



TESIS - TE142599

**KONTROL TORSI MOTOR DC BRUSHLESS
PENGGERAK HYBRID ELECTRIC VEHICLE
MENGUNAKAN PREDICTIVE DIRECT TORQUE
CONTROL**

WAHYU PRIBADI
2214202007

DOSEN PEMBIMBING
Dr.Ir.Mochammad Rameli
Ir.Rusdhianto Effendi Ak., MT

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM PENGATURAN
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



TESIS - TE142599

**KONTROL TORSI MOTOR DC BRUSHLESS
PENGGERAK HYBRID ELECTRIC VEHICLE
MENGUNAKAN PREDICTIVE DIRECT TORQUE
CONTROL**

WAHYU PRIBADI
2214202007

DOSEN PEMBIMBING
Dr.Ir.Mochammad Rameli
Ir.Rusdhianto Effendi Ak., MT

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM PENGATURAN
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Wahyu Pribadi
NRP. 2214202007

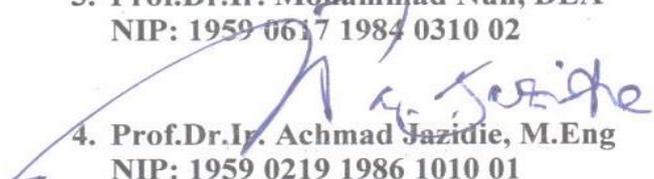
Tanggal Ujian : 5 Januari 2017
Periode Wisuda : Maret 2017

Disetujui oleh:


1. Dr. Ir. Mochammad Rameli (Pembimbing I)
NIP: 1954 1227 1981 0310 02


2. Ir. Rusdhianto Effendi A.K., MT (Pembimbing II)
NIP: 1957 0424 1985 0210 01


3. Prof. Dr. Ir. Mohammad Nuh, DEA (Penguji I)
NIP: 1959 0617 1984 0310 02


4. Prof. Dr. Ir. Achmad Jazidie, M. Eng (Penguji II)
NIP: 1959 0219 1986 1010 01


5. Dr. Trihastuti Agustinah, ST., MT (Penguji III)
NIP: 1968 0812 1994 0320 01

an, Direktur Program Pascasarjana
Asisten Direktur

Direktur Program Pascasarjana


Prof. Dr. Ir. Iri Widjaja, M. Eng.
NIP. 19611021/198603 1 001

Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc, Ph.D
NIP. 19601202 198701 1 001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul **“KONTROL TORSI MOTOR DC BRUSHLESS PENGGERAK HYBRID ELECTRIC VEHICLE MENGGUNAKAN PREDICTIVE DIRECT TORQUE CONTROL”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Januari 2017

Wahyu Pribadi
NRP.2214202007

Halaman ini sengaja dikosongkan

KONTROL TORSI MOTOR DC BRUSHLESS PENGGERAK HYBRID ELECTRIC VEHICLE MENGGUNAKAN PREDICTIVE DIRECT TORQUE CONTROL

Nama : Wahyu Pribadi
NRP : 2214202007
Dosen Pembimbing : Dr.Ir.Mochammad Rameli
Ir. Rusdhianto Effendi Ak., MT

ABSTRAK

Hybrid Electric Vehicle (HEV) merupakan kendaraan dengan dua sumber tenaga penggerak yaitu *Internal Combustion Engine* (ICE) sebagai penggerak primer dan *Brushless DC Motor* (BLDCM) sebagai penggerak sekunder. Permasalahan yang menjadi fokus penelitian adalah HEV memiliki respon *transient* kecepatan yang lambat.

BLDCM berperan untuk menyuplai torsi tambahan untuk mempercepat respon transient kecepatan. Penelitian ini mengembangkan metode *Direct Torque Control* (DTC) dengan tambahan mekanisme prediksi torsi yang disebut *Predictive Direct Torque Control* (PDTC) untuk pengaturan torsi BLDCM.

Hasil pengujian menunjukkan PDTC memiliki performansi yang lebih baik dibandingkan DTC, dimana nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) kecepatan *transient* PDTC lebih kecil dibandingkan dengan DTC. PDTC memiliki nilai RMSE=13,09 rpm sementara DTC memiliki RMSE=35,56 rpm. PDTC mampu meningkatkan performansi sebesar 2,72x lebih cepat dibanding DTC yang ditunjukkan dengan nilai RMSE.

Kata Kunci : *Hybrid Electric Vehicle, Internal Combustion Engine, Brushless DC Motor, Predictive Direct Torque Controller.*

Halaman ini sengaja dikosongkan.

BRUSHLESS DC MOTOR CONTROL STRATEGY FOR HYBRID ELECTRIC VEHICLE BY USING PREDICTIVE DIRECT TORQUE CONTROL

By : Wahyu Pribadi
Student Identity Number : 2214202007
Supervisor(s) : Dr.Ir.Mochammad Rameli
Ir. Rusdhianto Effendi Ak., MT

ABSTRACT

Hybrid Electric Vehicle (HEV) is a vehicle with two sources of propulsion consist of internal combustion engine (ICE) as the primary mover and brushless DC motor (BLDCM) as secondary mover. Slow transient velocity response is a problem that occurs in HEV.

BLDCM role is to supply additional torque for accelerating the transient speed response. This research developed a method of Direct Torque Control (DTC) with additional torque prediction mechanism called Predictive Direct Torque Control (PDTC) for controlling torque of BLDCM.

The test results showed transient response speed HEV PDTC has better performance than the DTC, where the value of root mean square error (RMSE) PDTC smaller than DTC. PDTC has a value RMSE = 13,09 rpm while the DTC has RMSE = 35,56 rpm. PDTC is able to improve the performance 2,72x faster than DTC shown with value of RMSE.

Keywords : Hybrid Electric Vehicle HEV (HEV), brushless DC motor (BLDCM), Predictive Direct Torque Control (PDTC).

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbil alamin puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas limpahan rahmatNya sehingga Tesis ini dapat terselesaikan dengan baik. Tesis ini disusun untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan Strata-2 pada bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dengan judul **KONTROL TORSI MOTOR DC BRUSHLESS PENGGERAK HYBRID ELECTRIC VEHICLE MENGGUNAKAN PREDICTIVE DIRECT TORQUE CONTROL.**

Penulis berterima kasih kepada bapak Dr.Ir.Moch.Rameli dan bapak Ir. Rusdhianto Effendi Ak., MT atas bimbingannya dalam menyelesaikan tesis ini. Penulis juga berterima kasih kepada segenap anggota keluarga, istri tercinta Fidya VT atas motivasi yang luar biasa kepada penulis, putri cantikku Nafeeza yang selalu memberikan senyuman penambah semangat, rekan-rekan seperjuangan S2 Teknik Sistem Pengaturan, seluruh pengajar dan karyawan Terknik Elektro serta rekan-rekan Lab A202 yang selalu mendukung langkah penulis selama mengerjakan Tesis ini.

Penulis menyadari dan memohon maaf atas segala kekurangan pada tesis ini. Akhir kata, semoga tesis ini dapat bermanfaat dalam pengembangan keilmuan dikemudian hari.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	v
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Kontribusi	3
1.6 Metodologi	3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 Kajian Penelitian Terkait	5
2.2 Hybrid Electric Vehicle	7
2.3 Mesin Pembakaran Dalam (Internal Combustion Engine - ICE)	9
2.4 Brushless DC Motor	10
2.5 Driver Tiga Fasa	15
2.6 Metode Identifikasi Sistem	20
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM	23
PERANCANGAN SISTEM	23
3.1 Gambaran Umum Sistem	23
3.2 Perancangan Sistem HEV	24
3.2.1 Spesifikasi Mesin Bakar	25
3.2.2 Spesifikasi Motor DC Brushless	26
3.2.3 Perancangan Gir Transmisi	28
3.2.4 Sensor Kecepatan	29
3.2.5 Sensor Arus	29
3.2.6 Sensor Posisi Throttle	30

3.2.7	Mikrokontroler ATmega32	31
3.2.8	Rem Elektromagnetik	32
3.3	Pengujian Sistem	33
3.3.1	Pengujian Sensor Kecepatan	33
3.3.2	Pengujian Sensor Arus dan Rem Elektromagnetik	34
3.3.3	Pengujian Sensor Posisi Throttle.....	34
3.4	Identifikasi dan Pemodelan Sistem	35
3.4.1	Identifikasi dan Pemodelan Motor DC Brushless	35
3.4.2	Pengukuran dan Pemodelan Beban	40
3.4.3	Pengukuran Sensor Posisi (Sensor Hall)	45
3.4.4	Identifikasi dan Pemodelan Mesin Bakar	46
3.5	Model Referensi	52
3.6	Torsi Referensi	53
3.7	Perancangan Direct Torque Controller (DTC).....	54
3.8	Perancangan Prediksi Torsi	55
3.9	Pulse Width Modulation (PWM) Generator	57
3.10	Simulasi Motor DC Brushless.....	58
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN		63
4.1	Pengujian Mesin Bakar	63
4.2	Pengujian Motor DC Brushless.....	65
4.3	Pengujian Hybrid Electric Vehicle.....	73
4.3.1	Pengujian HEV dengan Direct Torque Controller	73
4.3.2	Pengujian HEV dengan Predictive Direct Torque Control	76
BAB 5 PENUTUP.....		81
5.1	Kesimpulan.....	81
5.2	Saran.....	81
DAFTAR PUSTAKA.....		87
RIWAYAT HIDUP		89

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Hybrid Engine Vehicle Tipe Seri [3]	7
Gambar 2.2 Hybrid Engine Vehicle Tipe Paralel [3].....	8
Gambar 2.3 Hybrid Engine Vehicle Tipe Power Split [3].....	9
Gambar 2.4 Tahapan Kerja Mesin 2 Tak [3]	10
Gambar 2.5 Konstruksi Motor Dc Brushless [10]	10
Gambar 2.6 Sensor Hall Efek dan Data Output Posisi Rotor [10].....	11
Gambar 2.7 Sinyal Output Hall Sensor [10]	12
Gambar 2.8 Koneksi Star dan Sekuensial Pemberian Tegangan [10]	12
Gambar 2.9 Rangkaian Ekuivalen Stator	13
Gambar 2.10 Rangkaian Switching Inverter 3 Fasa [10].....	15
Gambar 2.11 Rangkaian Inverter Satu Fasa (Setengah Rangkaian)	15
Gambar 2.12 Rangkaian Inverter Satu Fasa (Rangkaian Penuh).....	16
Gambar 2.13 Diagram Fasor Six Step Commutation.....	17
Gambar 2.14 Output Data Hall Sensor Dan Arus Fasa UVW [10]	18
Gambar 2.15 Diagram Blok DTC Konvensional [7]	19
Gambar 2.16 Voltage Vector DTC Konvensional [7]	19
Gambar 2.17 Penarikan Garis Singgung Pada Respon System [11].....	21
Gambar 3.1 Diagram Blok Perancangan Sistem.....	23
Gambar 3.2 Diagram Blok Perancangan Implementasi Sistem	24
Gambar 3.3 Mesin Bakar Penggerak Primer HEV	25
Gambar 3.4 Motor DC Brushless Penggerak Sekunder HEV	27
Gambar 3.5 Konfigurasi Gir Transmisi	29
Gambar 3.6 Karakteristik Sensor Arus ACS712-10A	30
Gambar 3.7 Sensor Posisi Pedal Throttle.....	31
Gambar 3.8 Mikrokontroler ATmega32.....	31
Gambar 3.9 Rem Elektromagnetik.....	32
Gambar 3.10 Rancangan Simulator Hybrid Electric Vehicle	33
Gambar 3.11 Pengukuran Mutual Induktansi	36
Gambar 3.12 Plot Arus Transient dan Kecepatan Hasil Pengukuran	44
Gambar 3.13 Beban Maksimum HEV	45
Gambar 3.14 Diagram Blok Sub Sistem Hall Sensor	46
Gambar 3.15 Diagram Blok Model Dinamis Mesin Bakar.....	47
Gambar 3.16 Plot Sinyal Output Tachometer Hasil Pengukuran	47
Gambar 3.17 Grafik Respon Kecepatan Mesin Bakar Hasil Pengukuran	47
Gambar 3.18 Penentuan Titik Awal Belok Dan Akhir Belok.....	48
Gambar 3.19 Respon Torsi Mesin Bakar Hasil Pemodelan.....	50
Gambar 3.20 Respon Kecepatan Mesin Bakar Hasil Pemodelan	51
Gambar 3.21 Grafik Respon Kecepatan Mesin Bakar Hasil Pemodelan.....	51
Gambar 3.22 Grafik Respon Kecepatan Model Referensi dan ICE.....	53
Gambar 3.23 Prinsip Prediksi Data dengan 2 Step Increment [14]	56
Gambar 3.24 Prinsip Pembangkitan Sinyal PWM.....	57

Gambar 3.25 Diagram Simulink Brushless DC Motor.....	58
Gambar 3.26 Diagram Simulink Sub Sistem Hall Sensor.....	58
Gambar 3.27 Diagram Simulink Sub Sistem Six Step Commutation.....	59
Gambar 3.28 Diagram Simulink Sub Sistem Transistor Gates.....	60
Gambar 3.29 Diagram Simulink Sub Sistem PWM Generator.....	60
Gambar 3.30 Diagram Simulink Sub Sistem Brushless DC Motor.....	61
Gambar 3.31 Diagram Simulink Sub Sistem Load.....	61
Gambar 4.1 Diagram Simulink Pengujian Mesin Bakar.....	63
Gambar 4.2 Respon Kecepatan Mesin Bakar.....	63
Gambar 4.3 Respon Torsi Mesin Bakar.....	64
Gambar 4.4 Grafik Error Kecepatan Mesin Bakar Terhadap Model Referensi....	64
Gambar 4.5 Diagram Blok Simulasi Motor DC Brushless.....	65
Gambar 4.6 Sinyal Output Hall Sensor.....	66
Gambar 4.7 (a) Sinyal Switching Transistor dengan PWM 100%.....	66
Gambar 4.8 Tegangan Line to Netral dengan PWM 100%.....	68
Gambar 4.9 Tegangan Line to Line UV dengan PWM 100%.....	68
Gambar 4.10 Back EMF Fasa UVW.....	69
Gambar 4.11 Back EMF Fasa U Pada Kondisi Starting dan Steady State.....	70
Gambar 4.12 Arus fasa U dan V.....	70
Gambar 4.13 Arus Fasa U pada Kondisi Starting dan Steady State.....	71
Gambar 4.14 Arus Total Motor DC Brushless.....	72
Gambar 4.15 Torsi Motor DC Brushless.....	72
Gambar 4.16 Respon Kecepatan Motor DC Brushless.....	73
Gambar 4.17 (a) Grafik Respon Kecepatan Steady State HEV.....	74
Gambar 4.17 (b) Grafik Respon Kecepatan Transient HEV.....	74
Gambar 4.18 Respon Torsi Motor DC Brushless dengan Direct Torque Control.....	75
Gambar 4.19 Respon Torsi HEV dengan Direct Torque Control.....	75
Gambar 4.20 Grafik Error Kecepatan Transient HEV.....	76
Gambar 4.21 (a) Respon Kecepatan Steady State HEV.....	77
Gambar 4.21 (b) Respon Kecepatan Transient State HEV.....	77
Gambar 4.22 Torsi Referensi Torsi Prediksi Referensi Motor.....	78
Gambar 4.23 Respon Torsi Motor dengan Predictive Direct Torque Control.....	78
Gambar 4.24 Respon Torsi HEV dengan Predictive Direct Torque Control.....	79
Gambar 4.25 Error Kecepatan transient HEV.....	79

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Logika Switching Transistor	17
Tabel 2.2 Pembangkitan Tegangan 3 Fasa dengan Six Step Commutation.....	18
Tabel 2.3 Switching Voltage DTC Konvensional [7].....	20
Tabel 2.4 Tabel Pendekatan Orde Ke $-n$ dan Nilai y_i	21
Tabel 3.1 Spesifikasi Teknis HEV.....	24
Tabel 3.2 Spesifikasi Mesin Bakar Penggerak Primer HEV [12].....	26
Tabel 3.3 Spesifikasi Motor Dc Brushless Penggerak Sekunder HEV [13].....	27
Tabel 3.4 Hasil Pengukuran Sensor Kecepatan	33
Tabel 3.5 Hasil Pengukuran Sensor Arus	34
Tabel 3.6 Data Hasil Pengujian Sensor Posisi Throttle.	35
Tabel 3.7 Data Hasil Pengukuran Arus Input dan Tegangan Output.....	37
Tabel 3.8 Data Hasil Pengukuran Back EMF	40
Tabel 3.9 Hasil Pengujian Koefisien Gesek Beban Minimum	42
Tabel 3.10 Hasil Identifikasi Parameter Motor DC Brushless.....	46
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Mesin Bakar.....	65
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Arus Fasa Motor DC Brushless.....	71
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Motor DC Brushless	73
Tabel 4.4 Parameter Direct Torque Controller	73
Tabel 4.5 Parameter Predictive Direct Torque Controller	77
Tabel 4.6 Hasil Pengujian HEV	80

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Hybrid Electric Vehicle (HEV) merupakan kendaraan yang menggunakan energi penggerak dari minimal dua sumber yang berbeda. Kombinasi sumber energi yang umum digunakan adalah internal combustion engine (ICE) dan motor listrik [3]. Tujuan utama pengembangan HEV adalah untuk mengoptimalkan efisiensi konsumsi bahan bakar dengan tetap memaksimalkan torsi kendaraan dan pengurangan emisi gas buang kendaraan [4].

Beberapa permasalahan yang menjadi topik penelitian pada HEV, diantaranya adalah strategi kontrol mesin bakar untuk dapat mencapai respon terbaik untuk mencapai torsi dan kecepatan mesin bakar [2]. Masalah lainnya adalah strategi kontrol torsi mesin bakar dan motor listrik agar dapat bekerja secara optimal untuk mensuplay kebutuhan torsi agar kendaraan mampu mencapai kecepatan yang diinginkan [1] [3] [4]. Beberapa penelitian juga membahas tentang pengaruh kontrol torsi terhadap efisiensi konsumsi bahan bakar [1] [2].

Penelitian [1] membahas tentang kontroler hybrid untuk mendapatkan efisiensi konsumsi bahan bakar HEV. Kontroler hybrid membagi mode operasi kerja HEV menjadi 6 state berdasarkan state of charge (SOC) baterai dan setpoint kebutuhan daya. Pengujian kinerja kontroler menunjukkan efisiensi konsumsi bahan bakar 24% lebih baik dibandingkan kendaraan konvensional, namun terjadi penurunan terhadap performa akselerasi.

Penelitian [2] membahas tentang strategi pengaturan engine speed dan power HEV dengan 2 metode yaitu dengan kontroler konvensional PI dan fuzzy gain scheduling PI controller. Respon output dari gain scheduling PI controller menghasilkan kinerja yang lebih baik dibandingkan kontroler konvensional PI, ditunjukkan dengan nilai overshoot yang lebih rendah serta settling time yang lebih cepat. Batasan pada penelitian inihanya membahas tentang strategi kontrol torsi mesin bakar dan tidak membahas tentang kontrol torsi motor listrik.

Penelitian [10] membahas tentang pengaturan kecepatan motor listrik sebagai penggerak HEV. Permanent magnet synchronous motor PMSM digunakan sebagai aktuator penggerak HEV karena karakteristik peak power, continuous power, average efficiency dan dimensi yang cocok untuk diimplementasikan di HEV. Pengaturan motor listrik dilakukan dengan frekuensi switching inverter yang konstan dengan memodifikasi current ramp control. Pengamatan terhadap output torsi, kecepatan motor dan total harmonic distortion THD dilakukan untuk mengetahui tingkat keberhasilan penelitian.

Berdasarkan beberapa penelitian yang telah dijabarkan di atas, maka proposal tesis ini mengusulkan penelitian tentang strategi pengaturan torsi motor listrik pada HEV dengan metode predictive direct torque control (predictive DTC).

1.2 Rumusan Masalah

Masalah yang menjadi pembahasan dalam penelitian ini adalah mesin bakar sebagai penggerak primer HEV memiliki respon transient kecepatan yang lambat, sehingga diperlukan suatu metode kontrol kecepatan penggerak sekunder motor DC brushless.

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang *predictive direct torque control* pada pengaturan kecepatan motor DC brushless untuk mempercepat respon transient kecepatan HEV.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini dijelaskan sebagai berikut:

1. Mesin bakar sebagai penggerak primer dikontrol secara manual melalui pedal *throttle*.
2. Motor DC brushless hanya difungsikan sebagai penggerak sekunder HEV, tanpa aksi charging baterai.

1.5 Kontribusi

Kontribusi penelitian ini berupa pengembangan metode direct torque controller dengan tambahan prediksi torsi untuk pengaturan kecepatan motor DC brushless.

1.6 Metodologi

Untuk mencapai target penelitian sesuai yang diharapkan maka digunakan metodologi penelitian sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Pada tahap studi literatur dilakukan pengumpulan beberapa referensi penelitian yang berkaitan dengan HEV dilanjutkan dengan mempelajari penelitian yang telah dilakukan. Selain mempelajari beberapa penelitian terhadap topik yang berkaitan dilakukan pula perbandingan beberapa kajian penelitian sehingga didapatkan fokus topik penelitian. Beberapa pokok bahasan yang berkaitan dengan pembahasan HEV diantaranya, struktur HEV, motor DC brushless, direct torque control, predictive control, dan simulator HEV.

2. Pemodelan Sistem

Tahap pemodelan sistem dilakukan dengan mengidentifikasi plant simulator HEV, sehingga didapatkan model matematis dari plant HEV.

3. Perancangan Sistem

Setelah didapatkan model matematis plant HEV kemudian dirancang metode pengaturan torsi pada simulator HEV dengan membuat kontroler predictive direct torque control. Pada tahap perancangan sistem ini dilakukan dengan perangkat lunak MATLAB.

4. Pengujian dan Analisa Sistem

Tahap pengujian dan analisa sistem dilakukan untuk mengukur tingkat keberhasilan dari rancangan sistem yang telah dibuat. Rancangan sistem yang telah dibuat diimplementasikan secara langsung pada simulator HEV. Dari hasil pengujian dapat diperoleh data yang digunakan untuk menganalisa performansi pengaturan torsi HEV yang telah dibuat.

5. Kesimpulan

Dari rancangan yang telah dibuat dan implementasi sistem pada simulator HEV kemudian diperoleh kesimpulan dengan menganalisa data hasil pengujian yang telah dilakukan.

6. Penulisan Laporan Tesis

Hasil penelitian tesis yang telah dilakukan selanjutnya didokumentasikan dalam bentuk laporan.

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Kajian Penelitian Terkait

Beberapa penelitian terkait HEV telah dan terus dikembangkan dengan fokus penelitian pada strategi pengaturan torsi dan efisiensi penggunaan bahan bakar. Berbagai metode kontrol yang telah digunakan seperti Hybrid Controller [1], Fuzzy Gain-Scheduling Proportional–Integral Controller [2], Optimal Neuro-Fuzzy Control [4], Adaptive Neural PID Controller [5], Fuzzy Logic Controller [6].

Hybrid controller berbasis PID dibuat untuk memperbaiki efisiensi konsumsi bahan bakar pada plant parallel HEV [1]. Tahapan desain kontroler dilakukan dengan membuat estimasi kebutuhan torsi dan menghitung titik terbaik untuk operasi distribusi torsi mesin bakar dan motor listrik. Tahapan berikutnya menjaga torsi mesin bakar pada kondisi konstan selama mungkin dengan cara mengontrol torsi tambahan dari motor agar didapatkan efisiensi konsumsi bahan bakar. Desain hybrid controller dimulai dengan membaca posisi pedal yang diterjemahkan sebagai setpoint kebutuhan daya yang dibagi menjadi 3 mode operasi yaitu braking control, power split control dan charging control. Pemakaian PI controller pada penelitian menunjukkan bahwa parallel HEV hybrid berhasil menghemat konsumsi bahan bakar sebesar 24% dibandingkan kendaraan engine conventional.

Metode fuzzy gain scheduling PI controller didesain untuk pengaturan kecepatan mesin bakar pada HEV [2]. Desain logika fuzzy menggunakan multiple-input–single-output (MISO) Mamdani dengan mengambil variabel input error baterai, derivatif error baterai dan error mesin bakar. Penelitian dilakukan dengan simulasi Matlab dan implementasi pada kendaraan Ford Escape Hybrid. Obyektif kontrol dari penelitian untuk mendapatkan respon terbaik pada speed dan power engine dengan beberapa variabel pengukuran seperti engine speed, desired engine power, actual engine power, dan actual HV battery power. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode fuzzy gain-scheduling PI controller

berhasil mengeliminasi overshoot pada engine speed dan power serta memperbaiki respon rise time dan settling time 50% lebih baik dibandingkan metode PI controller.

Metode adaptive neuro fuzzy untuk plant parallel HEV dengan estimasi state of charge SOC baterai didesain untuk memperbaiki efisiensi konsumsi bahan bakar [3]. Kontribusi dari penelitian yang telah dilakukan adalah pengembangan metode optimal kontrol berbasis neuro fuzzy dengan memaksimalkan torsi output untuk meminimalkan konsumsi bahan bakar. Hasil simulasi menunjukkan hasil yang baik dari segi efisiensi konsumsi bahan bakar dan torsi output.

Kontroler neural PID didesain untuk menjadikan kontroler torsi HEV menjadi lebih robust [4]. Kontroler yang dibuat mengkombinasikan keuntungan dari kontroler PID konvensional dan neural network dimana tuning gain kontroler PID bekerja secara otomatis. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kontroler neural PID berhasil mengurangi error secara signifikan.

Metode fuzzy dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi konsumsi bahan bakar HEV [5]. Torsi mesin bakar dan motor listrik dikontrol dengan logika fuzzy berdasarkan pola kebutuhan torsi dan state of charge (SOC) baterai. Fungsi keanggotaan dan basis aturan pada kontroler fuzzy dioptimisasi menggunakan particle swarm optimization. Kontroler akan mengidentifikasi pola kebutuhan torsi dengan metode learning vector quantization (LVQ) yang diteruskan ke kontroler fuzzy untuk mengontrol distribusi torsi mesin bakar dan motor listrik. Hasil penelitian membandingkan kontroler fuzzy konvensional dan kontroler fuzzy optimisasi menunjukkan bahwa efisiensi konsumsi bahan bakar kontroler fuzzy optimisasi lebih baik.

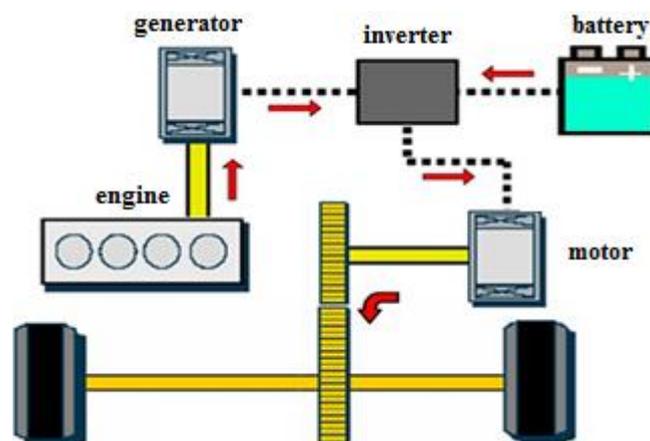
Torsi motor listrik sebagai penggerak HEV dikontrol dengan frekuensi switching inverter yang konstan [6]. Motor listrik yang digunakan dalam penelitian adalah permanent magnet synchronous motor PMSM dimana motor jenis ini memiliki karakteristik mampu memberikan torsi penuh pada kondisi kecepatan rendah dan menghasilkan daya output sebesar dua sampai tiga kali diatas daya output nominal. Karakteristik inilah yang diharapkan mampu memberikan akselerasi maksimal pada kendaraan. Kelebihan PMSM antara lain:

daya output yang tinggi, efisiensi tinggi, dan torsi awal yang tinggi. Pada penelitian ini sebuah current ramp controller didesain dengan menggunakan sawtooth signal. Nilai current error kemudian dibandingkan dengan sawtooth signal untuk membangkitkan signal PWM pada VSI. Hasil penelitian menunjukkan bahwa current ramp control menghasilkan karakteristik output dan torsi yang mirip dengan histeresis control, akan tetapi tegangan dan arus THD mengalami kenaikan.

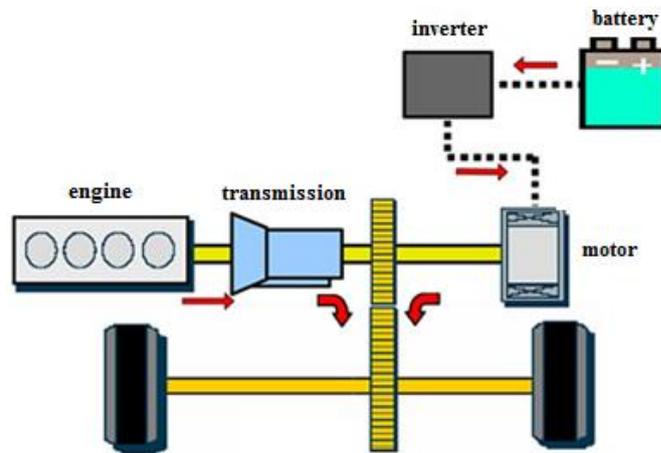
2.2 Hybrid Electric Vehicle

Hybrid Electric Vehicle HEV merupakan kendaraan yang mengambil daya dari kombinasi minimal dua sumber energi penggerak seperti internal combustion engine (ICE) dan motor listrik [3]. HEV dapat dikategorikan menjadi tiga tipe yaitu HEV tipe seri, HEV tipe paralel, dan HEV tipe power split. HEV umumnya memiliki komponen internal combustion engine dan generator yang terhubung melalui gear set, sebuah motor traksi dan high voltage baterai [4].

