

# Stator inter-turn fault 발생 시 권선 방식에 따른 IPM Type BLDC Motor의 Fault Tolerance 향상

논 문
60-3-9

## Fault Tolerance Improvement of IPM Type BLDC Motor Considering Winding Configuration under a Stator Inter-Turn Fault Condition

김 희 운\* · 윤 진 규\*\* · 허 진†  
(Hee-Woon Kim · Jin-Gyu Yoon · Jin Hur)

**Abstract** - This paper analyzes fault tolerance under a stator turn fault, according to the winding configuration. Improvement of torque characteristics and fault tolerance can be achieved by winding configuration without additional methods. And, torque characteristics and fault tolerance according to the winding configuration can be usually analyzed by analytical method. But, when the stator turn fault generates, compare to the steady-state, analysis of torque characteristics and fault tolerance using the analytical method is not accurate because it does not reflect influence in mutual inductance and magnetic non-linearity. Therefore, analysis of torque characteristics and fault tolerance has to be performed by using the numerical method under fault condition. This paper develops fault characteristics according to the winding configuration using the FEM-base model considered magnetic non-linearity. And, this paper suggests fault tolerance improvement according to the winding configuration, by the comparison of 8/12 and 10/12 models, under fault condition.

**Key Words** : Stator turn fault, IPM motor, Winding configuration, Magneto-Motive Force (MMF), Harmonic component, input current, Generated torque.

### 1. 서 론

IPM type BLDC 모터는 의료 및 가전 기기에서부터 공장 등에서 사용되는 산업용 로봇까지 산업 전반에서 널리 사용되고 있다. 그리고 최근에는 차량(EV, HEV)에서 화석 에너지 절감을 위한 주요 구동 원으로서 사용이 증가하고 있다. 그래서 모터의 사용 증가는 추가적으로 고 신뢰성과 고장 대응 능력(Fault tolerance) 향상이 요구된다. 특히 차량에서는 사람의 생명과 관련되므로 더욱 중요하게 고려된다. 그러므로 발생할 수 있는 고장에 대하여 실시간으로 검출하고 예측하는 기술과 처음부터 고장에 대하여 강한 설계를 하는 것은 고 신뢰성과 고장 대응 능력 향상을 위하여 아주 필수적이다.

모터에서 고장의 원인 중 가장 많은 부분을 차지하는 것은 고정자 권선 고장(Stator Turn Fault)이다. 고정자 권선 고장은 고정자 권선에 전압 및 전류 스트레스 혹은 열에 의한 절연 파괴로 발생하며, 고장에 의해 발생하는 열은 다른 인접한 권선으로 쉽게 전파되어 더 큰 손실을 초래하는 특징을 가지게 된다. 그리고 고정자 권선 고장은 모터의 특성에도 악영향을 미치게 되므로 고정자 권선 고장에 대한 고

장 대응 능력의 향상은 필수적이다.

모터에서 고장에 대하여 대응 능력 향상시키는 방법으로는 모터의 설계적인 측면을 이용하는 방법과 고장 검출 알고리즘을 이용한 방법[1],[2]으로 나눌 수 있다. 첫 번째, 모터의 설계적인 측면에서 고려하는 방법은 모터 설계 시 기본적으로 고려되는 요소들을 이용하는 것으로서, 고려되는 요소에는 자석의 모양, 배치 그리고 극 슬롯 수에 따른 권선 방식 등이 있다. 두 번째, 고장 검출 알고리즘을 이용한 방법은 고장 발생 시 나타나는 전류 및 전압을 측정하여 특성을 분석 및 제어하여 고장에 대한 대응력을 향상시키는 방법이다. 하지만, 기본적으로 측정 및 분석 그리고 제어를 위한 센서 및 계측 그리고 제어 장비들로 인하여 추가적인 비용이 증가하게 된다. 이러한 이유로, 저 비용으로 고장 상태에서 고장의 영향을 최소화하기 위해서는 첫 번째 방법인 모터 설계적인 측면을 고려한 방법을 고려하게 된다.

모터의 설계적인 범주 중에서 권선 방식을 이용하는 방법은 토크 리플을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 상간 영향력을 감소시켜 고장 대응 능력을 향상시킬 수 있기 때문에 고정자 권선 고장에 대한 영향을 최소화하기 위하여 자주 이용된다[3],[4]. 그리고 이러한 권선 방식은 크게 일반적인 방식과 새로운 방식으로 구분된다. 여기서, 일반적인 방식으로는 분포권(Distributed Winding)과 집중권(Concentrated Winding)이 있고 새로운 방식에는 Modular Winding이 있다. 새로운 방식에는 Modular Winding이 있다. 그러나 고정자 권선 고장의 관점에서 분포권의 경우에는 권선 간에 오버랩 되는 부분이 증가하기 때문에 집중권과 Modular Winding에 비하여 고장에 의한 영향을 많이 받는다.

