

## PENGENDALIAN KECEPATAN MOTOR SINKRON MAGNET PERMANEN (MSMP) TIPE INTERIOR DIATAS KECEPATAN DASAR

Muh. Bachtiar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Tadulako  
Email: m\_bachtiar23@yahoo.com

**Abstract** – This paper presents a method to control Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) at high speed above the based speed. To control PMSM from zero speed up to base speed, the armature voltage of the motor may be varied up to maximum voltage allowed of the inverter used. In this region the stator voltage will increases with the increases of motor speed reaches the based speed, motor voltage cannot increase anymore because of saturation and consequently motor speed cannot be increase more highly. In order motor to control the motor above base speed, it is can be done by weakening the field flux of the rotor. As the rotor made of permanent magnet, then filed weakening control cannot be done directly. The control of field-weakening effect is done by controlling stator current vector of direct axis, which is variable with speed.

**Keyword:** Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), field flux, increases of motor speed.

### I. Pendahuluan

Aplikasi Motor Sinkron Magnet Permanen (MSMP) untuk keperluan industri sudah sangat luas seperti robotika, kendaraan listrik dan sebagainya. Untuk aplikasi kendaraan listrik MSMP memerlukan range kecepatan yang lebar dari kecepatan rendah dibawah kecepatan dasar sampai kecepatan tinggi diatas kecepatan dasar.

Pengendalian kecepatan MSMP dari kecepatan nol sampai kecepatan dasar dilakukan dengan pengaturan tegangan jangkar. Namun diatas pada kecepatan diatas kecepatan dasar, pengaturan tegangan yang lebih tinggi tidak dapat dilakukan lagi karena inverter yang digunakan mempunyai batas tegangan maksimum yang tidak boleh dilewati. Oleh karena itu untuk menaikkan kecepatan melebihi kecepatan dasar maka pengendalian dapat dilakukan dengan

melemahkan fluks medan. Pelemahan fluks ini dimungkinkan pada MSMP tipe interior karena MSMP tipe interior mempunyai induksi jangkar relative besar sehingga pengendalian torka maksimum dengan menggunakan torka reluktansi dapat dicapai. Dengan alasan inilah maka pengoperasian MSMP untuk kecepatan yang lebih tinggi dari kecepatan dasar dapat dilakukan dengan kendali pelemahan fluks pada daerah daya kuda konstan.

#### 1. Pengendalian MSMP Dengan Metoda Kendali Vektor

Pada MSMP torka dibangkitkan oleh interaksi antara fluks yang dihasilkan oleh magnet rotor dan MMF stator. Fluks tambahan tidak mungkin dibangkitkan dengan mengambil komponen MMF stator sepanjang arah fluks motor karena magnet rotor hanya bersifat seperti celah udara terhadap MMF luar. Untuk memperoleh torka maksimum dari arus yang diberikan atau untuk memperoleh torka yang diberikan dengan arus minimum stator, maka MMF stator harus tegak lurus dengan fluks rotor, dengan kata lain MMF stator harus quadrature dengan medan[1].

Hal ini diperoleh dengan mendeteksi posisi sesaat dari rotor dengan menggunakan sensor posisi, dan mengendalikan posisi dari MMF stator pada posisi tegak lurus dengan fluks rotor. Karena fluks rotor berputar dalam ruang maka vector MMF stator juga harus diputar secara sinkron sehingga posisi relatif dalam ruang dipertahankan, tidak hanya dalam kondisi *steady state* tetapi dalam kondisi *transient* untuk memperoleh respon dinamis yang paling baik. Ini dilakukan dengan pengendalian vector (*vector control*).

2. Struktur Dari Metoda Kendali Vektor

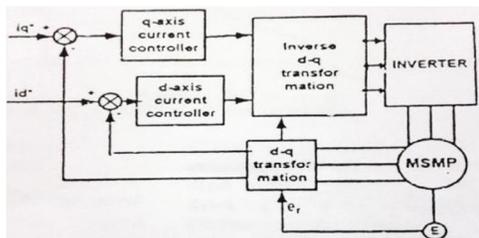
Untuk mengendalikan torka dan fluks dari MSMP tipe *interior* dengan cara *decouple* maka komponen  $i_d$  dan  $i_q$  dari arus stator harus dikendalikan. Magnituda  $i_q$  harus dikendalikan untuk mengetur torka dan magnituda  $i_d$  harus dikendalikan untuk memperoleh efek pelemahan medan (*field weakening effect*). Pengeturan  $i_d$  dan  $i_q$  dilakukan dengan menggunakan teknik PWM atau pengendali hysteresis dalam kerangka referensi rotor. Pengendalian torka dan fluks dilakukan berdasarkan persamaan torka motor magnet permanen [2] sebagai berikut :

$$T_e = \frac{p}{2} \psi_{mag} I_q \tag{1}$$

Dimana :