HEV tipe seri memiliki prinsip sama dengan electrical vehicle dimana semua torsi yang digunakan sebagai penggerak dihasilkan oleh motor listrik. Motor mendapatkan suplay tegangan dari baterai atau dari generator yang mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Kekurangan dari tipe ini adalah efisiensi dari motor menyebabkan performa kendaraan menjadi kurang optimal pada kondisi tertentu seperti saat respon akselerasi yang lambat [4]. Gambar 2.1 menunjukkan konfigurasi HEV tipe seri.



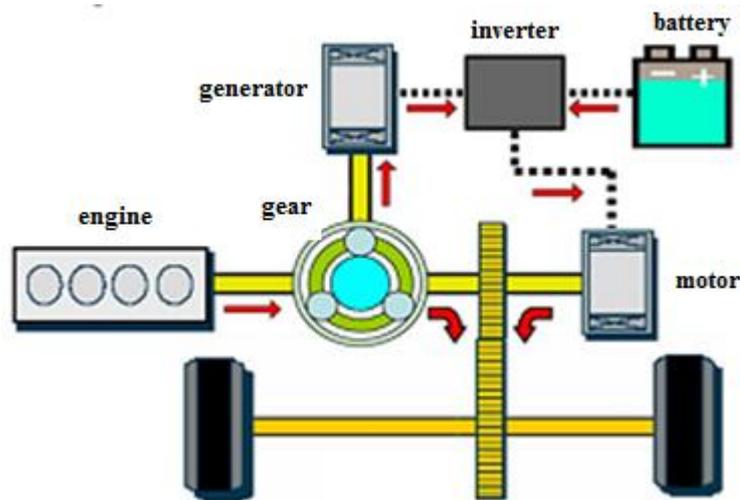
Gambar 2.1 Hybrid Engine Vehicle Tipe Seri [3]



Gambar 2.2 Hybrid Engine Vehicle Tipe Paralel [3]

HEV tipe paralel memiliki konfigurasi sesuai Gambar 2.2 yang terdiri dari dua sumber daya penggerak yaitu mesin bakar dan motor listrik dimana masing-masing dapat bekerja secara mandiri ataupun bersamaan. Ciri utama HEV tipe paralel adalah motor listrik dapat berfungsi sebagai motor sekaligus sebagai generator [3]. Kelebihan HEV tipe paralel yaitu torsi total dihasilkan oleh mesin bakar secara mekanis terhubung dengan motor listrik sehingga respon yang cepat pada mode akselerasi dapat tercapai [4]. Pada HEV tipe paralel mode operasi dan jumlah torsi yang dihasilkan oleh mesin bakar dan motor listrik ditentukan oleh kontroler.

HEV tipe power split merupakan kombinasi dari tipe seri dan paralel, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3. Konfigurasi HEV tipe power split diharapkan dapat menggabungkan kelebihan dari HEV tipe seri dan paralel sekaligus mengeliminasi kekurangan pada masing-masing tipe [3]. Konfigurasi ini menjadikan sistem dapat bekerja dengan kondisi motor digunakan untuk mengontrol kecepatan kendaraan dan mesin bakar ikut mensuplay torsi yang diperlukan untuk meningkatkan akselerasi. Pada waktu bersamaan mesin bakar yang terhubung dengan unit generator dapat melakukan charging baterai. Gambar 2.3 menunjukkan konfigurasi HEV tipe power split.

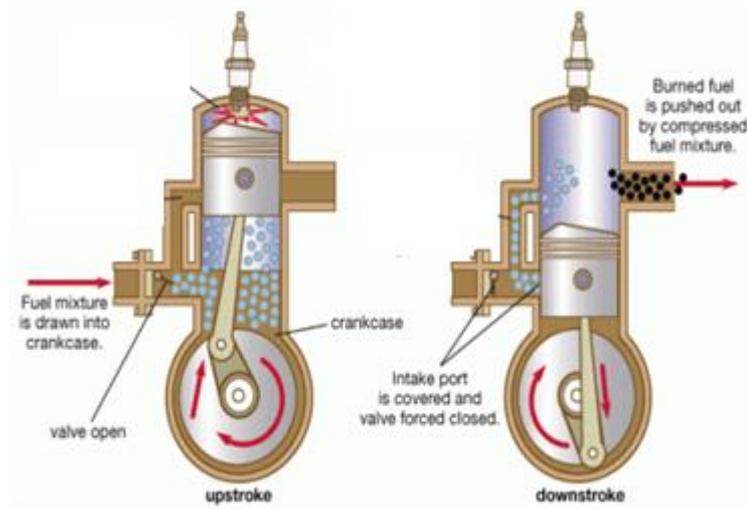


Gambar 2.3 Hybrid Engine Vehicle Tipe Power Split [3]

2.3 Mesin Pembakaran Dalam (Internal Combustion Engine - ICE)

Prinsip dasar mesin bakar adalah mengubah energi panas dari bahan bakar menjadi energi mekanik/gerak. Mesin pembakaran dalam dibagi menjadi dua yaitu mesin 2 tak (langkah) dan mesin 4 tak. Pada mesin pembakaran dalam, proses pembakaran atau perubahan energi panas dilakukan di dalam konstruksi mesin itu sendiri dan tempat terjadinya proses pembakaran disebut ruang bakar..

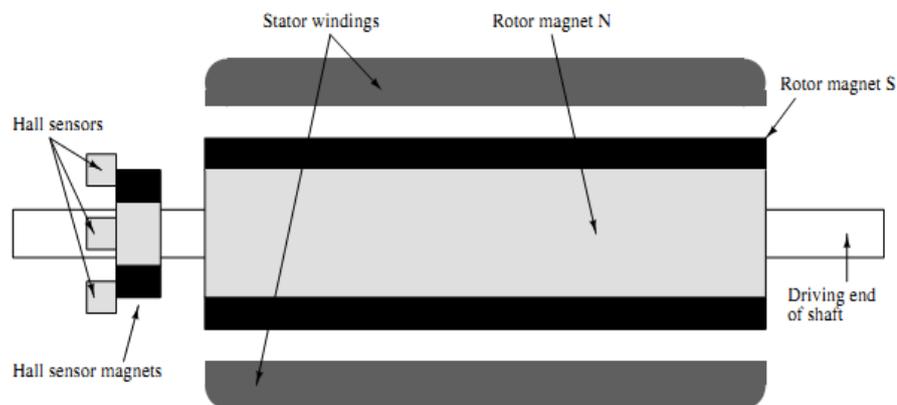
Motor 2 tak adalah mesin yang memerlukan dua langkah torak atau piston (1 kali langkah ke atas/ascending stroke dan 1 kali langkah ke bawah (discending stroke) untuk memperoleh 1 kali usaha di ruang pembakaran. Tahapan yang terjadi dalam motor 2 tak yaitu pada tahap pertama fase kompresi dan hisap. Kondisi ini terjadi saat torak dari titik mati bawah menuju titik mati atas sehingga saluran udara masuk tertutup dan torak melakukan kompresi. Tahap kedua yaitu usaha dan buang. Pada kondisi ini piston bergerak dari titik mati atas menuju titik mati bawah. Sesaat sebelum piston menuju titik mati atas, busi memercikkan bunga api sehingga terjadi pembakaran yang dilanjutkan dengan usaha sehingga piston terdorong ke bawah sampai saluran buang terbuka dan gas bekas terdorong ke luar ruang bakar. Selanjutnya aluran bilas terbuka terbuka dan gas baru memasuki ruang bakar. Gambar 2.4 menunjukkan tahapan kerja mesin bakar.



Gambar 2.4 Tahapan Kerja Mesin 2 Tak [3]

2.4 Brushless DC Motor

Brushless DC motor dikembangkan untuk mengatasi permasalahan sikat pada motor DC yang memerlukan perawatan ekstra. motor DC brushless dibedakan menjadi beberapa jenis seperti inner rotor, outer rotor dan axial gap. Pada jenis inner rotor posisi rotor berada di dalam yang dikelilingi oleh stator. Sedangkan pada jenis outer rotor posisi rotor berada di luar. Jenis motor lainnya yaitu axial gap didesain dengan magnet dalam posisi mendatar untuk mengurangi efek cogging.

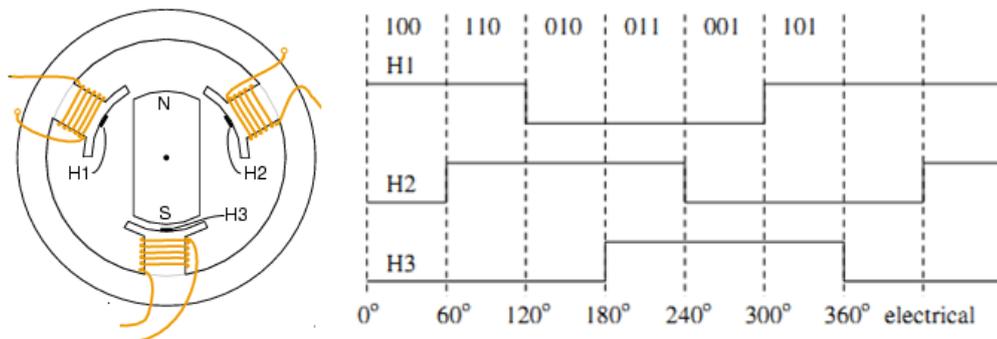


Gambar 2.5 Konstruksi Motor Dc Brushless [10]

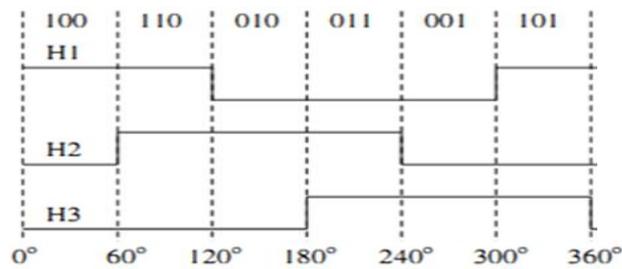
Motor DC brushless banyak digunakan pada aplikasi yang membutuhkan ketahanan tinggi, efisiensi tinggi, daya yang besar namun dimensi dan berat motor yang kecil [11]. Motor DC brushless termasuk kategori permanen magnet synchronous motor yang menggunakan sensor posisi dan inveter untuk mengatur arus stator. Terdapat dua tipe motor DC brushless berdasarkan back emf yang dibangkitkan pada kumparan stator yaitu trapezoidal dan sinusoidal. Bentuk back emf ditentukan oleh desain magnet rotor dan distribusi kumparan stator. Tipe trapezoidal membutuhkan arus suplay berupa quasi square sedangkan pada tipe sinusoidal membutuhkan arus suplay berupa sinusoidal agar dapat beroperasi dengan ripple torsi yang minim.

Motor DC brushless tipe sinusoidal membutuhkan sensor dengan resolusi yang tinggi karena posisi rotor harus diketahui setiap waktu untuk pengoperasin yang maksimal, berbeda dengan tipe trapezoidal yang lebih sederhana dan tidak membutuhkan sensor dengan resolusi tinggi. Sensor posisi yang biasa digunakan adalah sensor hall efek berjumlah tiga unit yang digunakan untuk mendeteksi magnet kecil yang dipasang pada poros motor. Motor DC brushless dikembangkan dalam berbagai konfigurasi akan tetapi BLDCM tiga fasa merupakan model yang paling sering dijumpai dan memiliki efisiensi tinggi dan ripple torsi minim [10]. Gambar 2.5 menunjukkan konstruksi motor DC brushless.

Motor DC brushless tiga fasa didesain bekerja pada kondisi dua fasa on dan satu fasa pada kondisi off. Signal dari sensor posisi menghasilkan kombinasi 3 digit bilangan yang berubah setiap 60° (sudut elektrik) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Sensor Hall Efek dan Data Output Posisi Rotor [10]



Gambar 2.7 Sinyal Output Hall Sensor [10]

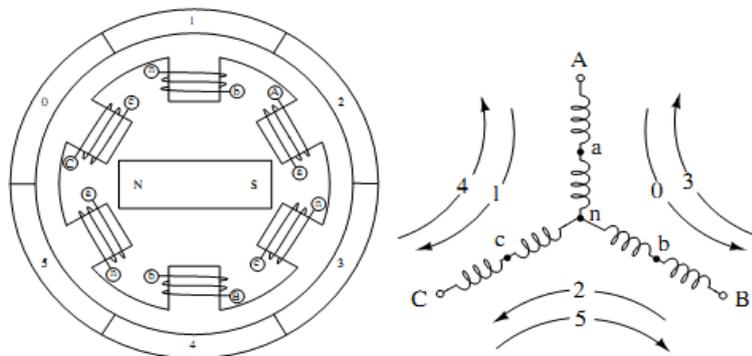
Output data hall sensor dapat dilihat pada Gambar 2.7. Persamaan output hall sensor dapat dituliskan sebagai berikut:

$$H1 = \begin{cases} 1 & 0^{\circ} \leq \theta_e \leq 120^{\circ} \\ & 300^{\circ} \leq \theta_e \leq 360^{\circ} \\ 0 & 120^{\circ} < \theta_e < 300^{\circ} \end{cases} \quad (2.1)$$

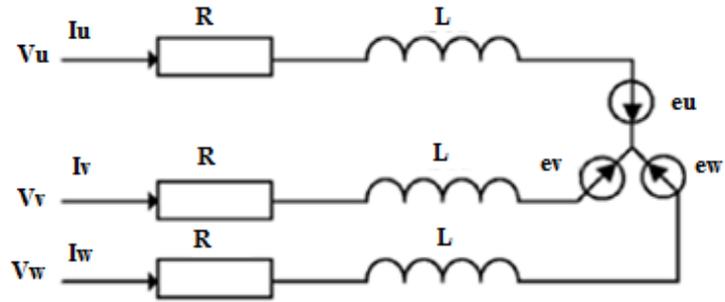
$$H2 = \begin{cases} 1 & 60^{\circ} \leq \theta_e \leq 240^{\circ} \\ 0 & 0^{\circ} \leq \theta_e < 60^{\circ} \\ & 240^{\circ} < \theta_e < 360^{\circ} \end{cases} \quad (2.2)$$

$$H3 = \begin{cases} 1 & 180^{\circ} \leq \theta_e \leq 360^{\circ} \\ 0 & 0^{\circ} \leq \theta_e < 180^{\circ} \end{cases} \quad (2.3)$$

Motor DC brushless dalam model koneksi star ditunjukkan Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Koneksi Star dan Sekuensial Pemberian Tegangan [10]



Gambar 2.9 Rangkaian Ekivalen Stator

Motor DC brushless dapat dikoneksikan dalam model star dan delta. Gambar 2.8 menunjukkan koneksi star dengan urutan sekuensial pemberian tegangan pada masing-masing fasa. Rangkaian ekivalen stator seperti tampak pada Gambar 2.9. Dari Gambar 2.9 dapat diketahui bahwa motor DC brushless disusun oleh resistor R, induktor L, mutual induktansi M dan tegangan back emf e_u, e_v, e_w . Dengan menggunakan hukum kirchoff didapatkan persamaan tegangan sebagai berikut:

$$L \frac{di_U}{dt} + Ri_U + M \frac{di_V}{dt} + M \frac{di_W}{dt} + e_U = V_U \quad (2.4)$$

$$L \frac{di_V}{dt} + Ri_V + M \frac{di_W}{dt} + M \frac{di_U}{dt} + e_V = V_V \quad (2.5)$$

$$L \frac{di_W}{dt} + Ri_W + M \frac{di_U}{dt} + M \frac{di_V}{dt} + e_W = V_W \quad (2.6)$$

dengan:

- | | | |
|-----------------|-------------------------------------|-------|
| i_U, i_V, i_W | : arus tiga fasa | (A) |
| V_U, V_V, V_W | : tegangan tiga fasa | (V) |
| e_U, e_V, e_W | : back emf tiga fasa | (V) |
| L | : induktansi kumparan stator | (H) |
| M | : mutual induktansi kumparan stator | (H) |
| R | : resistansi kumparan stator | (ohm) |

Antar fasa memiliki beda sudut 120^0 maka back emf dituliskan sebagai berikut:

$$e_U = k_e \omega_m F(\theta_e) \quad (2.7)$$

$$e_V = k_e \omega_m F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.8)$$

$$e_W = k_e \omega_m F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2.9)$$

$$F(\theta_e) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \theta_e < \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi}\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e < \pi \\ -1 & \pi \leq \theta_e < \frac{5\pi}{3} \\ -1 + \frac{6}{\pi}\left(\theta_e - \frac{5\pi}{3}\right) & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e < 2\pi \end{cases} \quad (2.10)$$

dengan:

K_e : konstanta back emf (v /rad /s)

ω_m : kecepatan rotor (rad/s)

Persamaan torsi motor dituliskan sebagai berikut:

$$T_M = K_{TM} \frac{(I_U + I_V + I_W)}{3} \quad (2.11)$$

dengan:

T_M : torsi motor (N.m)

K_{TM} : konstanta torsi (N.m / A)

Persamaan gerak putar rotor dituliskan sebagai berikut :

$$T_M - T_L - J \frac{d\omega}{dt} = B_\omega \quad (2.12)$$

dengan:

T_L : torsi beban (N.m)

B : koefisien gesek (N.m /rad /s)

J : momen inersia ($kg.m^2$)

2.5 Driver Tiga Fasa

Driver atau inverter 3 fasa disusun oleh 6 transistor, dimana 1 fasa terdiri dari 2 komponen switching seperti mosfet atau IGBT. Sebuah sumber tegangan DC terhubung dengan komponen transistor. Rangkaian switching inverter DC terhubung dengan komponen transistor. Rangkaian switching inverter ditunjukkan oleh Gambar 2.10. Persamaan tegangan line to ground:

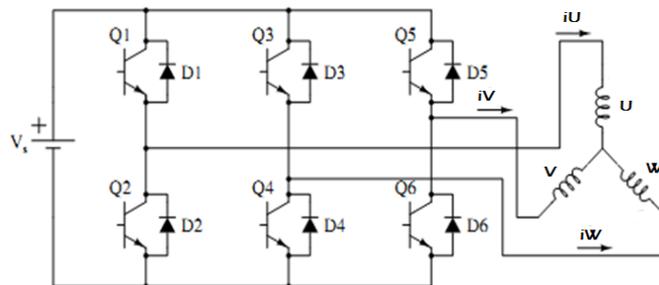
$$U = \begin{cases} 1 & Q1 = 1 \text{ dan } Q2 = 0 \\ 0,5 & Q1 = 0 \text{ dan } Q2 = 0 \\ 0 & Q1 = 0 \text{ dan } Q2 = 1 \end{cases} \quad (2.13)$$

$$V_o = VDC \cdot U$$

Persamaan tegangan line to netral:

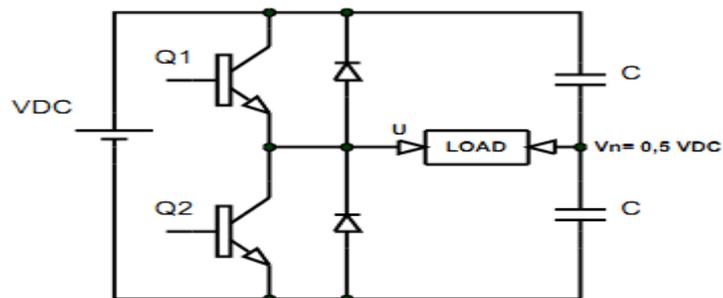
$$Un = \begin{cases} 0,5 & Q1 = 1 \text{ dan } Q2 = 0 \\ 0 & Q1 = 0 \text{ dan } Q2 = 0 \\ -0,5 & Q1 = 0 \text{ dan } Q2 = 1 \end{cases} \quad (2.14)$$

$$V_o = VDC (U - 0,5)$$

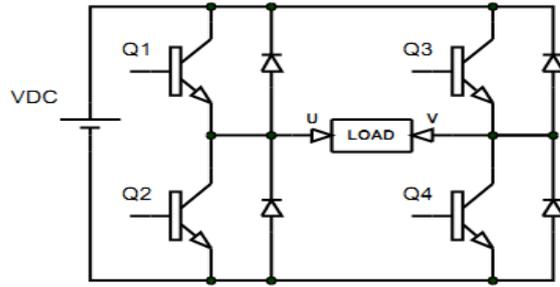


Gambar 2.10 Rangkaian Switching Inverter 3 Fasa [10]

Rangkaian inverter satu fasa (setengah rangkaian) ditunjukkan Gambar 2.11:



Gambar 2.11 Rangkaian Inverter Satu Fasa (Setengah Rangkaian)



Gambar 2.12 Rangkaian Inverter Satu Fasa (Rangkaian Penuh)

Rangkaian inverter satu fasa (rangkainan penuh) ditunjukkan Gambar 2.12.

Analisa persamaan tegangan line to ground (fasa U) dituliskan sebagai berikut:

$$U = \begin{cases} 1 & Q1 = 1 \text{ dan } Q2 = 0 \\ 0,5 & Q1 = 0 \text{ dan } Q2 = 0 \\ 0 & Q1 = 0 \text{ dan } Q2 = 1 \end{cases} \quad (2.15)$$

Persamaan tegangan line to ground (fasa V): (2.16)

$$V = \begin{cases} 1 & Q3 = 1 \text{ dan } Q4 = 0 \\ 0,5 & Q3 = 0 \text{ dan } Q4 = 0 \\ 0 & Q3 = 0 \text{ dan } Q4 = 1 \end{cases}$$

Persamaan tegangan line to netral (fasa U): (2.17)

$$Un = \begin{cases} 0,5 & Q1 = 1 \text{ dan } Q2 = 0 \\ 0 & Q1 = 0 \text{ dan } Q2 = 0 \\ -0,5 & Q1 = 0 \text{ dan } Q2 = 1 \end{cases}$$

$$Vo = VDC (U - 0,5)$$

Persamaan tegangan line to netral (fasa V):

$$Vn = \begin{cases} 0,5 & Q3 = 1 \text{ dan } Q4 = 0 \\ 0 & Q3 = 0 \text{ dan } Q4 = 0 \\ -0,5 & Q3 = 0 \text{ dan } Q4 = 1 \end{cases} \quad (2.18)$$

Persamaan tegangan line to line UV:

$$UV = \begin{cases} 1 & Q1 = 1, Q2 = 0, Q3 = 0 \text{ dan } Q4 = 1 \\ 0 & Q1 = 0, Q2 = 0, Q3 = 0 \text{ dan } Q4 = 0 \\ -1 & Q1 = 0, Q2 = 1, Q3 = 1 \text{ dan } Q4 = 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

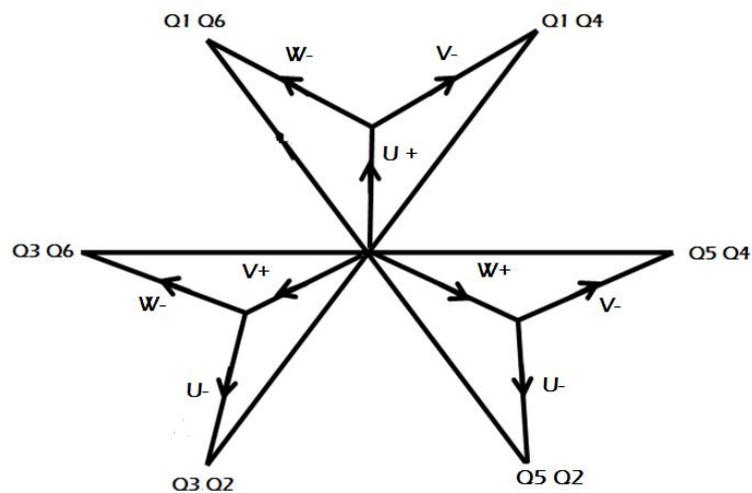
$$Vo = VDC (U - V)$$

Logika switching transistor dibagi menjadi 6 kondisi seperti pada Tabel 2.1

Tabel 2.1 Logika Switching Transistor

Switching Number	Transistor Logic						Voltage Output (Line to Netral)		
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Un	Vn	Wn
1	1	0	0	0	0	1	$\frac{1}{2}V_{DC}$	0	$-\frac{1}{2}V_{DC}$
2	0	0	1	0	0	1	0	$\frac{1}{2}V_{DC}$	$-\frac{1}{2}V_{DC}$
3	0	1	1	0	0	0	$-\frac{1}{2}V_{DC}$	$\frac{1}{2}V_{DC}$	0
4	0	1	0	0	1	0	$-\frac{1}{2}V_{DC}$	0	$\frac{1}{2}V_{DC}$
5	0	0	0	1	1	0	0	$-\frac{1}{2}V_{DC}$	$\frac{1}{2}V_{DC}$
6	1	0	0	1	0	0	$\frac{1}{2}V_{DC}$	$-\frac{1}{2}V_{DC}$	0

Six step commutation merupakan metode pembangkitan tegangan 3 fasa pada kumparan stator melalui 6 langkah sekuensial switching seperti ditunjukkan pada Gambar 2.13. Berdasarkan diagram fasor dapat disusun six step commutation sebagai berikut:



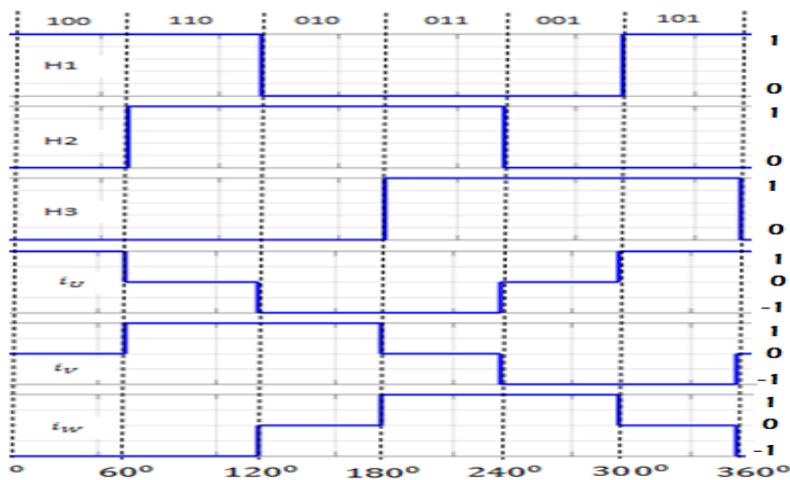
Gambar 2.13 Diagram Fasor Six Step Commutation

Sekunsial switching transistor pada six step commutation seperti pada Tabel 2.2

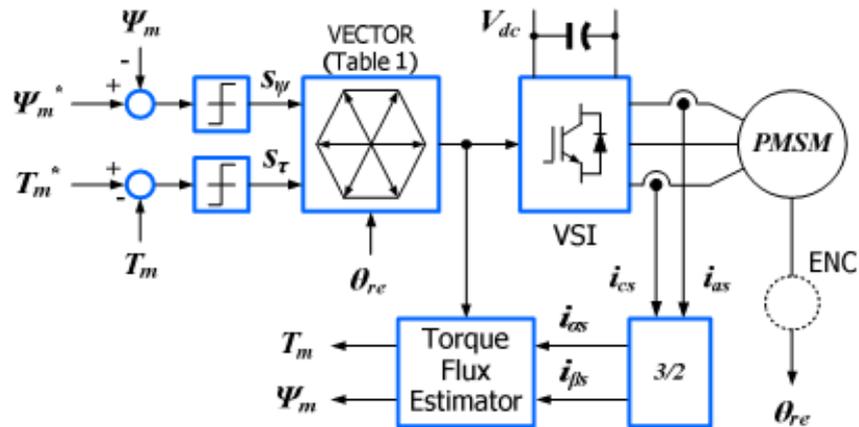
Tabel 2.2 Pembangkitan Tegangan 3 Fasa dengan Six Step Commutation

Switching Number	Switching Interval	Hall Output			Transistor ON		Voltage Output			Current Polarity		
		H1	H2	H3			Un	Vn	Wn	U	V	W
1	$0^{\circ} - 60^{\circ}$	1	0	0	Q1	Q6	$\frac{1}{2}V_{DC}$	0	$-\frac{1}{2}V_{DC}$	+	0	-
2	$60^{\circ} - 120^{\circ}$	1	1	0	Q3	Q6	0	$\frac{1}{2}V_{DC}$	$-\frac{1}{2}V_{DC}$	0	+	-
3	$120^{\circ} - 180^{\circ}$	0	1	0	Q2	Q3	$-\frac{1}{2}V_{DC}$	$\frac{1}{2}V_{DC}$	0	-	+	0
4	$180^{\circ} - 240^{\circ}$	0	1	1	Q2	Q5	$-\frac{1}{2}V_{DC}$	0	$\frac{1}{2}V_{DC}$	-	0	+
5	$240^{\circ} - 300^{\circ}$	0	0	1	Q4	Q5	0	$-\frac{1}{2}V_{DC}$	$\frac{1}{2}V_{DC}$	0	-	+
6	$300^{\circ} - 360^{\circ}$	1	0	1	Q4	Q1	$\frac{1}{2}V_{DC}$	$-\frac{1}{2}V_{DC}$	0	+	-	0

Logic switching transistor berubah setiap 60° . Dalam satu periode switching terdapat 3 kondisi arus output yaitu positif, netral, dan negatif seperti pada Gambar 2.14.

