

ANALISIS SOFT STARTING METODA PWM UNTUK MOTOR INDUKSI TIGA FASE 37 KW

Analysis Soft Starting PWM Method for Three Phase Induction Motor 37 KW

Andi Akbar Hidayat¹, I Made Ari Nrartha¹, dan Sabar Nababan¹

¹Jurusan Teknik Elektro, Universitas Mataram.

Jl. Majapahit 62, Mataram, 83125 Lombok, Indonesia

Email : losakbar@gmail.com, nrartha@unram.ac.id, nababan.sabar@gmail.com

ABSTRAK

Arus starting motor induksi untuk metoda Direct On Line (DOL) mencapai 5 sampai 7 kali dari arus beban penuh menyebabkan jatuh tegangan, sehingga peralatan lain yang terhubung pada sistem yang sama akan terganggu. Arus starting tersebut dapat dikurangi dengan soft starting menggunakan metoda Pulse Width Modulation (PWM). Soft starting dengan metoda PWM menggunakan komponen Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT) diusulkan pada penelitian ini. Tegangan input pada motor induksi diatur secara bertahap sampai tegangan nominal dalam waktu tertentu dengan mengatur PWM pada IGBT. Frekuensi PWM diatur pada rentang 200 – 1000 Hz dengan duty cycle dari 10-100%. Simulasi soft starting metoda PWM pada motor induksi tiga fase 37 kW menggunakan software MATLAB versi 2014. Hasil penelitian menunjukkan arus starting motor berkurang dari 619.45 A untuk metoda DOL menjadi 109.6 A untuk metoda PWM pada 200 Hz dengan waktu starting 25 detik. Pengaturan PWM dengan variasi frekuensi dan duty cycle menghasilkan harmonisa pada tegangan dan arus, berdasarkan pengukuran Total Harmonic Distortion (THD). Variasi frekuensi PWM pada duty cycle yang sama menghasilkan THD tegangan yang sama, dan THD arus berkurang untuk frekuensi PWM yang tinggi. THD arus dan tegangan berkurang untuk kenaikan duty cycle dari 10% sampai 100% pada frekuensi yang sama. Konsumsi energi pada soft starting metoda PWM berbading lurus dengan frekuensi dan durasi waktu starting.

Kata Kunci: Soft starting, metoda PWM, IGBT, THD, Motor Induksi Tiga Fasa.

ABSTRACT

Current of induction motor starting using for the Direct On Line (DOL) method may reach 5 to 7 times of the full load current that causes high voltage drop, hence the equipment connected to the same system will be disrupted. The starting current can be reduced by applying soft starting technique using the Pulse Width Modulation (PWM) method. Soft starting with PWM method using the Insulated-Gate Bipolar Transistor (IGBT) component is proposed in this study. The input voltage on the induction motor is gradually adjusted to a nominal voltage within a certain time by regulating the PWM on IGBT. PWM frequency is set in the range of 200-1000 Hz with a duty cycle of 10-100%. Soft start simulation of PWM method on 37 kW three phase induction motor using MATLAB software 2014 version. The results showed the starting motor current was reduced from 619.45 A for DOL method to 109.6 A for PWM method at 200 Hz with a starting time of 25 seconds. PWM settings with variations in frequency and duty cycle produce harmonics on voltage and current, based on measurements of Total Harmonics Distortion (THD). Variations in PWM frequencies at the same duty cycle produce the same voltage THD, and current THD decreases for high PWM frequencies. THD current and voltage are reduced for a duty cycle increase from 10% to 100% at the same frequency. Energy consumption in the soft starting method of PWM is directly proportional to the frequency and duration of the starting time.

Keywords : Soft starting, PWM method, IGBT, THD, Three Phase Induction Motor.

PENDAHULUAN

Motor induksi banyak digunakan dalam berbagai aplikasi mulai dari aplikasi di lingkungan rumah tangga sampai aplikasi di industri-industri besar. Motor-motor induksi

sangat penting penggunaannya sebagai alat bantu penggerak peralatan lain seperti pada industri perakitan alat-alat transportasi, perakitan alat berat maupun pada industri pertambangan.

Arus *starting* motor induksi mencapai 5 sampai 7 kali dari arus beban penuh dan menghasilkan torsi 1,5 sampai 2,5 kali torsi beban penuh. Arus *starting* dari motor daya besar dapat mengakibatkan jatuh tegangan pada saluran sehingga akan mengganggu peralatan lain yang dihubungkan pada saluran yang sama. Untuk motor daya kecil sampai 5 kW, arus *starting* tidak berpengaruh besar terhadap jatuh tegangan. Untuk motor yang berdaya 37 kW tentu arus *starting* juga akan semakin besar. Pada motor dengan daya diatas 30 kW sampai dengan 100 kW dapat mengakibatkan jatuh tegangan pada sistem[1].

