

Analisa Perbandingan Pengasutan Motor Induksi 3 Fasa *Soft Starter* IGBT Berbasis *Sine-Triangle* dan *Sine-Sawtooth* PWM Menggunakan Matlab Simulink

Miftakhul Umam Ulil Anwar¹⁾, Dedi Nugroho²⁾, dan Agus Adhi Nugroho³⁾

^{1,2,3)}Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknologi Industri Universitas Islam Sultan Agung

^{1,2,3)}Jl.Kaligawe Raya Km.4 Kota Semarang, Jawa Tengah 50112, Indonesia

e-mail : miftakhulumam@std.unissula.ac.id¹⁾, dedi.nugroho@unissula.ac.id²⁾, agusadhi@unissula.ac.id³⁾

ABSTRACT

The induction motor is the electric drive for industry so special attention is needed for maintainance and control system. Induction motors pulling high starting currents at starting. Various starting methods have been developed to overcome this problem, one of which is the Direct On-Line starting method. This method is the most common method because it is the easiest and cheapest to use, but there is high inrush current around 6-8 times the nominal current will pulled by induction motor when using this method. This starting current can cause several disturbances, both from the electricity network, damaging the motor and can cause fatal losses to the electric power system. This research discusses the application of the Soft Starter starting method to a 3-phase induction motor to reduce the high starting current pulled by a 3-phase induction motor. The induction motor used in this study is a squirrel cage rotor type with 4kVA power, a rotational speed of 1430 r.p.m, a frequency of 50 Hz, and a voltage of 380 V. The Soft Starter system in this study uses 6 Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) power electronics switches which are controlled using a sine-triangle PWM and sine - Sawtooth PWM. MATLAB SIMULINK is used to simulate the application of the soft starter starting method on a 3-phase induction motor. The results prove that the Soft Starter method is successful in reducing starting currents when compared to the Direct On-Line method. When using the Direct On-Line method the starting current is 77.29 – 78.80 A, when using the sine-triangle soft starter method the starting current is 60,46 – 61,46 A, and when using the sine-sawtooth soft starter method. starting 59,96 – 60,60 A. However, at steady state conditions, the Direct On-Line rotational speed is better than the Soft Starter because when using the Soft Starter method the voltage is cut. Soft Starter input voltage is controlled using PWM. The wider the pulse produced, the greater the value of the voltage and vice versa.

Keywords: 3 Phase Induction Motor, Direct On-Line, Soft Starter, IGBT, PWM

ABSTRAK

Motor induksi adalah roda penggerak dari industri sehingga perhatian khusus diperlukan untuk merawat dan mengendalikannya. Motor induksi menarik arus starting yang tinggi pada saat saat pengasutan. Berbagai metode pengasutan telah dikembangkan untuk mengatasi permasalahan ini, salah satunya adalah metode pengasutan *Direct On-Line*. Metode ini adalah metode yang paling umum dikarenakan paling mudah dan paling murah untuk digunakan tetapi terjadi arus inrush yang tinggi sekitar 6-8 kali arus nominal akan ditarik motor induksi pada saat menggunakan metode ini. Arus *starting* ini dapat mengakibatkan beberapa gangguan, baik dari jaringan listrik, merusak motor dan dapat menimbulkan kerugian yang fatal pada sistem tenaga listrik. Penelitian ini membahas tentang pengaplikasian metode pengasutan *Soft Starter* pada motor induksi 3 fasa untuk mengurangi tingginya arus *starting* yang ditarik oleh motor induksi 3 fasa. Motor induksi yang digunakan untuk penelitian ini bertipe rotor *squirrel cage* berdaya 4kVA, kecepatan putar 1430 r.p.m, frekuensi 50 Hz, dan bertegangan 380 V. Sistem *Soft Starter* pada penelitian ini menggunakan 6 buah saklar elektronika daya *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) yang dikontrol menggunakan *sine-triangle* PWM dan *sine-sawtooth* PWM. MATLAB SIMULINK digunakan untuk melakukan simulasi pengaplikasian metode pengasutan *soft starter* pada motor induksi 3 fasa. Hasil membuktikan bahwa metode *Soft Starter* berhasil menurunkan arus *starting* jika dibandingkan dengan metode *Direct On-Line*. Pada saat menggunakan metode *Direct On-Line* arus *starting* 77,29 – 78,80 A, pada saat menggunakan metode *soft starter sine-triangle* arus *starting* 60,46 – 61,46 A, dan pada saat menggunakan metode *soft starter sine-sawtooth* arus *starting* 59,96 – 60,60 A. Namun pada saat kondisi *steady stade* kecepatan putar *Direct On-Line* lebih baik dibandingkan dengan *Soft Starter* ini dikarenakan pada saat menggunakan metode *Soft Starter* tegangan mengalami pemotongan. Tegangan masukan *Soft Starter* dikontrol menggunakan PWM. Semakin lebar pulsa yang dihasilkan maka tegangan akan semakin besar nilainya dan sebaliknya.

Kata Kunci: Motor Induksi 3 Fasa, *Direct On-Line*, *Soft Starter*, IGBT, PWM

I. PENDAHULUAN

Tipe rotor *squirrel cage* sangat tumbuh pesat. Ewasa ini penggunaan motor induksi khususnya Motor induksi 3 fasa ini begitu banyak diminati dan merupakan penggerak dari dunia industri karena memiliki kelebihan seperti konstruksi yang kuat, desain simpel, memiliki keandalan yang bagus, mempunyai efisiensi yang tinggi dan perawatannya yang mudah [1].

Pada saat motor induksi telah di *start* akan menarik arus yang tinggi yang disebut *Locked Rotor Current* (RLC) dan motor induksi akan menghasilkan torsi yang biasa disebut *Locked Rotor Torque*. Oleh karena itu ketika di *start* arusnya akan mengalami kenaikan 4 - 7 kali dari arus nominalnya [2]. Akibat dari permasalahan diatas maka diperlukan metode pengasutan motor induksi yang mampu mengurangi lonjakan arus yang ditarik oleh motor induksi pada saat proses pengasutan. Salah satu metode pengasutan yang sering ditawarkan untuk mengatasi permasalahan ini yaitu metode pengasutan *soft starter*.

