

# Analisa Karakteristik Permanent Magnet Synchronous Motor Menggunakan Matlab-Simulink

Doni Pradipta<sup>1</sup>, Dary Rafi Brafianto<sup>2</sup>, dan Muhammad Kurniawan<sup>3</sup>  
Teknik Elektro, Universitas Brawijaya<sup>1,2,3</sup>  
donipradipta28@student.ub.ac.id<sup>1</sup>; drafibrafianto@student.ub.ac.id<sup>2</sup>;  
mk.rangga@student.ub.ac.id<sup>3</sup>

## Abstrak

Penggunaan motor listrik menghabiskan energi listrik mencapai dua kali lipat dari pencahayaan, yaitu mencapai 46% dari konsumsi listrik global. Permanent magnet synchronous motor (PMSM) memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan motor induksi. Dalam pengembangan PMSM dibutuhkan pemahaman akan karakteristik jenis motor ini. Analisa karakteristik PMSM telah dilakukan dengan memodelkan motor secara matematis dari tiga fasa menjadi dq beserta hubungan antara tegangan, arus, kecepatan putar, dan torsi motor. Dengan adanya simulasi ini memudahkan pengguna untuk mengubah-ubah parameter motor untuk mengetahui pengaruhnya terhadap karakteristik motor.

**Kata Kunci** — Karakteristik Motor, Motor Listrik, PMSM

## Abstract

*The use of electric motors consumes twice as much electrical energy as lighting, 46% of global electricity consumption. A permanent magnet synchronous motor (PMSM) is more efficient than an induction motor. In the development of PMSM, it is necessary to understand the characteristics of this type of motor. PMSM characteristic analysis has been carried out by mathematically modelling the motor from three phases to dq and the relationship between voltage, current, rotational speed, and motor torque. This study carried out simulations using Matlab Simulink 2021b to analyze PMSM characteristics. The simulations can represent PMSM characteristics and make it easier for users to change motor parameters to determine their effect on motor characteristics.*

**Keywords** — Electric Motor, Motor Characteristics, PMSM

## I. PENDAHULUAN

Perkembangan motor saat ini sangat pesat, dan penggunaan motor masuk ke hampir semua bidang, yaitu industri, transportasi, pertanian, komersial dan bahkan rumah tangga. Penggunaan motor listrik menghabiskan energi listrik mencapai dua kali lipat dari pencahayaan, yaitu mencapai 46% dari konsumsi listrik global. Bahkan pada bidang industri, penggunaan motor listrik mendominasi konsumsi energi listrik. Dalam aplikasi industri, motor listrik yang digunakan untuk menghidupkan pompa, kipas, kompresor, konveyor, dan penggerak mesin lainnya.

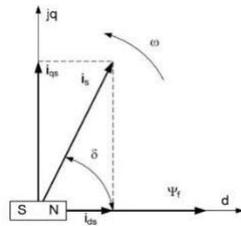
Penggunaan motor listrik yang besar tersebut mendorong banyak peneliti untuk menciptakan motor yang lebih hemat energi listrik. Saat ini telah dilakukan penelitian untuk mengetahui motor mana yang lebih efisien untuk digunakan pada bidang industri. Permanent magnet synchronous motor (PMSM) memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan motor induksi. Efisiensi motor induksi pada saat beban penuh mencapai 93,6%, sedangkan motor magnet permanen dapat mencapai 96,2%. Dalam pengembangan PMSM dibutuhkan pemahaman akan karakteristik jenis motor ini. Pada penelitian ini akan dilakukan simulasi menggunakan Matlab Simulink 2021b untuk menganalisa karakteristik permanent magnet synchronous motor. Dengan Analisa yang dilakukan dalam *paper* ini maka penggunaan motor sinkron magnet permanen (PMSM) dapat memberikan banyak manfaat penting dalam industri, karena mampu menunjukkan efisiensi tinggi dan kinerja yang stabil. Hal ini dapat memberikan kontribusi besar dalam berbagai aplikasi industri, seperti mesin industri, otomasi, dan transportasi.

