

## Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Metode *Field Oriented Control* (FOC) Pada Mobil Listrik

Nibras Syarif Ramadhan<sup>1</sup>, Indra Ferdiansyah<sup>2</sup>, Era Purwanto<sup>3</sup>  
<sup>1,2,3</sup> Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jl. Raya ITS, Jawa Timur, Indonesia

*email: nibras.sarbin11@gmail.com<sup>1</sup>, indraferdi@pens.ac.id<sup>2</sup>, era@pens.ac.id<sup>3</sup>*

**Abstrak** - Terbatasnya bahan bakar fosil mendorong adanya penelitian mengenai energi alternatif. Penggunaan mobil listrik menjadi salah satu solusi memanfaatkan energi alternatif. Dalam penerapannya, mobil listrik dapat digerakkan oleh beberapa jenis motor, salah satunya adalah motor induksi tiga fasa. Motor induksi tiga fasa bekerja dengan sistem *coupled* yang berarti kumparan medan dan jangkar saling memengaruhi satu sama lain. Interaksi keduanya menghasilkan torsi dan fluks yang mana diperlukan sebuah metode yang dapat mengatur torsi dan fluks secara terpisah agar torsi dapat dimaksimalkan tanpa adanya perubahan fluks. Pada mobil listrik, arus motor dapat berubah tergantung dari medan yang dilalui. Penggunaan metode *field oriented control* dapat memisahkan komponen torsi dan fluks dengan menggunakan transformasi clarke dan park. Dengan perangkat inverter dan sensor kecepatan akan didapat sinyal RPM,  $\omega$ ,  $\theta$  yang diolah menjadi  $I_d$  dan  $I_q$  sebagai masukan metode *field oriented control*. Penelitian dilakukan dengan *software* matlab pada beban mobil listrik seberat 208 kg. Hasil simulasi menunjukkan sistem dapat mencapai *setpoint* 1200 RPM dalam waktu 0,04 detik dan memiliki *steady state error* sebesar 1,08% dengan menggunakan kontrol proporsional dan integral sebagai kontrolernya.

**Kata Kunci** - Mobil listrik, *field oriented control*, kontrol proporsional dan integral, motor induksi.

**Abstract** - Limited fossil fuels encourage research on alternative energy. The use of electric cars is one solution to utilize alternative energy. In its application, electric cars can be driven by several types of motors, one of which is a three-phase induction motor. Three-phase induction motors work in a coupled system which means that the field and armature coils influence each other. The interaction of the two produces torque and flux which requires a method that can regulate torque and flux separately so that torque can be maximized without any change in flux.. In electric cars, the motor current can change depending on the field in which it is travelling. The use of field oriented control method can separate the components of torque and flux by using the Clarke and Park transformations. With the inverter device and speed sensor, RPM,  $\omega$ ,  $\theta$  signals will be obtained which are processed into  $I_d$  and  $I_q$  as input for the field oriented control method. The research was conducted using Matlab software on an electric car weighing 208 kg. The simulation results show that the system can reach a setpoint of 1200 RPM in 0.04 seconds and has a steady-state error of 1.08 % by using proportional and integral controls as controllers.

**Keywords** - Electric car, *field oriented control*, proportional and integral controller, induction motor.

### I. PENDAHULUAN

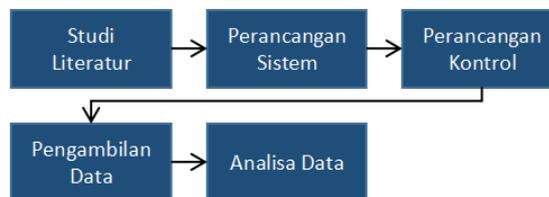
Penggunaan energi bahan bakar fosil mengalami peningkatan tiap tahunnya. Berbanding terbalik dengan hal tersebut, cadangan bahan bakar fosil semakin menipis sehingga diperlukan pemanfaatan energi alternatif dalam skala luas [1]. Penggunaan mobil listrik menjadi salah satu solusi dalam memanfaatkan energi alternatif. Selain itu, penggunaan mobil listrik juga relatif ramah lingkungan. Mobil listrik dapat digerakkan dengan beberapa macam motor listrik, baik motor DC maupun motor AC. Motor DC merupakan jenis motor yang dapat dikendalikan

secara ideal sebab pengaturannya bersifat *decoupled* (terpisah) antara jangkar (torsi) dan medan (fluks). Namun pada motor DC terdapat *brush* (sikat) yang menyebabkan adanya gesekan sehingga menyebabkan panas. Hal tersebut selain membuat efisiensi menurun, juga diperlukan perawatan berkala sehingga kurang ekonomis. Oleh sebab itu, penggunaan motor DC mulai digantikan motor induksi yang memiliki konstruksi kokoh dan tidak memerlukan sikat sehingga efisiensi lebih tinggi dan ekonomis dibandingkan motor DC. Namun pengaturan pada motor induksi bersifat *coupled* antara torsi dan fluks. Dengan menggunakan metode *field oriented control* (FOC), torsi dan fluks dapat diatur terpisah seperti layaknya motor DC [2].