Metode *soft starter* sangat efektif untuk mengurangi lonjakan arus dan torsi secara signifikan dengan prinsip mengurangi tegangan yang akan disuplai ke motor selama proses pengasutan berlangsung. Namun metode *soft starter* itu sendiri masih memiliki berbagai pilihan diantaranya adalah *soft starter IGBT sine-triangle PWM* dan *soft starter IGBT sine-sawtooth PWM* yang tentunya setiap rangkaian memiliki perbedaan penanganan pada saat motor induksi di *start*, sehingga perlu dilakukan analisa lebih jauh mengenai kemutakhiran metode *softstarter* dalam kemampuannya untuk mengurangi arus *inrush*, sistem kontrol PWM dengan gelombang *carrier* yang berbeda untuk *soft starter*, hasil kontrol tegangan IGBT *soft starter* dengan menggunakan *software MATLAB SIMULINK*, sehingga nantinya akan didapatkan rangkaian *soft starter* yang lebih efektif dalam mengatasi permasalahan arus *inrush* dan kedip tegangan yang diakibatkan oleh *starter* motor induksi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Meninjau dari penelitian yang telah dilakukan oleh Abhay M Halmare, Ashis Karnase, dan Swapnil Kourati (2016) pada penelitiannya yang berjudul “*Comparative Study Of Induction Motor Starters Using Matlab Simulink*”. Hasil penelitian yang sudah didapatkan adalah dari karakteristik yang telah diamati bahwa arus starting pada saat menggunakan metode *soft starter* akan lebih kecil dibandingkan dengan menggunakan metode *Direct On-Line* dan metode *Star Delta*. Selain arus starting yang dibutuhkan lebih kecil, metode *soft starter* juga menghasilkan efisiensi yang lebih baik untuk motor

meskipun membutuhkan harga yang sedikit lebih mahal dibandingkan dengan metode lain, akan tetapi untuk tujuan keamanan harga seharusnya tidak jadi masalah. Jadi dari metode yang telah diuji metode *soft starter* adalah metode yang paling baik dibandingkan dengan metode lain[3]. Meninjau dari penelitian yang sudah dilakukan oleh Muhammad Husein Rizky (2020) pada penelitiannya yang berjudul “*Kedip Tegangan Dari Berbagai Jenis Pengasutan motor Induksi dan*

Pengaruhnya Pada Sensivitas Peralatan Industri” dengan hasil bahwa, pengasutan jenis *soft starter* sangat dianjurkan dilakukan karena memiliki presentase kedip tegangan yang tinggi dan durasi yang singkat, pengasutan ini juga tidak mengganggu kinerja peralatan industri. Pada penelitiannya dengan menggunakan simulasi pada *MATLAB SIMULINK* didapatkan analisa bahwa dengan pengasutan motor *soft starter* pada bus 6,8,10,14, dan 15 didapatkan hasil arus *start* masing-masing 0.827,0.827,0.827, 0.408 dan 0.408. Nilai tegangan *start* yang didapatkan dengan pengasutan *soft starter* dimasing-masing bus yaitu 3.34,3.34,3.34,3.27 dan 3.27, sehingga mengakibatkan tidak adanya kedip tegangan yang terjadi. Berbeda dengan metode pengasutan *star delta* dan *auto trafo* yang mengakibatkan kedip tegangan[4].

A. Motor Induksi

Motor induksi merupakan motor listrik arus bolak-balik yang paling banyak digunakan, penamaannya berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator kerotornya, dimana arus rotor motor ini bukan diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi sebagai akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar (*rotating magnetic field*) yang dihasilkan oleh arus stator. [5]

Motor induksi 1 fasa mempunyai daya keluaran yang relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan motor induksi 3 fasa itu sebabnya motor ini banyak dimanfaatkan untuk kebutuhan peralatan rumah tangga.

B. Metode Pengasutan Motor Induksi

Untuk menjalankan motor induksi diperlukan proses pengasutan motor induksi itu sendiri, antara lain:

1. Metode *Direct On-Line*

Metode *Direct On-Line* atau yang sering disingkat dengan *DOL* ini sendiri adalah suatu metode pengasutan motor induksi yang mana dengan cara menghubungkan langsung motor induksi dengan jala-jala dan kemudian motor distart pada posisi tegangan penuh.

Pada saat motor induksi di *start* dengan menggunakan metode ini arus *start* atau *inrush current* akan sangat tinggi yaitu antara 6 sampai 10 kali dari arus nominalnya dan itu

berlangsung antara 8 sampai 12 detik tergantung dari daya, putaran dan $\cos \phi$ motor. Keunggulan dari metode ini adalah moment *start* nya tinggi dan biayanya yang murah dikarenakan tidak membutuhkan pembelian alat tambahan lain, namun penggunaan metode ini sangat membahayakan motor dan normalnya motor yang distart dengan cara ini mempunyai daya yang relatif kecil[6].

