

## 고장진단을 위한 영구자석 동기전동기의 권선 단락에 의한 고장모델 연구 및 특성해석

(A Study on Stator Winding Turn-Fault Model for Fault Diagnosis in Inverter-Driven Permanent Magnet Motor Drives)

김경화\* · 최동욱 · 구본관 · 정인성

(Kyeong-Hwa Kim · Dong-Uk Choi · Bon-Gwan Gu · In-Soung Jung)

### 요 약

고정자 권선의 단락으로 인한 고장을 해석하고 진단 알고리즘의 효과적인 시험 평가를 위해 사용될 수 있는 인버터 구동 영구자석 동기전동기의 고장모델이 제시된다. 기존에 전동기의 해석과 제어에 많이 사용되는 dq 모델은 상전압 모델을 변환한 것으로 전동기 고정자의 권선 단락 시에는 더 이상 3상평형 조건이 성립하지 않기 때문에 인버터 극전압으로부터 전동기 입력 전압을 구하기가 쉽지 않아 고장모델의 해석을 위해서 사용하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 전동기 3상 변수와 선전압 관계식을 이용한 전동기의 고장모델이 제안된다. 제안된 고장모델의 타당성을 입증하기 위해 시뮬레이션이 수행되며 내부 고정자의 권선 단락이 가능하도록 제작된 전동기와 DSP TMS320F28335를 이용한 제어 시스템에 의해 동일 고장 조건에서 비교 실험이 수행된다.

### Abstract

To analyze influences under faults caused by a stator winding short and to evaluate an effectiveness of a diagnostic algorithm, a faulty model for an inverter-driven permanent magnet synchronous motor is presented. Even though the conventional dq motor model obtained through the transformation of phase voltage model is widely used to analyze and control the motor, it can not be used in the analysis of a faulty motor since the 3-phase balanced condition is no longer hold under the fault caused by a stator winding short, and thus, it is very difficult to obtain motor input voltages from the pole voltage of an inverter. To overcome this problem, a faulty model for an inverter-driven permanent magnet synchronous motor is proposed by considering the line voltage of 3-phase variables. The effectiveness of the proposed faulty model is verified through comparative simulations and experiments using DSP TMS320F28335 and motor built to allow a partial short of inter-turn.

Key Words : Turn-fault Model, Diagnosis, Simulation, DSP TMS320F28335, PM Motors

\* 주저자 : 서울산업대학교 전기공학과 부교수

Tel : 02-970-6406, Fax : 02-978-2754

E-mail : k2h1@snut.ac.kr

접수일자 : 2009년 1월 29일

1차심사 : 2009년 2월 11일

심사완료 : 2009년 3월 4일

## 1. 서 론

점점 더 다양해지는 산업사회의 고급 시스템에서 공정의 신뢰성, 안정성, 유효성 등은 매우 중요한 관심사가 되고 있으며, 이로 인해 영구자석 동기전동기는 더욱 더 주목을 받고 있다. 다양한 공정에서 사용되고 있는 영구자석 동기전동기에 고장이 발생할 경우 사용 효율이 저하되거나 공정이 중단되는 상황에 직면하며 심지어 사고에 의한 큰 손실이 발생할 수도 있다. 이와 같은 사용자의 자산 손실을 최소화하기 위해 효과적인 시스템 모니터링과 정확한 고장 진단이 중요한 과제가 되고 있다[1-8].

영구자석 동기전동기에서 발생하는 고장의 유형을 조사해 보면 크게 고정자 및 회전자 관련 고장, 인버터 및 전력 회로 부분 고장, 축 센서 및 전류 센서 같은 센서류 부분 고장, 그리고 기타 기계적 고장으로 분류할 수 있으며 [1] 각각 유형 별로 어느 정도 연구가 진행되고는 있지만 아직 고장의 정도에 대한 판단 기준 등이 명확히 확립되지 않았으며 대응 운전도 부족한 실정이다. 이러한 고장 중에 고정자 권선의 전압 및 전류 스트레스 혹은 열에 의한 절연파괴로 발생하는 권선의 단락(turn short)과 같은 고장은 열에 의해 권선의 절연 파괴가 더 많은 권선으로 쉽게 전파되어 더 큰 손실을 초래하는 특징을 가지며 단락 권선에 과도한 열을 발생할 수 있는 순환전류를 일으킨다[7]. 또한, 권선에 일부 단락이 발생했을 경우 전동기의 동작이 가능하나 초기 고장 단계에서 진단되지 않으면 빠르게 절연 파괴가 심화되는 특징을 갖는다. 고정자 권선의 부분적 단락으로 인한 고장을 진단하기 위해 많이 연구들이 수행되었다[1-8]. 이러한 기법들은 주로 서치코일을 이용한 검사, 웨이브렛 변환을 이용한 기법[1], DFT 등의 수치해석적 방법[7], 지능제어 기법에 기반한 실험적 방법들을[2, 4] 사용하고 있다.

본 논문에서는 이러한 고정자 권선의 단락으로 인해 발생하는 고장을 해석하고 진단 알고리즘의 시험 평가를 위해 효과적으로 사용될 수 있는 영구자석 동기전동기의 고장모델이 제시된다. 기존의 전동기의 해석과 제어에 많이 사용되는 dq 모델은 상전압 모델을 변환한 것으로[9] 전동기의 어느 고정자 상

의 권선 단락 시에는 3상평형 조건이 성립하지 않아 인버터 극전압으로부터 전동기 입력전압을 구하기가 쉽지 않아 고장모델의 해석을 위해 사용하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 전동기의 3상 변수와 선전압 관계식을 이용한 전동기의 고장모델이 제안된다. 제안된 고장모델의 타당성을 입증하기 위해 고장모델을 사용한 시뮬레이션이 수행되어 실제 동일 고장 조건에서의 실험 결과와 비교된다. 시뮬레이션과 실험적 비교 평가를 위해 내부 고정자의 권선 단락이 가능한 전동기가 특별히 제작되었으며 전체 구동 시스템이 DSP TMS320F28335에 의해 구현되었다[10]. 제안된 전동기의 고장모델은 권선 단락에 의한 고장 발생 시 구동 시스템의 해석과 고장진단 알고리즘의 효과적인 시험 평가 및 알고리즘 연구용으로 유익하게 사용될 수 있으리라 기대된다.