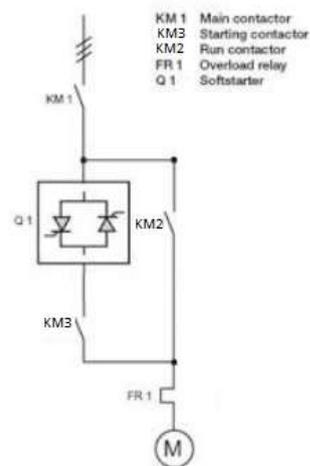
Solusi untuk menghindari jatuh tegangan akibat *starting* motor induksi adalah dengan menerapkan metoda-metoda *starting* pada motor induksi atau pemasangan kapasitor pada saat *starting* motor induksi [2]. Metoda-metoda *starting* motor induksi antara lain, metoda star-delta, autotransformer, primary resistor, dan *Soft Starting*. Metoda *soft starting* menjadi pilihan karena dapat mengurangi arus start yang cukup signifikan. Penelitian-penelitian *soft starting* dalam bentuk rancangan hardware sudah dilakukan menggunakan komponen TRIAC dengan mikrokontroler ATmega 8535 untuk *soft starting* motor tiga fase 1 HP [1], begitupula [3] menggunakan jenis mikrokontroler Atmega328 untuk mengontrol TRIAC untuk *soft starting* motor induksi tiga fase 1 kW. Rancangan yang hampir sama [4] dengan jenis TRIAC BT138 untuk *soft starting* motor induksi tiga fase 0,25 kW. Kontrol tegangan menggunakan TRIAC dengan cara merubah sudut penyalaan pada gate TRIAC. *Soft starting* menggunakan komponen thyristor [5] yang dikontrol dengan arduino nano dengan cara yang hampir sama dengan TRIAC yaitu mengatur tegangan dengan mengatur sudut peyalan pada gate thyristor. Disamping mengatur sudut peyalan, tegangan input pada motor dapat diatur dengan metoda PWM. Tegangan diatur menggunakan perubahan *duty cycle* dari PWM. Komponen utama yang dibutuhkan untuk *soft starting* metoda PWM adalah IGBT. Pengendalian tegangan dengan PWM sangat ditentukan oleh frekuensi PWM. PWM dengan frekuensi 4 kHz untuk mengatur PWM AC Chopper pada skema kontrol *soft Starting* motor induksi tiga fase kapasitas 2.2 kW [6]. *Soft starting* metoda PWM menghasilkan harmonisa. Filter aktif dikembangkan untuk kompensasi distorsi harmonisa[7].

Simulasi *soft starting* pada *software* khususnya Simulink MATLAB sangat didukung oleh adanya model motor induksi tiga fase [8]. Simulasi sangat dibutuhkan sebagai dasar desain sistem secara *hardware*. Berdasarkan

penelitian-penelitian sebelumnya, penelitian ini difokuskan pada analisis *soft starting* metoda PWM untuk motor induksi kapasitas besar yaitu 37 kW. Lingkup analisis yang dibahas adalah arus *starting*, harmonisa arus, harmonisa tegangan dan konsumsi energi selama *starting*. Untuk mendapatkan pembahasan yang lebih rinci pada artikel ini maka dipaparkan *soft starting* metoda PWM pada bagian pertama, dilanjutkan metodologi penelitian, hasil dan pembahasan dan diakhiri dengan kesimpulan.

SOFT STARTING METODA PWM

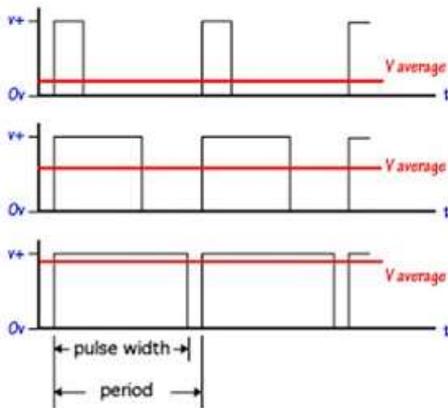
Soft starting dipergunakan untuk mengatur/ memperhalus *starting* dari motor induksi. Prinsip kerjanya adalah dengan mengatur tegangan yang masuk ke motor dengan sakelar elektronik. Sakelar-sakelar elektronik yang digunakan pada rangkaian *soft starting* seperti komponen elektronik daya yaitu MOSFET, IGBT, dan TRIAC. Pertama-tama motor diberikan tegangan yang rendah sehingga arus dan torsi juga rendah. Selanjutnya tegangan akan dinaikkan secara bertahap sampai ke tegangan nominal motor induksi sehingga akan berputar dengan kondisi RPM yang nominal [4]. Rangkaian *starting* metoda *soft starting* pada Gambar 1.