\* 정 회 원 : 한국파워트레인(주) 연구원

\*\* 정 회 원 : 세종공업(주) 연구원

† 교신저자, 시니어회원 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부, 조교수

E-mail : jinhur@ulsan.ac.kr

접수일자 : 2010년 11월 24일

최종완료 : 2011년 2월 17일

본 논문에서는 권선 간에 오버랩 되는 부분이 적은 집중 권과 Modular Winding의 비교를 위하여 8극 12슬롯 모델과 10극 12슬롯 모델을 이용하여 고장 대응 능력을 분석하였고 기존의 수식을 이용한 방법과 FEM을 이용한 수치해석을 이용하여 고장 특성을 분석하였다. 또한 결과를 검증하기 위하여 순환 전류 특성을 실험에 의한 결과와 수식을 이용한 방법과 수치해석을 이용한 방법 통한 결과와 비교 분석하였다. 그리고 정상 상태와 비교하여 고장 상태에서 입력 전류와 발생 토크의 고조파 성분을 분석하여 고장에 의한 모터가 받게 되는 영향을 분석하였고, 회전자와 고정자의 기자력(MMF)고조파 성분을 분석하여 토크 특성을 비교하였다.

## 2. 고정자 권선 고장(Stator Turn Fault)에서의 모터의 기기 방정식

본 논문에서는 수식을 이용한 방법을 통하여 고정자 권선 고장이 발생하였을 때 모터의 기기 방정식을 유도하였다[5], [6]. 그리고 기기 방정식을 이용하여 권선 방식에 따른 모터 특성을 확인하였다. 하지만, 기기 방정식과 같은 분석적인 방법은 모터가 회전함에 따라 변하는 인덕턴스와 자기적인 비선형성을 고려하지 못한다는 단점을 가지고 있다.

그림 1은 3상 Wye-결선에서의 고정자 권선 고장을 도식적으로 나타내었다. 그리고 여기서 권선 고장은 A상에서 발생하였으며 고장이 발생한 부분(Faulty turn)과 고장이 발생하지 않은 부분(Healthy turn)으로 된다. 이때, 고장이 발생하지 않은 부분은  $as_1$ 으로, 고장 발생한 부분은  $as_2$ 로 나타내었다.

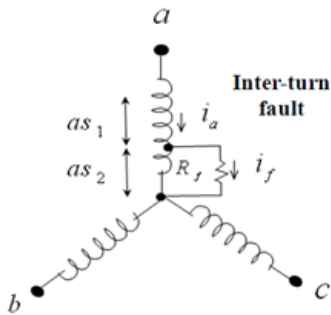


그림 1 고정자 권선 고장 발생 시 Wye-결선에서의 3상 권선 도식도

Fig. 1 Schematic of wye-connected three-phase windings with a stator turn fault

식 (1)과 (2)는 고장 상태에서의 전압 및 출력 토크 방정식을 나타내었다.

$$v_{sn} = R_s' i_s' + \frac{d\lambda_{sr}'(i_s', \lambda_{sr}', \theta_r)}{dt} \quad (1)$$

$$= R_s' i_s' + L_s'(\theta_r) \frac{di_s'}{dt} + w_e \frac{dL_s'(\theta_r)}{d\theta_r} i_s' + w_e \frac{d\lambda_{sr}'(\theta_r)}{d\theta_r}$$

$$T_e = \frac{P}{2} \left[ \frac{1}{2} i_s'^T \frac{dL_s'(\theta_r)}{d\theta_r} i_s' + i_s'^T \frac{d\lambda_{sr}'(\theta_r)}{d\theta_r} \right] \quad (2)$$

여기서,  $\lambda_{sr}'(\theta_r)$ 은 고장 상태에서의 자석에 의한 쇄교 자속이고,  $\mu_{sc}$ 는 고장률을 나타내며,  $i_s'$ 는 고장 상태에서의 입력 전류를 나타낸다. 그리고  $R_s'$ 는 고장 상태에서의 저항이며,  $L_s'$ 는 고장 상태에서의 자기 및 상호 인덕턴스를 나타낸다.