## II. PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR ANALYSIS

Permanent Magnet synchronous motor (PMSM) merupakan motor sinkron dengan rotor terbuat dari material magnet permanen. Pada motor sinkron biasa eksitasi medan dihasilkan oleh material magnet permanen tersebut. Karena menggunakan magnet permanen maka eksitasi pada PMSM bersifat konstan.

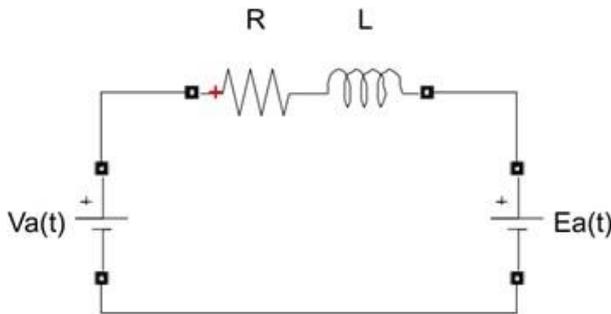
Desain yang sederhana merupakan keunggulan kedua dari motor PMSM. Tidak memerlukan komutator yang dilengkapi dengan sikat, karena tidak perlu mensuplai arus listrik ke rotor, yang membuat desainnya lebih andal. Namun, karena motor dengan magnet permanen tidak memiliki komutator, mereka harus dikendalikan dengan menggunakan sirkuit elektronik yang lebih canggih. Sistem kontrol harus memungkinkan suplai motor dengan arus listrik sinus yang sesuai.

Ketika motor PMSM disuplai dengan arus listrik sinusoidal maka dapat dioperasikan dengan sudut beban optimum = 90°. Grafik vector motor sinkron dengan magnet permanen sebagai berikut.



Gbr. 1 Grafik Vektor PMSM

Pengoperasian motor dengan sudut beban seperti pada Gbr 1. menjamin bahwa torsi maksimum untuk arus tertentu tercapai. Artinya komponen ids dari arus yang dihasilkan adalah nol ( $i_d=0$ ).



Gbr. 2 Rangkaian Skematik PMSM

Untuk deskripsi matematis motor sinkron dengan magnet permanen, efek belitan rotor dan arus eddy terkait di dalamnya dapat diabaikan. Persamaan tegangan fasa pada PMSM dapat didapatkan melalui rangkaian skematik seperti pada Gbr 2.

$$V_a(t) = i_a R + L_s \frac{di_a}{dt} + E_a(t) \quad (1)$$

$$V_b(t) = i_b R + L_s \frac{di_b}{dt} + E_b(t) \quad (2)$$

$$V_c(t) = i_c R + L_s \frac{di_c}{dt} + E_c(t) \quad (3)$$

Persamaan yang menggambarkan model matematis motor pada sistem koordinat putar sumbu dq didapatkan melalui transformasi Clarke dan Park sehingga didapatkan persamaan berikut :

$$V_d = Ri_d + L_s \frac{di_d}{dt} - \omega i_q L_s \quad (4)$$

$$V_q = Ri_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \omega i_d L_s + \omega \psi \quad (5)$$

Dengan menurunkan persamaan (1) dan persamaan (2) terhadap waktu maka didapatkan besar arus  $I_d$  dan  $I_q$  sesuai pada persamaan (3) dan persamaan (4).

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_s} [V_d - Ri_d + \omega L_s i_q] \quad (6)$$

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_s} [V_q - Ri_q - \omega L_s i_d - \omega \psi] \quad (7)$$

Torsi pada PMSM dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$T_e = c * (\lambda \times i) \quad (8)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (9)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p * (\psi i_q) + \frac{3}{2} p * (L_d - L_q) i_d i_q \quad (10)$$