Pengaturan motor induksi pada mobil listrik akan melalui medan yang variatif sehingga membuat motor harus beroperasi dengan baik. Penggunaan metode FOC dalam pengaturan motor induksi dapat memberikan torsi maksimal untuk kecepatan mobil yang variatif tanpa memengaruhi fluks motor sehingga dapat lebih efisien. Dengan beban mobil listrik seberat 208 kg, digunakan motor induksi dengan kapasitas daya 1,5 HP atau 1,12 KW.

## II. METODE

Proses pada penelitian ini dibagi dalam beberapa tahap sebagaimana yang dijelaskan pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok Diagram Penelitian

### A. Studi Literatur

Dalam pengerjaan penelitian ini dipelajari literatur mengenai pengaturan motor induksi dengan metode FOC menggunakan *proportional-integral controller* (kontrol PI). Hal-hal yang telah dipelajari dijelaskan sebagai berikut.

#### 1. Motor induksi tiga fasa

Motor induksi adalah motor listrik AC dan banyak digunakan di dunia industri. Pada pengoperasiannya, motor induksi dapat dibebani dengan beban yang bervariasi. Konstruksi dari motor induksi ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Konstruksi Motor Induksi

Adapun yang dimaksud motor induksi tiga fasa adalah motor induksi yang pada belitan statornya diberikan sumber daya tiga fasa dengan beda fasa senilai  $120^\circ$ . Stator dan rotor merupakan bagian utama dari motor induksi. Terdapat celah udara di antara stator dan rotor sebagai tempat berpindahnya energi dari stator ke rotor. Sedangkan rotor merupakan bagian yang berputar dari motor yang mana terdapat dua tipe, yaitu *squirrel cage rotor* dan *phase wound rotor*.

Ketika sumber tegangan diberikan ke bagian stator, kumparan stator akan menghasilkan medan magnet yang berputar. Medan magnet berputar berlawanan arah jarum jam pada kecepatan sinkron  $n_s$ :

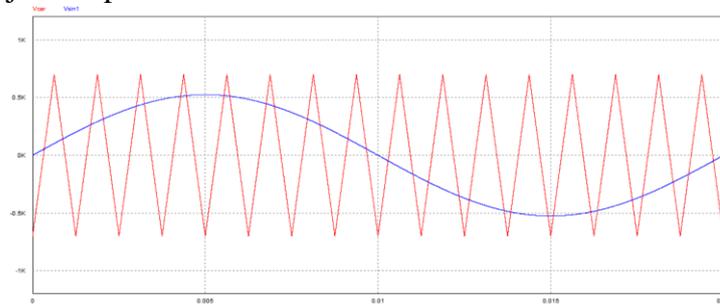
$$n_s = \frac{120 \times f}{P} (\text{rpm}) \quad (1)$$

Di mana  $f$  adalah frekuensi dan  $P$  adalah jumlah *poles* (kutub) pada motor induksi.

Garis gaya fluks yang diinduksikan dari kumparan stator akan memotong kumparan rotor sehingga timbul emf (ggl) atau tegangan induksi. Kumparan rotor yang merupakan rangkaian yang tertutup membuat arus akan mengalir. Kumparan rotor yang dialiri arus akan berada dalam garis gaya fluks yang berasal dari kumparan stator sehingga akan terjadi gaya Lorentz yang menimbulkan torsi dan menggerakkan rotor sesuai dengan arah pergerakan medan induksi stator.

## 2. Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)

Sinyal modulasi lebar pulsa (PWM) digunakan untuk mengendalikan *switching* inverter. Amplitudo tegangan output inverter ditentukan dari siklus pulsa PWM. Teknik PWM yang biasa digunakan adalah *sinusoidal pulse width modulation* (SPWM) dan *space vector modulation* (SVM). Metode yang digunakan dalam menghasilkan sinyal PWM adalah dengan membandingkan gelombang sinus referensi dengan gelombang segitiga *carrier* [3]. Konsep dasar SPWM ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Konsep Dasar SPWM

Rasio modulasi frekuensi ( $m_f$ ) didefinisikan sebagai perbandingan frekuensi sinyal carrier dengan sinyal referensi pada persamaan berikut:

$$M_f = f_{car} / f_{sin} \quad (2)$$

Rasio modulasi amplitudo ( $m_a$ ) didefinisikan sebagai perbandingan amplitudo dari sinyal referensi dengan sinyal carrier pada persamaan berikut:

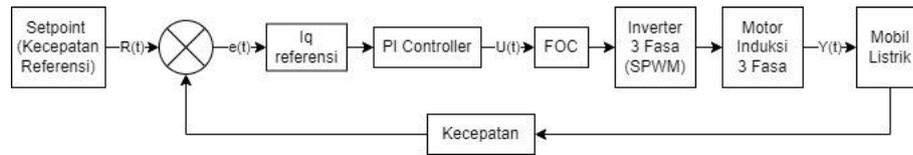
$$M_a = V_{max}(sin) / V_{max}(tri) \quad (3)$$

Nilai tegangan *output* linear terhadap nilai  $m_a$ , yang mana nilai  $m_a$  sebesar 0 sampai 1. Persamaan yang menggambarkan nilai tegangan *output* linear dengan nilai  $m_a$  adalah sebagai berikut:

$$V_{out} = M_a \times V_{in(DC)} \quad (4)$$

## B. Perancangan Sistem

Pengaturan motor induksi dilakukan secara loop tertutup dengan diberi nilai *setpoint* kecepatan sebagai referensi. Blok diagram dari sistem pengaturan motor induksi ditunjukkan pada Gambar 7 yang mana menggunakan *PI controller* sebagai kontroler dan *field oriented control* (FOC) sebagai metode pengaturan kecepatan motor. Motor induksi digunakan sebagai penggerak dari mobil listrik.