## 2. 고정자 권선 단락시의 고장모델

영구자석 동기전동기의 동적 모델은 집중 정수 파라미터를 이용하여 구해질 수 있으며 고장이 없는 3상평형 전동기의 모델은 다음과 같이 상변수를 이용하여 구해진다[9].

$$\begin{pmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서  $v_{as}$ ,  $v_{bs}$ , 및  $v_{cs}$ 는 각각 상전압,  $i_{as}$ ,  $i_{bs}$ , 및  $i_{cs}$ 는 각각 상전류,  $e_{as}$ ,  $e_{bs}$ , 및  $e_{cs}$ 는 3상 역기전력으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_{as} &= \omega_r \lambda_m \cos \theta_r \\ e_{bs} &= \omega_r \lambda_m \cos(\theta_r - 2\pi/3) \\ e_{cs} &= \omega_r \lambda_m \cos(\theta_r + 2\pi/3) \end{aligned}$$

또한,  $L$ 은 자기 인덕턴스,  $M$ 은 상호 인덕턴스,  $R_s$ 는 저항,  $\omega_r$ 은 전기 각속도,  $\lambda_m$ 은 쇠교 자속, 및  $\theta_r$ 은 전기각을 나타낸다. 전동기의 발생 토크는 다음과 같이 나타난다.

$$T_e = \frac{e_{as}i_{as} + e_{bs}i_{bs} + e_{cs}i_{cs}}{\omega_m} \quad (2)$$

여기서  $\omega_m = \omega_r/P$ 이며 P는 극의 쌍 수를 나타낸다. 일반적으로 전동기에서 권선 저항과 역기전력 상수는 권선의 턴수에 비례하고 인덕턴스는 턴수의 제곱에 비례함을 고려하여 고정자 권선의 일부 단락으로 인한 고장의 정도를 정의하고 고장모델에 사용하기 위해 다음이 정의된다.

FTR(Faulty Turn Ratio):  $\sigma = N_f/N_T$  ( $0 \leq \sigma \leq 1$ )

HTR(Healthy Turn Ratio):  $a = 1 - \sigma$  ( $0 \leq a \leq 1$ )

여기서  $N_T$ 는 전체 턴수를 나타내고  $N_f$ 는 고장 턴수를 나타낸다. 전동기의 고정자 저항과 쇄교 자속이 각각  $R_s$ 와  $\lambda_m$ 일 때 이 파라미터를 이용하면 권선에 고장이 없는 상의 저항은 그대로  $R_s$ 이나 단락으로 인한 고장이 일어난 상의 저항은  $aR_s$ 로 된다. 유사하게 고장이 없는 상의 쇄교 자속은 그대로  $\lambda_m$ 으로 변하지 않으나 고장이 일어난 상의 쇄교 자속은  $a\lambda_m$ 로 변화한다. 또 단락 권선에 의한 순환 단락 전류를  $i_{fs}$ 로 표시하면 단락 경로 상의 저항  $R_f = \sigma R_s$ 가 되고 단락 경로 상에 존재하는 역기전력  $e_{fs} = \omega_r \lambda_{mf} \cos(\text{고장난상의위상})$ 이 되며  $\lambda_{mf} = \sigma \lambda_m$ 이 된다. 만약 전동기의 권선 고장이 b상에서 일어난다면 다음과 같은 파라미터가 구해진다.

$$R_a = R_c = R_s$$

$$R_b = aR_s$$

$$R_f = \sigma R_s$$

$$e_{as} = \omega_r \lambda_{ma} \cos \theta_r$$

$$e_{bs} = \omega_r \lambda_{mb} \cos \left( \theta_r - \frac{2}{3} \pi \right)$$

$$e_{cs} = \omega_r \lambda_{mc} \cos \left( \theta_r + \frac{2}{3} \pi \right)$$

$$e_{fs} = \omega_r \lambda_{mf} \cos \left( \theta_r - \frac{2}{3} \pi \right)$$

$$\lambda_{ma} = \lambda_{mc} = \lambda_m$$

$$\lambda_{mb} = a\lambda_m$$

$$\lambda_{mf} = \sigma \lambda_m$$

고장이 일어나는 b상의 단락 권선에는 단락된 경로를 통해 전류가 흐르며 인덕턴스 성분에 의한 자체의 동특성을 가진다. b상에 고장이 발생하는 경우 식 (1)의 인덕턴스 행렬은 4개의 권선 전류 사이의 관계를 고려하여 구해질 수 있다[6]. 이상의 관계를 일반화하여 고정자 권선의 일부 단락으로 인한 고장 발생 시의 전동기의 고장 상전압 모델이 다음과 같이 구해진다.

$$v_s = R_s i_s + L_F i_s + e_s \quad (3)$$

$$\text{여기서 } v_s = (v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs} \ v_{fs})^T$$

$$i_s = (i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs} \ i_{fs})^T$$

$$e_s = (e_{as} \ e_{bs} \ e_{cs} \ e_{fs})^T$$

$$R_s = \begin{pmatrix} R_a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f \end{pmatrix}$$

$$L_F = \begin{pmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} \end{pmatrix}$$

이 때  $L_F$ 는 고장 난 권선이 어느 상이냐에 따라 다음과 같이 나타난다.

$$L_F = L_{AF} = \begin{pmatrix} a^2 L & aM & aM & a\sigma L \\ aM & L & M & \sigma M \\ aM & M & L & \sigma M \\ a\sigma M & \sigma M & \sigma M & \sigma^2 L \end{pmatrix} \text{ for a-phase fault}$$

$$L_F = L_{BF} = \begin{pmatrix} L & aM & M & \sigma M \\ aM & a^2 L & aM & \sigma L \\ M & aM & L & \sigma M \\ \sigma M & a\sigma M & \sigma M & \sigma^2 L \end{pmatrix} \text{ for b-phase fault}$$

$$L_F = L_{CF} = \begin{pmatrix} L & M & aM & \sigma M \\ M & L & aM & \sigma M \\ aM & aM & a^2 L & a\sigma L \\ \sigma M & \sigma M & a\sigma M & \sigma^2 L \end{pmatrix} \text{ for b-phase fault}$$

이 때 고정자 저항과 쇄교 자속 값들은 고장이 없는 상은 변화가 없으나 고장이 있는 상은  $aR_s$ 와  $a\lambda_m$ 으로 변화하고 고장 발생 시  $R_f = \sigma R_s$ 와  $\lambda_{mf} = \sigma \lambda_m$ 이며 역기전력  $e_{fs}$ 는 고장 상과 동일 위상을 갖는다.

