

# 퍼지제어기를 이용한 영구자석형 7상 브러시리스 직류전동기의 속도제어 성능개선

(Advanced speed control of the seven-phase PM brushless DC motor using fuzzy logic controller)

박상훈\*, 유동환\*, 이희준\*, 원충연\*

(Sang-Hoon Park\*, Dong-Hwan Yu\*, Hee-Jun Lee\*, Chung-Yuen Won\*)

## Abstract

The 7-phase BLDC motor is possible for higher efficiency per the unit area, high power and high speed due to the increasing number of phase. Also, it can be looking forward to reduce the current ripple at a point of commutation by the increasing number of phase. Thus, a study for applications of servo system, medical and military instruments is progressing about the BLDC motor is manufactured with multi-phase, currently. This paper is used the fuzzy logic control method for speed control of 7-phase BLDC motor and this is compared with the conventional PI controller using by simulation and experimental results for verification validity of the fuzzy logic controller in this system. The 7-phase BLDC motor and controller are modeled by PSIM6.0 software of PowerSim co. in simulation and we are experimented by the test board that is composed with TMS320VC33-150 DSP controller of Texas Instruments co. and FLEX EPF6016TC144-3 of ALTERA co.

## 1. 서 론

현대 산업분야에서 전기, 전자, 기계는 상호간의 밀접한 관계를 지니고 있다. 특히, 전력전자기술의 발달로 전력용 반도체소자를 사용한 전동기의 응용범위가 넓어지고 있다. 그 중에서 영구자석형 브러시리스 직류전동기는 정밀 속도제어를 필요로 하는 서보기기 및 고속기에 널리 사용되고 있다. 이러한 브러시리스 직류전동기는 최근에 상수를 증가시켜 단위 체적 당 효율 및 출력 등을 높은 구동 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 브러시리스 직류전동기의 상수를 증가시키면서 이를 제어하기 위한 인버터의 사양 역시 증가된다. 그럼에도 불구하고 높은 가격에 대한 문제점은 다상 전동기의 고효율, 고출력과 신뢰성이 필요로 되는 고부가가치 산업에 사용됨으로써 높은 가격에 대한 시스템의 경제적 단점을 극복할 수 있다. 또한, 전동기 구동에 필요한 인버터의 반도체 스위칭 소자가 14개 필요로 하는 단점에도 불구하고 7상 6여자 방식으로 구동됨에 따라 각 스위치의 전력분담률을 줄일 수 있다. 이에 따라, IGBT나 MOSFET과 같은 전력용 반도체 소자의 전력 부담이 줄어들어 시스템의 방열을 최소화 할 수 있다는 장점이 있다. 또한, 상수의 증가는 브러시리스 직류 전동기의 전환시점에서의 전류리플형상을 저감하는 효과를 기대할 수 있고, 한 상의 고장 시에도 운전이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 최근에는 브러시리스 직

류전동기를 다상으로 제조하여 고성능 서보시스템, 의 료기기 및 군사용기기 분야에 적용하기위한 연구가 활 발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 7상 브러시리스 직류전동기의 퍼지 제어이론에 의해 속도제어에 실험과 시뮬레이션을 수행하였다. PSIM 프로그램을 사용하여 유도된 전압방정식과 토크 관계식을 이용하여 7상 브러시리스 직류전동기를 모델링하였고, DLL을 이용하여 제어기를 구성하였다. 구현된 전 동기의 전체 제어시스템 구성은 다음과 같다. 주 연산 장치로 부동 소수점 연산이 가능한 제어용 DSP인 TMS320VC33-150을 사용하여 전동기의 속도제어에 필 요한 M/T 카운터, 퍼지 제어기 그리고 전류제어에 필 요한 히스테리시스 전류제어기를 프로그램 하였으며, 외 부 입출력장치에 대한 제어회로는 EPF6016TC144-3을 이용하여 회로를 설계하였다.

본 논문에서는 7상 브러시리스 직류전동기를 모델링 하였고, 퍼지 제어기를 이용하여 7상 브러시리스 직류 전동기의 속도제어 대하여 연구하였다.

