고정자 절연파괴 비선형 모델링을 이용한 매입형 영구자석 전동기의 고장분석

논 문

60-3-10

Fault Analysis of IPM type BLDC Motor Using Nonlinear Modeling of Stator Inter Turn Faults

김 경 태* · 허 진†

(Kyung-Tae Kim · Jin Hur)

Abstract - This paper proposes a finite element method (FEM)-based model of an interior permanent magnet (IPM) type BLDC motor having stator inter-turn faults. For more realistic simulation studies, the magnetic non-linearity is also considered in proposed model. And the simulation data are verified through experiment. By integrating the developed model with a current-controlled voltage source inverter (CCVSI) model, the characteristics of an inter-turn fault operated by six-switched inverter are investigated considering the speed control. And the circulating current, which is induced by magnetic linkage flux originated from PM, was analyzed from the view point of distortion of air-gap magnetic flux distribution caused deterioration of their torque.

Key Words : Inter turn fault, Insulation failure, Circulating current, Stator turn fault

1. 서 론

구형과 구동 IPM type 전동기는 높은 출력밀도와 고효율 및 우수한 구동 특성으로 인하여, 다양한 전기 구동 시스템을 이용하는 산업에서의 사용이 증가하고 있다. 그리고 특히, IPM type BLDC 전동기는 구조상의 강건성을 가지고 있어서 높은 신뢰성을 요구하는 응용분야에서도 많이 이용되고 있다. 만약 산업현장의 구동 시스템에서 고장이 발생하게 되면 고장 지연 시간 동안의 작업이 중단되므로 피해가 심각할 것이고, EV의 구동 전동기에서 운전 중 고장이 발생한다면 인명피해의 위험도 발생할 수 있다. 그러므로 이러한 시스템에서는 전동기의 고장에 대한 신뢰성이 매우 중요하다[1].

전동기 고장은 크게 Stator turn fault, Power converter fault, Mechanical fault 이외에도 영구자석 전동기의 경우 회전자 자석의 비산, 자석의 감자 등으로 인하여 발생하는 고장이 존재한다. 특히 고장 중 가장 발생 확률이 높은 고장이 진동이나 단자간의 과부하, 외부물질 유입 등의 전기기계적 현상으로 인해 권선의 절연이 점차적으로 파괴되어 단락이 발생하는 고정자 권선 절연파괴 고장(stator turn fault)이 존재한다[2].

고정자 권선 절연파괴 고장은 단락된 코일에서 열이 발생하고, 이 열은 순환전류의 제곱에 비례하여 인접한 코일의 절연을 파괴하여 전파되며 매우 빠르게 한 상을 파괴시키기

때문에, 빠른 고장검출과 고장대응이 반드시 요구된다[3].

국내의 경우에는 전동기에 대한 고장진단 연구의 진행이 극히 미비한 실정이며, 국외의 경우에는 일부 산업용 전동기를 대상으로 고장진단에서 고장예측까지 가능한 연구개발 단계에 도달해 있다. 그러나 모든 분야의 구동모듈은 고장예측 기술에서 더 나아가 고장대응의 기술 수준까지 요구되고 있다. 따라서 고장대응의 기술연구가 진행되기 위해서는 전동기의 고장에 대한 정확한 수식적 모델링과 분석이 우선시 되고, 전동기의 고장 발생 시 나타나게 되는 현상을 파악해야 한다.

고정자 절연파괴 모델링에 관련된 많은 연구들이 자기 등가회로(MEC)의 집중 파라미터(Lumped parameters)를 이용하였는데, MEC는 자기적 비선형성을 고려하지 못한다. 하지만, IPM type BLDC 전동기는 자기포화 현상이나 교번자계 효과로 인하여 인덕턴스의 변화가 발생하기 때문에 비선형을 고려한 모델링이 중요하다[3]-[5].

따라서 본 논문에서는 IPM type BLDC 전동기의 고정자 절연파괴 고장의 비선형 모델링을 제안하고, 고장이 진행됨에 따라서 순환전류의 발생과 입력전류의 변화를 비교 분석하여 토크특성에 미치는 영향을 확인하였고, 또한 실험을 통하여 입력전류와 순환전류의 변화를 검증하였다.