Gambar 7. Blok Diagram Sistem

Pada penelitian ini digunakan inverter dengan teknik *switching Sinusoidal Pulse Width Modulation* (SPWM). Tegangan *output* yang dihasilkan inverter tersebut sebesar 220 Vrms yang juga merupakan tegangan nominal dari motor yang digunakan. Motor induksi tiga fasa yang digunakan memiliki spesifikasi daya sebesar 1,5 HP (1,12 KW) dengan kecepatan nominal sebesar 1435 RPM. Adapun beban mobil listrik seberat 208 kg dan dapat dikendarai oleh 1 orang. Desain mobil listrik pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Desain Mobil Listrik

*Setpoint* yang digunakan dalam *PI controller* adalah nilai  $I_q$  yang didapat dari error antara kecepatan referensi dengan kecepatan aktual. *Output* dari *PI controller* nantinya akan mengubah nilai parameter MF (*modulation frequency*) dan MA (*modulation amplitude*) setelah diproses oleh metode *field oriented control*.

### C. Perancangan Kontrol

Perancangan kontrol pada sistem ini terdiri dari *field oriented control* dan *PI controller* yang akan dibahas sebagai berikut:

#### 1. Field oriented control (FOC)

Sistem *field oriented control* (FOC) merupakan metode yang memiliki kelebihan dalam mengatur fluks, vektor tegangan, dan vektor arus [4]. Dengan menggunakan metode ini, motor induksi dapat diatur fluks dan torsi secara terpisah seperti motor DC. Sistem arus tiga fasa (abc) akan diubah menjadi sistem dua fasa orthogonal ( $\alpha\beta$ ) terlebih dahulu. Kemudian, sistem tersebut diubah menjadi sistem dua fasa rotasioner (dq) atau biasa dikenal sistem koordinat dq. Untuk mengubah sistem tiga fasa menjadi dua fasa orthogonal menggunakan persamaan transformasi Clark sebagai berikut.

$$I_\alpha = I_a - \frac{1}{2}I_b - \frac{1}{2}I_c \tag{5}$$

$$I_\beta = \frac{\sqrt{3}}{2}I_b - \frac{\sqrt{3}}{2}I_c \tag{6}$$

Adapun inverse transformasi clark digunakan untuk mentransformasi balik komponen  $\alpha$  dan  $\beta$  menjadi komponen a, b, dan c menggunakan persamaan berikut.

$$I_a = I_\alpha \tag{7}$$

$$I_b = -\frac{1}{2}I_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2}I_\beta \tag{8}$$

$$I_c = -\frac{1}{2}I_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2}I_\beta \tag{9}$$

Untuk mengubah sistem dua fasa orthogonal menjadi dua fasa rotasioner menggunakan persamaan transformasi park sebagai berikut.

$$I_d = I_\alpha \cos \theta + I_\beta \sin \theta \tag{10}$$

$$I_q = -I_\alpha \sin \theta + I_\beta \cos \theta \tag{11}$$

Adapun inverse transformasi park digunakan untuk mentransformasi balik komponen d dan q menjadi komponen  $\alpha$  dan  $\beta$  menggunakan persamaan berikut.

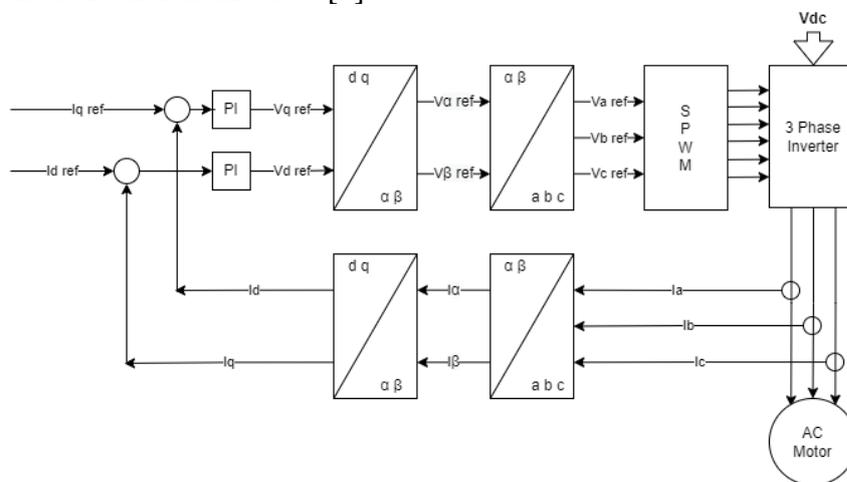
$$I_\alpha = I_d \cos \theta - I_q \sin \theta \tag{12}$$

$$I_\beta = I_d \sin \theta + I_q \cos \theta \tag{13}$$

Dari perhitungan tersebut, didapatkan persamaan yang dapat memisahkan arus torsi dan arus medan (*decoupled*). Untuk mengetahui besarnya nilai sudut dalam transformasi park, digunakan persamaan berikut.