Gambar 1. Metoda *soft starting* [4].

PWM adalah pengaturan lebar pulsa gelombang kotak seperti pada Gambar 2. PWM diaplikasikan pada rangkaian-rangkaian seperti inverter, *soft starting*, konverter, *switch mode power supply (SMPS)* dan pengontrol kecepatan. Rangkaian-rangkaian ini memiliki banyak sakelar elektronik di dalamnya. Sakelar-sakelar elektronik yang digunakan pada rangkaian tersebut adalah komponen elektronik daya seperti MOSFET, IGBT, TRIAC, dan lain-lainnya. Untuk

mengendalikan sakelar elektronik daya tersebut, diperlukan PWM. [9].



Gambar 2. Bentuk sinyal PWM [10].

A. Harmonisa pada metoda PWM

Harmonisa adalah gejala pembentukan gelombang dengan frekuensi perkalian bilangan bulat dari frekuensi dasar sebuah gelombang. Frekuensi yang terbentuk disebut frekuensi harmonisa yang timbul pada bentuk gelombang aslinya sedangkan bilangan bulat pengali frekuensi dasar disebut angka urutan harmonik. Gelombang-gelombang ini menumpang pada gelombang aslinya sehingga terbentuk gelombang cacat yang merupakan jumlah antara gelombang murni sesaat dengan gelombang harmoniknya [11].

Kecacatan gelombang dapat dihitung dengan formula THD. Persamaan 1 adalah formula THD arus dan Persamaan 2 adalah formula THD tegangan

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana, I_1 dan I_h adalah arus RMS komponen fundamental dan arus RMS komponen harmonisa

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \dots\dots\dots(2)$$

Dimana, V_1 dan V_h adalah tegangan RMS komponen fundamental dan nilai tegangan RMS komponen harmonisa [12].

B. Konsumsi Energi Selama Starting Motor Induksi

Starting motor induksi membutuhkan waktu sampai motor dapat bekerja secara normal. Proses starting akan mengkonsumsi energi listrik yang berbeda untuk perbedaan lama waktu start untuk motor induksi. Energi listrik yang dikonsumsi motor induksi selama starting dapat dihitung dengan Persamaan 3.

$$E = \frac{1}{1000} P \times \frac{1}{3600} t \text{ kWh} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana, P dan t adalah daya dalam Watt dan waktu dalam sec.

METODELOGI PENELITIAN

A. Spesifikasi dan Model komponen pada Simulink MATLAB untuk Simulasi

Spesifikasi motor induksi tiga fase yang diteliti mempunyai kapasitas Daya 37 kW, tegangan Y/Δ: 400/230 V, frekuensi: 50 Hz, kecepatan nominal: 1480 rpm, Perbandingan Input mekanik terhadap torsi mekanik dengan nilai 0.1, tipe rotor: sangkar tupai, Arus beban penuh: 64.5 A. Spesifikasi motor induksi dari data model mesin asinkron di Simulink MATLAB versi 2014.

Blok IGBT/Diode pada Simulink MATLAB versi 2014 mempunyai parameter-parameter resistansi internal (R_{on}), resistansi snubber (R_s) dan kapasitor snubber (C_s). Nilai default digunakan pada penelitian ini yaitu: $R_{on} = 1e-3$ ohm, $R_s = 1e5$ ohm dan $C_s = \text{inf}$ farad.

B. Metoda Penelitian

Beberapa model komponen dibuat untuk analisis soft starting metoda PWM yaitu model PWM dan model anti *over voltage*. Model PWM untuk beberapa frekuensi yaitu: 200, 400, 600, 700, 800, dan 1000 Hz. Duty cycle PWM diatur dari rentang 0 – 100%.

Langkah-langkah penelitian adalah sebagai berikut:

