Perancangan Sistem Pengendali Arus Motor DC Eksitasi Terpisah Berbasis H-BRIDGE dan HALF-BRIDGE
Untuk Kendaraan Listrik Utilitas Kawasan Terbatas
Avatar Fawwazthana Susatyo, Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI iii
HALAMAN PERSEMBAHAN iv
KATA PENGANTAR v
DAFTAR ISI vi
DAFTAR TABEL xi
DAFTAR GAMBAR xii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN xvii
INTISARI xviii
ABSTRACT xix
BAB I Pendahuluan 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 3
1.3 Tujuan Penelitian 3
1.4 Batasan Penelitian 4
1.5 Manfaat Penelitian 5
1.6 Sistematika Penulisan 5
BAB II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori 7
2.1 Tinjauan Pustaka 7
2.2 Dasar Teori 8
2.2.1 Motor DC Eksitasi Terpisah 8
2.2.1.1 Prinsip Kerja 8
2.2.1.2 Model Matematis 8
2.2.1.3 Fungsi Transfer untuk Perancangan Kendali Arus 9
2.2.2 Topologi Konverter Daya 10
2.2.2.1 H-*Bridge* untuk Jangkar 10
2.2.2.2 Konfigurasi Tiga MOSFET Paralel Per *Switch* 11
2.2.2.3 *Half-Bridge* untuk Medan 11
2.2.2.4 *Gate Driver* IR2110 11
2.2.2.5 Rugi Daya MOSFET dan Pemilihan Frekuensi Pensaklaran 12
2.2.3 Sensor Arus ACS758 13
2.2.4 Subsistem *Precharge* 13
2.2.5 Perancangan Pengendali PI 14
2.2.5.1 Struktur Pengendali PI 14
2.2.5.2 Metode Penalaan Ziegler-Nichols 14

UNIVERSITAS GADJAH MADA
Perancangan Sistem Pengendali Arus Motor DC Eksitasi Terpisah Berbasis H-BRIDGE dan HALF-BRIDGE
Untuk Kendaraan Listrik Utilitas Kawasan Terbatas
Avatar Fawwazthana Susatyo, Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

2.2.5.3 Metode *Internal Model Control* 15
2.2.5.4 Metode *Pole-Zero Cancellation* 15
2.2.5.5 Penetapan *Bandwidth* Target dan Parameter Kendali 17
2.2.6 Platform STM32F103C8T6 18
BAB III Metode Penelitian 19
3.1 Alur Tugas Akhir 19
3.2 Alat dan Bahan 21
3.2.1 Perangkat Keras 21
3.2.2 Perangkat Lunak 22
3.3 Gambaran Umum Sistem 22
3.4 Perancangan Tahap Daya 24
3.4.1 Modul H-*Bridge* Jangkar 24
3.4.1.1 Konfigurasi MOSFET Jangkar 24
3.4.1.2 Pengaturan *Dead Time* 24
3.4.1.3 Sinyal PWM 24
3.4.2 Modul *Half-Bridge* Medan 25
3.4.3 Subsistem *Precharge* 25
3.4.3.1 Perancangan Resistor *Precharge* 25
3.4.3.2 Desain Mesin Keadaan Berhingga 26
3.4.4 Realisasi PCB *Power Board* 27
3.4.4.1 Batasan Desain Fabrikasi 27
3.4.4.2 Skematik Tahap Daya Jangkar 28
3.4.4.3 Skematik *Half-Bridge* Medan, Sensor Arus, dan Konektor 29
3.4.4.4 Skematik Subsistem *Precharge* 29
3.4.4.5 Distribusi Daya 31
3.4.4.6 *Routing* PCB 31
3.4.5 Realisasi *Driver Board* 33
3.4.5.1 Isolasi Sinyal: HCPL-2630 33
3.4.5.2 *Gate Driver* dan Sirkuit *Bootstrap* 34
3.4.5.3 Distribusi Daya dan Konektor 35
3.4.5.4 Realisasi PCB *Driver Board* 35
3.4.6 Realisasi *Control Board* 36
3.5 Perancangan Pengendali PI 37
3.5.1 Prosedur Penalaan PZC 38
3.5.2 Identifikasi Parameter Motor dan Kalkulasi PZC 39
3.5.3 Implementasi Diskrit Pengendali PI 40
3.6 Implementasi *Firmware* 42
3.6.1 Arsitektur *Firmware* 42