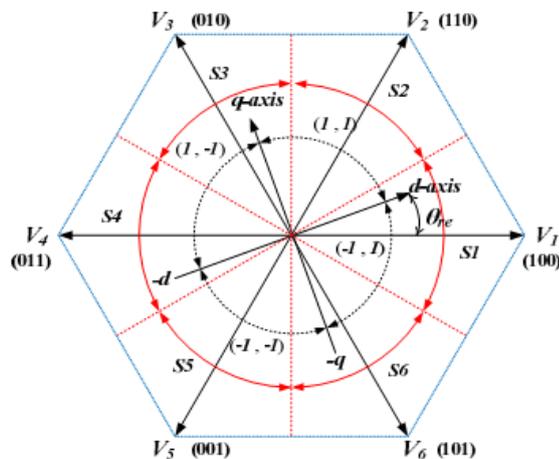


Gambar 2.14 Output Data Hall Sensor Dan Arus Fasa UVW [10]



Gambar 2.15 Diagram Blok DTC Konvensional [7]

Gambar 2.15 menunjukkan diagram blok DTC konvensional. Sebuah metode kontrol untuk mengatur torsi diperlukan untuk menjamin performa output yang baik. Beberapa metode kontrol yang dipakai seperti Field Open Control (FOC) atau biasa disebut vector control, dan Direct Torque Control (DTC). Tipe kontroler ini dipengaruhi oleh gain dari kontroler (umumnya PI atau PID) dan parameter motor [7]. DTC mudah diimplementasikan dengan switching rule yang sederhana. Riak (ripple) torsi dan flux yang cukup tinggi menjadi masalah pada metode kontrol ini [7]. Untuk mengatasi masalah ini dikembangkan beberapa metode seperti direct torque control-space vector pulse width modulation (DTC-SVM) yang merupakan gabungan antara DTC dan SVPWM.



Gambar 2.16 Voltage Vector DTC Konvensional [7]

Tabel 2.3 Switching Voltage DTC Konvensional [7].

s_ϕ	s_τ	ROTOR POSITION (Sector Number)					
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	1	V2	V3	V4	V5	V6	V1
	-1	V6	V1	V2	V3	V4	V5
-1	1	V3	V4	V5	V6	V1	V2
	-1	V5	V6	V1	V2	V3	V4

Dari gambar 2.16 dapat diketahui bahwa voltage vector dapat dibagi menjadi 4 region berdasarkan karakteristik torsi dan flux. Pembagian region sesuai dengan output fungsi histeresis dari error flux dan error torsi. Selanjutnya dapat dibuat switching voltage seperti pada Tabel 2.3.

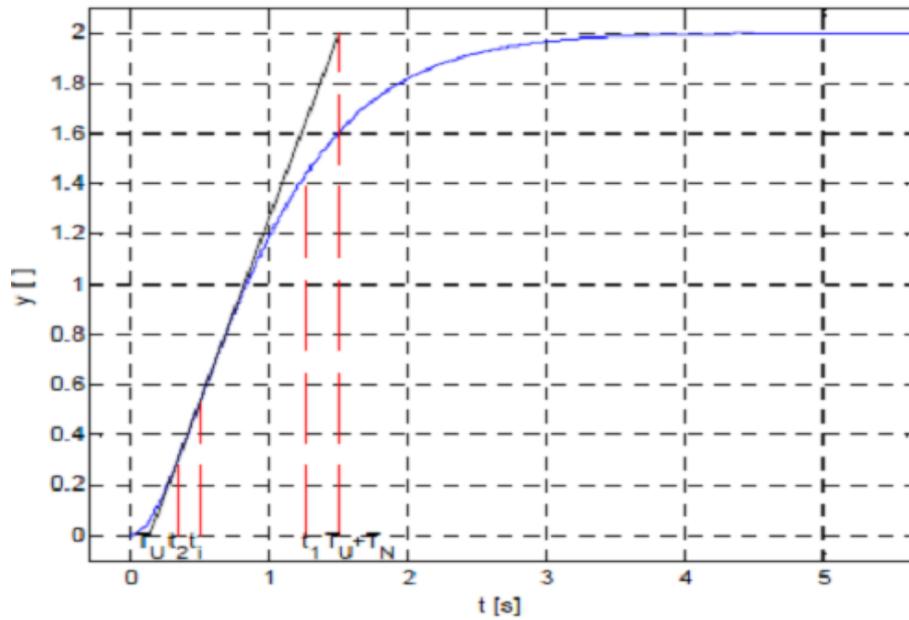
2.6 Metode Identifikasi Sistem

Identifikasi sistem merupakan tahapan untuk memperoleh parameter dari plant. Tahapan identifikasi dilakukan dengan mengukur input dan output plant. Salah satu metode yang digunakan pada proses identifikasi mesin bakar adalah metode strejc [11]. Konsep metode strejc berdasarkan analisa grafis dengan menarik garis singgung dari grafik respon plant. Titik penarikan garis singgung yaitu pada titik belok (inflection point), seperti diilustrasikan pada Gambar 2.17.

Dari penarikan garis maka didapatkan t_u dan t_n , definisi t_u merupakan titik belok awal sementara t_n adalah waktu ketika respon melewati titik belok. Tahapan identifikasi dengan metode strejc dijelaskan sebagai berikut:

1. Hitung nilai τ dengan persamaan berikut:

$$\tau = \frac{t_u}{t_n} \quad (2.26)$$



Gambar 2.17 Penarikan Garis Singgung Pada Respon System [11]

Tentukan orde plant berdasarkan nilai τ sesuai dengan Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Tabel Pendekatan Orde Ke $-n$ dan Nilai y_i

Nilai τ	Orde (n)	Nilai y_i
0,104	2	0,264
0,218	3	0,327
0,319	4	0,359
0,410	5	0,371
0,493	6	0,384
0,570	7	0,394
0,642	8	0,401
0,709	9	0,407
0,773	10	0,413

2. Berdasarkan nilai y_i lakukan pengamatan terhadap grafik sehingga didapatkan nilai t_i , dimana t_i merupakan waktu ketika respon mencapai nilai y_i .

3. Hitung konstanta waktu t_c dengan persamaan berikut:

$$t_c = \frac{t_i}{n - 1} \quad (2.27)$$

4. Dapatkan pendekatan model dengan persamaan berikut:

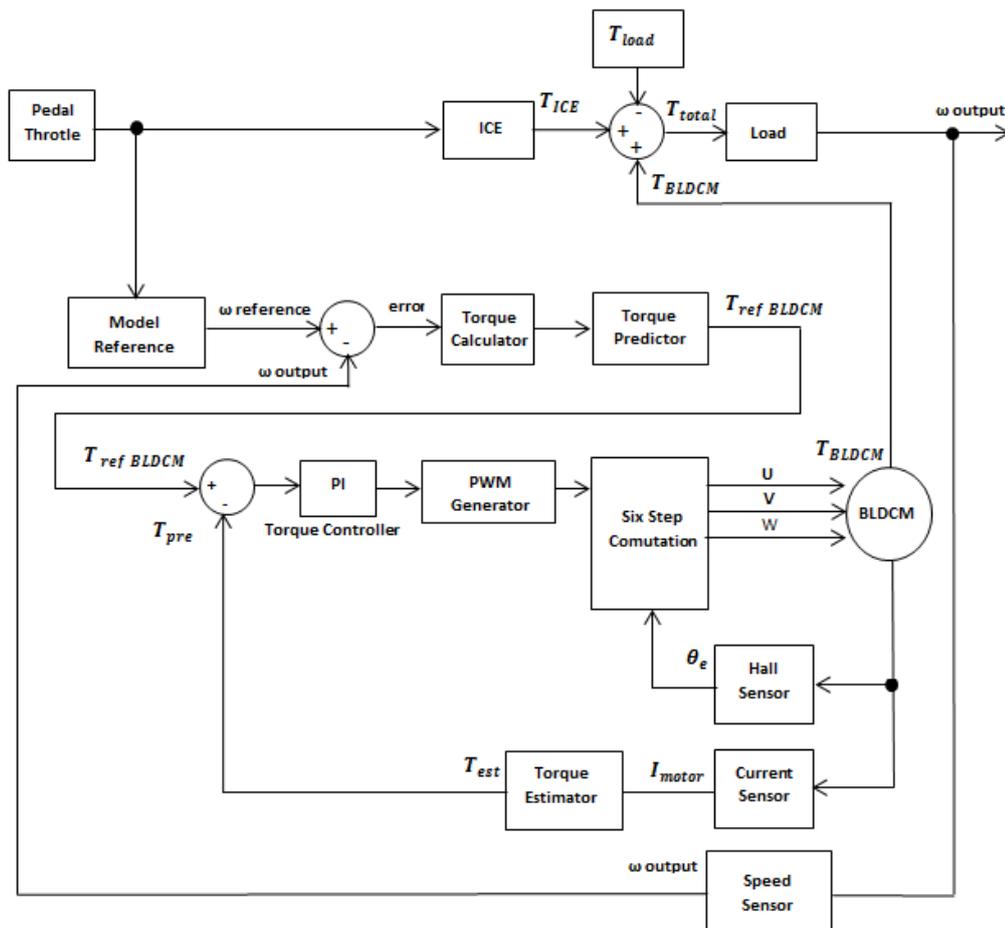
$$G(s) = \frac{K}{(t_c s + 1)^n} \quad (2.28)$$

BAB 3

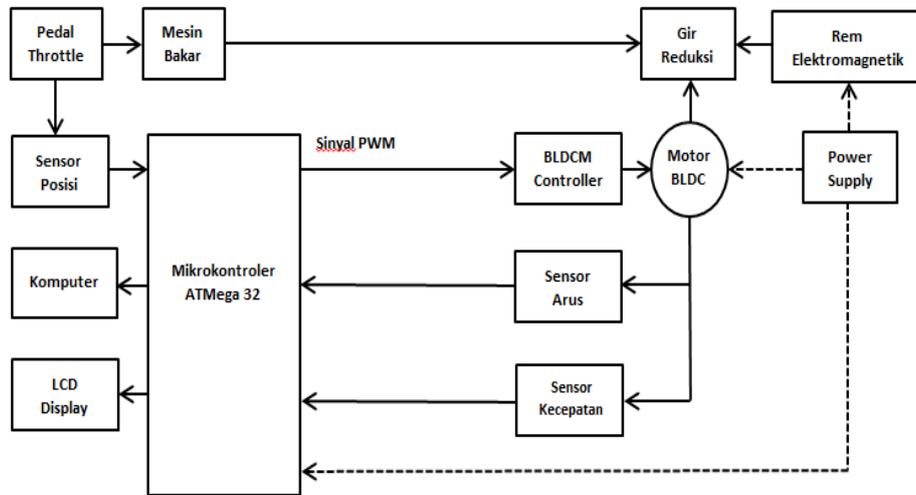
PERANCANGAN SISTEM

3.1 Gambaran Umum Sistem

Seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya, HEV merupakan kendaraan dengan minimal dua sumber tenaga penggerak yang berbeda. Pada penelitian ini HEV yang digunakan adalah tipe paralel, dimana mesin bakar (ICE) dan motor DC brushless (BLDCM) terhubung pada satu shaft (poros) roda. Mesin bakar berperan sebagai penggerak primer dan BLDCM sebagai penggerak sekunder. Sumber utama torsi yang digunakan untuk menggerakkan kendaraan dihasilkan dari ICE, sementara BLDCM mensuplai torsi tambahan untuk memperbaiki respon transient kecepatan. Gambar 3.1 menunjukkan diagram blok perancangan konseptual sistem.



Gambar 3.1 Diagram Blok Perancangan Sistem



Gambar 3.2 Diagram Blok Perancangan Implementasi Sistem

Setpoint kecepatan HEV berasal dari pedal throttle. Model referensi merupakan model acuan HEV dengan respon kecepatan yang lebih cepat dari respon mesin bakar. Torsi calculator merupakan blok yang mengubah input error kecepatan menjadi setpoint torsi referensi. Kontroler torsi motor DC brushless menggunakan PI direct torque controller. Sebuah mekanisme prediksi torsi ditambahkan untuk menghitung nilai kecepatan mendatang dengan tujuan untuk memperbaiki respon pengaturan kecepatan HEV. Agar pengendalian HEV dapat mencapai performa yang maksimal digunakan beberapa komponen pendukung seperti yang ditunjukkan diagram blok sistem pada Gambar 3.2.

3.2 Perancangan Sistem HEV

Desain HEV dirancang untuk dapat memenuhi kecepatan tertentu dengan spesifikasi seperti Tabel 3.1:

Tabel 3.1 Spesifikasi Teknis HEV.

No	Kriteria	Spesifikasi
1	Kecepatan kendaraan	100 km / jam
2	Diameter roda	16 inch = 0,4064 m

Perhitungan kecepatan ω mesin bakar sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\omega &= \frac{v}{r} && (3.1) \\ &= \frac{27,77 \text{ m/s}}{0,2032 \text{ m}} \\ &= 136,7 \text{ rad ps} = 1304,133 \text{ rpm}\end{aligned}$$

dengan:

v : kecepatan linier HEV (km/jam)

ω : kecepatan mesin bakar (rpm)

r : jari- jari roda (m)

3.2.1 Spesifikasi Mesin Bakar

Mesin bakar pada HEV digunakan sebagai penggerak utama, jenis yang digunakan pada penelitian ini merupakan mesin 2 tak. Pemilihan mesin bakar berdasarkan kecepatan output yang sesuai dengan spesifikasi desain HEV. Gambar 3.3 menunjukkan mesin bakar yang digunakan dalam penelitian.



Gambar 3.3 Mesin Bakar Penggerak Primer HEV

Tabel 3.2 Spesifikasi Mesin Bakar Penggerak Primer HEV [12]

No	Kriteria	Spesifikasi
1	Tipe / langkah	2 tak
2	Bahan bakar	Bensin
3	Kapasitas silinder	33,8 cc
4	Sistem pembakaran	electronic ignition
5	Sistem pendingin	forced air
6	Starter	recoil starter
7	Kendali kecepatan	manual throttle
8	Kecepatan	8000 rpm

3.2.2 Spesifikasi Motor DC Brushless

Motor DC brushless merupakan motor yang ideal untuk aplikasi yang membutuhkan kehandalan, efisiensi, perbandingan daya dan dimensi yang tinggi. Motor DC brushless memiliki performa tinggi yang mampu memberikan torsi besar dalam range kecepatan yang lebar. Karakteristik kecepatan dan torsi motor DC brushless memiliki kesamaan dengan motor DC. Perbedaan mendasar diantara keduanya adalah motor DC brushless tidak memiliki sikat komutator (brush) sehingga prinsip komutasi dibangkitkan melalui switching elektronik.

Komutasi merupakan proses perubahan fasa pada motor DC untuk menghasilkan torsi putar. Pada motor DC brushless arus listrik membangkitkan medan induksi stator yang menggerakkan magnet permanent motor sehingga sikat komutator tidak lagi diperlukan. Dengan tidak adanya sikat komutator maka perawatan motor DC brushless jauh lebih mudah. Motor DC brushless yang digunakan pada penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.4. pemilihan motor ini didasarkan pada nilai output kecepatan dimana motor DC brushless ini memiliki kecepatan output 3100 rpm. Motor DC brushless juga memiliki daya output yang cukup untuk menggerakkan simulator HEV yaitu 350 W, sementara torsi output yang dihasilkan 1,19 N.m. Detil spesifikasi teknis motor DC brushless dapat dilihat pada Tabel 3.3.



Gambar 3.4 Motor DC Brushless Penggerak Sekunder HEV

Tabel 3.3 Spesifikasi Motor Dc Brushless Penggerak Sekunder HEV [13]

No	Kriteria	Spesifikasi
1	Tegangan	48 volt
2	Jumlah fasa	3
2	Jumlah kutub	2
3	Model koneksi	star
2	Daya	350 watt
3	Arus tanpa beban	< 2,8 A
4	Arus beban penuh	< 9,4 A
5	Kecepatan tanpa beban	3100 rpm
6	Kecepatan beban penuh	2800 rpm
7	Torsi maksimum	1.19 N.m
8	Index protection	IP 28

3.2.3 Perancangan Gir Transmisi

Output motor DC brushless dihubungkan ke poros output yang dihubungkan ke roda. Untuk menyatukan poros mesin bakar dan poros motor DC brushless dibutuhkan gir transmisi sehingga didapatkan kecepatan yang sama di poros output. Perhitungan gir transmisi sebagai berikut:

$$\omega_A R_A = \omega_B R_B \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} R_A &= \frac{\omega_B R_B}{\omega_A} \\ &= \frac{8000}{2000} R_B \\ &= 4 R_B \end{aligned}$$

dengan:

ω_A : kecepatan motor (rpm)

R_A : jari- jari gir motor (m)

ω_B : kecepatan mesin bakar (rpm)

R_B : jari- jari gir mesin bakar (m)

Pada penelitian ini gir transmisi desain dengan 2 tahap reduksi dari yaitu B ke C_1 kemudian poros C_2 ke A. Disain gir reduksi $R_B : R_{C1} = 1:2$ dan $R_{C2} : R_A = 1:2$, sehingga memenuhi persamaan 3.4. Besarnya torsi output pada poros A dapat dihitung sebagai berikut:

$$\frac{\tau_A}{R_A} = \frac{\tau_B}{R_B} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \tau_A &= \frac{R_A \tau_B}{R_B} \\ &= 4 \tau_B \end{aligned}$$

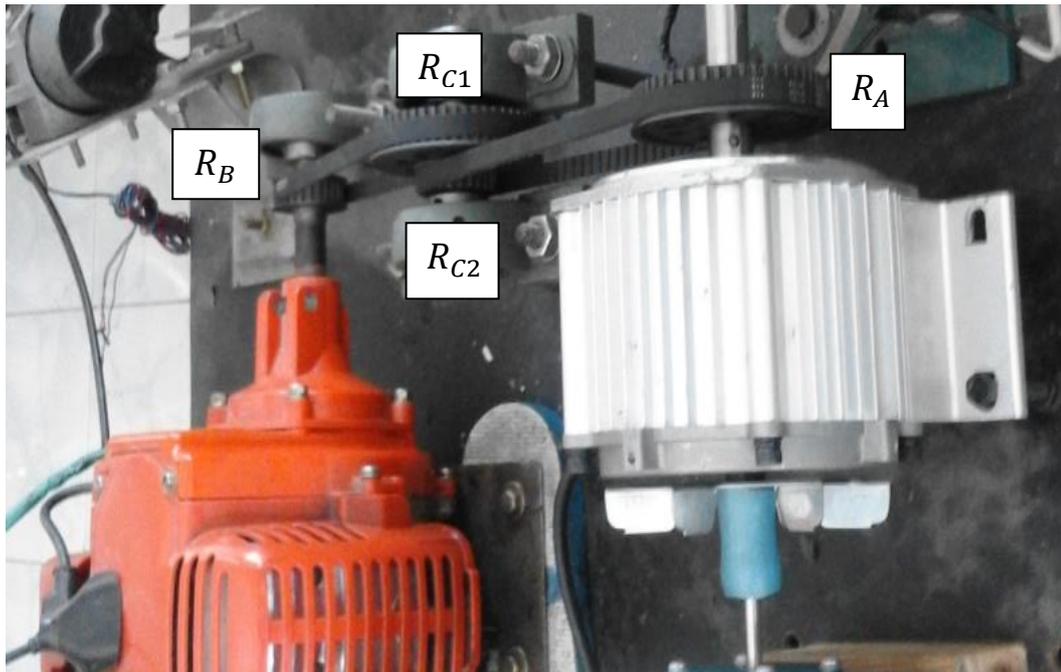
dengan:

τ_A : torsi motor listrik (N.m)

R_A : jari- jari gir motor (m)

τ_B : torsi mesin bakar (N.m)

R_B : jari- jari gir mesin bakar (m)



Gambar 3.5 Konfigurasi Gir Transmisi

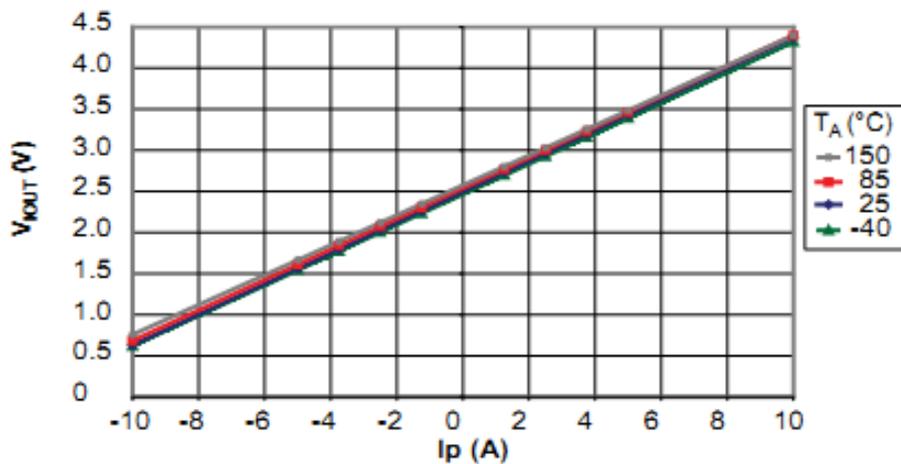
Berdasarkan perhitungan diketahui bahwa torsi pada poros A (motor DC brushless) sebesar 4 kali poros B (mesin bakar). Konfigurasi gir reduksi ditunjukkan pada Gambar 3. 5.

3.2.4 Sensor Kecepatan

Sensor kecepatan yang digunakan pada HEV adalah tachometer tipe Feedback GT 102X yang dihubungkan dengan poros motor DC brushless.

3.2.5 Sensor Arus

Pengukuran arus motor DC brushless memerlukan sebuah sensor arus. Pengukuran arus pada umumnya menggunakan sensor berupa resistor shunt yang dihubungkan secara seri pada beban dan sebuah transformator mengubahnya menjadi tegangan. Akan tetapi teknik ini sulit diimplementasikan karena resistor shunt memiliki keterbatasan untuk pengukuran arus besar. Pada penelitian ini digunakan sebuah sensor arus ACS712-10A dimana arus ini bekerja berdasarkan prinsip efek hall.

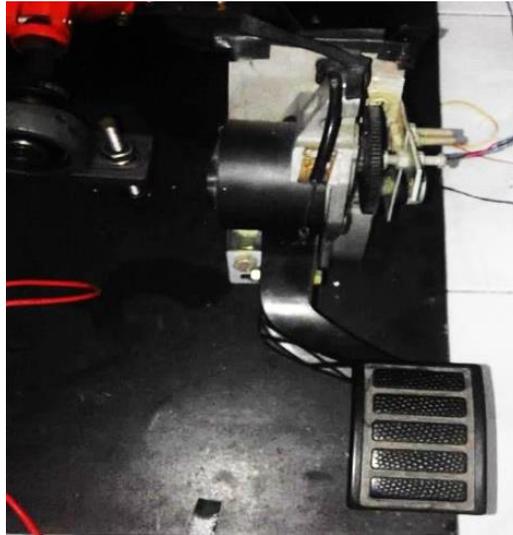


Gambar 3.6 Karakteristik Sensor Arus ACS712-10A

Fungsi resistor shunt digantikan dengan hall efek untuk mendeteksi arus beban. Sensor ACS712-10A dapat bekerja pada tegangan AC dan DC dengan jangkauan arus deteksi maksimal 10A, pemilihan sensor ini diharapkan mampu membaca arus beban motor DC brushless yang memiliki arus maksimal 9,4 A. Keluaran sensor ACS712-10A berupa tegangan analog 0 – 5 volt dengan sensitifitas pembacaan 66-185mV. Karakteristik pembacaan arus sensor ACS 712-10A ditunjukkan Gambar 3.6.

3.2.6 Sensor Posisi Throttle

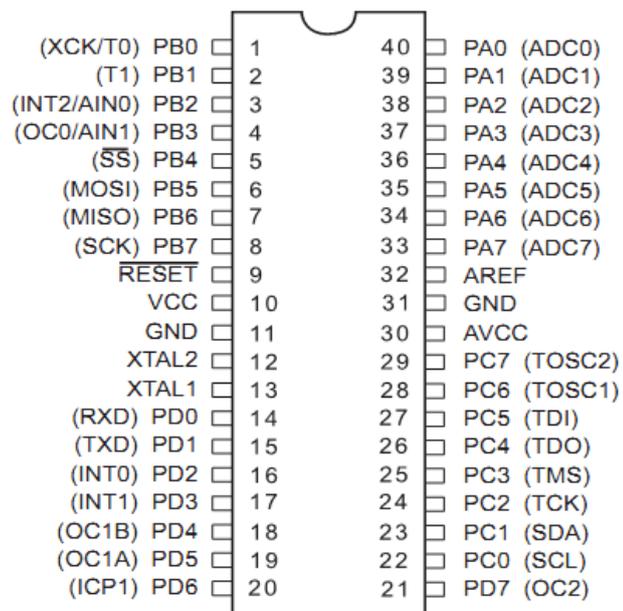
Mesin bakar pada HEV langsung dikendalikan melalui pedal throttle gas. Besarnya kecepatan mesin bakar sesuai dengan kondisi pedal gas, artinya semakin besar sudut pedal gas maka katup pembakaran (karburator) semakin membuka dan kecepatan mesin bakar semakin besar. Pada sistem kontrol torsi motor listrik, sebuah model referensi ditentukan berdasarkan posisi atau sudut bukaan pedal gas. Posisi pedal gas dideteksi dengan sebuah sensor berupa potensiometer yang dipasang pada poros pedal gas. Keluaran tegangan analog potensiometer sebesar 0- 5 volt merepresentasikan sudut pedal gas. Tegangan output analog kemudian dikonversi menjadi tegangan digital 10 bit oleh mikrokontroler. Gambar 3.7 menunjukkan posisi sensor pada pedal gas.



Gambar 3.7 Sensor Posisi Pedal Throttle

3.2.7 Mikrokontroler ATmega32

Mikrokontroler ATmega32 berfungsi sebagai pusat pengolahan data sensor, dan pengendali motor DC brushless sesuai dengan algoritma yang diprogramkan. Mikrokontroler ATmega32 memiliki fitur yang mampu mengakomodir kebutuhan sistem baik secara hardware elektronik maupun memory program. Gambar 3.8 menunjukkan mikrokontroler ATmega32.



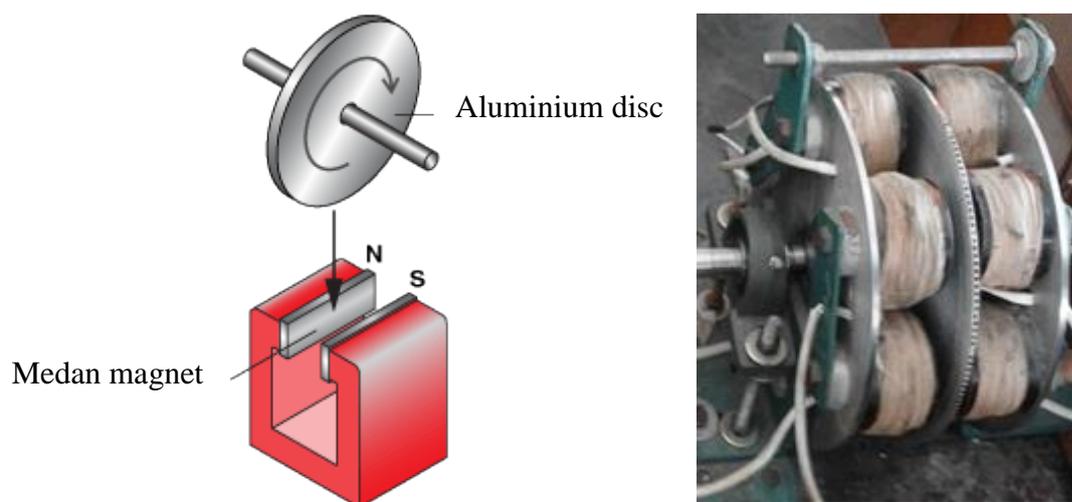
Gambar 3.8 Mikrokontroler ATmega32

Beberapa fitur yang dimiliki oleh mikrokontroler ATmega antara lain:

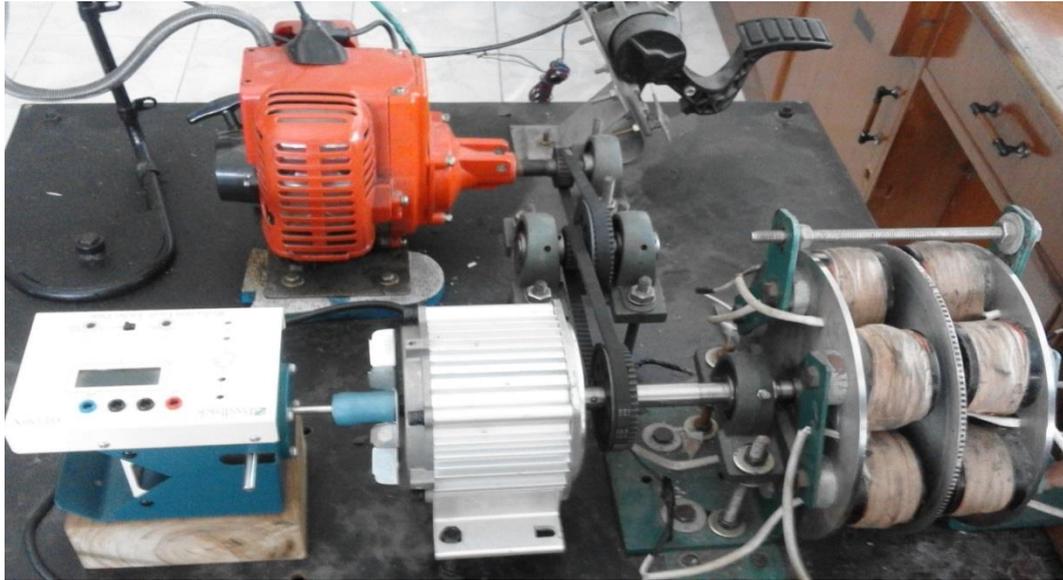
- 8 bit CMOS low power microcontroller
- 16 Mhz clock
- 32 Kbyte flash memory & 2 Kbyte internal SRAM
- 3 internal timer / counter
- 8 channel 10 bit ADC
- Programmable serial USART
- 32 programmable input output

3.2.8 Rem Elektromagnetik

Penggunaan rem elektromagnetik pada HEV difungsikan sebagai beban. Rem elektromagnetik dipasang pada poros motor DC brushless. Konstruksi rem elektromagnetik terdiri dari kumparan yang mengapit sebuah disc brake (Gambar 3.9). Prinsip kerja rem elektromagnetik ini adalah ketika arus listrik yang diberikan ke kumparan akan menghasilkan medan magnet. Medan magnet kemudian menghasilkan arus eddy dimana arus eddy ini menghasilkan gaya lawan yang memperlambat putaran disc brake yang secara langsung memperlambat putaran motor DC brushless.



