

Program Simulasi Penyearah Terkontrol Satu Fasa untuk Motor Arus Searah Penguatan Terpisah dengan Bahasa Pemrograman Delphi

Priyono¹, Dr. Ir. Hermawan, DEA¹, Mochammad Facta, ST, MT¹

¹Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Sudharto, Tembalang, Semarang, Indonesia.

Abstrak

Motor arus searah penguatan terpisah dapat diatur kecepatan perputarannya dengan mengatur tegangan jangkarnya. Pengaturan tegangan yang masuk ke motor dapat diperoleh dengan pengaturan sudut picu tegangan bolak-balik. Pengaturan tegangan tersebut dapat disimulasikan dengan suatu program simulasi yang disusun dengan menggunakan bahasa pemrograman Delphi. Program dapat memperlihatkan cara pengendali putaran motor arus searah dengan mengatur sudut pemucuan thyristor. Program simulasi juga dapat menampilkan bentuk-bentuk sinyal pada komponen-komponen simulasi serta menampilkan grafik arus medan, arus jangkar, kecepatan putaran, dan torsi motor.

1. Pendahuluan

Motor arus searah dapat diatur kecepatan perputarannya sesuai dengan keinginan. Salah satu cara mengatur kecepatan putaran motor arus searah adalah dengan pengaturan tegangan. Pengaturan tegangan yang masuk ke motor arus searah dapat diperoleh dengan pengaturan sudut picu tegangan bolak-balik.

Tujuan dari tugas akhir ini adalah merancang suatu program simulasi yang dapat memperlihatkan cara pengendali putaran motor arus searah penguatan terpisah dengan mengatur sudut pemucuan thyristor serta menampilkan bentuk-bentuk sinyal pada tiap komponen simulasi, grafik arus medan, arus jangkar kecepatan putaran, dan torsi motor dengan menggunakan bahasa pemrograman Delphi.

Pembatasan masalah dalam tugas akhir ini adalah:

1. Motor arus searah yang dipergunakan merupakan motor arus searah dengan penguatan terpisah.
2. Sistem yang digunakan adalah pengendalian dengan kalang terbuka dan data kecepatan putaran motor merupakan proses akuisisi data.
3. Respon motor arus searah merupakan hasil model simulasi yang dihitung dengan metode Runge Kutta orde 4.
4. Tegangan dan arus searah yang masuk dalam model motor arus searah merupakan nilai rms.
5. Pada program simulasi ini tidak memperhitungkan rugi-rugi daya motor.

2. Dasar Teori^{[1][3][10][11][12][15]}

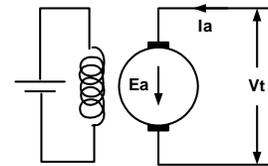
Motor listrik adalah mesin yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Prinsip kerjanya berdasarkan hukum gaya lorentz dan kaidah tangan kiri fleming, yang menyatakan bahwa: Apabila sebatang konduktor yang dialiri arus listrik ditempatkan didalam medan magnet maka konduktor tersebut akan mengalami gaya. Arah dari gaya yang dialami oleh konduktor tersebut ditunjukkan oleh kaidah tangan kiri fleming. Gaya tersebut dialami oleh setiap batang konduktor pada rotor, sehingga menghasilkan putaran dengan torsi yang cukup untuk memutar beban yang dikopel dengan motor.

Suatu mesin listrik baik generator maupun motor terdiri dari:

1. Kumparan medan, untuk menghasilkan medan magnet.
2. Kumparan jangkar yang berfungsi mengimbangkan gaya gerak listrik pada konduktor-konduktor yang terletak pada alur-alur jangkarnya.
3. Celah udara yang berfungsi untuk memberikan ruang untuk memudahkan jangkar berputar dan memberikan ruang bagi medan magnet

Motor Arus Searah dengan Penguatan Terpisah^{[1][15]}

Motor arus searah dengan penguatan terpisah mempunyai penguat magnet yang mendapatkan arus dari sumber tersendiri dan terpisah dengan sumber arus yang menuju ke rotor. Gambar rangkaian motor dengan penguatan terpisah ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Motor penguatan terpisah