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Perancangan Sistem Pengendali Arus Motor DC Eksitasi Terpisah Berbasis H-BRIDGE dan HALF-BRIDGE
Untuk Kendaraan Listrik Utilitas Kawasan Terbatas
Avatar Fawwazthana Susatyo, Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

3.6.2 Implementasi Loop Kendali Arus 43
3.6.3 Perancangan Filter IIR *Exponential Moving Average* 45
3.6.3.1 Analisis Frekuensi dan Pemilihan α 45
3.6.4 Lapis Keselamatan 46
3.7 Metodologi Pengujian dan Validasi 47
3.7.1 Simulasi PLECS 48
3.7.2 Verifikasi Parameter dengan Python 48
3.7.3 Pengujian Laboratorium (*Bench Test*) 48
3.7.4 Pengujian Berbeban 49
BAB IV Hasil dan Pembahasan 51
4.1 Validasi Simulasi PLECS 51
4.1.1 Model dan Parameter Simulasi 51
4.1.2 Respons Tangga Loop Arus Jangkar 53
4.1.2.1 Bandwidth 500 Hz 54
4.1.2.2 Bandwidth 200 Hz 55
4.1.2.3 Bandwidth 100 Hz 57
4.1.3 Pemilihan Frekuensi Pensaklaran 59
4.1.4 Respons Tangga Loop Arus Medan 62
4.1.5 Pembalikan Arah Jangkar 64
4.1.6 Operasi Simultan Kedua Loop 65
4.2 Pengujian Subsistem *Precharge* 67
4.2.1 Verifikasi Analitis Profil Pengisian RC 67
4.2.2 Profil Pengisian Kapasitor Bus 68
4.2.3 Transisi Keadaan FSM dan Aktivasi Relay 69
4.3 Verifikasi Sinyal PWM pada Tahap Daya 69
4.3.1 Frekuensi dan Bentuk Gelombang Sinyal *Gate* 70
4.3.2 Pengukuran *Dead Time* 71
4.4 Pengujian *Firmware*: *Loop* Kendali Arus (Kondisi Poros Bebas) 72
4.4.1 Konfigurasi dan Skema Pengujian 72
4.4.2 Stabilitas *Loop*: Temuan Empiris dan Penalaan Ulang 73
4.4.2.1 Penalaan Ulang Lanjutan: Pengaruh *Bandwidth* terhadap Redaman Sistem 75
4.4.3 Kendali Arus Medan 77
4.4.4 Kendali Arus Jangkar Arah Maju 78
4.4.5 Bukti Operasi Motor: Arus Jangkar, Arus Medan, dan Kecepatan . 80
4.4.6 Operasi Empat Kuadran dan Pembalikan Arah Elektronis 81
4.4.7 Pengereman Regeneratif 83
4.4.8 Pembahasan Perbedaan Teori dan Hasil Nyata 84
4.4.8.1 Ketidakstabilan PI PZC 500 Hz pada Perangkat Keras .. 84

Perancangan Sistem Pengendali Arus Motor DC Eksitasi Terpisah Berbasis H-BRIDGE dan HALF-BRIDGE
Untuk Kendaraan Listrik Utilitas Kawasan Terbatas
Avatar Fawwazthana Susatyo, Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

