

# CERTIFICATE

This is to certify that

**Hidayat**

*Universitas Gadjah Mada*

has participated in **Conference on Information Technology and Electrical Engineering**,  
held on 20 July 2010, at Department of Electrical Engineering and Information Technology,  
Faculty of Engineering, Gadjah Mada University, as

author and/or coauthor of presented paper (papers)

CONFERENCE ON  
INFORMATION TECHNOLOGY  
AND  
ELECTRICAL ENGINEERING  
2010

Yogyakarta, 20 July 2010  
Chairman

*Risanuri Hidayat*

Risanuri Hidayat

# **Conference on Information Technology and Electrical Engineering (CITEE) 2010**

Monday, 03 May 2010 WIB, By: Humas UGM

---



The Conference on Information Technology and Electrical Engineering (CITEE) 2010 is organized by the Electrical Engineering Department,

Gadjah Mada University, and will be held in July 20, 2010 in Yogyakarta. Yogyakarta is one of the major city in Java, located geographically in its centre. It is well known as the top tourist destination in Indonesia, as well the city of education, where students from all over Indonesia, even from other countries come to study. CITEE 2010 aims at strengthening information and experience sharing on the current researchs and ideas among researchers and practitioners in the Information Technology and Electrical Engineering area. The conference is expected give contribute in the development of the electrical engineering field, particularly within its region

Conference on Information Technology and Electrical Engineering (CITEE) 2010 will be held in **July 20, 2010, in Gedung KPTU** Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada Yogyakarta

Location  
of Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada is The North of Sarjito Hospital.

Â

**Â Important Dates :**

Â **Mei 10, 2010** : Full-paper submission deadline  
Â May 31, 2010 : Notification of Acceptance  
Â Juni 21, 2010 : Camera ready submission deadline  
Â July 20, 2010 : Conference Date

For detail [click here](#)

Website Â [click here](#)

---

#### Related News

- [International Conference on Information Technology and Electrical Engineering \(CITEE\) 2012](#)
- [UGM Students Ready to Follow Asia Pacific NetRiders Challenge](#)
- [Conference on Information Technology and Electrical Engineering \(CITEE\) 2010](#)
- [UGM as a Host of International Electrical Engineering Discussion Forum](#)
- [Yogyakarta and Faculty of Agricultural Technology UGM to Host the 6th Asian Regional Conference of ICID](#)

## SCHEDULE

- 07.30 – 08.00: Registration  
 08.00 – 08.10: Opening Speech  
     1. Chairman of the Organizing Committee  
     2. Rector of Gadjah Mada University

### PLENARY SESSION (at Room A): Keynote Speech

Moderator: F. Danang Wijaya

08.10 – 08.40

*Ministry of National Education, Republic of Indonesia*

08.40 – 09.10 Innovative Power Switch Named MERS for Renewable and Power Saving Applications  
*Prof. Ryuichi Shimada*

*Tokyo Institute of Technology, Japan*

09.10 – 09.40 Indoor Localization and Navigation for Pervasive and Sensor-Based Computing Environment  
*Widyawan*

*Department of Electrical Engineering and Information Technology, Gadjah Mada University*

09.40 – 10.00 Morning Coffee Break

### PARALLEL SESSION (Room A, B, C, D)

- Allocated duration per paper : 20 minutes (max.)  
 • GREEN lamp : 10 minutes (max.) presentation  
 • YELLOW lamp : 10 minutes (max.) discussion  
 • RED lamp : END of allocated duration

No.	Time	Code of Presented Papers (see Table of Contents for the details)			
		Room A	Room B	Room C	Room D
	Moderator	<i>Haryono (P-Teti #11)</i>	<i>Suhartomo (S-Jkt #11)</i>	<i>Cahyo I (P-Ugm #24)</i>	<i>Anat (S-Teti #13)</i>
1.	10.00 – 10.20	<b>P-USA #11</b>	<b>I-MCD #11</b>	P-Jkt #21	I-Bdg #21
2.	10.20 – 10.40	<b>P-USA #12</b>	<b>I-Yog #11</b>	P-Bdg #21	S-Bgr #21
3.	10.40 – 11.00	<b>P-JPN #11</b>	<b>S-ALG #11</b>	P-Jbr #21	S-Mlg #21
4.	11.00 – 11.20	<b>P-JPN #12</b>	<b>S-Jkt #12</b>	P-Smg #21	S-Sby #23
5.	11.20 – 11.40	<b>P-JPN #13</b>	<b>S-Sby #11</b>	P-Smg #22	S-Sby #22
6.	11.40 – 12.00	<b>P-Ugm #11</b>	<b>S-Ugm #12</b>	P-Ugm #21	I-Ugm #21
	12.00 – 13.00		<b>Lunch Break</b>		
	Moderator	<i>A. Syakur (P-Ugm #11)</i>	<i>Udayanto (S-Ugm #12)</i>	<i>Budi S. (S-Teti #13)</i>	<i>Ardi R. (I-Ugm #21)</i>
7.	13.00 – 13.20	<b>P-Teti #11</b>	<b>S-Jkt #11</b>	P-Ugm #24	S-Sby #21
8.	13.20 – 13.40	<b>P-EGP #11</b>	<b>S-Ugm #11</b>	S-Pwk #21	S-Smg #21
9.	13.40 – 14.00	S-Kds #21	<b>S-Teti #11</b>	S-Yog #21	S-Smg #22
10.	14.00 – 14.20	S-Smg #23	<b>S-Teti #12</b>	S-Yog #22	S-Yog #23
11.	14.20 – 14.40	S-Smg #24	<b>S-Teti #13</b>	P-Ugm #23	I-Yog #21
12.	14.40 – 15.00	S-Smg #25	<b>S-Ugm #13</b>	P-Ugm #22	I-Yog #22
	15.00 – 15.20		<b>Afternoon Coffee Break</b>		
	Moderator		<i>Enas (S-Teti #11)</i>	<i>Okie (S-Teti #12)</i>	<i>Galang (S-Ugm #13)</i>
13.	15.20 – 15.40		S-Ugm #21	S-Teti #21	S-Teti #23
14.	15.40 – 16.00		P-Teti #21	S-Teti #22	S-Ugm #22

Paper codes (see Table of Contents for the details):

- *Italic-Bold* font (for example: **I-MCD #11**): International (English) session
- Regular font: National (Indonesia) session
- I, P, S: Information, Power, Signal/System/Circuit

Certificate of presentation is available after completing your presentation.