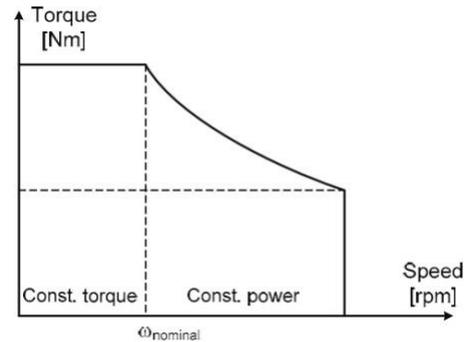
Dari torsi bisa diketahui kecepatan motor dengan persamaan:

$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{J} T_e \quad (11)$$

Tegangan pada terminal atau back EMF berbanding lurus dengan kecepatan motor. Hal ini disebabkan karena terinduksi oleh fluks rotor yang berubah-ubah, sehingga persamaan back EMF pada motor didapatkan:

$$E_a(t) = \frac{d\psi(\theta)}{d\theta} * w \quad (12)$$

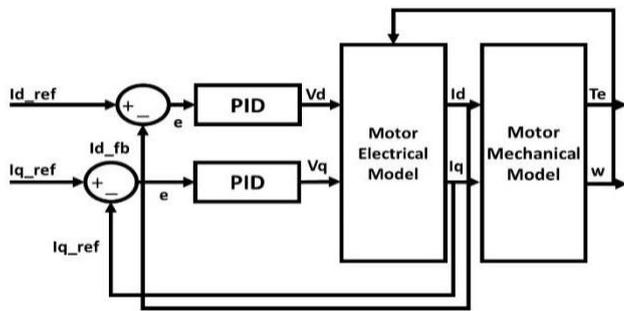
Motor PMSM dapat bekerja dalam rentang kecepatan berlebih. Ini berarti bahwa kecepatan motor yang sebenarnya dapat melebihi kecepatan nominal (dinilai). Hal ini dimungkinkan dalam apa yang disebut interval kontrol kedua (rentang pelemahan fluks atau pelemahan medan, disebut juga sebagai rentang daya konstan). Untuk meningkatkan kecepatan di atas nominal fluks harus dikurangi sementara tegangan dijaga konstan. Hal ini diperlukan untuk menghantarkan arus ke jalur sinyal d ( $i_d \neq 0$ ), sedangkan arus maksimum di jalur q tetap konstan dan maksimum. Torsi berbanding terbalik dengan rpm sehingga daya keluaran tetap konstan untuk kisaran di mana rpm nominal terlampaui, karakteristik tersebut ditunjukkan pada Gbr 3.



Gbr. 3 Grafik Karakteristik PMSM

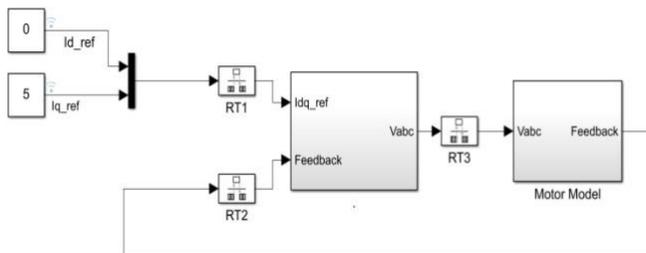
### III. PERANCANGAN SIMULASI

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan simulasi kendali motor PMSM melalui perubahan nilai arus  $I_d$  dan  $I_q$ . Arus  $I_d$  dan  $I_q$  dikontrol agar sesuai dengan nilai referensi dengan kontroler PID. Keluaran dari kontroler berupa  $V_d$  dan  $V_q$  yang selanjutnya masuk ke motor electrical model bersama dengan nilai kecepatan motor yang terhitung. Input motor mechanical model berupa  $I_q$  dan  $I_d$  dengan output berupa torsi elektrik dan kecepatan motor sesuai dengan Gbr 4.

