

Kontrol Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan *Multilevel Inverter* Dengan Metode V/f Konstan Berbasis *Fuzzy Logic Control*

Faisa Musahiroh¹, Fahmi Ahyar Izaqi², Irfan Dzaky Lazuardi³
^{1,2,3} Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jawa Timur, Indonesia

email: faisamusa@pe.student.pens.ac.id¹

Abstraksi – Tujuan dari dibuatnya paper ini adalah untuk melakukan pengaturan motor induksi dengan menggunakan *multilevel inverter* untuk mendapatkan gelombang tegangan keluaran yang baik. Pengaturan kecepatan motor induksi menggunakan metode V/f dengan mengubah tegangan sumber dan frekuensi yang kemudian diaplikasikan pada motor induksi 3 fasa dengan rasio konstan. Sistem ini diharapkan menjadi pengganti yang efektif dari metode konvensional yang menghasilkan *switching losses* yang lumayan besar dan dapat menurunkan performa motor. *Fuzzy logic control* digunakan untuk mengatur rasio tegangan dan frekuensi agar dapat menentukan nilai tegangan dan frekuensi yang tepat untuk mencapai *set point*. Hasil simulasi yang didapatkan memiliki nilai harmonisa yang besar, yaitu THDV sebesar 45,49 % sedangkan THDI sebesar 18,63 %.

Kata Kunci – Motor induksi, *Multilevel Inverter*, Metode V/f, *Fuzzy Logic Control*.

Abstract – *The purpose of this paper is to adjust the induction motor using a multilevel inverter to get a good output voltage waveform. The induction motor speed regulation uses the V/f method by changing the source voltage and frequency which is then applied to a 3-phase induction motor with a constant ratio. This system is expected to be an effective substitute for the conventional method which results in quite large switching losses and can reduce motor performance. Fuzzy logic control is used to adjust the voltage and frequency ratio in order to determine the right voltage and frequency values to reach the set point. The simulation results obtained have a large harmonic value, namely THDV of 45.49% while THDI is 18.63%.*

Keywords – *Induction Motor, Multilevel inverter, V/f method Fuzzy logic Control,*

I. PENDAHULUAN

Seiring berkembangnya teknologi pada aplikasi industri memerlukan sebuah mesin penggerak yang mudah dalam perawatan dan penggunaan serta murah dalam biaya pengoperasian. Pada umumnya pada industri menggunakan motor DC karena mudah dalam pengaturan kecepatan karena RPM tinggi dan respon torsi yang baik. Tetapi, motor DC memiliki sikat komutator yang dapat mengalami keausan seiring berlalunya waktu, sehingga perlu perawatan khusus. Dalam kebanyakan kasus, motor AC lebih disukai daripada motor DC, hal ini disebabkan karena motor induksi memerlukan biayanya operasional yang rendah, perawatan yang mudah, berat yang lebih rendah, efisiensi yang lebih tinggi, dan keandalan. Semua fitur ini membuat penggunaan motor induksi banyak digunakan pada aplikasi industri.

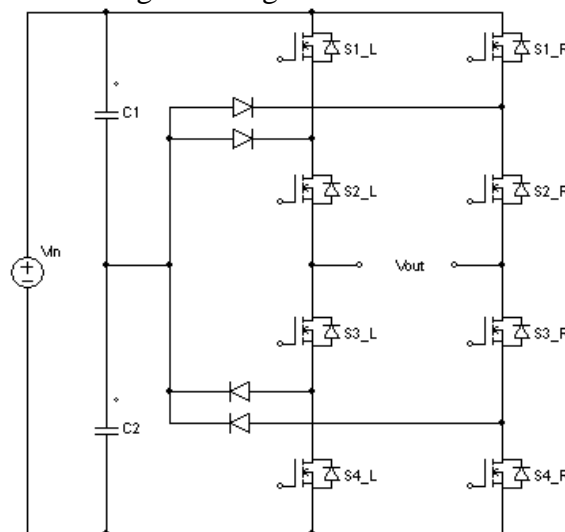
Kemajuan teknologi dalam elektronika daya dan teknologi semikonduktor telah memicu pengembangan perangkat semikonduktor berdaya tinggi dan berkecepatan tinggi untuk mencapai variasi kecepatan motor yang halus, kontinu, dan *step-less* [1]. *Multilevel inverter* dikenal memiliki distorsi tegangan rendah dan dapat beroperasi pada daya tinggi dan frekuensi *switching* yang tinggi. Dalam kondisi ideal, *multilevel inverter* harus menyediakan gelombang

sinus murni untuk beban listrik. *Multilevel inverter* dapat menghasilkan tegangan keluaran bertingkat yang mendekati bentuk gelombang sinus. Dengan bentuk gelombang seperti hal tersebut, akan lebih efektif digunakan sebagai tegangan untuk menyuplai motor, karena inverter jenis ini lebih baik kualitas tegangan keluarannya daripada inverter konvensional, karena lebih minim distorsi dan mengurangi rugi daya. Dengan *Fuzzy Logic Control*, parameter untuk mengatur rasio antara tegangan dan frekuensi pada *multilevel inverter* dapat diatur, sehingga dapat mencapai *set point* kecepatan yang diinginkan [2].