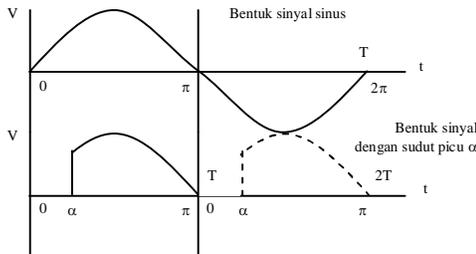
Penyearah Terkontrol sebagai Penggerak Motor Arus Searah Penguatan Terpisah^{[1][3][10][11][12][15]}

Bidang industri banyak membutuhkan motor arus searah yang mampu menghasilkan putaran yang bervariasi dengan torsi dan kecepatan putar stabil. Kecepatan motor arus searah dapat diatur mulai dari nol sampai diatas kecepatan rata-ratanya. Selain kemampuan pengaturan putarannya, motor arus searah juga baik untuk peralatan yang membutuhkan torsi sesaat yang besar. Motor arus searah mampu menghasilkan tiga sampai lima kali torsi normalnya dalam jangka waktu yang pendek.

Keuntungan pengendalian kecepatan putaran motor arus searah dengan mengatur tegangan pada kumparan jangkar adalah:

1. Jangkauan pengendalian kecepatan putaran motor yang lebar
2. Perubahan beban tidak begitu mempengaruhi kecepatan.
3. Efisien pada putaran rendah.
4. Mudah menggabungkan dengan sistem pengendali elektronik yang kompleks.

Pengendalian putaran motor dapat dilakukan dengan kalang terbuka ataupun kalang tertutup. Sistem pengendalian dengan kalang terbuka adalah sistem kendali yang keluarannya tidak berpengaruh pada aksi pengendalian. Pengendalian dengan kalang terbuka hasil keluarannya dapat diukur tetapi tidak diumpankan kembali untuk dibandingkan dengan masukan. Untuk setiap masukan acuan terdapat suatu kondisi operasi yang tetap. Ketelitian kendali kalang terbuka tergantung pada kalibrasi.



Gambar 2. Bentuk sinyal penggerak motor arus searah

Pengaturan putaran motor arus searah dapat diperoleh dari mengatur tegangan sumber dengan pengaturan sudut picu tegangan bolak-balik. Simpul sinus dimanfaatkan sebagai sudut 0° dan simpul selanjutnya dimanfaatkan sebagai sudut 180° (π) sekaligus 0° untuk siklus berikutnya.

Pada gambar 2 sinyal sinus dipicu pada sudut α . Tegangan efektif (V_{rms}) yang didapat dari bentuk sinyal di atas dapat diperoleh dengan persamaan:

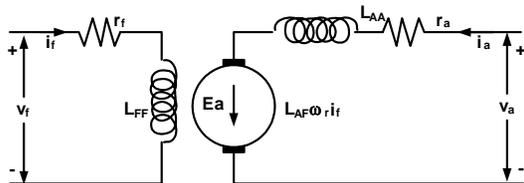
$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2 dt} \dots\dots\dots (1)$$

Jika tegangan yang digunakan adalah tegangan sinusoidal dan sudut picu yang digunakan adalah α , maka persamaan (1) akan menjadi:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{V_m^2}{2} \left(1 - \frac{\alpha}{180^\circ} + \frac{1}{4\pi} \sin 4\alpha \right)} \dots\dots\dots (2)$$

dimana: V_m : Tegangan Maksimum
 α : Sudut pemicuan

Dari persamaan 2 tampak bahwa perubahan α dapat menyebabkan perubahan pada tegangan efektif (V_{rms}). Perubahan tegangan efektif tersebut menyebabkan perubahan putaran motor. Dengan kata lain pengaturan sudut α sama dengan mengatur putaran motor arus searah.



Gambar 3. Rangkaian persamaan motor arus searah penguatan terpisah

Perumusan Motor Arus Searah Penguatan Terpisah^{[2][4][5][8]}

Persamaan motor arus searah penguatan terpisah dapat dilihat seperti gambar 3. Dari gambar tersebut dapat ditulis dua persamaan yaitu pada sisi kumparan jangkar dan kumparan medan.

Dari gambar dapat diperoleh persamaan untuk arus medan dan arus jangkar saat t.