$$\theta(t) = \int_0^T \omega_t dt + \theta_0 \tag{14}$$

Pada pengaturan ini, kecepatan motor akan dipantau oleh sensor kecepatan *rotary encoder*. Kecepatan motor menjadi *feedback* sistem yang akan dibandingkan dengan kecepatan referensi. Perbandingan tersebut akan menghasilkan error yang diolah menjadi  $I_q$  referensi dan menjadi input dari *controller* (dalam hal ini adalah kontrol PI). Kemudian, *output controller* menuju sistem FOC dan diteruskan ke inverter [5].



Gambar 8. Blok Diagram Metode FOC

## 2. PI controller

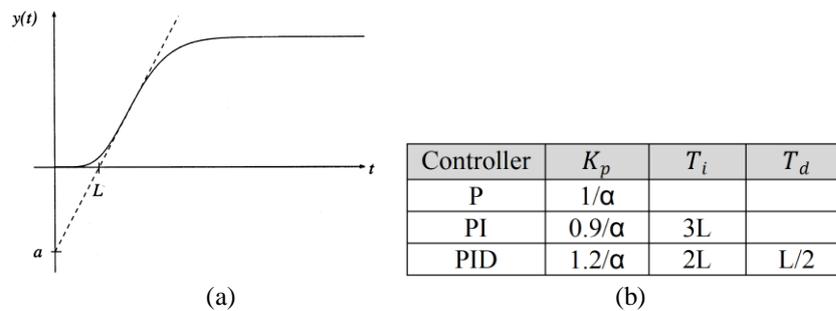
Kontrol proportional-integral-derivative (PID) banyak digunakan pada dunia industri dengan tujuan mengatur parameter dari suatu sistem. Persamaan dari kontrol PID yang umum digunakan adalah sebagai berikut:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{d}{dt} e(t) \right] \tag{15}$$

Di mana  $u(t)$  merupakan notasi dari kontrol dan  $e(t)$  adalah notasi dari error sinyal, sedangkan  $K_p, T_i, T_d$  merupakan parameter yang akan diatur nilainya. Maka *transfer function* dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$K_s = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \tag{16}$$

Fitur utama dari kontroler PID adalah untuk menghilangkan kesalahan kondisi tunak dari respon terhadap sinyal referensi.



Gambar 9. (a) Respon Step Kontrol PID (b) Parameter Metode Ziegler-Nichols

Dalam mendesain kontrol PID, teknik yang banyak digunakan pada dunia industri adalah menggunakan metode Ziegler-Nichols, yang mana tidak memerlukan model sistem yang akan dikendalikan dan hanya memerlukan respon step dari sistem tersebut. Penentuan nilai parameter pada metode Ziegler-Nichols terdiri dari empat langkah sebagai berikut:

1. Mendapatkan respon step dari sistem.
2. Menggambar garis singgung lurus terhadap respon
3. Mendapatkan nilai  $\alpha$  dan  $L$  sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 9(a).
4. Menentukan parameter  $K_p, T_i, T_d$  dengan mengacu pada Gambar 9(b).

Pada penelitian ini, pengaturan kecepatan dilakukan dengan kontrol PI dengan menggunakan metode Ziegler-Nichols. Pengaturan menggunakan kontrol PI ini juga diikuti dengan metode *field oriented control* (FOC) sehingga ada dua metode pengaturan yang bekerja (*hybrid*) [6].

#### D. Pengambilan Data

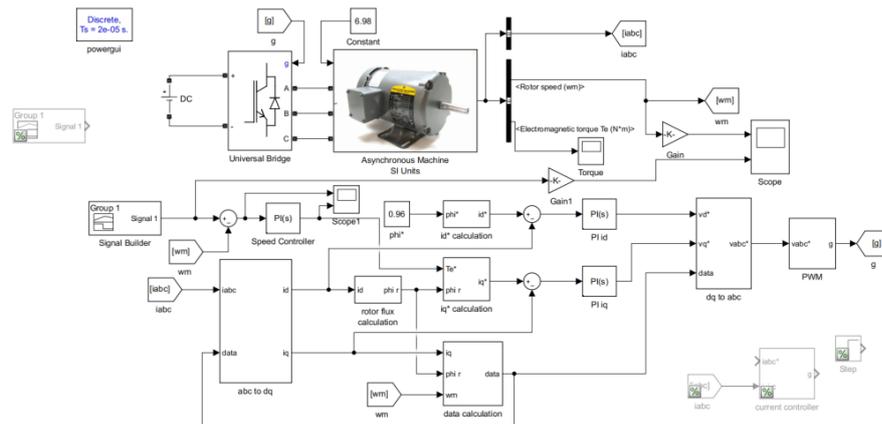
Pengambilan data meliputi respon kecepatan motor pada kondisi *open loop* (tanpa pengaturan) dan kondisi *close loop* (dengan pengaturan), serta pengamatan arus tiap fasa. Pengambilan data pada kondisi *open loop* bertujuan untuk mengetahui perilaku sistem dengan kondisi tanpa pengontrol. Pengambilan data dilakukan dengan memberikan nilai kecepatan yang berbeda, yaitu nilai *setpoint* 400 RPM, 800 RPM, dan 1200 RPM. Kemudian dilakukan pengambilan data kembali dengan menaikkan kecepatan hingga kecepatan nominal sebanyak lima *step*. Beban yang diberikan kepada motor sebesar 6,98 Nm, yakni beban mobil listrik dengan dikendarai satu penumpang. Data yang diamati adalah respon kecepatan motor pada mobil listrik tanpa menggunakan kontrol yang dibandingkan dengan saat menggunakan kontrol.