Untuk menentukan arus *start* suatu motor induksi dengan metode DOL dapat menggunakan persamaan dibawah ini:

$$I_{st} = \frac{V_{Th}}{\sqrt{(R_{Th} + R_r)^2 + (X_s + X_r)^2}} \quad (1)$$

Keterangan: I_{st} = Arus Starting Motor (A)

V_{Th} = Tegangan Thevenin (V)

R_{Th} = Resistansi Thevenin (Ω)

R_s = Resistansi Stator (Ω)

R_r = Resistansi Rotor (Ω)

X_s = Reaktansi Stator (Ω)

X_r = Reaktansi Rotor (Ω)

X_m = Reaktansi Magnetisasi (Ω)

L_s = Induktansi Stator (H)

L_r = Induktansi Rotor (H)

Untuk menentukan besar torsi beban dapat menggunakan persamaan dibawah ini:

$$T_{sh} = \frac{\text{Torsi Shaft}}{2\pi N/60} \quad (2)$$

Keterangan : T_{sh} = Torsi Shaft (N.m)

P_{out} = Daya keluaran (Watt)

N = Kecepatan rotor (r.p.m)

Untuk menentukan besar V_{peak} input dapat menggunakan persamaan dibawah ini:

$$V_{peak} = \frac{\sqrt{2} \times V_{rms}}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

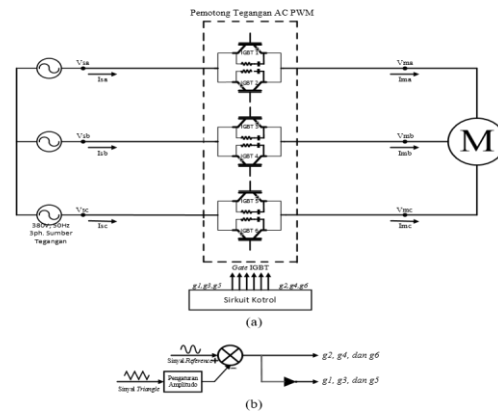
Keterangan : V_{peak} = Tegangan puncak

V_{rms} = Tegangan efektif

2. Metode Soft Starter

Soft starter menghasilkan proses starting yang halus dan bebas hentakan pada motor induksi. Tegangan berfrekuensi tinggi dapat dengan mudah dicekikan menggunakan semikonduktor berbasis model sirkuit control. Sirkuit control ini bukan hanya mengurangi harmonik tetapi juga mengurangi permasalahan yang timbul ketika motor terhubung Direct on line dan memberikan pengasutan yang halus bebas hentakan pada motor listrik. Solid-State Soft Starter sangat ekonomis, *simple*, dan mempunyai keandalan yang bagus. Metode soft starter dapat digunakan secara ekonomis apabila dipasang pada starting motor induksi besar tegangan menengah, yang mana hanya membutuhkan torsi awal

yang rendah. Dengan menggunakan metode pengasutan berbasis converter elektronik daya, arus inrush dapat dikurangi secara signifikan ditambah juga dapat menghasilkan akselerasi yang halus.



Gambar 1. Soft Starter PWM AC Chopper Motor Induksi 3 Fasa
(a) Konfigurasi sirkuit, (b) Diagram skematik dari sirkuit kontrol

Dengan V_m adalah nilai tegangan puncak dan ω_e adalah frekuensi switching. Sumber tegangan tiga fasa akan dipotong menggunakan IGBT sehingga nilai RMS dari tegangan dan arus motor akan berubah dengan mengubah *duty ratio* (D) dari pensaklaran IGBT. Untuk mengitung tegangan motor, fungsi *switching* $F(t)$ akan dikalikan dengan sumber tegangan. Sehingga tegangan motor dapat direpresentasikan dengan persamaan:

$$V_M(t) = V_S(t) \cdot F(t) \quad (4)$$

$$V_M(t) = V_m \sin(\omega_e t) \cdot F(t) \quad (5)$$

$$V_{M_{\infty}}(t) = V_m \sin(\omega_e t) \cdot D + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2 \sin D n \pi}{n \pi} \sin(n \cdot \omega_e t) \right) \quad (6)$$

Dengan $V_M(t)$ bisa merupakan V_{ma} , V_{mb} , V_{mc} , dan $V_S(t)$ bisa merupakan V_{sa} , V_{sb} , V_{sc} .

C. Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT)

Insulated Gate Bipolar Transistor atau yang sering disingkat dengan IGBT adalah suatu komponen elektronika daya (semi konduktor) yang tersedia sejak tahun 1980 an. IGBT dirancang khusus untuk digunakan sebagai saklar tegangan tinggi atau arus tinggi dan biasanya tidak digunakan untuk pengaplikasian linier seperti *amplifier audio* kelas daya B. Sebelum adanya IGBT dulunya terdapat komponen elektronika daya yang dinamakan thyristor (SCR) namun dikarenakan kecepatan dan kemudahan dalam pengoperasian SCR sudah tergantikan oleh IGBT [7].

IGBT memiliki karakteristik kinerja gabungan antara *Bipolar Junction Transistor* (BJT) dan *Enhancement Metal Oxide Semiconductor FET* (E-MOSFET). Sama halnya dengan BJT, IGBT menawarkan kerugian daya yang rendah saat kondisi *on* dan mempunyai kemampuan untuk

mengangani arus dan tegangan yang tinggi. IGBT juga memiliki kesamaan dengan E-MOSFET dalam kemudahannya untuk dikendalikan (dioperasikan).

IGBT dapat dikontrol dengan menggunakan sistem *Pulse Width Modulation (PWM)*. Untuk memvariasikan kecepatan motor, sistem kontrol PWM akan menghasilkan pulsa. Semakin kecil *duty cycle* disetiap pulsanya, maka akan membuat rata-rata tegangan yang akan disuplai ke motor menjadi kecil.

D. Pulse Width Modulation

Prinsip utama kerja *Pulse Width Modulation (PWM)* dapat dengan jelas dan singkat digambarkan sebagai pengaturan *on/off* dari komponen saklar semi konduktor, rentetan pulsa dengan amplitude yang sama dan dengan lebar pulsa yang berbeda-beda telah dibangkitkan pada *output port* untuk mrnggantikan gelombang sinusoidal atau bentuk gelombang lainnya yang dibutuhkan oleh sistem. *Duty cycle* dari gelombang keluaran perlu dimodulasikan agar menghasilkan teganga keluaran dan frekuensi pada inverter dapat diregulasi.

Sinusoidal PWM (SPWM) adalah salah satu metode yang paling populer dan sederhana yang sering digunakan dalam bidang kontrol motor. Prinsip utama kerjanya adalah dengan melakukan perbandingan antara *modulation wave* dengan *carrier wave*, ketika nilai amplitudo *carrier wave* lebih kecil maka akan berlogika *high* (1) dan apabila sebaliknya maka akan berlogika *low* (0).