## 2. 본 론

### 2.1. 7상 BLDC 전동기의 등가회로 및 각부 파형

그림 1은 7상 브러시리스 직류전동기의 등가회로를 나타낸 그림이고, 그림 2는 구간별 각 부 파형을 나타낸 그림이다. 그림 2에서 보듯이 7상 브러시리스 직류전동기는 전기각으로 한 회전 당 14의 구간으로 해석이 가능하며

7상 6여자 방식으로 구동된다.

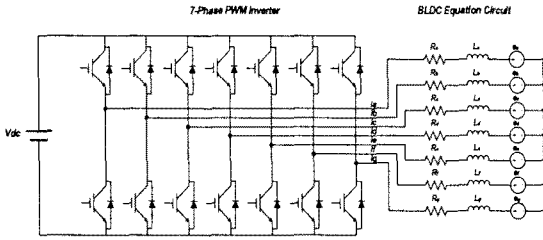


그림 2. 7상 브러시리스 직류전동기 등가회로  
Fig. 1. Equivalent circuit of 7-phase BLDC motor

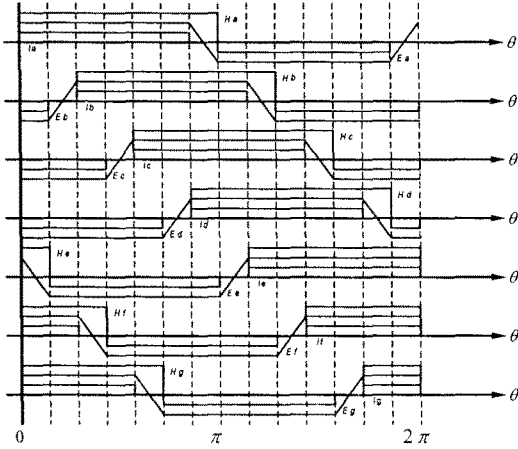


그림 3. 7상 BLDCM의 홀센서, 역기전력 그리고 전류파형  
Fig. 2. Hall sensor, back-EMF and current waveforms of 7-phase BLDCM

## 2.2. 7상 BLDCM 전동기의 모델링

7상 브러시리스 직류전동기의 상호 인덕턴스 성분을 무시하고, 키르히호프의 전류법칙에 의해 각 상 전류의 합이 0인 조건을 만족할 때 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \\ v_d \\ v_e \\ v_f \\ v_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_c & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \\ i_f \\ i_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & L_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_d \\ i_e \\ i_f \\ i_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \\ e_d \\ e_e \\ e_f \\ e_g \end{bmatrix} \quad (1)$$

식(1)에서  $R_s$  는 자기저항,  $L_s$  는 자기인덕턴스,  $e_{a,b,c,d,e,f,g}$  는 각 상의 역기전력이고,  $i_{a,b,c,d,e,f,g}$  는 각 상의 전류이다.

각 상 전류에 대해 키르히호프의 전류법칙을 만족하고 손실을 무시할 경우 전동기의 전기적인 출력과 기계적인 출력은 같으므로 토크와 회전속도, 출력전력간의 관계는 다음의 식과같이 전개 된다.

$$P_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c + e_d i_d + e_e i_e + e_f i_f + e_g i_g \quad (2)$$

$$P_m = T_e \times \omega_m \quad (3)$$

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_m} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c + e_d i_d + e_e i_e + e_f i_f + e_g i_g}{\omega_m} \quad (4)$$

위 식(2), (3), (4)에서  $P_e$  는 전기적인 출력,  $P_m$  은 기계적인 출력,  $T_e$  는 전기적인 출력토크이고,  $\omega_m$  은 전동기 회전 각속도이다.

이때, 전동기 출력토크에 관한 운동방정식은 다음과 같다.

$$T_e = J_m \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + T_L \quad (5)$$

· 식(5)에서  $J_m$  은 회전관성 모멘트,  $B_m$  은 점성마찰계 수이고,  $T_L$  은 부하토크이다.

## 2.3. 7상 BLDC 전동기의 속도측정

본 논문에서는 전동기 속도를 측정하기 위하여 고가의 엔코더를 사용하지 않고 홀센서 신호를 이용하였다. 센서보드를 통해 입력된 7상의 홀센서 신호는 EPLD의 입력으로 사용된다.