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{1}{L_{FF}}(v_f - r_f i_f) \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_{AA}}(v_a - r_a i_a - \omega_r L_{AF} i_f) \dots\dots\dots (4)$$

persamaan untuk torsi dan kecepatan motor arus searah adalah:

$$T_e = J \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \omega_r + T_L \dots\dots\dots (5)$$

sedang

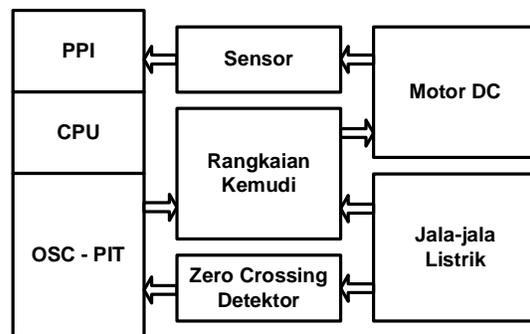
$$T_e = L_{AF} i_f i_a \dots\dots\dots (6)$$

dari persamaan 5 dan 6 dapat diperoleh persamaan untuk kecepatan sesaat t yaitu:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (L_{AF} i_f i_a - B_m \omega_r - T_L) \dots\dots\dots (7)$$

3. Komponen Simulasi^{[7][9][11][13][14]}

Program simulasi pengendalian putaran motor arus searah ini dibuat dengan bahasa pemrograman visual Delphi 5.0. Program simulasi tersebut terbagi menjadi tiga bagian yaitu bagian utama, bagian osiloskop dan bagian grafik motor. Bagian utama merupakan bagian yang mensimulasikan komponen serta melakukan perhitungan. Bagian osiloskop merupakan bagian yang menampilkan bentuk sinyal tiap komponennya dan bagian grafik motor merupakan bagian yang menampilkan perubahan arus, kecepatan, dan torsi motor.



Gambar 4. Blok diagram komponen simulasi

Program mensimulasikan 8 komponen yang saling berkaitan. Komponen-komponen tersebut adalah komponen komputer dengan komponen antar muka PIT dan PPI, komponen sensor, komponen rangkaian kemudi, komponen zero crossing detector, komponen motor arus searah serta komponen tegangan jala-jala. Hubungan tiap komponen simulasi tampak seperti pada gambar 4.

Tegangan bolak-balik dari jala-jala listrik masuk ke *Zero Crossing Detector* (ZCD) yang merupakan rangkaian pendeteksi titik tegangan nol sinyal bolak-balik. Saat tegangan melewati titik nol volt maka keluaran ZCD akan memberikan sinyal pulsa. Frekuensi pulsa *zero crossing detector* dua kali frekuensi tegangan bolak-balik masukan. Pulsa dari *zero crossing detector* diumpankan ke OSC – PIT dan dipergunakan untuk membentuk sinyal frekuensi tinggi.

Oscillator (OSC) adalah suatu rangkaian yang menghasilkan keluaran yang amplitudonya berubah-ubah berdasarkan waktu. *Oscillator* pada simulator yang dibangkitkan oleh rangkaian *Phase Locked Loop* (PLL) berupa gelombang persegi. Frekuensi yang dihasilkan oleh PLL tersebut merupakan perkalian dari *zero crossing detector* dengan sampling. Jika frekuensi *zero crossing detector* adalah 100 Hz dan sampling yang dipakai adalah 512 maka frekuensi yang dihasilkan oleh *oscillator* adalah 51.200 Hz. Sinyal tersebut dipergunakan sebagai clock untuk PIT. PIT merupakan komponen *counter/timer* yang dapat diprogram. Keluaran PIT berupa gelombang persegi dengan daur aktif yang dapat diprogram untuk memicu rangkaian kemudi.

Keluaran dari rangkaian OSC - PIT diteruskan ke rangkaian kemudi motor. Tegangan keluaran dari rangkaian kemudi berupa sinyal sinus terpotong. Tegangan ini diperoleh dari tegangan jala-jala listrik yang dipotong dengan sinyal dari PIT. Keluaran rangkaian kemudi yang berupa tegangan rms dari jala-jala listrik terpotong kemudian diteruskan ke motor arus searah.