II. METODE

A. *Multilevel Inverter*

Inverter merupakan peralatan yang mengubah besaran listrik searah (DC) menjadi besaran listrik bolak-balik (AC). *Inverter* pada umumnya hanya memiliki tiga level tegangan, yaitu +VDC, -VDC, dan nol. *Inverter* multilevel merupakan jenis *Inverter* yang dapat menghasilkan beberapa level tegangan maupun arus. *Inverter* multilevel pada prinsipnya merupakan susunan beberapa *Inverter* yang dirangkai secara bertingkat. *Diode Clamped Multilevel Inverter* (DC-MLI) juga dikenal sebagai *Neutral Point Clamped Multilevel Inverter* (NPC-MLI) [3]. NPC-MLI terdiri dari dua pasang sakelar seri (atas dan bawah) secara paralel dengan dua kapasitor seri dimana anoda dioda atas dihubungkan ke titik tengah (netral) kapasitor dan katoda ke titik tengah atas sepasang sakelar. Katoda dari diode bawah dihubungkan ke titik tengah kapasitor yang berfungsi membagi tegangan DC utama menjadi tegangan yang lebih kecil ($1/2$ VDC). Titik tengah dari dua kapasitor dapat didefinisikan sebagai “titik netral”. *Diode clamped Inverter* menggunakan bus DC tunggal yang terbagi dalam level tegangan oleh serangkaian kapasitor. Untuk *diode clamped Inverter* 3 tingkat antara fasa ke netral, titik 0 diambil sebagai referensi *ground*. Jumlah komponen semikonduktor (MOSFET/IGBT) yang digunakan membutuhkan lebih banyak komponen semikonduktor untuk membentuk tingkat dari gelombang tegangan keluarannya. Selain itu untuk membentuk tegangan bertingkat pada topologi NPC-MLI diperlukan komponen tambahan yakni dioda tegangan tinggi untuk *blocking* tegangan balik dan kapasitor untuk DC-link. Gambar 2.6 menunjukkan skema rangkaian *multilevel inverter* 3 tingkat 2 lengan.



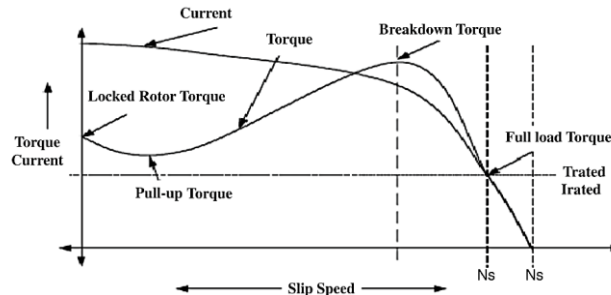
Gambar 1. Rangkaian *Multilevel Inverter Diode Clamped*

B. *Pengaturan Kecepatan Motor Induksi*

Kontrol kecepatan motor induksi dapat secara luas diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu kontrol skalar [4] dan kontrol vector [5]. Kontrol skalar melibatkan pengendalian besarnya

tegangan atau frekuensi motor induksi. Dengan mengetahui karakteristik kecepatan dan torsi dari motor induksi, kecepatannya dapat dikontrol dengan 3 cara yaitu:

1. Dengan mengganti jumlah *pole*
2. Memvariasikan tegangan *input* pada frekuensi tetap
3. Memvariasikan tegangan *input* dan frekuensi secara bertahap

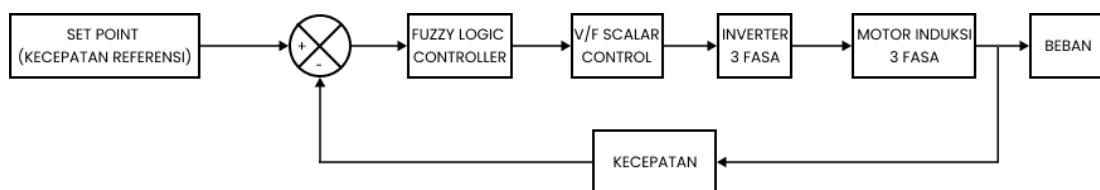


Gambar 2. Karakteristik Kecepatan dan Torsi Motor Induksi

Untuk menjaga agar torsi motor mendekati ratingnya pada semua frekuensi, *air gap flux* ϕ_{ag} , dijaga konstan. Semua pengurangan frekuensi *supply* tanpa mengubah tegangan akan menaikkan *air gap flux* dan motor akan dalam keadaan saturasi. Ini akan meningkatkan arus magnetisasi, mengganggu arus dan tegangan *line* dan juga meningkatkan *losses* pada inti besi dan tembaga dan ini juga membuat sistem menjadi berisik.

C. Perancangan Sistem

Pengaturan kecepatan motor induksi dilakukan secara *loop* tertutup dengan nilai *set point* kecepatan yang menjadi nilai referensi kecepatan putaran pada motor. Diagram *block* dari sistem pengaturan kecepatan pada motor induksi tiga fasa tersebut ditunjukkan pada Gambar 3. Pada *block* diagram sistem, merupakan suatu sistem pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa menggunakan *Fuzzy logic controller* dengan Sugeno models sebagai kontrolernya. Sumber motor induksi 3 fasa didapatkan pada inverter 3 fasa yang mengubah tegangan searah menjadi tegangan bolak balik [6].



Gambar 3. Blok Diagram Sistem

Inverter 3 fasa yang digunakan menggunakan teknik *switching Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM) di mana akan menghasilkan tegangan keluaran yang termodulasi. Keluaran yang dihasilkan dari inverter tersebut yaitu sebesar 220 Vrms sesuai dari tegangan nominal motor, nantinya keluaran tegangan tersebut digunakan sebagai *supply* motor induksi 3 fasa, motor induksi 3 fasa yang digunakan pada simulasi memiliki spesifikasi 1.5 Hp atau setara dengan 1,2 KW dengan memiliki kecepatan nominal sebesar 1435 RPM. Untuk melakukan pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa digunakan *fuzzy logic controller*. Metode yang digunakan pada *Fuzzy logic controller* pada sistem ini menggunakan metode Sugeno.