식 (1)과 (2)를 재정리하면,

$$v_{sn} = R_s i_s + L_s(\theta_r) \frac{di_s}{dt} + w_e \frac{dL_s(\theta_r)}{d\theta_r} i_s + w_e \frac{d\lambda_{sr}(\theta_r)}{d\theta_r} - \mu_{sc} \left\{ \begin{bmatrix} R_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} i_f + \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta_r) \\ L_{ab}(\theta_r) \\ L_{ac}(\theta_r) \end{bmatrix} \frac{di_f}{dt} + w_e \frac{d}{d\theta_r} \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta_r) \\ L_{ab}(\theta_r) \\ L_{ac}(\theta_r) \end{bmatrix} i_f \right\} \quad (3)$$

$$T_e = \frac{P}{2} \left[ \begin{aligned} & \left( \frac{1}{2} i_s'^T \frac{dL_s'(\theta_r)}{d\theta_r} i_s' + i_s'^T \frac{d\lambda_{sr}'(\theta_r)}{d\theta_r} \right) \\ & + \frac{1}{2} \mu_{sc}^2 \frac{dL_{aa}(\theta_r)}{d\theta_r} i_f^2 - \mu_{sc} i_f \left( \frac{d\lambda_{ar}(\theta_r)}{d\theta_r} \right) \\ & - \mu_{sc} i_f \left( i_a \frac{dL_{aa}(\theta_r)}{d\theta_r} + i_b \frac{dL_{ab}(\theta_r)}{d\theta_r} + i_c \frac{dL_{ac}(\theta_r)}{d\theta_r} \right) \end{aligned} \right] \quad (4)$$

여기서,  $L_s$ 는 정상 상태에서의 3상의 자기 및 상호 인덕턴스이고,  $w_e$ 는 동기 전기 각속도(rad/sec)를 나타낸다.

$$|i_f| = \frac{|v_{as}|}{\left| \frac{R_f}{\mu_{sc}} + R_s + jw_e [L_{ts} + \mu_{sc}(L_1 - 3L_2)] \right|} \quad (5)$$

고정자 권선 고장이 발생하였을 때 순환 전류와 토크 특성은 앞서 식 (4) ~ (5)를 통하여 알 수 있다. 하지만, 식 (5)를 통하여 알 수 있는 순환 전류는 오직 자기 인덕턴스만을 고려하기 때문에 상호 인덕턴스 차이가 큰 모델에서는 정확한 순환 전류 특성을 확인 할 수 없다. 그리고 식 (4)와 같이, 순환 전류에 영향을 받는 고장 발생 시 추가적으로 나타나는 토크 성분은 정확하게 확인할 수 없다. 그러므로 고장이 발생하였을 때, 순환 전류 특성과 토크 특성을 정확하게 확인하고 분석하기 위해서는 자기적인 비선형성과 상호 인덕턴스의 영향을 고려할 수 있는 FEM을 이용한 고장 모델링이 필수적이다.

## 3. 고정자 권선 고장 모델링

고정자 권선 고장의 관점에서, 한 상에서의 고장은 인접한 고장이 발생하지 않은 상에도 악영향을 미치게 된다. 이것은 모터에서 고정자 권선과 회전자의 자석 간에는 자기적인 커플링이 존재한다는 것을 나타낸다. 따라서 고정자 권선 고장이 발생하게 되면, 단락된 권선에서 순환 전류가 발생하게 되고 이 순환전류는 자석으로부터 단락된 권선에 쇄교되는 자속에 의해 발생된다. 그러나 이러한 특성은 비선

형적인 특성을 가지게 되므로 이러한 영향을 분석하기 위해서는 그림 3과 4와 같은 FEM을 이용한 모델링이 필수적이다[7],[8]. 본 논문에서는 한상의 권선의 5%를 고장 턴으로 가정하고 모델링을 수행 하였다.

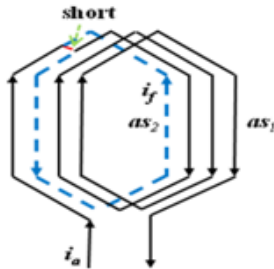


그림 3 고정자 권선 고장의 권선 구조  
Fig. 3 Winding configuration of the inter-turn fault

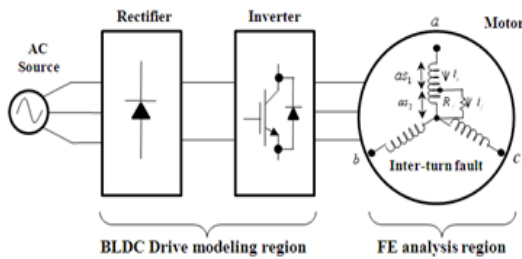


그림 4 FEM을 이용한 고장 모델링  
Fig. 4 Fault modeling of using FEM

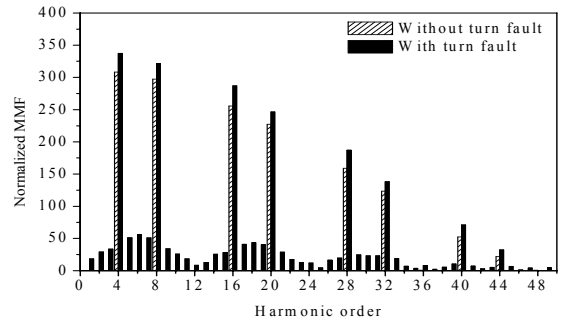
#### 4. 고장 상태에서 발생 토크 특성

고정자에서 권선 고장이 발생하게 되면 자기적인 커플링에 의하여 입력 전류의 수집 배에 달하는 순환 전류가 발생하게 된다. 또 입력 전류는 고장 턴으로 인한 정상 턴의 감소와 순환 전류의 영향으로 3상 불 평형으로 발생하게 된다. 이러한 순환 전류와 입력 전류 특성은 모터의 토크 특성에 악 영향을 미치게 되어 토크 리플을 증가시키게 된다.