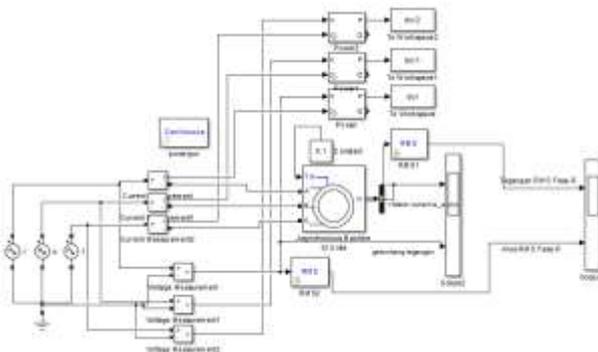
1. Menguji motor induksi 3 fase 37 kW dengan metoda DOL. Starting metoda DOL untuk mendapatkan data-data starting motor induksi 3 fase seperti arus start *starting*, harmonisa dan energi selama starting.
2. Perancangan model PWM, model PWM dbuat menggunakan blok *sawtooth generator*, blok *stair generator*, dan blok *relational operator*.
3. Pengujian model PWM, model PWM diuji dengan merubah tegangan referensi untuk *duty cycle* 0% sampai 100%, dan menguji frekuensi PWM yang dihasilkan.
4. Perancangan model anti *over voltage* menggunakan blok *sawtooth generator*, blok *stair generator*, dan blok *relational operator*. Model ini berfungsi saat blok IGBT pada model *soft starting* metoda PWM 3 fase mati atau terbuka maka blok IGBT pada model anti *over voltage* ini akan hidup atau tertutup. Sehingga arus induksi balik tidak melewati beban yang mengakibatkan lonjakan tegangan.
5. Pengujian model anti *over voltage*, model anti *over voltage* diuji untuk tegangan referensi dengan *duty cycle* 0% sampai

- 100%, dan menguji frekuensi PWM yang dihasilkan.
6. Pengujian model *soft starting* metoda PWM 3 fase dengan beban RL. Beban RL menggunakan blok *series RLC branch*. Tiga beban RL dihubung bintang, nilai $R = 1 \text{ ohm}$ dan $L = 1 \text{ mH}$. PWM dengan frekuensi 400 Hz, *soft starting* selama 2 detik dengan tahapan pertambahan *duty cycle* 10 % setiap 0.2 detik.
 7. Pengujian model *soft starting* metoda PWM untuk motor induksi 3 fase. *Soft starting* metoda PWM menggunakan frekuensi 200, 400, 600, 700, 800, dan 1000 Hz.
 - a. *Duty cycle* diatur untuk 3 tahap pada masing-masing frekuensi, yaitu 10%, 55%, dan 100% untuk waktu 10 detik.
 - b. *Duty cycle* diatur untuk 5 tahap pada masing-masing frekuensi, yaitu 10%, 32.5%, 55%, 77.5%, dan 100% untuk waktu 15 detik.
 - c. *Duty cycle* diatur untuk 7 tahap pada masing-masing frekuensi, yaitu 10%, 25%, 40%, 55%, 70.%, 85%, dan 100% untuk waktu 25 detik.
 8. Dokumentasi hasil *soft starting* metoda PWM yaitu arus starting, harmonisa dan energi yang dikonsumsi selama starting.
 9. Analisis hasil dan pembahasan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Starting Motor Induksi 3 Fase Metode DOL

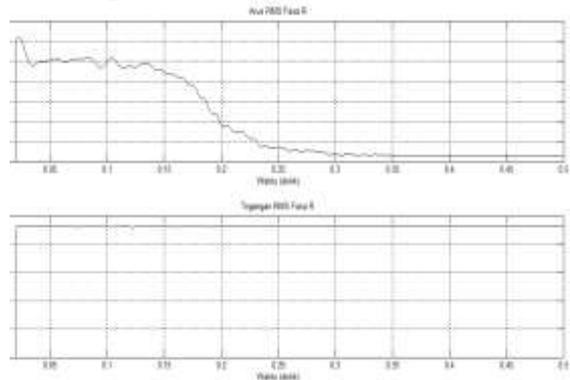
Gambar 5 adalah rangkaian starting metoda DOL untuk motor induksi tiga fase. Rangkaian terdiri dari Blok mesin asinkron SI units, dan blok sumber tegangan AC satu fase yang disusun hubung bintang menjadi sumber AC tiga fase. Sumber AC tiga fase seimbang dengan magnitude yang sama dan selisih antar fase 120° .



Gambar 3. Starting motor induksi tiga fase metode DOL

Sumber tegangan 400V AC dengan frekuensi 50 Hz langsung diberikan pada saat *start*

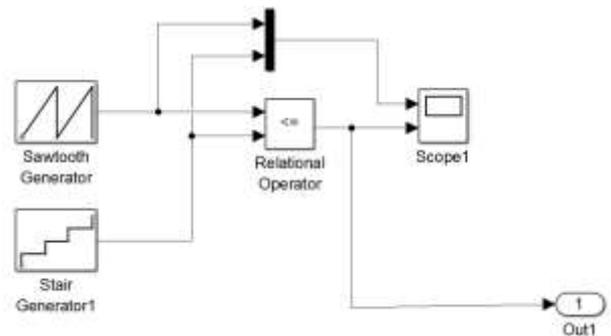
sehingga terjadi lonjakan arus *start* yang sangat tinggi. Lonjakan arus *starting* sebesar 619.45 A sebelum mencapai arus nominal motor 50 A, ditunjukkan pada Gambar 4 bagian atas. Gambar 4 bagian bawah adalah tegangan 400 V yang diberikan ke motor induksi tiga fase 37 kW. Energi yang dikonsumsi selama *starting* adalah sebesar 6.23 kWh dan tidak terjadi harmonisa selama *starting*.