Gambar 3.9 Rem Elektromagnetik



Gambar 3.10 Rancangan Simulator Hybrid Electric Vehicle

3.3 Pengujian Sistem

Pengujian sistem dilakukan untuk mengetahui kinerja dan karakteristik masing-masing komponen. Berikut ini tahapan pengujian sistem yang telah dilakukan.

3.3.1 Pengujian Sensor Kecepatan

Pada pengujian sensor kecepatan dilakukan pengamatan terhadap kecepatan motor DC brushless pada tachometer dimana kecepatan motor DC brushless diatur secara bertahap 400–1000 rpm. Hasil pengujian sensor kecepatan dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Hasil Pengukuran Sensor Kecepatan

No	Kecepatan Motor (rpm)	Output Tachometer (V)
1	400	1,04
2	600	1,57
3	800	2,07
4	1000	2,61

Tabel 3.5 Hasil Pengukuran Sensor Arus

No	Kecepatan Motor (rpm)	Hasil Pengukuran (A)	
		Tang Ampere	Sensor Arus
1	400	0,92	0,9
2	600	1,52	1,5
3	800	2,71	2,7
4	1000	3,52	3,5

3.3.2 Pengujian Sensor Arus dan Rem Elektromagnetik

Pengujian sensor arus dilakukan dengan pengamatan terhadap output sensor arus berupa tegangan analog yang ditampilkan pada display lcd. Sebagai alat pembanding digunakan alat ukur arus tang ampere Kyoritsu Kew Snap 2033. Pengujian dilakukan pada motor DC brushless dalam kondisi tanpa beban dengan mengatur kecepatan motor mulai 400–1000 rpm. Kemudian dilakukan pengukuran arus motor DC brushless. Hasil pengukuran sensor arus kemudian dibandingkan dengan data hasil pembacaan tang ampere. Data pengukuran sensor arus ditunjukkan Tabel 3.5.

3.3.3 Pengujian Sensor Posisi Throttle

Pengujian sensor posisi dilakukan dengan pengamatan terhadap tegangan output potensiometer dan prosentase bukaan throttle pada display LCD. Proses konversi tegangan output ADC menjadi prosentase bukaan throttle menggunakan ADC internal 10 bit dari mikrokontroler ATmega32. Hubungan antara tegangan output potensiometer dengan prosentase pembukaan throttle sebagai berikut:

$$f(x) = x \frac{(2^{10} - 1)}{57,8} = 51,15x \quad (3.3)$$

dengan:

x : tegangan output potensiometer (volt)

$f(x)$: prosentase bukaan throttle mesin bakar (%)

Data hasil pengujian sensor posisi throttle seperti pada Tabel 3.6.

Tabel 3.6 Data Hasil Pengujian Sensor Posisi Throttle.

No	Tegangan Output Sensor Posisi (mV)	Prosentase Throttle (%)
1	195	10
2	390	20
3	585	30
4	780	40
5	975	50
6	1170	60
7	1365	70
8	1560	80
9	1755	90
10	1950	100

3.4 Identifikasi dan Pemodelan Sistem

Untuk mendapatkan parameter sistem dilakukan proses identifikasi pada plant HEV. Parameter yang telah didapatkan selanjutnya digunakan untuk membuat pemodelan matematis plant HEV. Berdasarkan model matematis yang telah didapat maka dapat dibuat simulasi untuk mengetahui karakteristik plant secara menyeluruh dan mendesain kontroler untuk mendapatkan respon terbaik sistem. Setelah berhasil disimulasikan selanjutnya masuk tahapan implementasi sistem pada plant HEV. Tahapan identifikasi dan pemodelan meliputi identifikasi beban, mesin bakar, dan motor DC brushless. Sebagian metode identifikasi mengambil referensi dari penelitian sebelumnya [15].

3.4.1 Identifikasi dan Pemodelan Motor DC Brushless

Proses identifikasi motor DC brushless dilakukan untuk mengetahui beberapa parameter berikut:

1. Tahanan (resistansi) motor R
2. Induktansi motor L
3. Mutual induktansi M

4. Konstanta torsi motor K_{TM}
5. Konstanta ggl (back emf) K_{GGL}
6. Koefisien Gesek (Friction) B
7. Momen Inersia J

3.4.1.1 Pengukuran Tahanan (Resistansi)

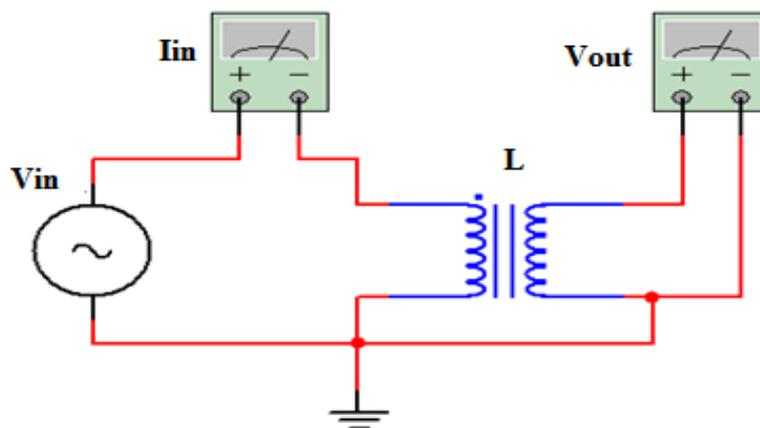
Untuk mendapatkan nilai resistansi dilakukan pengukuran secara langsung dengan menggunakan LCR meter. Dari hasil pengukuran didapatkan nilai resistansi $R = 8,4 \Omega$.

3.4.1.2 Pengukuran Induktansi

Untuk mendapatkan nilai induktansi dilakukan pengukuran secara langsung dengan menggunakan LCR meter. Dari hasil pengukuran didapatkan nilai induktansi $L = 4,2 \text{ mH}$.

3.4.1.3 Pengukuran Mutual Induktansi

Pengukuran mutual induktansi motor dilakukan untuk mengetahui nilai induktansi bersama antar kumparan stator. Tahapan Pengukuran dilakukan dengan memberikan tegangan AC 3 – 12 volt 50 Hz pada kumparan primer dan mengamati tegangan output di sisi kumparan sekunder seperti ditunjukkan Gambar 3.11.



Gambar 3.11 Pengukuran Mutual Induktansi

Besarnya mutual induktansi dihitung dengan persamaan berikut:

$$V_{in} - Ri_1 - L \frac{di_1}{dt} = 0 \quad (3.4)$$

$$V_{in} - Ri_1 - L \frac{di_1}{dt} = 0$$

$$L \frac{di_1}{dt} = V_{in} - Ri_1$$

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{1}{L} (V_{in} - R i_1) \quad (3.5)$$

$$V_o = M \frac{di_1}{dt} \quad (3.6)$$

Subtitusikan persamaan (3.5) ke persamaan (3.6)

$$V_o = M \left(\frac{1}{L} (V_{in} - R i_1) \right)$$

$$M = \frac{L \cdot V_o}{V_{in} - R i_{in}} \quad (3.7)$$

Data hasil pengukuran mutual induktansi ditunjukkan Tabel 3.7:

Tabel 3.7 Data Hasil Pengukuran Arus Input dan Tegangan Output

No	Tegangan Input (V)	Arus Input (A)	Tegangan Output (V)
1	3	0,12	1,82
2	6	0,18	4,12
3	9	0,25	6,22
4	12	0,32	8,64

Berdasarkan data yang diperoleh maka dapat dihitung mutual induktansi:

$$M = \frac{L \cdot V_o}{V_{in} - R i_{in}}$$

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{0,0042 \cdot 1,82}{3 - (8,4 \cdot 0,12)} \\ &= 0,00383 \text{ H} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_2 &= \frac{0,0042 \cdot 4,12}{6 - (8,4 \cdot 0,18)} \\ &= 0,00385 \text{ H} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_3 &= \frac{0,0042 \cdot 6,22}{9 - (8,4 \cdot 0,25)} \\ &= 0,00378 \text{ H} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_4 &= \frac{0,0042 \cdot 8,64}{12 - (8,4 \cdot 0,32)} \\ &= 0,00389 \text{ H} \end{aligned}$$

Nilai rata- rata mutual induktansi:

$$\begin{aligned} \bar{M} &= \frac{M_1 + M_2 + M_3 + M_4}{4} \\ &= 0,00384 \text{ H} \end{aligned}$$

3.4.1.3 Pengukuran Konstanta Torsi

Tahapan pengukuran konstanta torsi motor dilakukan dengan mengukur daya motor DC brushless pada kondisi pembebanan yang berbeda. Hubungan antara daya, torsi, kecepatan putar dan arus motor sebagai berikut:

$$P = T_M \cdot \omega \tag{3.8}$$

$$\begin{aligned} K_{TM} &= \frac{T_M}{I_M} \tag{3.9} \\ &= \frac{\Delta T_M}{\Delta I_M} \end{aligned}$$

Dengan daya P yang berubah dan kecepatan ω yang tetap maka :

$$\begin{aligned}
 K_{TM} &= \frac{\frac{\Delta P}{\omega}}{\Delta I_M} \\
 &= \frac{\Delta P \cdot \Delta I_M}{\omega} \\
 &= \frac{(V_1 \cdot I_1 - V_0 \cdot I_0) (I_1 - I_0)}{\omega}
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

dengan:

T_M	: torsi motor	(N.m)
K_{TM}	: konstanta torsi motor	(N.m / A)
I_M	: arus motor	(A)
P_{in}	: daya motor	(Watt)
ω	: kecepatan motor	(rad/s)

Berikut ini tahapan pengukuran parameter konstanta torsi:

➤ Pengujian tahap pertama

Pada pengujian ini motor DC brushless pada kondisi tanpa beban diatur pada kecepatan 1000 rpm. Dilakukan pengukuran tegangan dan arus. Berikut ini data hasil pengukuran:

$$\omega = 1000 \text{ rpm} = 104,82 \text{ rad /s}$$

$$I_0 = 0,62 \text{ A}$$

$$V_0 = 48 \text{ V}$$

➤ Pengujian tahap kedua

Pada pengujian ini motor DC brushless pada kondisi diberikan beban dengan pemberian tegangan pada rem elektrik sebesar 32 volt. Motor diatur pada kecepatan konstan 1000 rpm. Dilakukan pengukuran tegangan dan arus. Berikut ini data hasil pengukuran:

$$\omega = 1000 \text{ rpm} = 104,82 \text{ rad /s}$$

$$I_1 = 1,22 \text{ A}$$

$$V_1 = 48 \text{ V}$$

Berdasarkan data diatas selanjutnya dihitung konstanta torsi:

$$\begin{aligned}
 K_{TM} &= \frac{(V_1 \cdot I_1 - V_0 \cdot I_0) (I_1 - I_0)}{\omega} \\
 &= \frac{(48 \cdot 1,22) - (48 \cdot 0,62)(1,22 - 0,62)}{109,64} \\
 &= 0,164
 \end{aligned}$$

3.4.1.4 Pengukuran Konstanta Back EMF

Tahapan identifikasi konstanta back EMF dilakukan dengan memberikan gaya pada motor DC brushless sehingga berputar pada kecepatan tertentu dan menghasilkan tegangan balik, kemudian dilakukan pengukuran besarnya nilai tegangan balik dengan menggunakan alat ukur voltmeter. Hasil pengujian seperti ditunjukkan Tabel 3.8.

3.4.2 Pengukuran dan Pemodelan Beban

Beban minimum diasumsikan berasal dari komponen gear transmisi dan berat kendaraan. Identifikasi parameter beban dilakukan untuk mengetahui nilai:

- koefisien gesek (friction) (B)
- momen inersia beban (J)

Tabel 3.8 Data Hasil Pengukuran Back EMF

Kecepatan		$V_{EMF}(e)$ (volt)	$K_{EMF} = e/\omega$
(rpm)	(rad ps)		
400	41,93	1,1	0,021
600	62,89	2,31	0,022
800	83,86	3,3	0,021
1000	104,8	4,19	0,020
Rata – rata			0,021

3.4.2.1 Pengukuran Koefisien Gesek

Beban minimum disimulasikan sebagai pembebanan rem elektromagnetik dengan torsi sebesar 0,02 N.m. Perubahan torsi rem sebanding dengan perubahan torsi motor dan dapat dihitung sebagai berikut:

$$T_{REM} = T_M = K_{TM} \cdot I_M$$

$$I_M = \frac{T_M}{K_{TM}}$$

$$= \frac{0,02}{0,16}$$

$$= 0,125 \text{ A}$$

Berikut ini persamaan yang menunjukkan hubungan antara torsi dan parameter beban:

$$T_M = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (3.11)$$

$$T_M = K_{TM} \cdot I_M \quad (3.12)$$

Pada saat tanpa beban $T_L = 0$ dan keadaan steady state $\frac{d\omega}{dt} = 0$ sehingga:

$$K_{TM} \cdot I_M = J \cdot 0 + B\omega + 0$$

$$B = \frac{K_{TM} \cdot I_M}{\omega} \quad (3.13)$$

dengan:

T_M	: torsi motor	(N.m)
J	: momen inersia beban	($kg \cdot m^2$)
B	: koefisien gesek (friction)	(N.m / rad ps)
ω	: kecepatan	(rad/s)
K_{TM}	: konstanta torsi motor	(Nm / A)
I_M	: arus motor	(A)
T_L	: torsi beban	(N.m)

Tahapan pengukuran:

1. Hubungkan motor DC brushless dengan ICE melalui komponen gir transmisi.
2. Atur kecepatan motor pada range 400-1000 rpm dengan interval 200 rpm.
3. Ukur arus motor.
4. Atur tegangan rem elektronik sampai terjadi perubahan arus motor sebesar $=0,125 \text{ A}$
5. Hitung nilai koefisien gesek sesuai Persamaan (3.13)

Tabel 3.9 Hasil Pengukuran Koefisien Gesek Beban Minimum

Kecepatan Awal (rpm)	Arus Awal (A)	Arus Akhir (A)	Kecepatan Akhir (rpm)	Kecepatan Akhir (rad ps)
400	0,24	0,36	415	43,58
600	0,37	0,49	572	60
800	0,49	0,62	711	74,54
1000	0,62	0,74	868	90,99

Berdasarkan data yang diperoleh maka dapat dihitung koefisien gesek:

$$B = \frac{K_{TM} \cdot I_M}{\omega}$$

$$B_1 = \frac{0,16 \cdot 0,36}{43,58}$$
$$= 0,00134$$

$$B_2 = \frac{0,16 \cdot 0,49}{60}$$
$$= 0,00132$$

$$B_3 = \frac{0,16 \cdot 0,49}{74,54}$$
$$= 0,00132$$

$$B_4 = \frac{0,16 \cdot 0,62}{90,99}$$
$$= 0,00131$$

Besarnya rata-rata koefisien gesek hasil pengujian:

$$\begin{aligned}\bar{B} &= \frac{B_1 + B_2 + B_3 + B_4}{4} \\ &= 0,00132 \text{ N.m.s /rad}\end{aligned}$$

3.4.2.2 Pengukuran Momen Inersia

Tahapan selanjutnya adalah pengukuran parameter momen inersia beban. Persamaan torsi motor dan momen inersia sebagai berikut:

$$T_M = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (3.14)$$

Dalam domain diskrit persamaan diatas menjadi:

$$\begin{aligned}T_m(k) &= J \frac{\omega(k) - \omega(k-1)}{\Delta t} + B\omega(k) \\ &= \frac{J}{\Delta t} \omega(k) - \frac{J}{\Delta t} \omega(k-1) + B\omega(k)\end{aligned} \quad (3.15)$$

Dengan memberikan notasi α dan β menjadi:

$$\overbrace{\left(\frac{J}{\Delta t} + B\right)}^{\alpha} \omega(k) - \overbrace{\left(\frac{J}{\Delta t}\right)}^{\beta} \omega(k-1) = T_m(k)$$

$$\alpha\omega(k) - \beta\omega(k-1) = T_m(k)$$

$$[\omega(k) \quad -\omega(k-1)] \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = T_m(k)$$

$$\overbrace{\begin{bmatrix} \omega(2) & -\omega(1) \\ \vdots & \vdots \\ \omega(600) & -\omega(599) \end{bmatrix}}^Q \overset{x}{\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}} = \overbrace{\begin{bmatrix} T_m(2) \\ \vdots \\ T_m(600) \end{bmatrix}}^P$$

$$QX = P$$

$$Q^T QX = Q^T P$$

$$(Q^T Q)^{-1}(Q^T Q)X = (Q^T Q)^{-1}Q^T P$$

$$X = (Q^T Q)^{-1}Q^T P$$

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = (Q^T Q)^{-1}Q^T P$$

$$\beta = \frac{J}{\Delta t} \quad (3.16)$$

$$J = \beta \cdot \Delta t \quad (3.17)$$

Pada tahap pengukuran parameter momen inersia, motor DC brushless diberi sinyal input step hingga mencapai kecepatan 1000 rpm. Pada oscilloscope dilakukan pengamatan terhadap respon kecepatan dan arus transient (Gambar 3.12). Dari hasil pengujian didapatkan data pengukuran sebanyak 500 dan $\Delta t=0,002s$. Melalui Persamaan (3.17) maka didapatkan nilai berikut :

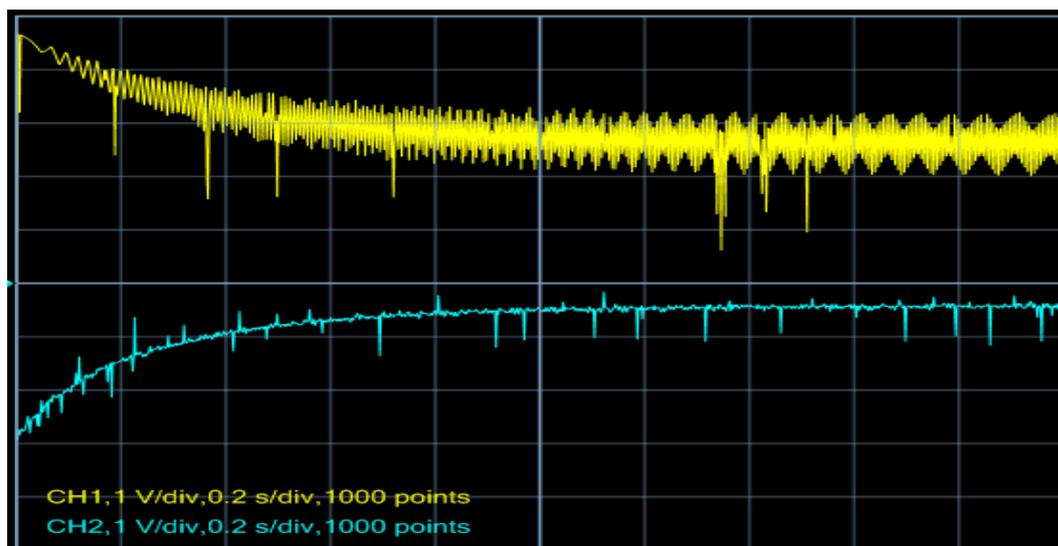
$$\beta = 0,1505$$

Sehingga didapatkan nilai momen inersia:

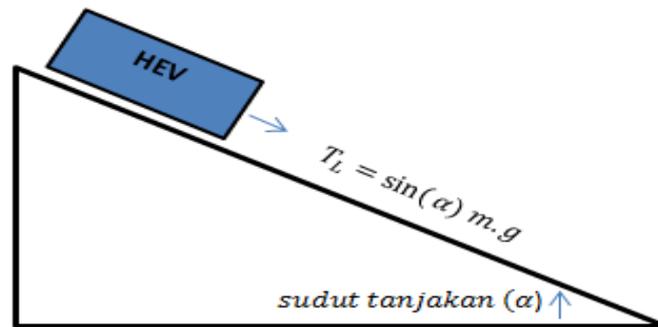
$$J = \beta \cdot \Delta t$$

$$= 0,1505 \cdot 0,002$$

$$= 0,000301 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$



Gambar 3.12 Plot Arus Transient dan Kecepatan Hasil Pengukuran



Gambar 3.13 Beban Maksimum HEV

Beban maksimum merupakan kondisi ketika HEV pada medan tanjakan. Sudut medan tanjakan maksimal diasumsikan 30^0 . Gambar 3.13 merupakan ilustrasi beban maksimum HEV. Persamaan beban maksimum:

$$T_L = \sin(\alpha) \cdot m \cdot g \quad (3.18)$$

Berat HEV disimulasikan dengan pembebanan rem elektromagnetik sebesar 0,08 N.m sehingga persamaan beban maksimum menjadi:

$$T_L = \sin(\alpha) \cdot 0,08 \text{ N.m}$$

dengan:

T_L : torsi beban maksimum (N.m)

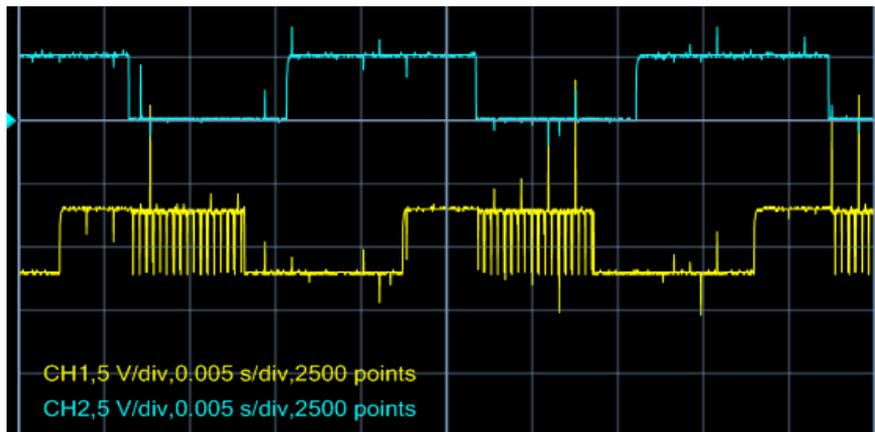
α : sudut tanjakan

m : massa kendaraan (kg)

g : percepatan gravitasi ($m s^{-2}$)

3.4.3 Pengukuran Sensor Posisi (Sensor Hall)

Pengukuran sensor hall dilakukan dengan mengamati sinyal output sensor hall menggunakan oscilloscope. Gambar 3.14 menunjukkan plot sinyal output hall sensor fase U dan V.



Gambar 3.14 Diagram Blok Sub Sistem Hall Sensor

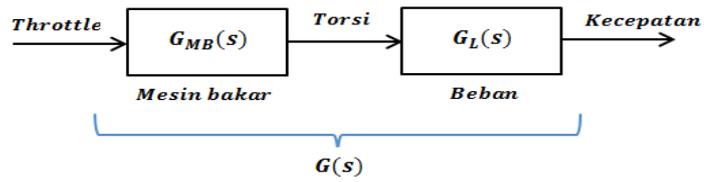
Hasil identifikasi parameter motor DC brushless ditunjukkan Tabel 3.10.

Tabel 3.10 Hasil Identifikasi Parameter Motor DC Brushless

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Jumlah kutub	4	
2	Tegangan kerja	48	Volt
3	Resistansi stator	8,4	Ohm
4	Induktansi stator	0,0042	H
5	Mutual induktansi	0,0038	H
6	Konstanta torsi motor	0,164	Nm / A
7	Konstanta back EMF	0,021	V / rad ps
8	Koefisien gesek	0,00132	N.m /rad ps
10	Momen inersia	0,000301	$kg.m^2$

3.4.4 Identifikasi dan Pemodelan Mesin Bakar

Identifikasi parameter ICE dilakukan dengan menggunakan metode Strejc. Proses identifikasi Strejc dilakukan dengan menganalisa grafik respon ICE ketika diberikan masukan sinyal step. Berdasarkan perhitungan yang dilakukan akan didapatkan model matematika mesin bakar yang mendekati plant riil mesin bakar. Model matematis mesin bakar secara keseluruhan ditunjukkan Gambar 3.15.

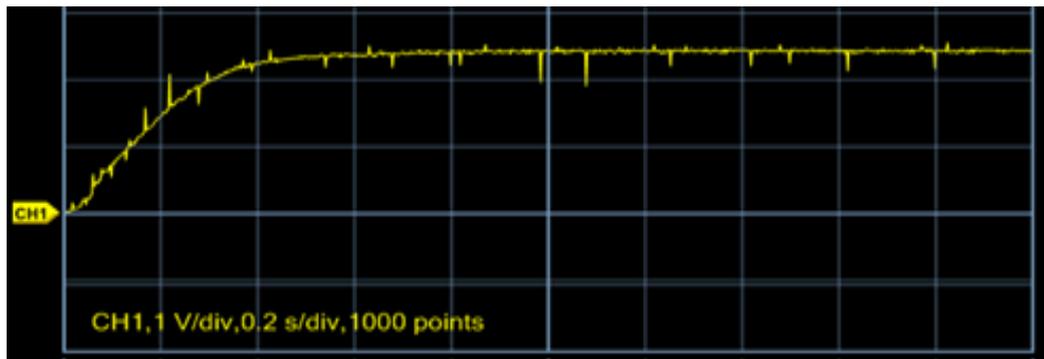


Gambar 3.15 Diagram Blok Model Dinamis Mesin Bakar

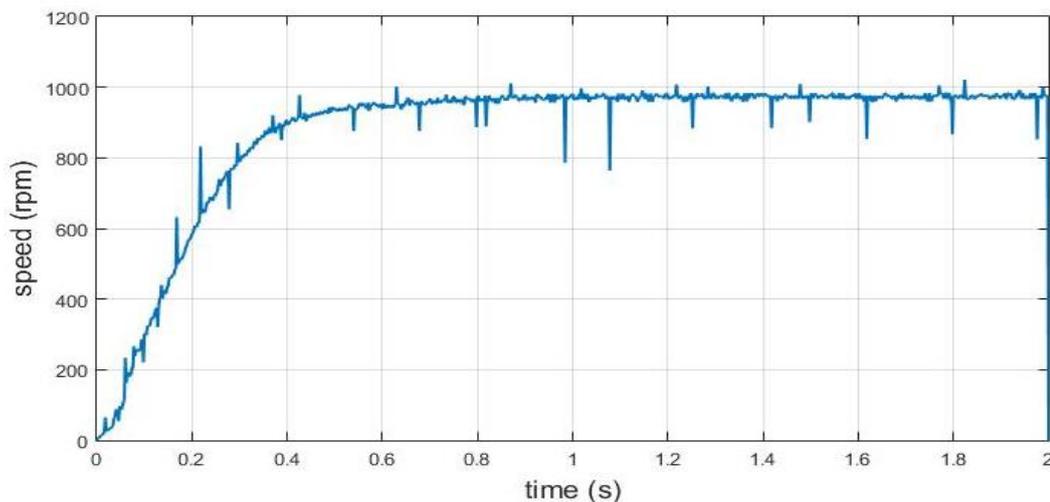
Dari Gambar 3.15 dapat dituliskan model dinamis mesin bakar sebagai berikut:

$$G_{MB}(s) = \frac{G(s)}{G_L(s)} \quad (3.19)$$

Tahapan identifikasi parameter beban dilakukan dengan mengatur throttle pada nilai 50% dan dilakukan pengamatan terhadap kecepatan mesin bakar Y_{SS} . Grafik respon kecepatan mesin bakar pembacaan tachometer ditunjukkan pada Gambar 3.16 dan plot data pengukuran kecepatan ditunjukkan Gambar 3.17.