2. 고정자 절연파괴 모델링

고정자 절연파괴로 인한 순환전류와 입력전류의 왜곡현상에 대한 토크특성 변화를 계산하기 위해서 우선적으로 단락된 권선을 모델링 하였다.

순환전류(Circulating Current)는 단락되어 입력전류가 흐르지 않는 공심 코일과 공극 자속의 상호작용으로 인하여 발생하는 유기기전력에 의해 유도되는 전류이다. 그리고 순

* 준 회원 : 울산대학교 대학원 전기공학부, 석사과정

† 교신저자, 시니어회원 : 울산대학교 전기전자정보시스템공학부, 조교수

E-mail : jinhur@ulsan.ac.kr

접수일자 : 2010년 11월 24일

최종완료 : 2011년 2월 20일

환전류는 입력전류의 왜곡현상을 발생시키고, 토크특성에 변화를 준다.

그림 1은 inter turn fault를 나타내기 위한 3상 등가회로로써, a상의 권선에 단락이 발생하면, 한 상의 코일은 $as1$ 과 $as2$ 두 부분으로 구분할 수 있다[3]. $as1$ 은 healthy turn, $as2$ 는 shorted turn 이고, $as2$ 부분에 순환전류(i_f)가 발생하게 된다. 그림 2는 고정자 절연과피 고장을 분석하기 위한 시뮬레이션 모델과 실험을 위한 동일한 기기정수의 IPM type BLDC 전동기이다. 고정자 절연과피 시험을 위한 TEST 전동기는 단락을 위한 구조로 제작 하였으며, 고정자의 권선을 정해진 비율로 단락 시킬 수 있도록 Tap에 코일이 연결되어 있다.

그림 1 고정자 절연과피 고장의 모델링
Fig. 1 Modeling of inter turn fault in stator

그림 2 고정자 절연과피 시험을 위한 매입형 영구자석 전동기
Fig. 2 IPM motor for inter-turn fault test

정상 조건에서 3상이 평형인 IPM type 전동기의 전압 방정식은 식 (1)과 같다. IPM type 전동기는 자기공극의 변화로 인한 인덕턴스가 변하기 때문에, 비선형성을 고려한 인덕턴스의 변화 또한 고려해야 한다. 그리고 식 (2)는 정상 조건에서의 토크 방정식 이다[3].

정상 조건의 전압방정식과 그림 1의 등가회로를 기준으로 a상에 절연과피 고장이 발생하였다고 가정하였을 때, a상의 전압 방정식은 식 (3)과 같고, (3)식에서 λ_a 는 a상 권선 전류에 의한 쇄교자속, λ_{pm} 은 영구자석에 의한 쇄교자속, θ 는 전기각이다. 그리고 $L_{am} = L_{aa} - L_{ls}$ 으로써, $as1$ 의 권선에서 $as2$ 의 영향을 고려한 자기 인덕턴스이다.

Healthy turn ($as1$)과 faulty turn($as2$)로 식(3)을 분리해보면, 식(4), (5)과 같다. 여기서 μ 는 고장 비율을 나타내고, $\mu = as1 \text{ turns}/as2 \text{ turns}$ 이다. $\lambda_a' = L_{am} \cdot i_f$ 이고, 이것은 단락된 턴에 의해서 감소된 턴 수의 영향을 고려하기 위한 쇄교 자속이다.

$$V_s = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + i_s \frac{dL_s}{dt} + \frac{d\lambda_{pm}}{dt} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{P}{2} \left[\frac{1}{2} i_s^T \frac{dL_s}{d\theta} i_s + i_s^T \frac{d\lambda_{pm}}{d\theta} \right] \quad (2)$$

$$V_a = V_{as1} + V_{as2} \\ = (R_s i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} + \frac{d\lambda_{pm}}{d\theta}) - (\mu R_f i_f + \frac{d(L_{am} i_f)}{dt}) \quad (3)$$

$$V_{as1} = (1-\mu) [R_s i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} + \frac{d\lambda_{pm}}{d\theta} - \mu \frac{d\lambda_a'}{dt}] \quad (4)$$

$$V_{as2} = \mu [R_s i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} + \frac{d\lambda_{pm}}{d\theta} - \mu \frac{d\lambda_a'}{dt} - R_s i_f] \quad (5)$$