Gambar 4. Arus dan tegangan fase R metoda DOL.

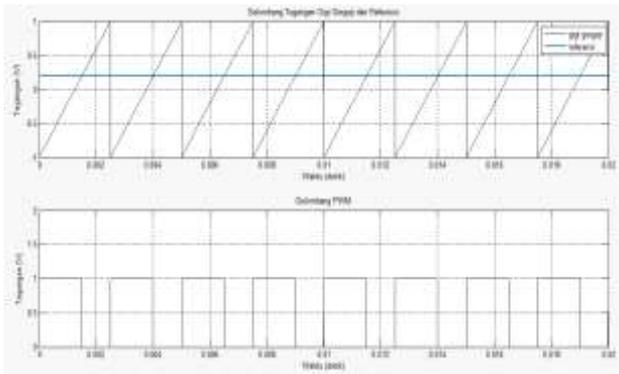
B. Hasil Rancangan dan Pengujian Model PWM

Perancangan model PWM menggunakan blok *sawtooth generator*, blok *stair generator* dan blok *relational operator* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Model PWM.

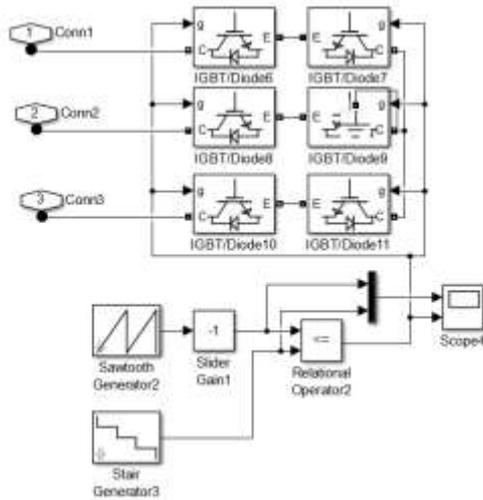
Prinsip kerja model PWM yaitu pada saat nilai tegangan referensi lebih besar dari tegangan *carrier* (gigi gergaji dari *sawtooth generator*) maka keluaran blok *relational operator* akan bernilai *high*. Berlaku sebaliknya, saat tegangan referensi bernilai lebih kecil dari tegangan *carrier*, maka keluaran blok *relational operator* akan bernilai *low*. *Duty cycle* dirubah dengan merubah tegangan referensi. Gambar 6. adalah hasil simulasi dari model PWM yang frekuensi 400 Hz dengan *duty cycle* sebesar 60%.



Gambar 6. PWM untuk *duty cycle* 60%, 400 Hz,

C. Hasil Rancangan dan Pengujian Model Anti Over voltage

Model anti *over voltage* ditunjukkan pada Gambar 7, terdiri dari blok *sawtooth generator*, blok *slider gain*, blok *stair generator*, blok *relational operator* dan blok IGBT/Diode.

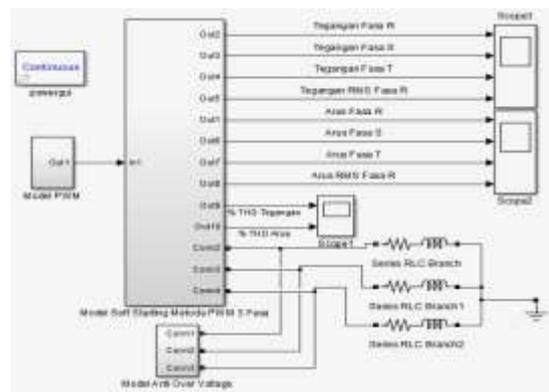


Gambar 7. Model anti *over voltage*

Prinsip kerja model anti *over voltage* yaitu untuk meredam lonjakan tegangan akibat *switching* IGBT. Pada saat blok IGBT pada model *soft starting* metoda PWM *off* atau terbuka maka blok IGBT pada model anti *over voltage* akan on atau tertutup. Sehingga arus induksi balik tidak melewati beban yang mengakibatkan lonjakan tegangan.