Pengaturan *modulation index* dapat menghasilkan tegangan keluaran RMS yang bervariasi [8]. *Modulation index* dapat direpresentasikan dengan persamaan 7.

$$M = \frac{V_r}{V_c}, 0 < M < 1 \tag{7}$$

Dengan:

M = Modulation Index

V_r = Amplitudo puncak gelombang sinyal sinus

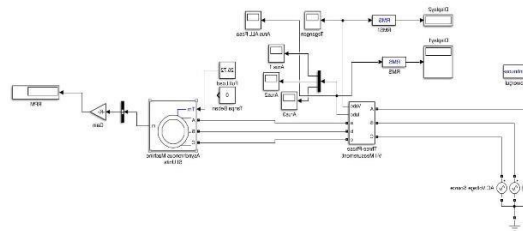
V_c = Amplitudo gelombang sinyal pembawa

III. METODE PENELITIAN

A. Model Penelitian

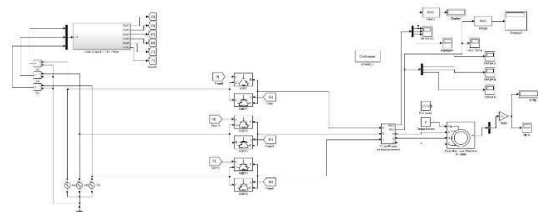
Langkah pertama penelitian ini melakukan studi literatur mengenai metode pengasutan pada motor induksi dan kemudian menentukan perangkat (*software*) yang digunakan untuk melakukan pemodelan dan dilakukanlah penelitian, setelah itu baru dilanjutkan dengan melakukan pengumpulan data-data sekunder yang diperlukan. Datadata sekunder yang dibutuhkan dalam penelitian ini didapatkan dengan mengambil *sample* motor induksi yang terdapat didalam *software* MATLAB SIMULINK. Selain didapatkan didalam *software* MATLAB SIMULINK data

sekunder didapatkan juga dari buku, jurnal, dan penelitian-penelitian lain yang mengenai analisa metode pengasutan motor induksi. Selanjutnya akan dilakukan pemodelan mengenai metode pengasutan motor induksi yang akan disimulasikan dengan menggunakan *software* MATLAB SIMULINK, kemudian akan dilakukan perbandingan dari hasil simulasi yang didapatkan dimasing-masing metode pengasutan motor induksi untuk mendapatkan metode pengasutan yang paling optimal menurunkan arus *inrush* baru kemudian dilakukan analisis dan kesimpulan dari penelitian yang dilakukan.



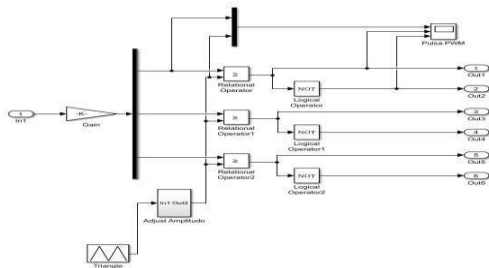
Gambar 2. Pemodelan Rangkaian DOL

Pemodelan rangkaian DOL menggunakan beban motor induksi 3 fasa jenis *squirrel cage* yang mana motor langsung dihubungkan ke tegangan jala-jala atau sumber.

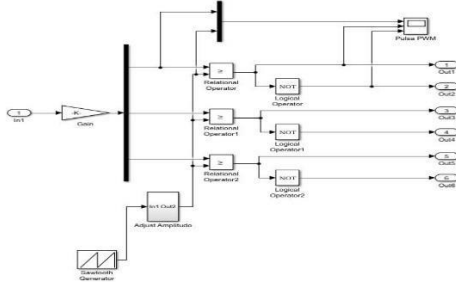


Gambar 3. Model Simulasi Soft Starter IGBT Dengan Sistem Kontrol PWM

Gambar diatas merupakan pemodelan simulasi metode pengasutan motor induksi *soft starter* IGBT dengan sistem pengendalian PWM. Pemodelan ini diambil berdasarkan dengan skema gambar 1(a) dan persamaan 5 dimana dalam persamaan ini menjelaskan bahwa tegangan stator pada motor didapatkan dari pengkalian tegangan sumber dan fungsi switching IGBT.

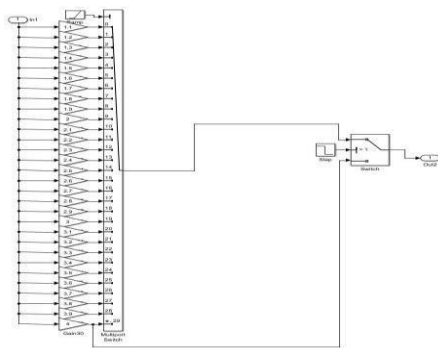


Gambar 4. Model Simulasi *Sine-Triangle* PWM



Gambar 5. Model Simulasi *Sine-Sawtooth* PWM

Gambar diatas merupakan pemodelan simulasi PWM yang digunakan untuk mengontrol IGBT pada sistem *soft starter*. Gambar 4 adalah simulasi PWM dengan gelombang pembawa *triangle* (segi tiga), sedangkan pada gambar 5 adalah simulasi PWM dengan menggunakan gelombang pembawa *sawtooth* (gigi gergaji). Kedua PWM ini menggunakan *input* yang diambil dari gelombang hasil pengukuran tegangan sumber untuk mendapatkan gelombang *modulating* yang berupa sinyal sinusoidal yang kemudian dimasukan ke proses *gain* untuk mengubah nilai amplitudo dari gelombang sinus menjadi bernilai 1 dengan dikalikan sebesar $1/310.27$.