#### E. Analisa Data

Pada tahap ini dilakukan analisa data mengenai penelitian yang dilakukan. Analisa di sini menjelaskan mengenai semua hal yang berkaitan dengan penelitian, seperti penjelasan tentang simulasi sistem, perencanaan sistem pengaturan, sistem kerja alat, hasil simulasi, dan lain sebagainya. Hasil analisa penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat sebagai bahan acuan dalam penelitian atau pembuatan alat serupa di waktu yang akan datang.

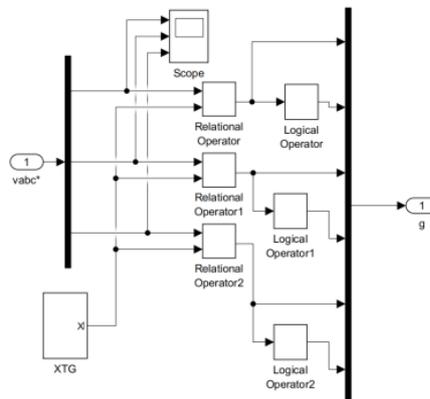
### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem pengaturan yang dirancang diuji melalui simulasi program matlab. Pada simulasi, motor diberikan beban (torsi beban) sebesar 6,98 Nm sebagai beban mobil listrik dan satu penumpang. Perubahan *setpoint* pada masing-masing kondisi yang diamati dan dianalisis adalah meliputi *overshoot*, *undershoot*, *rise time*, *settling time* dan *steady state error* melalui tampilan karakteristik kecepatan motor induksi pada blok “scope” matlab. Gambar 10 merupakan blok diagram dari sistem yang dirancang.



Gambar 10. Rangkaian Blok Diagram Sistem dengan Simulink Matlab

Metode *switching* yang digunakan adalah *sinusoidal pulse width modulation* (SPWM) yang dibangkitkan dengan membandingkan sinyal *sinusoidal* (referensi) dengan sinyal *triangular* (*carrier*). Rangkaian blok diagram SPWM simulink matlab ditampilkan pada Gambar 11.



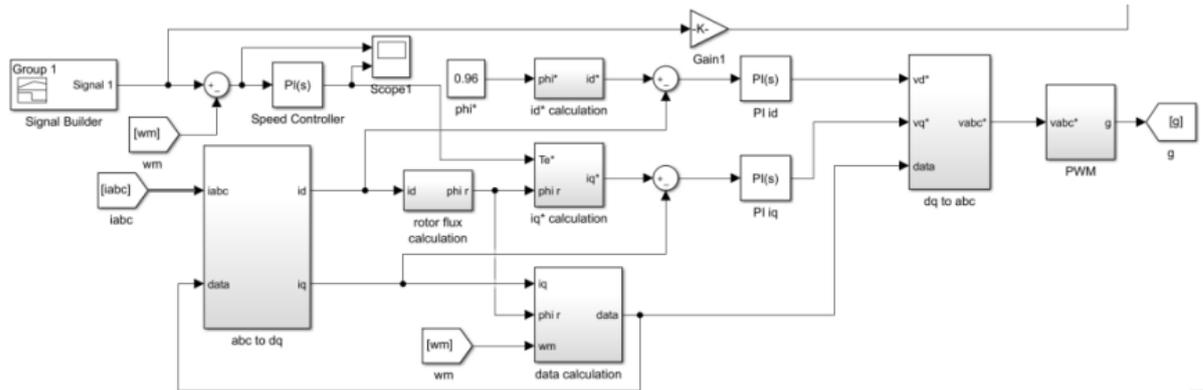
Gambar 11. Rangkaian Blok Diagram Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)

Besar nilai tegangan *input* DC ( $V_{DC}$ ) inverter adalah 311,12 V sehingga menghasilkan tegangan *output* sebesar  $220 V_{rms}$  sebagai suplai daya motor penggerak mobil listrik. Pada Tabel 1 disajikan data spesifikasi motor induksi tiga fasa yang digunakan pada simulasi ini.