Metode Sugeno hampir sama dengan metode Mamdani, hanya saja *output* (konsekuen) sistem tidak berupa himpunan fuzzy, melainkan berupa konstanta atau persamaan linear. Di mana terdapat 2 *input* yaitu *error* dan *delta error* dan 1 *output* fungsi keanggotaan. Fungsi keanggotaan/MF (*membership function*) yang digunakan pada sistem ini yaitu 7x7. *Set point* yang digunakan pada pengontrolan sistem ini menggunakan *set point* kecepatan di mana keluaran dari sensor kecepatan akan di *feedback* sehingga menghasilkan sinyal *error*, sinyal *error* dan *delta error* ini nantinya akan diolah oleh *fuzzy logic controller*. Keluaran dari kontrol

tersebut nantinya akan mengubah nilai parameter m_f (*Modulation frequency*) dan MA (*Modulation amplitude*) setelah diproses oleh *scalar control* dalam menjaga rasio perbandingan tegangan dan frekuensi tetap konstan.

D. Perancangan Control

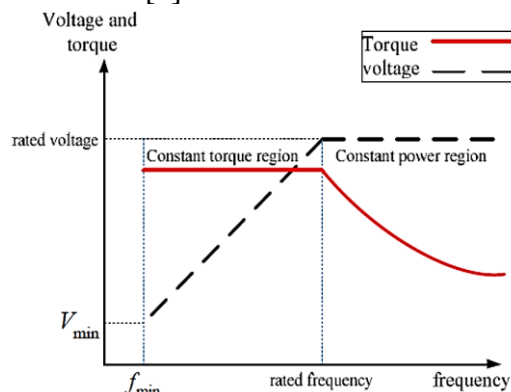
Perancangan *control* pada sistem terdiri dari *scalar control* dan *fuzzy logic controller* sebagai berikut:

1. Scalar Control

Kecepatan motor induksi berbanding lurus dengan frekuensi sumber daya dan jumlah kutub dari motor. Karena jumlah kutub ditetapkan melalui desain, cara terbaik untuk merubah kecepatan dari motor induksi tersebut adalah dengan merubah frekuensi sumber daya. Torsi yang dihasilkan oleh motor induksi adalah berbanding lurus dengan rasio tegangan yang diberikan dan frekuensi sumber daya. Dengan merubah tegangan dan frekuensi, tetapi menjaga konstan rasio keduanya, torsi yang dihasilkan dapat dijaga konstan sepanjang daerah pengaturan kecepatan. Kendali ini disebut sebagai kendali v/f konstan. Oleh karena itu dengan memvariasikan tegangan dan frekuensi oleh rasio yang sama, torsi dapat dijaga konstan dan independen frekuensi suplai di seluruh rentang kecepatan [4].

$$V_{eff} \propto f \cdot \varphi \rightarrow \varphi \propto \frac{v}{f} \quad (1)$$

Di mana V dan φ adalah tegangan stator dan fluks masing-masing serta f adalah frekuensi tegangan *input*. Ini membuat v/f konstan membuat pengaturan kecepatan paling umum pada motor induksi seperti pada Gambar 4 [7].



Gambar 4. Karakteristik V/F Konstan

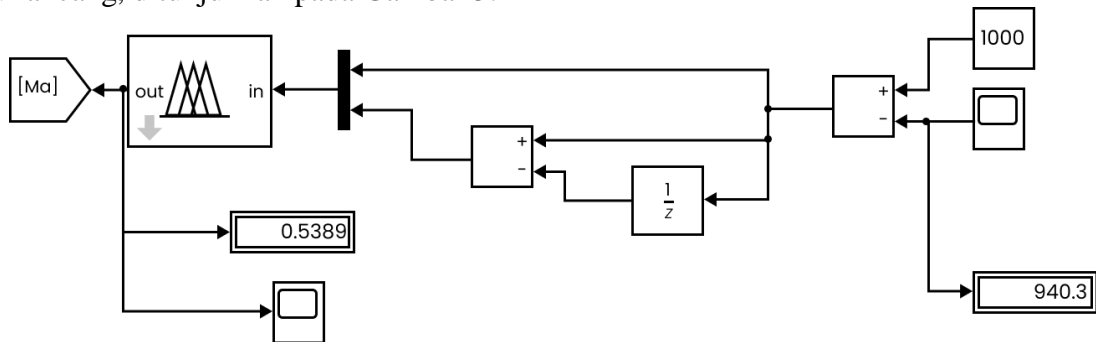
Pengaturan kecepatan motor induksi dilakukan dengan mempertahankan rasio v/f yang konstan untuk menghindari celah udara variasi fluks. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, tujuan dari pengaturan v/f konstan adalah untuk menjaga torsi konstan dan independen frekuensi, mencapai efisiensi yang lebih tinggi dan arus yang lebih rendah saat *runtime*.

2. Fuzzy logic controller

Kontroler logika fuzzy dikategorikan dalam kontrol cerdas (*intelligent control*). Unit logika fuzzy memiliki *realibity* yang mampu menyelesaikan masalah perilaku sistem yang kompleks dan memiliki ketidakpastian [8]. Pengendali logika fuzzy memiliki unjuk kerja sangat baik dibandingkan dengan sistem kontroler PID. Berbeda dengan sistem control biasa, keluaran yang dihasilkan diolah dan didefinisikan secara pasti atau dengan istilah lain hanya mengenal logika '0' dan '1' atau bekerja pada daerah ON dan OFF sehingga didapatkan perubahan yang kasar. Pada sistem logika fuzzy, nilai yang berada antara '0' dan '1' dapat didefinisikan, sehingga kontroler dapat bekerja seperti sistem syaraf manusia yang bisa merasakan lingkungan eksternalnya, yakni "kurang", "agak", "biasa", dan "sangat". Kontroler yang berbasis logika fuzzy harus melalui beberapa tahapan sebelum sampai ke plant. Tahapan-tahapan tersebut

kuantisasi, fuzzifikasi, penentuan *rule base* dan Inference (*reasoning*), kemudian defuzzifikasi. Metode sistem inferensi fuzzy (*Fuzzy Inference System/FIS*) yang dikenal antara lain metode: Mamdani [9], Sugeno [6] dan Tsukamoto [10].

