Brushless Motor Control System Using PID
Adaptive Control*

**FEBRIYANI BAHARU
D032 201 001**



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

PENGAJUAN TESIS

**PENINGKATAN KINERJA SISTEM KENDALI MOTOR
BRUSHLESS DC MENGGUNAKAN KENDALI *ADAPTIVE* PID**

Tesis
Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister
Program Studi Magister Teknik Elektro

Disusun dan diajukan oleh

**FEBRIYANI BAHARU
D032201001**

Kepada

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

TESIS**PENINGKATAN KINERJA SISTEM KENDALI MOTOR
BRUSHLESS DC MENGGUNAKAN KENDALI ADAPTIVE
PID****FEBRIYANI BAHARU
D032201001**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 25 September 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Prof.Dr.-Ing.Ir.Faizal Arya Samman, ST,MT,IPU,ACPE
NIP. 19750605 200212 1 004

Pembimbing Pendamping



Dr. Ir. Yusran, S.T, M.T.
NIP. 19750404 200012 1 001

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT., IPM
NIP. 19730926 200012 1 002

Ketua Program Studi
S2 Teknik Elektro

Dr. Eng. Ir. Wardi, ST. M.Eng.
NIP. 19720828 199903 1 003

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama : Febriyani Baharu
Nomor mahasiswa : D032201001
Program studi : Magister Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa, tesis berjudul “Peningkatan Kinerja Sistem Kendali Motor *Brushless* DC Menggunakan Kendali *Adaptive* PID” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing (Prof.Dr.-Ing.Ir.Faizal Arya Samman, ST,MT,IPU,ACPE. NIP. 19750605 200212 1 004 dan Dr. Ir. Yusran, S.T, M.T. NIP. 19750404 200012 1 001). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka tesis ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan di Jurnal/Prosiding *The 2023 International Conference on Computer Science, Information Technology and Engineering* (ICCSITE) sebagai artikel dengan judul “*Performancce Evaluation of a Brushless DC Motor System with Variable Loads*”.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya berupa tesis ini kepada Universitas Hasanuddin.

Gowa, 20 Oktober 2023
Yang menyatakan



Febriyani Baharu

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan atas Hadirat Tuhan Yang Maha Kuasa atas segala limpahan rahmat dan hidayahnya sehingga tugas akhir yang berjudul “Peningkatan Kinerja Sistem Kendali Motor *Brushless* Dc Menggunakan Kendali *Adaptive* PID” ini dapat diselesaikan sebagai salah satu syarat dalam menyelesaikan jenjang Magister pada Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan dan penulisan laporan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan, bimbingan serta dukungan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai dengan masa penyusunan tugas akhir. Oleh karena itu, penulis dengan senang hati menyampaikan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan hidayahnya kepada penulis untuk bisa menyelesaikan tugas akhir ini dengan baik.
2. Kedua orang tua penulis, yang selalu menjadi motivasi penulis dari kecil hingga berada pada tahap ini dan menyelesaikan penyusunan tesis ini.
3. Bapak Prof. Dr-Ing. Faizal Arya Samman, ST., MT, selaku pembimbing I yang senantiasa memberikan saran-saran serta bantuan selama proses simulasi, pengambilan data hingga selesainya model sistem kendali ini dibuat, dan Bapak Dr. Ir. Yusran, ST., MT, selaku pembimbing II yang selalu menyediakan waktu untuk mengingatkan penulis untuk selalu semangat dalam menyelesaikan proses pengambilan data dan penulisan penyusunan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr.Eng. Ir. Wardi, ST., M.Eng, selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah membimbing penulis selama masa perkuliahan.
5. Bapak, Ibu tenaga pengajar dan Staf Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan bimbingan dan ilmunya kepada penulis selama masa perkuliahan.
6. Teman-teman Penulis di Laboratorium Elektronika dan Divais, yang telah meluangkan waktu untuk mengajari saya tentang motor BLDC.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Untuk itu saran beserta kriikan yang membangun sangat diharapkan. Semoga karya ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Wassalam

Makassar, Agustus 2023

Penulis

ABSTRAK

FEBRIYANI BAHARU. *Peningkatan Kinerja Sistem Kendali Motor Brushless DC Menggunakan Kendali Adaptive PID* (dibimbing oleh, **Faizal Arya Samman, Yusran**).

Pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pengendali PID adaptif pada sistem kendali kecepatan motor *brushless* DC (BLDC) dan menghasilkan model sistem kendali PID yang dikombinasikan dengan sistem kendali adaptif untuk mengendalikan motor BLDC dengan beban yang bervariasi. Penelitian ini merancang sebuah pengontrolan/pengendalian yang mampu menjaga dan meningkatkan kestabilan putaran motor pada gangguan beban yang bervariasi dan kecepatan motor yang bervariasi. Salah satu sistem kendali yang dapat diprogram untuk menghasilkan *respon time* yang cepat, mengurangi *overshoot* dan meredam riak yang terjadi pada motor BLDC adalah pengendali Proporsional, Integral, dan Derivatif (PID) dan untuk menangani beban atau parameter yang bervariasi maka akan dipadukan dengan kendali adaptif. Nilai K_p , K_i , dan K_d didapatkan berdasarkan dua metode yaitu hasil uji coba atau *trial and error* yaitu $K_p = 3$, $K_i = 2,4$, $K_d = 0$, dan metode *Particle Swarm Optimization* (PSO) yaitu $K_p = 0,9$, $K_i = 2,4$, $K_d = 0,05$. Dari hasil simulasi pengujian pada gangguan beban yang bervariasi, sistem kendali PID yang dipadukan dengan kendali adaptif menunjukkan hasil performa yang lebih baik dengan kecepatan motor BLDC yang stabil, sesuai dengan kecepatan referensi yang diinginkan, dan berdasarkan hasil pengujian sistem kendali PID adaptif pada beban yang konstan bisa menghasilkan kecepatan yang bervariasi.

Kata Kunci: Motor *Brushless* DC, Inverter, PID, PID Adaptif

ABSTRACT

FEBRIYANI BAHARU. *Improved Performance of DC Brushless Motor Control System Using PID Adaptive Control* (supervised by, **Faizal Arya Samman, Yusran**).

This study aims to determine the effect of adaptive PID controllers on the brushless DC motor (BLDC) speed control system and produce a PID control system model combined with an adaptive control system to control BLDC motors with varying loads. This study designed a control / control that is able to maintain and increase the stability of motor rotation at varying load disturbances and varying motor speeds. One control system that can be programmed to produce fast response times, reduce overshoot and dampen ripples that occur in BLDC motors is the Proportional, Integral and Derivative (PID) controller and to handle varying loads or parameters it will be combined with adaptive control. The K_p , K_i , and K_d values were obtained based on two methods, namely trial and error results $K_p = 3$, $K_i = 2.4$, $K_d = 0$, and the Particle Swarm Optimization (PSO) method which was $K_p = 0.9$, $K_i = 2.4$, $K_d = 0.05$. From the results of test simulations at varying load disturbances, the PID control system combined with adaptive control shows better performance results with a stable BLDC motor speed, according to the desired reference speed, and based on the test results of the adaptive PID control system at constant loads can produce varying speeds.