4.4.8.2 Batas *Duty Cycle* dan Jangkauan Arus Aktual 85
4.4.8.3 Keterbatasan Laju Perekaman Data Log ($\approx$ 33–62 Hz) . 85
4.4.8.4 Sensor Kecepatan Hall dan Estimasi *Back-EMF* 86
4.4.9 Perbandingan dengan Spesifikasi Desain 86
4.4.10 Respons Transien Arus Jangkar dengan Pembatas Laju 87
4.4.10.1 Step $0 \rightarrow 6$ A 88
4.4.10.2 Step $0 \rightarrow 8$ A 89
4.4.10.3 Respons Transien Murni Pengendali PI (tanpa Pembatas Laju pada Tanjak) 91
4.4.10.4 Interpretasi dan Keputusan Desain: Pembatas Laju sebagai Proteksi Keselamatan 92
4.4.11 Ringkasan Validasi Pengujian Poros Bebas 94
4.5 Validasi Berbeban di Jalan Raya (Uji Aspal, Dua Penumpang) 96
4.5.1 Proteksi Arus-Lebih dan Perilaku *Fault* 97
4.5.2 Estimasi dan Proteksi Arus Baterai 99
4.5.2.1 Validasi Estimasi terhadap Pengukuran *Clamp Meter* ... 100
4.5.2.2 Strategi Proteksi Dua Tingkat 101
4.5.3 Cuplikan Traksi Maju dan Mundur Berbeban 102
4.5.4 Sesi Traksi Berkelanjutan hingga Proteksi Baterai (BMS) Bekerja (76 detik) 104
4.5.5 Traksi Berbeban Berkelanjutan (Uji Ketahanan Termal) 105
4.5.6 Pembahasan 106
4.6 Perbandingan Hasil dengan Spesifikasi Desain 107
BAB V Kesimpulan dan Saran 109
5.1 Kesimpulan 109
5.2 Saran 111
DAFTAR PUSTAKA 113
LAMPIRAN L-1
L.1 Hasil Plot L-1
L.1.1 Simulasi PLECS: Sapuan *Bandwidth* Loop Jangkar L-1
L.1.2 Simulasi PLECS: Cuplikan *Scope* L-2
L.1.3 Simulasi PLECS: Respons Arus Jangkar L-3
L.1.4 Simulasi PLECS: Respons Arus Medan L-3
L.1.5 Simulasi PLECS: Pembalikan Arah dan Operasi Simultan L-4
L.1.6 Simulasi PLECS: Analisis Rugi Daya, Riak, dan *Precharge* L-5
L.1.7 Perangkat Keras: Respons Transien Arus Jangkar L-6
L.1.8 Perangkat Keras: Operasi Empat Kuadran dan Kestabilan L-7
L.1.9 Perangkat Keras: Pengujian Berbeban di Jalan Raya L-8
L.1.10 Perangkat Keras: Arus Baterai dan Proteksi Arus-Lebih L-9

UNIVERSITAS
GADJAH MADA
Perancangan Sistem Pengendali Arus Motor DC Eksitasi Terpisah Berbasis H-BRIDGE dan HALF-BRIDGE
Untuk Kendaraan Listrik Utilitas Kawasan Terbatas
Avatar Fawwazthana Susatyo, Ir. Eka Firmansyah, S.T., M.Eng., Ph.D., IPM., ASEAN Eng.
Universitas Gadjah Mada, 2026 | Diunduh dari http://etd.repository.ugm.ac.id/

L.1.11 Perangkat Keras: *Precharge* dan Sinyal PWM L-10
L.1.12 Perangkat Keras: Pelacakan Arus Kondisi Poros Bebas L-10
L.2 Kode Firmware STM32 ..... L-11
L.2.1 Konfigurasi Sistem (`config.h`) L-12
L.2.2 Loop Kendali Arus (`control.c`) L-20
L.2.3 Antarmuka Kendali (`control.h`) L-28
L.2.4 Mesin Keadaan *Precharge* (`precharge.c`) L-29
L.2.5 Manajemen PWM (`pwm.c`) L-33
L.2.6 Akuisisi Sensor (`sensors.c`) L-36