Gambar 3.16 Plot Sinyal Output Tachometer Hasil Pengukuran



Gambar 3.17 Grafik Respon Kecepatan Mesin Bakar Hasil Pengukuran

Berdasarkan grafik yang diperoleh dilakukan analisa untuk mencari model matematika dengan metode Strejc sebagai berikut:

$$Y_{ss} = 963,8 \text{ rpm}$$

$$= 101,02 \text{ rad/s}$$

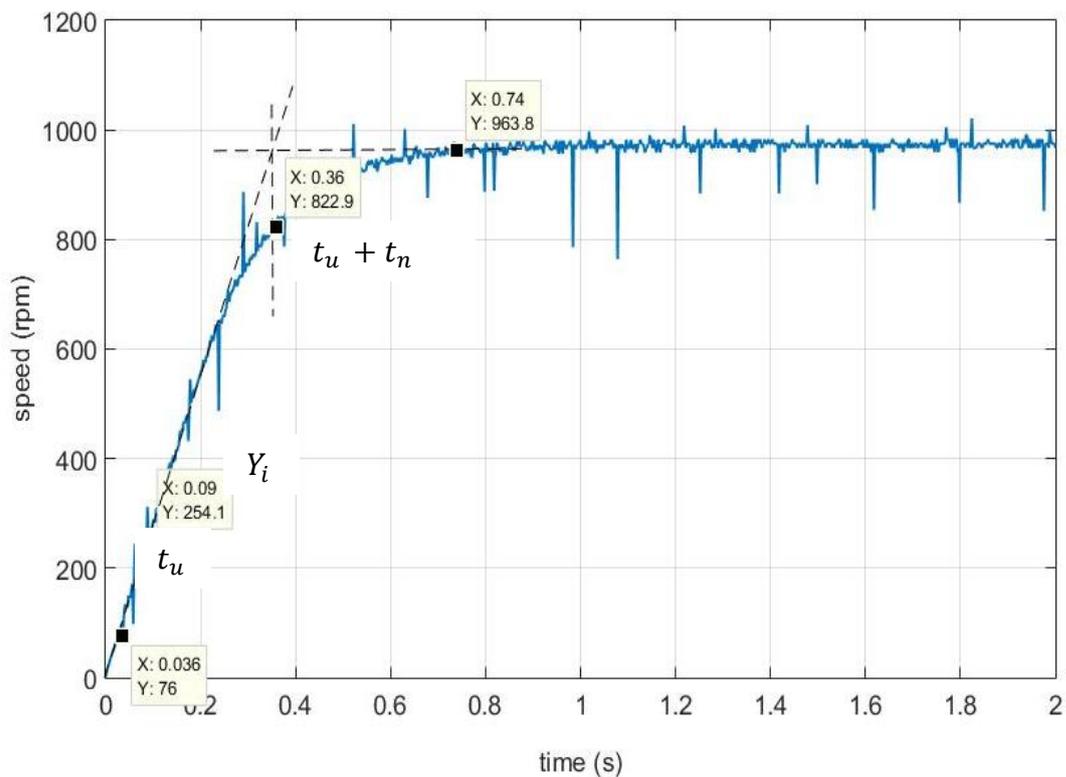
$$X_{ss} = 50$$

$$K = \frac{Y_{ss}}{X_{ss}}$$

$$= \frac{101,02}{50}$$

$$= 2,02$$

Untuk menentukan parameter t_u (awal titik belok) dan t_n (akhir titik belok) dilakukan dengan menarik garis singgung pada grafik (Gambar 3.18).



Gambar 3.18 Penentuan Titik Awal Belok Dan Akhir Belok

Berdasarkan plot respon kecepatan didapatkan nilai berikut:

$$t_u = 0,036$$

$$t_u + t_n = 0,36$$

$$t_n = 0,354$$

Selanjutnya dihitung nilai rasio waktu tunda:

$$\begin{aligned}\tau &= \frac{t_u}{t_n} \\ &= \frac{0,036}{0,354} \\ &= 0,102\end{aligned}$$

Dari nilai τ yang telah diperoleh selanjutnya dilakukan pendekatan model orde ke - n berdasarkan taksiran orde sesuai tabel 2.3 dan didapatkan nilai pendekatan orde ke -2 dengan nilai $y_i=0,264$. Selanjutnya dicari nilai t_i yaitu nilai ketika respon sistem mencapai $0,264 Y_{ss}$.

$$\begin{aligned}y_i &= 0,264 Y_{ss} \\ &= 0,264 \cdot 963,8 \\ &= 254,4 \text{ rpm}\end{aligned}$$

Dilakukan pengamatan terhadap nilai $t_i = 0,09$

Selanjutnya dihitung waktu konstan t_c :

$$\begin{aligned}t_c &= \frac{t_i}{n - 1} \\ &= \frac{0,09}{2 - 1} \\ &= 0,09\end{aligned}$$

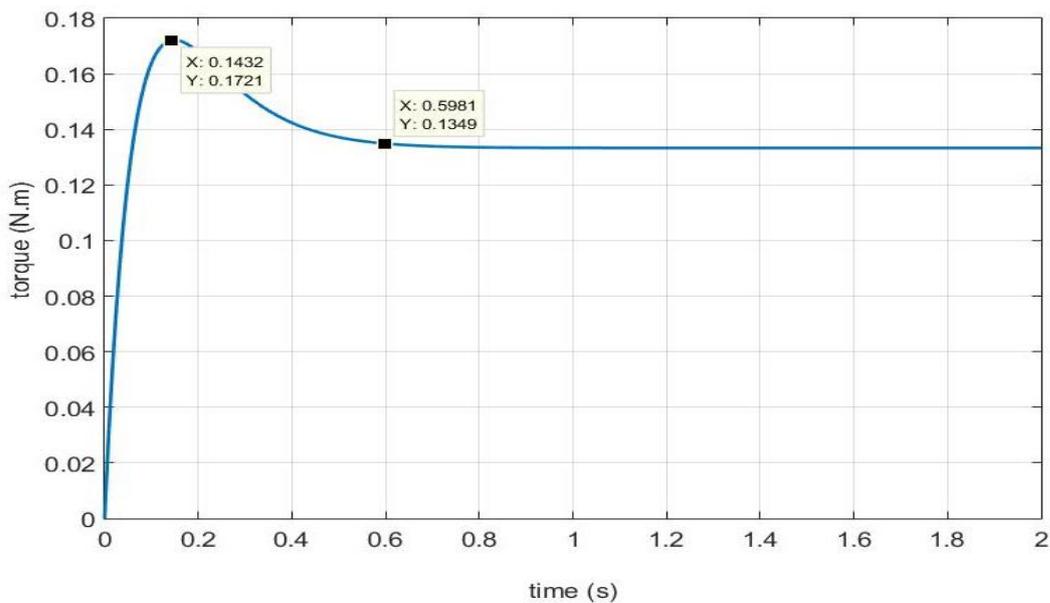
Sehingga didapatkan pendekatan model orde ke-2 sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 G(s) &= \frac{K}{(T_c s + 1)^n} \\
 &= \frac{2,02}{(0,09s + 1)^2} \\
 &= \frac{2,02}{0,0081s^2 + 0,18s + 1}
 \end{aligned}$$

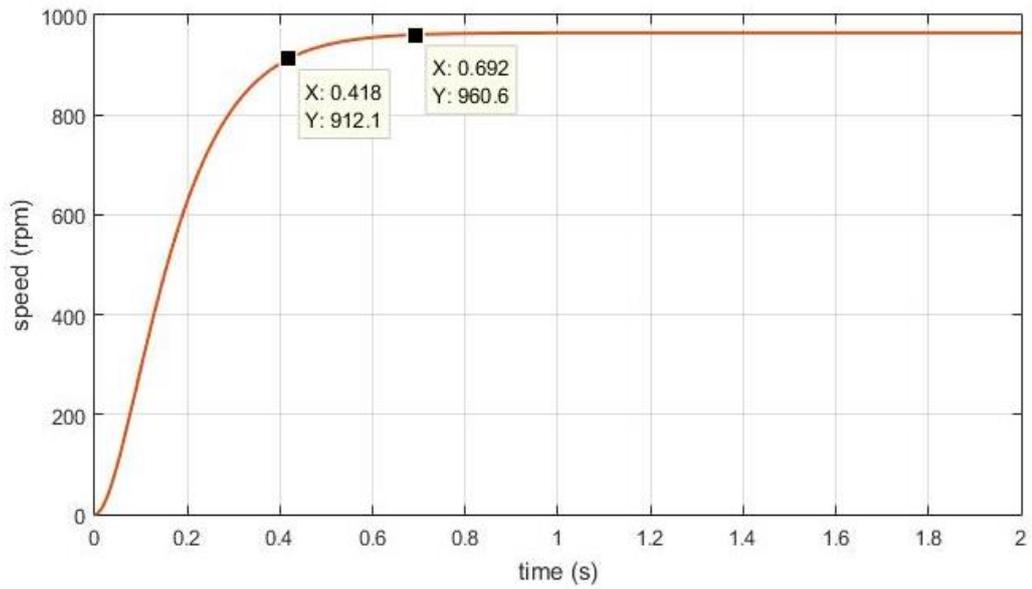
Untuk mendapatkan pemodelan mesin bakar maka:

$$\begin{aligned}
 G_{MB}(s) &= \frac{G(s)}{G_L(s)} \\
 &= \frac{\frac{2,02}{0,0081s^2 + 0,18s + 1}}{\frac{1}{3 \cdot 10^{-4}s + 13,2 \cdot 10^{-4}}} \\
 &= \frac{6,06 \cdot 10^{-4}s + 26,664 \cdot 10^{-4}}{0,0081s^2 + 0,18s + 1}
 \end{aligned}$$

Respon torsi mesin bakar hasil pemodelan (Gambar 3.19) menunjukkan torsi starting = 0.172 N.m dan torsi steady state=0.13 N.m:

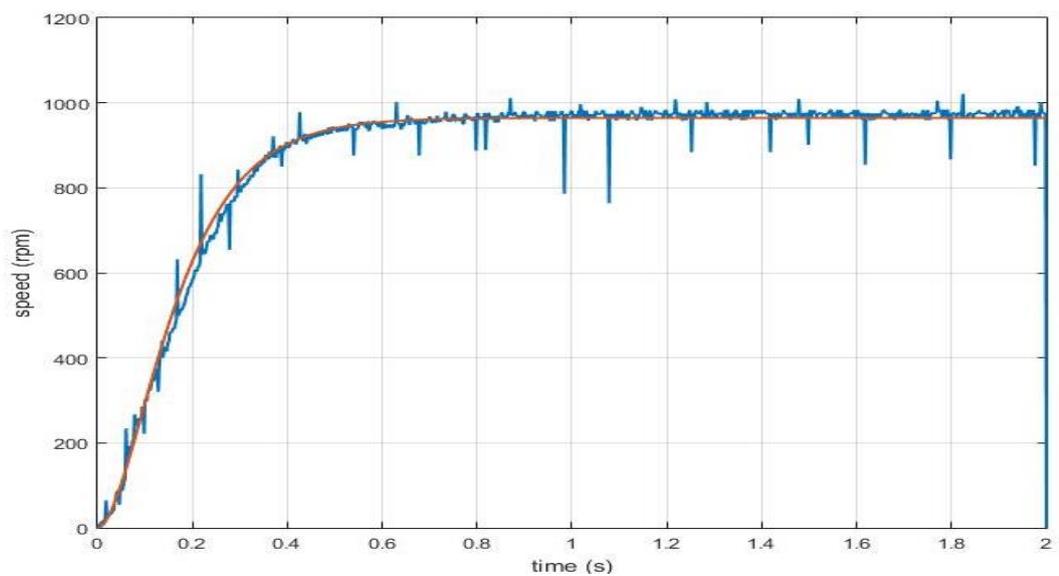


Gambar 3.19 Respon Torsi Mesin Bakar Hasil Pemodelan



Gambar 3.20 Respon Kecepatan Mesin Bakar Hasil Pemodelan

Respon kecepatan mesin bakar hasil identifikasi (Gambar 3.20) menunjukkan settling time = 0,4 s dan kecepatan steady state= 960 rpm. Grafik respon kecepatan mesin bakar dan hasil identifikasi ditunjukkan oleh Gambar 3.21.



Gambar 3.21 Grafik Respon Kecepatan Mesin Bakar Hasil Pemodelan

Validasi pemodelan mesin bakar dilakukan dengan menghitung nilai error menggunakan metode root mean square error (RMSE). Metode RMSE merupakan metode statistik untuk mengukur nilai rata-rata error pada deret waktu tertentu. Berikut ini adalah persamaan RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2}, i = 1, 2, 3 \dots n \quad (3.20)$$

$$e_i = A_i - M_i, i = 1, 2, 3 \dots n$$

dengan:

n : jumlah data

i : indeks data

e : nilai prosentase error

A : data hasil pemodelan

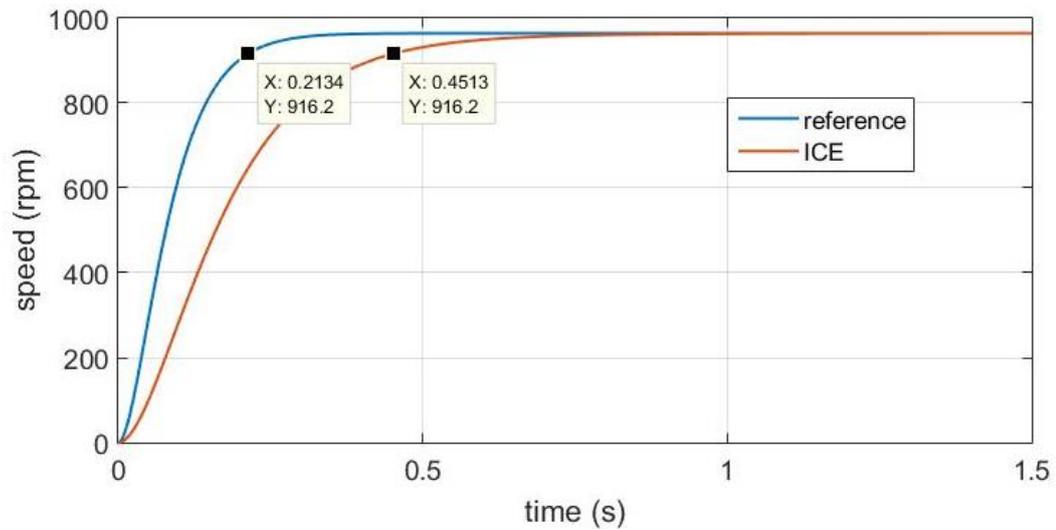
M : data pengukuran

Dari hasil perhitungan didapatkan nilai $RMSE = 21,026$ rpm.

3.5 Model Referensi

Model referensi merupakan model acuan bagi kontroler untuk mempercepat respon HEV. Respon kecepatan ICE yang semula memiliki time constant = 0,09s dipercepat dua kali menjadi 0,045s. Berikut ini adalah persamaan model referensi:

$$G(s) = \frac{2,02}{0,002025s^2 + 0,09s + 1}$$



Gambar 3.22 Grafik Respon Kecepatan Model Referensi dan ICE

Grafik respon kecepatan model referensi dan mesin bakar hasil (Gambar 3.22) menunjukkan settling time model referensi= 0,213s dan settling time mesin bakar= 0,45s.

3.6 Torsi Referensi

Torsi referensi motor DC brushless dihitung berdasarkan error kecepatan. Persamaan torsi mesin bakar dituliskan sebagai berikut:

$$T_{ICE} = (Js + B) \omega_{ICE} \quad (3.21)$$

Persamaan torsi model referensi dituliskan sebagai berikut:

$$T_{REF} = (Js + B) \omega_{REF} \quad (3.22)$$

Persamaan kecepatan model referensi:

$$\omega_{REF} = \omega_{ICE} + \Delta\omega_{REF} \quad (3.23)$$

Persamaan torsi model referensi:

$$T_{ICE} + \Delta T = T_{REF} \quad (3.24)$$

Substitusikan persamaan (3.21) dan persamaan (3.22) ke persamaan (3.24)

$$\begin{aligned} T_{ICE} + \Delta T &= T_{REF} \\ (Js + B) \omega_{ICE} + \Delta T &= (Js + B) \omega_{REF} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Substitusikan persamaan (3.23) ke persamaan (3.25)

$$\begin{aligned} (Js + B) \omega_{ICE} + \Delta T &= (Js + B) \omega_{REF} \\ (Js + B) \omega_{ICE} + \Delta T &= (Js + B) \omega_{ICE} + (Js + B) \Delta\omega_{REF} \\ \Delta T &= (Js + B) \Delta\omega_{REF} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Parameter ΔT selanjutnya menjadi torsi referensi motor DC brushless, sehingga:

$$T_{REF\ BLDC} = \Delta T = (Js + B) \Delta\omega_{REF} \quad (3.27)$$

Dalam bentuk persamaan diferensial:

$$T_{REF\ BLDC} = J \frac{d\Delta\omega_{REF}}{dt} + B\Delta\omega_{REF} \quad (3.28)$$

Dalam bentuk persamaan diskrit:

$$T_{REF\ BLDC} = J \Delta\omega_{REF}(k) - J \Delta\omega_{REF}(k-1) + B \Delta\omega_{REF}(k) \quad (3.29)$$

3.7 Perancangan Direct Torque Controller (DTC)

Direct torque controller merupakan metode pengaturan untuk motor DC brushless dengan feedback torsi. Implementasi DTC menggunakan PI controller. Persamaan PI controller dapat dituliskan sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3.30)$$

dengan:

$u(t)$: sinyal kontrol

K_p : konstanta proporsional

K_i : konstanta integral

$e(t)$: error torsi

Persamaan error $e(t)$:

$$e(t) = T_{ref\ BLDCM}(t) - T_{est}(t) \quad (3.31)$$

Persamaan torsi estimasi $T_{est}(t)$:

$$T_{est}(t) = I_M(t) K_{TM}(t) \quad (3.32)$$

dengan:

$T_{ref\ BLDCM}$: torsi referensi motor	(N.m)
T_{est}	: torsi estimasi motor	(N.m)
I_M	: arus motor	(A)
K_{TM}	: konstanta torsi motor	(N.m/A)

Arus motor merupakan arus DC link yang merupakan total jumlahan fasa UVW:

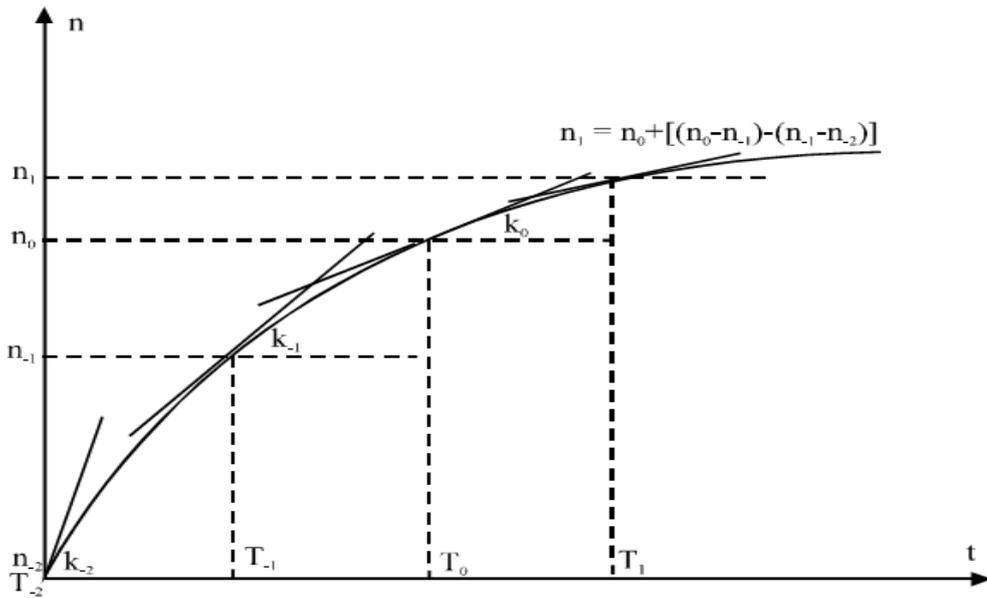
$$I_M = \frac{(I_U) + (I_V) + (I_W)}{3} \quad (3.33)$$

dengan:

I_U, I_V, I_W	: arus tiga fasa motor	(A)
-----------------	------------------------	-----

3.8 Perancangan Prediksi Torsi

Prediksi torsi dihitung dengan mempertimbangkan data torsi waktu sekarang dan waktu sebelumnya. Data waktu sekarang dinotasikan dengan n_0 , data pada satu langkah sebelumnya n_{-1} dan data pada dua langkah sebelumnya n_{-2} seperti ditunjukkan Gambar 3.23. Metode prediksi data dengan 1 step increment dapat digunakan dengan mudah untuk memprediksi torsi mendatang motor DC brushless, akan tetapi hanya cocok untuk sistem yang linier. Untuk prediksi torsi yang bersifat non linier maka one step increment akan menghasilkan error yang besar. Agar error prediksi yang dihasilkan kecil atau mendekati nilai sesungguhnya maka perlu ditambahkan menjadi 2 step increment.



Gambar 3.23 Prinsip Prediksi Data dengan 2 Step Increment [14]

Metode prediksi data dengan 1 step increment memiliki error yang relatif kecil dan hanya cocok untuk sistem linear. Untuk prediksi data pada sistem non linear dengan nilai prediksi yang mendekati nilai sebenarnya perlu ditingkatkan menjadi 2 step increment. Selisih data dengan 2 step increment:

$$\Delta n_{0-1} = n_0 - n_{-1}$$

$$\Delta n_{-1-2} = n_{-1} - n_{-2} \quad (3.36)$$

Sehingga data prediksi satu waktu mendatang n_1 menjadi:

$$n_1 = n_0 + \Delta n_{0-1} + \Delta n_{-1-2} \quad (3.37)$$

Dari grafik prediksi data (Gambar 3.22) dapat ditentukan slope dengan 2 step increment:

$$k_{0-1} = \lim_{T \rightarrow 0, T \neq 0} \frac{n_0 - n_{-1}}{T} = \frac{d\Delta n_{0-1}}{dt} \quad (3.38)$$

$$k_{-1-2} = \lim_{T \rightarrow 0, T \neq 0} \frac{n_{-1} - n_{-2}}{T} = \frac{d\Delta n_{-1-2}}{dt} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} \Delta k &= k_{0-1} - k_{-1-2} \\ &= k_{1-0} - k_{0-1} \end{aligned} \quad (3.40)$$

Persamaan slope prediksi:

$$k_{1-0} = k_{0-1} + \Delta k \quad (3.41)$$

Prediksi data dengan 2 step increment:

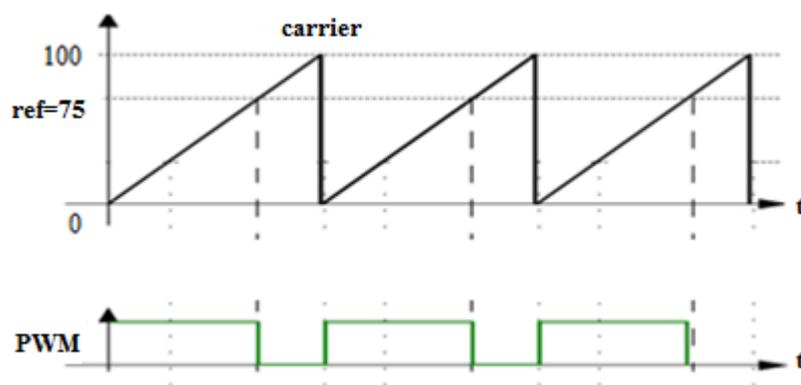
$$n_1 = k_{1-0} T + n_0 \quad (3.42)$$

3.9 Pulse Width Modulation (PWM) Generator

Pengendalian arus motor motor DC brushless menggunakan switching sinyal PWM pada gate transistor. PWM merupakan metode untuk membandingkan sinyal referensi dengan sinyal carrier (berupa sinyal saw tooth dengan frekuensi 20 khz). Output PWM berupa sinyal pulsa dengan duty cycle dari 0 – 100%. Dengan menggunakan sinyal PWM maka pengendalian arus DC link menjadi lebih sederhana karena cukup menggunakan satu sinyal kontrol, berbeda dengan metode konvensional yang membutuhkan tiga kontroler hysteresis untuk pengendalian arus masing-masing fasa UVW. Persamaan sinyal output PWM:

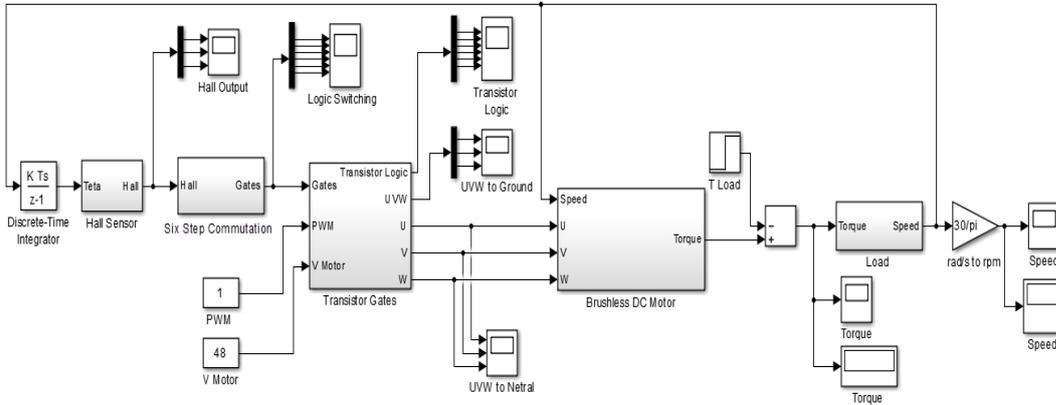
$$V_{out} = \begin{cases} 1 & \text{Referensi} \geq \text{Carrier} \\ 0 & \text{Referensi} < \text{Carrier} \end{cases} \quad (3.43)$$

Ilustrasi pembangkitan sinyal PWM ditunjukkan Gambar 3.24.



Gambar 3.24 Prinsip Pembangkitan Sinyal PWM

Diagram blok simulasi motor DC brushless ditunjukkan oleh Gambar 3.25.



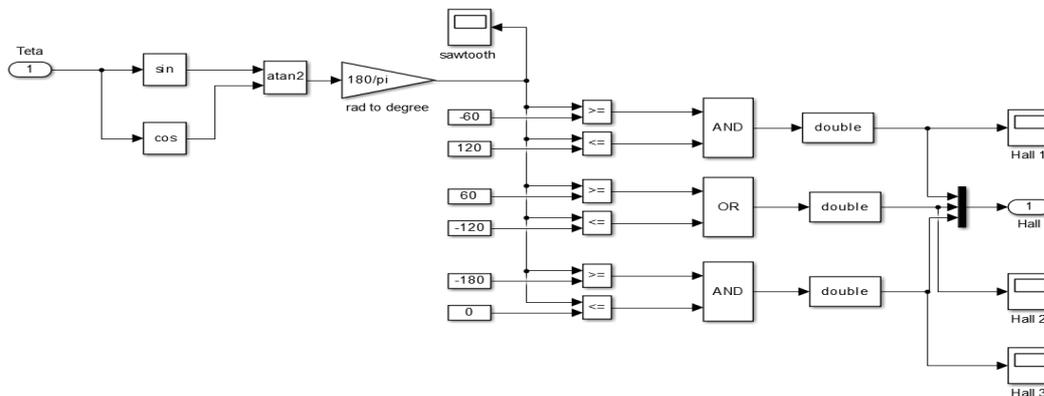
Gambar 3.25 Diagram Simulink Brushless DC Motor

3.10 Simulasi Motor DC Brushless

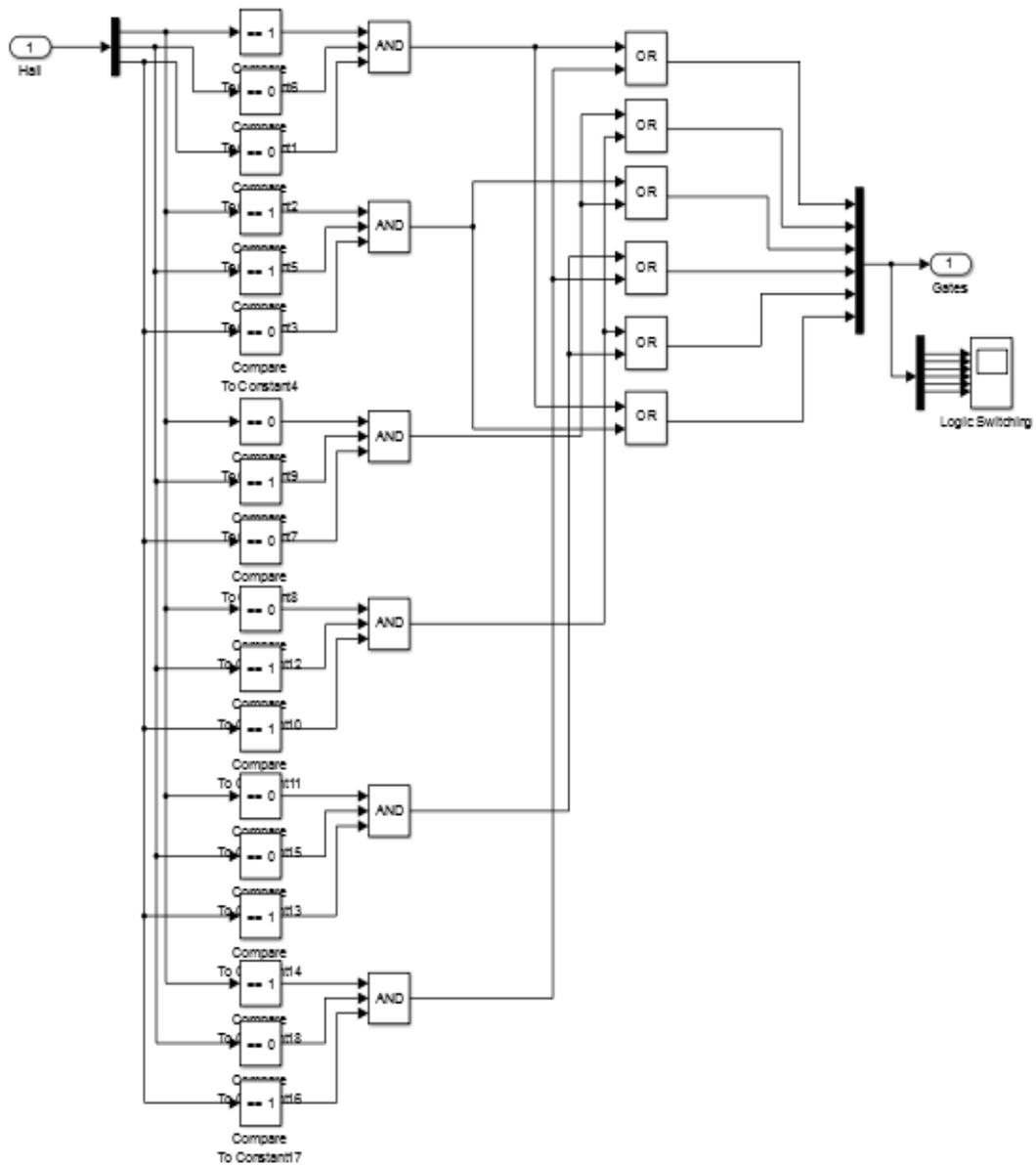
Dari hasil identifikasi parameter yang telah didapatkan kemudian dibuat simulasi motor DC brushless yang disusun oleh dari sub sistem:

1. Hall sensor
2. Six step commutation
3. Transistor gates
4. PWM generator
5. Brushless DC motor
6. Load

Sub sistem hall sensor mengambil input posisi rotor (teta) dan mengubahnya menjadi 3 bit sinyal output hall sensor seperti Gambar 3.26.