Gambar 6. Pengaturan Amplitudo *Carrier Signal*

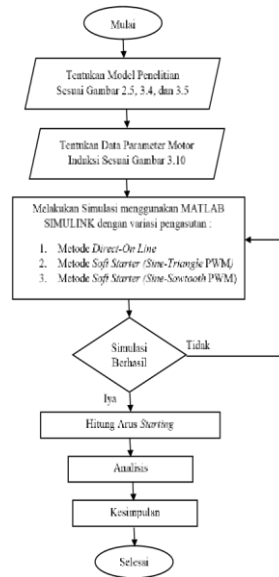
Gambar diatas merupakan *sub sistem adjust amplitudo* yang terdapat didalam sistem PWM pada gambar 4 dan 5. Pengaturan amplitudo gelombang *carrier* ini mengacu pada persamaan 8 yaitu apabila dilakukan pengaturan *modulation index* maka akan menghasilkan tegangan keluaran

C. Objek Penelitian

Tugas akhir ini menggunakan objek penelitian motor induksi *squirrel cage* yang sudah terdapat didalam *preset model library software* MATLAB SIMULINK.

D. Diagram Alir

Tahapan untuk menyelesaikan penelitian tugas akhir dapat dilihat pada diagram alir dibawah ini :



Gambar 7. Diagram Alir Penelitian

IV. HASIL PEMBAHASAN

A. Data Parameter Motor Induksi

Data parameter motor induksi *squirrel cage* diperoleh dari *preset model* pada MATLAB SIMULINK yang tertera pada tabel 1.

Aspek	Keterangan
Horsepower	5,4 HP
Daya Output	4 kVA
Full Load r.p.m	1430 rpm
Frekuensi	50Hz
Arus Tanpa Beban	6,79 A
Arus Beban Penuh	7,83 A
Tegangan	380 V
Resistansi Stator	1,405 Ω
Resistansi Rotor	1,395 Ω
Induktansi Stator	0,005839 H
Induktansi Rotor	0,005839 H
Kutub	4

Motor induksi *squirrel cage* 3 fasa ini belitan statornya menggunakan hubungan *wye/star* sesuai yang tertera pada blok parameter objek penelitian, yaitu pada gambar 3.9. Startor yang terhubung secara *star* dapat meningkatkan efisiensi motor karena *losses* atau kerugian harmonik homopolar dapat dikurangi.

B. Perhitungan Arus Inrush DOL, Torsi Beban Penuh, Tegangan Sumber.

Perhitungan ini dilakukan untuk mendapatkan nilai arus tegangan masukan yang akan digunakan untuk simulasi, selain itu untuk didapatkan nilai *inrush* pada motor induksi *squirrel cage* 3 fasa pada saat dihubungkan menggunakan metode pengasutan DOL, kemudian setelah dilakukan perhitungan arus *inrush* dilakukan perhitungan torsi beban penuh yang nantinya akan digunakan untuk simulasi pada matlab.

Perhitungan Arus *Inrush* Tanpa Beban

$$\begin{aligned} X_r &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_r \\ &= 2 \times 3,14 \times 50 \times 0,005839 \\ &= 1,83 \Omega \\ X_s &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_s \\ &= 2 \times 3,14 \times 50 \times 0,005839 \\ &= 1,83 \Omega \\ X_m &= \frac{V}{(\sqrt{3} \times I)} \\ &= \frac{380}{(\sqrt{3} \times 6,79)} \\ &= 32,31 \text{ A} \\ R_{Th} &= R_s \times \left(\frac{X_m}{X_s + X_m} \right)^2 \\ &= 1,405 \times \left(\frac{32,31}{1,83 + 32,31} \right)^2 \\ &= 1,26 \Omega \\ V_{Th} &= V \text{ per phase} \times \frac{X_m}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + X_m)^2}} \\ &= 380 \times \frac{32,31}{\sqrt{1,405^2 + (1,83 + 32,31)^2}} \\ &= 359,29 \text{ V} \\ I_{st} &= \frac{V_{Th}}{\sqrt{(R_{Th} + R_r)^2 + (X_s + X_r)^2}} \\ &= \frac{359,29}{\sqrt{(1,26 + 1,395)^2 + (1,83 + 1,83)^2}} \\ &= 79,38 \text{ A} \end{aligned}$$

Perhitungan Arus *Inrush* Beban Penuh

$$\begin{aligned} X_r &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_r \\ &= 2 \times 3,14 \times 50 \times 0,005839 \\ &= 1,83 \Omega \\ X_s &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_s \\ &= 2 \times 3,14 \times 50 \times 0,005839 \\ &= 1,83 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} X_m &= \frac{V}{(\sqrt{3} \times I)} \\ &= \frac{380}{(\sqrt{3} \times 7,83)} \\ &= 28,02 \text{ A} \\ R_{Th} &= R_s \times \left(\frac{X_m}{X_s + X_m} \right)^2 \\ &= 1,405 \times \left(\frac{27,98}{1,83 + 27,98} \right)^2 \\ &= 1,24 \Omega \\ V_{Th} &= V \text{ per phase} \times \frac{X_m}{\sqrt{R_s^2 + (X_s + X_m)^2}} \\ &= 380 \times \frac{27,98}{\sqrt{1,405^2 + (1,83 + 27,98)^2}} \\ &= 356,27 \text{ V} \\ I_{st} &= \frac{V_{Th}}{\sqrt{(R_{Th} + R_r)^2 + (X_s + X_r)^2}} \\ &= \frac{356,28}{\sqrt{(1,24 + 1,395)^2 + (1,83 + 1,83)^2}} \\ &= 78,92 \text{ A} \end{aligned}$$

Perhitungan Torsi Beban Penuh

$$\begin{aligned} T_{sh} &= \frac{P_{out}}{\omega} \\ T_{sh} &= \frac{P_{out}}{2\pi N/60} \\ T_{sh} &= \frac{4000}{2 \times 3,14 \times 1430/60} \\ &= 26,72 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Perhitungan Tegangan Sumber

$$\begin{aligned} V_{peak} &= \frac{\sqrt{2} \times V_{rms}}{\sqrt{3}} \\ &= \frac{\sqrt{2} \times 380}{\sqrt{3}} \\ &= 310,27 \text{ V} \end{aligned}$$

C. Hasil Pulsa Sistem PWM

Sistem PWM ini digunakan untuk menghasilkan pulsa dimana pulsa ini nantinya yang akan mengatur penyalan *on-off* pada IGBT sehingga besar kecilnya tegangan dapat disesuaikan untuk mengurangi arus *inrush* motor induksi.