## Table of Contents

Inner Cover	i
Organizer	ii
Foreword	iii
Schedule	iv
Table of Contents	v

### **KEYNOTE**

1. Key #1

*Ministry of National Education, Republic of Indonesia*

2. Key #2 Innovative Power Switch Named MERS for Renewable and Power Saving Applications  
*Prof. Ryuichi Shimada  
Tokyo Institute of Technology*

3. Key #3 Indoor Localization and Navigation for Pervasive and Sensor-Based Computing Environment  
*Widyawan  
Dept. of Electrical Engineering and Information Technology, Gadjah Mada University*

### **TEKNIS**

1. I-Bdg #21 Comparison Analysis Policing Traffic and Shaping Traffic For Management Traffic on TCP/IP Network  
*Lita Lidyawati, Lucia Jambola*
2. I-Yog #21 Desain dan Implementasi Sistem Komunikasi Data Rencana Penerbangan Untuk Kepentingan Identifikasi Sasaran Berbasis Web Online  
*Panca Prawira, Arwin Datunaya Wahyudi Sumari*
3. I-Yog #22 Kualitas Website Pemerintah Daerah di Indonesia Sebagai Media Pendukung Penyelenggaraan Pemerintahan yang Terbuka dan Partisipatif  
*Puguh Prasetya Utomo*
4. I-Ugm #21 Aplikasi Facebook untuk Sistem Monitoring Billing Warnet Berbasis Web Menggunakan Jaringan Internet Telkom Speedy  
*Ardi Rahman, Harry Yuliansyah, Risamuri Hidayat*
5. P-Jkt #21 Sistem Peningkatan Mutu Minyak Transformator Berdasarkan Tegangan Tembus Pada IBBT01  
*A.Sofyan, A.Priyono, dan I.Setiawan*
6. P-Bdg #21 Evaluasi Unjuk Kerja Multirate-GPC Controller  
*Ali Mashar*
7. P-Jbr #21 Analisa Gangguan Simultan Hubungan Paralel-Paralel Pada Sistem Tenaga Listrik  
*Triwahju Hardianto*
8. P-Smg #21 Pengaruh Sinyal Injeksi Harmonika Orde Ketiga Terhadap Kinerja Motor Induksi Tipe Volt/Hertz  
*Leonardus H. Pratomo*
9. P-Smg #22 Sistem Manual MPPT – Inverter Sebagai Interface Antara PV dan Beban  
*Ari Hardwin S., Slamet Riyadi*
10. P-Ugm #21 Strategi Kontrol Kecepatan dan Torsi Motor Arus Searah Tanpa Sikat (MASTS)  
*Hidayat, Sarjiya, Sasongko, P.H, Suharyanto*
11. P-Ugm #22 Relationship between Contact Angle and Stoichiometry Value On Epoxy Resin Polymer Insulating Materials  
*Nurlailati, Abdul Syakur, Sarjiya, Hamzah Berahim*

# Strategi Kontrol Kecepatan dan Torsi Motor Arus Searah Tanpa Sikat (MASTS)

Hidayat<sup>1,2</sup>, Sarjiya<sup>1</sup>, Sasongko, P.H<sup>1</sup>, Suharyanto<sup>1</sup>

1. Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, Indonesia

2. Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Bung Hatta Padang, Indonesia

hdyytanjung@yahoo.com

**Abstract**— This paper presents a strategy to control the speed and torque of Brushless Direct Current Motor (BLDCM) with performance like a conventional direct current motor. The strategy is based on the torque vs. speed curve, which is divided into two regions as constant torque region and flux weakening region. The aim is to obtain the motor operating similar to a speed and torque setting. The 3 phase's motor model is transformed into the rotor reference frame (*field oriented control*), then the current and voltage formulations are derived by q axis and d axis (*dq axis*). The rotor angle is maintained 90° at the constant torque region and it will turn the d axis current to be zero ( $i_d = 0$ ), therefore the motor torque or speed can be controlled through the q axis current ( $i_q$ ). The set data of BLDCM is used to simulate this model by MATLAB Simulink version 7. The PID (*Proportional Integral Derivative*) controller is proposed to improve the model transient responses. The simulation results show that it is relatively success to control the BLDCM speed and torque transient responses.

**Keywords :** BLDCM, speed, torque, control, PID control

## I. PENDAHULUAN

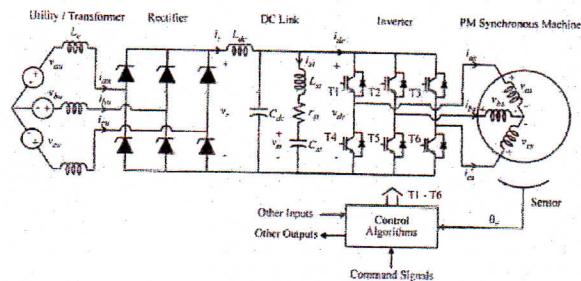
Pada industri-industri proses yang dibangun sebelum tahun 1950-an, banyak dijumpai motor arus searah konvensional (MASK) sebagai penggerak mekanik. Hal demikian didasarkan atas anggapan bahwa MASK memiliki kemudahan dalam pengendaliannya, yaitu melalui pengaturan arus jangkar motor yang sebanding dengan kecepatan atau torsi [5]. Sedangkan kelemahannya adalah efisiensi rendah, rating kapasitas daya terbatas, perawatan mahal dan tidak memungkinkan digunakan pada area yang mudah terbakar. Sebagai alternatif dikembangkan mesin sinkron yang dioperasikan seperti MASK atau dikenal dengan *Brushless DC Motor*, dalam tulisan ini disebut dengan Mesin Arus Searah Tanpa Sikat (MASTS) [7]. Terdapat beberapa keuntungan menggunakan MASTS, diantaranya adalah : karena tidak ada sikat maka perawatan ringan, *noise* hampir tidak ada, bisa dioperasikan pada lingkungan yang berbahaya (mudah terbakar) dan dimensi relatif kecil [3].