토크 리플은 일반적으로 회전자와 고정자 기자력(MMF)의 고조파 성분의 상호 작용을 통하여 발생하게 된다. 그리고 회전자 기자력의 고조파 성분은  $pn$ -차 성분으로 나타나게 되고 고정자 기자력 성분은 권선 분포에 따라 다르게 나타나게 된다. 여기서  $p$ 는 극쌍수를 나타낸다. 따라서 회전자 기자력의 고조파 성분과 고정자 기자력의 고조파 성분의 동일 차수가 많을수록 모터에서의 토크 리플은 증가하게 된다[9].

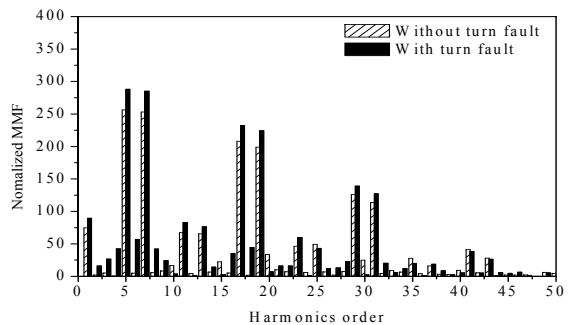
그림 5에서는 8극 12슬롯 모델과 10극 12슬롯 모델의 정상 및 고장 상태에서의 고정자 기자력의 고조파 성분을 나타내었다. 8극 12슬롯 모델의 경우에 정상 및 고장 상태에서 4, 8, 16, 20, 28, 32, 40, 44 ... 의  $4n$ -차 고조파 성분이 발생하고 10극 12슬롯 모델의 경우에는 1, 5, 7, 11, 13, 17, 19 ... 의 고조파 성분이 발생하게 된다. 그러므로 회전자

기자력의 고조파 성분이  $4n$ -차 성분으로 나타나는 8극 12슬롯 모델의 경우에는 고정자 기자력의 고조파 성분과 상호작용이 증가하게 된다. 하지만 회전자 기자력의 고조파 성분이  $5n$ -차 성분으로 나타나는 10극 12슬롯 모델의 경우에는 5차 고조파 성분만이 상호작용을 하게 된다. 그러므로 정상 및 고장 상태에서 토크 리플은 8극 12슬롯 모델에서 크게 발생하게 된다. 그리고 이 현상은 그림 6의 발생 토크를 통하여 확인할 수 있다.