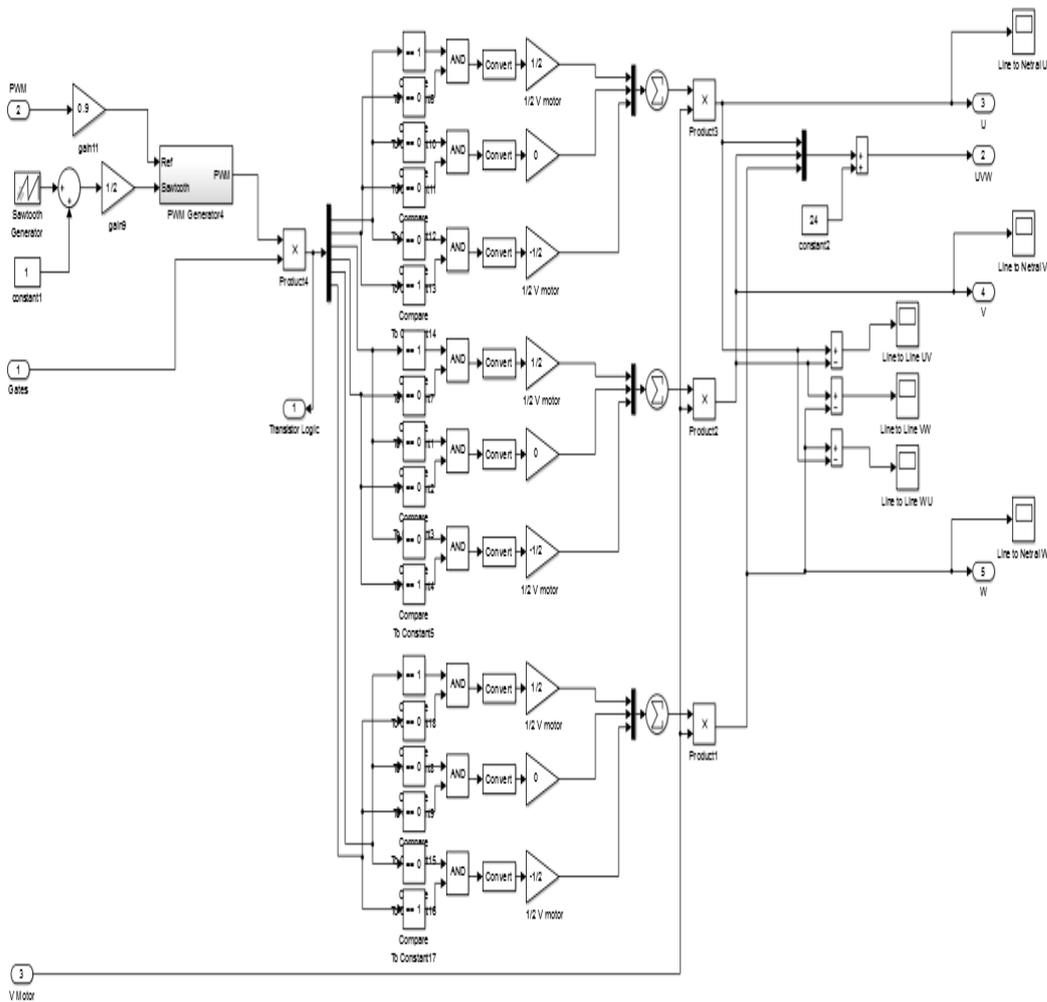


Gambar 3.26 Diagram Simulink Sub Sistem Hall Sensor



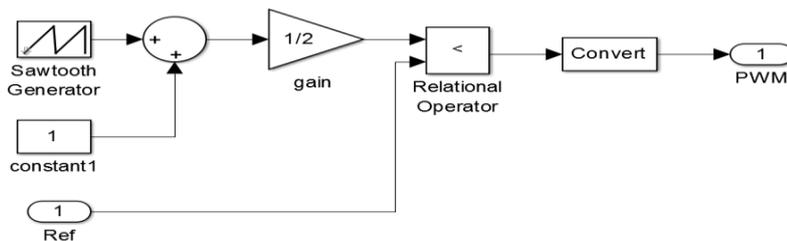
Gambar 3.27 Diagram Simulink Sub Sistem Six Step Commutation

Sub sistem six step commutation mengatur logika switching transistor berdasarkan data input hall sensor. Detil sub sistem six step commutation ditunjukkan Gambar 3.27. Sub sistem transistor gates merupakan representasi dari komponen switching transistor. Output transistor gates merupakan tegangan 3 fasa UVW . Detil sub sistem transistor gates ditunjukkan Gambar 3.28.



Gambar 3.28 Diagram Simulink Sub Sistem Transistor Gates

Sinyal carrier untuk pembangkitan sinyal PWM dihasilkan oleh saw tooth generator dengan frekuensi 20Khz. Relational operator digunakan untuk membandingkan sinyal carrier dengan sinyal referensi sehingga dihasilkan sinyal output dengan lebar pulsa termodulasi atau sinyal PWM. Detil sub sistem PWM generator ditunjukkan Gambar 3.29.



Gambar 3.29 Diagram Simulink Sub Sistem PWM Generator

Halaman ini sengaja dikosongkan

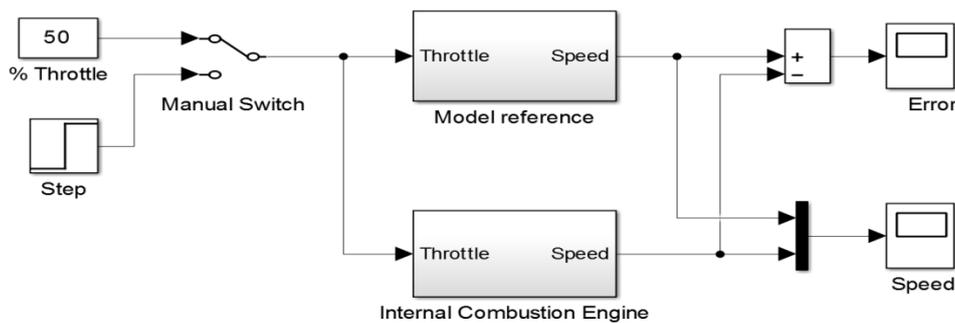
BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

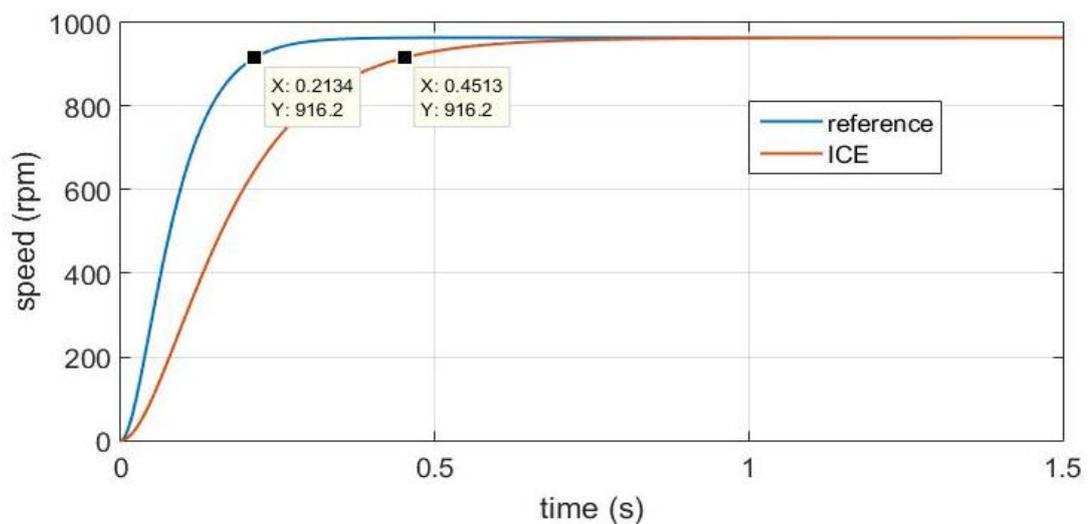
4.1 Pengujian Mesin Bakar

Pengujian mesin bakar bertujuan untuk mengetahui respon kecepatan mesin bakar. Pengujian dilakukan dengan memberikan throttle sebesar 50% seperti Gambar 4.1. Respon kecepatan mesin bakar kemudian dibandingkan dengan model referensi.

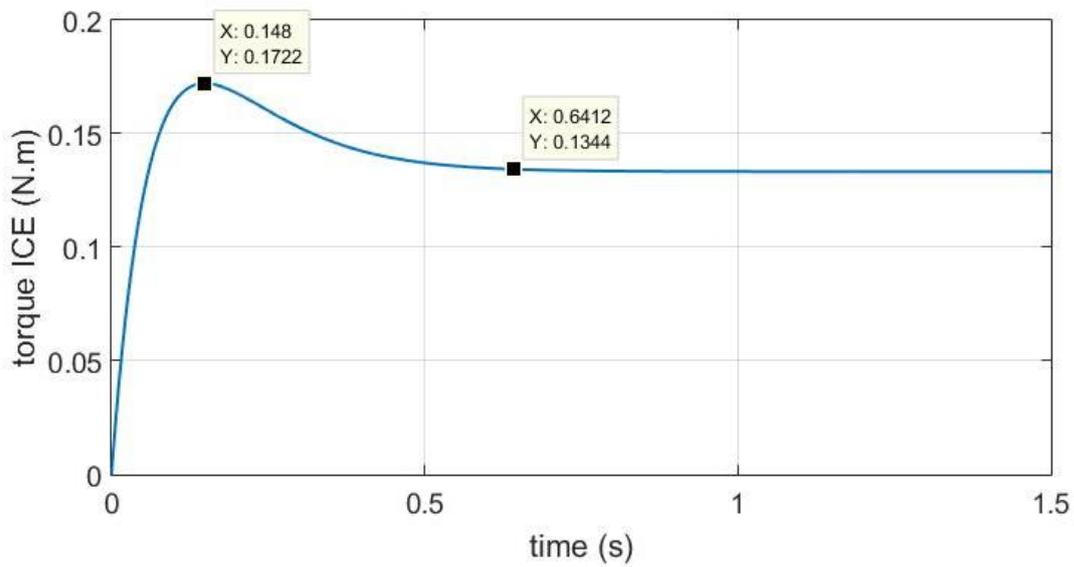
Grafik respon kecepatan mesin bakar (Gambar 4.2) menunjukkan bahwa settling time model referensi= 0,21s dan settling time mesin bakar=0,45s. sehingga terdapat selisih keterlambatan waktu respon= 0,24 s.



Gambar 4.1 Diagram Simulink Pengujian Mesin Bakar

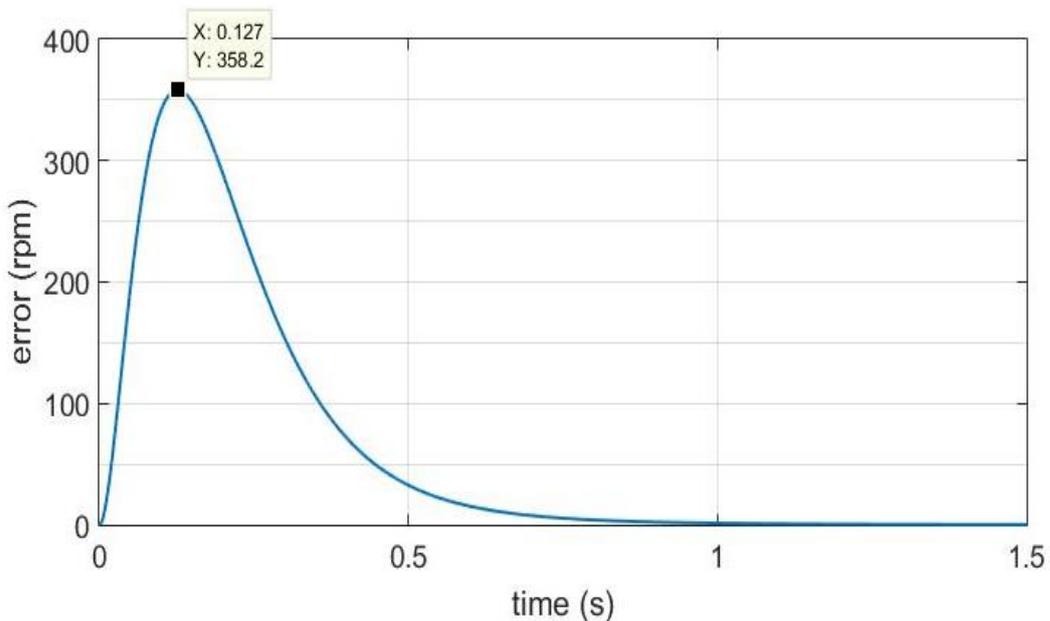


Gambar 4.2 Respon Kecepatan Mesin Bakar



Gambar 4.3 Respon Torsi Mesin Bakar

Grafik respon kecepatan torsi mesin bakar (Gambar 4.3) menunjukkan bahwa torsi maksimum = 0,17 N.m dan torsi steady state=0,13 N.m. Dari grafik error kecepatan (Gambar 4.4) dapat dilihat bahwa error terbesar bernilai 358,2 rpm pada detik 0,127s dan secara eksponensial turun. Berdasarkan perhitungan didapatkan RMSE= 80,29 rpm. Hasil pengujian mesin bakar ditunjukkan pada Tabel 4.1.



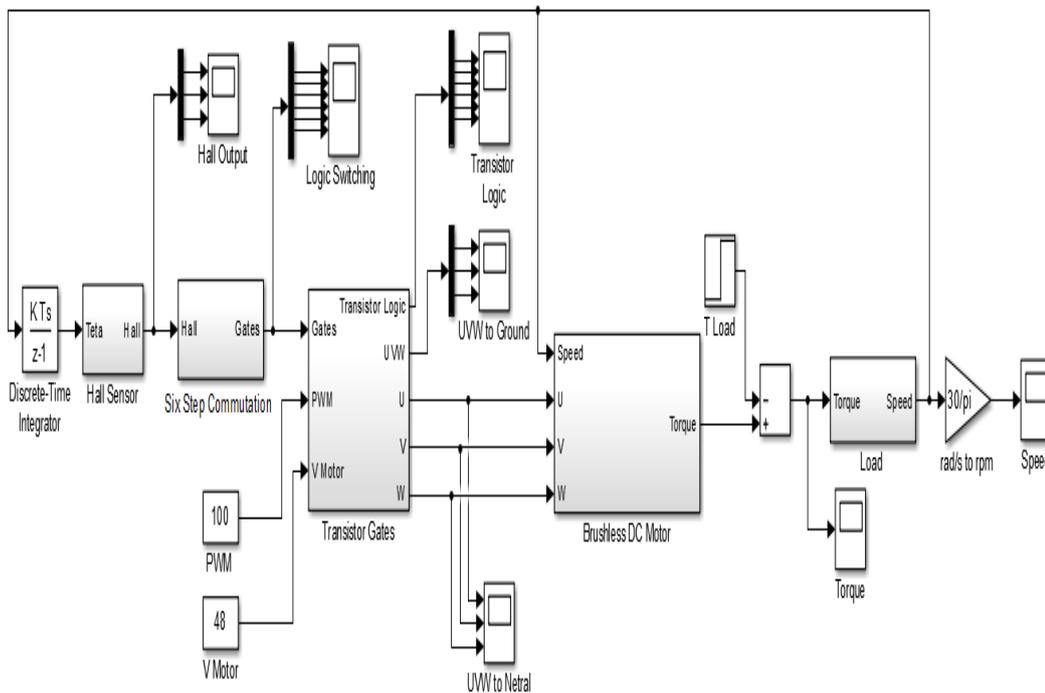
Gambar 4.4 Grafik Error Kecepatan Mesin Bakar Terhadap Model Referensi

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Mesin Bakar

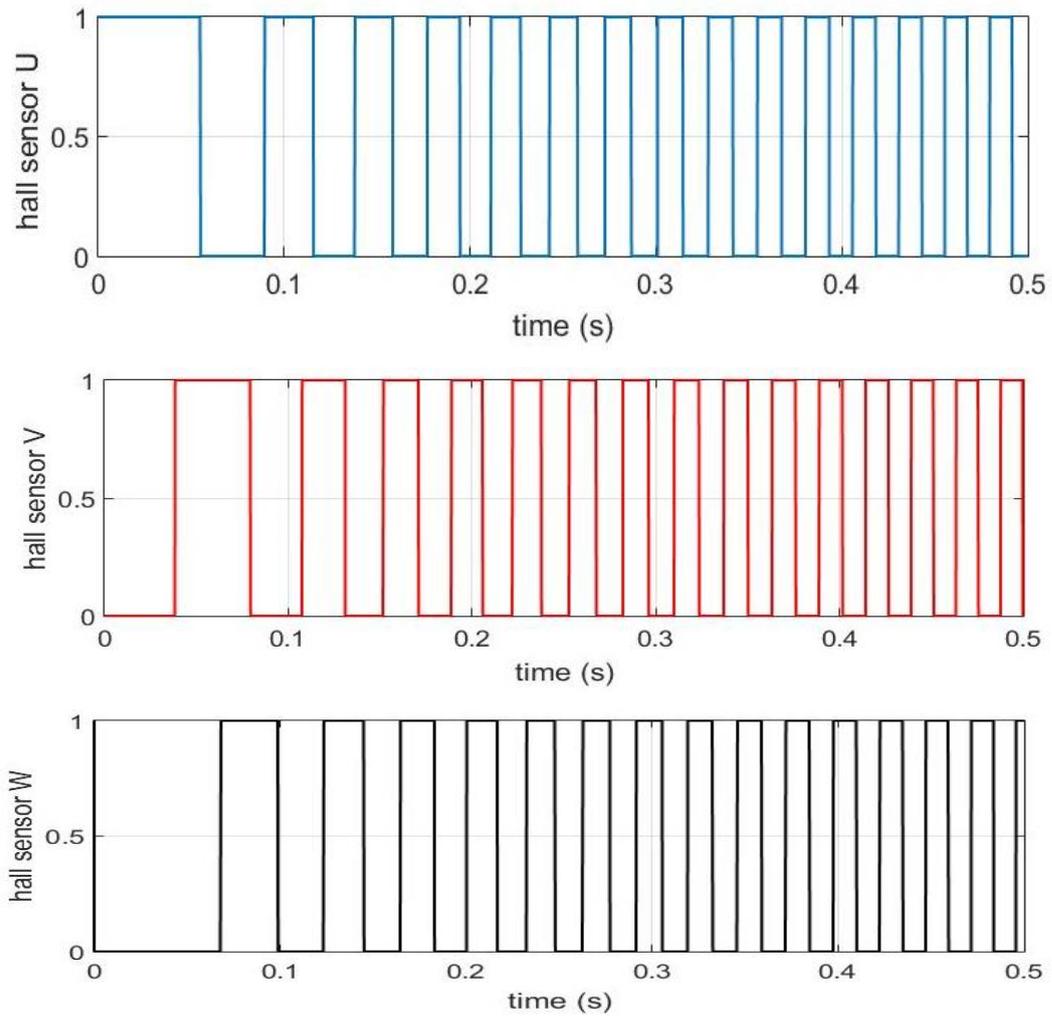
Settling Time		Error maksimum		RMSE
Model reference	ICE	Speed	Time	
0,21 s	0,45 s	358,2 rpm	0,127 s	80,29 rpm

4.2 Pengujian Motor DC Brushless

Pengujian motor DC brushless bertujuan untuk mengetahui respon kecepatan motor DC brushless pada kondisi beban minimum. Pengujian dilakukan secara open loop dengan memberikan sinyal kontrol PWM sebesar 100% dan frekuensi sinyal PWM sebesar 20 KHz seperti ditunjukkan Gambar 4.5. Tegangan motor diatur pada nilai 48 volt. Pengamatan dilakukan untuk mengetahui karakteristik hall sensor, arus tiga fasa, nilai back EMF, tegangan line to line, tegangan line to netral, respon arus, respon torsi, dan respon kecepatan motor DC brushless.

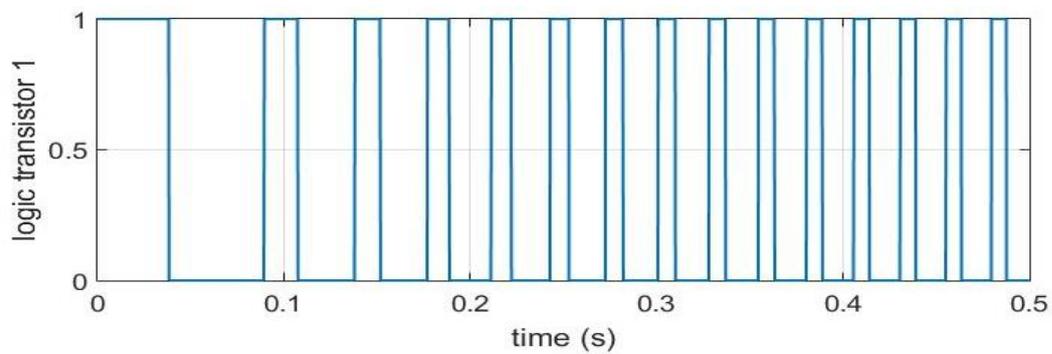


Gambar 4.5 Diagram Blok Simulasi Motor DC Brushless

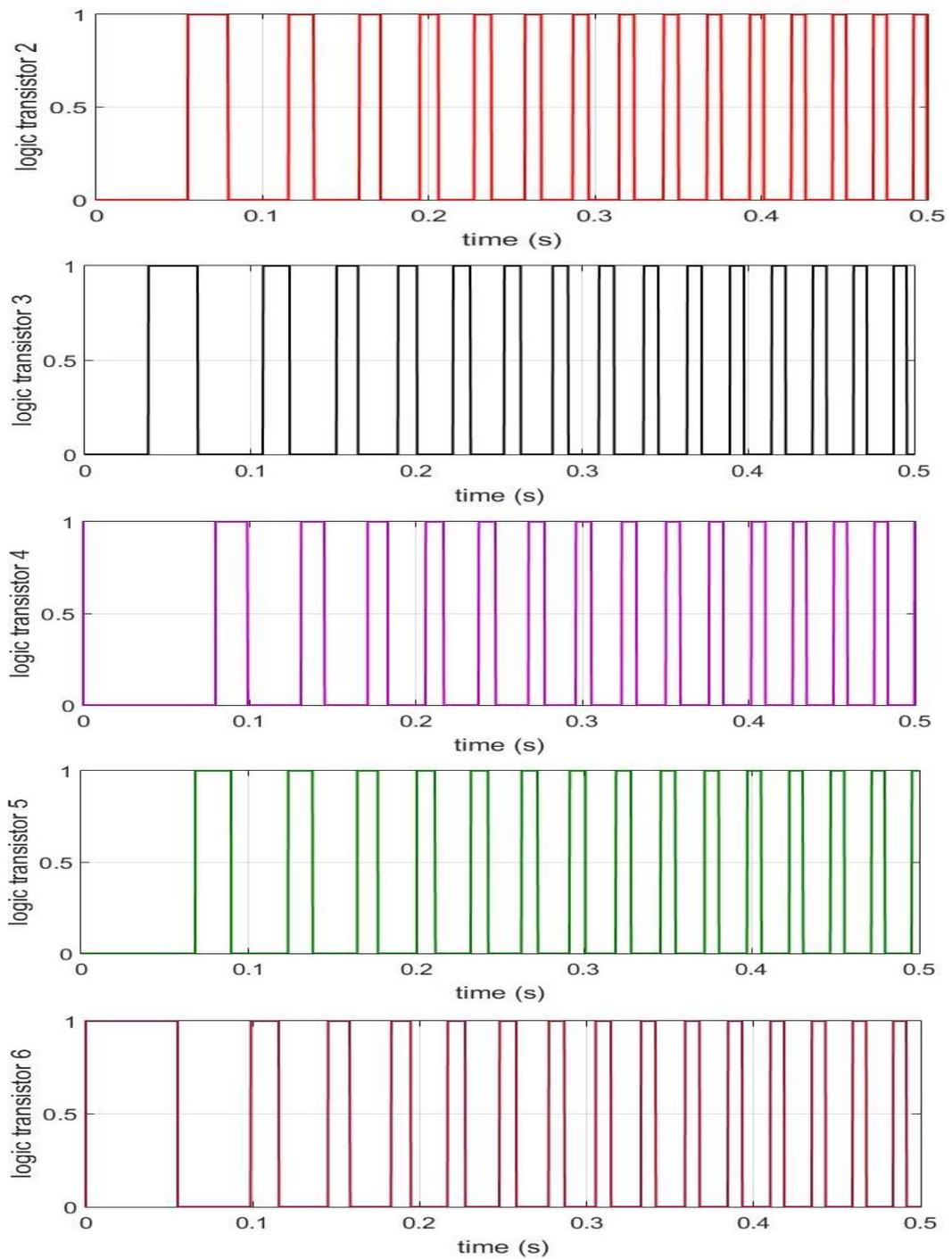


Gambar 4.6 Sinyal Output Hall Sensor

Hasil pengujian menunjukkan bahwa data output hall sensor (Gambar 4.6) menunjukkan bahwa antar fasa terdapat beda sudut 120° .

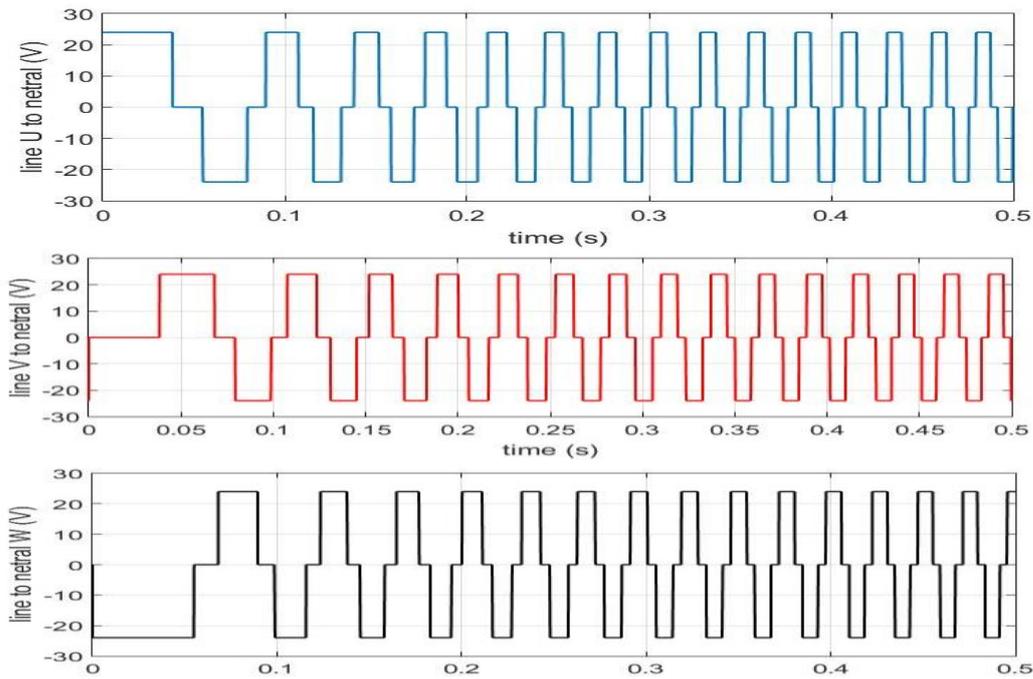


Gambar 4.7 (a) Sinyal Switching Transistor dengan PWM 100%



Gambar 4.7 (b) Sinyal Switching Transistor dengan PWM 100%

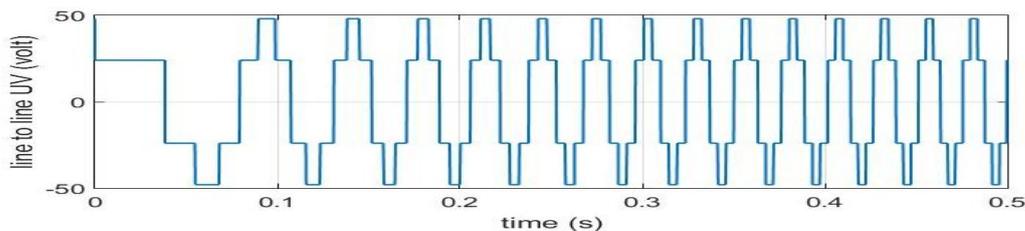
Pengamatan terhadap sinyal switching 6 transistor (Gambar 4.7) menunjukkan logic switching berubah setiap 60° . Pada periode waktu yang sama terdapat 2 transistor yang aktif.