입력된 7상의 홀센서 신호는 EPLD내에 구현된 에지 검출기를 통해 전기각 한 주기 동안 28개의 펄스열이 출력된다. EPLD로부터 출력된 28개의 펄스열은 TMS320VC33-150으로 입력되어 M/T카운터 방식을 사용하여 전체 속도를 계산하는데 사용된다.

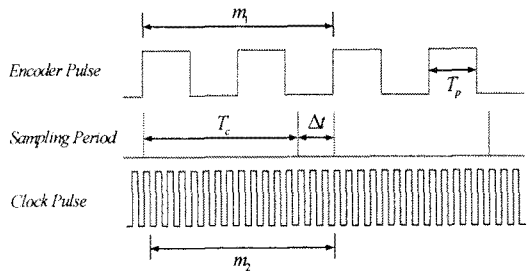


그림 3. M/T Method에 의한 속도 측정  
Fig. 3. Speed estimation using M/T method

M/T 카운터법은 그림 3에서와 같이 일정시간동안 엔코더로부터 입력되는 펄스의 수와 내부에서 일정시간 동안 일정하게 발생시킨 펄스의 수를 모두 계수하여 회전속도를 계산하는 방법이다.

측정시간은 일정한 시간 간격이 지난 후에 첫 번째의 엔코더 펄스와 동기되는 시간이고 전동기의 회전속도, 즉 엔코더 펄스의 주파수에 따라 변하는 시간이다. 전동기의 회전속도를 측정시간 동안의 각 변위로 표현 하면 식(6)과 같이 표현된다.

$$N = \frac{60X}{2\pi MT_d} = \frac{60X}{2\pi(MT_c + \Delta t)} [rpm] \quad (6)$$

엔코더의 1회전 당 출력 펄스 수를 PPR(Pulse/revolution)이라고 하면 각 변위는 다음 식(7)과 같이 표현된다.

$$X = \frac{2\pi m_1}{PPR} \quad (7)$$

또한, 주파수가  $Mf_c [Hz]$  인 클럭펄스가 측정시간  $MT_d$  와 동기된다고 가정하면 측정시간은 다음 식(8)과 같이 표현되고, 전동기의 회전속도는 식(9)과 같이 표현할 수 있다.

$$MT_d = MT_c + \Delta t = \frac{m_2}{Mf_c} \quad (8)$$

$$N = \frac{60 \times Mf_c \times m_1}{PPR \times m_2} \quad (9)$$

## 2.4. 퍼지제어기를 이용한 7상 BLDC 전동기의 속도제어

퍼지제어기의 기본구조는 퍼지 제어기는 퍼지화기(Fuzzifier), 지식기반(Knowledge Base), 퍼지추론 엔진(Fuzzy Inference Engine), 비퍼지화기(Defuzzifier)로 구성된다. 퍼지제어기의 일반적인 구성은 퍼지집합이론(IF-THEN 규칙)으로 표현하고 퍼지추론을 이용하여 계산하는 특수한 형태의 제어기이다. 그림 4는 7상 브러시리스 직류전동기의 속도제어를 위한 퍼지로직 제어기의 전체 블록도이다. 지령 속도와 실제 전동기 속도의 오차를 구하고, 이 속도 오차의 미분에 해당하는 속도 오차 변화량을 계산한다. 두 개의 변수를 퍼지로직 제어기의 입력 값으로 하고 7상 브러시리스 직류전동기 시스템에 맞는 제어규칙과 소속함수를 사용하여 퍼지 추론을 수행한다. 퍼지로직 제어기의 출력은 전동기의 토크를 발생하기 위한 기준전류를 만들며, 이는 비퍼지화 된 보통의 집합(Crisp Set)에 출력 이득을 곱하여 생성한다.[3]

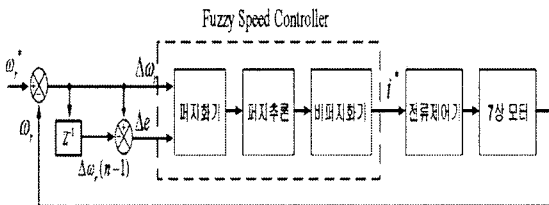


그림 4. 퍼지로직 속도 제어기의 블록도

Fig. 4. Block diagram of fuzzy logic speed controller

본 논문에서는 7상 브러시리스 직류전동기의 속도제어를 위한 퍼지로직 제어기를 구성하기 위해 입력과 출력변수를

각각 속도오차와 속도오차의 변화비로 설정하였다. 다음의 식(10)과 (11)는 입력변수에 대한 식이다.