Pemodelan MASTS berdasarkan *field oriented control* sangat menguntungkan, karena dapat memberlakukan pengontrolan *Permanent Magnet Synchronous Machine* (PMSM) seperti MASK [9] dengan mengacu pada kurva torsi terhadap putaran dalam daerah torsi konstan dan *flux-weakening* [1],[9].

Untuk itu dibutuhkan tambahan komponen seperti penyearah, inverter dan sensor posisi rotor [6],[7]. Pada MASTS komutasi berlangsung secara elektronis, yaitu pada komponen *switching inverter* misalnya transistor, IGBT, thyristor dsb. Pengontrolan dapat dilakukan dengan mengontrol arus yang masuk ke stator melalui pengontrolan *switching inverter* dengan modulasi lebar pulsa (PWM) atau *duty cycle* [7]. Mode kendali yang sederhana dan mudah adalah *PID controller* [2] diterapkan untuk menguji prilaku MASTS.

## II. PEMODELAN MASTS

Motor Arus Searah Tanpa Sikat (MASTS) dibangun dari *Permanent Magnet Synchronous Machine* (PMSM) 3 fasa hubungan bintang 4 kutub, *inverter* 3 fasa sumber tegangan (*Voltage Source Inverter* = VSI) terkontrol, *rectifier*, *filter*, sensor posisi rotor, sensor kecepatan dan algoritma kontrol [6]. Pada Gambar 1 ditunjukkan rangkaian komponen MASTS. Tegangan sumber 3 fasa disearahkan dengan *rectifier* berpenyaring RLC. Keluaran tegangan searah menjadi sumber tegangan inverter 3 fasa, yang keluarannya dihubungkan kerangkaian kumparan stator PMSM. Sinyal dasar *switching* inverter bersumber dari keluaran sensor posisi rotor, sehingga frekuensi rotor selalu sinkron dengan frekuensi tegangan masukan stator. Proses pengolahan sinyal untuk menghasilkan 6 buah sinyal *firing* inverter, menentukan lebar pulsa *firing* inverter, proses komputasi penerapan algoritma kendali terjadi pada *control algoritma*.



Gambar 1. Rangkaian komponen MASTS [6]

### A. Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM)

Teknik pengontrolan MASTS berorientasi kontrol fluksi (*field oriented control*), merupakan teknik pengontrolan mesin AC berprilaku seperti MASK. Teknik ini sudah dimulai semenjak tahun 1970, yaitu

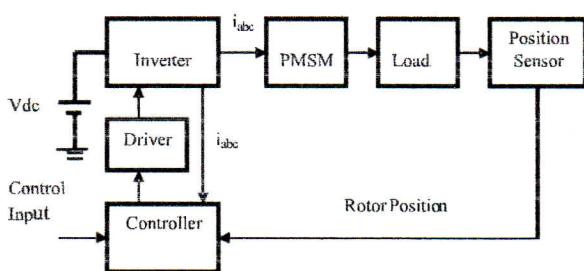
mengontrol kecepatan motor AC (motor induksi dan motor sinkron penguat terpisah). Persamaan motor AC dalam kerangka arus bolak-balik tiga fasa, ditransformasikan kedalam kerangka arus searah (DC) yang dikenal dengan koordinat sumbu d-q (*d-q axis*). Metode transformasi sistem koordinat untuk analisis mesin listrik pertama kali diperkenalkan oleh R.II Park, yaitu dengan membuat formulasi transformasi koordinat variabel stator ke koordinat variabel rotor mesin serempak yang kemudian dikenal dengan transformasi Park. Ini berlaku karena koordinat rotor merupakan besaran searah, sehingga semua variabel setelah transformasi merupakan besaran searah. Untuk implementasi, variabel dalam koordinat rotor harus dikembalikan ke koordinat stator, karena pada kenyataannya stator disiapkan oleh sumber tiga fasa. Sistem koordinat stator dibentuk oleh sumbu *a*, *b* dan *c*, sedangkan sistem koordinat rotor dibentuk oleh sumbu *d,q*. Formulasi untuk mentransformasikan variabel tiga fasa *a*, *b* dan *c* ( $V_{abc}$ ) ke sumbu *d,q* ( $V_{dq0}$ ) ditunjukkan oleh persamaan (1),

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r & 1 \\ \cos(\theta_r - 120) & \sin(\theta_r - 120) & 1 \\ \cos(\theta_r + 120) & \sin(\theta_r + 120) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Transformasi dari sumbu *d,q* ( $V_{dq0}$ ) ke variabel tiga fasa *a*, *b* dan *c* ( $V_{abc}$ ), ditunjukkan oleh persamaan (2),

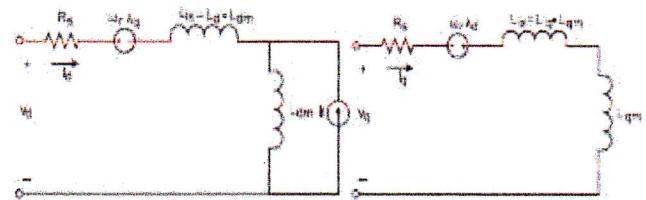
$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - 120) & \cos(\theta_r + 120) \\ \sin \theta_r & \sin(\theta_r - 120) & \sin(\theta_r + 120) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_q \\ V_d \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Untuk operasinya dibutuhkan informasi posisi sudut rotor terhadap fluk rotor sesaat atau posisi rotor magnet permanen  $\theta_r$ . Pada Gambar 2 ditunjukkan blok diagram pengontrolan MASTS, yang juga merupakan penyederhanaan Gambar 1.