(a) 8극 12슬롯 모델

(a) 8pole 12slot model

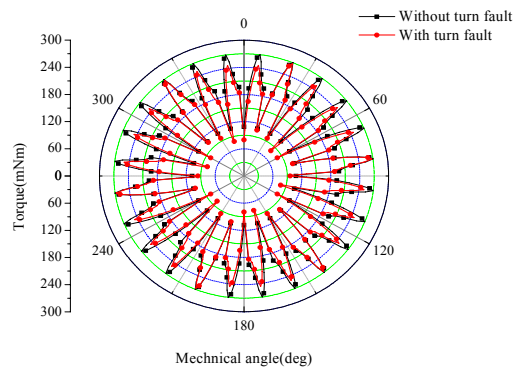


(b) 10극 12슬롯 모델

(b) 10pole 12slot model

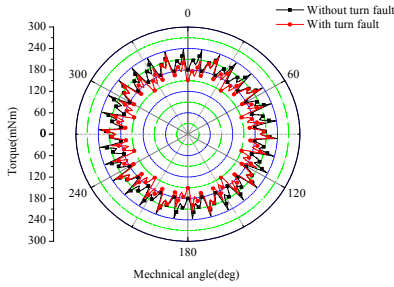
그림 5 고정자 기자력 고조파 성분 분포 비교

Fig. 5 Comparison of MMF space harmonic components distribution



(a) 8극 12슬롯 모델

(a) 8pole 12slot model

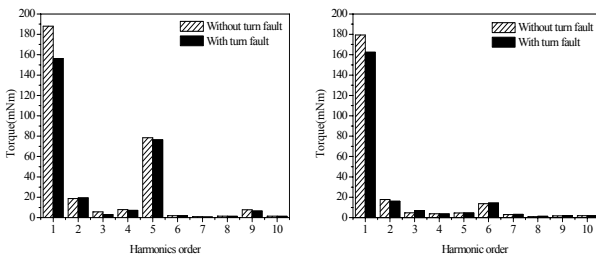


(b) 10극 12슬롯 모델  
(b) 10pole 12slot model

그림 6 발생 토크 특성

Fig. 6 Comparison of generated torque

그림 7은 그림 6의 발생 토크 고조파 성분이다. 고장자 권선 고장이 발생하게 되면 발생 토크의 고조파 성분 중 모터의 구동 방향과 반대 방향의 성분인 역상 성분 2, 5, 8...의 고조파 성분이 증가한다. 8극 12슬롯 모델의 경우에는 고장이 발생하였을 때 역상 성분인 2 고조파 성분이 증가하지만 10극 12 슬롯 모델의 경우에는 이와 반대로 2 고조파 성분은 감소한다. 그리고 상대적으로 5 고조파 성분은 8극 12슬롯 모델이 10극 12슬롯 모델에 비하여 크게 나타난다. 또한, 두 모델 모두 그림 6과 같이 토크 리플은 증가하지만 토크 파형의 최댓값은 일정하기 때문에 기본파 성분은 감소하고 다른 성분의 고조파 성분은 증가한다. 하지만, 기본파 성분의 감소폭은 8극 12슬롯 모델이 10극 12슬롯 모델에 비하여 크게 나타나게 된다. 그러므로 고장이 발생하였을 때 8극 12슬롯 모델이 10극 12슬롯 모델에 비하여 고장의 영향을 더 많이 받는다.



(a) 8극 12슬롯 모델 (b) 10극 12슬롯  
(a) 8pole 12slot model (b) 10pole 12slot model

그림 7 발생 토크의 고조파 성분

Fig. 7 Analysis of harmonic components of generated torque

5. 정상 및 고장 상태에서 해석과 실험 결과 비교

5.1 해석 모델



(a) 8극 회전자 (b) 10극 회전자 (c) 고정자  
(a) Rotor-8pole (b) Rotor-10pole (c) Stator

그림 8 해석 모델

Fig. 8 Analysis models

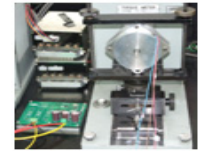
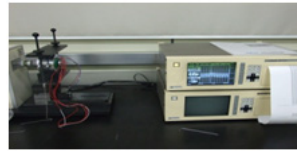
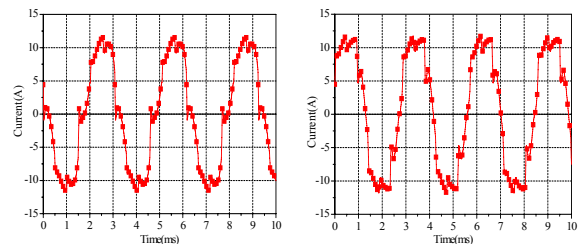


그림 9 실험 장비

Fig. 9 Experiment equipment

5.2 순환 전류

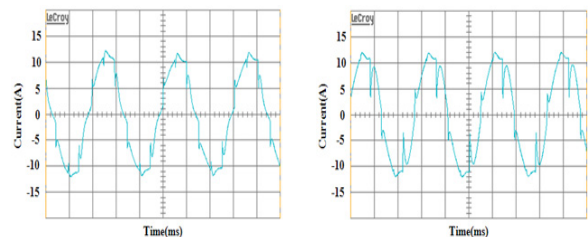
순환 전류는 고장 턴 수와 자석의 쇄교자속에 영향을 받는다. 그림 10, 그림 11은 FEM 모델링을 이용한 순환 전류와 실제 실험을 통한 순환 전류 특성을 비교하였다. 그리고 그림 10, 그림 11의 비교를 통하여 FEM을 이용한 경우 실험을 통한 결과와 유사하다는 것을 알 수 있다.



(a) 8극 12슬롯 모델 (b) 10극 12슬롯 모델  
(a) 8pole 12slot model (b) 10pole 12slot model

그림 10 수치 해석적 방법을 이용한 순환 전류

Fig. 10 Comparison of circulating current by numerical method



(a) 8극 12슬롯 모델 (b) 10극 12슬롯 모델  
(a) 8pole 12slot model (b) 10pole 12slot model

그림 11 실험을 통한 순환 전류

Fig. 11 Circulating current by experiment result

5.3 입력 전류

그림 12, 그림 14 그리고 그림 15는 정상 및 고장 상태에서의 입력 전류의 해석결과와 실험결과를 나타내었다. 고장이 발생하였을 때 8극 12슬롯 모델과 10극 12슬롯 모델은 각각 정상 상태에 비하여 약 25%와 13% 입력 전류가 증가한다. 이것은 고장이 증가할수록 두 모델 모두 정상 턴의 감소하기 때문에 입력 전류가 증가하는 것이다. 하지만 두 모델은 고장에 의한 영향력 차이로 인하여 증가량은 다르게 나타난다. 영향력의 차이는 그림 13의 입력 전류의 고조파 성분 분석을 통하여 확인할 수 있다. 10극 12슬롯 모델은 8극 12슬롯 모델에 비하여 기본파 성분이 작게 감소하고 역상 성분인 2, 5 고조파 성분은 작게 증가하는 것을 알 수 있다. 그러므로 10극 12슬롯 모델이 8극 12슬롯 모델에 비해 고장에 대한 영향력이 작다.