TABEL 1. DATA SPESIFIKASI MOTOR INDUKSI TIGA FASA

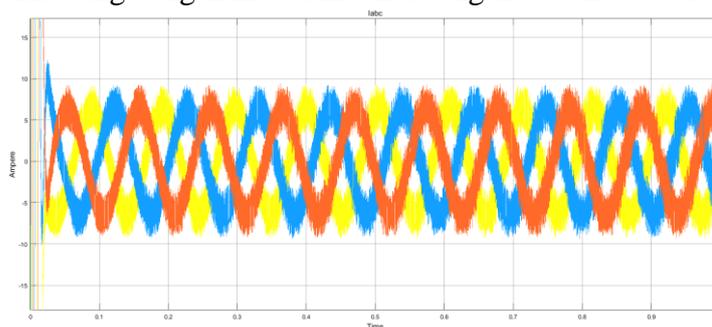
No	Parameter	Nilai	Satuan
1	$R_{stator}$	5,27	$\Omega$
2	$R_{rotor}$	3,40	$\Omega$
3	$L_{stator}$	4,33	mH
4	$L_{rotor}$	4,46	mH
5	$L_{magnetisasi}$	270	mH
6	Daya (P)	1,5	HP
7	$V_{(L-L)}$ (rms)	220	Volt
8	Frekuensi	50	Hz
9	Pole	4	unit
10	Kecepatan Motor	1435	RPM

Dari blok motor induksi tiga fasa, diambil data berupa *rotor speed* yang mana juga menjadi *input* dari pengontrol. Pada Gambar 12 ditunjukkan rangkaian blok diagram pengontrol secara keseluruhan, yakni terdiri dari *field oriented control* dan *PI controller*.



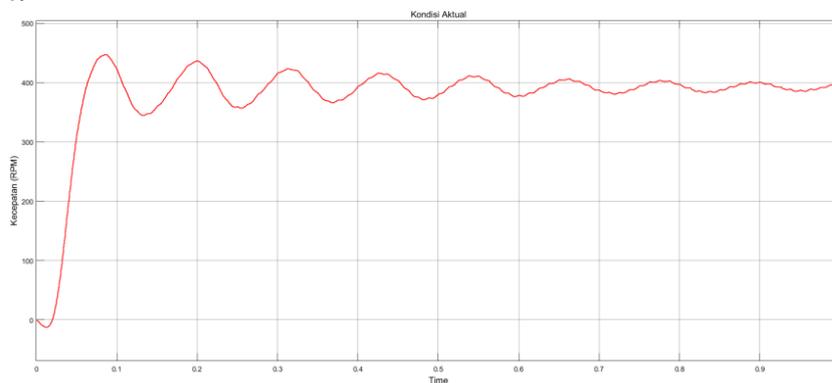
Gambar 12. Rangkaian Blok Diagram Pengontrol

Arus motor tiap *line* ( $I_{ABC}$ ) disajikan dalam Gambar 13. Arus tersebut merupakan keluaran dari inverter yang terhubung dengan motor induksi dengan beban sebesar 6,98 Nm.

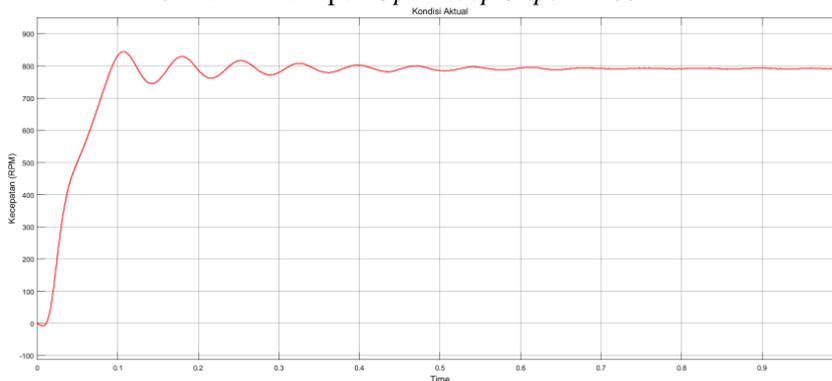


Gambar 13. Arus Output ( $I_{ABC}$ )

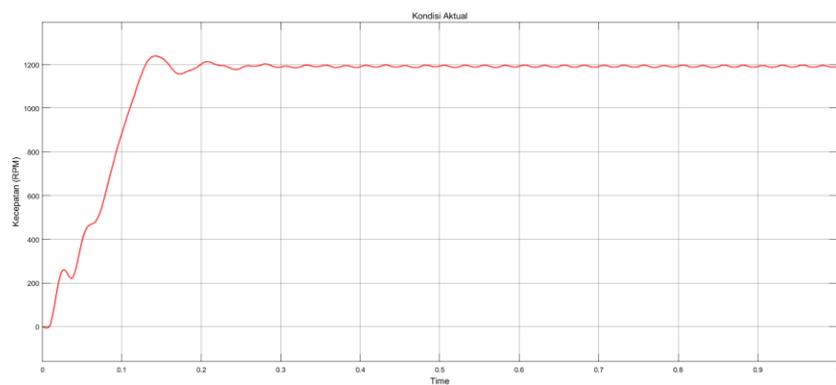
Respon dari kecepatan motor induksi tiga fasa dilakukan pada kondisi *open loop* dengan nilai *setpoint* 400 RPM, 800 RPM, dan 1200 RPM dapat dilihat pada Gambar 14, Gambar 15, dan Gambar 14.