Gambar 2. Blok diagram pengontrolan MASTS

Rangkaian ekivalen PMSM ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian Ekivalen PMSM [1]

Persamaan tegangan dalam kerangka rotor direpresentasikan oleh persamaan (3) dan (4).

$$V_q = R_s i_q + \omega_r \lambda_d + \rho \lambda_q \quad (3)$$

$$V_d = R_s i_d - \omega_r \lambda_d + \rho \lambda_d \quad (4)$$

Flux linkages dinyatakan dengan :

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (5)$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_f \quad (6)$$

Subsitusi persamaan (5) dan (6) ke persamaan (3) dan (4), sehingga diperoleh persamaan dalam bentuk matriks

$$\begin{bmatrix} V_q \\ V_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \rho L_q & \omega_r L_d \\ -\omega_r L_q & R_s + \rho L_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_r \lambda_f \\ \rho \lambda_f \end{bmatrix} \quad (7)$$

Persamaan torsi mesin dapat dinyatakan dengan persamaan (8)

$$T_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (8)$$

Arus masukan tiga phasa dinyatakan dengan :

$$i_a = I_m \sin(\omega_r t + \alpha) \quad (9)$$

$$i_b = I_m \sin(\omega_r t + \alpha - \frac{2\pi}{3}) \quad (10)$$

$$i_c = I_m \sin(\omega_r t + \alpha + \frac{2\pi}{3}) \quad (11)$$

Dalam bentuk matriks dapat dinyatakan dengan :

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\omega_r t + \alpha) \\ \sin(\omega_r t + \alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega_r t + \alpha + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} (I_m) \quad (12)$$

dengan  $\alpha$  adalah sudut antara medan rotor dan arus stator, dan  $\omega_r$  adalah kecepatan elektrik rotor. Transformasi arus stator kedalam kerangka rotor yang berputar dengan kecepatan  $\omega_r$  diperoleh :

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \end{bmatrix} = I_m \begin{bmatrix} \sin \alpha \\ \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (13)$$

Arus *q axis* ekivalen dengan arus jangkar MASTS penguat terpisah dan arus *d axis* ekivalen dengan arus medannya. Subsitusi persamaan (13) ke kedua persamaan (8), sehingga diperoleh :

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \left( \frac{1}{2} (L_d - L_q) I_m^2 \sin 2\alpha + \lambda_f I_m \sin \alpha \right) \quad (14)$$

Hubungan torsi elektrik ( $T_e$ ) terhadap kecepatan dan torsi beban ( $T_L$ ) dinyatakan dengan persamaan (15).

$$T_e = J \left( \frac{2}{P} \right) p \omega_r + B_m \left( \frac{2}{P} \right) \omega_r + T_L \quad (15)$$

dengan :

$J$  = momen inersia rotor dan hubungannya kebebhan ( $\text{kg.m}^2$ )

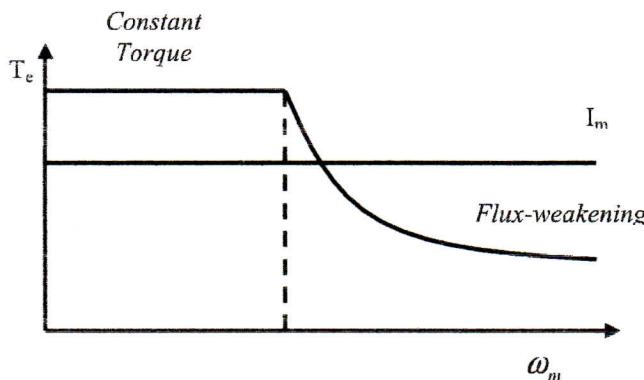
$T_L$  = torsi beban (N.m)

$B_m$  = kofisien damping (N.m.s/rad).

$p$  = notasi deferensial

$P$  = jumlah kutub

Pengontrolan MASTS berorientansi medan (*field oriented control*) berdasarkan kurva hubungan torsi terhadap kecepatan rotor. Motor yang beroperasi pada tegangan input terbatas, fluksi konstan, hubungan torsi terhadap kecepatan putaran rotor berbanding terbalik. Oleh karena itu penambahan kecepatan motor sampai batas kecepatan rating ( $\omega_{rated}$ ) motor yang sedang memikul beban (torsi) konstan, motor mampu menghasilkan torsi elektromagnetik sesuai yang dibutuhkan. Namun setelah mencapai  $\omega_{rated}$  terjadi penurunan torsi elektromagnetik [1],[9]. Prilaku tersebut ditunjukkan seperti Gambar 4.



Gambar 4. Grafik Hubungan Torsi Konstan terhadap Kecepatan [1]

Oleh karena itu, pengontrolan MASTS dapat dilakukan pada kedua daerah tersebut, yaitu *constan torque* (torsi konstan) dan *flux-weakening* (pengontrolan fluksi medan). Dalam makalah ini hanya dibatasi pada daerah torsi konstan.

Pengontrolan MASTS didaerah torsi konstan yaitu membuat arus  $q$  axis ( $i_q$ ) sama dengan arus suplay maksimum ( $I_m$ ), caranya adalah dengan membuat sudut  $\alpha = 90^\circ$ . Dari persamaan (13) arus  $i_d = 0$ . Persamaan torsi pada kondisi ini dinyatakan dengan :