쇄교자속과 순환전류를 추정하기 위해 앞서 제안한 모델링을 바탕으로 유한요소법(FEM) 기반의 고장모델을 분석하였고, 그림 3은 고정자 절연과피 고장의 자기 포화 현상과 전동기의 분포적인 특성 분석을 위한 고장모델 개요도이다. 이 모델은 쇄교되는 자속의 변화로 인하여 유도되는 순환전류의 계산을 위한 단락 권선이 포함되어 있어서 고정자 절연과피 고장에 의한 전자기적 변화를 시뮬레이션 할 수 있다. 또한, 제시된 모델에서 철심의 히스테리시스 특성을 고려하여 자기포화 특성을 분석하였다. IPM type 전동기의 회로정수는 표 1에서 확인 할 수 있다.

그림 3 고장이 적용된 FEM 기반 고장 모델의 개요도
Fig. 3 Scheme of FEM-based model with inter turn fault

3. 분석 결과

해석 모델에 고정자 절연과피를 적용하고, 고장 비율(μ)이 변화함에 따른 IPM type BLDC 전동기의 전자기적 영향을 유한요소해석(FEA)을 이용하여 분석 하였다. 앞의 절에서 제안한 모델링과 동일하게 고정자 권선의 a상에 단락 권선을 구현하여, 단락이 진행됨에 따라 입력전류와 자속밀도, 토크특성 변화를 분석하였다. 역기전력과 순환전류, 3상 입력전류의 변화는 실험 결과와 비교하기 위해서 다음 절에서 나타내었다.

시뮬레이션과 실험의 모든 분석은 1500[rpm]에서 수행되었으나, 자속밀도 포화현상 분석은 3500[rpm]에서 수행되었다. 그 이유는 정격속도에서의 토크 리플이 매우 크고, 단락을 위한 전선에 열이 크게 발생하여 실험 진행에 어려움이 있어서이다.

그림 4에서 고장이 증가함에 따른 a상 입력전류가 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 단락이 진행됨에 따라 부하와 회

전속도를 유지시키기 위해서 더 많은 전류가 인가된다. 그리고 Fr (fault fraction)은 단락 비율을 나타내며, μ 와 같은 의미이다. 그림 5에서 자속밀도와 자속의 왜곡현상을 확인할 수 있다. 이 현상은 순환전류 발생으로 인한 역 자계 현상으로써 설명할 수 있고, 출력특성에 직접적으로 영향을 미치게 된다. 또한, 고장이 모델링되어진 치 부분은 자속밀도가 감소하지만 고장이 모델링 되지 않은 치 부분에서는 자기포화 현상이 발생하게 되는데, 그림 6에서 도시된 자속밀도 분포 그래프에서 도식적으로 확인할 수 있다.

고정자 절연파괴에 의한 입력전류 증가 현상과 자속밀도 왜곡현상은 단락된 코일이 작은 경우에는 입력전류가 미세하게 증가하고, 순환전류에 의한 자속 또한 크지 않기 때문에 자속밀도 불평형도 크지 않다. 하지만, 고장 비율이 증가하면 입력전류와 고정자 치 부분의 자계의 불평형이 심해져 출력 특성이 악화된다.

고정자 절연파괴에 의한 토크특성 변화를 그림 7에서 확인할 수 있다. 고장이 증가함에 따른 3상전류와 공극 자속밀도의 불평형으로 인해 평균토크가 감소하고 토크 리플이 증가한다. 그림 8의 토크 리플 변동 그래프를 통하여 단락된 턴이 증가 할수록 리플이 증가하여 전동기의 진동이 심해짐을 확인할 수 있다. 그래서 고정자 절연파괴가 발생한 토크 특성을 분석하기 위해 그림 9에서 고장이 증가함에 따른 출력토크 고조파 분석을 수행하였다. 고조파 분석 결과, 단락된 비율이 증가 할수록 토크성분의 2고조파가 증가하였는데, 앞서 분석한 3상전류의 불평형과 순환전류에 의한 자계왜곡 현상에 의해 역상 성분이 증가한다.