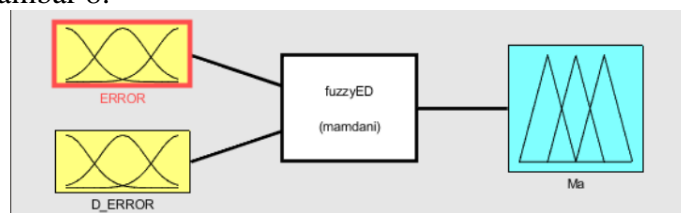
Blok diagram *fuzzy logic controller simulink* menggunakan matlab sistem pengaturan kecepatan motor induksi menggunakan metode *v/f scalar control* dengan kontroler logika fuzzy yang dirancang, ditunjukkan pada Gambar 5.



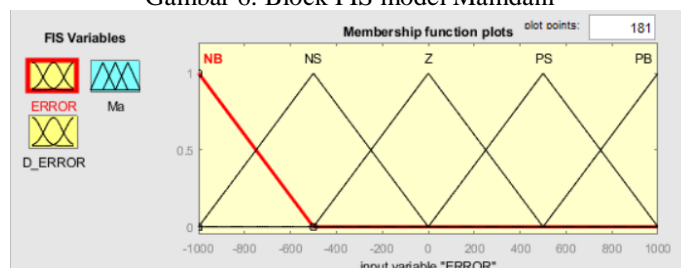
Gambar 5. Blok Diagram Simulink FLC

Pada pengontrol *Fuzzy logic controller* memiliki dua masukan dan satu keluaran yang masing-masing memiliki 7 fungsi keanggotaan. Masukan pada *control fuzzy* ini adalah *error* (*e*) dan *delta error* (*de*), sedangkan keluaran pengontrol fuzzy merupakan sinyal *control f* (*u*). Metode yang digunakan yaitu sugeno *fuzzy models*.

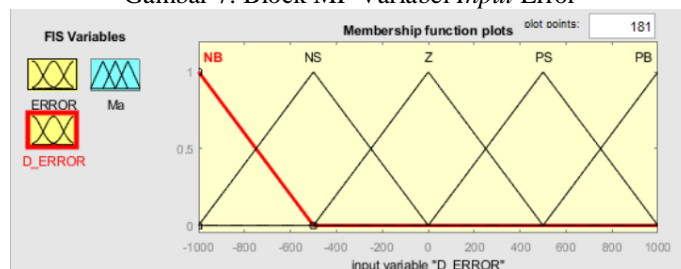
Menggunakan *Fuzzy Inference System* (FIS) model Sugeno, maka block FIS editor dari Simulink/Matlab dapat dirancang seperti tampilan Gambar 6. Metode yang digunakan pada kontroler logika fuzzy ini adalah metode statik, artinya sifat fungsi keanggotaan (*membership function/MF*) bekerja dengan rentang kerja (*range*) tetap, yaitu antara 0 sampai dengan 4 untuk variabel *input*, dan antara 0 sampai dengan 4 untuk variabel *output*. Kontroler ini dapat dilibat pada Gambar 7 dan Gambar 8.



Gambar 6. Block FIS model Mamdani



Gambar 7. Block MF Variabel Input Error



Gambar 8. Block MF Variabel Input Delta Error

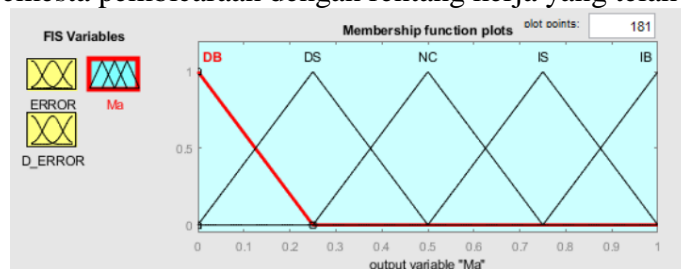
Dalam merancang kontroler logika fuzzy yang perlu diperhatikan adalah variabel *input* (masukan) *error* (e) dan perubahan/*delta error* (dE), dinyatakan melalui persamaan:

$$e(k) = sp - y(k) \tag{2}$$

$$dE(k) = e(k) - e(k-1) \tag{3}$$

Di mana *sp* adalah *set point* (kecepatan referensi ‘w-ref’) dan *y* adalah keluaran (*output*) sistem, sedangkan *k* dan *k-1* adalah kejadian urutan dari pencuplikan data sistem. Pada kasus pengaturan kecepatan motor induksi, himpunan semesta pembicaraan meliputi *error* kecepatan dan *delta error* kecepatan dinyatakan melalui Persamaan 2 dan 3.

Error dan *delta error* yang terjadi selama sistem dioperasikan terlebih dahulu dikuantisasi atau dipetakan melalui interpolasi biasa menjadi *error* terkuantisasi (*Qe*) dan *delta error* terkuantisasi (*dQe*). Pengkuantisasian melalui interpolasi bertujuan untuk memetakan *error* dan *delta error* ke dalam semesta pembicaraan dengan rentang kerja yang telah ditetapkan di atas.



Gambar 9. Rule Model Surface

Aturan dasar fuzzy (*rule base*) dari kontroler logika fuzzy pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1 blok fuzzy rule base sedangkan pada Gambar 9 merupakan tampilan fuzzy rule model surface.