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f i_q \quad (16)$$

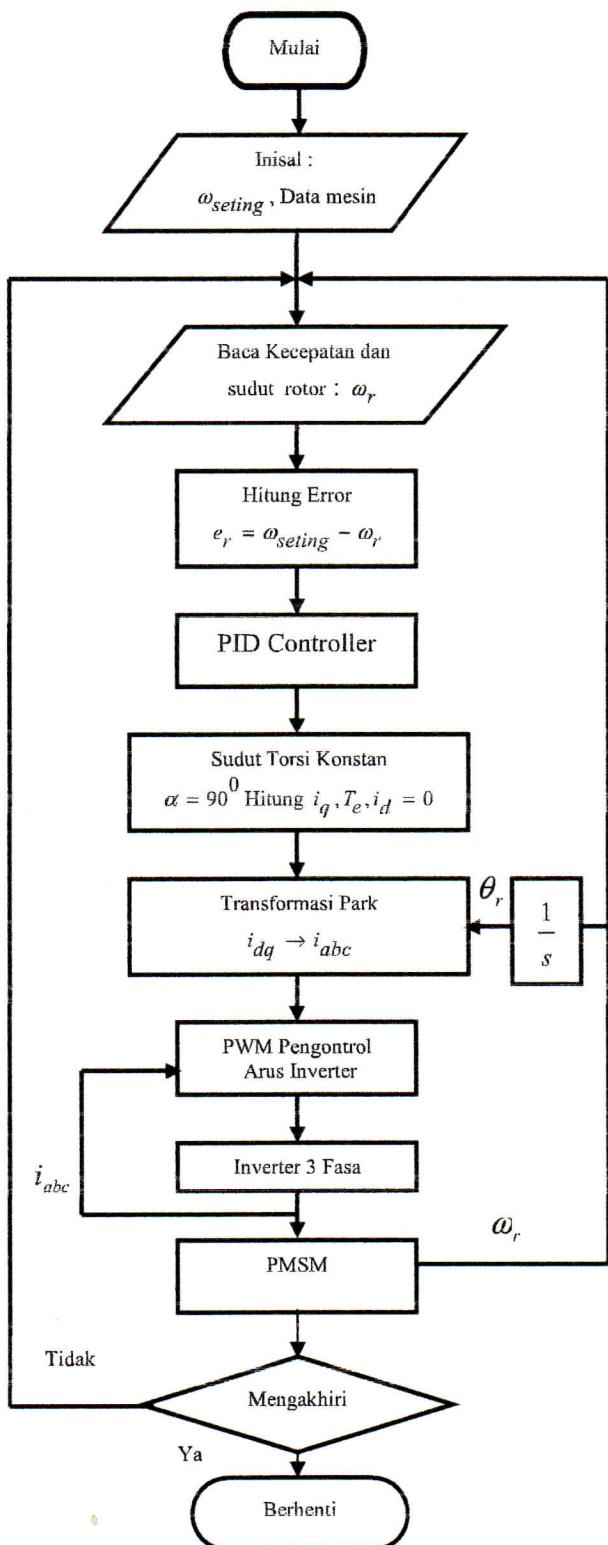
Jika diasumsikan  $k_t$  adalah konstanta torsi,

$$k_t = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f \quad (17)$$

sehingga persamaan torsi dapat dinyatakan dengan :

$$T_e = k_t i_q \quad (18)$$

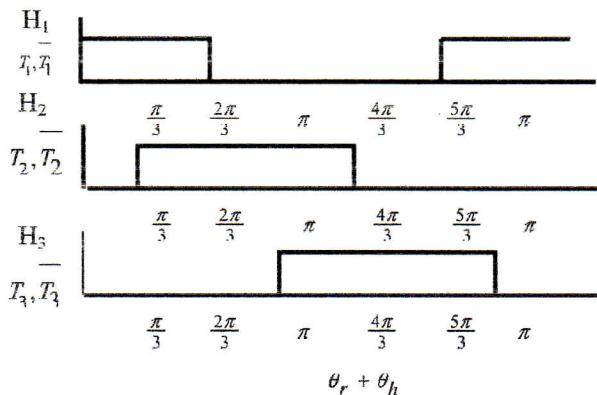
Persamaan (18) identik dengan persamaan torsi MASK, dimana torsi hanya tergantung arus jangkar motor [9].



Gambar 5. Diagram alir pengontrolan MASTS

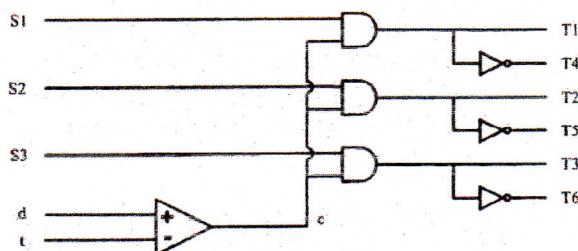
### B. Inverter

Inverter berfungsi untuk mengkonversikan tegangan searah menjadi tegangan bolak-balik. Ada dua jenis inverter yaitu : inverter sumber tegangan (VSI) dan inverter sumber arus (CSI). Pada Gambar 1 dibagian awal ditunjukkan rangkaian komponen MASTS dengan inverter jenis VSI 180°. Kerja inverter pada prinsipnya adalah mengontrol switching. Pada Gambar 6 ditunjukkan gelombang pulsa kontrol switching transistor. Waktu aktif (on) T1 dan T4 dibuat berkomplementer ( $T_1, \overline{T}_4$ ) demikian juga dengan ( $T_2, \overline{T}_5$ ) dan ( $T_3, \overline{T}_6$ ).



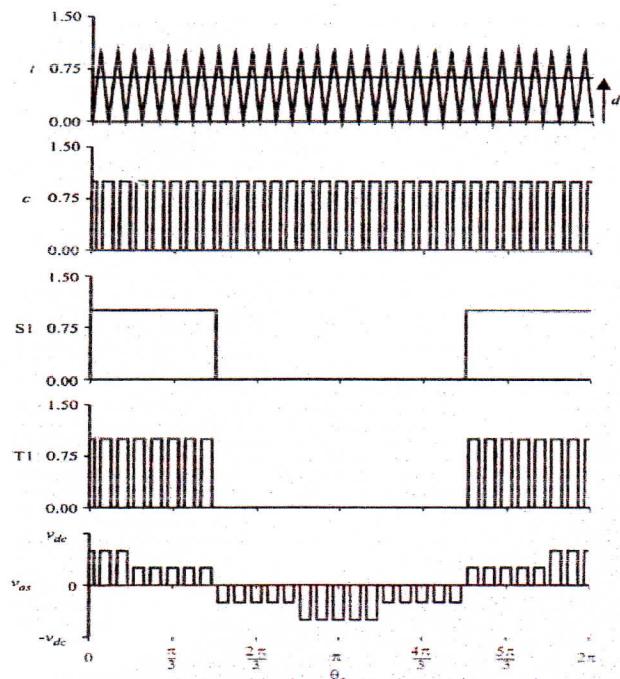
Gambar 6. Pulse firing inverter [6]

Pengontrolan tegangan inverter yaitu dengan modulasi lebar pulsa (Pulse Width Modulation = PWM). Pada Gambar 7 ditunjukkan skematik kontrol PWM untuk VSI 180°. Sinyal masukan PWM adalah S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> dan S<sub>3</sub> berasal dari keluaran sensor H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub> dan H<sub>3</sub>. Masukan kontrol adalah *duty cycle* d yang levelnya divariasikan dari 0 ke 1. Sinyal t merupakan sinyal segitiga dengan frekuensi  $f_{sw}$ , amplitudo dari 0 ke 1. Sinyal d dan sinyal t dibandingkan di komparator, akan keluar sinyal bentuk square. Amplitudo d atau frekuensi t divariasikan, sehingga lebar pulsa keluaran comparator c bervariasi. Sinyal keluaran c di and -kan dengan sinyal S<sub>1</sub>-S<sub>3</sub> yang keluarnya menjadi sinyal aktual penggerak inverter.