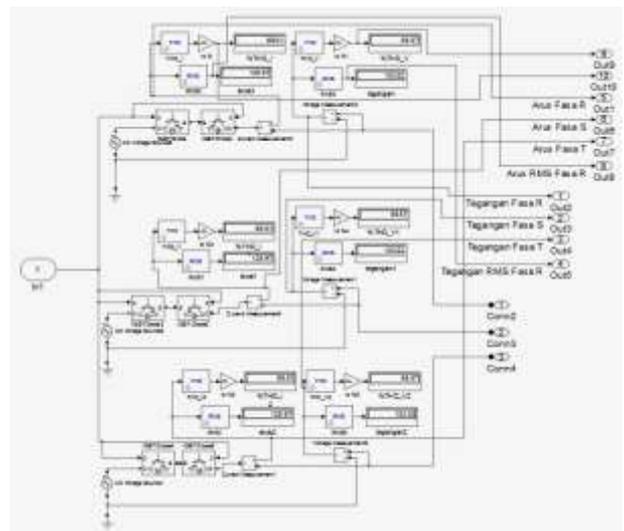
D. Hasil Soft Starting Metoda PWM Beban RL

Rangkaian *soft starting* metoda PWM dengan beban RL ditunjukkan pada Gambar 8. Rangkaian terdiri dari: model PWM, blok *series RLC branch*, model anti *over voltage*, dan model *soft starting* metoda PWM tiga fase. Rangkaian dilengkapi scope untuk melihat hasil pengukuran variabel-variabel sistem seperti tegangan, arus, dan THD.



Gambar 8. Soft Starting Metoda PWM Beban RL

Blok model *soft starting* metoda PWM tiga fase pada Gambar 8, dapat dijabarkan pada Gambar 9. Model *soft starting* metoda PWM tiga fase terdiri dari blok sumber tegangan AC, blok IGBT/Diode.



Gambar 9. Model soft starting metoda PWM tiga fase

Hasil simulasi rangkaian *soft starting* metoda PWM untuk beban RL ditunjukkan pada Tabel 1. Perubahan *duty cycle* dari 0 - 100% pada PWM untuk 10 tahap diperoleh nilai tegangan dan arus semakin besar. Tegangan dan arus meningkat dalam 10 tahapan.

Hasil pengukuran harmonisa ditunjukkan pada Tabel 2. *Duty cycle* PWM semakin besar (menuju 100%), THD tegangan dan THD arus akan semakin kecil. *Duty cycle* 100 % bentuk gelombang tegangan dan arus pada sisi beban adalah sinusoidal sehingga nilai THD sama dengan nol.

Tabel 1. Hasil *Soft Starting* Metoda PWM Beban RL

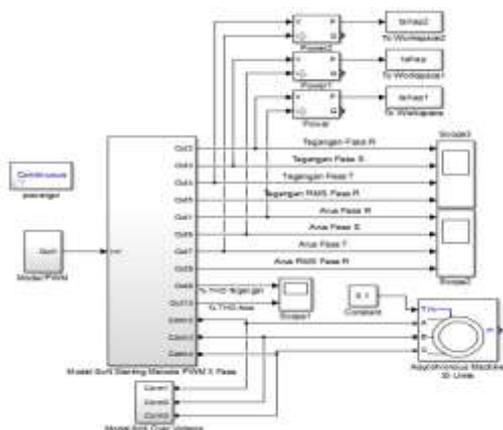
No	Duty Cycle Model PWM (%)	Duty Cycle Model Anti Over voltage (%)	Tegangan (V)	Arus (A)
1	10	90	73.01	10.6
2	20	80	103.2	27.72
3	30	70	126.4	47.4
4	40	60	145.9	68.38
5	50	50	163.1	90.19
6	60	40	178.7	112.8
7	70	30	193	136.4
8	80	20	206.3	161.6
9	90	10	218.7	189.1
10	100	0	230.5	219.9

Tabel 2. Hasil Pengukuran THD *Soft Starting* Metoda PWM Beban RL

No	Duty Cycle Model PWM (%)	Duty Cycle Model Anti Over voltage (%)	%THD Tegangan (%)	%THD Arus (%)
1	10	90	300.5	310.4
2	20	80	200.4	206.4
3	30	70	153	157.1
4	40	60	122.7	125.5
5	50	50	100.2	102.1
6	60	40	81.8	83.04
7	70	30	65.58	66.32
8	80	20	50.09	50.44
9	90	10	33.39	33.48
10	100	0	0	0

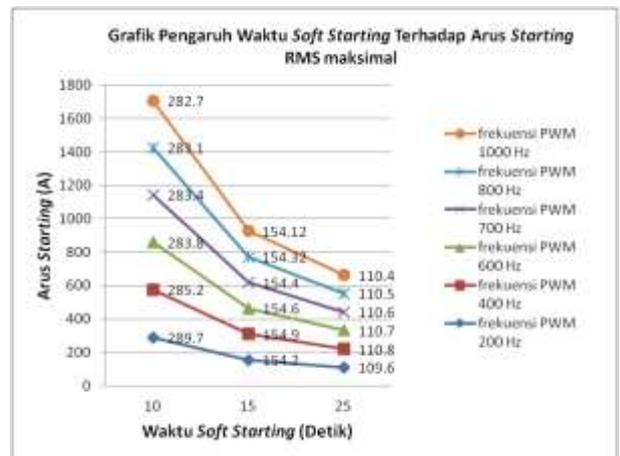
E. Hasil *Soft Starting* Metoda PWM pada Motor Induksi Tiga Fase 37 kW.