TABEL 1. RULE BASE FUZZY LOGIC

E \ dE	NB	NS	Z	PS	PB
NB	DB	DB	DB	DS	NC
NS	DB	DB	DS	NC	IS
Z	DB	DS	NC	IS	IB
PS	DS	NC	IS	IB	IB
PB	NC	IS	IB	IB	IB

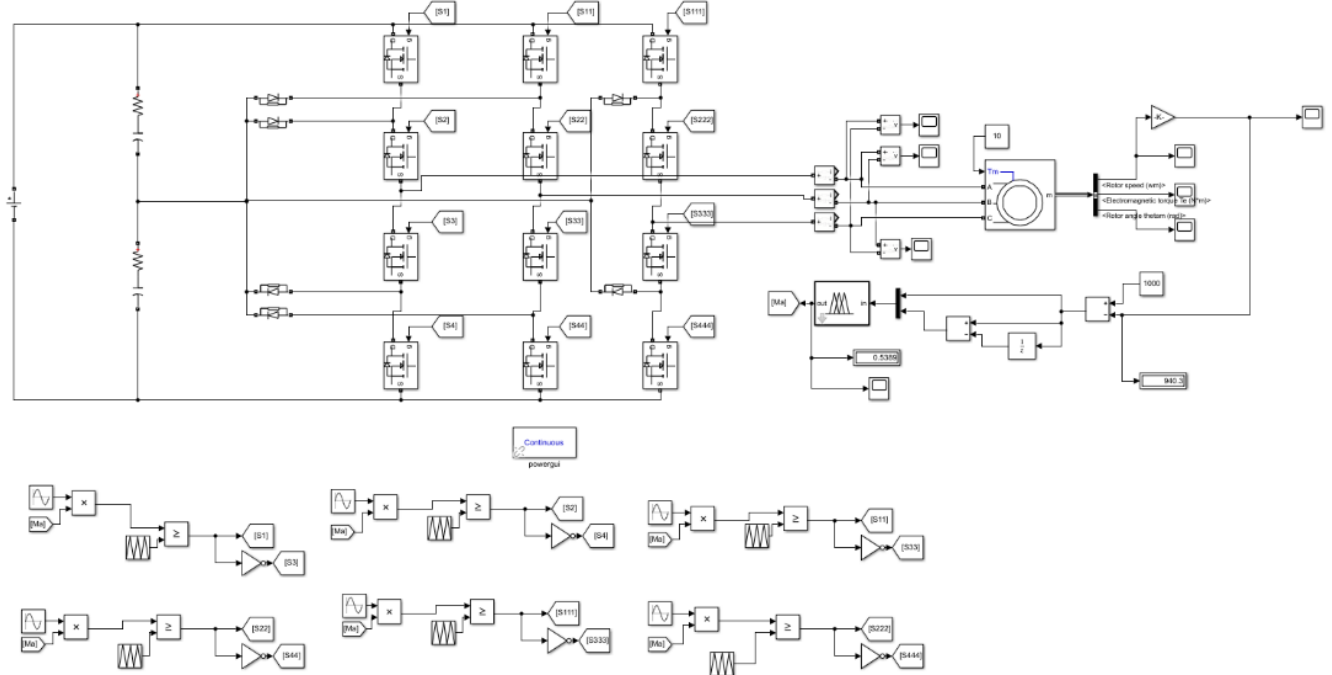
E. Pengambilan Data

Pengambilan data meliputi data respon kecepatan motor *open loop* (tanpa pengaturan) dan respon *close loop* (dengan pengontrol) serta pengamatan gelombang tegangan antar fasa, arus fasa, torsi motor dan nilai *total harmonic distortion* (THD). Pengambilan data respon kecepatan *open loop* bertujuan untuk identifikasi plant atau dengan kata lain mengetahui perilaku sistem tanpa pengontrol. Pengambilan data dilaksanakan variasi nilai kecepatan yaitu nilai *Set point* 800 RPM, 1000 RPM, 1200 RPM. Beban yang diberikan sebesar 10 Nm yang akan diberikan ke motor. Data yang diamati berupa respon kecepatan motor tanpa menggunakan pengontrol dibandingkan dengan saat menggunakan *control*.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

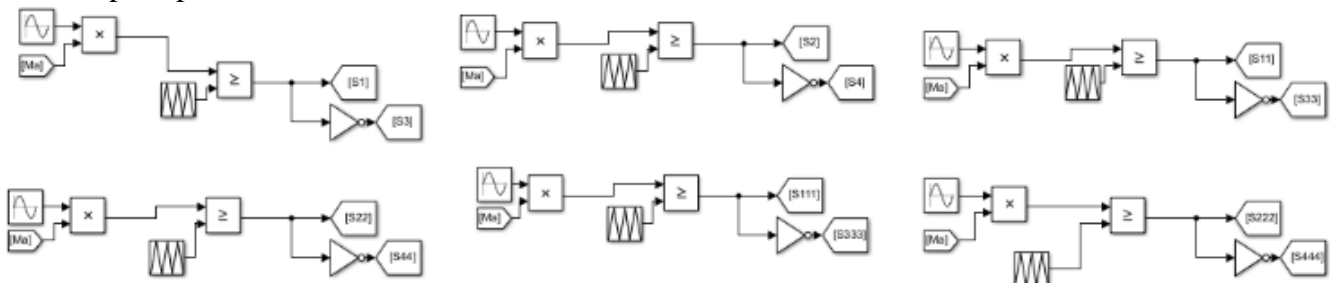
Untuk menguji keberhasilan/ketangguhan dari sistem pengaturan yang dirancang, maka simulasi program dilakukan dengan kondisi pemberian beban (torsi beban), beban yang diberikan yaitu sebesar 10 Nm yang didasari pada beban penuh. Pada masing-masing kondisi perubahan *set point* tersebut diamati dan dianalisis kinerja motor induksi seperti *overshoot*, *undershoot*, *rise time*, *settling time* dan *steady state error* melalui tampilan karakteristik

kecepatan motor induksi pada blok “Scope” matlab. Gambar 10 merupakan diagram sirkuit pengendali motor induksi 3 fase menggunakan *fuzzy logic controller* menggunakan matlab.