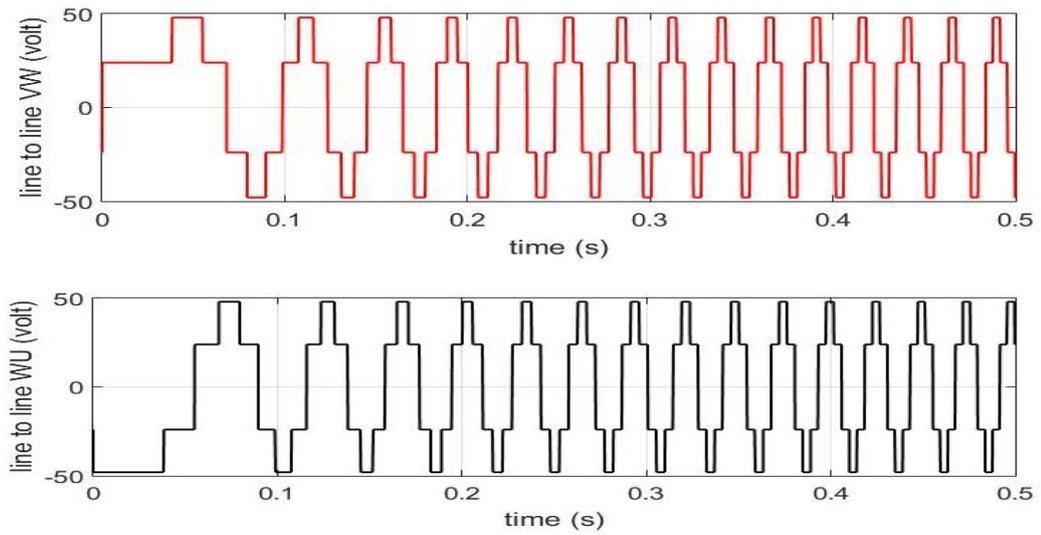
Gambar 4.8 Tegangan Line to Netral dengan PWM 100%

Pengamatan terhadap tegangan line to netral (Gambar 4.8) menunjukkan tegangan UVW berubah setiap 60° sehingga pada satu siklus terdapat 6 kondisi level tegangan yaitu nol – positif – positif – nol – negatif – negatif. Polaritas antar fasa selalu berpasangan dimana salah satu nol, salah satu positif dan polaritas lainnya negatif. Jumlah tegangan 3 fasa selalu nol karena simetris.

Pengamatan terhadap tegangan line to line UV –VW dan WU (Gambar 4.9) menunjukkan tegangan UVW berubah setiap 60° sehingga pada satu siklus terdapat 6 kondisi level tegangan yaitu positif $\frac{1}{2}$ - positif – positif $\frac{1}{2}$ – negatif $\frac{1}{2}$ – negatif - negatif $\frac{1}{2}$. Tegangan total selalu bernilai nol, karena beban simetris 3 fasa.

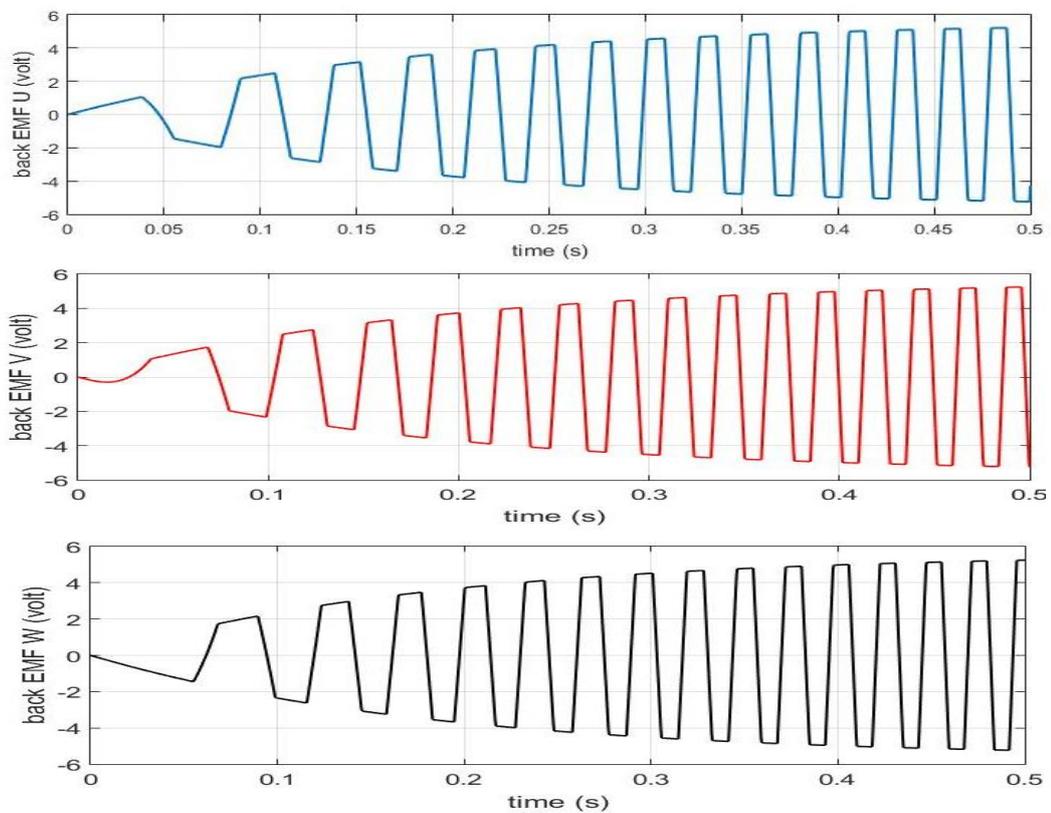


Gambar 4.9 Tegangan Line to Line UV dengan PWM 100%

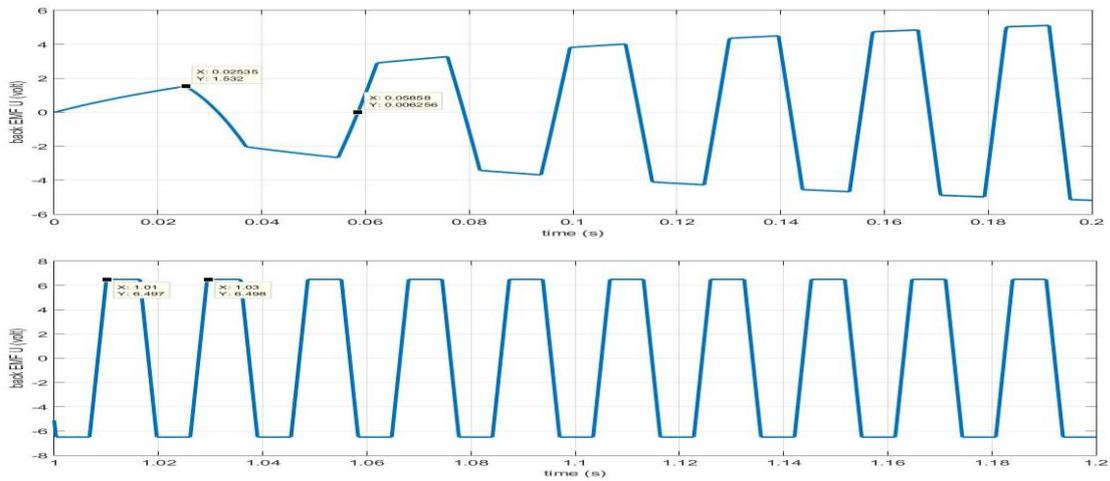


Gambar 4.9 (b) Tegangan line To Line VW dan WU dengan PWM 100%

Pengamatan terhadap back EMF fasa UVW (Gambar 4.10) menunjukkan bahwa back EMF mempunyai beda sudut antar fasa sebesar 120° .



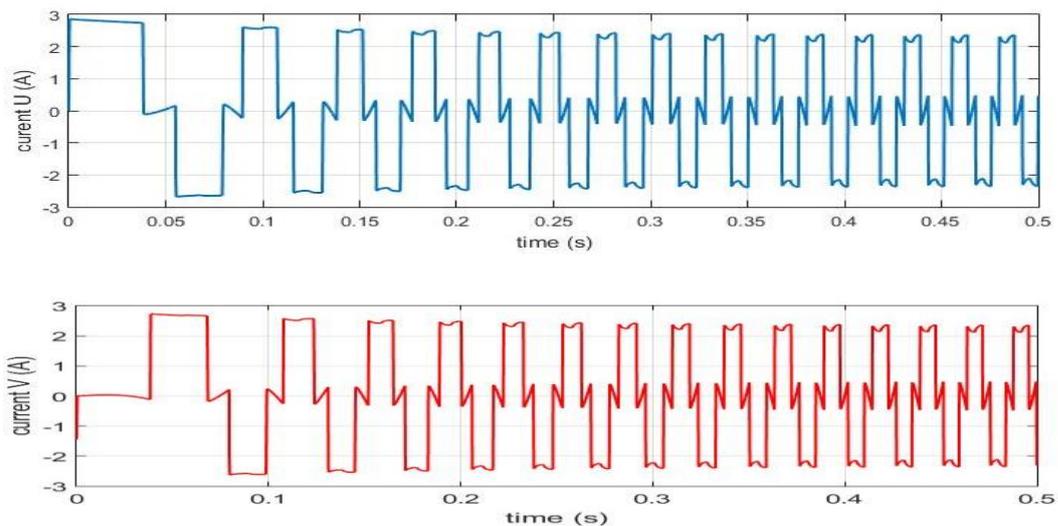
Gambar 4.10 Back EMF Fasa UVW



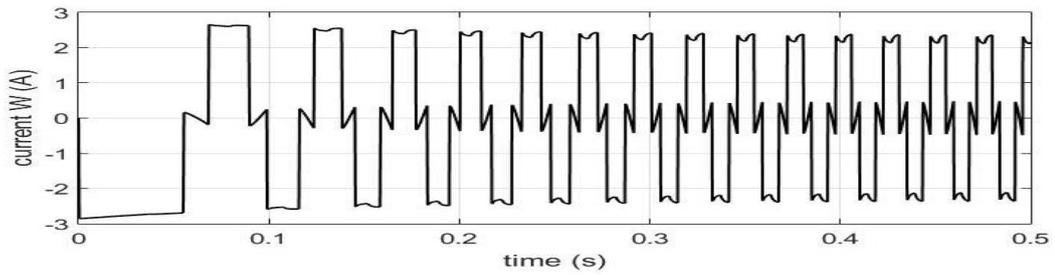
Gambar 4.11 Back EMF Fasa U Pada Kondisi Starting dan Steady State

Pengamatan terhadap back EMF pada kondisi starting dan steady state (Gambar 4.11) dapat dilihat nilai back EMF starting = 1,532 V dan pada kondisi steady state= 6,497 V. Pada kondisi starting periode back EMF=0,0585s dan pada kondisi steady state=0,02s.

Pengamatan terhadap arus fasa UVW (Gambar 4.12) menunjukkan bahwa arus UVW mempunyai beda sudut antar fasa sebesar 120° . Pada satu siklus terdapat 6 kondisi level tegangan yaitu nol – positif – positif – nol – negatif – negatif. Polaritas antar fasa selalu berpasangan dimana salah satu nol, salah satu positif dan polaritas lainnya negatif.

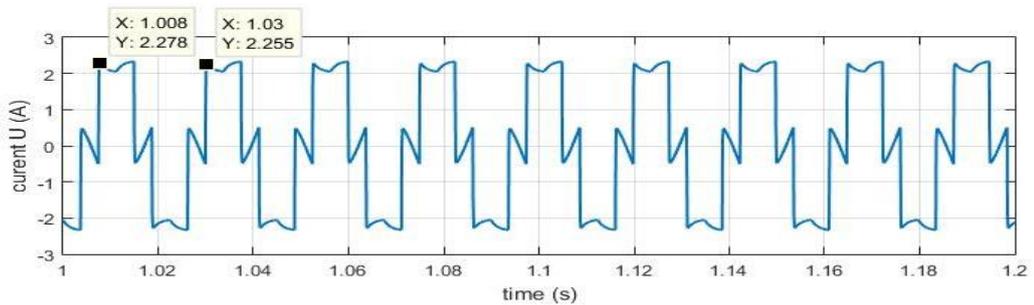
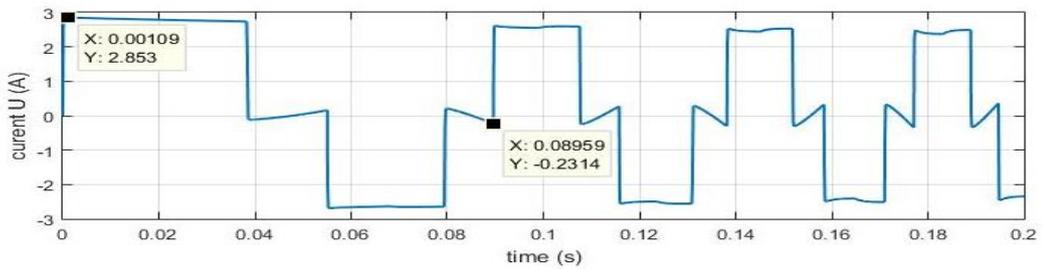


Gambar 4.12 Arus fasa U dan V



Gambar 4.12 (b) Arus fasa W

Pengamatan terhadap output arus fasa U pada kondisi starting dan steady state (Gambar 4.13). Hasil pengujian arus fasa U ditunjukkan pada tabel 4.2.

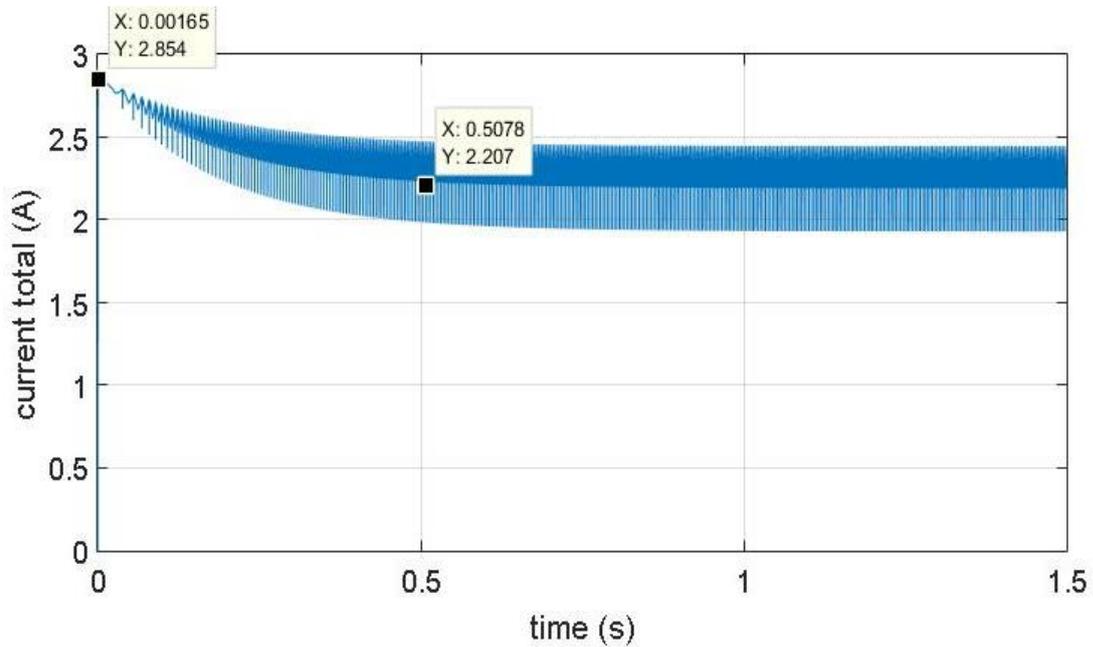


Gambar 4.13 Arus Fasa U pada Kondisi Starting dan Steady State

Keseluruhan hasil pengujian arus fasa motor DC brushless ditunjukkan Tabel 4.2. Pengamatan terhadap arus total motor DC brushless pada kondisi starting dan steady state (Gambar 4.14) dapat dilihat bahwa arus starting bernilai= 2,854 A dan pada kondisi steady state=2,207 A.

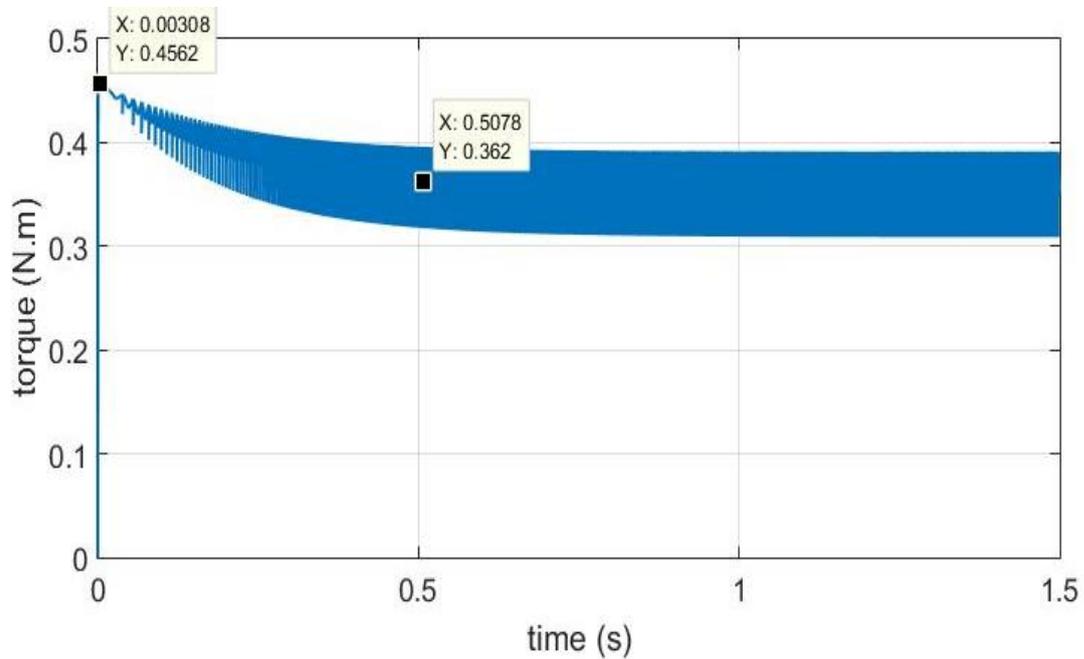
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Arus Fasa Motor DC Brushless

Arus		Periode	
Starting	Steady State	Starting	Steady State
2,85 A	2,27 A	0,08 s	0,02 s

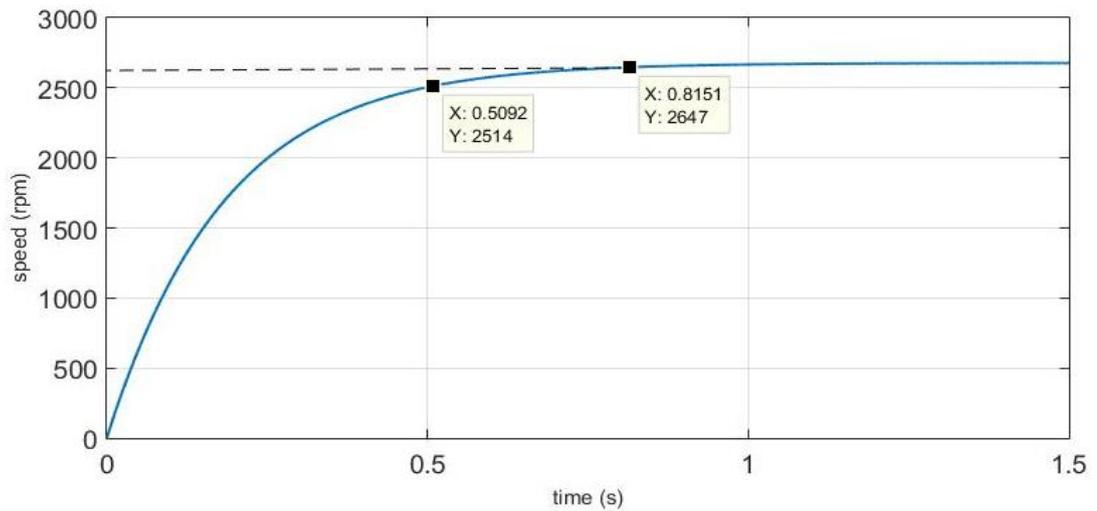


Gambar 4.14 Arus Total Motor DC Brushless

Pengamatan terhadap torsi motor DC brushless pada kondisi starting dan steady state (Gambar 4.15) dapat dilihat bahwa torsi starting bernilai= 0,45 N.m dan pada kondisi steady state=0,36 N.m.



Gambar 4.15 Torsi Motor DC Brushless



Gambar 4.16 Respon Kecepatan Motor DC Brushless

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Motor DC Brushless

Back EMF Steady State	Arus Steady State	Torsi Steady State	Kecepatan Steady State	Settling Time
5,58 V	2,207 V	0,36 N.m	2647 rpm	0,5 s

Grafik respon kecepatan (Gambar 4.16) menunjukkan bahwa kecepatan steady state motor DC brushless = 2647 rpm dan settling time=0,5s. Tabel 4.3 menunjukkan data hasil pengujian motor DC brushless.

4.3 Pengujian Hybrid Electric Vehicle

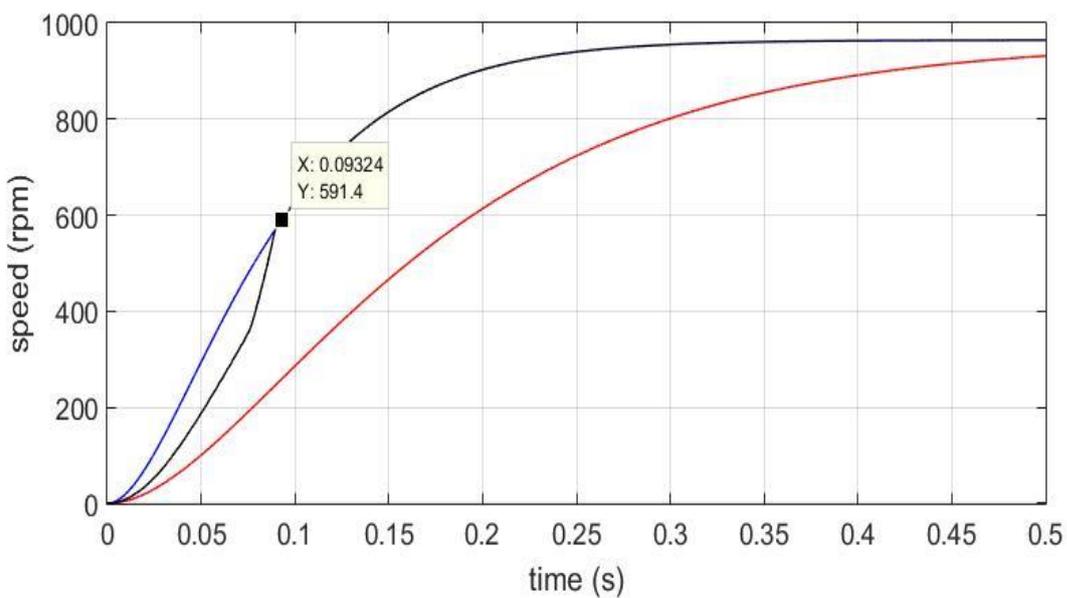
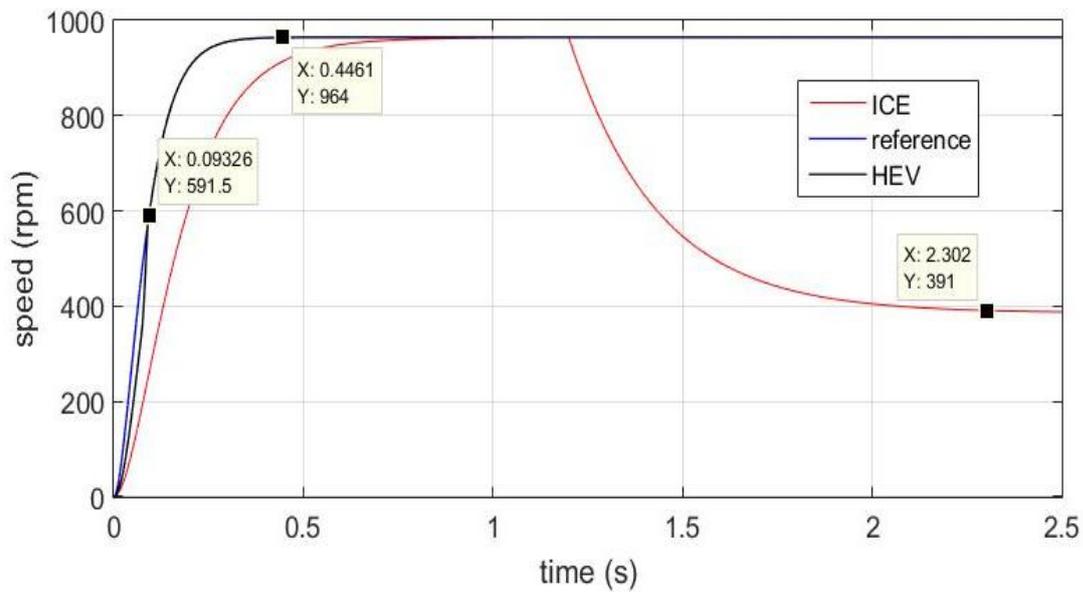
Pengujian HEV bertujuan untuk mengetahui respon kecepatan HEV dengan predictive direct torque controller. Berikut ini adalah hasil pengujian:

4.3.1 Pengujian HEV dengan Direct Torque Controller

Pengujian dilakukan untuk mengetahui respon direct torque controller. Nilai konstanta PI seperti ditunjukkan ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Parameter Direct Torque Controller

Setpoint Throttle	Gain Kontroler		Torsi Beban
	Kp	Ki	
50%	10	2	0,08 N.m pada detik ke 1,2s



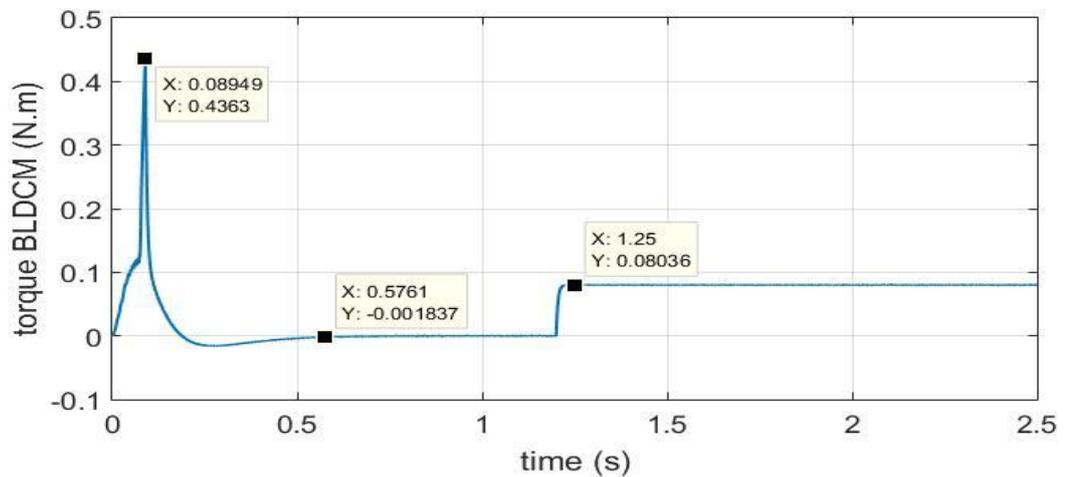
Gambar 4.17 (a) Grafik Respon Kecepatan Steady State HEV

(b) Grafik respon Kecepatan Transient HEV

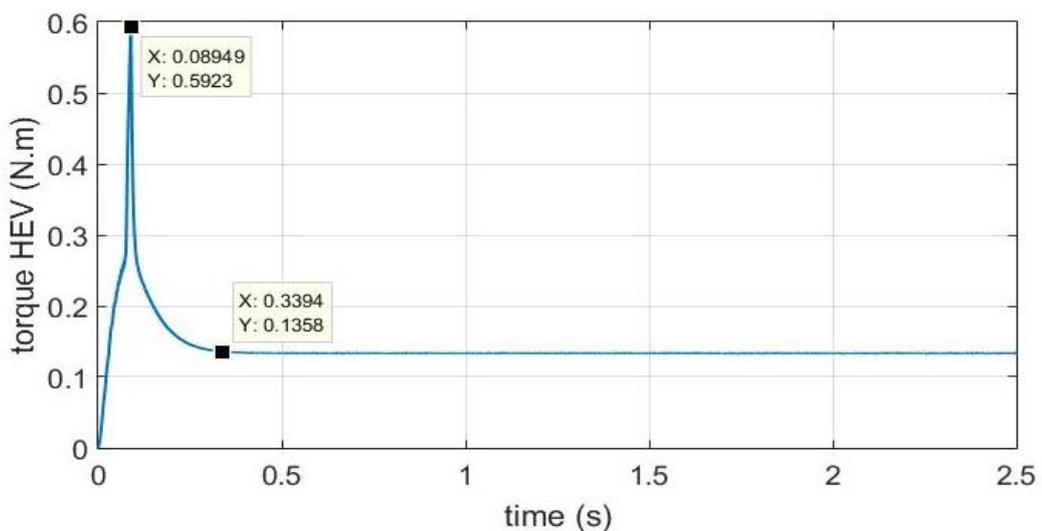
Grafik respon kecepatan (Gambar 4.17) menunjukkan bahwa setpoint dapat tercapai dengan kecepatan steady state=964 rpm. Pada detik 0,093s error menuju titik minimum. Pada detik ke 1,2s diberikan torsi beban dan respon mesin bakar mengalami penurunan kecepatan menjadi 391 rpm. Direct torque controller mampu mempertahankan kecepatan steady state.