Keywords: Motor *Brushless* DC, Inverter, PID, Adaptive PID

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
PENGAJUAN TESIS.....	ii
PERSETUJUAN TESIS.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GABAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiii
DAFTAR ISTILAH, SINGKATAN, DAN SIMBOL.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Manfaat Penelitian.....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	3
2.1 Penelitian Terkait.....	3
2.2 Motor <i>Brushless</i> DC (BLDC).....	5
2.3 Inverter.....	7
2.4 Hall Sensor.....	9
2.5 Switching Control.....	9
2.6 Proportional Integral Derivative (PID).....	11
2.7 Kendali Adaptif.....	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	14
3.1 Gambaran Umum.....	14
3.2 Spesifikasi Motor BLDC.....	16

3.3	Pemodelan Sistem.....	16
3.4	Sistem Penggerak Motor BLDC.....	17
3.4.1	Motor BLDC.....	18
3.4.2	Inverter.....	21
3.4.3	Hall Sensor.....	22
3.4.4	<i>Switching Control</i>	22
3.4.5	PWM Generator.....	23
3.4.6	<i>Commutation Logic</i>	23
3.5	Kendali PID.....	23
3.6	Kendali Adaptif.....	24
3.7	Pencarian Nilai PID.....	25
3.7.1	Metode <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO).....	26
3.8	Skenario Sistem Pengujian.....	27
3.8.1	Pengujian dengan Gangguan Beban.....	27
3.8.2	Pengujian Variasi Kecepatan.....	27
BAB IV	HASIL SIMULASI DAN PEMBAHASAN.....	28
4.1	Hasil Pencarian Nilai PID Menggunakan Metode <i>Trial and Error</i>	28
4.2	Hasil Pengujian dengan Gangguan.....	28
4.2.1	Pengujian dengan Gangguan Beban pada Kecepatan 500 RPM.....	28
4.2.2	Pengujian dengan Gangguan Beban pada Kecepatan 750 RPM.....	31
4.2.3	Pengujian dengan Gangguan Beban pada Kecepatan 1000 RPM.....	33
4.2.4	Pengujian dengan Gangguan Beban pada Kecepatan 1500 RPM.....	36
4.2.5	Pengujian dengan Gangguan Beban pada Kecepatan 2000 RPM.....	38
4.2.6	Pengujian Dengan Gangguan Beban pada Kecepatan 3000 RPM.....	41
4.3	Hasil Pengujian Variasi Kecepatan.....	44
4.3.1	Hasil Pengujian Variasi Kecepatan 500 RPM.....	44
4.3.2	Hasil Pengujian Variasi Kecepatan 750 RPM.....	46
4.3.3	Hasil Pengujian Variasi Kecepatan 1000 RPM.....	49
4.3.4	Hasil Pengujian Variasi Kecepatan 1500 RPM.....	51
4.3.5	Hasil Pengujian Variasi Kecepatan 2000 RPM.....	54
4.3.6	Hasil Pengujian Variasi Kecepatan 3000 RPM.....	56

4.3.7 Hasil Pengujian Variasi Kecepatan dengan Beban Variasi.....	59
4.4 Hasil Pencarian Nilai PID menggunakan Metode PSO.....	62
4.5 Hasil Pengujian dengan Gangguan.....	62
4.5.1 Pengujian dengan Gangguan Beban pada Kecepatan 500 RPM.....	62
4.5.2 Pengujian dengan Gangguan Beban pada Kecepatan 750 RPM.....	65
4.5.3 Pengujian dengan Gangguan Beban pada Kecepatan 1000 RPM.....	67
4.5.4 Pengujian dengan Gangguan Beban pada Kecepatan 1500 RPM.....	70
4.5.5 Pengujian dengan Gangguan Beban pada Kecepatan 2000 RPM.....	72
4.5.6 Pengujian dengan Gangguan Beban pada Kecepatan 3000 RPM.....	75
4.6 Hasil Pengujian Variasi Kecepatan.....	78
4.6.1 Hasil Pengujian Variasi Kecepatan 500 RPM.....	78
4.6.2 Hasil Pengujian Variasi Kecepatan 750 RPM.....	80
4.6.3 Hasil Pengujian Variasi Kecepatan 1000 RPM.....	83
4.6.4 Hasil Pengujian Variasi Kecepatan 1500 RPM.....	85
4.6.5 Hasil Pengujian Variasi Kecepatan 2000 RPM.....	88
4.6.6 Hasil Pengujian Variasi Kecepatan 3000 RPM.....	90
4.6.7 Hasil Pengujian Variasi Kecepatan dengan Beban Variasi.....	93
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	96
5.1 Kesimpulan.....	96
5.2 Saran.....	96

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 <i>Outer</i> rotor dan <i>inner</i> rotor.....	6
Gambar 2.2 Inverter 3 fasa.....	7
Gambar 2.3 Bentuk gelombang kotak yang dihasilkan oleh trapezoid control.....	8
Gambar 2.4 Posisi komutasi sensor hall efek pada motor dan rotasi motor.....	8
Gambar 2.5 Bagian kiri merupakan metode switching bipolar dan bagian kanan merupakan metode switching unipolar.....	9
Gambar 2.6 Pulsa PWM berdasarkan <i>duty cycle</i>	11
Gambar 2.7 Diagram sistem kontrol PID.....	12
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> penelitian.....	15
Gambar 3.2 Model sistem kendali motor BLDC.....	16
Gambar 3.3 Blok diagram penggerak sistem <i>brushless</i> DC.....	17
Gambar 3.4 Model blok motor BLDC.....	18
Gambar 3.5 Model blok <i>electrical</i>	19
Gambar 3.6 Model blok <i>back EMF</i>	20
Gambar 3.7 Model blok <i>mechanical</i>	21
Gambar 3.8 Model blok inverter.....	22
Gambar 3.9 Model blok hall sensor.....	22
Gambar 3.10 Model blok <i>switching control</i>	23
Gambar 3.11 Model blok PWM generator.....	23
Gambar 3.12 Model blok <i>commutation logic</i>	23
Gambar 3.13 Model blok PID <i>controller</i>	24
Gambar 3.14 Model blok kendali PID adaptif.....	25
Gambar 4.1 Hasil simulasi pengujian gangguan.....	28
Gambar 4.2 Hasil simulasi pengujian gangguan pada kecepatan 500 RPM.....	29
Gambar 4.3 Hasil simulasi tegangan.....	29
Gambar 4.4 Hasil simulasi arus.....	30
Gambar 4.5 Hasil simulasi pengujian gangguan.....	31
Gambar 4.6 Hasil simulasi pengujian gangguan pada kecepatan 750 RPM.....	31
Gambar 4.7 Hasil simulasi tegangan.....	32

Gambar 4.8 Hasil simulasi arus.....	32
Gambar 4.9 Hasil simulasi pengujian gangguan.....	33
Gambar 4.10 Hasil simulasi pengujian gangguan pada kecepatan 1000 RPM....	34
Gambar 4.11 Hasil simulasi tegangan.....	34
Gambar 4.12 Hasil simulasi arus.....	35
Gambar 4.13 Hasil simulasi pengujian gangguan.....	36
Gambar 4.14 Hasil simulasi pengujian gangguan pada kecepatan 1500 RPM....	36
Gambar 4.15 Hasil simulasi tegangan.....	37
Gambar 4.16 Hasil simulasi arus.....	37
Gambar 4.17 Hasil simulasi pengujian gangguan.....	38
Gambar 4.18 Hasil simulasi pengujian gangguan pada kecepatan 2000 RPM...39	
Gambar 4.19 Hasil simulasi tegangan.....	39
Gambar 4.20 Hasil simulasi arus.....	40
Gambar 4.21 Hasil simulasi pengujian gangguan.....	41
Gambar 4.22 Hasil simulasi pengujian gangguan pada kecepatan 3000 RPM....	41
Gambar 4.23 Hasil simulasi tegangan.....	42
Gambar 4.24 Hasil simulasi arus.....	42
Gambar 4.25 Hasil simulasi variasi kecepatan.....	44
Gambar 4.26 Hasil simulasi kecepatan 500 RPM.....	44
Gambar 4.27 Hasil simulasi tegangan.....	45
Gambar 4.28 Hasil simulasi arus.....	45
Gambar 4.29 Hasil simulasi variasi kecepatan.....	46
Gambar 4.30 Hasil simulasi kecepatan 750 RPM.....	47
Gambar 4.31 Hasil simulasi tegangan.....	47
Gambar 4.32 Hasil simulasi arus.....	48
Gambar 4.33 Hasil simulasi variasi kecepatan.....	49
Gambar 4.34 Hasil simulasi kecepatan 1500 RPM.....	49
Gambar 4.35 Hasil simulasi tegangan.....	50
Gambar 4.36 Hasil simulasi arus.....	50
Gambar 4.37 Hasil simulasi variasi kecepatan.....	51
Gambar 4.38 Hasil simulasi kecepatan 1500 RPM.....	52