식 (3)에 주어진 전동기의 고장모델은 상전압 모델이다. 전동기가 정상인(Healthy) 상태에서는 3상

평형 조건이 성립하여 이 조건과 인버터의 스위칭 상태에 따른 극전압을 이용하여 쉽게 전동기의 상전압 입력이 구해질 수 있다. 하지만, 권선 고장 상황에서는 3상평형 조건이 더는 성립하지 않기 때문에 전동기의 상전압 입력을 구하기가 쉽지 않아 인버터의 극전압 정보로부터 쉽게 구해줄 수 있는 선전압(Line-to-Line Voltage) 모델을 사용할 필요가 있다. 전동기의 선전압과 인버터 극전압의 관계식은 다음과 같이 구해진다.

$$v_{ab} = v_{ao} - v_{bo} \quad (4)$$

$$v_{bc} = v_{bo} - v_{co} \quad (5)$$

$$v_{ca} = v_{co} - v_{ao} \quad (6)$$

3상 Y 결선 부하에서  $i_{as} + i_{bs} + i_{cs} = 0$ 이 항상 성립함을 이용하여 3상 전류 중 두 상에 대한 선전압 관계식을 구하면 다음과 같은 상태 방정식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} & (L_{11} - L_{13} - L_{21} + L_{23})\dot{i}_{as} \\ & + (L_{12} - L_{13} - L_{22} + L_{23})\dot{i}_{bs} + (L_{14} - L_{24})\dot{i}_{fs} \\ & = v_{ab} - e_{as} + e_{bs} - R_a i_{as} + R_b i_{bs} = u_1 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & (L_{21} - L_{23} - L_{31} + L_{33})\dot{i}_{as} \\ & + (L_{22} - L_{23} - L_{32} + L_{33})\dot{i}_{bs} + (L_{24} - L_{34})\dot{i}_{fs} \\ & = v_{bc} - e_{bs} + e_{cs} - R_b i_{bs} - R_c (i_{as} + i_{bs}) = u_2 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & (L_{41} - L_{43})\dot{i}_{as} + (L_{42} - L_{43})\dot{i}_{bs} + L_{44}\dot{i}_{fs} \\ & = v_{fs} - e_{fs} - R_f i_{fs} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (7)~(9)의 상태 방정식을 이용하여 전동기의 권선 단락에 의한 고장 발생 시의 모델이 구해지며 이를 이용하여 고장 특성이 해석될 수 있다.

### 3. 전체 시스템 구성

그림 1은 비교 실험에 사용된 전동기로 권선 단락에 의한 인위적인 고장을 발생시키기 위해 고정자 권선의 특정 시점에 탭이 구성되어 있다. 권선 단락을 위한 탭은 권선의 1/16지점, 1/8지점, 1/4지점 및 1/2지점에 위치하며 이를 이용하여 고정자 권선의

고장이 발생된다.

그림 2는 실험 시스템의 구성을 나타낸다. 전체 알고리즘은 고성능의 32[bit] 부동소수점 DSP인 TI사의 TMS320F28335에 의해 구현된다. TMS320F28335는 연산 속도가 빠르고 내장 메모리를 보유하고 있으며 AD 컨버터와 PWM 포트 등이 내장되어 있다[10]. 샘플링 시간은 100[μsec]로 설정되며 PWM으로는 공간 벡터 PWM 기법이 사용된다[11]. 전동기는 10[kHz] 스위칭 주파수의 3상 PWM 인버터로 구동되며 회전자 속도와 위치는 IRT310-3000-325 엔코더를 통해 감지되어 DSP의 내장 eQEP 모듈에 의해 입력되고 각 상전류는 홀 센서를 통해 측정되어 40/2<sup>11</sup>[A] 분해능으로 내장된 12-[bit] A/D 컨버터에 의해 DSP에 입력된다.

그림 3은 DSP 제어기, 시험 전동기, 인버터 드라이버, 및 에뮬레이터로 구성된 전체 실험 시스템의 구성을 나타낸다. 시험 전동기의 정격 및 파라미터는 표 1에 나타난다.

표 1. 시험 전동기의 정격 및 파라미터  
Table 1. Ratings and parameters of a test motor

정격 용량	400[W]	정격 속도	3,500[rpm]
정격 토크	1.1[Nm]	극 수	6
쇄교 자속	0.02[Wb]	고정자 저항	0.05[Ω]
인덕턴스	0.2[mH]		

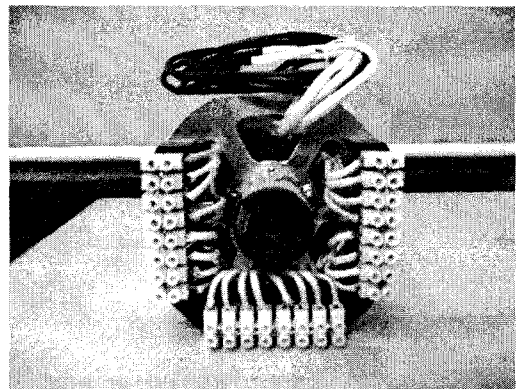


그림 1. 비교 실험에 사용된 전동기 구조  
Fig. 1. Test motor for comparative experiments

고장진단을 위한 영구자석 동기전동기의 권선 단락에 의한 고장모형 연구 및 특성분석

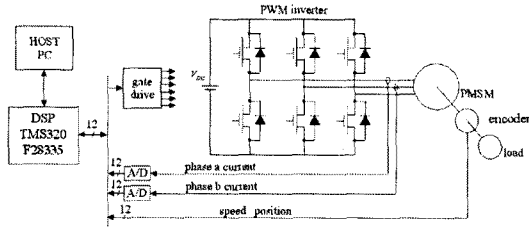


그림 2. 실험 시스템 구성  
Fig. 2. Configuration of the experimental system

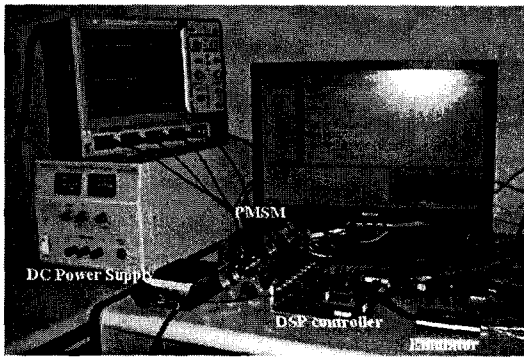
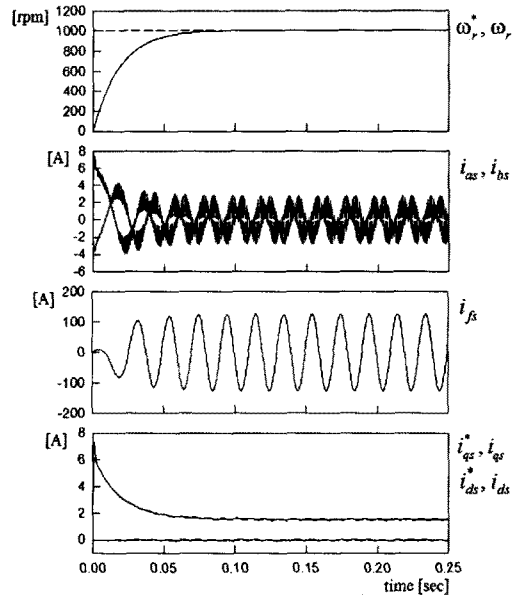