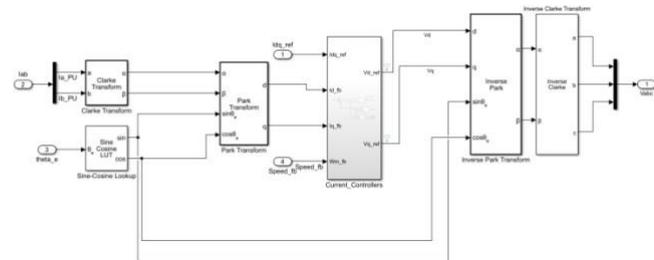


Gbr. 4 Rangkaian Simulasi

Simulasi dilakukan dengan Simulink untuk memodelkan PMSM, yang terlihat pada Gbr 5. Input dari sistem berupa  $I_d$  dan  $I_q$  yang diatur agar konstan melalui kontroler PID selanjutnya  $I_d$  dan  $I_q$  diubah menjadi tegangan tiga fasa ( $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$ ) melalui blok inverse park dan blok inverse clark. Tegangan tiga fasa tersebut selanjutnya menjadi input pada motor model dengan output berupa arus tiga fasa ( $I_a$ ,  $I_b$ , dan  $I_c$ ), sudut elektik, dan kecepatan motor yang selanjutnya menjadi *feed back* kontroler sesuai dengan Gbr 6.



Gbr. 5 Pemodelan dalam Simulasi



Gbr. 6 Rangkaian Transformasi Park dan Clarke

#### IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada saat starting, arus bernilai nol sehingga nilai error pada  $I_q$  adalah 5 A untuk mencapai nilai tersebut  $I_{q\_fb}$  perlahan naik sampai 5A dengan tegangan  $V_q$  yang konstan dan setelah  $I_{q\_fb}$  mencapai 5 A tegangan  $V_q$  perlahan menurun, dapat dilihat pada Gbr 8. Saat teraliri arus, terbentuklah nilai torsi yang selanjutnya diikuti dengan kenaikan kecepatan motor. Saat nilai  $I_{q\_ref}$  bernilai konstan,

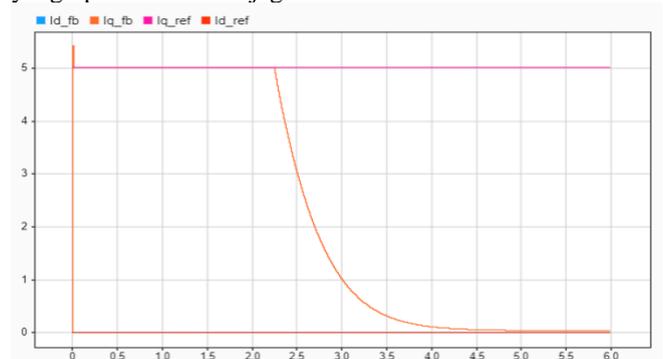
$V_q$  secara perlahan terus naik hal ini disebabkan karena ketika kecepatan perlahan naik, back EMF juga ikut naik. Sehingga beda tegangan antara output inverter dengan back EMF menurun. Karena beda tegangan yang berkurang ini menyebabkan arus menurun. Sehingga agar arus tetap konstan tegangan pada inverter perlu untuk ditingkatkan. Hal ini sesuai dengan persamaan (7).

Saat detik ke 2.2 s  $I_q$  dan fb terus menurun, hal ini disebabkan karena tegangan back EMF yang terus naik namun tegangan inverter tidak bisa terus naik sehingga nilai  $w$  terus naik dan  $V_q$  tetap konstan sehingga  $di = q/dt$  menjadi bernilai negatif. Sehingga nilai  $I_q$  perlahan menurun dan  $I_q$  menjadi nol. Karena torsi berbanding lurus dengan arus, torsi juga menjadi bernilai nol dan kecepatan berada di nilai maksimum.

Arus feedback pada PMSM adalah informasi yang diperoleh dari sensor yang memantau arus yang mengalir ke motor. Ini memberikan pemahaman yang akurat tentang arus yang digunakan oleh motor dalam waktu nyata.