Gambar 10. Diagram Sirkuit Sistem dengan Simulink MATLAB

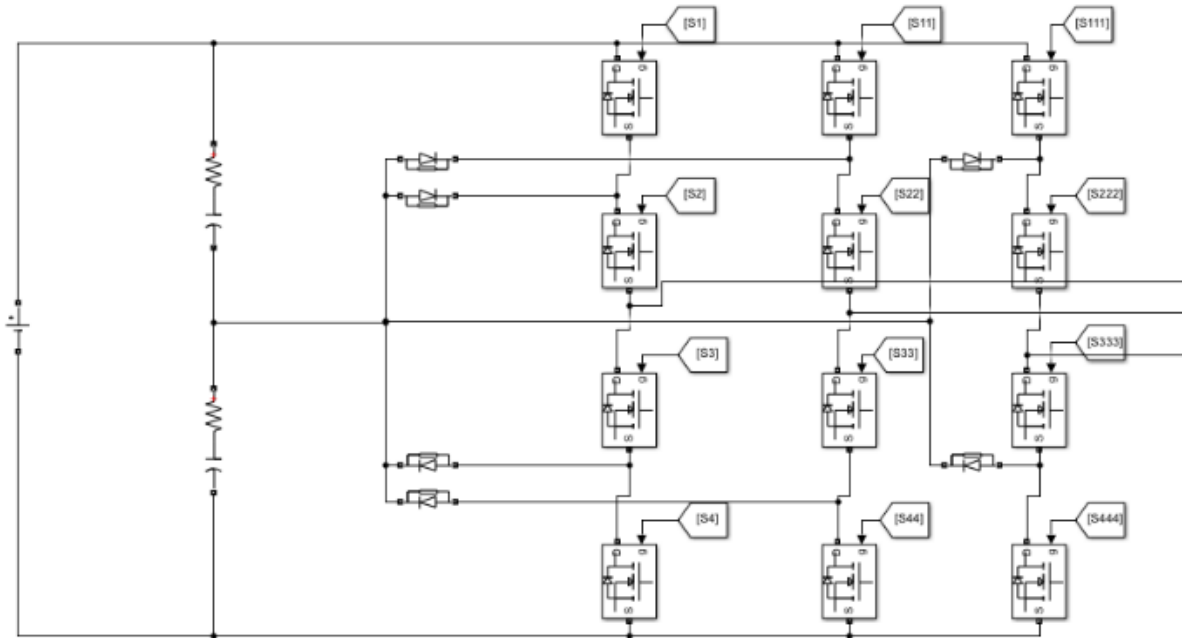
Sinyal pembangkitan inverter 3 fase menggunakan *sinusoidal pulse width modulation* (SPWM) dibangkitkan dengan cara membandingkan sinyal referensi yaitu sinyal sinusoidal dengan sinyal *carrier* yaitu sinyal segitiga. Sinyal referensi memiliki perbedaan sudut 120 untuk mewakili sumber 3 fase yang memiliki beda sudut fasa 120. Keluaran dari comparator atau pembanding sinyal tersebut digunakan sebagai pembangkitan sinyal inverter 3 fase pada komponen *switching* IGBT di mana sinyal pembangkitan tersebut terdiri dari sinyal *high* dan sinyal *low*. Sinyal tersebut nantinya akan mendrive dari 6 IGBT pada inverter 3 fase. Blok diagram sirkuit *sinusoidal pulse width modulation* (SPWM) menggunakan simulink matlab seperti pada Gambar 11.



Gambar 11. Diagram Sirkuit *Sinusoidal Pulse Width Modulation*

Blok Inverter 3 Fasa pada Gambar 12, terdiri dari 6 IGBT (komponen *switching*) di mana sinyal pembangkitan pada kaki gate didapatkan pada proses pembangkitan sinyal SPWM. Besarnya tegangan *input* DC (VDC) sebesar 311,12 V supaya menghasilkan tegangan keluaran inverter sebesar 220 Vrms sehingga bisa digunakan sebagai sumber dari motor induksi 3 fase.

Pada simulasi ini motor induksi yang digunakan memiliki kapasitas 7.55 KW dengan tegangan nominal motor sebesar 400 V. Pada Tabel 2 merupakan spesifikasi dari motor induksi 3 fasa yang digunakan pada simulasi ini. Pada blok motor induksi 3 fasa memiliki tiga *input* yaitu A, B, C. Ketiga *input* ini merupakan *output* dari blok inverter 3 fasa.