Motor arus searah dengan penguatan terpisah mempunyai penguat magnet yang mendapatkan arus dari sumber tersendiri dan terpisah dengan sumber arus yang menuju ke rotor. Kecepatan motor penguatan terpisah dapat dilakukan dengan mengubah-ubah tegangan rms.

Komputer sebagai pusat kendali dipergunakan untuk menentukan sudut pemicuan thyristor melalui penentuan sudut ke-n dan jumlah sampling yang dipakai. Komputer kemudian menghitung sudut picu dan menghitung tegangan rms yang masuk ke motor. PPI merupakan antar muka komputer yang dapat dijadikan sebagai gerbang masukan maupun gerbang keluaran. Dalam simulasi ini PPI digunakan sebagai gerbang masukan. Masukan PPI diperoleh dari sinyal sensor. Bentuk sinyal yang masuk PPI berupa sinyal persegi. Sinyal yang masuk disimpan pada internal buffer PPI dan selanjutnya akan dibaca oleh komputer. Selanjutnya komputer akan menghitung jumlah pulsa tiap waktu tertentu. Dengan perhitungan tersebut akan diketahui kecepatan motor. Data kecepatan motor diperoleh melalui proses akuisisi data.

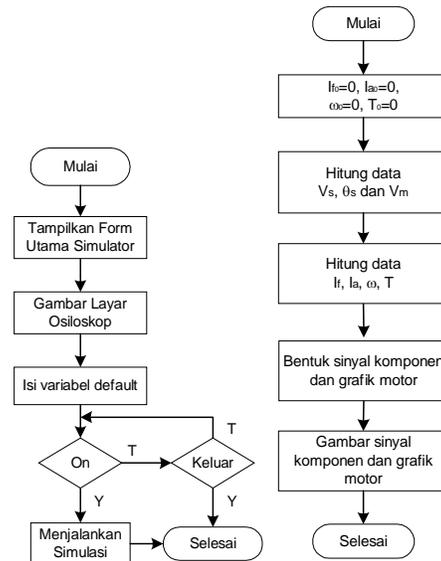
4. Diagram Alir

Diagram alir form utama program simulasi dan program inti tampak pada gambar 5. Secara garis besar program utama dimulai dengan menampilkan form utama kemudian variabel-variabel diisi dengan harga default. Jika tombol **On** ditekan maka program utama akan menjalankan program simulasi, jika tombol **On** tidak ditekan dan selanjutnya dilakukan penekanan tombol **Keluar** maka program akan berakhir. Penekanan tombol **On** program simulasi akan menjalankan program inti simulasi.

Inti dari program utama adalah diawali oleh inisial awal arus medan, arus jangkar, kecepatan motor dan torsi motor. Harga inisial awal keempat variabel tersebut adalah 0. Kemudian dilanjutkan dengan

perhitungan V_{rms} , V_{maks} dan sudut picu untuk $n = 0$ sampai $n = \text{sampling}$.

Sudut picu pada ke-n sampling dapat dihitung dengan persamaan 8, dimana sampling adalah jumlah penculikan yang diinginkan, dan n adalah bilangan bulat dari 0 sampai sampling. Untuk menghitung V_{rms} dapat menggunakan persamaan 2. Untuk tegangan maksimum ke-n dapat diperoleh dengan rumus tegangan sesaat seperti persamaan 9 dengan syarat $\theta \geq 90^\circ$ sedang untuk $\theta < 90^\circ$ memakai $\theta = 90^\circ$.



Gambar 5. Diagram alir program utama dan program inti

$$\theta = \frac{n}{\text{sampling}} 180 \dots\dots\dots (8)$$

$$V_n = V_m \sin(\theta) \dots\dots\dots (9)$$

Inti dari program selanjutnya adalah perhitungan I_f , I_a , ω , dan Torsi motor dari $n = 0$ sampai $n = \text{sampling}$. Untuk mempercepat dan mempermudah perhitungan maka digunakan perhitungan dengan metode Runge Kutta orde 4.