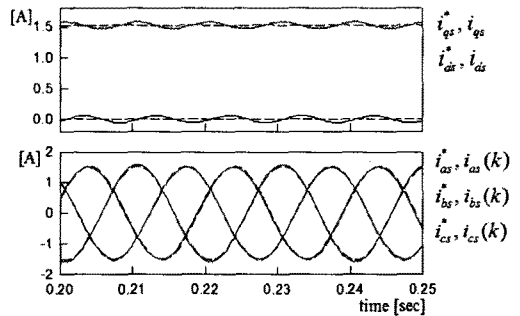
그림 3. 실험 시스템 사진  
Fig. 3. Experimental system

#### 4. 시뮬레이션 및 실험결과

이 절에서는 제안된 고장모델의 타당성과 유용성을 입증하기 위해 전동기 권선 단락에 의한 고장 등 여러 동작 조건에서 비교 시뮬레이션과 실험 결과가 제시된다. 전동기의 권선 단락에 의한 고장모델로 식 (7)~(9)의 상태 방정식과 고장 권선에 따른 인덕턴스 값이 사용된다. 그림 4는 b상 고정자 권선의 단락으로 인한 고장 발생 시의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 속도 명령은 1,000[rpm]이며 전동기 권선의 고장 정도를 나타내는 FTR은 2.1[%]로 주어진다. 속도 제어기로는 PI 제어기가 사용되었으며 속도 제어기 이득은  $k_p=0.02$ ,  $k_i=0.28$ 이 사용되었다. 내부 루프의 전류 제어기로는 동기좌표계 PI 비결합 전류 제어기[12] 사용되었으며 전류 제어기의 대역폭은 2,000[rad/sec]로 설정되었다[13]. 각 그림에서 점선은 각 신호의 명령치를, 실선은 실제 변수 값을 표시한다. 특정 상의 권선 단락에 의한 고장 발생 시 저



(a) 과도 응답

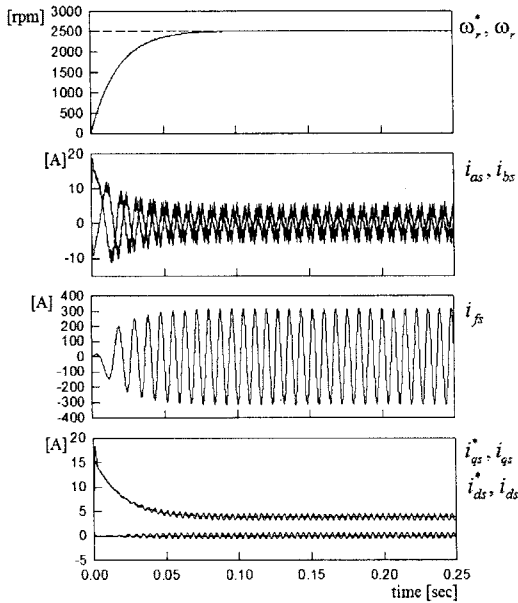


(b) 정상상태 응답

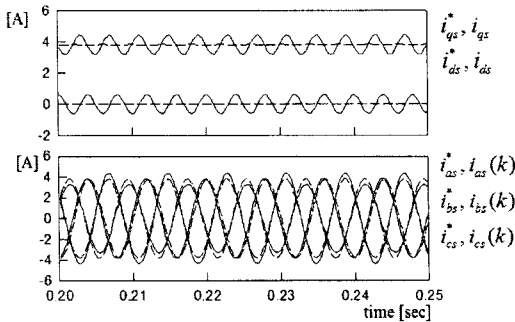
그림 4. 권선 고장 시 1,000(rpm)에서 시뮬레이션 결과 (FTR=2.1%)  
Fig. 4. Simulation results at 1,000(rpm) under stator fault due to turn short in b-phase

항, 인덕턴스 및 역기전력의 변화가 일어나며 고장 권선에는 큰 순환 단락전류  $i_s$ 가 발생되고 3상 전류는 더는 평형 상태를 유지하지 못하며 고장이 없는 상전류도 제어되지 못하는 특징이 나타난다. 3상전류 뿐 아니라 dq축 전류 제어도 효과적으로 이루어지지 못하고 상전류에는 3차 고조파 성분이 dq축 전류에는 2차 고조파 성분이 나타난다.

그림 5는 b상 고정자 권선의 고장 발생 시 시뮬레이션 결과로 속도 명령만이 2,500[rpm]으로 증가되



(a) 과도 응답



(b) 정상상태 응답

그림 5. 권선 고장 시 2,500(rpm)에서 시뮬레이션 결과 (FTR=2.1(%))  
 Fig. 5. Simulation results at 2,500(rpm) under stator fault due to turn short in b-phase

있으며 FTR, 속도 제어기 이득, 전류 제어 대역폭 등 다른 조건은 그림 4와 동일하게 설정되었다. 속도가 증가함에 따라 단락 권선에 더 큰 단락전류가 발생하고 3상전류와 dq축 전류의 제어 성능도 1,000[rpm]일 때보다 저하되며 3상전류의 불평형 상태도 더 심화된다. 또한, 상전류의 3차 고조파 성분과 dq축 전류의 2차 고조파 성분이 더 증가하게 된다.