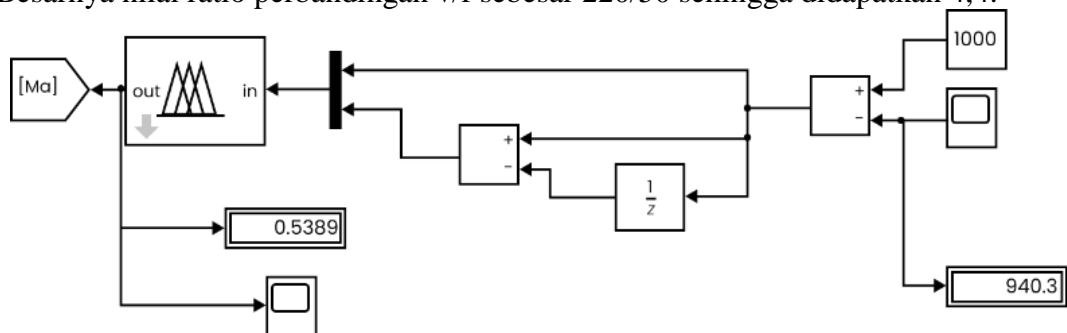


Gambar 12. Diagram Sirkuit Inverter 3 Fasa

TABEL 2. SPESIFIKASI MOTOR INDUKSI 3 FASA

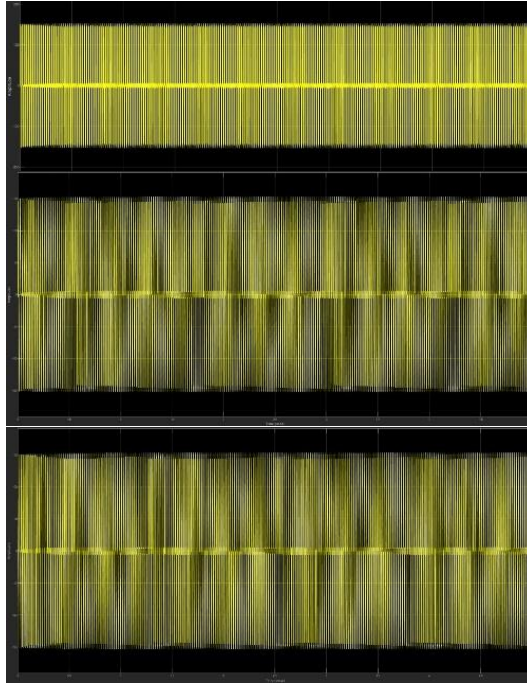
No.	Motor Parameter	Specification
1	Voltage	400 Volt
2	Power	7.5 KW
3	Frequency	50 Hz
4	Speed	1440 RPM
5	Rotor Type	Squirrel Cage
6	Rotor Resistance	0.7402 Ω
7	Stator Resistance	0.7384 Ω
8	Rotor Inductance	0.003045 H
9	Stator Inductance	0.003045 H
10	Mutual Inductance	0.1241 H
11	Pole	2
12	Inertia	0.0343 Kg

Besarnya torsi beban yang diberikan yaitu sebesar 10 Nm. Parameter yang diambil dari block tersebut yaitu rotor speed dan electromagnetic torque, di mana rotor speed digunakan sebagai feedback atau input dari sebuah controller. Block controller pada Gambar merupakan blok keseluruhan controller yaitu terdiri dari v/f scalar control dan Fuzzy logic controller. Pada block scalar control parameter yang diamati yaitu frekuensi (f) dan modulation amplitude (MA). Besarnya nilai ratio perbandingan v/f sebesar 220/50 sehingga didapatkan 4,4.



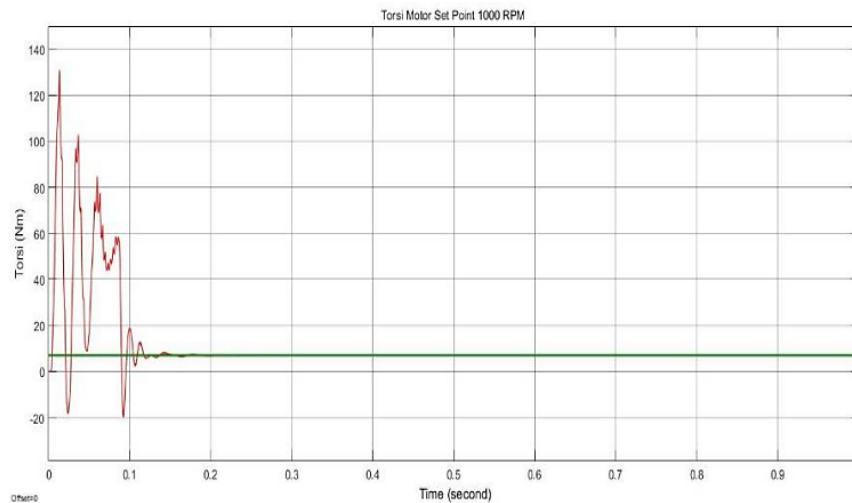
Gambar 13. Diagram Sirkuit Controller

Gambar 14 merupakan gambar gelombang tegangan output VL-L yang merupakan keluaran dari inverter 3 fasa yang terhubung ke motor induksi 3 fasa dengan torsi beban sebesar 10 Nm.

