

매입형 영구자석 BLDC 전동기의 고정자 권선 절연파괴 고장 해석.

Kyung-Tae Kim*, Jin Hur*, Byeong-Woo Kim*

Dept. of Electrical Engineering, University of Ulsan*

Daehak-ro 102, Nam-gu, Ulsan 680-749, Korea

Abstract

본 논문에서는 전동기의 고정자 권선 절연파괴 고장을 분석하고 자기 인덕턴스 변화의 비선형성을 고려하기 위해 FEM 시뮬레이션을 이용하여 고장 현상을 해석하고, 실험을 통해 검증하였다. 제안한 고장의 모델링을 통하여 고정자 권선에서 단락이 발생하면 단락된 권선의 순환전류에 의해 고정자에 자기 포화현상이 발생하고, 입력전류의 불평형에 의하여 평균토크가 감소하고, 토크리플이 증가함을 확인 하였다.

1. Introduction

BLDC 드라이버 기반의 IPM 전동기는 높은 출력밀도와 고효율 및 우수한 구동 특성으로 인하여, 다양한 전기 구동 시스템을 이용하는 산업에서의 사용이 증가하고 있다. 만약 산업현장의 구동 시스템에서 고장이 발생한다면 고장 지연 시간 동안의 작업이 중단되므로 피해가 심각할 것이고, EV의 구동 전동기에서 운전 중 고장이 발생한다면 인명피해의 위험도 발생할 수 있다. 그러므로 이러한 시스템에서 전동기의 고장에 대한 신뢰성이 매우 중요하다. [1]

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

전동기 고장은 크게 stator turn fault, power converter fault, mechanical fault 등의 이러한 원인 이외에도 영구자석 모터의 경우 회전자의 자석의 비산, 자석의 감자 등으로 인하여 발생하는 고장이 있고, 이러한 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)이다. [2]

고정자 권선 절연파괴 고장은 단락된 코일에서 열이 발생하고, 이 열은 순환전류의 제곱에 비례하여 급속히 한 상을 파괴시키기 때문에, 빠른 고장검출과 고장대응이 요구된다. [3]

본 논문에서는 IPM형 BLDC 전동기의 고정자 절연파괴 고장의 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

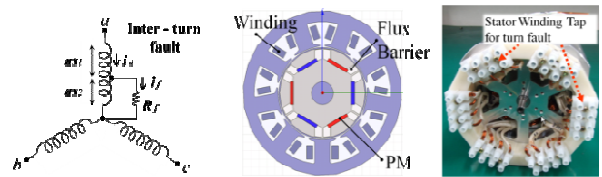


Fig.1 고장 등가회로

Fig.2 고장 테스트를 위한 전동기

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

순환전류(Circulating Current)란, 단락되어 입력전류가 흐르지 않는 공심 코일과 공극 자속의 상호작용으로 인하여 발생하는 유기 기전력에 의해 유도되는 전류이다. 그리고 순환전류는 입력전류의 왜곡현상을 발생시키고, 토크특성에 변화를 준다.

Fig.1는 inter turn fault를 나타내기 위한 모델링으로써, 한 상의 권선에 단락이 발생하면, 한 상의 코일은 as1과 as2 두 부분으로 분리해서 생각 할 수 있다. as1은 healthy turn, as2는 shorted turn 이고, as2 부분에 순환전류(if)가 발생한다.

Fig.2은 고정자 절연파괴 고장을 분석하기 위한 시뮬레이션 모델과 실험을 위한 동일한 기기정수의 IPM 전동기이다.

$$v_a = v_{as1} + v_{as2} = \left(R_s \cdot i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} + \frac{d\lambda_{pm}}{d\theta} \right) - \left(\mu \cdot R_f \cdot i_f + \frac{d(L_{am} \cdot i_f)}{dt} \right) \quad (1)$$

$$v_{as1} = (1 - \mu) \cdot \left[R_s \cdot i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} + \frac{d\lambda_{pm}}{d\theta} - \mu \frac{d\lambda_a'}{dt} \right] \quad (2)$$

$$v_{as2} = \mu \cdot \left[R_s \cdot i_a + \frac{d\lambda_a}{dt} + \frac{d\lambda_{pm}}{d\theta} - \mu \frac{d\lambda_a'}{dt} - R_s \cdot i_f \right] \quad (3)$$

Fig.1의 등가회로를 기준으로 a 상에 절연파괴 고장이 발생 하였다고 가정 하였을 때, a 상의 전압 방정식은 식(1)과 같고, (1)식에서 λ_a 는 a 상 권선 전류에 의한 쇄교자속, λ_{pm} 은 영구자석에 의한 쇄교자속, θ 는 전기각이다. 그리고 $L_{am} = L_{aa} - L_{js}$ 으로써, as1의 권선에서 as2의 영향을 고려한 자기 인덕턴스이다. [3]

Healthy turn (as1)과 faulty turn(as2)로 식(1)을 분리 해 보면, 식(2), (3)과 같다. 여기서 $\lambda_a' = L_{am} \cdot i_f$ 이고, 이것은 단락된 턴에 의해서 감소된 턴 수의 영향을 고려하기 위한 쇄교자속이다.