$$\Delta\omega_r(n) = \omega_r^*(n) - \omega_r(n) \quad (10)$$

$$\Delta\epsilon = \Delta\omega_r(n) - \Delta\omega_r(n-1) \quad (11)$$

7상 브러시리스 직류전동기의 출력토크를 생성하기 위한 전류는 퍼지로직 제어기의 출력으로 다음 식(12)과 같이 표현된다.

$$i^*(n) = i^*(n-1) + (\eta \times \Delta i^*(n)) \quad (12)$$

위의 식(10), (11), (12)에서  $\Delta\omega_r(n)$  은 속도오차,  $\omega_r^*(n)$  은 기준속도,  $\omega_r(n)$  은 실제속도,  $\Delta\epsilon$  는 속도오차 값의 변화량비이다. 그리고  $i^*(n)$  은 기준전류,  $\eta$  는 퍼지 로직 제어기 출력 지령전류 계수이고,  $\Delta i^*(n)$  은 샘플링 시점에서 퍼지로직 제어기 출력 지령전류이다.

퍼지제어기에서 입력과 출력 변수들은 언어적 변수로 표현되며, 이 언어적 변수들은 퍼지부분집합으로 정의된다. 본 논문에서는 7개의 퍼지부분집합을 입력과 출력변수를 설정하기 위해서 표 1과 같이 선정하였다.

표 1. 퍼지부분집합

Table 1. Fuzzy subset

NB	Negative Big	PB	Positive Big
NM	Negative Medium	PM	Positive Medium
NS	Negative Small	PS	Positive Small
ZE	Zero		

다음의 그림 5는 7상 브러시리스 직류전동기의 속도제어를 위한 퍼지제어기의 소속함수를 나타낸 그림이다. 두 입력변수의 소속함수는 이등변 삼각형 형태의 소속함수를 채택하고, 출력변수 소속함수는 싱글턴형으로 채택을 하였다.

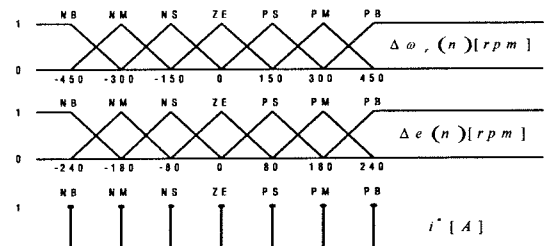


그림 5. 7상 BLDCM을 위한 소속함수

Fig. 5. Subset for 7-phase BLDC motor

퍼지제어기의 제어규칙은 합성에 의한 추론법을 사용할 때 다음과 같은 형식으로 정리된다.

IF  $\Delta\omega_i(n)$  is  $A_i$  and  $B_i$ , THEN  $i^*(n)$  is  $C_i$  (13)

여기서,  $A_i$ ,  $B_i$ 는 퍼지부분집합이고,  $C_i$ 는 퍼지 싱글톤이다.

비퍼지화기에는 무게중심법(Center of Gravity Method), 합중심법(Center of sums Method), 높이법(Height Method), 최대면적 중심법(Center of largest area Method) 그리고 최대 평균법(Middle of Maxima Method)과 같은 방법이 있다. 이 중 본 논문에서는 비퍼지화기에 무게중심법을 사용하였으며, 제어 규칙에 의한 비퍼지화 된 추론 출력 함수는 다음 식으로 주어진다.

$$i^*(n) = \frac{\sum_{i=1}^4 \omega_i C_i}{\sum_{i=1}^4 \omega_i} \quad (14)$$

여기서,  $\omega_i$ 는  $i$  번째 제어규칙 가중치이고,  $C_i$ 는 삼각형의 무게중심법으로 구한 추론결과이다.

7상 브러시리스 직류 전동기의 속도제어를 위해 사용한 퍼지제어는 속도 오차에 해당하는 양을 퍼지 제어를 거쳐 토크 지령치  $i^*$ 를 생성한다.

속도제어를 위한 퍼지 제어기 각각에서의 오차 변화 분에 대해 표 2에 따른 제어 규칙값을 선택한다.