Gambar 4.39 Hasil simulasi tegangan.....	52
Gambar 4.40 Hasil simulasi arus.....	53
Gambar 4.41 Hasil simulasi variasi kecepatan.....	54
Gambar 4.42 Hasil simulasi kecepatan 2000 RPM.....	54
Gambar 4.43 Hasil simulasi tegangan.....	55
Gambar 4.44 Hasil simulasi arus.....	55
Gambar 4.45 Hasil simulasi variasi kecepatan.....	56
Gambar 4.46 Hasil simulasi kecepatan 3000 RPM.....	57
Gambar 4.47 Hasil simulasi tegangan.....	57
Gambar 4.48 Hasil simulasi arus.....	58
Gambar 4.49 Hasil simulasi variasi kecepatan dengan beban.....	59
Gambar 4.50 Hasil simulasi variasi kecepatan.....	59
Gambar 4.51 Hasil simulasi tegangan.....	60
Gambar 4.52 Hasil simulasi arus.....	60
Gambar 4.53 Hasil simulasi pengujian gangguan.....	62
Gambar 4.54 Hasil simulasi pengujian gangguan pada kecepatan 500 RPM....	63
Gambar 4.55 Hasil simulasi tegangan.....	63
Gambar 4.56 Hasil simulasi arus.....	64
Gambar 4.57 Hasil simulasi pengujian gangguan.....	65
Gambar 4.58 Hasil simulasi pengujian gangguan pada kecepatan 750 RPM.....	65
Gambar 4.59 Hasil simulasi tegangan.....	66
Gambar 4.60 Hasil simulasi arus.....	66
Gambar 4.61 Hasil simulasi pengujian gangguan.....	67
Gambar 4.62 Hasil simulasi pengujian gangguan pada kecepatan 1000 RPM....	68
Gambar 4.63 Hasil simulasi tegangan.....	68
Gambar 4.64 Hasil simulasi arus.....	69
Gambar 4.65 Hasil simulasi pengujian gangguan.....	70
Gambar 4.66 Hasil simulasi pengujian gangguan pada kecepatan 1500 RPM....	70
Gambar 4.67 Hasil simulasi tegangan.....	71
Gambar 4.68 Hasil simulasi arus.....	71
Gambar 4.69 Hasil simulasi pengujian gangguan.....	72

Gambar 4.70	Hasil simulasi pengujian gangguan pada kecepatan 2000 RPM....	73
Gambar 4.71	Hasil simulasi tegangan.....	73
Gambar 4.72	Hasil simulasi arus.....	74
Gambar 4.73	Hasil simulasi pengujian gangguan.....	75
Gambar 4.74	Hasil simulasi pengujian gangguan pada kecepatan 3000 RPM....	75
Gambar 4.75	Hasil simulasi tegangan.....	76
Gambar 4.76	Hasil simulasi arus.....	76
Gambar 4.77	Hasil simulasi variasi kecepatan.....	78
Gambar 4.78	Hasil simulasi kecepatan 500 RPM.....	78
Gambar 4.79	Hasil simulasi tegangan.....	79
Gambar 4.80	Hasil simulasi arus.....	79
Gambar 4.81	Hasil simulasi variasi kecepatan.....	80
Gambar 4.82	Hasil simulasi kecepatan 750 RPM.....	81
Gambar 4.83	Hasil simulasi tegangan.....	81
Gambar 4.84	Hasil simulasi arus.....	82
Gambar 4.85	Hasil simulasi variasi kecepatan.....	83
Gambar 4.86	Hasil simulasi kecepatan 1000 RPM.....	83
Gambar 4.87	Hasil simulasi tegangan.....	84
Gambar 4.88	Hasil simulasi arus.....	84
Gambar 4.89	Hasil simulasi variasi kecepatan.....	85
Gambar 4.90	Hasil simulasi kecepatan 1500 RPM.....	86
Gambar 4.91	Hasil simulasi tegangan.....	86
Gambar 4.92	Hasil simulasi arus.....	87
Gambar 4.93	Hasil simulasi variasi kecepatan.....	88
Gambar 4.94	Hasil simulasi kecepatan 2000 RPM.....	88
Gambar 4.95	Hasil simulasi tegangan.....	89
Gambar 4.96	Hasil simulasi arus.....	89
Gambar 4.97	Hasil simulasi variasi kecepatan.....	90
Gambar 4.98	Hasil simulasi kecepatan 2000 RPM.....	91
Gambar 4.99	Hasil simulasi tegangan.....	91
Gambar 4.100	Hasil simulasi arus.....	92

Gambar 4.101 Hasil simulasi variasi kecepatan dengan beban.....	93
Gambar 4.102 Hasil simulasi variasi kecepatan.....	93
Gambar 4.103 Hasil simulasi tegangan.....	94
Gambar 4.104 Hasil simulasi arus.....	94

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 <i>State of the art</i>	4
Tabel 3.1 Spesifikasi motor BLDC (<i>trial and error</i>).....	16
Tabel 3.2 Spesifikasi motor BLDC (PSO).....	16
Tabel 4.1 Hasil simulasi pengujian dengan gangguan beban (<i>trial and error</i>)....	43
Tabel 4.2 Perbandingan hasil simulasi variasi kecepatan	61
Tabel 4.3 Hasil simulasi pengujian dengan gangguan beban (PSO).....	77
Tabel 4.4 Hasil simulasi pengujian variasi kecepatan.....	95

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Pencarian Nilai KP.....	101
Lampiran 2. Pencarian Nilai Ki.....	102
Lampiran 3. Pencarian Nilai Kd.....	103
Lampiran 4. Hasil Pencarian Menggunakan Metode PSO.....	104
Lampiran 5. Hasil Perbandingan Kecepatan <i>Trial and Error</i>	105
Lampiran 6. Hasil Simulasi paper terkait (Performace Improvement in BLDC Motor Drive Using Self-Tuning PID Controller).....	106
Lampiran 7. Hasil simulasi paper terkait (Particle Swarm Optimization-Based BLDC Motor Speed Controller with Response Speed Consideration).....	106
Lampiran 8. Hasil Simulasi Pengujian Variasi Kecepatan.....	107
Lampiran 9. Paper Penelitian.....	108
Lampiran 10. Coding PSO.....	116
Lampiran 11. Coding <i>Trial and Error</i>	118

DAFTAR ISTILAH, SINGKATAN DAN SIMBOL

Istilah/Singkatan/Symbol	Arti/Penjelasan
BLDC	= <i>Brushless Direct Current</i>
PWM	= <i>Pulse Width Modulation</i>
MOSFET	= <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
PID	= <i>Proportional Integral Derivative</i>
PSO	= <i>Particle Swarm Optimization</i>
Kp	= Nilai <i>Proportional</i>
Ki	= Nilai <i>Integral</i>
Kd	= Nilai <i>Derivative</i>
DC	= <i>Direct Current</i>
V	= <i>Volt</i>
A/mA	= <i>Ampere/ mili Ampere</i>
$E_{au}(t), E_{av}(t), E_{aw}(t)$	= Tegangan <i>Input</i> Jangkar (V)
$E_{bu}(t), E_{bv}(t), E_{bw}(t)$	= Tegangan <i>Back emf</i> (V)
$i_{au}(t), i_{av}(t), i_{aw}(t)$	= Arus Jangkar (A)
R_a	= Resistansi Jangkar (Ω)
L_a	= Induktansi Jangkar (Ω)
K_b	= Konstanta generator (V_s / rad)
$\omega_m(t)$	= Kecepatan putaran motor (rad/s)
θ_e	= Sudut elektrik motor
$E_{bu}(t), E_{bv}(t), \text{ dan } E_{bw}(t)$	= Tegangan <i>back emf</i> (V)
$f_u(\theta_e), f_v(\theta_e), \text{ dan } f_w(\theta_e)$	= Fungsi sudut rotor terhadap fasa
T(t)	= Total torsi (Nm)
K_m	= Konstanta motor (Nm/A)
J	= Momen inersia motor (Nms^2/rad)
B	= Beban motor (Nms/rad)
P	= Jumlah pasang kutub
θ_e	= Sudut elektrik rotor
θ_m	= Sudut mekanik rotor

$\omega_m(t)$ = Kecepatan putaran motor (rad/s)
 $T_{eu}(t), T_{ev}(t),$ dan $T_{ew}(t)$ = Torsi pada masing-masing fasa (Nm)
 $f_u(\theta_e), f_v(\theta_e),$ dan $f_w(\theta_e)$ = Fungsi sudut rotor terhadap fasa

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada beberapa tahun terakhir ini, bahan bakar minyak (BBM) mulai mengalami kelangkaan dengan ketersediaan sumber daya alam yang semakin menipis dan polusi udara yang dihasilkan dari pembakaran semakin mengkhawatirkan, maka kendaraan yang menggunakan BBM harus segera dialihkan dengan menggunakan *Electric Vehicle*, hal ini dapat menjawab permasalahan tersebut dan lingkungan yang tercemar dengan mengurangi emisi pada kendaraan.