Gambar 10 adalah rangkaian blok *soft starting* metoda PWM untuk motor induksi tiga fase. Rangkaian blok terdiri dari model PWM, blok mesin asinkron SI units, model anti over voltage dan model *soft starting* metoda PWM.



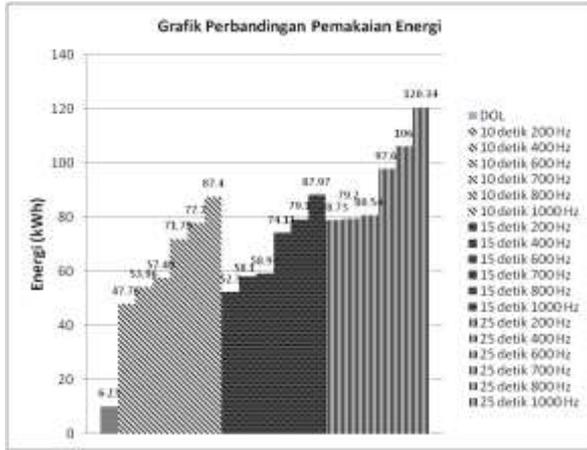
Gambar 10. *Soft starting* metoda PWM untuk motor induksi tiga fase

Perbandingan hasil simulasi arus starting motor induksi ditunjukkan pada Gambar 11. Pada frekuensi PWM (200, 400, 600, 700, 800, dan 1000Hz) dilakukan perubahan duty cycle PWM dari rentang 0-100% dengan waktu starting 10, 15 dan 25 detik. Arus starting minimum sebesar 109.6 A untuk *soft starting* frekuensi PWM 200 Hz dengan durasi starting 25 detik. Arus starting maksimum sebesar 282.7 A untuk *soft starting* frekuensi PWM 1000 Hz dengan durasi starting 15 detik. Nilai arus starting berbanding lurus dengan frekuensi PWM tetapi berbanding terbalik dengan durasi starting.



Gambar 11. Perbandingan durasi, frekuensi dan duty cycle *Soft Starting* metoda PWM pada Motor Induksi

Perbandingan konsumsi energi metoda DOL dan *Soft Starting* metoda PWM untuk masing-masing durasi starting pada masing-masing frekuensi PWM ditunjukkan pada Gambar 12. Konsumsi energi dihitung dari motor start sampai motor beroperasi pada tegangan nominal motor (400 V). Konsumsi energi metoda DOL sangat sangat rendah bila dibandingkan dengan *soft starting* metoda PWM. Konsumsi energi metoda DOL 6.23 kWh, sedangkan konsumsi energi dari *soft starting* metoda PWM bervariasi dari 47.76 – 120.34 kWh. Konsumsi energi *soft starting* metoda PWM 7 – 19 kali metoda DOL. Metoda konsumsi energi *soft starting* metoda PWM frekuensi 200 Hz terendah untuk durasi starting 10 detik, sedangkan konsumsi energi tertinggi pada frekuensi PWM 1000 Hz pada durasi starting 25 detik. Konsumsi energi *soft starting* metoda PWM berbanding lurus dengan frekuensi PWM dan waktu starting.



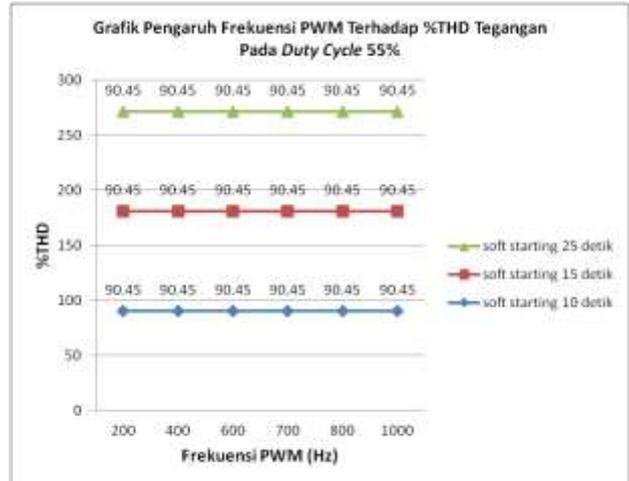
Gambar 12. Konsumsi energi selama starting

Hasil simulasi *soft starting* motor induksi tiga fase metoda PWM menghasilkan harmonisa arus dan tegangan selama proses starting. Gambar 13. adalah pengukuran THD arus untuk simulasi *soft starting* variasi frekuensi PWM (200, 400, 600, 700, 800 dan 1000 Hz) pada *duty cycle* 55%. THD arus tertinggi terjadi pada saat frekuensi 200 Hz dengan periode starting 25 detik, sedangkan THD arus terendah pada frekuensi 1000 Hz dengan durasi starting 10 detik. THD arus berbanding terbalik dengan durasi starting dan frekuensi PWM.