Dengan menggunakan sistem sine-triangle PWM modulating wave berupa gelombang sinusoidal dan carrier wave berupa gelombang segi tiga, kedua sinyal ini nantinya akan dibandingkan baru kemudian akan menghasilkan pulsa. Pada saat gelombang sinus lebih besar dibandingkan gelombang segitiga maka akan menghasilkan pulsa *high* (1) dan sebaliknya. Besar amplitudo sinyal segitiga akan bertambah secara berkala sebesar 0,1 setiap 0,2 detik. Dengan diaturnya nilai amplitudo sinyal segi tiga secara berkala akan mempengaruhi besar pulsa yang dihasilkan yaitu semakin besar amplitudo sinyal segi tiga maka pulsa akan semakin

besar, pengaturan ini dilakukan sampai pada kurun waktu 0,6 detik.

Pada saat menggunakan sistem *sine-sawtooth* PWM *modulating wave* berupa gelombang sinusoidal dan *carrier wave* berupa gelombang gigi gergaji, kedua sinyal ini nantinya akan dibandingkan baru kemudian akan menghasilkan pulsa. Pada saat gelombang sinus lebih besar dibandingkan gelombang gigi gergaji maka akan menghasilkan pulsa *high* (1) dan sebaliknya. Besar amplitudo sinyal gigi gergaji akan bertambah secara berkala sebesar 0,1 setiap 0,2 detik. Dengan diaturnya nilai amplitudo gigi gergaji secara berkala akan memengaruhi besar pulsa yang dihasilkan yaitu semakin besar amplitudo sinyal gigi gergaji maka pulsa akan semakin besar, pengaturan ini dilakukan sampai pada kurun waktu 0,6 detik.

D. Hasil Tegangan Output IGBT

Pulsa yang dihasilkan oleh sistem PWM akan digunakan untuk mengatur penyalan IGBT. Penyalan *gate* pada IGBT inilah yang mengontrol besar kecilnya tegangan untuk mensuplai motor induksi. Lama waktu simulasi MATLAB SIMULINK diatur menjadi 1s pada saat dilakukan pengamatan hasil tegangan dari sistem PWM.

Dalam kurun waktu 1s sistem *sine-triangle* PWM menghasilkan tegangan *output* IGBT yang tersusun dari pulsa PWM yang awalnya bentuknya tidak rata menjadi gelombang sinusoidal yang rata diakhir simulasi. Dengan mengambil cuplikan pada waktu simulasi yaitu pada selama 0,02 detik diawal dan diakhir akan dapat dilihat dengan jelas perbedaan gelombang tegangan *output*. Pada kurun waktu 0 – 0,02 detik riak yang sangat jelas pada gelombang tegangan yang berbentuk sinusoidal, namun pada saat kurun waktu 0,9 – 0,92 detik riak-riak pada gelombang sinusoidal hampir tidak ada sehingga nilai tegangan akan semakin besar. Jika dilihat dari nilai RMS tegangan juga akan menunjukkan hasil yang berbeda yaitu pada saat 0 – 0,02 detik RMS tegangan sebesar 326,9 V dan pada saat 0,9 – 0,92 detik nilai RMS tegangan sebesar 373,6 V.

Begitupun dengan sistem *sine-sawtooth* PWM, waktu simulasi MATLAB SIMULINK diatur selama 1s hasilnya pun tidak jauh berbeda pada saat menggunakan *sine-triangle* PWM namun hasil tegangan dengan *sine-sawtooth* PWM lebih kecil. Dalam kurun waktu 1s sistem *sine-sawtooth* PWM menghasilkan tegangan *output* IGBT yang tersusun dari pulsa PWM yang awalnya bentuknya tidak rata menjadi gelombang sinusoidal yang rata diakhir simulasi. Dengan mengambil cuplikan pada waktu simulasi yaitu pada selama 0,02 detik diawal dan diakhir akan dapat dilihat dengan jelas perbedaan

gelombang tegangan *output*. Pada kurun waktu 0 – 0,02 detik riak yang sangat jelas pada gelombang tegangan yang berbentuk sinusoidal, namun pada saat kurun waktu 0,9 – 0,92 detik riak-riak pada gelombang sinusoidal hampir tidak ada sehingga nilai tegangan akan semakin besar. Jika dilihat dari nilai RMS tegangan juga akan menunjukkan hasil yang berbeda yaitu pada saat 0 – 0,02 detik RMS tegangan sebesar 324,8 V dan pada saat 0,9 – 0,92 detik nilai RMS tegangan sebesar 373,2 V.

TABEL II
PERBANDINGAN HASIL *OUTPUT* TEGANGAN

Jenis Sistem PWM	Hasil Tegangan <i>Output</i>	
	0 sampai 0,02 detik	0,9 sampai 0,92 detik
<i>Sine-triangle</i> PWM	326,9 V	373,6 V
<i>Sine-sawtooth</i> PWM	324,8 V	373,2 V

E. Perbandingan Arus *Inrush*

Perbandingan arus *inrush* ini dilakukan pada setiap metode pengasutan yaitu DOL, *soft starter sine-triangle* PWM, dan *soft starter sine-sawtooth* PWM, hal ini dilakukan untuk membuktikan metode pengasutan yang paling optimal dalam usaha mengurangi arus *inrush* yang diakibatkan pada saat penyalan motor induksi. Pada saat pengujian arus *inrush* waktu simulasi diatur selama 1s baik dalam kondisi beban penuh maupun tanpa beban sehingga dapat dibandingkan pula kondisi transien dan *steady state* pada setiap pengasutan motor, selain itu akan dilihat juga arus puncak dimasing – masing fasa, hasil ini dapat diamati pada tabel 3.