그림 6은 그림 5와 동일 조건에서 전류제어 대역폭이 1,500[rad/sec]로 줄어든 경우의 시뮬레이션 결

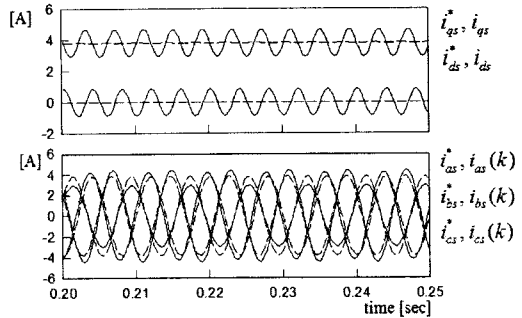
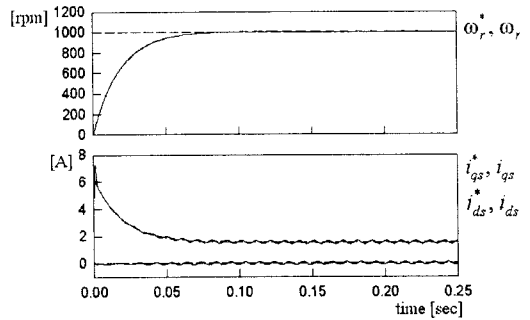
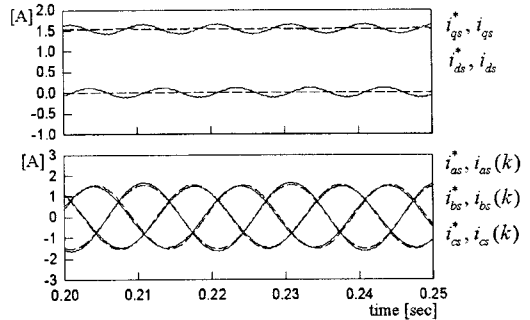


그림 6. 전류제어 대역폭이 1,500[rad/sec]일 때 2,500 [rpm]에서 시뮬레이션 결과(FTR=2.1(%))  
 Fig. 6. Simulation results at 2,500(rpm) with current control bandwidth of 1,500(rad/sec)



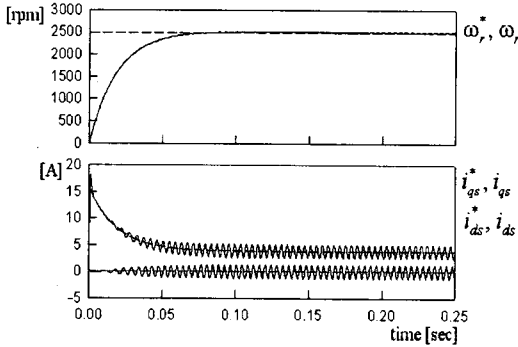
(a) 과도 응답



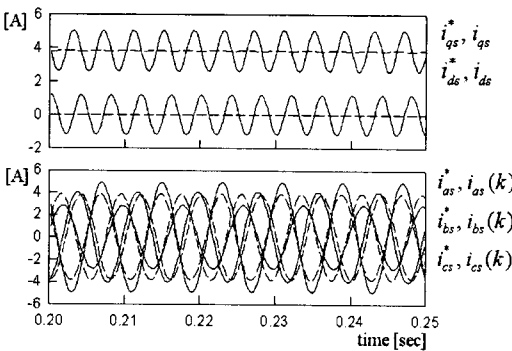
(b) 정상상태 응답

그림 7. 권선 고장 시 1,000(rpm)에서 시뮬레이션 결과 (FTR=4.2(%))  
 Fig. 7. Simulation results at 1,000(rpm) under stator fault due to turn short in b-phase

과이다. 일반적으로 전류 제어기의 성능은 대역폭에 의존하는데 고장자 고장 시에도 전류 제어 성능은 대역폭에 심각하게 의존할 뿐 아니라 각 상전류 간



(a) 과도 응답



(b) 정상상태 응답

그림 8. 권선 고장 시 2,500[rpm]에서 시뮬레이션 결과 (FTR=4.2[%])

Fig. 8. Simulation results at 2,500(rpm) under stator fault due to turn short in b-phase

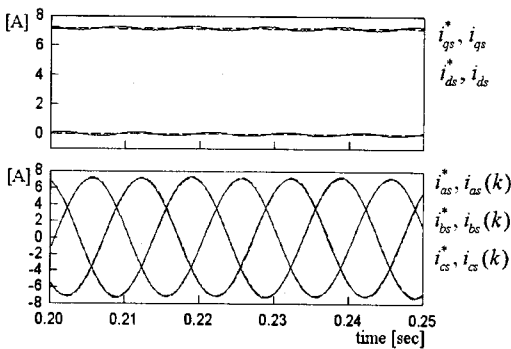
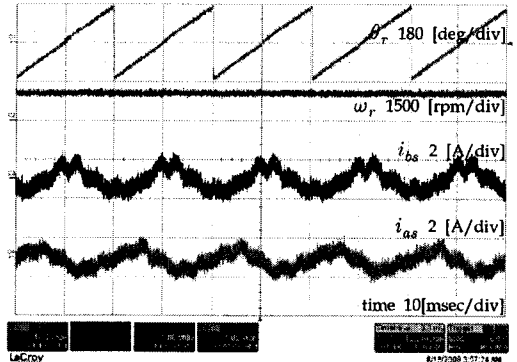
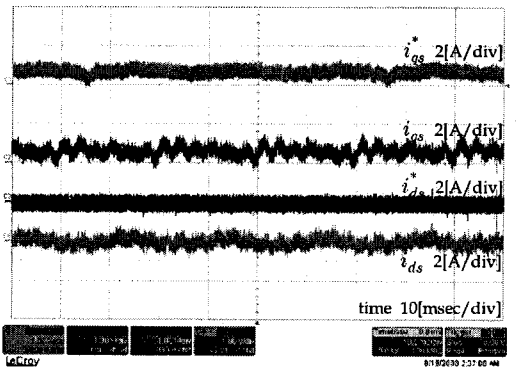


그림 9. 권선 고장 시 1,000(rpm), 0.5(N·m)에서의 시뮬레이션 결과(FTR=4.2[%])

Fig. 9. Simulation results at 1,000(rpm) and 0.5(N·m) under stator fault due to 4.2[%] of turn short in b-phase



(a)  $\theta_r$ ,  $\omega_r$ ,  $i_{bs}$  및  $i_{as}$



(b)  $i_{qs}^*$ ,  $i_{qs}$ ,  $i_{ds}^*$  및  $i_{ds}$

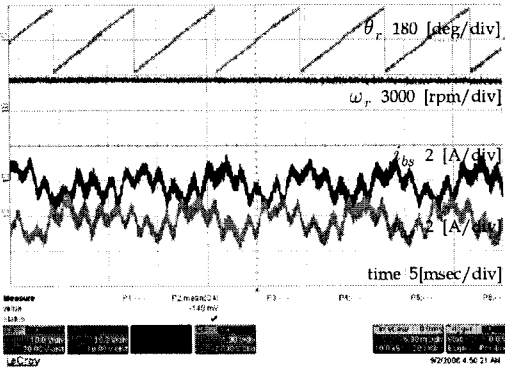
그림 10. 1,000(rpm) 정상조건에서 실험 결과

Fig. 10. Experimental results at 1,000(rpm) without stator fault due to turn short