- $T_e$  = torka elektromagnetik
- $p$  = jumlah pasangan kutub
- $\psi_{mag}$  = fluks lingkup magnet permanen
- $L_d$  = induktansi stator sumbu *direct*
- $L_q$  = induktansi stator sumbu *quadrature*
- $I_d$  = arus *steady state* stator sumbu *direct*
- $I_q$  = arus *steady state* stator sumbu *quadrature*

Sebelum men-switching inverter, *error* (galat) arus yang sudah dikuatkan ditransformasi ke stator oleh blok transformasi  $dq^{-1}$  (*inverse dq transformation*) dengan menggunakan posisi rotor terukur dari sebuah *encoder*. Untuk mengurangi cross coupling antara arus sumbu-d dan arus sumbu-q dan back EMF maka digunakan beberapa *feed forward decoupling*. Diagram sederhana dari pengendalian torka dengan kerangka referensi rotor [3] diperlihatkan pada gambar 1.



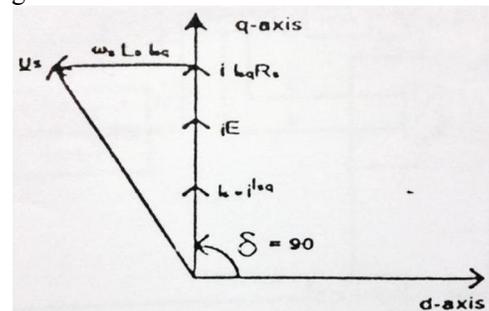
Gambar 1. Skema pengendalian torka dengan regulator arus

3. Daerah Operasi Motor

MSMP dapat beroperasi dalam dua daerah operasi yaitu daerah dibawah kecepatan dasar dari kecepatan nol sampai kecepatan dasar dan operasi pada daerah diatas kecepatan dasar.

- Operasi pada Daerah dibawah Kecepatan Dasar

Supaya dihasilkan torka paling besar untuk arus stator yang diberikan maka operasi optimal dicapai dengan mengendalikan arus stator dimana fasor ruang arus stator hanya mengandung komponen sumbu quadrature saja apabila dinyatakan dalam kerangka referensi rotor. Fluks celah tetap konstan dan torka steady state maksimum bergantung pada rating arus kontinu stator. Diagram fasor untuk operasi torka konstan diperlihatkan pada gambar 2.



Gambar 2. Diagram fasor MSMP dalam mode torka konstan

Dari gambar 2 terlihat bahwa tegangan stator  $u_x$  bertambah dengan bertambahnya kecepatan, dengan torka konstan pada motor, maka akan membutuhkan lebih banyak tegangan dari inverter. Kecepatan maksimum yang dapat dicapai pada torka maksimum dibatasi oleh tegangan inverter yang diijinkan. Kecepatan maksimum pada daerah operasi ini didefinisikan sebagai kecepatan dasar  $\omega_{rb}$ .

- Operasi pada Daerah diatas Kecepatan Dasar

Mode operasi yang optimal sesuai untuk kecepatan dibawah kecepatan dasar dimana tegangan yang cukup tersedia dari inverter yang mensuplai belitan stator motor. Akan tetapi pada kenyataan diatas kecepatan dasar, yaitu pada daya konstan, EMF induksi bertambah secara langsung dengan bertambahnya kecepatan (fluks eksitasi

tetap konstan karena magnet permanen), dan jika kecepatan yang diberikan tercapai, maka tegangan harus juga ditambah untuk melawan EMF stator. Pertambahan tegangan terminal memerlukan pertambahan dalam rating tegangan inverter yang diberikan.