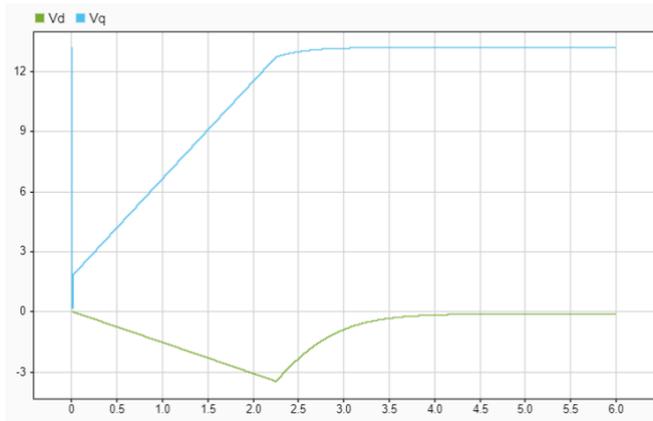
Kondisi arus feedback pada PMSM umumnya harus stabil dan sesuai dengan kebutuhan operasional motor. Arus yang tidak stabil atau di luar rentang yang diinginkan dapat mengakibatkan performa yang buruk, keausan yang lebih cepat pada komponen motor, atau bahkan kerusakan pada sistem secara keseluruhan.

Oleh karena itu, pengendalian dan monitoring arus feedback sangat penting untuk memastikan bahwa PMSM beroperasi dengan efisien dan dapat diandalkan. Pemantauan arus dapat dilakukan dengan menggunakan sensor arus yang terpasang pada sirkuit daya motor atau melalui pengukuran secara langsung pada pengendali motor. Dengan informasi yang tepat tentang arus, pengendali dapat menyesuaikan parameter operasional motor sesuai dengan kebutuhan aplikasi, seperti kontrol kecepatan atau torsi, untuk mencapai performa yang optimal dan menjaga keandalan sistem.

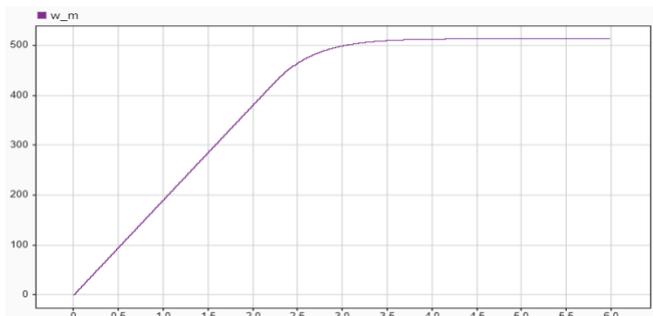


Gbr. 7 Grafik Hasil Arus Refrensi dengan Arus Feedback

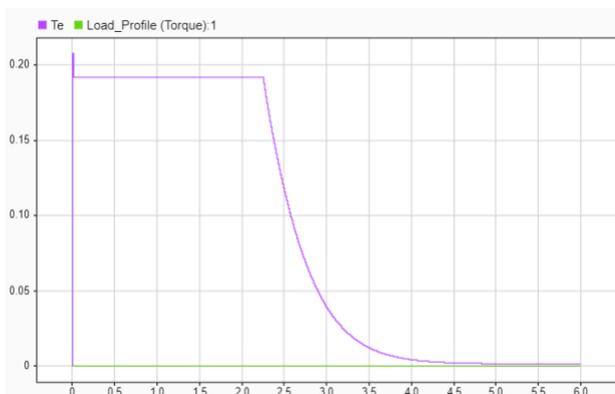




Gbr. 8 Grafik Hasil Tegangan Vd dan Vq



Gbr. 9 Grafik Hasil Kecepatan Motor



Gbr. 10 Grafik Hasil Torsi Motor

## V. KESIMPULAN (PENUTUP)

Analisa karakteristik permanent magnet synchronous motor telah dilakukan dengan memodelkan motor secara matematis dari tiga fasa menjadi dq beserta hubungan antara tegangan, arus, kecepatan putar, dan torsi motor. Persamaan matematis tersebut selanjutnya disimulasikan menggunakan Matlab-Simulink. Dengan adanya simulasi ini memudahkan pengguna untuk mengubah-ubah parameter motor untuk mengetahui

pengaruhnya terhadap karakteristik motor. Model simulasi sistem penggerak PMSM closed loop telah dikembangkan melalui model matematika. Simulasi menggunakan kontrol SVPWM dengan mengendalikan pulsa inverter. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model yang dibuat memiliki keakuratan dengan nilai referensi yang telah ditetapkan. Sistem closed loop yang dibuat juga dapat bekerja dengan baik terbukti dengan nilai hasil yang perlahan konstan menyesuaikan dengan nilai referensi.