Gambar 14. Respon *Open Loop Setpoint* 400 RPM

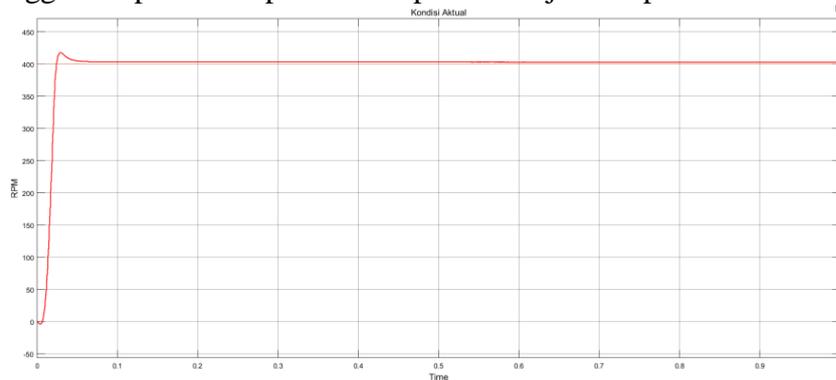


Gambar 15. Respon *Open Loop Setpoint* 800 RPM

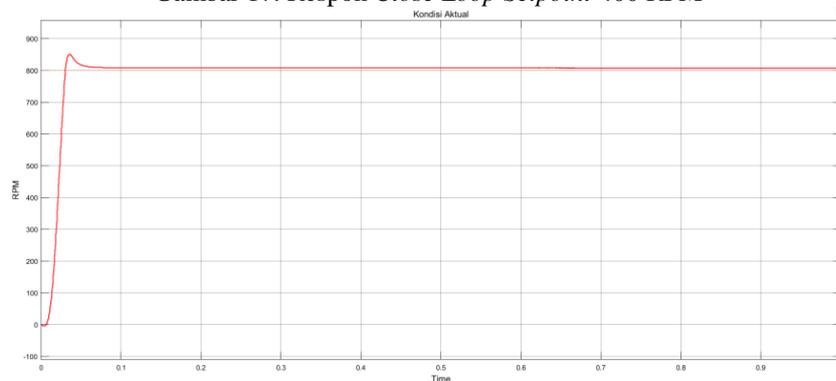


Gambar 16. Respon *Open Loop Setpoint 1200 RPM*

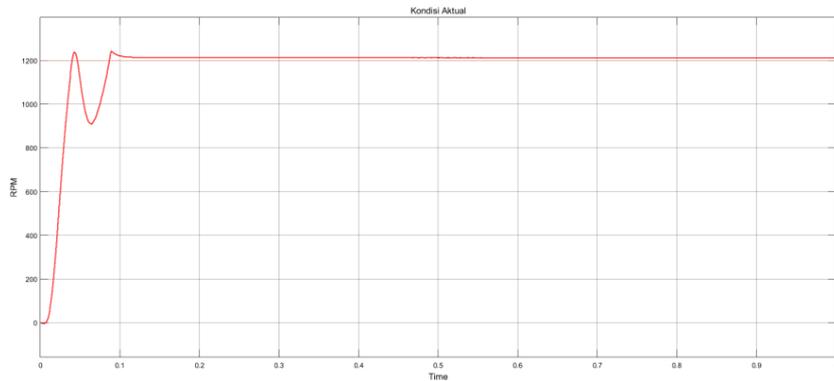
Pada Gambar 14, Gambar 15, dan Gambar 16 ditunjukkan respon *open loop* kecepatan motor induksi tiga fasa dengan tiga variasi nilai *setpoint*. Pada nilai *setpoint* 400 RPM didapatkan respon dengan nilai *rise time* 0,063 detik dan *settling time* 1,479 detik. Pada nilai *setpoint* 800 RPM didapatkan respon dengan nilai *rise time* 0,093 detik dan *settling time* 0,694 detik. Pada nilai *setpoint* 1200 RPM, didapatkan respon dengan nilai *rise time* 0,129 detik dan *settling time* 0,332 detik. Parameter *rise time* merupakan waktu yang di ukur mulai dari respon  $t = 0$  sampai dengan respon memotong sumbu *steady state* yang pertama. Adapun parameter *settling time* merupakan waktu yang menyatakan respon telah masuk  $\pm 5\%$ , atau  $\pm 2\%$  dari keadaan *steady state*. Nilai *rise time* dan *settling time* yang didapatkan dari respon *open loop* tersebut akan diperbaiki dengan menambahkan pengontrol yakni *field oriented control* dan *PI controller* sehingga didapatkan respon baru seperti ditunjukkan pada Gambar 17, 18 dan 19.