Inverter mempunyai batas tegangan yang tidak dapat dilebihi, maka tegangan terminal motor harus dibatasi dengan menggunakan pelemahan medan (*field weakening*). Pelemahan medan secara langsung tidak dapat dilakukan karena medan eksitasi diperoleh dari magnet permanen. Namun efek yang sama dapat dicapai dengan memasang arus sumbu direct yang negatif seperti yang ditunjukkan pada persamaan berikut :

(2)

dimana :

$\psi_{sd}$  = fluks lingkup stator pada sumbu *direct*  
 $\lambda_r$  = fluks lingkup akibat fluks magnet rotor yang melingkupi stator

Magnituda arus stator yang merupakan jumlah vektor dari komponen arus sumbu-d dan sumbu-q akan bertambahn jika motor membangkitkan torka yang sama seperti pada kecepatan dasar. Untuk membatasi arus stator pada rating kontinu yang tetap, komponen torka  $I_{qx}$  dari arus stator harus dikurangi, seperti pada persamaan 3.

(3)

dimana :

$I_{max}$  = rating arus kontinu dari stator

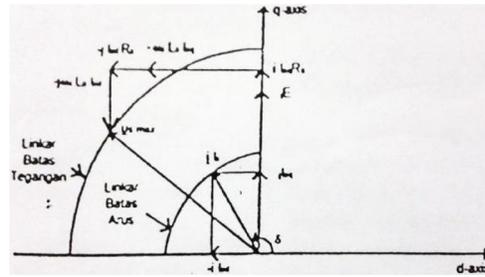
Jadi torka output maksimum dari motor mendapat batas dalam daerah operasi daya konstan. Diagram fasor untuk mode operasi daya konstan ditunjukkan dalam gambar 3.

Untuk operasi daya konstan :

(4)

dimana :

$\omega_r$  = kecepatan sudut diatas kecepatan dasar  
 $\omega_{rb}$  = kecepatan dasar  
 $T_e$  = torka elektromagnetik  
 $T_b$  = rated torka pada kecepatan dasar



Gambar 3. Diagram fasor MSMP dalam mode operasi daya kuda konstan

Torka berbanding lurus dengan  $I_{qx}$  maka persamaan 4 dapat ditulis ulang menjadi :

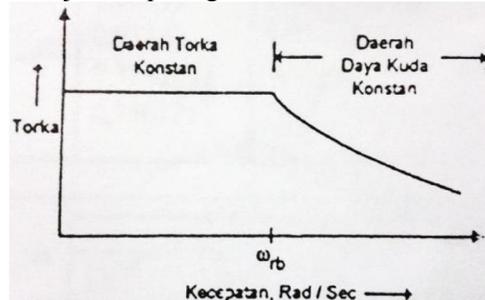
$$\text{---} \quad (5)$$

dimana :

$I_{qs}$  = komponen sumbu-q dari arus stator pada kecepatan  $\omega_r$

$I_{qs \text{ rated}}$  = arus stator pada rated torka dan pada kecepatan dasar  $\omega_{rb}$

Karakteristik torka kecepatan dari motor ditunjukkan pada gambar 4.



Gambar 4. Karakteristik kecepatan versus torka

## II. Metode Penelitian

Skema keseluruhan dari pengendali torka menggunakan vector control ditunjukkan dalam gambar 5.

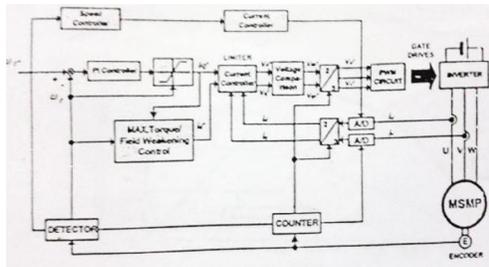
Motor diperlukan untuk beroperasi dalam mode operasi torka konstan dibawah kecepatan dasar dan dalam mode daya kuda konstan diatas kecepatan dasar.

Untuk memperoleh torka maksimum pada arus stator yang diberikan dalam mode torka konstan, maka fasor ruang arus stator dikendalikan agar selalu berada disepanjang sumbu-q. arus sumbu-d dipertahankan tetap nol. Pengendali kecepatan memberikan nilai referensi untuk torka yang diperlukan dari motor. Referensi untuk arus sumbu-q

dihitung dengan membagi torka referensi dengan konstanta torka  $K_T$  dari motor. Motor dapat menarik arus *rated* beberapa kali dalam waktu singkat. Oleh karena itu motor dibolekan untuk membangkitkan torka yang sama dengan torka puncak dengan membolehkan nilai arus stator yang diperlukan mengalir. Hal ini perlu untuk mengurangi waktu percepatan. Akan tetapi dalam prakteknya arus stator maksimum dibatasi oleh kapasitas hantar arus maksimum dari inverter.