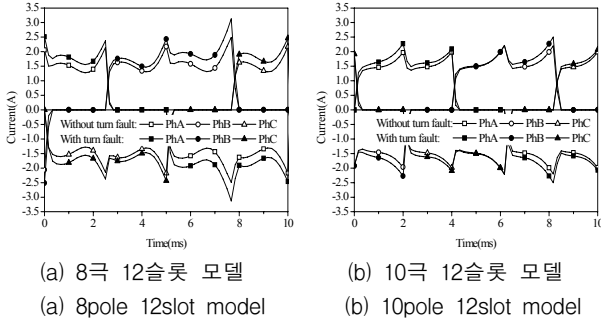


그림 12 시뮬레이션을 통한 입력 전류  
 Fig. 12 Comparison of Input current by simulation

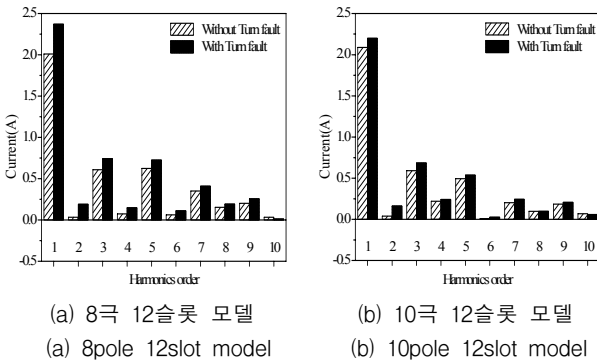


그림 13 입력 전류 고조파 분석  
 Fig. 13 Analysis of harmonic components of input current

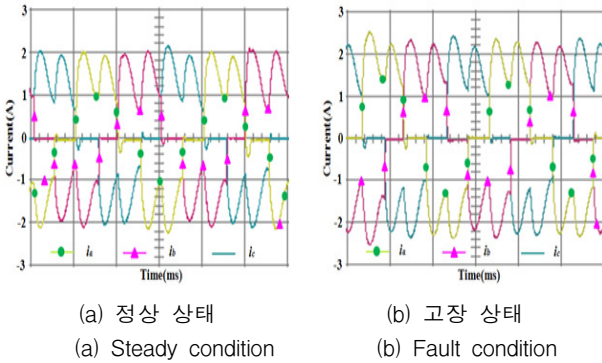


그림 14 8극 12슬롯 모델의 실험을 통한 입력 전류  
 Fig. 14 Input current of 8 pole 12 slot model by experiment

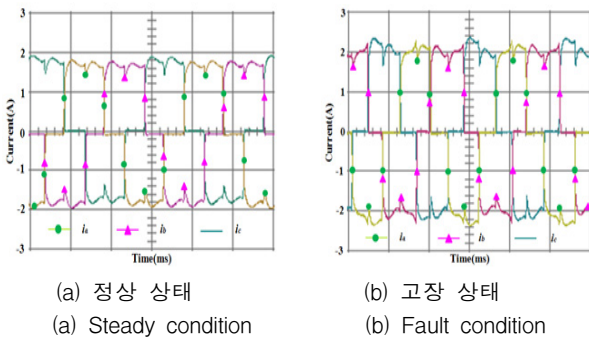
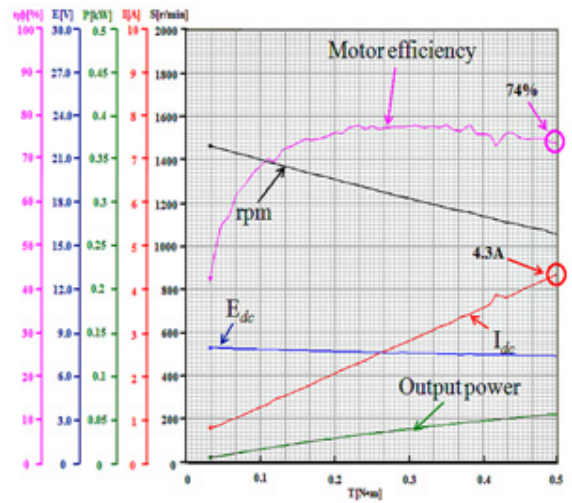