Respon torsi motor DC brushless (Gambar 4.18) sebagai penggerak sekunder memberikan torsi tambahan maksimum=0,43 N.m dan menjadi nol pada detik 0,57s. Torsi menjadi nol karena kecepatan referensi telah tercapai. Motor DC brushless kembali memberikan torsi tambahan =0,008 N.m pada detik 1,25s sebagai kompensasi torsi beban.

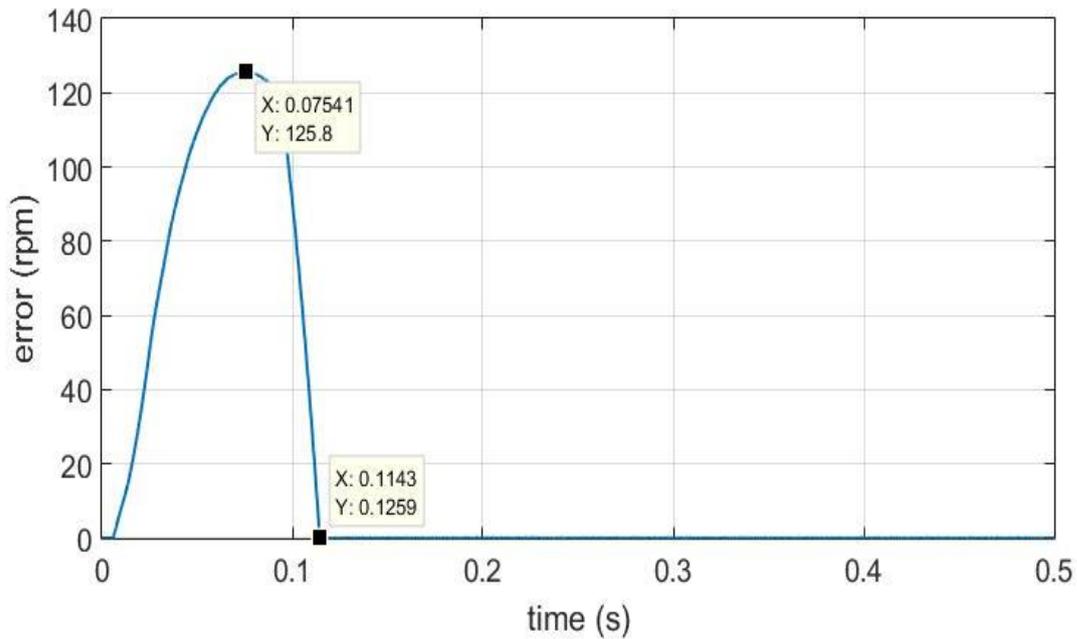
Respon torsi HEV (Gambar 4.19) menunjukkan torsi maksimum=0,59 N.m pada detik ke 0,08s. Torsi steady state=0,135s tercapai pada detik 0,339s. Meskipun diberikan torsi beban pada detik 1,2s, HEV mampu mempertahankan torsi steady state.



Gambar 4.18 Respon Torsi Motor DC Brushless dengan Direct Torque Control



Gambar 4.19 Respon Torsi HEV dengan Direct Torque Control



Gambar 4.20 Grafik Error Kecepatan Transient HEV

Error kecepatan transient HEV seperti pada Gambar 4.20 menunjukkan nilai maksimum error=125,8 rpm terjadi pada detik 0,075s. Error menuju titik minimum=0,012rpm pada detik ke 0,11s. Didapatkan perhitungan RMSE=35,56 rpm.

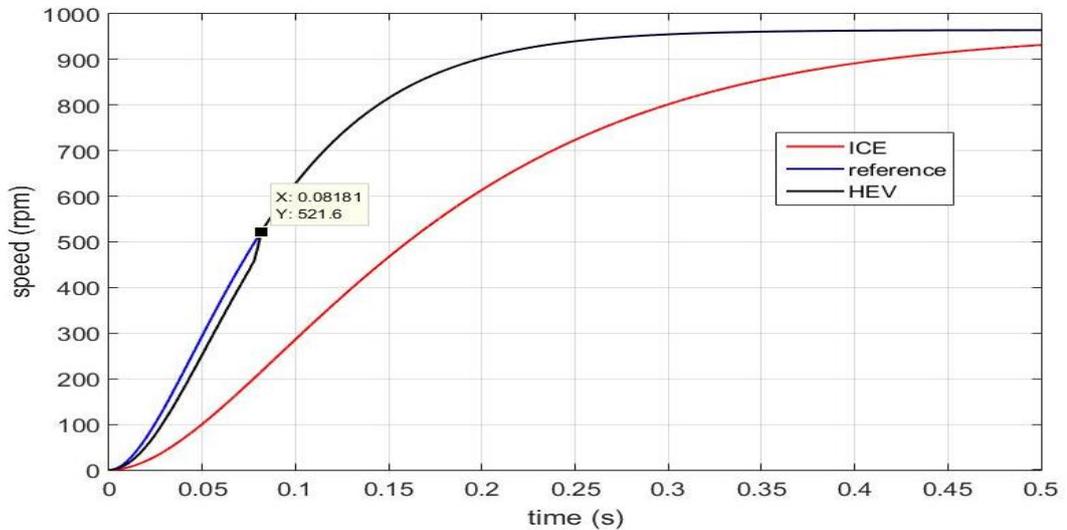
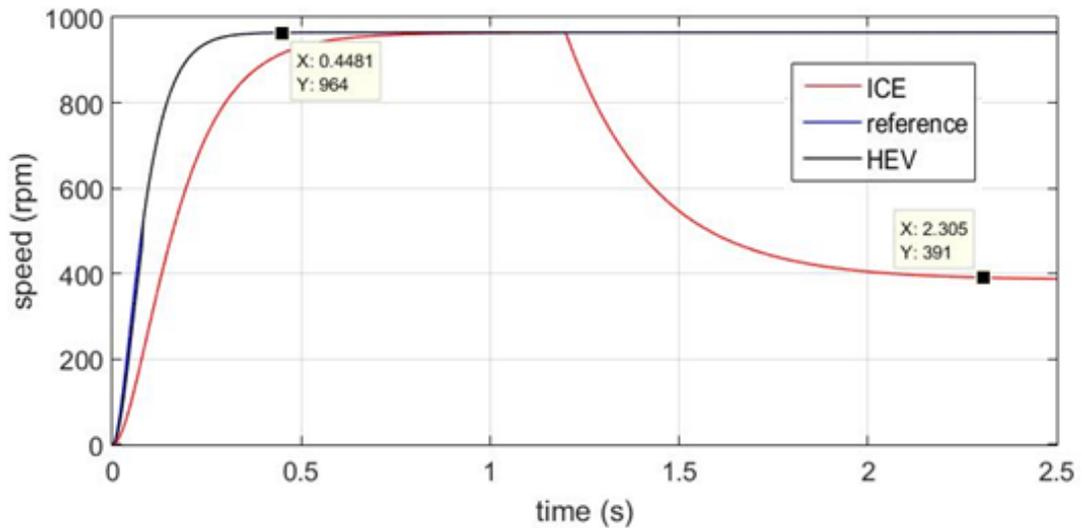
4.3.2 Pengujian HEV dengan Predictive Direct Torque Control

Pengujian dilakukan untuk mengetahui respon kontroler dengan tambahan mekanisme prediksi torsi. Nilai gain kontroler PI seperti ditunjukkan Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Parameter Predictive Direct Torque Controller

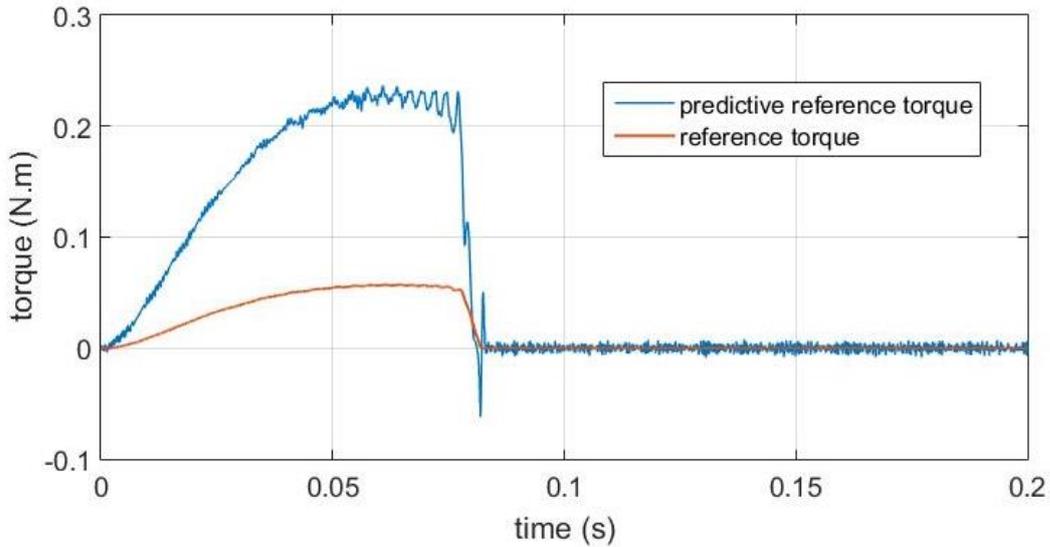
Setpoint Throttle	Gain Kontroler		Torsi Beban
	Kp	Ki	
50%	10	2	0,08 N.m pada detik ke 1,2s

Grafik respon kecepatan Gambar 4.21 menunjukkan bahwa setpoint dapat tercapai dengan kecepatan steady state=964 rpm. Pada detik ke 1,2s diberikan torsi beban dan respon mesin bakar mengalami penurunan kecepatan menjadi 391 rpm. Kontroler predictive direct torque controller mampu mempertahankan kecepatan steady state.



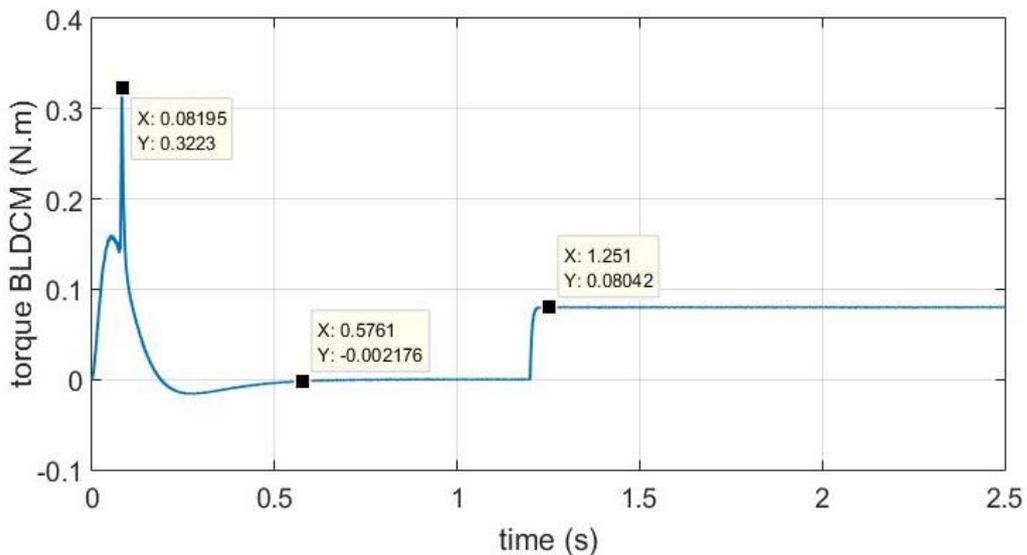
Gambar 4.21 (a) Respon Kecepatan Steady State HEV

(b) Respon Kecepatan Transient HEV

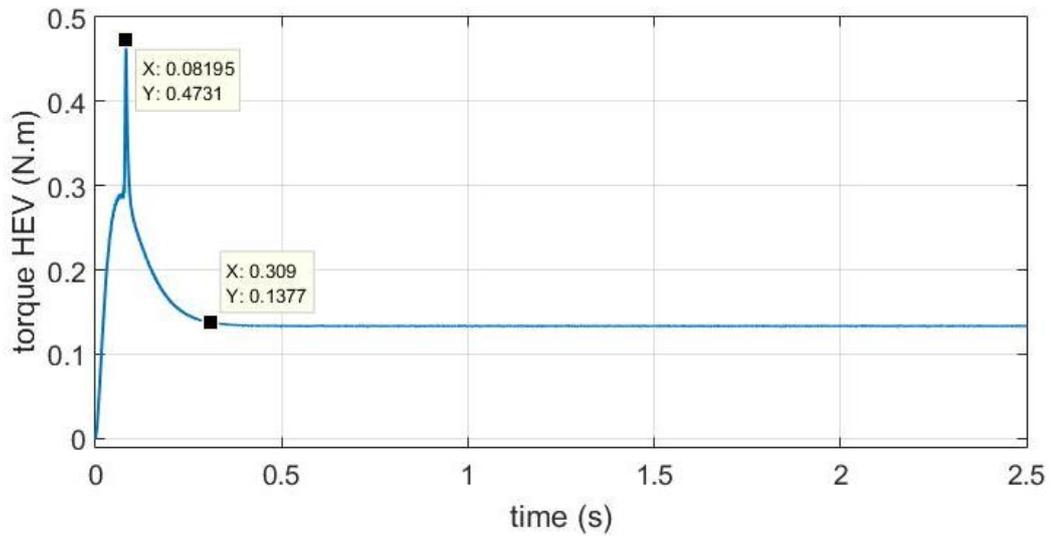


Gambar 4.22 Torsi Referensi Torsi Prediksi Referensi Motor

Torsi prediksi referensi motor DC brushless memiliki pola respon yang hampir sama dengan torsi referensi motor DC brushless (Gambar 4.22). Respon torsi motor DC brushless (Gambar 4.23) memberikan torsi tambahan maksimum=0,32 N.m dan menjadi nol pada detik 0,57s. Torsi menjadi nol karena kecepatan referensi telah tercapai. Motor DC brushless kembali memberikan torsi tambahan =0,008 N.m pada detik 1,25s sebagai kompensasi torsi beban.



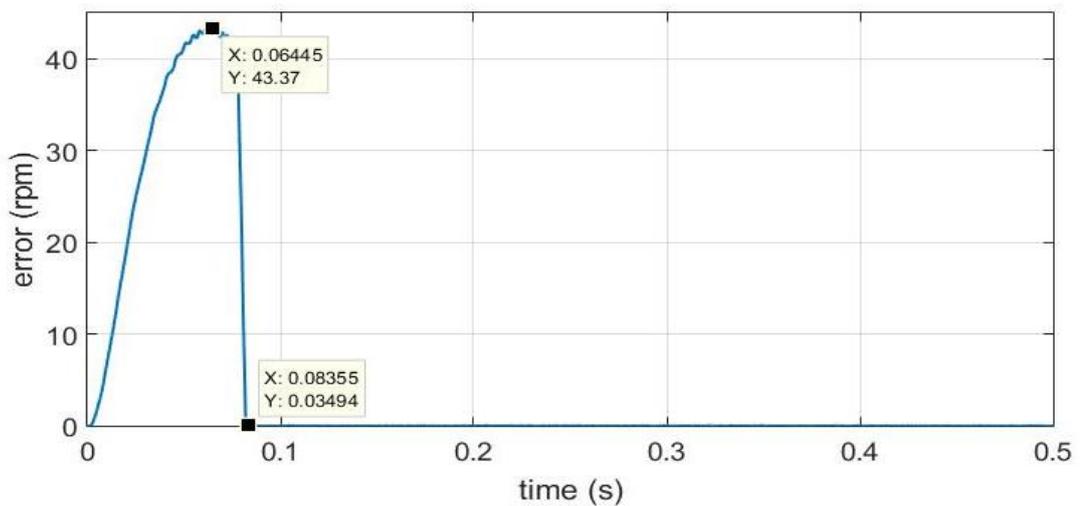
Gambar 4.23 Respon Torsi Motor dengan Predictive Direct Torque Control



Gambar 4.24 Respon Torsi HEV dengan Predictive Direct Torque Control

Respon torsi HEV (Gambar 4.24) menunjukkan torsi maksimum=0,47 N.m pada detik ke 0,084s. Torsi steady state=0,137s tercapai pada detik 0,309s. Meskipun diberikan torsi beban pada detik 1,2s, HEV mampu mempertahankan torsi steady state.

Dari grafik error kecepatan transient (Gambar 4.25) dapat diketahui nilai error maksimum = 43,37 rpm terjadi pada detik=0,064s. Error mencapai titik minimum=0,034 rpm pada detik=0,08s. Didapatkan perhitungan RMSE=13,09 rpm.



Gambar 4.25 Error Kecepatan transient HEV

Keseluruhan hasil pengujian HEV ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian HEV.

Direct Torque Control			Predictive Direct Torque Control		
Error maksimum		RMSE	Error maksimum		RMSE
Speed	Time		Speed	Time	
125,8 rpm	0,075 s	35,56 rpm	43,37 rpm	0,064 s	13,09 rpm

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Mesin bakar sebagai mesin penggerak primer HEV mampu mencapai setpoint kecepatan akan tetapi respon waktu terlambat 0,24s dari model referensi dengan nilai RMSE=80,29 rpm.
2. Rancangan Fix Frequency PWM dengan Six Step Commutation dapat diimplementasikan untuk pengaturan kecepatan motor DC brushless dengan torsi output=0,36 N.m dan kecepatan steady state=2647 rpm.
3. Kontroler Predictive DTC memiliki performansi yang lebih baik karena memiliki RMSE yang lebih kecil dibandingkan DTC dimana predictive DTC memiliki RMSE=13,09 rpm dan kontroler DTC memiliki RMSE=35,56 rpm.

5.2 Saran

Pengembangan penelitian dapat dilakukan dengan menambahkan parameter state of charge baterai sehingga pemodelan HEV lebih komprehensif.

Halaman ini sengaja dikosongkan

LAMPIRAN

A. Perhitungan RMSE Kecepatan Transient HEV dengan Kontroler DTC

No	Time (s)	Error (rpm)	No	Time (s)	Error (rpm)	No	Time (s)	Error (rpm)
1	0	0.00	36	0.175	0.01	71	0.35	0.01
2	0.005	3.29	37	0.18	0.04	72	0.355	-0.05
3	0.01	11.49	38	0.185	-0.05	73	0.36	-0.02
4	0.015	22.56	39	0.19	-0.10	74	0.365	-0.03
5	0.02	36.38	40	0.195	0.04	75	0.37	-0.02
6	0.025	49.98	41	0.2	0.06	76	0.375	0.02
7	0.03	63.91	42	0.205	0.04	77	0.38	-0.03
8	0.035	75.95	43	0.21	-0.07	78	0.385	-0.02
9	0.04	87.98	44	0.215	-0.03	79	0.39	0.04
10	0.045	97.55	45	0.22	0.05	80	0.395	0.00
11	0.05	106.32	46	0.225	-0.05	81	0.4	0.02
12	0.055	113.13	47	0.23	-0.02	82	0.405	0.07
13	0.06	118.63	48	0.235	-0.09	83	0.41	0.07
14	0.065	123.08	49	0.24	-0.03	84	0.415	0.07
15	0.07	124.96	50	0.245	0.09	85	0.42	0.01
16	0.075	124.22	51	0.25	0.03	86	0.425	-0.07
17	0.08	96.03	52	0.255	0.05	87	0.43	-0.03
18	0.085	50.67	53	0.26	-0.07	88	0.435	-0.08
19	0.09	0.07	54	0.265	0.06	89	0.44	-0.03
20	0.095	0.09	55	0.27	-0.04	90	0.445	-0.07
21	0.1	0.01	56	0.275	-0.09	91	0.45	-0.05
22	0.105	-0.04	57	0.28	0.07	92	0.455	-0.08
23	0.11	0.09	58	0.285	0.03	93	0.46	-0.10
24	0.115	0.02	59	0.29	-0.01	94	0.465	0.08
25	0.12	-0.03	60	0.295	0.10	95	0.47	0.03
26	0.125	0.09	61	0.3	-0.08	96	0.475	0.02
27	0.13	0.06	62	0.305	-0.04	97	0.48	0.10
28	0.135	0.05	63	0.31	-0.08	98	0.485	0.06
29	0.14	0.01	64	0.315	-0.05	99	0.49	0.01
30	0.145	-0.02	65	0.32	-0.09	100	0.495	-0.07
31	0.15	-0.04	66	0.325	-0.06	101	0.5	-0.09
32	0.155	0.04	67	0.33	-0.03			
33	0.16	-0.01	68	0.335	-0.07			
34	0.165	-0.07	69	0.34	0.01			
35	0.17	0.03	70	0.345	-0.09			
							RMSE	35.56

B. Perhitungan RMSE Kecepatan Transient HEV dengan Kontroler PDTC

No	Time (s)	Error (rpm)
1	0	0.00
2	0.005	1.73
3	0.01	6.70
4	0.015	12.64
5	0.02	18.89
6	0.025	24.80
7	0.03	29.35
8	0.035	34.11
9	0.04	37.10
10	0.045	39.35
11	0.05	41.26
12	0.055	42.63
13	0.06	42.74
14	0.065	43.03
15	0.07	42.85
16	0.075	41.92
17	0.08	19.95
18	0.085	-0.04
19	0.09	-0.01
20	0.095	-0.02
21	0.1	-0.05
22	0.105	-0.01
23	0.11	-0.05
24	0.115	0.02
25	0.12	0.06
26	0.125	-0.09
27	0.13	-0.06
28	0.135	0.02
29	0.14	-0.03
30	0.145	0.08
31	0.15	0.05
32	0.155	-0.06
33	0.16	0.04
34	0.165	0.09
35	0.17	-0.04

No	Time (s)	Error (rpm)
36	0.175	0.05
37	0.18	0.06
38	0.185	0.00
39	0.19	0.03
40	0.195	-0.06
41	0.2	0.07
42	0.205	0.00
43	0.21	-0.01
44	0.215	0.09
45	0.22	0.01
46	0.225	0.08
47	0.23	-0.02
48	0.235	-0.09
49	0.24	-0.03
50	0.245	-0.01
51	0.25	0.03
52	0.255	0.04
53	0.26	0.09
54	0.265	0.00
55	0.27	-0.01
56	0.275	0.00
57	0.28	0.02
58	0.285	0.04
59	0.29	-0.05
60	0.295	-0.02
61	0.3	0.03
62	0.305	-0.07
63	0.31	0.02
64	0.315	-0.01
65	0.32	-0.08
66	0.325	-0.09
67	0.33	-0.08
68	0.335	-0.08
69	0.34	0.06
70	0.345	-0.10

No	Time (s)	Error (rpm)
71	0.35	0.08
72	0.355	-0.06
73	0.36	-0.10
74	0.365	0.00
75	0.37	0.04
76	0.375	-0.10
77	0.38	-0.01
78	0.385	-0.06
79	0.39	-0.03
80	0.395	0.07
81	0.4	0.01
82	0.405	0.08
83	0.41	0.08
84	0.415	0.02
85	0.42	0.02
86	0.425	0.05
87	0.43	-0.07
88	0.435	0.03
89	0.44	-0.06
90	0.445	-0.05
91	0.45	0.00
92	0.455	0.00
93	0.46	-0.03
94	0.465	0.02
95	0.47	-0.01
96	0.475	0.03
97	0.48	-0.04
98	0.485	0.10
99	0.49	-0.05
100	0.495	0.05
101	0.5	-0.01
RMSE		13.09

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Boukehili Adel, Zhang Youtong, Sun Shuai, “Parallel HEV Hybrid Controller Modeling for Power Management”, World Electric Vehicle Journal, 2010
- [2] Fazal U. Syed, Ming L. Kuang, Matt Smith, Shunsuke Okubo, Hao Ying. “Fuzzy Gain-Scheduling Proportional–Integral Control for Improving Engine Power and Speed Behavior in a Hybrid Electric Vehicle”. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013.
- [3] Mohebbi M, Charkhgard M, Farrokhi M. “Optimal Neuro-Fuzzy Control of Parallel Hybrid Electric Vehicles”, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, 2005.
- [4] Yun Zhang, Xiumin Yu, Mingshuang Bi, Sina Xu, “An Adaptive Neural PID Controller for Torque Control of Hybrid Electric Vehicle”, International Conference on Computer Science & Education , 2011.
- [5] WU Jian, “Fuzzy Control Strategy of Parallel HEV Based on Driving Cycle Recognition”, IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference, 2012.
- [6] Siddhartha Anirban Singh, “Simulation of a PMSM based Electric Motor Propulsion system for HEV application using Fixed Inverter Switching Frequency”, IEEE International Electric Drive Conference, 2012.
- [7] YunChang Kwak, Jin-Woo Ahn, Dong-Hee Lee, “An High Performance Direct Torque Control Method with PWM Approach of PMSMs”, IEEE International Conference on Industrial Technology, 2014.
- [8] Jaswant Singh, Bindeshwar Singh, S. P. Singh, Mohd Naim, “Investigation of Performance Parameters of PMSM Drives using DTC-SVPWM Technique”, IEEE International Electric Drive Conference, 2012.
- [9] Ben Mansour Houda, Nouri Ahmed Said, “Discrete Predictive Sliding Mode control of uncertain systems”, IEEE International Multi Conference on Systems, Signals, Devices, 2012.

- [10] Dian-sheng Sun, Xiang Cheng, Xu-qiang Xia, “Research of Novel Modeling and Simulation Approach of Brushless DC Motor Control System”, IEEE Electric Drive Conference, 2014.
- [11] Ing. Pavel Jakoubek, “Experimental Identification of Stable Nonoscillatory Systems from Step-Responses by Selected Methods”, Konference Studenske Tvuurci-Cinnosti. 2009.
- [12] Aulia Rahma Anisa, “Strategi Pengaturan Torsi Pada Hybrid Electric Vehicle (HEV) Menggunakan Metode Neuro-fuzzy Prediktif Dengan Multi Input Neuro-fuzzy Invers Model “, Tesis Teknik Elektro ITS, 2015.
- [13] Datasheet Brushless DC Motor BM1418ZXF.
- [14] Guangjie Fu, Ziming Zao, Haiwei Mu, “Improved Speed Predictive Control for the Brushless DC Motor Adjusting Speed Study”, Information Technology Journal, 2014.
- [15] Fahrul, “Perancangan Konstruksi Self Commutation Multistage Axial Field BLDC Motor dengan Pengaturan Kecepatan Menggunakan Sliding Mode Control (SMC) “, Tesis Teknik Elektro ITS, 2016.

RIWAYAT HIDUP



Wahyu Pribadi lahir di Magetan 30 Agustus 1987 merupakan putra ketiga dari Bp. Mulyono dan Ibu Suwarsini. Saat ini penulis telah menikah dengan Fidya Vernastutining Tyas dan dikaruniai seorang putri Nafeeza Cinantya. Penulis bekerja sebagai dosen di Politeknik Negeri Madiun sejak tahun 2011.

Riwayat Pendidikan :

- ✓ SDN Petungrejo 2 lulus tahun 1999.
- ✓ SMPN 1 Kawedanan lulus tahun 2002.
- ✓ SMKN 1 Madiun jurusan Elektronika Komunikasi lulus tahun 2005.
- ✓ Politeknik Elektronika Negeri Surabaya-ITS jurusan D4 Teknik Elektronika lulus tahun 2009.
- ✓ Institut Teknologi Sepuluh Nopember Jurusan Teknik Elektro, bidang study Teknik Sistem Pengaturan lulus tahun 2017.

Pada tanggal 5 Januari 2017 penulis telah mengikuti sidang tesis sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Teknik.

Halaman ini sengaja dikosongkan