Pada saat menggunakan metode pengasutan DOL dengan beban torsi mekanik 0 atau tanpa beban terjadi lonjakan arus pada saat awal penyalan kemudian arus akan mulai berkurang pada saat motor dalam kondisi *steady state*. Pada metode ini kondisi transien terjadi selama 0,045 detik dari detik 0 – 0,045 baru kemudian dilanjutkan pada kondisi *steady state* dari kurun waktu 0,045 – 1 detik. Lonjakan arus tertinggi terjadi pada fasa A yaitu sebesar 77,29 A. Pada saat motor diberi beban torsi mekanik 26,72 Nm dengan menggunakan metode DOL kondisi transien terjadi selama 0,1 detik pada 0 – 0,1 detik dan dilanjutkan pada kondisi *steady state* pada kurun waktu 0,1 – 1 detik atau terjadi selama 0,9 detik. Lonjakan arus tertinggi juga terjadi pada fasa A yaitu sebesar 78,80 A.

Pada saat menggunakan metode pengasutan *soft starter sine-triangle* PWM dengan beban torsi mekanik 0 atau tanpa beban terjadi lonjakan arus pada saat awal penyalan kemudian arus akan mulai berkurang pada saat motor dalam kondisi *steady state*. Pada metode ini kondisi transien terjadi selama 0,2 detik dari detik 0 – 0,2 baru kemudian dilanjutkan pada kondisi *steady state* dari kurun waktu 0,2 – 1 detik. Lonjakan arus tertinggi terjadi pada fasa A yaitu sebesar 60,46 A. Pada saat motor diberi beban

torsi mekanik 26,72 Nm dengan menggunakan metode ini kondisi transien terjadi selama 0,24 detik pada 0 – 0,24 detik dan dilanjutkan pada kondisi *steady stade* pada kurun waktu 0,24 – 1 detik atau terjadi selama 0,76 detik. Lonjakan arus tertinggi juga terjadi pada fasa A yaitu sebesar 61,45 A.

Pada saat menggunakan metode pengasutan *soft starter sine-sawtooth* PWM dengan beban torsi mekanik 0 atau tanpa beban terjadi lonjakan arus pada saat awal penyalaan kemudian arus akan mulai kembali mengecil pada saat motor dalam kondisi *steady stade*. Pada metode ini kondisi transien terjadi selama 0,2 detik dari detik 0 – 0,2 baru kemudian dilanjutkan pada kondisi *steady stade* dari kurun waktu 0,2 – 1 detik. Lonjakan arus tertinggi terjadi pada fasa A yaitu sebesar 59,96 A. Pada saat motor diberi beban torsi mekanik 26,72 Nm dengan menggunakan metode ini kondisi transien terjadi selama 0,23 detik pada 0 – 0,23 detik dan dilanjutkan pada kondisi *steady stade* pada kurun waktu 0,23 – 1 detik atau terjadi selama 0,77 detik. Lonjakan arus tertinggi terjadi pada fasa A yaitu sebesar 60,60 A.

Dari hasil pengujian diatas maka dapat disimpulkan bahwa metode *soft starter* terbukti dapat mengurangi besar arus *inrus* jika dibandingkan dengan metode DOL. Namun jika dibandingkan dari ketiganya nilai arus *inrush* terkecil didapatkan pada saat menggunakan metode *soft starter sine-sawtooth*.

TABEL III
PERBANDINGAN ARUS *INRUSH* SETIAP METODE PENGASUTAN

Metode Pengasutan	Beban	Transien (s)	Steady Stade (s)	Arus <i>Inrush</i> Perfasa (A)			Kecepatan Putar Rotor (r.p.m)
				A	B	C	
<i>Direct On-Line</i>	Tanpa Beban	0,045	0,955	77,29	50,82	53,58	1499
	Beban Penuh	0,1	0,9	78,80	58,47	64,27	1427
<i>Soft Starter Sine-Triangle</i> PWM	Tanpa Beban	0,2	0,8	60,46	31,62	35,68	1499
	Beban Penuh	0,24	0,76	61,46	36,76	39,75	1424
<i>Soft Starter Sine-Sawtooth</i> PWM	Tanpa Beban	0,2	0,8	59,96	32,55	35,86	1429
	Beban Penuh	0,23	0,77	60,60	37,38	39,72	1424

F. Perbandingan Kecepatan Putar Rotor

Dalam penggunaan masing – masing pengasutan tentunya akan menghasilkan kecepatan putar rotor yang berbeda – beda, ini diakibatkan oleh besar kecilnya suplai tegangan ke motor iru sendiri, maka dari itu akan dilakukan pengujian terhadap kecepatan putar rotor yang dihasilkan dimasing – masing metode pengasutan. Pada saat pengujian ini lama waktu simulasi pada MATLAB SIMULINK diatur menjadi 1s dan dilakukan pada saat tanpa beban maupun beban penuh.

Dapat dilihat pada tabel 3 pada saat menggunakan metode DOL tanpa beban saat kondisi *steady stade* atau pada saat detik ke 0,045 menghasilkan kecepatan putar rotor sebesar 1499 rpm dan pada saat beban penuh kecepatan rotor berkurang menjadi 1427 rpm. Pada saat menggunakan metode *soft stater sine-triangle* dan *soft*

starter sine-sawtooth didapatkan hasil yang sama, yaitu ketika motor tanpa beban saat kondisi *steady stade* pada detik 0,2 dan 0,3 menghasilkan kecepatan putar rotor sebesar 1499 rpm dan pada saat beban penuh kecepatan putar rotor berkurang menjadi 1424 rpm.

Dari hasil pengujian diatas dapat dilihat bahwa pada saat motor dalam kondisi beban penuh kecepatan putar rotor DOL lebih besar jika dibandingkan dengan metode *soft starter*, hal ini dikarenakan metode *soft starter* mengalami pemotongan tegangan sehingga supali tegangan kemotor akan berkurang.