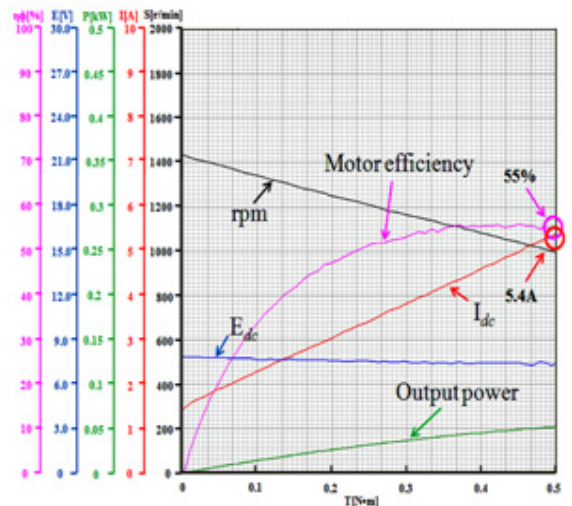
그림 15 10극 12슬롯 모델의 실험을 통한 입력 전류  
 Fig. 15 Input current of 10pole 12slot model by experiment

5.4 모터 동작 특성

그림 16과 그림 17은 정상 및 고장 상태에서 8극 12슬롯 모델과 10극 12슬롯 모델의 실험을 통한 모터 동작 특성을 나타내고 있다. 고정자 권선 고장이 발생하게 되면 정상 상태에 비하여 8극 12슬롯 모델과 10극 12슬롯 모델의 입력 전류는 각각 25%와 10% 증가한다. 그러므로 고장 상태에서 모터의 효율은 동일 출력에서 10극 12슬롯이 8극 12슬롯에 비하여 높게 나타난다. 따라서 그림 17, 그림 18과 같이 두 모델의 효율 감소폭은 8극 12슬롯 모델의 경우에는 정상 상태에 비하여 26% 감소하지만 10극 12슬롯 모델의 경우에는 8% 감소하게 때문에 약 3배 더 많이 감소된 8극 12슬롯 모델이 10극 12슬롯 모델에 비하여 효율이 우수함을 알 수 있다.

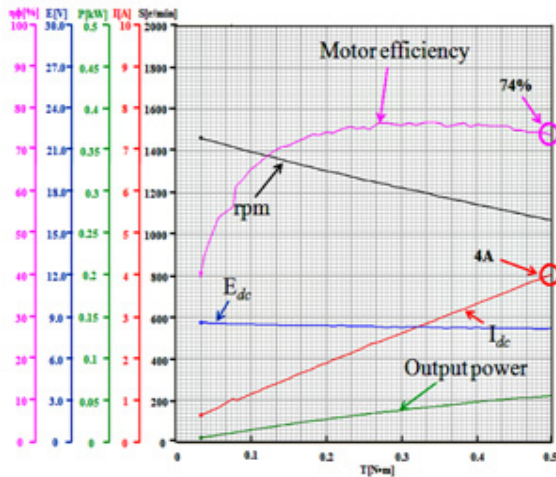


(a) 정상 상태  
 (a) Steady condition

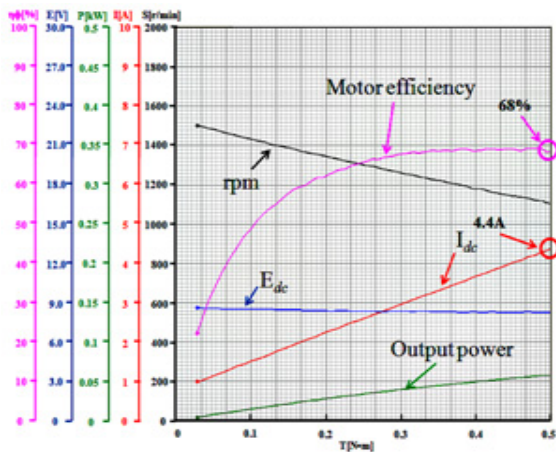


(b) 고장 상태  
 (b) Fault condition

그림 16 실험을 통한 8극 12슬롯 모델의 동작 특성  
 Fig. 16 Performance characteristics of 8 pole 12 slot model



(a) 정상 상태  
(a) Steady condition



(b) 고장 상태  
(b) Fault condition

그림 17 실험을 통한 10극 12슬롯 모델의 동작 특성  
Fig. 17 Performance characteristics of 10 pole 12 slot model

### 3. 결론

모터에 권선 고장이 발생하게 되면 순환 전류는 입력 전류와 토크 리플에 영향을 줄 뿐만 아니라 높은 열을 발생시키게 된다. 순환 전류와 3상 불 평형 입력 전류 그리고 높은 열은 모터의 출력 특성에 악영향을 미치게 된다. 그러므로 고장에 대하여 모터가 받는 영향을 정확하게 분석을 할 수 있어야만 고장 대응 능력을 향상시킬 수가 있다. 하지만, 수식을 이용한 방법을 이용한 고장에 대한 영향 분석은 상호 인덕턴스와 자기적인 비선형성을 고려하지 못하기 때문에 정확하지 않다.