그림 4 a상 입력전류 변화

Fig. 4 A-phase current variation

(a) 정상 상태
(a) Without an inter turn fault

(b) 고장 상태 (12.5% 단락)
(b) With an inter turn fault ($Fr=12.5\%$)

그림 5 자속밀도와 자속의 왜곡현상

Fig. 5 Distortion of magnetic flux density and flux line

그림 6 자속밀도 분포

Fig. 6 Distribution of flux density

그림 7 토크 특성

Fig. 7 Torque characteristics

그림 8 토크 리플 비율의 변동

Fig. 8 Variation torque ripple rate

그림 9 역상분 토크 성분
Fig. 9 Negative torque sequence

4. 실험 결과

4.1 Back-EMF 와 순환전류 특성

단락이 발생하면 Faulty turn($as2$)로 정의되어진 단락 코일이 증가하고, Healthy turn($as1$) 부분이 감소한다. 따라서 Healthy turn($as1$)에 유도되어지는 역기전력이 고장비율이 증가함에 따라 감소하는 현상을 그림 10에서 확인하였다. 다음의 비정현적인 역기전력은 전동기의 집중권 권선배치와 공극자계의 사각분포에 의해 발생되어진다[6].

고장자 절연과피에서 자기적 영향을 미치는 순환전류의 특성을 그림 11에 나타내었다. 순환전류의 시뮬레이션 결과를 보면, 고장이 증가 할수록 비선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 실험을 통하여 검증 하였다. 순환전류는 단락 코일이 많아질수록 인덕턴스 증가에 따른 동특성 현상을 보이며 고장 비율이 높지 않으므로 단락 코일에서 유도되는 순환전류의 값이 입력전류에 비해서 매우 크다. 그림 12에서는 a상 권선의 8.33%가 단락이 진행되었을 때, 입력전류의 위상과 순환전류의 위상을 비교 하였다. 순환전류는 공심코일에 유도되어 발생하는 전류이므로 전기적으로 180도 위상차를 가진다. 그리고 단락이 발생한 치 부분의 자속 밀도 불평형의 원인이 되며 출력특성에도 악영향을 미치게 된다.

(a) 시뮬레이션 결과
(a) Simulation result

(b) 실험 결과
(b) Experiment result

그림 10 역기전력 비교
Fig. 10 Back-EMF comparison

(a) 시뮬레이션 결과
(a) Simulation result

(b) 실험 결과
(b) Experiment result

그림 11 고장비율에 따른 순환전류
Fig. 11 Circulating current as fault fraction

(a) 시뮬레이션 결과
(a) Simulation result

(b) 실험 결과
(b) Experiment result

그림 12 입력전류와 순환전류의 위상 비교

Fig. 12 Phase angle comparison of input current and circulating current

4.2 입력전류 특성

고정자 절연파괴에서 전기적 영향을 미치는 3상 입력전류의 불평형을 그림 13에서 확인할 수 있다. 앞서 분석한 바와 같이 a상전류는 증가하고, BLDC 드라이버에서 동시에 통전되는 b, c상의 전류가 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이 현상으로 인하여 3상전류가 불평형을 이루고, 토크리플이 증가하게 된다. 그림 14에서 실험을 통하여 입력전류의 불평형 현상을 검증하였다.

(a) 정상 상태
(a) Without an inter turn fault

(b) 고장 상태 (8.33% 단락)
(b) With an inter turn fault (Fr=8.33%)

그림 13 3상 입력전류의 시뮬레이션 결과

Fig. 13 Simulation result of 3-phase current

(a) 정상 상태
(a) Without an inter turn fault

(b) 고장 상태 (8.33% 단락)
(b) With an inter turn fault (Fr=8.33%)