Gambar 7. Skematik kontrol modulasi lebar pulsa [6]

Pada saat T<sub>1</sub>-T<sub>3</sub> berlogika 1 transistor konduksi (*switch on*), tegangan akan muncul pada kumparan  $v_{as}$  dan  $v_{cs}$  motor. Saat T<sub>1</sub>-T<sub>3</sub> berlogika 0, transistor tidak konduksi (*switch off*), tegangan kumparan  $v_{as}$  dan  $v_{cs}$  motor nol. Sinyal kontrol PWM ditunjukkan pada Gambar 8. Tegangan  $v_{as}$  dapat diatur dengan memvariasikan *duty cycle*, yaitu dengan mengontrol d.



Gambar 8. Sinyal kontrol dan sinyal keluaran PWM [6]

### C. Sensor Posisi Rotor

Sensor posisi dapat digunakan *Hal efek sensor*, dipasang pada sumbu rotor. Fungsinya adalah untuk mendapatkan posisi rotor. Sensor ini terdiri dari piringan (disk) dan optocoupler, ditunjukkan pada Gambar 8. Disk diberi kode transparan dan gelap. Disk berputar mengikuti sumbu rotor. Pada saat disk berkode transparan melewati sumber cahaya optocoupler maka cahaya menembus *photo detector* sehingga menghasilkan pulsa tinggi. Sebaliknya saat disk kode gelap melewati cahaya, pulsa dihasilkan logika rendah. Disk dibagi menjadi 3 lapis, yaitu lapis A, B dan C yang kemudian menghasilkan sinyal H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub> dan H<sub>3</sub>. Gambar 6 menunjukkan piringan enkoder.

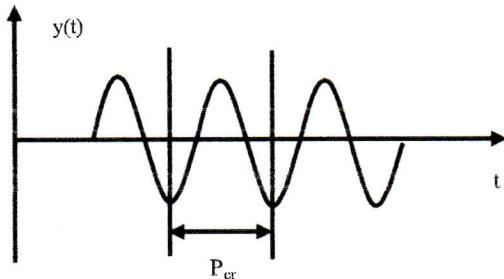


Gambar 9. Piringan enkoder dan optocoupler [5]

#### D. PID Kontrol

Respon kecepatan dan torsi MASTS diperbaiki dengan menerapkan algoritma kontrol PID. Untuk menyetting konstanta PID digunakan metode Ziegler-Nichols kedua, yaitu dengan mendapatkan kurva respon loop tertutup melalui pengujian sistem. Caranya adalah, pertama membuat parameter *integrator* tak berhingga dan parameter *derivative* nol ( $T_i = \infty$  dan  $T_d = 0$ ). Parameter *proporsional* dipilih sembarang mulai dari nilai terkecil, kemudian dinaikan secara perlahan sampai diperoleh respon sistem berosilasi dengan magnitude tetap. Pengukuran proporsional pada saat tercapai magnitude tetap dicatat sebagai pengukuran kritis ( $K_{cr}$ ) dengan periode kritis,  $T_{cr}$  seperti ditunjukkan pada Gambar 10. Keluaran pengedali PID menjadi acuan untuk menentukan arus  $i_q$  yang wujud dalam bentuk sinyal aksi lebar pulsa PWM dinyatakan dengan persamaan 19.

$$u(t) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i} \int e_r(t) dt + T_d \frac{de_r(t)}{dt} \right) \quad (19)$$



Gambar 10. Kurva respon dengan osilasi magnitude tetap [2]

Penalaan parameter PID didasarkan atas kedua konstanta hasil eksperimen yaitu  $K_{cr}$  dan  $P_{cr}$ . Penentuan parameter yang lainnya digunakan Tabel 1.

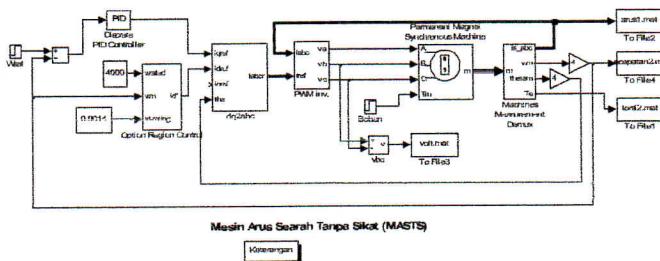
TABLE I. PENALAN PARAMETER PID METODE ZIEGLER NICHOLS LOOP TERTUTUP

TIPE PID	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5 K_{cr}$	$\infty$	0
PI	$0,45 K_{cr}$	$P_{cr}/1,2$	0
PID	$0,6 K_{cr}$	$P_{cr}/2$	$P_{cr}/8$

### III. HASIL SIMULASI DAN DISKUSI

Prilaku MASTS disimulasikan menggunakan program MATLAB 7 Simulink dengan model yang ditunjukkan pada Gambar 11. Model tersebut disusun

berdasarkan persamaan-persamaan yang sudah diuraikan di atas.



Gambar 11. Program MASTS dengan MATLAB simulink [10]

Sebagai objek kontrol adalah mesin sinkron magnet permanen 3 fasa yang data teknisnya diambil dari referensi [4].