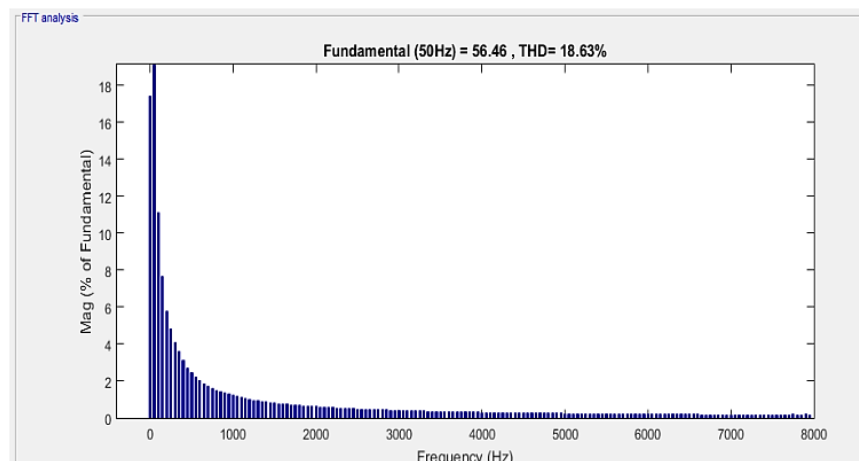


Gambar 14. Tegangan Output V_{L-L}

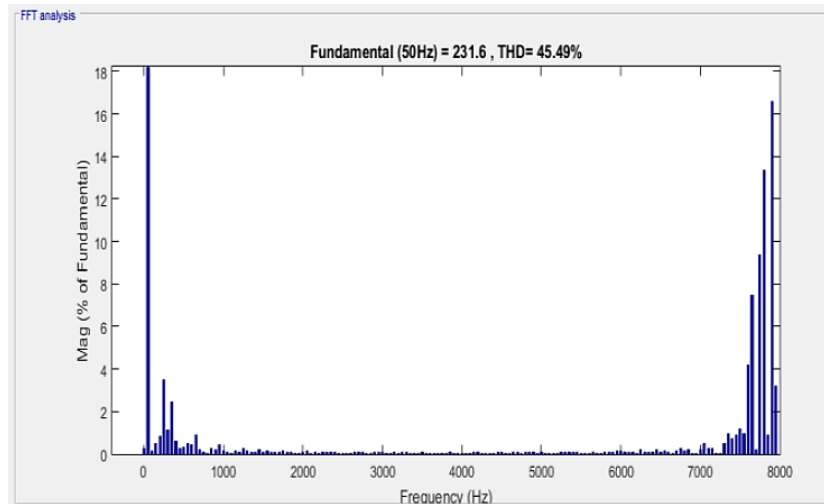
Gambar 15 merupakan gambar gelombang torsi motor yang dihasilkan saat torsi beban 10 Nm saat *set point* 1000 RPM, sedangkan Pada Gambar 16 dan Gambar 17 merupakan nilai total *harmonic distortion* THDV dan THDI.



Gambar 15. Torsi Motor Set Poin 1000 RPM



Gambar 16. THD-i



Gambar 17. THD-V

Dari hasil simulasi yang didapat pada sistem tersebut memiliki kandungan harmonisa yang besar, baik THDI maupun THDV hal dikarenakan teknik *switching* yang digunakan pada inverter 3 fasa yaitu SPWM di mana masih tergolong memiliki kandungan harmonisa yang tinggi, selain itu beban yang digunakan yaitu motor induksi 3 fasa merupakan jenis beban non linier atau beban yang bersifat induktif sehingga memiliki kandungan harmonisa yang tinggi. Serta itu tidak digunakannya *low pass filter* pada keluaran inverter 3 fasa sehingga kandungan harmonisa tidak termitigasi.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan simulasi yang dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Dengan menggunakan *Fuzzy logic controller* metode Sugeno pada pengaturan kecepatan motor induksi 3 fasa, dengan *set point* kecepatan 800, 1000 dan 1200 RPM dengan torsi beban sebesar 10 Nm didapatkan respon yang sesuai dengan *set point*-nya. Dari respon yang didapatkan sistem memiliki nilai *error steady state* yang rendah, serta nilai *rise time* dan *settling time* yang cepat sehingga motor cepat dalam menuju keadaan *steady state*.
2. Pada sistem ini nilai *total harmonic distorsion* THDV dan THDI, dari hasil simulasi yang didapatkan memiliki kandungan harmonisa yang besar, yaitu THDV sebesar 45,49 % sedangkan THDI sebesar 18,63 %.

REFERENSI

- [1] Hart, D. W. (2011). *Power Electronics*. New York: Mc. Graw Hill.
- [2] Putri, R. I. (2007). Penerapan Adaptif Fuzzy Pada Pengaturan Pecepatan Motor Induksi Tiga Fasa, *Jurnal Teknik GELAGAR*, 18(1): 57-64.
- [3] Semendawai, H. & Sutikno, T. (2018). Pemodelan Neutral Point Clamped-Multilevel Inverter Tiga Fasa Menggunakan Metode Phase Disposition Pulse Width Modulation, *Jurnal Ilmu Teknik Elektro Komputer dan Informatika (JITEKI)*, 4(1): 28-33.
- [4] Sumanjaya, R. & Susanto, E. (2015). Perancangan Simulasi Sistem Kontrol Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Dengan Metode Control Scalar, *eProceedings of Engineering*, 2(3): 1-8.
- [5] Pambudi, D. S. A., Sarwoko, M., & Kurnia, E. (2016). Kontrol Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Tegangan Dan Frekuensi Dengan Modulasi Vector Ruang, *Jurnal Penelitian Dan Pengembangan Telekomunikasi, Kendali, Komputer, Elektrik Dan Elektronika (TEKTRIKA)*, 1(1): 76-84.

- [6] Chen, Y., Yang, B., Abraham, A., & Peng, L. (2007). Automatic Design of Hierarchical Takagi–Sugeno Type Fuzzy Systems Using Evolutionary Algorithms, *in IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15(3): 385-397.
- [7] Alizadeh, M., Masoumi, M., & Ebrahim, E. (2017). Closed Loop Speed Control Of Induction Motor Using Constan V/F Applying SPWM and SVM Based Inverter," *International Journal of Engineering and Advanced technology (IJEAT)*, 6(5): 234-241.
- [8] Sukanto. (2019). Pengendalian Kecepatan Motor Induksi Menggunakan Controller Logika Fuzzy, *Jurnal of Electrical Electronic Control and Automotive Engineering (JEECAE)*, 4(1): 245-251.
- [9] Sutawinaya, I. P. (2013). Pengembangan Model Fuzzy Mamdani Untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Berbasis Metode Control Filed Oriented, *Jurnal LOGIC*, 13(2).
- [10] Cordon, O. (2011). A Historical Review of Evolutionary Learning Methods for Mamdani-Type Fuzzy Rule-Based Systems: Designing Interpretable Genetic Fuzzy Systems, *International Journal of Approximate Reasoning*, 52(6): 894-913.