본 논문에서는 상호 인덕턴스와 자기적인 비선형성을 고려할 수 있는 수치해석을 이용한 방법을 통하여 고장에 대한 영향을 분석하였다. 정상 및 고장 상태에서 FEM 모델링을 통한 모터 특성 분석을 위하여 입력 전류의 증가량 및 고조파 성분 분석, 또한 발생 토크 특성 및 고조파 성분 분석을 수행하였다.

그리고 권선 방식을 통한 모터의 고장 대응 능력 향상을 제안하였다. 이를 위하여 8극 12슬롯모델과 10극 12슬롯 모델의 비교하였으며, FEM 모델링과 실험 결과를 통하여 고장이 발생하였을 때 모터가 구동하여 사고를 회피할 수 있는 능력이 10극 12슬롯 모델이 8극 12슬롯 모델에 비하여 우수함을 확인 할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원의 에너지인력양성사업의 지원과 교육과학기술부 울산과학교육연구단지육성사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

### 참고 문헌

- [1] J. F. Martins, V. F. Pires, and A. J. Pires, "Unsupervised neural-network based algorithm for an on-line diagnosis of three-phase induction motor stator fault", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 1, pp. 259 - 264, Feb. 2007.
- [2] J. H. Jung, J. J. Lee, and B. H. Kwon, "Online diagnosis of induction motors using MCSA", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 6, pp. 1842 - 1852, Dec. 2006.
- [3] J. R. Hendershot, and T.J.E. Miller, "Design of brushless permanent magnet motors", Magna Physics Publishing & Clarendon Press, 1994.
- [4] A. M. El-Refaie and M. R. Shah, "Comparison of induction machine performance with distributed and fractional-slot concentrated winding", in *Conf. Rec. 43st IEEE IAS Annu. Meeting*, Oct. 2008, pp. 1-8.
- [5] Y. K. Lee and T. G. Habetler, "A stator turn fault tolerant strategy for induction motor drives in safety critical applications", In *Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC'06. 37th IEEE*, pp. 1 - 7. 2006.
- [6] Y. K. Lee and T. G. Habetler, "A phase variable simulation model for interior PM synchronous motor drives with stator turn fault", *Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC'06. 12th IEEE*, pp. 1074-1079. 2006.
- [7] Dai, M., A. Keyhani, and T. Sebastian, "Fault analysis of a PM brushless DC motor using finite element method", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 20, No.1, 2005.
- [8] Romeral, L.; Urresty, J. C.; Riba Ruiz, J. R.; Garcia Espinosa, A.; "Modeling of Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors With Stator Winding Inter-Turn Faults", *Industrial Electronics, IEEE Transactions On* vol. PP, Issue: 99, 2010
- [9] K. T. Kim, J. Hur, B. W. Kim, Y. K. Lee, "Fault analysis of IPM type BLDC motor using nonlinear modeling of stator inter turn faults", *Conference on* pp. 1-1, 2010.

## 저 자 소 개



### 김 희 운 (金 熙 運)

2009년 울산대학교 전기공학부 졸업, 공학사, 2011년 2월, 울산대학교 대학원 전기공학부 졸업, 공학석사, 2011년 1월~현재 한국과워트레인(주) 연구원.

Tel : 052-259-1532

E-mail : heewoony@nate.com



### 윤 진 규 (尹 珍 奎)

2009년 울산대학교 전기공학부 졸업, 공학사, 2011년 2월, 울산대학교 자동차 선박대학원 메카/IT 전공(전기공학), 공학석사, 2010년 10월~현재 세종공업(주) 연구원.

Tel : 054-636-7966

E-mail : borbogo@nate.com



### 허 진 (許 眞)

1999년 공학박사, 한양대(전기공학), 1999년~2000년 Texas A&M Univ. Post-doctoral Research Associate, 2000년~2001년 한양대 연구교수, 2002년~2008년 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터장/책임연구원, 2008년~현재 울산대 전기전자정보시스템 공학부 조교수, 2004년~현재 IEEE Senior Member, 2006년~현재, Associate Editor, IEEE Trans. on Power Elec., 2008년~현재, Associate Editor, IEEE Trans. on Vehicular Technology. 2008년~현재, IEEE Intelec 2009 Conference, Publication Chair. 2009년~현재, KIEE Senior Member 및 B부문 편집이사.

Tel : 052-259-1282

E-mail : jinhur@ulsan.ac.kr