Gambar 13. THD Arus.

Gambar 14. menunjukkan variasi frekuensi PWM (200, 400, 600, 700, 800 dan 1000 Hz) dan durasi waktu starting terhadap THD tegangan pada *duty cycle* 55%. Berbeda dengan THD arus, frekuensi PWM tidak berpengaruh pada THD tegangan. THD tegangan hanya dipengaruhi oleh durasi waktu starting. Durasi waktu yang panjang menghasilkan THD tegangan yang tinggi pada *duty cycle* yang sama (55%).



Gambar 14 THD Tegangan.

KESIMPULAN

Soft starting metoda PWM untuk motor induksi tiga fase 37 kW berhasil mengurangi arus *start* dari metoda DOL yaitu sebesar 619.45 A menjadi 109.6 A pada frekuensi PWM 200 Hz dengan durasi *starting* 25 detik. *Soft starting* metoda PWM mengkonsumsi energi lebih tinggi antara 7 – 19 kali dari metoda DOL. Selama proses starting terjadi harmonisa pada arus dan tegangan yang dinyatakan dalam THD arus dan tegangan. THD arus pada *soft starting* metoda PWM, berbanding terbalik dengan durasi starting dan frekuensi PWM. Sedangkan THD tegangan hanya dipengaruhi oleh durasi waktu *starting*. Durasi waktu *starting* yang panjang menghasilkan THD tegangan yang tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A.B. Priahutama, T. Sukmadi, I. Setiawan, "Perancangan Modul *Soft Starting* Motor Induksi 3 Fase dengan ATMEGA 8535". *Transmisi*, 12(4), 160–167. 2010
- [2] M.K. Shibab, I.M.A. Nrartha, I. M. B Sukmadana, "Analisis Arus Starting dan Torsi pada Motor Induksi Tiga Fasa Terhadap Pemasangan Kapasitor Secara Real Time Berbasis Atmega 2560". *Dielektrika*, 5(2), 99–107, 2018.
- [3] R. Ardiansyah, I.M.A.Nrartha, I. M. B. Sukmadana, "Perancangan *Soft Starting* pada Motor Induksi 3 Fase Menggunakan Mikrokontroler Atmega328". *Dielektrika*, 2(2), 91–96., 2015
- [4] Y.R. Fauzi, "Perancangan *Soft Starting* pada Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Mikrokontroler Atmega328", Tugas Akhir, Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya., 2017
- [5] A. Saputra, Syukriadin, M. Syukri, "Perancangan Rangkaian Pengasutan *Soft Starting* Pada Motor Induksi 3 Fase Berbasis

- Arduino Nano. *Karya Ilmiah Teknik Elektro*, 2(4), 45–51, 2017.
- [6] V. Thanyaphirak, V..Kinnares, A.Kunakorn, . "Soft Starting method for single-phase PWM AC chopper fed three-phase induction motor". *International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS 2014*, 92–95., 2014
- 7] T. Kilić, B. Terzić, and M. Despalatović, "Active power filter for harmonic distortion compensation of induction motors with soft starting," 2005, doi: 10.1109/epe.2005.219256.
- [8] K. L. Shi, T. F. Chan, Y. K. Wong, and S. L. Ho, "Modelling and simulation of the three-phase induction motor using SIMULINK," *Int. J. Electr. Eng. Educ.*, 1999, doi: 10.7227/IJEEE.36.2.6.
- [9] D. Kho, "Pengertian PWM (Pulse Width Modulation atau Modulasi Lebar Pulsa)." tersedia di <https://teknikelektronika.com>. diakses 28 september 2019.
- [10]Fadhlanroyal, "Pulse Width Modulation (PWM)" 2012. tersedia di <http://robotic-electric.blogspot.com>. diakses 28 september 2019.
- [11]N.Tribuana, & Wanhar,. "Pengaruh Harmonik pada Transformator Distribusi" 1999,. <https://www.elektroindonesia.com>.
- [12]N. Mohan, M.T.Undeland, W.P Robbins, . "POWER ELECTRONICS (2 ed.). John Wiley & Sons, Inc., 1995