Motor listrik yang bisa dipakai untuk kendaraan listrik adalah jenis *Brushless Direct Current* (BLDC), motor ini mempunyai karakteristik yang handal, efisien, kinerja yang baik dan torsi yang besar dengan biaya perawatan yang relatif rendah, sehingga menjadi pilihan pada bidang otomotif, otomasi industri, penerbangan, dan pertambangan.

Untuk menghasilkan kinerja yang baik pada kendaraan, maka motor BLDC diperlukan suatu sistem kendali yang dapat mengendalikan kecepatan, akselerasi yang cepat (*respon time*) dan torsi yang kuat terutama pada beban yang bervariasi, yang disebabkan oleh keadaan jalan yang tidak rata. Salah satu sistem kontrol yang dapat diprogram untuk menghasilkan *respon time* yang cepat, mengurangi *overshoot* dan meredam riak yang terjadi pada motor BLDC adalah pengendali Proporsional Integral Derivatif (PID) (Suganthi, 2017), dan untuk menangani beban atau parameter yang bervariasi maka akan dipadukan dengan kendali adaptif.

Sistem kendali PID yang dipadukan dengan sistem kendali adaptif akan menghasilkan kecepatan yang stabil, torsi yang kuat, *respon time*/akselerasi yang cepat dan bisa mengurangi *overshoot* seperti yang diinginkan. Pada penelitian ini dilakukan riset tentang peningkatan kinerja sistem kendali motor BLDC menggunakan metode kendali sistem adaptif yang dikombinasikan dengan kendali PID. Sistem yang diuji hanya pada level simulasi menggunakan Matlab/Simulink.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut maka dapat dirumuskan permasalahan sebagai berikut:

1. Apakah kendali PID pada kondisi tertentu tidak mampu menangani kecepatan referensi dan torsi beban yang bervariasi?
2. Apakah kendali PID dan adaptif dapat mengontrol kecepatan dan torsi yang kuat pada beban yang bervariasi?
3. Bagaimana kendali PID adaptif dapat menghasilkan kecepatan yang bervariasi pada beban konstan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menghasilkan model sistem kendali PID yang dikombinasikan dengan sistem kendali adaptif untuk mengendalikan motor BLDC dengan beban yang bervariasi.
2. Mengetahui pengaruh pengendali PID adaptif pada sistem kendali kecepatan motor BLDC.

1.4 Batasan Masalah

Dalam penelitian ini, pemodelan yang akan dibuat dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. Penelitian ini berfokus pada pengembangan model simulasi.
2. Sistem yang diuji hanya pada level simulasi menggunakan *Matlab/Simulink*.
3. Obyek penelitian hanya pada motor BLDC 3 fasa.
4. Pencarian nilai K_p , K_i , dan K_d terbaik disimulasikan dengan gangguan beban dengan kecepatan konstan.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini dapat dijadikan sebagai model acuan dalam implementasi pengendali kecepatan motor BLDC dan sebagai referensi ilmiah pada bidang perancangan sistem kendali dan pengembangan teknologi pengendalian kecepatan motor BLDC.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terkait

Untuk kajian penelitian terkait dengan peningkatan kinerja sistem kendali motor BLDC menggunakan kendali *adaptive* PID yang ditemukan oleh peneliti adalah sebagai berikut: mengontrol kecepatan motor BLDC menggunakan kendali *adaptive* PID. Pada penelitian ini menerapkan kontroler PID *adaptive* tergantung dari *feedback* dari sistem kontrol untuk memahami *non-linear*, variasi parameter, dan beban yang terjadi dalam penggerak motor BLDC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa menggunakan pengontrol *adaptive* PID tergantung dari *feedback* dari sinyal kontrol yang cocok untuk mengurangi dampak perubahan parameter (M. Mahmud, 2020.).

Pengaturan kecepatan motor BLDC dengan *vector control*. Motor BLDC bisa disebut juga dengan PMSM (*Permanent Magnet Synchronous Motor*) merupakan motor *synchronous* AC 3 fasa. Perbedaan motor BLDC dengan motor PMSM adalah pada BEMF nya, motor BLDC memiliki BMEF berbentuk *trapezoid* sedangkan motor PMSM memiliki bentuk sinusoidal. Kontrol PI digunakan untuk menjaga komponen arus yang diukur pada nilai referensi. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, dengan set *point* 1000 rpm, diperoleh nilai *rise time* 21,937 ms, *overshoot* 0,85 %, *settling time* 15,4 tanpa beban dan diperoleh nilai *rise time* 21,94 ms, *overshoot* 0,847 %, *settling time* 15,386 berbeban (Singgih Agustian, 2021).

Peningkatan kinerja pada motor BLDC menggunakan *Self-Tuning* PID kontroler. Pada penelitian ini menggunakan kontrol PI dan PID yang mengontrol kecepatan motor BLDC secara konvensional untuk mendapatkan kinerja yang optimal. Dan penelitian ini juga menggunakan PID *self-tuning* untuk mengontrol kecepatan motor BLDC dan akan dibandingkan dengan metode PID konvensional untuk membuktikan bahwa *self-tuning* mendapatkan kinerja yang lebih baik dari PID konvensional (Kiran Gadeka, 2020).

Kontrol motor BLDC menggunakan kontrol *Zeta Converter*. penelitian ini bertujuan untuk mengurangi ukuran dan biaya motor BLDC dengan kualitas daya yang yang dapat meningkatkan keandalannya. Konverter zeta digunakan untuk kontrol kecepatan motor tanpa sensor. Konverter zeta telah menggunakan konverter

DC-DC orde empat yang dibuat dengan dua induktor dan dua kapasitor dan berfungsi dalam dua mode yaitu mode *step-up* atau *step-down* (S. Archary, 2020).

Peningkatan kinerja pengontrol kecepatan motor BLDC menggunakan kontroler PID *fuzzy*. penelitian ini membahas tentang masalah yang ingin diatasi yaitu *overshoot starting*, untuk mengatasi adanya *overshot starting* menggunakan teknik *fuzzy PID self-tuning*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua teknik mampu mengontrol kecepatan motor yang efektif (Muthulaksmi, 2016).

Penelitian ini merupakan tindak lanjut dari penelitian sebelumnya terkait motor BLDC Pada Tabel 1 memperlihatkan *State-of-the-art* mengenai kinerja sistem motor BLDC.

Tabel 1 *State of the art*

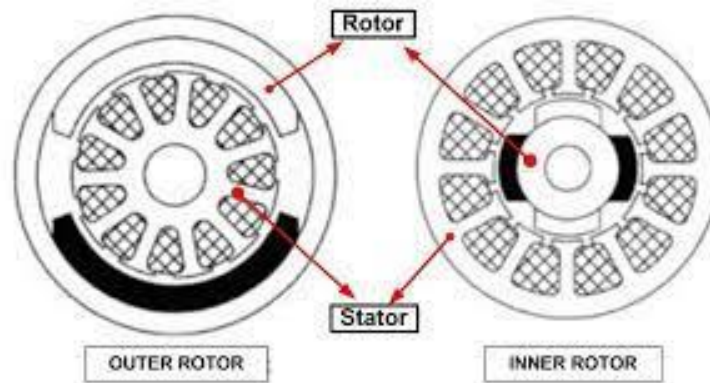
No	Judul	Metode	Hasil
1	<i>Reduction of Torque Ripple and Increase of Torque Capacity of BLDC Motor</i>	Menggunakan Matlab/Simulink, melakukan perbandingan antara model 3, 5, 7 fasa.	Dengan meningkatkan jumlah fasa motor BLDC motor torsi <i>startup</i> akan meningkat, efisiensi motor akan meningkat sedikit dan riak torsi akan berkurang.
2	<i>Performance Enhancement of Permanent magnet Brushless Dc Motor Using Multilevel Inverter</i>	Inverter multilevel, five level Cascaded H-bridge	Kinerja motor BLDC Meningkat secara signifikan.
3	<i>Soft Starting & Performance Evaluation of PI Speed Controller for Brushless DC Motor Using Three Phase Six Step Inverter</i>	<i>PI controller, dan Six step Inverter</i>	<i>soft starting</i> yaitu disetel dengan membandingkan sinyal step type 2 dengan sinyal saw toot dapat mengurangi <i>overshoot motor starter</i> BLDC saat ini.
4	<i>Control of BLDC Motor Based on Adaptive Fuzzy Logic PID Controller</i>	PID Fuzzy dan DTC	Mengurangi arus awal, menghilangkan overshoot dalam respon torsi dan kecepatan.
5	<i>Improvement of Speed Control Performance in BLDC Motor Using Fuzzy PID Controller</i>	<i>Fuzzy PID Controller- PID Self Tuning</i>	Memberikan kinerja yang lebih baik daripada pengontrol konvensional
6	<i>Peningkatan Kinerja Sistem Kendali Motor Brushless menggunakan kendali PID adaptif</i>	Kombinasi PID adaptif, pencarian nilai PID menggunakan PSO	Menghasilkan kecepatan yang stabil torsi yang kuat, dan bisa mengurangi <i>overshoot</i> .