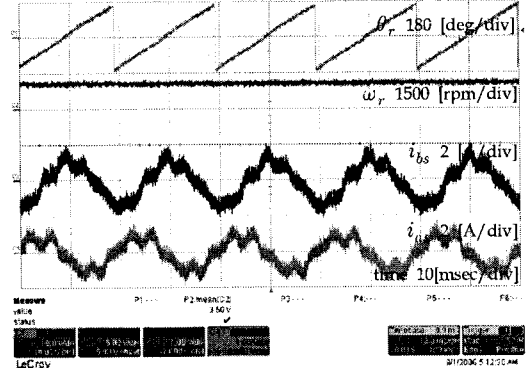
의 불균형 정도도 대역폭 저하 시 더 심화되고 고조파의 크기도 더 증가함을 확인할 수 있다.

그림 7은 b상 권선의 고장 시 시뮬레이션 결과로 그림 4와 동일 조건에서 전동기 권선의 고장 정도인 FTR만 4.2[%]로 변경된 경우이다. 그림 4에 비해 3상전류와 dq축 전류 제어 성능 저하와 각 상전류 간의 불평형 정도가 더 심해지며 고조파 크기에 비례하는 dq축 전류의 리플 성분도 더 증가함을 확인할 수 있어 권선 고장 시의 제어 특성은 권선의 고장 정도와 밀접하게 관련되어 있음을 알 수 있다.

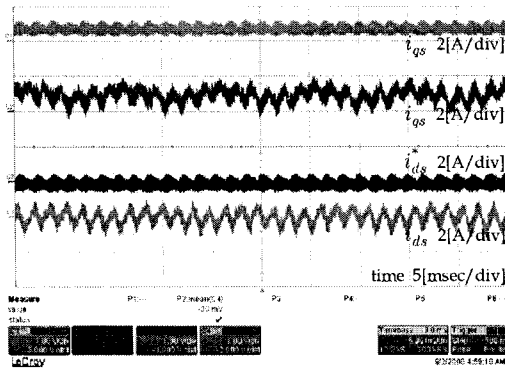
그림 8은 b상 권선의 고장 발생 시 시뮬레이션 결과로 그림 4와 동일 조건에서 속도 명령만 2,500[rpm]으로 주어진 경우이다. 그림 4, 그림 5,



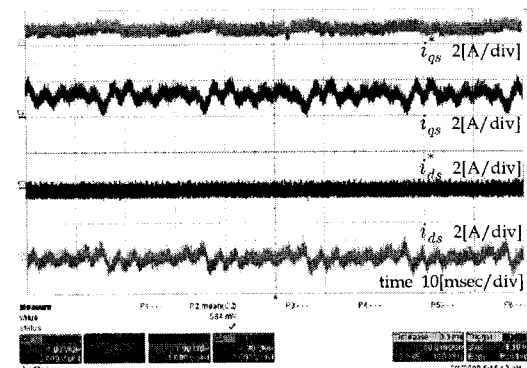
(a)  $\theta_r$ ,  $\omega_r$ ,  $i_{bs}$  및  $i_{as}$



(a)  $\theta_r$ ,  $\omega_r$ ,  $i_{bs}$  및  $i_{as}$



(b)  $i_{qs}^*$ ,  $i_{qs}$ ,  $i_{ds}^*$  및  $i_{ds}$



(b)  $i_{qs}^*$ ,  $i_{qs}$ ,  $i_{ds}^*$  및  $i_{ds}$

그림 11. 2,500(rpm) 정상조건에서 실험 결과  
Fig. 11. Experimental results at 2,500(rpm) without stator fault due to turn short

그림 12. 권선 고장 시 1,000(rpm)에서 실험 결과 (FTR=2.1[%])  
Fig. 12. Experimental results at 1,000(rpm) under stator fault due to turn short of 2.1[%]

및 그림 7의 조건에 비해 동작 속도와 FTR이 모두 가장 커 전류 제어의 성능 저하와 불평형 정도가 가장 심하고 dq축 전류의 리플도 가장 크게 나타난다.

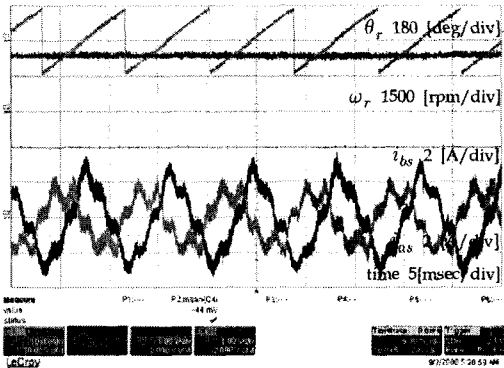
그림 9는 그림 7과 동일 조건에서 0.5[N·m]의 부하가 인가된 경우의 b상 권선 고장 시 시뮬레이션 결과이다. 부하인가로 인해 전체적인 전류의 크기는 증가하나 3상전류 및 dq축 전류 오차와 리플 및 각상전류 간의 불평형 정도는 그림 4와 유사하며 권선 단락으로 인한 고장 시의 전동기 제어 특성은 부하 크기와는 직접적인 연관이 없으며 고장 권선의 양, 동작 속도 및 전류 제어 대역폭에 의존함을 확인할 수 있다.

그림 10과 그림 11은 전동기의 권선 고장이 없는

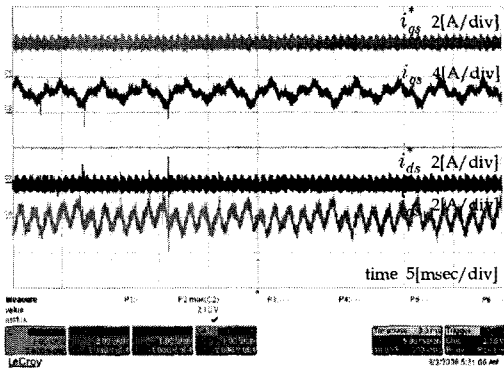
정상조건에서 각각 1,000[rpm]과 2,500[rpm]의 속도 명령이 가해진 경우의 실험 결과이다. 전류 제어로는 동기좌표계 PI 비결합 전류 제어방식이 사용되며 데이터는 DA 컨버터를 통해 출력되어 비교된다. 고장이 없는 정상인 조건에서 dq축 전류 및 3상 전류의 제어 성능과 3상전류의 평형 상태를 확인할 수 있으며 무부하 조건 특성과 역기전력 고조파로 인해 전류 파형에 약간의 고조파 특성을 확인할 수 있다.