BLDC motor type	: Amatek 119003-01
Rating (P)	: 106 Watt
Number of Phase	: 3 (star)
Rated Speed	: 4228 rpm
Rated current	: 6,8 A
Stator equivalent resistance	: 0,348 Ohm
Stator equivalent inductance	: 0,314 mH
Moment of inertia (J)	: 0,0019 N.m.s <sup>2</sup>
Number of pole (p)	: 8
Voltage current constant ( $\lambda$ )	: 0,0419 V/rad/s

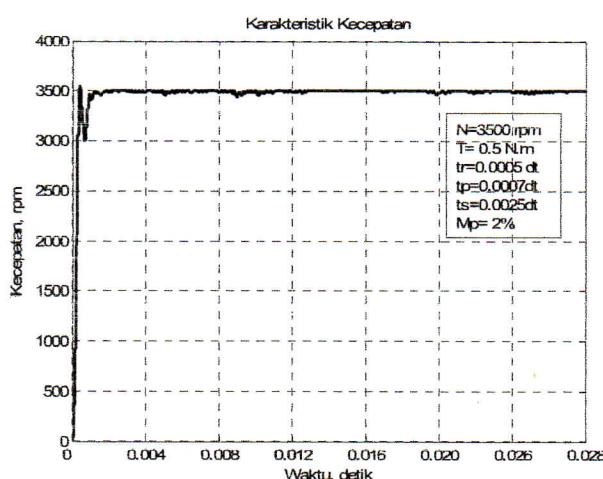
Pengujian awal adalah menentukan kostanta PID, sehingga diperoleh konstanta PID yang menghasilkan respon sistem memadai,  $K_p = 0,8$   $K_i = 5$  dan  $K_d = 0,000018$ .

Pengujian selanjutnya dengan menseting kecepatan MASTS 3500 rpm, motor dibebani  $0,5 \times 10^{-3}$  N.m konstan mulai  $t = 0$  dt. Kurva respon kecepatan terhadap waktu dapat dilihat pada Gambar 12. Parameter peralihan adalah :  $tr = 0,0005$  dt,  $tp = 0,0007$  dt,  $ts = 0,0015$  dt, maximum overshoot (MP) = 2 %.

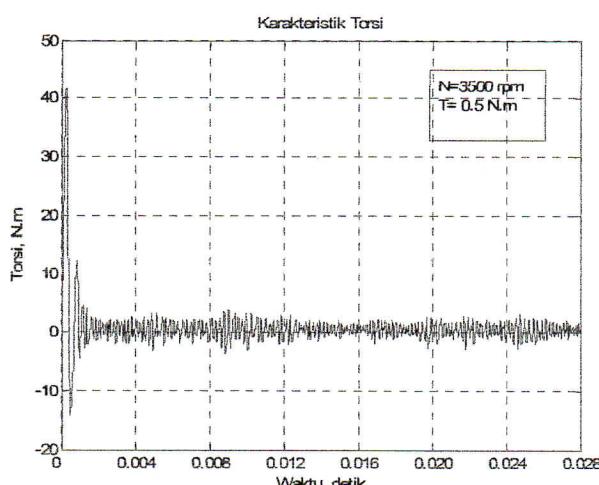
Berdasarkan parameter peralihan di atas, pengamatan respon sistem relatif baik, walaupun pada saat pengasutan motor terjadi satu siklus osilasi dalam waktu singkat 0,001 dt. Hal ini dikarenakan saat pengasutan motor terjadi lonjakan arus (*inrush current*) inverter akibat gaya gesek listrik lawan pada kumparan stator motor masih nol, sedangkan resistansi kumparan stator kecil maka seolah-olah inverter terhubung singkat. Fenomena ini tidak lagi muncul setelah kecepatan putar motor stabil, walaupun beban motor ditambah atau dikurangi, *overshoot* hampir tidak muncul, prilaku ini dapat diamati pada Gambar 16.

Pengujian selanjutnya bertujuan untuk mengamati respon kecepatan motor terhadap perubahan setting kecepatan dan perubahan beban. Pertama motor disetting pada kecepatan 3500 rpm, beban  $0,5 \times 10^{-3}$  N.m, kedua pada waktu  $t = 0,018$  dt kecepatan dinaikan menjadi 4000 rpm, ketiga pada waktu  $t = 0,022$  detik beban dinaikan menjadi  $5 \times 10^{-3}$  N.m.

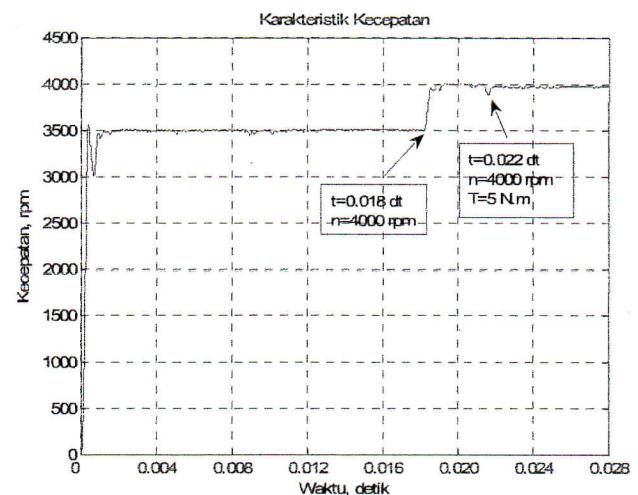
Respon kecepatan MASTS terhadap perlakuan tersebut dapat dilihat pada Gambar 14. Setelah menaikkan kecepatan menjadi 4000 rpm dibutuhkan waktu 0,0005 detik untuk pemulihan kecepatan. Demikian juga dengan penambahan beban menjadi  $5 \times 10^{-3}$  N.m terjadi penurunan kecepatan sesaat kemudian pulih setelah 0,0004 dt. Kenaikan torsi beban diikuti kenaikan torsi elektromagnetik secara cepat, seperti ditunjukkan pada Gambar 15. Lonjakan arus asut pada Gambar 16 terlihat cukup tinggi pada saat motor diasut, ini disebabkan oleh fenomena inverter berbeban motor seperti penjelasan terdahulu. Lonjakan arus berkurang pada saat penambahan kecepatan atau penambahan beban, karena gaya gerak listrik lawan pada kumparan stator saat itu sudah stabil..