2.2 Motor *Brushless* DC (BLDC)

Motor listrik BLDC merupakan salah satu jenis motor sinkron magnet permanen yang memiliki banyak keunggulan dibandingkan dengan motor arus searah (DC) dan motor induksi seperti suara halus, torsi besar, dan efisiensi tinggi (Anshory, 2019). Motor BLDC banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, hal tersebut dikarenakan motor BLDC memiliki kinerja yang baik dan torsi yang besar, serta keandalan dan efisiensi yang tinggi, dalam sebuah studi dinyatakan bahwa motor BLDC memiliki efisiensi yang paling tinggi dibandingkan dengan jenis motor lainnya (Yildirim, 2014).

Pada dasarnya konstruksi motor BLDC hampir sama dengan konstruksi motor DC biasa atau konvensional. Seperti halnya memiliki stator bagian yang diam atau rotor bagian yang berputar dan sistem komutasi. Perbedaan yang paling mencolok antara konstruksi motor BLDC dan konstruksi motor DC konvensional yaitu terletak pada sistem komutasinya. Pada motor DC konvensional menggunakan sikat karbon, maka pada motor BLDC berkomutasi secara elektronik menggunakan sensor yang sering disebut dengan hall sensor.

Ada tiga komponen inti membangun motor BLDC yaitu, rotor berupa magnet permanen, stator elektromagnetik berbentuk belitan, serta rangkaian kontrol berupa rangkaian elektronik dengan sensor sebagai elektronis komutasi sebagai pengganti brush atau sikat. Rotor adalah bagian motor yang berputar pada suatu motor karena adanya gaya elektromagnetik dari stator. Rotor pada motor BLDC terdiri dari 2 buah sampai 8 pasang magnet permanen berbentuk persegi panjang yang saling didekatkan dengan tanpa sikat. Ada dua macam desain rotor pada motor BLDC yaitu *inner* rotor dan *outer* rotor. Pada *outer* rotor, belitan berada pada inti motor sedangkan magnet permanen dipasang di sisi luar mengelilingi stator. Biasanya *outer* rotor bekerja pada arus yang kecil. *Inner* rotor menempatkan rotor didalam inti motor dan dikelilingi belitan stator. *Inner* rotor menghasilkan inersia motor yang rendah dan paling sering dipakai pada kebanyakan motor BLDC.



Gambar 2.1 Outer rotor dan inner rotor (repository.unika.ac.id)

Stator pada motor BLDC terdiri dari tiga atau lebih belitan yang bekerja secara elektromagnetik serta dihubungkan dengan tiga buah kabel untuk disambungkan pada rangkaian kontrol. Semakin banyak jumlah sebuah belitan maka semakin kecil riak torsi stator serta semakin halus putarannya. Motor sinkron, secara umum dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori berdasarkan bentuk gelombang *back electro-motive force* (BEMF). Satu berbentuk sinusoidal, yang dikenal dengan *Brushless Alternating Current* (BLAC) motor dan yang satu berbentuk trapezoidal, yaitu *Brushless Direct Current* (BLDC) motor. Selain menggunakan hall sensor, sebagai pendeteksi posisi rotor motor BLDC dapat menggunakan deteksi tegangan BEMF-nya (Somanatham et., al, 2006).

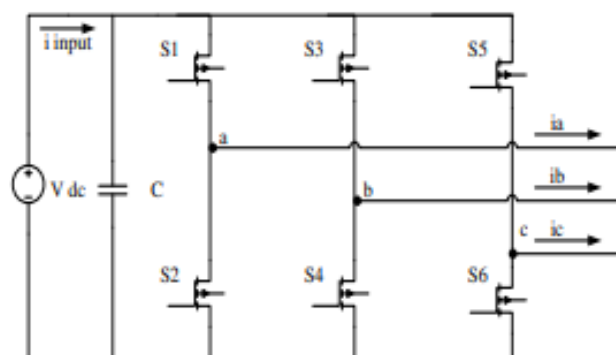
Sistem kerja motor BLDC hampir mirip dengan sistem kerja motor biasa, yang membedakan hanyalah sistem komutasi, dimana motor BLDC menggunakan sensor hall dan rangkaian elektronik kontrol sedangkan motor DC konvensional masih menggunakan *brush* atau sikat karbon sebagai komutasinya. Walaupun sumbernya DC namun gelombang yang dihasilkan berupa gelombang sinus dimana sensor hall berfungsi pula sebagai inverter. Untuk mengatur kecepatan menggunakan *pulse with modulation* (PWM). Belitan stator dililit sedemikian rupa hingga berpasangan.

Dengan menyuplai tegangan DC ke belitan, belitan akan terenergi dan menghasilkan gaya elektromagnet. Operasi dari motor BLDC didasarkan pada gaya interaksi sederhana antara permanen magnet dengan elektromagnet. Apabila belitan A diberi tegangan atau *dienergize* maka kutub yang berlawanan arah antara rotor dengan stator akan saling tarik menarik. Saat rotor berada pada belitan A, belitan B akan *terenergize*, saat rotor berada pada belitan B, belitan C akan *terenergize*.

Setelah itu belitan A akan *terenergize* dengan polaritas yang berlawanan. Proses ini akan terus berulang dan motor akan terus berjalan. Namun bila diperhatikan dengan seksama motor seperti ini memiliki sebuah kelemahan dimana hanya ada satu belitan yang akan *terenergize*, ini menyebabkan dua belitan lainnya mati dan mengurangi daya keluaran dari motor, hal tersebut dapat diatasi dengan memberi daya pada belitan dibelakang laju putar rotor dengan polaritas yang sama dengan magnet rotor. Ini akan menyebabkan adanya dorongan dari elektromagnet belitan dengan polaritas yang sama, disamping tetap adanya tarikan dari belitan yang akan dihampiri rotor karena polaritasnya, untuk itu perlu sebuah modifikasi pada belitan stator, dengan cara menghubungkan bersama belitan keluaran dari ketiga pasang belitan stator, hal tersebut akan menghasilkan pendayaan yang berbeda seperti pada gambar prinsip kerja motor BLDC.

2.3 Inverter

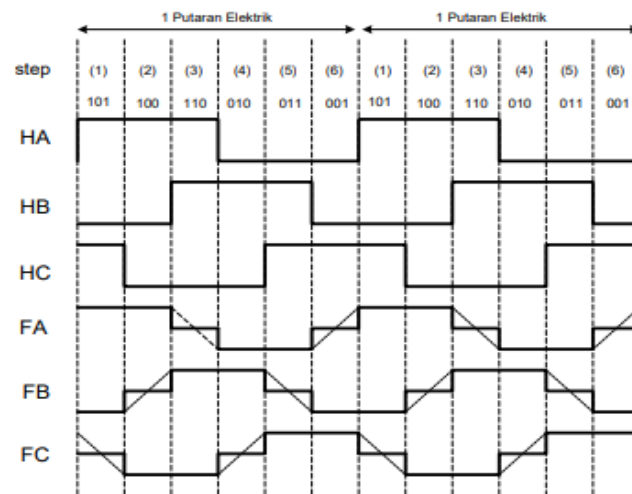
Inverter merupakan bagian terpenting pada motor BLDC karena berfungsi sebagai pengendali dan penggerak putaran pada motor. Inverter merupakan rangkaian elektronika daya yang digunakan untuk mengkonversikan atau mengubah tegangan searah (DC) ke tegangan bolak balik (AC) dan akan diubah lagi ke tegangan DC untuk mensuplai *driver*. Untuk penggunaan dalam penggerak motor AC dan *uninterruptible ac power supply* digunakan *switch-mode inverter* untuk menghasilkan sebuah keluaran tegangan bolak balik berupa sinusoidal yang besar dan frekuensinya dapat dikendalikan (M. Fajri, 2021).