그림 12와 그림 13은 b상 고정자 고장 발생 시 각각 1,000[rpm]과 2,500[rpm]의 속도 명령이 가해진 경우의 실험 결과이다. 전동기의 인위적 고장을 발생시키기 위해 그림 1의 탭을 사용하였으며 세 코일 중 한 코일의 1/16을 단락함으로써 시뮬레이션에서

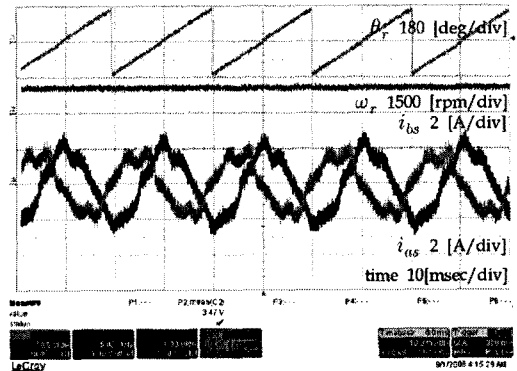




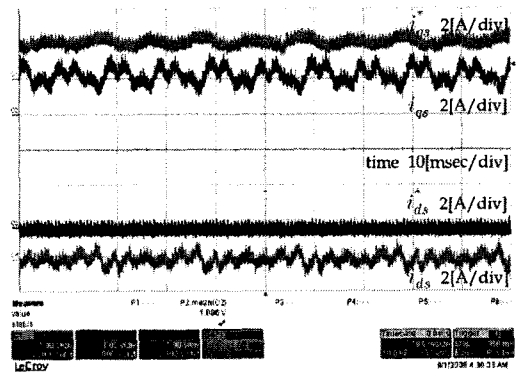
(a)  $\theta_r$ ,  $\omega_r$ ,  $i_{Bs}$  및  $i_{As}$



(b)  $i_{qs}^*$ ,  $i_{qs}$ ,  $i_{ds}^*$  및  $i_{ds}$



(a)  $\theta_r$ ,  $\omega_r$ ,  $i_{Bs}$  및  $i_{As}$



(b)  $i_{qs}^*$ ,  $i_{qs}$ ,  $i_{ds}^*$  및  $i_{ds}$

그림 13. 권선 고장 시 2,500(rpm)에서 실험 결과 (FTR=2.1(%))

Fig. 13. Experimental results at 2,500(rpm) under stator fault due to turn short of 2.1(%)

와 같이 약 2.1%의 FTR을 얻을 수 있다. 정상조건인 그림 10과 그림 11에 비해 각각의 동작 속도에서 고장 발생 시 3상전류와 dq축 전류 오차가 더 증가하고 상전류 간의 불평형 정도도 더 심해지며 고조파 성분의 최대인 dq축 전류 리플도 더 증가함을 확인할 수 있다.

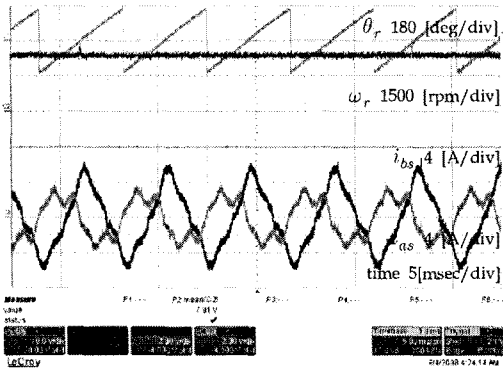
그림 14와 그림 15는 고정자 고장 발생 시 각각 1,000[rpm]과 2,500[rpm]의 속도 명령이 가해진 경우의 실험 결과를 나타낸다. 단락 탭을 이용하여 세 코일 중 한 코일의 1/8을 단락함으로써 4.2%의 FTR이 가능하다. 2.1%의 FTR이 사용된 그림 12와 그림 13에 비해 권선 고장에 의한 성능 저하가 더 심화됨을 확인할 수 있다.

그림 14. 권선 고장 시 1,000(rpm)에서 실험 결과 (FTR=4.2(%))

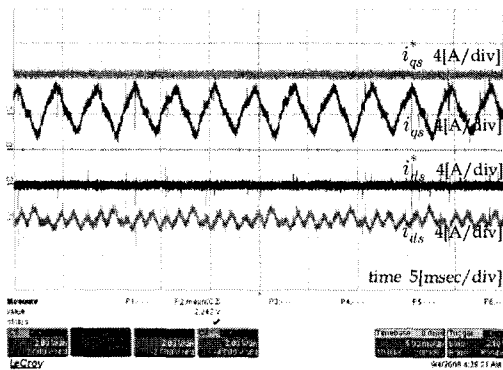
Fig. 14. Experimental results at 1,000(rpm) under stator fault due to turn short of 4.2(%)

그림 16은 그림 14와 동일 조건에서 0.5[N·m]의 부하가 인가된 경우의 실험 결과이다. 그림 9와 유사하게 부하인가로 인해 전체적인 전류의 크기는 증가하나 3상전류 및 dq축 전류 오차와 리플 및 각 상전류 간의 불평형 정도는 비슷하게 나타난다.

권선 단락 시 3상전류에는 불평형에 의한 3차 고조파 성분이 dq축 전류에는 이 성분이 기본파 성분과 곱해지므로 2차 고조파 성분이 나타나게 된다. 표 2와 표 3은 1,000[rpm]에서 권선 고장으로 발생하는 상전류와 q축 전류의 고조파 크기를 나타낸다.