Alur selanjutnya adalah pembentukan sinyal tiap komponen simulasi dan grafik motor. Tegangan masukan yang dipakai pada simulasi ini adalah tegangan bolak-balik yang berupa tegangan sinus. Sumber tegangan tersebut dapat diperoleh dari generator listrik ataupun dari jaringan PLN. Secara default yang dipergunakan adalah tegangan dari jala-jala listrik PLN dengan tegangan efektif yang dipakai adalah 220 volt dengan frekuensi 50 Hz. Harga sesaat tegangan listrik berupa sinyal sinus dapat diperoleh dengan persamaan 10.

$$V_t = V_m \sin(2\pi ft) \dots\dots\dots (10)$$

V_t merupakan variabel harga sesaat. V_m merupakan harga maksimum tegangan. Harga $\pi = 3,14$, sedangkan f adalah frekuensi dalam Hz dan t adalah waktu dalam detik.

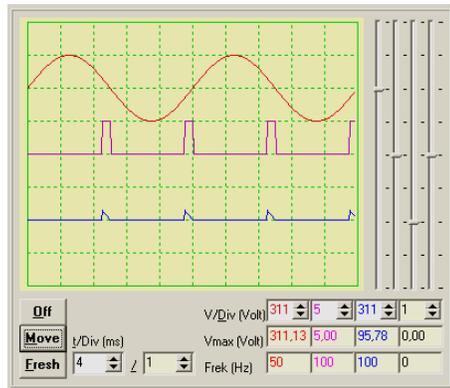
Sinyal ZCD dapat diperoleh dengan memberikan nilai set (disini dipilih nilai 5) untuk nilai persamaan 10 kurang dari 5 dan 0 untuk nilai persamaan 10 lebih dari dan sama dengan 5. Tegangan sinus terpotong diperoleh dengan memberi nilai 0 pada sudut ke 0° sampai dengan

sudut picu dan memberi harga sinyal sinus pada sudut selanjutnya.

Alur program selanjutnya adalah menggambarkan sinyal komponen ke layar osiloskop. Tegangan sesaat tiap sampling ke-n kemudian dijadikan koordiant tiap titik kemudian digabungkan sehingga membentuk gambar sinyal di layar osiloskop.

5. Hasil Pengujian

Osiloskop (T/Div, V/Div)



Gambar 6. Bentuk sinyal rangkaian kemudi

Dari sinyal pertama gambar 6 diperoleh panjang periode gambar adalah 5. T/Div yang dipakai adalah 4 ms. Sehingga frekuensi sinyal tersebut berdasarkan perhitungan dari gambar adalah

$$f = \frac{1}{T}$$

$$f = \frac{1}{5 \cdot 4 \cdot 10^{-3}}$$

$$f = 50 \text{ Hz}$$

jika frekuensi masukan dari jala-jala listrik adalah 50 Hz maka frekuensi yang ditunjukkan oleh gambar di layar osiloskop telah sesuai.

Dari sinyal pertama gambar 6 diperoleh tinggi sinyal maksimum adalah 1. V/Div sinyal pertama adalah 311. Sehingga tegangan maksimum sinyal pertama menurut gambar adalah

$$V_m = 1 \cdot 311 = 311 \text{ volt.}$$

Jika V_{rms} jala-jala listrik adalah 220 volt maka tegangan maksimum menurut perhitungan adalah

$$V_m = \sqrt{2} \cdot 220 = 311,13 \text{ volt}$$

maka tegangan maksimum yang ditunjukkan oleh gambar telah mendekati tegangan maksimum hasil perhitungan.

Komputer (Sampling, Sudut Picu ke-n Sampling, h)

Tabel 1. Variabel-variabel yang berubah akibat perubahan sampling pada komputer

| No | Komp. | | OSC-PIT | Motor | | |
|----|-------|---|----------|----------|---------|-----|
| | Samp. | n | α | V_{in} | I_a | rpm |
| 1. | 8 | 1 | 22,5 | 214,95 | 30,3070 | 621 |
| 2. | 16 | 1 | 11,25 | 219,30 | 30,3071 | 634 |
| 3. | 128 | 1 | 5,63 | 219,91 | 30,3071 | 635 |
| 4. | 512 | 1 | 1,41 | 220,00 | 30,3071 | 636 |

Pada sampling 8 dan n=1 maka sudut picu yang diperoleh adalah 22,5. semakin besar sampling dengan n

sama yaitu 1 maka sudut yang picu yang diperoleh semakin kecil. Dengan tegangan masukan yang sama yaitu 220 volt maka tegangan rms yang masuk ke motor semakin besar sehingga putaran motor juga semakin besar.