표 2. 퍼지규칙 기반의 행렬  
Table 2. Fuzzy logic rule based matrix

$\Delta\omega_i$ / $\Delta e$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	-3	-3	-3	-3	-2	-1	0
NM	-3	-3	-3	-2	-1	0	1
NS	-3	-3	-2	-1	0	1	2
ZE	-3	-2	-1	0	1	2	3
PS	-2	-1	0	1	2	3	3
PM	-1	0	1	2	3	3	3
PB	0	1	2	3	3	3	3

### 3. 실험

#### 3.1. 실험세트

실험에 사용된 전제보드에는 제어용 DSP인 TMS320VC33-150과 기타 제어회로를 구성하기 위한 FLEX EPF6016TC144-3을 사용하여 구성하였다. TMS320VC33-150에는 퍼지 속도 제어기, 히스테리시스 전류제어기 그리고 MT 카운터가 프로그램 되어있다. FLEX EPF6016TC144-3에는 7상의 홀센서 신호를 28개의 펄스열로 만들기 위한 예지검출 회로와 여자상 스위치를 결정하는 부울함수 로직 등이 설계되어 있다.

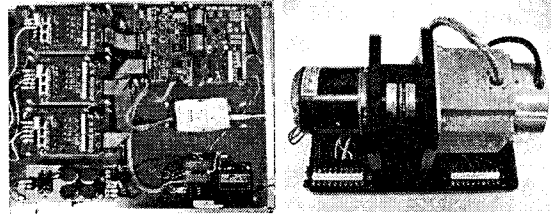


그림 6. 실험용 제어보드, 인버터와 7상 BLDC 전동기  
(좌 : 실험세트, 우 : 7상 BLDC 전동기)  
Fig. 6. Experimental board and 7-phase BLDCM  
(Left : Inverter and controller board, Right : 7-phase BLDCM)

#### 3.2. 실험결과 파형

그림 7은 A상의 홀센서 신호와 검출된 홀센서의 예지 신호파형을 보여준다.

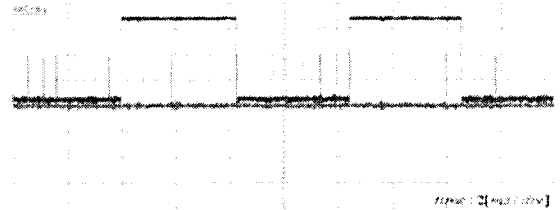


그림 7. A상의 홀센서 신호와 속도계 측용 14-펄스 회전자 4극 : 기계적으로 전동기 1회전 당 28-펄스)  
Fig. 7. Hall sensor signal of A-phase and 14-pulses for speed measuring  
(The number of pole : 4-pole, 28-pulse per revolution)

그림 8은 무부하 조건에서 기준속도를 0[rpm]~6000[rpm]으로 인가하였을 때 PI 제어기의 속도응답 특성과 퍼지 제어기의 속도응답 특성이다. 결과에서 알 수 있듯이 6000[rpm]에서는 PI 제어기와 퍼지 제어기의 속도 응답 특성이 비슷함을 볼 수 있다.

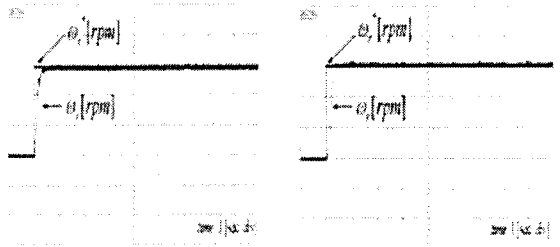


그림 8. 무부하 조건에서의 속도응답 실험파형  
Fig. 8. Speed response experimental waveforms under the no load.  
(Y-axis : 2,000(rpm)/Div., X-axis : 1(s)/Div.)  
(Left : Used PI controller, Right : Used fuzzy logic controller)

그림 9는 기준속도값을 0[rpm]~6000[rpm]으로 주었을 때 일정구간동안 정격부하의 80%를 인가 또는 제거하였을

때의 파형이다. 결과에서 알 수 있듯이 PI 제어기는 부하가 인가 또는 제거 시 퍼지 제어기 보다 더 큰 오버슈트와 언더슈트가 발생한다.