그림 14 3상 입력전류의 실험 결과

Fig. 14 Experiment result of 3-phase current

4.3 Motor Performance

그림 15는 실험적인 측정을 위한 테스트 장비를 보여준다. 단락을 위한 Tap에 단락용 동선을 연결하고, 순환전류는 2절에서 수행한 모델링을 바탕으로 단락권선을 따로 연결하여 회전자에 의해 유도되는 순환전류를 측정하였다. 그리고 전동기의 특성시험을 위한 실험 장비를 이용하였고, 고정자 절연파괴가 구현되어있는 테스트 IPM type 전동기의 성능 특성을 그림 16에서 확인할 수 있다. 고정자 권선 a상이 8.33% 단락되었을 때, 효율이 약 50% 감소하였고, 단락용 동선에 열이 크게 발생하며 진동이 심해짐을 확인하였다.

(a) 순환전류의 측정

(a) Measurement of i_f

(b) 전동기 실험 장비

(b) Measurement for experiment

그림 15 실험적인 측정을 위한 테스트

Fig. 15 Test equipment of experimental

(a) 정상 상태
(a) Without an inter turn fault

(b) 고장 상태 (8.33% 단락)
(b) With an inter turn fault (Fr=8.33%)

그림 16 성능 특성 시험

Fig. 16 Motor performance test

5. 결 론

본 논문은 고정자 절연과피 고장의 비선형 모델링을 제안하고 고장 발생시, 순환전류와 입력전류의 변화가 전동기의 출력특성에 미치는 영향을 분석하였다.

유한요소법(FEM) 기반의 시뮬레이션 결과를 통하여, 인버터에서 입력되는 전류는 단락이 진행될수록 불평형을 이루게 되고 순환전류의 영향으로 자속밀도가 포화되어 출력토크 평균이 저감하고, 토크 리플로 인한 진동과 소음이 증가함을 확인하였다. 또한, 제안된 모델의 타당성을 입증하기 위해 권선단락이 가능하도록 제작된 전동기와 6-스위치 인버터를 이용하여 동일한 고장 조건에서의 실험을 수행하고 NTI-특성 시험을 통하여 고정자 절연과피 고장이 전동기의 효율에 미치는 영향을 확인하였다.

표 1 IPM형 BLDC 전동기의 기기정수

Table 1 Specifications of IPM type BLDC motor

구분	값[단위]	구분	값[단위]
정격 용량	400 [W]	입력 전압	48 [V]
역기전력 (1000rpm)	8 [V]	고정자 인덕턴스	0.2 [mH]
고정자 저항	0.07 [Ohm]	상 수	3
정격 토크	1.10 [Nm]	슬롯 수	9
정격 속도	3500 [rpm]	극 수	6
정격 전류	13.58 [A]	상당 턴 수	72

감사의 글

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

참 고 문 헌

- [1] Jin Hur "Characteristic Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor in Electro-Hydraulic Power Steering System", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 6, pp2316-2322, June. 2008.
- [2] A. Jack, B. Mecrow, and J. Haylock, "A comparative study of permanent magnet and switched reluctance motors for high-performance fault tolerant applications", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-32, no.4, pp. 889-895, July/Aug. 1996.
- [3] Young-kook Lee "A Stator turn fault detection method and a fault tolerant operating strategy for interior PM synchronous motor drives in safety-critical applications", Ph.D. dissertation GIT, Aug. 2007.
- [4] S. B. Lee, R. M. Tallam, and T. G. Habetler, "A robust, on-line turn-fault detection technique for induction machines based on monitoring the sequence component impedance matrix," IEEE Trans. Power Electronics, vol. 18, no. 3, pp. 865-872, May 2003.
- [5] B. VASEGHI, B. NAHID-MOBAREKEH, N. TAKORABET and F. MEIBODY-TABAR, "Experimentally Validated Dynamic Fault Model for PMSM with Stator Winding Inter-turn Fault", IAS Annual Meeting, Oct. 2008.
- [6] T. J. E Miller, Design of Brushless Permanent Magnet Motor, Clarendon press, Oxford, 1994.

저 자 소 개

김 경 태 (金 耿 兌)

2010년 울산대학교 전기공학부 졸업, 공학사, 2010년~현재, 울산대학교 대학원 전기공학부 석사과정.

Tel : 052-259-1532

E-mail : kkt2782@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