Jadi referensi torka dibatasi sampai nilai kapasitas hantar arus maksimum dari inverter yang sesuai. Arus sumbu-q referensi [4]diberikan oleh persamaan :

(6)



Gambar 5. Diagram blok vektor kontrol untuk MSMP tipe interior

Referensi untuk arus sumbu-d dalam mode torka konstan adalah  $I_{dx} = 0$ . Dalam mode daya kuda konstan arus stator harus mempunyai komponen sepanjang sumbu-d negatif.

Bila kecepatan  $\omega_r$  yang diberikan diatas kecepatan dasar  $\omega_{rb}$ , nilai referensi untuk komponen sumbu-d dari arus stator dihitung dari :

$$\frac{I_{dref}}{I_{dmax}} = \frac{\omega_r - \omega_{rb}}{\omega_{max} - \omega_{rb}} \quad (7)$$

Untuk mencapai karakteristik daya konstan, komponen sumbu-q dari arus stator dibatasi sampai batas daya kuda konstan. Batas untuk komponen sumbu-q dari arus stator diberikan oleh :

$$I_{qref} = I_{qmax} \quad (8)$$

Magnituda dari arus stator tidak boleh melebihi rating arus kontinu atau

kemampuan hantar arus maksimum dari inverter berapapun kecilnya. Ini menjadi batas kedua untuk komponen sumbu-q dari arus stator. Batas untuk komponen sumbu-q dari arus stator akibat dari konstrain ini diberikan oleh :

$$I_{qref} = \frac{I_{dmax}}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

Berdasarkan pertimbangan diatas pengendali kecepatan yang dirancang sebaiknya menggunakan pengendali proporsional + integral (PI) untuk lup kendali kecepatan. Pengendali fluks hanya mengecek jika kecepatan diatas kecepatan dasar dan referensi arus sumbu-d yang bergantung pada kecepatan selanjutnya dihitung.

Lup paling dalam dari struktur kendali adalah pengendali arus. Lup arus memaksa arus jala-jala AC mengikuti referensi arus. Desain dari pengendali arus didasarkan pada persamaan tegangan motor.

Persamaan tegangan dari kordinat d-q (kerangka referensi rotor) diberikan oleh :

$$u_d = R i_d - \omega_s L_q i_q \quad (10)$$

$$u_q = R i_q + \omega_s L_d i_d \quad (11)$$

$\omega_s$  adalah kecepatan sinkron, yang besarnya adalah :

$$\omega_s = \frac{2\pi f}{p} \quad (12)$$

Respon yang diharapkan dari lup arus adalah waktu kelambatan T orde pertama. Sifat ini secara matematis dinyatakan sebagai berikut :

$$I_{dref} = I_{dmax} \quad (13)$$

$$I_{qref} = I_{qmax} \quad (14)$$

Keluaran tegangan referensi ditransformasikan dari sinyal referensi kerangka rotor 2 fasa menjadi sinyal referensi kerangka stator 3 fasa dan disuplai ke inverter sumber tegangan (VSI) setelah

melalui rangkaian modulasi lebar pulsa (PWM).