V. KESIMPULAN

Sesuai dengan hasil simulasi yang telah dianalisa penulis mengenai arus *inrush* pada metode *soft starter sintriangle*, *soft starter sine-sawtooth* dengan menggunakan MATLAB SIMULINK, dapat diambil kesimpulan bahwa :

1. Penggunaan sistem pengontrolan *sine-triangle* PWM akan menghasilkan pulsa-pulsa yang dihasilkan dari pembandingan sinyal sinusoidal (*modulating signal*) dengan siyal segitiga (*carrier signal*), sedangkan sistem pengontrolan *sine-sawtooth* PWM akan menghasilkan pulsa dari pembandingan sinyal sinusoidal (*modulating signal*) dan sinyal gigi gergaji (*carrier signal*). Kedua sistem PWM ini akan menghasilkan pulsa ketika nilai amplitudo *modulating signal* lebih besar dibandingkan nilai amplitudo *carrier signal*. Dengan melakukan *adjust amplitudo* dengan nilai sama, lebar pulsa yang terbentuk pada sistem *sine-triangle* dan *sinesawtooth* akan mengalami kenaikan amplitudo *carrier signal* sebesar 0,1 yang terjadi setiap 0,2 detik yang mana semakin besar nilai aplitudo *carrier signal* maka pulsa yang terbentuk akan semakin lebih lebar.
2. Hasil tegangan *output* pada saat menggunakan sistem pengontrolan *sine-triangle* PWM tegangan yang terkontrol IGBT tanpa beban didapatkan hasil tegangan RMS 326,9 V, pada saat gelombang tegangan yang hampir sempurna berbentuk sinusoidal terjadi pada detik 0,9 sampai 0,92 dengan nilai tegangan RMS 373,6 V, sedangkan pada saat menggunakan sistem pengontrolan *sine-sawtooth* dengan tanpa beban menghasilkan nilai tegangan RMS sebesar 324,8 V, pada saat gelombang tegangan yang hampir sempurna berbentuk sinusoidal terjadi pada detik 0,9 sampai 0,92 dengan nilai tegangan RMS 373,2 V. Besar kecilnya nilai tegangan ini dipengaruhi oleh pulsa-pulsa yang dihasilkan oleh masing-masing sistem PWM.

3. Penggunaan metode *soft starter* terbukti berhasil menurunkan nilai arus *inrush*, ini dibuktikan dengan melakukan perbandingan penggunaan metode *direct on-line* dengan metode *soft starter sinetriangle* dan metode *soft starter sine-sawtooth*. Pada saat menggunakan metode *direct on-line* tanpa beban didapatkan nilai puncak arus pada masing-masing fasa yaitu sebesar 77,29A, 50,82A, 53,58 A, sedangkan pada saat menggunakan beban penuh hasilnya adalah 78,80A, 58,80A, dan 64,27A. Pada saat menggunakan metode *soft starter sine-triangle* tanpa beban didapatkan nilai arus puncak pada masing-masing fasa yaitu 60,46A, 51,62A, 53,68A, sedangkan pada saat beban penuh didapatkan nilai arus puncak pada masing-masing fasa yaitu 61,46A 56,76A, dan 59,75A. Pada saat menggunakan metode *soft starter sine-sawtooth* tanpa beban didapatkan nilai arus puncak pada masing-masing fasa yaitu 59,69A, 52,55A, 53,86A, sedangkan pada saat beban penuh didapatkan nilai arus puncak pada masing-masing fasa yaitu 60,60A, 57,38A dan 59,72A. Jika dibandingkan antara metode *soft starter sine-triangle* dan *soft starter sine-sawtooth* nilai arus *inrush* puncak tertinggi dihasilkan oleh metode *soft starter sine-triangle*, selain itu metode *soft starter sine-triangle* juga memiliki kondisi transien yang lebih lama.
4. Perbandingan kecepatan putaran rotor antara metode DOL dengan metode *soft starter* nilai terbesar didapatkan pada saat menggunakan metode DOL. Hal ini dikarenakan suplai tegangan yang masuk kemotor tidak mengalami pemotongan, sedangkan pada saat menggunakan metode *soft starter* tegangan yang disuplai kemotor mengalami pemotongan sehingga putaran yang dihasilkan tidak dapat maksimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. C. Onyewuchi, I. F. I, and O. Mathew, "Simulation of the Impact of Soft Starter Controller on Induction Motor Transients," vol. 6, no. 3, pp. 1187–1195, 2017, doi: 10.21275/11031707.
- [2] A. Nurmalitawati, Aztrid dan Rahardjo, "Analisis Perbandingan Besarnya Arus Start Motor Induksi Berkapasitas Besar Terhadap Jatuh Tegangan Bus," *Tek. Elektro, Fak. Tek. Univ. Indones.*, vol. 3, no. 6, pp. 1–16, 2014.
- [3] A. M. Halmare, "Comparative Study of Induction Motor Starters Using MATLAB SIMULINK," *Int. J. Adv. Res. , Ideas Innov. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 1–5, 2016.
- [4] M. H. Rizky, "KEDIP TEGANGAN DARI BERBAGAI JENIS PENGASUTAN MOTOR INDUKSI DAN PENGARUHNYA PADA SENSITIVITAS PERALATAN INDUSTRI," UNIVERSITAS SUMATERA UTARA, 2020.
- [5] Zuhail, *Dasar Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya*. Jakarta: PT Gramedia Pustaka Utama, 2000.
- [6] Siswanto, "Total Maintenance Program," no. 021, p. 68, 2003.
- [7] J. M. Fiore, *Semiconductor Devices* : Utica, New York: James M. Fiore, 2017.
- [8] T. B. M. Patil, S. R. Sawant, and T. T. M. Patil, "Mathematical and Simulation Model of an SPWM," vol. 4, no. 1, pp. 23–32, 2011.