Tabel 2. Variabel-variabel yang berubah akibat perubahan sudut picu ke-n sampling

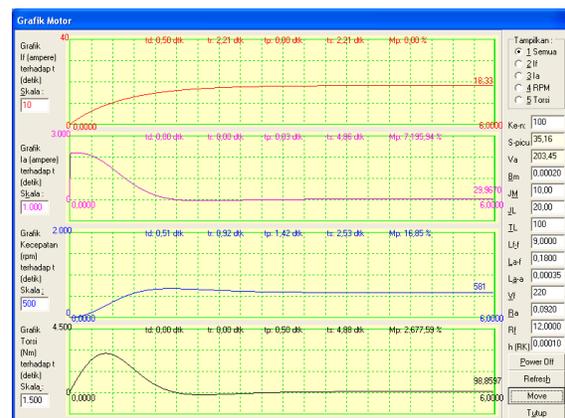
| No | Komp. | | OSC-PIT | Motor | |
|----|-------|----------|----------|---------|------|
| | n | α | V_{in} | I_a | Ptm. |
| 1. | 0 | 0 | 220,00 | 30,3071 | 636 |
| 2. | 100 | 35,16 | 203,45 | 30,3068 | 588 |
| 3. | 200 | 70,31 | 160,36 | 30,3060 | 463 |
| 4. | 300 | 105,47 | 153,09 | 30,3058 | 442 |
| 5. | 400 | 140,63 | 95,47 | 30,3048 | 275 |

Pengujian dilakukan dengan mengubah-ubah n dari 0 menjadi 100, 200, 300, dan 400. Perubahan sudut picu mengakibatkan tegangan rms yang masuk ke motor juga berubah. Perubahan tegangan yang masuk ke motor juga mengakibatkan perubahan kecepatan motor. Semakin besar sudut picunya kecepatan motor akan semakin kecil.

Dalam program simulasi ini perhitungan untuk mencari arus medan, arus jangkar, kecepatan dan torsi motor arus searah dilakukan dengan metode Runge Kutta orde 4. h adalah perubahan waktu dalam detik. Misal jika persamaan perhitungan dalam t dan h = 0,1 berarti setiap tahap perhitungan dilakukan dengan selisih t = 0,1 detik.

Nilai h awal yang dipakai adalah 0,0001. Pengujian dilakukan dengan memberi perubahan pada nilai h menjadi 0,001. Perubahan pada h mempengaruhi ketelitian perhitungan. Hasil perhitungan digunakan untuk menggambar titik-titik koordinat grafik motor sehingga pemilihan harga h berpengaruh pada grafik motor. Nilai h yang kecil akan mempengaruhi kehalusan gambar grafik motor.

Motor



Gambar 7. Grafik motor arus medan, arus jangkar, kecepatan dan torsi motor arus searah mulai t = 0 detik

Pengujian simulasi arus medan, arus jangkar, kecepatan dan torsi motor arus searah saat mulai berputar dilakukan mulai t = 0 dimana I_f , I_a , ω , dan torsi motor = 0. Pada pengujian dilakukan dengan tegangan efektif masukan ke simulasi 220 volt, frekuensi 50 Hz,

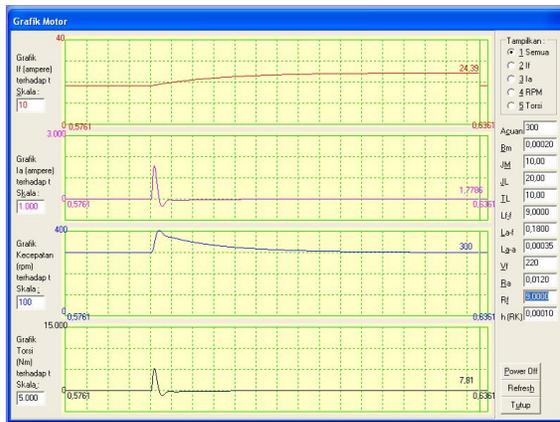
sudut picu ke-n 100 rpm, dan sampling 512, B_m 0,0002, J_m 10 kgm² dan J_l 20 kgm², T_L 10 Nm, L_{AA} 0,00035 H, L_{AF} 0,18 H, L_{FF} 9 H, V_f 220 volt, R_a 0,012 ohm, dan R_f 12 ohm. Hasil pengujian tampak pada gambar 7.