Gambar 2.2 Inverter 3 fasa (Nanda R, 2016)

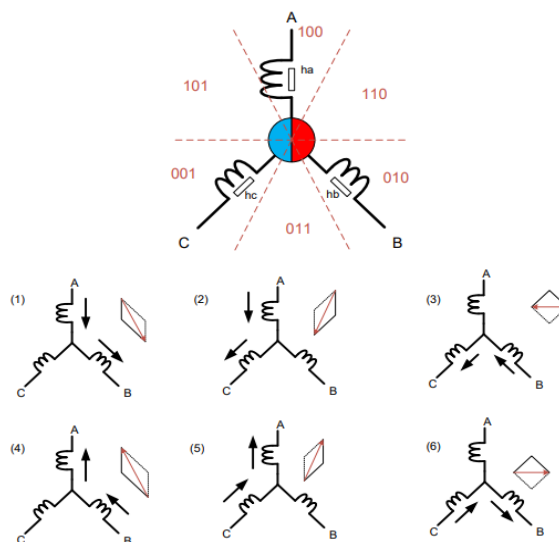
Trapezoid control atau blok komutasi juga dikenal sebagai *six-step control*, teknik komutasi enam langkah digunakan untuk mengontrol inverter tiga fasa/driver motor BLDC dalam enam rangkaian pensaklaran. Dalam teknik ini dua

fasa motor BLDC yang diberi *energize* pada setiap urutan pensaklaran sedangkan fasa lainnya tidak aktif. Pembalikan urutan *switching* mengubah arah putaran motor. Kecepatan motor berbanding lurus dengan lebar sinyal sensor hall (N. Hidayat, 2022)



Gambar 2.3 Bentuk gelombang kotak yang dihasilkan oleh trapezoid control (N. Hidayat, 2022)

Dari komutasi pada gambar diatas, berikut gambar yang menunjukkan putaran motor berdasarkan pola komutasinya.



Gambar 2.4 Posisi komutasi sensor hall efek pada motor dan rotasi motor berdasarkan komutasi hall sensor dan fasa pada gambar diatas (N. Hidayat, 2022)

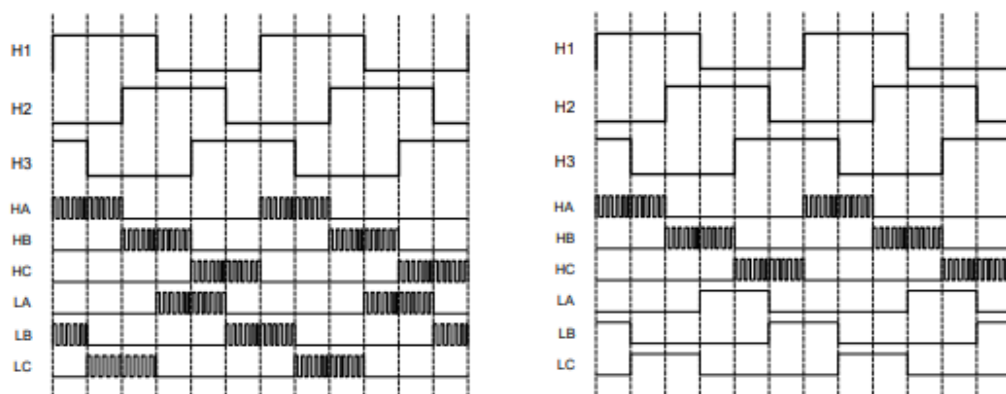
2.4 Hall Sensor

Hall sensor merupakan sensor yang berada pada motor BLDC yang berfungsi untuk memberikan *feedback* (umpan balik) pada rangkaian kontrol yang bersifat elektronik yang akan mengendalikan perubahan komutasi pada motor BLDC. hal tersebut dikarenakan motor BLDC bagian stator harus diberikan sinyal secara berurutan sesuai perubahan komutasi.

2.5 Switching Control

Kecepatan motor BLDC berbanding lurus dengan tegangan yang diberikan menuju stator. kecepatan dimana rotor dipaksa ke posisi berikutnya ditentukan oleh kekuatan gaya magnet, hal ini ditentukan oleh tegangan yang diberikan pada belitan stator. dengan besarnya tegangan yang diberikan pada stator dapat dengan mudah dikontrol, sehingga kecepatan motor dapat dikontrol.

Metode *switching* unipolar dan bipolar memiliki keunggulan spesifik. *Switching* secara unipolar mengurangi kebisingan elektromagnetik dan riak karena adanya *switching*. *Switching* bipolar lebih cocok untuk pendekatan tanpa sensor dimana perlu untuk merasakan gaya elektromagnetik balik (BEMF). Pendekatan bipolar memiliki titik voltase nol pada siklus kerja 50%, oleh karena itu ada lebih banyak waktu untuk melihat BEMF. Baik pendekatan unipolar dan bipolar dapat bersifat independen atau komplementer.

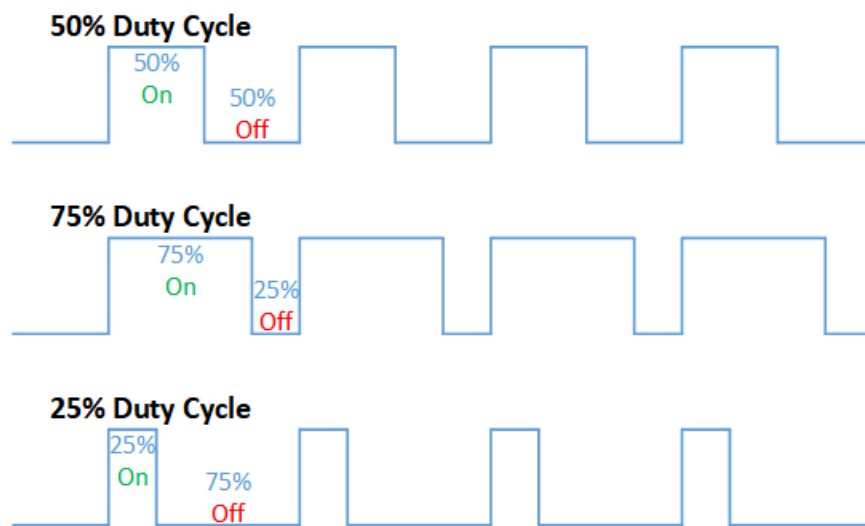


Gambar 2.5 Bagian kiri merupakan metode *switching* bipolar dan bagian kanan merupakan metode *switching* unipolar (N. Hidayat, 2022)

Pulse Width Modulation (PWM) atau Modulasi Lebar Pulsa adalah teknik modulasi yang dilakukan dengan memvariasikan lebar pulsa pada nilai frekuensi

dan amplitudo yang tetap untuk mendapatkan nilai tegangan rata-rata yang berbeda. PWM digunakan untuk menghasilkan tegangan output yang bervariasi dari 0 volt hingga tegangan maksimum dengan kenaikan tegangan yang linier, menambah atau mengurangi lebar pulsa. *Pulse Width Modulation* (PWM) merupakan salah satu teknik yang digunakan untuk mengendalikan daya (*power*) biasanya mengatur berapa besar tegangan yang akan digunakan dengan mengirim isyarat atau pulsa dalam bentuk sinyal. PWM pada biasanya digunakan untuk mengendalikan *duty cycle* pada sinyal yang akan digunakan (Suhendra *et al.*, 2018).