Gambar 17. Respon *Close Loop Setpoint 400 RPM*



Gambar 18. Respon *Close Loop Setpoint 800 RPM*



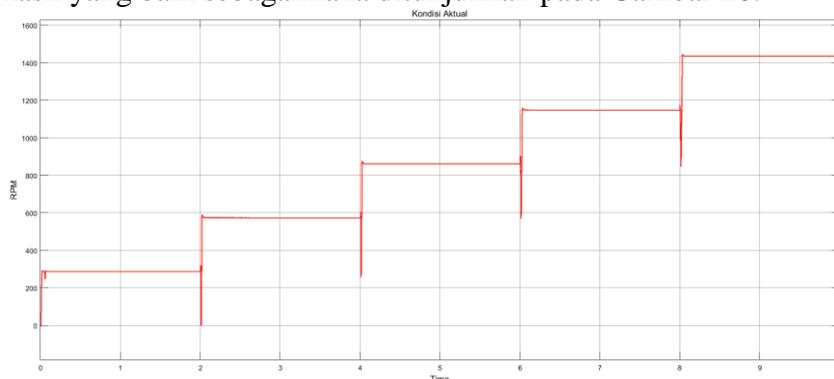
Gambar 19. Respon *Close Loop Setpoint* 1200 RPM

Pada Gambar 17, Gambar 18, dan Gambar 19 ditunjukkan respon kecepatan *close loop* motor induksi tiga fasa dengan tiga variasi nilai *setpoint*. Pada nilai *setpoint* 400 RPM didapatkan respon dengan nilai *rise time* 0,024 detik dan *settling time* 0,064 detik. Pada saat *setpoint* 800 RPM didapatkan respon dengan nilai *rise time* 0,030 detik dan *settling time* 0,078 detik. Pada saat *setpoint* 1200 RPM didapatkan respon dengan nilai *rise time* 0,040 detik dan *settling time* 0,114 detik. Dengan adanya pemberian kontrol pada sistem, maka respon kecepatan menjadi lebih baik. Hal ini ditunjukkan dengan semakin cepatnya waktu respon kecepatan motor (nilai *rise time* dan *settling time*) dalam menuju keadaan *steady state*. Perbandingan kondisi respon *open loop* dengan respon *close loop* ditunjukkan pada Tabel 2.

TABEL 2. PERBANDINGAN RESPON *OPEN LOOP* DENGAN *CLOSE LOOP*

Kondisi	Setpoint (RPM)	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Steady state Error (%)
Open Loop	400	0,063	1,479	1,750
	800	0,093	0,694	0,875
	1200	0,129	0,332	1,083
Close Loop	400	0,024	0,064	0,875
	800	0,030	0,078	0,950
	1200	0,040	0,114	1,083

Kemudian pada kondisi respon *close loop*, diberikan variasi nilai *setpoint* sebanyak lima *step* dengan rentang waktu sebesar 10 detik. Dengan adanya pengontrol, maka respon kecepatan menunjukkan hasil yang baik sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 20.



Gambar 20. Respon *Close Loop Setpoint* 0-1435 RPM 5 Step

#### IV. KESIMPULAN

Hasil penelitian dari pengaturan kecepatan motor induksi menggunakan metode *field oriented control* (FOC) pada mobil listrik menunjukkan bahwa penggunaan *field oriented control* dan *PI controller* memberikan respon kecepatan yang baik. Dengan memberikan nilai *setpoint* kecepatan 400 RPM, 800 RPM, 1200 RPM, didapatkan respon nilai *rise time* dan

*settling time* yang lebih cepat dari kondisi *open loop* sehingga motor cepat dalam menuju keadaan *steady state*. Pada sistem ini juga diberikan kecepatan sebanyak 5 variasi selama 10 detik. Berdasarkan Gambar 20 didapatkan respon kecepatan yang baik, yakni sesuai dengan nilai *setpoint*.

#### REFERENSI

- [1] Kementerian ESDM. ISSN 2527 3000. Outlook Energi Indonesia. Jakarta. Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional. 2019.
- [2] Purwanto E., Prabowo G., Wahyono E., Rifadil, M. M. Pengembangan Model Motor Induksi sebagai Penggerak Mobil Listrik dengan Menggunakan Metode Vektor Kontrol. *Jurnal Ilmiah Elite Elektro*. 2011; 2(2): 67-72.
- [3] Muntashir, A. A., Purwanto E., Nugraha, S. D., Apriyanto, R. A. N. Pengembangan Sugeno Fuzzy Model Untuk Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan V/F Scalar Control. *PoliGrid*. 2020; 1(2): 65-73.
- [4] Ferdiansyah, I., Rusli, M. R., Praharsena, B., Toar, H., Ridwan, Purwanto, E. *Speed Control of Three Phase Induction Motor Using Indirect Field Oriented Control Based on Real-Time Control System*. 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE). Bali. 2018; 438 - 442.
- [5] Ferdiansyah, I. Analisis Pengaruh Arus Medan (Id Current Axis) Terhadap Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Pada Pengaturan Menggunakan Metode Field Oriented Control (FOC). *Jurnal Teknologi Terpadu*. 2019; 7(2): 95-100.
- [6] Basilio, J. C., Matos, S. R. Design of PI and PID Controllers With Transient Performance Specification. *IEEE Transactions on Education*. 2002; 45(4): 364-370.