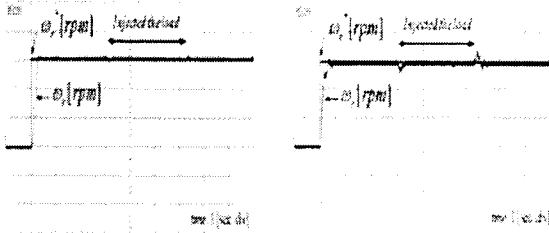


그림 9. 정상 상태에서 부하인가시의 속도응답 실험파형  
(부하인가 : 정격부하 80% 기준속도: 0(rpm) → 6000(rpm)  
(좌 : PI 제어기, 우 : 퍼지 제어기)  
Fig. 9. Speed response experimental waveforms under the 80% load.  
(Y-axis : 2,000(rpm)/Div., X-axis : 1[s]/Div.)  
(Left : Used PI controller, Right : Used fuzzy logic controller)

#### 4. 결론

본 논문에서는 높은 효율과 출력 특성을 가지는 7상 브러시리스 직류전동기를 속도제어기를 위하여 퍼지 제어기를 이용하여 PI 제어기와 속도응답을 비교하였다.

제어 알고리즘에서의 고속 연산처리를 위하여 가격이 저렴하고 성능이 우수한 TMS320VC33-150 DSP를 CPU로 사용하였다.

홀센서 신호를 처리하고 PWM신호 생성 및 주변 장치와의 인터페이스를 위한 로직을 설계하기 위해서 ALTERA사의 FPGA EPF6016TC144-3을 사용하여 시스템의 소형화가 가능하도록 하였다.

7상 브러시리스 전동기용 인버터는 고속 스위칭 및 소형화를 위하여 신뢰성이 높고 콤팩트한 IGBT 모듈인 IPM을 사용하였다.

#### 참 고 문 헌

[1] 이석, 전윤석, 김홍민, 목형수, 김덕근, "MSTC를 이용한 7상 BLDC 모터 구동시스템", 전력전자 학술대회 논문집, pp.429-433, 7 2000.  
[2] 이석, 전윤석, 목형수, 김덕근, "7상 BLDC 전동기 구동시스템을 위한 새로운 전류제어기에 관한 연구", 전력전자 학술대회 논문지, 제6권 제 2호, pp.191-201, 4 2001.  
[3] Jae-Sung Yu, Byoung-Kuk Lee, Chung-Yuen Won, Dong-Wook Yoo, "Full Fuzzy-Logic-Based Vector Control for Permanent Magnet Synchronous Motors", KES 2006, Part III, LNAI 4253, pp. 875-882, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2006.  
[4] Seok-Min Joo, Dong-Ryol Hur, Sang-Hyo Kim, Dong-Il Chung, Hyeng-Hwan Chung, "A Study on Damping

Improvement of a Synchronous Generator with Static AVR Compensator using a Fuzzy-PI Controller", Journal of KIEE, Vol.15, No.3, pp.57-66, May 2001.  
[5] Tae-Yeong Kim, Byoung-Kuk Lee, Chung-Yuen Won, "Modeling and Simulation of Multiphase BLDC Motor Drive System for an Autonomous Underwater Vehicle", IEEE - IEMDC Conference, Vol. 1, pp. 1366-1371, 2007. 5.  
[6] M. Godoy Simoes, P. Vieira Jr. "A Five-Phase Brushless DC-Machine Direct Drive System", IEEE - EPE Journal, Vol. 14, pp.15-24, August 2004.  
[7] Tae-Hyung Kim, Hyung-Woo Lee, Mehrdad Ehsani, "Advanced Sensorless Drive Technique for Multiphase BLDC Motors", IEEE-Industrial Electronics Society, pp.926-931, November 2-6, 2004.  
[8] Marcelo Godoy Simoes, Petronio Vieira, "A High-Torque Low-Speed Multiphase Brushless Machine-A Perspective Application for Electric Vehicles", IEEE Trans. On Industrial Electronics, Vol.49, No.5, pp.1154-1164, October 2002.  
[9] Nilson N. Franceschetti, M. Godoy Simoes, "A New Approach for Analysis, Modeling And Simulation of Brushless Multiphase Machines", IECON 2001, Vol.2, pp.1423-1427, November 29- December 2 2001.