## REFERENSI

- [1] J. Bernatt, T. Glinka, M. Jakubiec, E. Krol, and R. Rossa, *Electric motors with permanent magnets with two-zone rotational speed control*, *Electrical Machines and Power Electronics*, 2007. ACEMP '07.
- [2] P. Pillay, R. Krishnan, *Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. Part I. The permanent-magnet synchronous motor drive*, *IEEE Transactions on Industry Application*, vol.25, no.2, 1989, pp.265-2731. S. Jacobs and C. P. Bean, "Fine particles, thin films and exchange anisotropy," in *Magnetism*, vol. III, G. T. Rado and H. Suhl, Eds. New York: Academic, 1963, pp. 271–350.
- [3] T. Rudnicki, R. Czerwinski, "Examination of Electromagnetic Noises and Practical Operations of a PMSM Motor driven by a DSP and Controlled by means of Field Oriented Control", *elektronika ir Elektrotechnika*, no. 5, pp. 46–50, 2014.
- [4] L. Jarzbowicz, "Indirect Measurement of Motor Current Derivatives in PMSM Sensorless Drives", *Elektronika ir Elektrotechnika*, no. 5, pp. 23–26, 2014.
- [5] J. Agrawal and S. Bodkhe. 2015. Low speed sensorless control of PMSM drive using high frequency signal injection. *Annual IEEE India Conference (INDICON)* pp. 1-6.
- [6] M. R. Djalal, A. Imran, M. Ali, and H. Setiadi. 2017. Modifikasi Desain PID Controller Pada Permanent Magnet Synchronous Motor Dengan Flower Pollination Algorithm. *J. Tek. Elektro-ITP* vol. 6 no. 2 pp. 163–169.
- [7] M. Yilmaz. 2015. Limitations/capabilities of electric machine technologies and modeling approaches for electric motor design and analysis in plug-in electric vehicle applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* vol. 52 pp. 80-99.
- [8] O. M. Arafa, G. A. A. Aziz, M. I. A. El-Sebah, and A. A. Mansour. 2016. Observer-based sensorless speed control of PMSM: A focus on drive's startup. *Journal of Electrical Systems and Information Technology* vol. 3 pp. 181209.
- [9] P. Pillay and R. Krishnan. 1991. Application characteristics of permanent magnet synchronous and brushless DC motors for servo drives. *IEEE Transactions on industry applications* vol. 27 pp. 986-996.
- [10] P. Vas. 1998. *Sensorless Vector and Direct Torque Control*. New York, USA: Oxford University Press.
- [11] S. Singh and A. Tiwari. 2017. Various techniques of sensorless speed control of PMSM. *Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT)* pp. 1-6.
- [12] S.K. Sul. 2011. *Control of Electric Machine Drive Systems*. vol. 88: John Wiley & Sons, 2011.
- [13] P. Waide, *Energy Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor Driven Systems*, France: International Energy Agency, 2011.
- [14] M. Melfi and S. D. Rogers, "Permanent-Magnet Motors for Energy Savings in Industrial Applications," *IEEE Transactions On Industry Applications*, pp. 1360-1366, 2008.
- [15] J. Kim, "Speed Control of Interior Permanent Magnet PM Synchronous Motor Drives for the Flux Weakening Operation," *IEEE Transaction on Ind. Application*, pp. 43-48, 1997.
- [16] A. Kamalaselvan and S. L. Prakash, "Modeling simulation and analysis of closed loop speed control of PMSM drive system," *2014 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies [ICCPCT-2014]*, 2014, pp. 692-697, doi: 10.1109/ICPCT.2014.7055050.