Sinyal PWM pada umumnya memiliki amplitudo dan frekuensi dasar yang tetap, namun memiliki lebar pulsa yang bervariasi. Lebar pulsa PWM berbanding lurus dengan amplitudo sinyal asli yang belum termodulasi. Artinya, sinyal PWM memiliki frekuensi gelombang yang tetap namun *duty cycle* bervariasi antara 0% hingga 100%. Satu siklus pulsa merupakan kondisi *high* kemudian berada di zona transisi ke kondisi *low*. *Duty cycle* merupakan representasi dari kondisi logika *high* dalam suatu periode sinyal dan dinyatakan dalam bentuk (%) dengan *range* 0% sampai 100%, sebagai contoh jika sinyal berada dalam kondisi *high* terus menerus artinya memiliki *duty cycle* sebesar 100%. Jika waktu sinyal keadaan *high* sama dengan keadaan *low* maka sinyal mempunyai *duty cycle* sebesar 50%. Perubahan *duty cycle* akan merubah tegangan keluaran atau tegangan rata-rata dari PWM (Syed *et al.*, 2004; Badarov and Manoey, 2017).



Gambar 2.6 Pulsa PWM berdasarkan *Duty Cycle* (Gadgetronicx Team, 2021)

Rumus untuk menghitung siklus kerja atau *duty cycle* dapat ditunjukkan seperti persamaan di bawah ini.

$$Duty\ Cycle = \frac{t_{on}}{(t_{on}+t_{off})} \quad (1)$$

Atau

$$Duty\ Cycle = \frac{t_{on}}{t_{total}} \quad (2)$$

Dimana:

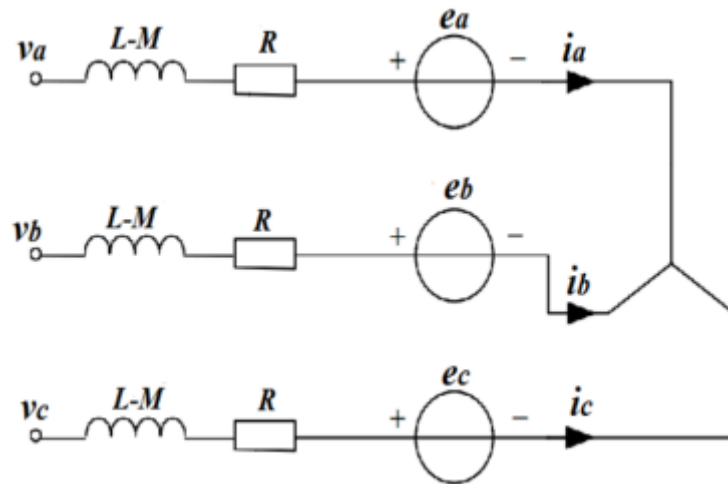
t_{on} = waktu *on* atau waktu dimana tegangan keluaran berada pada posisi tinggi (*high* atau 1)

t_{off} = waktu *off* atau waktu dimana tegangan keluaran berada pada posisi rendah (*low* atau 0)

t_{total} = waktu satu siklus atau penjumlahan antara t_{on} dengan t_{off} atau disebut juga dengan “periode satu gelombang”.

2.6 Model Matematis Motor BLDC

Model motor BLDC terdiri dari persamaan tegangan, persamaan torsi, dan persamaan gerak. Pada stator motor BLDC umumnya memiliki 3 belitan seperti motor induksi. Persamaan ini didasarkan bahwa stator memiliki lilitan yang terhubung Y, rotor bagian dalam merupakan tipe *non salient pole*, tiga *hall sensor* ditempatkan secara simetris dengan interval 120 derajat. Berikut gambar rangkaian ekuivalen dari motor BLDC (Ali. 2016).



Gambar 2.7 Rangkaian ekuivalen motor BLDC (Ali, 2016)

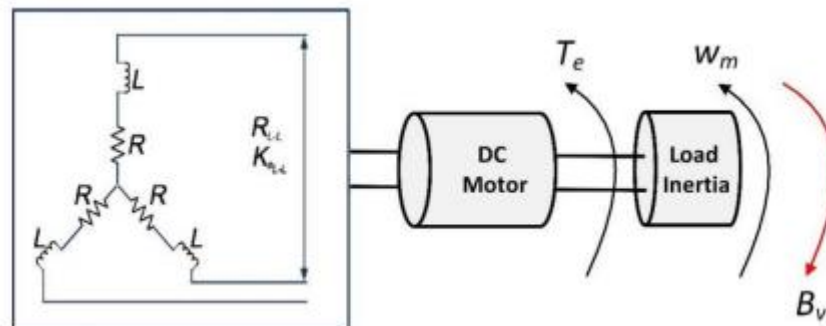
Hukum *Kirchoff* tegangan tiap fasa pada rangkaian kumparan jangkar motor BLDC diatas adalah:

$$v_{ab}(t) = R(i_a - i_b) + (L - M) \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + (e_a - e_b) \quad (3)$$

$$v_{bc}(t) = R(i_b - i_c) + (L - M) \frac{d}{dt}(i_b - i_c) + (e_b - e_c) \quad (4)$$

$$v_{ca}(t) = R(i_c - i_a) + (L - M) \frac{d}{dt}(i_c - i_a) + (e_c - e_a) \quad (5)$$

Torsi listrik dan mekanisme *back emf* motor BLDC sama dengan motor DC sikat, sehingga diperoleh gambar 2.8 sebagai berikut.



Gambar 2.8 Skematik motor BLDC (Ali, 2016)

Berdasarkan hukum newton, persamaan gerak rotasi pada motor BLDC adalah sebagai berikut.

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + B_v \omega_m + T_L \quad (6)$$

Dimana torsi listrik dan *back emf* dapat ditulis dengan:

$$e_a = \frac{K_e}{2} \omega_m F(\theta_e) \quad (7)$$

$$e_b = \frac{K_e}{2} \omega_m F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (8)$$

$$e_b = \frac{K_e}{2} \omega_m F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (9)$$

$$T_e = \frac{K_t}{2} \left[F(\theta_e) i_a + F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) i_c \right] \quad (10)$$

Dapat dilihat pada persamaan diatas *back emf* motor BLDC merupakan fungsi sudut rotor. Fungsi ini akan membentuk karakteristik *back emf* motor BLDC yang berbentuk *trapezoid*. Rumus dibawah ini merupakan fungsi sudut rotor motor BLDC.

$$F(\theta_e) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \theta_e \leq \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi} \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e \leq \pi \\ -1 & \pi \leq \theta_e \leq \frac{5\pi}{3} \end{cases} \quad (11)$$

Keterangan :

B_v : Koefisien gesek (Nms/rad)

K_e : Konstanta tegangan *back emf* (Vs/rad)

K_t : Konstanta torsi (Nm/A)

T_L : Torsi beban (Nm)

T_e : Torsi listrik (Nm)

e_a, e_b, e_c : Tegangan *back emf* fasa (V)

i_a, i_b, i_c : Arus fasa (A)

v_a, v_b, v_c : Tegangan *line to line* (V)

θ_e : Sudut elektrik rotor ($\theta_e = \frac{P}{2} \theta_m$)

θ_m : Sudut rotor

ω_m : Kecepatan putaran motor (rad/s)

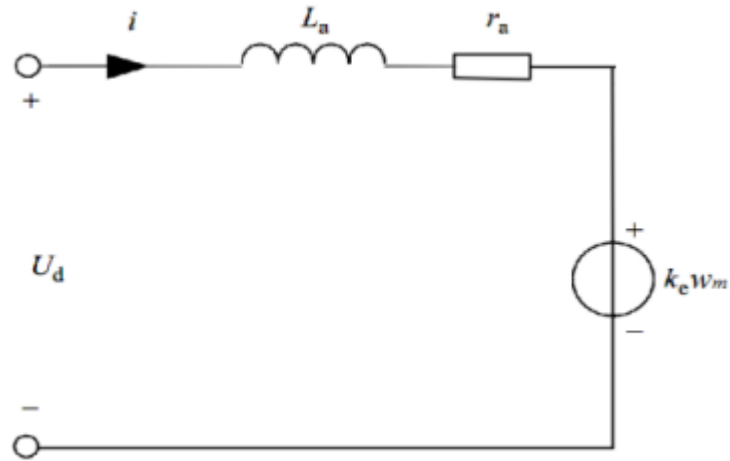
J : Momen Inersia

P : Jumlah pasang kutub

L : Induktansi fassa

R : Resistansi fasa

Berdasarkan gambar 2.7, apabila terdapat dua fasa yang tereksitasi, baik AB, BC, dan CA, maka rangkaian ekuivalen yang telah disederhanakan dapat dilihat pada gambar 2.9 (Xiang & Zhen, 2017).