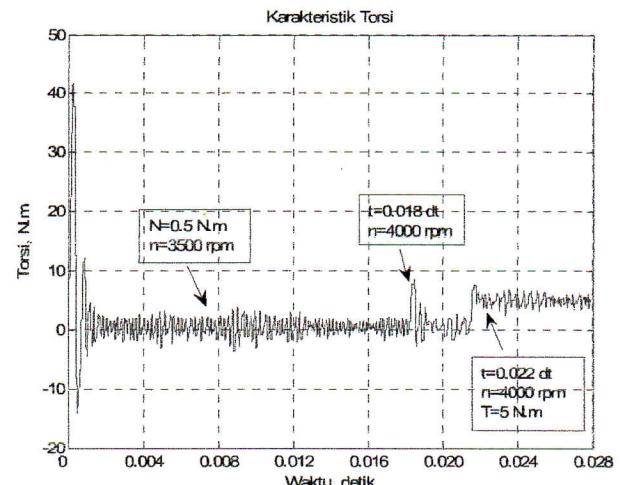
Gambar 12. Respon kecepatan pada setting kecepatan 3500 rpm, Torsi =  $0,5 \times 10^{-3}$  N.m



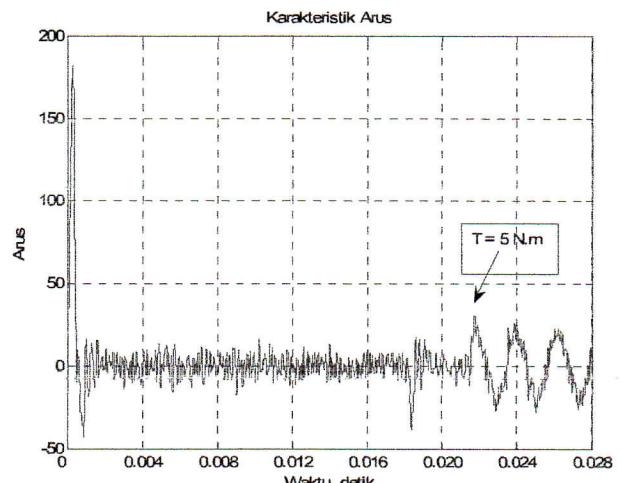
Gambar 13. Respon Torsi pada setting kecepatan 3500 rpm, Torsi =  $0,5 \times 10^{-3}$  N.m



Gambar 14. Respon kecepatan pada Torsi dinaikkan menjadi  $5 \times 10^{-3}$  N.m pada  $t = 0,022$  dt.



Gambar 15. Respon Torsi pada kecepatan awal 3500 rpm kemudian dinaikkan menjadi 4000 rpm, Torsi berubah  $5 \times 10^{-3}$  N.m pada  $t = 0,022$  dt



Gambar 16. Gelombang arus untuk Torsi dinaikkan menjadi  $5 \times 10^{-3}$  N.m pada  $t = 0,022$  dt

#### IV. KESIMPULAN

Pengontrolan kecepatan dan torsi MASTS berorientasi kontrol fluksi (*field oriented control*) dapat dilakukan dengan mengontrol arus sumbu q ( $i_q$ ), dan mengkondisikan arus sumbu d ( $i_d$ ) bernilai nol. Upaya tersebut diperoleh dengan mempertahankan sudut rotor  $90^\circ$ . Lonjakan arus asut sulit dihilangkan, karena pada saat pengasutan tegangan puncak keluaran inverter langsung maksimum, sementara ggl lawan kumparan stator masih nol. Setelah kecepatan stabil, perubahan beban tidak lagi menyebabkan lonjakan arus yang tinggi.

Untuk memperoleh respon sistem yang lebih baik tanpa memerlukan model sistem yang detail disarankan menggunakan algoritma kendali cerdas (*intelligent control*).

#### REFERENCES

- [1] Arroyo, Carrillo, E, "Modeling And Simulation Of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System ", A Thesis Submit Master of Science Electrical Engineering University of Puerto Mayagurz Campus, 2006
- [2] Brian, R "The Design of PID Controllers Using Ziegler Nichols Tuning", 2008
- [3] Brown Ward, "Brushless DC Motor Control Made Easy", Michrochip Technology, 2002
- [4] Cunkas Mehmet, Aydogdu.O, "Realization pf Fuzzy Logic Controllrd Brushless DC Motor Drives Using MATALAB/SIMULINK", Mathematical and Computational Applications, Vol 15, No.2,pp 218-229, Seluk University Turkey, 2010.
- [5] Hidayat, Munawar, I, "Perancangan dan Implementasi Sistem Pengendali Kecepatan Mesin DC Brushless (MDCB) Menggunakan Logika Fuzzy", Tesis Magister Program Studi Teknik Elektro ITB, 2000.
- [6] Krause, Paul.C, "Analysis of Electric Machinery And Drive Systems", IEEE Press, 2<sup>nd</sup> Edition, USA, 2002.
- [7] Munawar,I, Yahuarsyah,H, " Pemodelan dan Analisis Sistem Pensaklaran Motor Arus Searah Tanpa Sikat, Desertasi S3 Jurusan Tenik Elektro ITB, 2005
- [8] Munawar,I Hidayat, "Perancangan dan Implementasi Pengendali Kecepatan Mesin Sinkron 3 Fasa Berkinerja Mesin DC Menggunakan Logika Fuzzy", SMED 2000, FT UGM, Yogyakarta, 2000.
- [9] Novotny, D.W, "Vector Control And Dynamic Of AC Drives", Clarendon Press Oxford, 1996
- [10] Tool Box Matlab Versi 7, "Permanent Magnet Syncronous Machinc", Sim Power Systems, 2004.
- [11] The MathWorks, Inc (1984-2010), " Permanent Magnet Synchronous Machine - Model the dynamics of three-phase permanent magnet synchronous machine with sinusoidal or trapezoidal back electromotive force (back EMF)", 2010