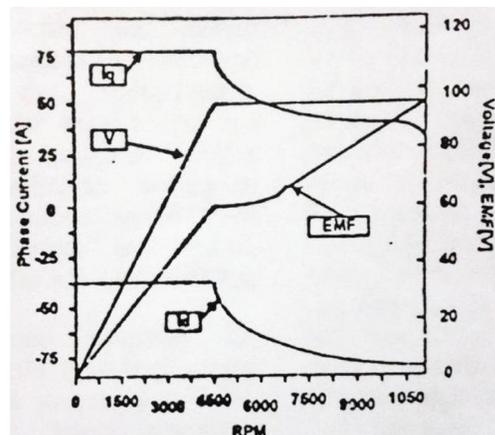
### III. Hasil dan Pembahasan

#### 1. Analisis Hasil Penggunaan Msmp Dengan Efek Pelemahan Fluks

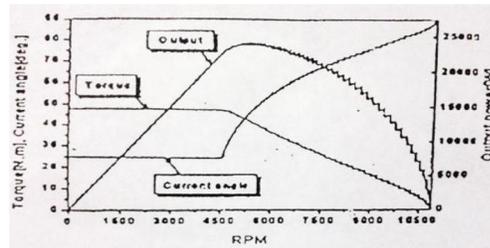
MSMP telah dikembangkan untuk diaplikasikan pada kendaraan listrik [5]. Pengujian dilakukan dengan pengendalian pelemahan medan (*field weakening control*). Hasil yang diperoleh untuk spesifikasi motor yang ditunjukkan pada tabel 1 ditunjukkan dalam gambar 6 dan 7.

**Tabel 1.** Parameter desain dari MSMP tipe interior yang digunakan dalam eksperimen [5].

Output	15 KW	Phase current	85 A
Phase voltage	98 V	d-axis current	-34,5 A
Rated current	85 A	q-axis current	77,65 A
Base speed	3000 rpm	d-axis voltage	-75,28 V
Resistance per fasa	0,042 $\Omega$	q-axis voltage	70,96 V
Synchronous reactance	0,673 $\Omega$	Efficiency	96,25
d-axis reluctance	0,32327 $\Omega$		
q-axis reluctance	0,95077 $\Omega$		



**Gambar 6.** Karakteristik tegangan-arus berdasarkan kecepatan



**Gambar 7.** Karakteristik tegangan versus torca, arus dan daya output

Gambar 6 dan 7 menunjukkan karakteristik kecepatan daya dalam daerah *field weakening*. Dari karakteristik pada gambar tersebut terlihat bahwa kecepatan dasar dimana tegangan suplai sudah jenuh meningkat sampai dengan 4500 rpm karena pelemahan medan terinduksi oleh efek reluktansi dalam daerah torca konstan. Oleh karena itu daerah output kecepatan yang memenuhi output yang diharapkan dapat diperlebar sampai 900 rpm dengan menggunakan *field weakening control*.

### IV. Kesimpulan

Motor sinkron magnet permanen (MSMP) dapat dioperasikan dalam dua daerah operasi yaitu daerah operasi torca konstan dan daerah operasi daya kuda konstan. Pada daerah torca konstan, torca motor maksimum dan motor berputar dari kecepatan nol sampai kecepatan dasar. Pada daerah ini tegangan stator akan terus bertambah seiring dengan bertambahnya kecepatan dan saat pada saat motor mencapai kecepatan dasar, tegangan motor tidak bias lagi bertambah karena mengalami kejenuhan ( *Saturasi*). Karena tegangan motor tidak bias lagi bertambah maka kecepatan motor juga tidak bias lagi bertambah.

Agar kecepatan motor dapat bertambah sampai diatas kecepatan dasar, maka fluks sampai di atas kecepatan dasar, maka fluks medan harus dilemahkan. Akan tetapi karena pelemahan medan tidak dapat dilakukan secara langsung, maka efek pelemahan medan dapat dilakukan dengan mengendalikan vektor arus ststor sumbu *direct* yang bervariasi dengan kecepatan. Pengendalian ini disebut dengan *vector control*.

**Daftar Pustaka**

- [1] Flett, F.,1994, *A Tutorial in AC Induction and Permanent Magnet Synchronous Motor, Vector Control with DSP*, Analog Devices, Inc. and Infosys Technologies, Ltd., USA
- [2] Schaible,U. and Szabados,B, 1998, *Dynamic Parameter Torque Control of High Speed Sinusoidal Flux Permanent Magnet Synchronous Machines*, International Conferences on PEDES, Vol. I, pp.88-13.
- [3] Rahman M.F., Zhong L. and Lim, K.W. 1998, *A Comparison of Two High Performance, Wide Speed Range Drive Techniques for Interior Magnet Motors*, International Conferences on PEDES, Vol. I, pp.276-281.
- [4] Oyama, J., et.al., 2001, *Sensorless Vector Control of IPM Motor Over Whole Speed Range*, International Conferences on PEDS 2001, Bali, Vol. I, pp.448-451.
- [5] Park,J.W., Koo, D.H., Kim, J.M., and Kim, H.G., 1998, *Development of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor and Driver for Electric Vehicle*, International Conferences on PEDES, Vol. II, pp.892-897.