Gambar 2.9 Rangkaian ekuivalen sederhana motor BLDC

$$i_a = -i_b = i \quad (12)$$

$$\frac{di_a}{dt} = -\frac{di_b}{dt} = \frac{di}{dt} \quad (13)$$

$$v_{ab} = 2Ri + 2(L - M) \frac{di}{dt} + (e_a - e_b) \quad (14)$$

$$v_{ab} = U_d = 2Ri + 2(L - M) \frac{di}{dt} + (e_a - e_b) \quad (15)$$

$$e_a = -e_b \quad (16)$$

$$v_{ab} = U_d = 2Ri + 2(L - M) \frac{di}{dt} + 2e_a \quad (17)$$

$$U_d = r_a i + L_a \frac{di}{dt} + K_e \omega_m \quad (18)$$

$$K_t i = J \frac{d\omega_m}{dt} + B_v \omega_m + T_L \quad (19)$$

$$i = \frac{J}{K_t} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B_v}{K_t} \omega_m + \frac{T_L}{K_t} \quad (20)$$

$$i = \frac{J}{K_t} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B_v}{K_t} \omega_m \quad (21)$$

Substitusi persamaan (21) pada persamaan (18)

$$U_d = r_a \left(\frac{J}{K_t} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B_v}{K_t} \omega_m \right) + L_a \frac{d}{dt} \left(\frac{J}{K_t} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{B_v}{K_t} \omega_m \right) + K_e \omega_m \quad (22)$$

$$U_d = \frac{L_a J}{K_t} \frac{d^2 \omega_m}{dt^2} + \frac{r_a J + L_a B_v}{K_t} \frac{d\omega_m}{dt} + \frac{r_a B_v + K_t K_e}{K_t} \omega_m \quad (23)$$

Keterangan :

U_d : Tegangan DC

r_a : Resistansi Jangkar

L_a : Induktansi Jangkar

i : Arus Jangkar

M : Mutual Induktansi

Fungsi transfer motor BLDC dapat diperoleh dengan melakukan Transformasi Laplace pada persamaan (23),

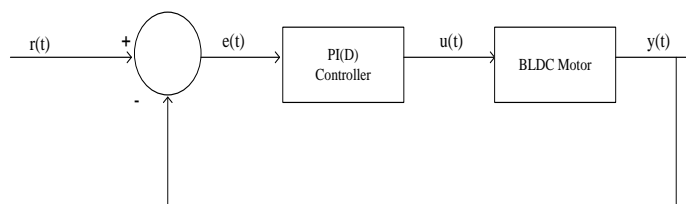
$$G_{uS} = \frac{\omega_m(s)}{U_d(s)} = \frac{K_t}{L_a J s^2 + (r_a J + L_a B_v) s + (r_a B_v + K_t K_e)} \quad (24)$$

2.7 Proportional Integral Derivative (PID)

Pengendali *Proportional Integral Derivative* atau biasa disebut PID merupakan kontroler mekanisme umpan balik yang biasa digunakan pada sistem kontrol industri dan sangat populer digunakan karena memiliki struktur yang sederhana, mampu bekerja dengan baik, dan mudah diimplementasikan, bahkan lebih dari 90% baik pada peralatan biasa maupun di industri masih menggunakan kontroler PID (Alim, 2021). Persamaan umum sistem kontrol PID ditunjukkan oleh persamaan (3).

$$u(t) = K_p * e(t) + K_i * \int e(t) dt + K_d * \frac{de(t)}{dt} \quad (25)$$

K_p adalah gain proporsional yang memberi pengaruh langsung pada *error* yaitu semakin besar *error* maka semakin besar sinyal kendali yang dihasilkan pengendali, K_i adalah konstanta waktu (*time constant*) integral dan K_d adalah konstanta waktu diferensial. Kontroler PID mempunyai banyak variasi bentuk diantaranya kontroler proporsional (P), proporsional-diferensial (PD) dan proporsional-integral-diferensial (PID).



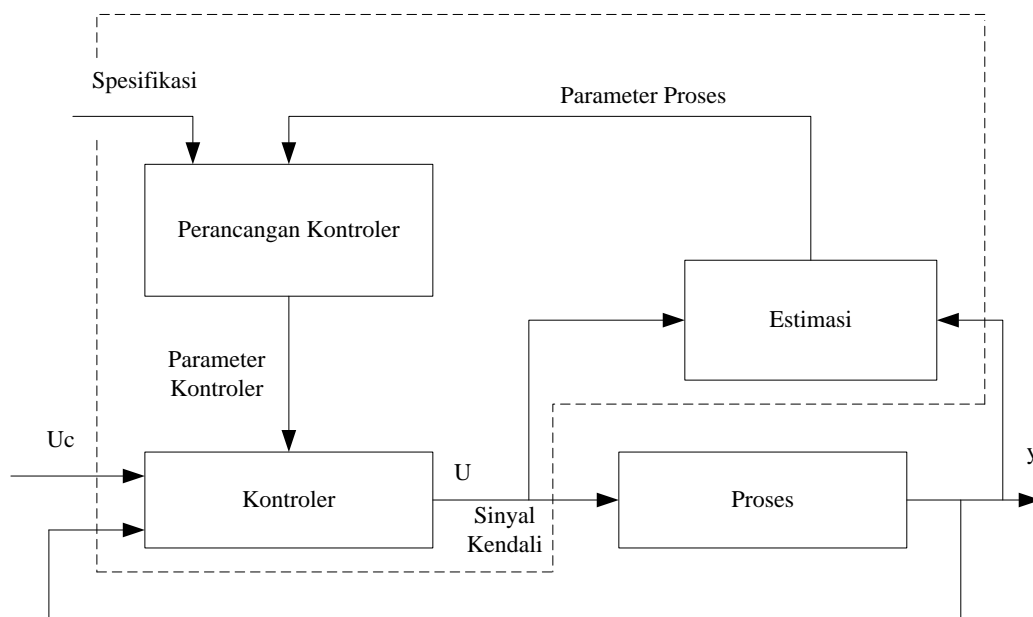
Gambar 2.10 Diagram sistem kontrol PID.

2.8 Kendali Adaptif

Istilah kendali adaptif digunakan untuk mendefinisikan kemampuan suatu pengendali untuk mengatur parameternya agar dapat menyesuaikan diri dengan dinamika dan statistika suatu proses sehingga perilaku proses dapat dikendalikan sesuai dengan yang diharapkan. Dengan kata lain, pengendali adaptif adalah pengendali yang dapat memodifikasi perilakunya sehingga mampu menanggapi

perubahan dinamika suatu proses dan karakteristik gangguan diluar lingkungan proses.

Secara pragmatis, pengendali adaptif adalah pengendali dengan parameter yang dapat diatur dilengkapi dengan sebuah mekanisme pengaturan parameter tersebut. Secara inheren, kendali adaptif adalah tipe kendali *non-linier*, karena adanya mekanisme pengaturan parameter tersebut. Oleh karena itu, sistem kendali adaptif ini banyak digunakan untuk mengendalikan sistem-sistem tak *linier* (F. Arya, 2016). Pada perancangan pengendali dengan parameter *plant* yang tidak diketahui, maka cukup beralasan untuk memilih parameter *plant* dari nilai estimasinya yang dihitung oleh unit estimator parameter.



Gambar 2.11 Diagram blok sistem kendali adaptif

Untuk setiap waktu sesaat k , estimator mengirim ke pengendali sehimpunan parameter proses yang dihitung berdasarkan pada data *input-output* proses yang melalui proses estimasi. Parameter pengendali kemudian dirancang berdasarkan parameter proses tadi beserta spesifikasi perancangan yang ditetapkan oleh *user*. Parameter pengendali kemudian disalin ke pengendali yang kemudian menghasilkan sinyal kendali. Sinyal kendali memberikan aturan kendali berdasarkan sinyal pengukuran *output* dan sinyal perintah acuan eksternal, serta sinyal kendali pada masa lampau. Proses ini terus berulang setiap saat, dimana pada saat tertentu, estimator telah berhasil mengidentifikasi proses dengan sangat baik.