(a)  $\theta_r$ ,  $\omega_r$ ,  $i_{bs}$  및  $i_{ds}$



(b)  $i_{qs}^*$ ,  $i_{qs}$ ,  $i_{ds}^*$  및  $i_{ds}$

그림 15. 권선 고장 시 2,500(rpm)에서 실험 결과 (FTR=4.2(%))  
 Fig. 15. Experimental results at 2,500(rpm) under stator fault due to turn short of 4.2(%)

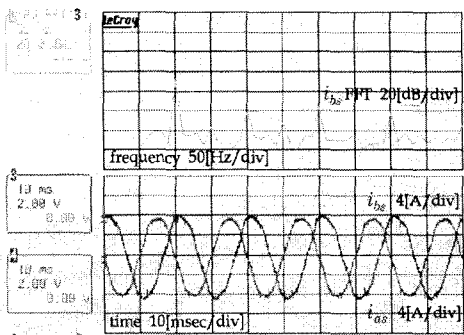


그림 16. 권선 고장 시 1,000(rpm), 0.5(N·m)에서의 실험 결과(FTR=4.2(%))  
 Fig. 16. Experimental results at 1,000(rpm) and 0.5(N·m) under turn short of 4.2(%)

표 2. 1,000(rpm)에서 b상전류의 고조파 크기 비교  
 Table 2. Comparison of the harmonics in b-phase current at 1,000(rpm)

부하조건	고장유무	3차/기본파
무부하	정상조건	-30[dB]/0[dB]
	2.1[%] Turn short	-20[dB]/0[dB]
	4.2[%] Turn short	-10[dB]/10[dB]
	8.3[%] Turn short	0[dB]/20[dB]
0.5[Nm]	정상조건	-30[dB]/20[dB]
	2.1[%] Turn short	-20[dB]/20[dB]
	4.2[%] Turn short	-10[dB]/20[dB]
	8.3[%] Turn short	0[dB]/20[dB]

표 3. 1,000(rpm)에서 q축 전류의 2차 고조파 크기비교

Table 3. Comparison of the second harmonics in q-axis current at 1,000(rpm)

부하조건	고장유무	2차
무부하	정상조건	-20[dB]
	2.1[%] Turn short	-10[dB]
	4.2[%] Turn short	0[dB]
	8.3[%] Turn short	0[dB]
0.5[Nm]	정상조건	-10[dB]
	2.1[%] Turn short	0[dB]
	4.2[%] Turn short	5[dB]
	8.3[%] Turn short	15[dB]

### 5. 결 론

영구자석 동기전동기에서 고정자 권선의 단락으로 인해 발생하는 고장을 해석하고 진단 알고리즘의 시험 평가를 위해 효과적으로 사용될 수 있는 고장 모델이 제안된다. 기존에 전동기의 해석과 제어에 많이 사용되는 dq 모델은 상전압 모델을 변환하여 구해지는 것으로 전동기 고정자 상의 권선 단락으로 인한 고장 시에는 더 이상 3상평형 조건이 성립하지 않아 고장모델의 해석을 위해 사용하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 전동기의 3상 변수와 선전압 관계식을 이용한 고장모델이 제안된다. 제안된 고장 모델의 타당성을 입증하기 위해 고장모델을 사용한 시뮬레이션이 수행되고 내부 권선 단락이 가능하도록

제작된 전동기와 DSP TMS320F28335에 의해 구현된 제어 시스템을 이용하여 동일한 고장 조건에서 비교 실험이 수행된다. 제안된 고장모델은 권선 단락에 의한 고장 발생 시 구동 시스템의 해석과 고장 진단 알고리즘의 시험 평가를 위해 효과적으로 사용될 수 있으리라 기대된다.

### References

[1] M. A. Awadallah, M. M. Morcos, S. Gopalakrishnan, and T. W. Nehl, "Detection of stator short circuits in VSI-fed brushless DC motors using wavelet transform", *IEEE Trans. Ener. Conv.*, vol. 21, no. 1, pp. 1-8, 2006.

[2] F. Filippetti, G. Franceschini, C. Tassoni, and P. Vas, "Recent developments of induction motor drives fault diagnosis using AI techniques", *IEEE Trans. Ind. Elec.*, vol. 47, no. 5, pp. 994-1004, 2000.

[3] R. M. Tallam, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Stator winding turn-fault detection for closed-loop induction motor drives", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, no. 3, pp. 720-724, 2003.

[4] M. A. Awadallah, M. M. Morcos, S. Gopalakrishnan, and T. W. Nehl, "A neuro-fuzzy approach to automatic diagnosis and location of stator inter-turn faults in CSI-fed PM brushless DC motors", *IEEE Trans. Ener. Conv.*, vol. 20, no. 2, pp. 253-259, 2005.

[5] H. J. Park, D. U. Jang, G. D. Kim, J. S. Choi, and J. S. Kim, "A study on the condition diagnosis for the stator coil of traction motor by transient surge," *KJPE journal*, vol. 8, no. 3, pp. 247-252, June 2003.

[6] L. Li, A. David, and L. Wenxin, "Application of particle swarm optimization to PMSM stator fault diagnosis", *Int. Conf. on Neural Networks, Vancouver*, pp. 1969-1974, 2006.

[7] G. M. Joksimovic, and J. Penman, "The detection of inter-turn short circuits in the stator windings of operating motors", *IEEE Trans. Ind. Elec.*, vol. 47, no. 5, pp. 1078-1084, 2000.

[8] J. D. Lee, B. G. Park, T. S. Kim, J. S. Ryu, D. S. Hyun, "Fault detection of BLDC motor drive based on operating characteristics," *KJPE journal*, vol. 13, no. 2, pp. 88-95, April 2008.

[9] P. C. Krause, *Analysis of Electric Machinery*. New York: McGraw-Hill, 1986.

[10] TMS320F28335 Digital Signal Controller (DSC) - Data Manual. Texas Instrument, 2008.

[11] H. W. van der Broeck, H. C. Skudelny, and G. V. Stanke, "Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vectors, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 24, no. 1, pp. 142-150, 1988.

[12] T. M. Rowan and R. J. Kerkman, "A new synchronous current regulator and an analysis of current-regulated PWM inverters, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 22, no. 4, pp. 678-690, 1986.

[13] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern Control Systems*. Prentice-Hall International Editions, 2005.

### ◆ 저자소개 ◆

#### 김경화 (金庚和)

1969년 3월 11일생. 1991년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1993년 2월 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 1998년 2월 동 대학원 졸업(박사). 1998~2000년 삼성전자 선임연구원. 2000~2002년 한국과학기술원 연구교수. 2002년~현재 서울산업대 전기공학과 부교수.

#### 최중욱 (崔東旭)

1983년 1월 24일생. 2009년 2월 서울산업대 전기공학과 졸업. 2009년 3월~현재 서울산업대 대학원 전기공학과 석사과정.

#### 구본관 (具本琯)

1976년 2월 6일생. 1998년 2월 경북대학교 전자공학과 졸업. 2000년 2월 포항공과대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2005년 2월 동 대학원 졸업(박사). 2005~2007년 LG전자 선임연구원. 2007년~현재 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터 선임연구원.

#### 정인성 (鄭因城)

1971년 3월 10일생. 1993년 2월 한양대학교 전기공학과 졸업. 1995년 8월 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 2월 동 대학원 졸업(박사). 2000년~현재 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터 센터장.