Perubahan Hambatan Medan (R_f)

Dari tabel 3 terlihat bahwa penambahan hambatan R_f mengakibatkan arus medan turun. Dengan beban yang tetap maka arus jangkar akan naik dan kecepatan akan naik pula. Pada gambar 8 memperlihatkan perubahan I_f , I_a , Kecepatan dan Torsi motor.

Tabel 3. Variabel-variabel yang berubah akibat perubahan hambatan medan motor

| No | R_f | I_f | I_a | T_e | rpm |
|----|-------|-------|---------|----------|-----|
| 1. | 9 | 24,44 | 22,7294 | 100,0092 | 441 |
| 2. | 12 | 18,33 | 30,3068 | 100,0123 | 588 |
| 3. | 15 | 14,66 | 37,8846 | 100,0154 | 734 |



Gambar 8. Grafik Motor akibat perubahan R_f dari 12 ohm ke 9 ohm

Perubahan Hambatan Jangkar (R_a)

Dari tabel 4 terlihat bahwa penambahan hambatan R_a mengakibatkan arus jangkar sedikit turun serta kecepatan motor juga turun.

Tabel 4. Variabel-variabel yang berubah akibat perubahan hambatan jangkar motor

| No | R_a | I_a | rpm |
|----|-------|---------|-----|
| 1. | 0,012 | 30,3068 | 588 |
| 2. | 0,052 | 30,3067 | 584 |
| 3. | 0,092 | 30,3067 | 581 |

Perubahan Tegangan Medan (V_f)

Dari tabel 5 terlihat bahwa penambahan tegangan V_f mengakibatkan arus medan naik, arus jangkar turun dan kecepatan juga turun.

Tabel 5. Variabel-variabel yang berubah akibat perubahan tegangan medan motor

| No | V_f | I_f | I_a | rpm |
|----|-------|-------|---------|-----|
| 1. | 150 | 12,50 | 44,4525 | 861 |
| 2. | 220 | 18,33 | 30,3068 | 588 |
| 3. | 300 | 25,00 | 22,2242 | 431 |

Perubahan Beban Motor (T_L)

Tabel 6 terlihat bahwa penambahan beban T_L akan mengakibatkan kumparan jangkar menarik arus lebih besar serta kecepatan motor akan sedikit turun.

Tabel 6. Variabel-variabel yang berubah akibat perubahan beban motor

| No | T_L | I_a | T_e | Rpm |
|----|-------|---------|----------|-----|
| 1. | 0 | 0,0037 | 0,0123 | 589 |
| 2. | 100 | 30,3068 | 100,0123 | 588 |
| 3. | 150 | 45,4583 | 150,0123 | 587 |

6. Kesimpulan

Kesimpulan yang dapat ditarik oleh penulis dari pembuatan program simulasi adalah sebagai berikut:

- Setelah melakukan pengujian program respon program simulasi pengendalian putaran motor arus searah dapat berfungsi dengan baik dan dapat untuk menunjukkan cara pemotongan sinyal sinus jala-jala listrik dengan mengatur sudut picu thyristor.
- Pada pengujian dilakukan dengan tegangan efektif masukan ke simulasi 220 volt, frekuensi 50 Hz, sudut picu ke-n 100, dan sampling 512, B_m 0,0002 N.m.s, J_m 10 kgm² dan J_l 20 kgm², T_L 100 Nm, L_{AA} 0,00035 H, L_{AF} 0,18 H, L_{FF} 9 H, V_f 220 volt, R_a 0,012 ohm, dan R_f 12 ohm. Pengujian menghasilkan putaran 588 rpm, I_f = 18,33 A, V_a = 203,45 volt, I_a = 30,3068 A; T_e = 10,0123 Nm, t_d : 0,51 detik, t_r : 0,92 detik, t_p : 1,42 detik, t_s : 2,53 detik; dan M_p : 16,85% dan bentuk grafik sesuai dengan referensi.
- Pemilihan sampling yang semakin tinggi akan memperoleh sudut picu thyristor yang lebih banyak sehingga jarak perubahan tegangan tiap sudut picu untuk menggerakkan motor lebih kecil, nilai h (*increment step*) yang kecil akan mengurangi kesalahan perhitungan sehingga grafik arus medan, arus jangkar, kecepatan, dan torsi motor terhadap t dapat lebih baik. Increment step 0,0001 sudah menghasilkan grafik yang baik.
- Motor arus searah pada program simulasi berbeda dari motor sebenarnya karena pada program simulasi tidak memperhitungkan adanya rugi-rugi daya. Penambahan beban T_L akan menyebabkan kumparan jangkar menarik arus lebih besar dan kecepatan motor akan sedikit turun.

7. Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

- Metode yang dipakai penulis untuk mengendalikan putaran motor adalah dengan mengatur pemotongan sinyal sinus jala-jala listrik dengan mengatur sudut pemicuan thyristor, untuk selanjutnya agar dikembangkan pengendalian putaran motor dengan metode lain.
- Pengaturan kecepatan yang dipakai pada tugas akhir ini adalah simulasi pengendalian dengan kalang terbuka, pengembangan selanjutnya diharapkan dapat diterapkan pengendalian motor dengan kalang tertutup.
- Penulis menggunakan bahasa pemrograman Delphi, untuk selanjutnya dapat dibuat dengan bahasa pemrograman lain.

8. Daftar Pustaka

- [1] -----, *Motor Listrik*, <http://www.kota-makassar.net>
- [2] -----, *MyPhysicsLab – Runge-Kutta Algorithm*, <http://www.myphysicslab.com>
- [3] Ayres, Frank, *Schaum's Outline of Theory and Problems of Defferential and Integral Calculus*, McGraw-Hill Book Company, Singapore, 1981.
- [4] Chapra, Stephen, *Analisa Numerik*, Erlangga, Jakarta.
- [5] Finizio, N., Ladas, G., *Persamaan Diferensial Biasa dengan Penerapan Modern*, Erlangga, Jakarta, 1988.
- [6] Harahap, H. M. Rusli, *Mesin Listrik: Mesin Arus Searah*, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1996.
- [7] Hogen Boom, P., *Data Sheet Book 3*, PT Elex Media Komputindo, Gramedia, Jakarta.
- [8] Krause, PC., *Analysis of Electric Machinery*, Mc Graw-Hill Book Company, Singapore, 1987.
- [9] Loveday, George, *Intisari Elektronika*, Alih bahasa Suryawan, PT Elex Media Komputindo, Gramedia, Jakarta, 1988.
- [10] Ogata, Katsuhiko, *Teknik Kontrol Automatik*, Erlangga, Jakarta, 1984.
- [11] Schuler Charles A. and Mc. Namee William L., *Industrial Electronic and Robotics*, Mc Graw-Hill Book Company, Singapore, 1986.
- [12] Smith, R. J., *Rangkaian Piranti dan Sistem*, Terjemahan: Adhi Susanto, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1990.
- [13] Steeman, J.P.M, *Data Sheet Book 2*, PT Elex Media Komputindo Gramedia, Jakarta, 1996.
- [14] Wasito, S, *Data Sheet Book 1*, Terjemahan, PT Elex Media Komputindo, Gramedia, Jakarta, 1985.
- [15] Zuhail, *Dasar Tegangan Listrik dan Elektronika Daya*, Gramedia, Jakarta, 1995.

Mengetahui,

Pembimbing I

Dr. Ir. Hermawan, DEA

NIP 131 598 857

Pembimbing II

Mochammad Facta, ST, MT

NIP 132 231 134



Penulis

Priyono (L2F301538) dilahirkan di Magelang, 1 Mei 1975. Menempuh pendidikan di SDN Rejowinangun Utara I Magelang lulus tahun 1988, kemudian melanjutkan ke SLTPN 10 Magelang lulus tahun 1991, kemudian melanjutkan ke SMAN 3 Magelang lulus tahun 1994, dan sampai saat ini masih menyelesaikan studi S1 di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro Semarang.