3. 분석 결과

3.1 시뮬레이션

본 논문의 시뮬레이션은 단락된 고장 부분을 증가시키면서, 순환전류와 입력전류의 변화를 분석하고 토크에 미치는 영향을 확인하였다.

Fig.3는 전동기의 출력 특성을 분석하고 자기포화 현상을 고려하기 위한 유한요소모델의 개요도이다. 제안한 시뮬레이션 모델과 드라이버의 고정자 절연과 파괴 현상을 구현하여 해석을 하였다.

Fig.4와 Fig.5은 단락이 진행됨에 따른 입력전류 변화와 입력전류의 고조파 분석이다. 고장으로 인한 턴 수 감소로 인해 드라이버에서 입력되는 전류가 증가하고 결국, 3상 입력전류의 불평형을 초래하게 된다. 그리고 입력전류의 고조파 분석을 통하여, 고장이 진행될수록 입력전류의 정상 성분(1st)과 역상 성분(2nd)이 증가하게 되므로 전동기의 출력 특성에 악영향을 준다.

입력전류의 변화에 가장 큰 영향을 주는 순환전류를 Fig.6에 나타내었다. 고장이 발생한 상의 단락 권선에는 단락된 경로를 통해 순환전류가 비선형적으로 증가하며 인덕턴스 성분에 의한 자체의 동특성을 가진다. 그리고 Fig.7에서 입력전류와 전기적으로 90도 차이를 가지는 순환전류의 위상을 확인 할 수 있다. 결과적으로 Fig.8에서 단락된 권선의 순환전류에 의해 발생하는 자속에 의해 단락이 발생한 권선이 감긴 치에서는 역자계 현상으로 인하여 자속밀도가 감소하여, 단락이 발생한 상의 나머지 치의 자속밀도는 증가하여 포화를 발생시킨다. 결국, Fig.9에서와 같이 토크 리플이 증가하고 평균토크가 감소한다.

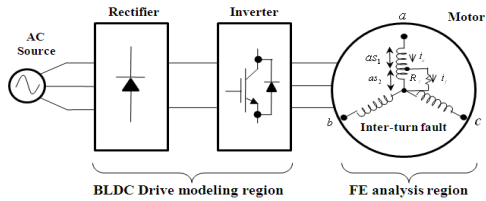


Fig.3. 고정자 절연과 파괴가 발생한 유한요소모델의 개요도

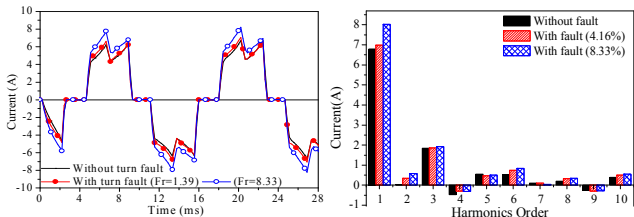


Fig.4 입력전류의 변화

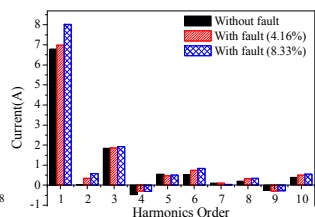


Fig.5 입력전류 고조파 분석

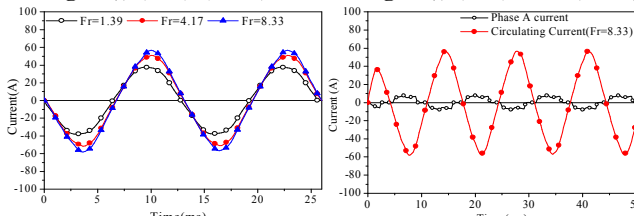


Fig.6 순환전류(I_f)의 변화

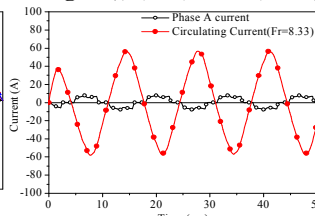


Fig.7 If와 I_a의 위상 비교

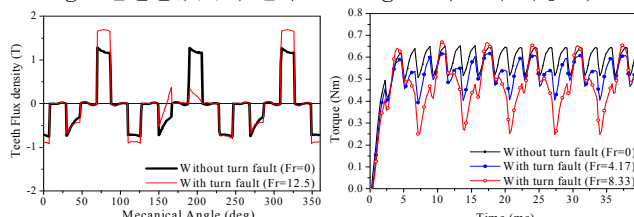


Fig.8 치 자속 분포

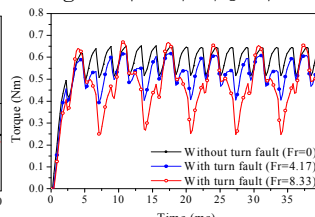


Fig.9 출력 토크 변화

3.2 실험

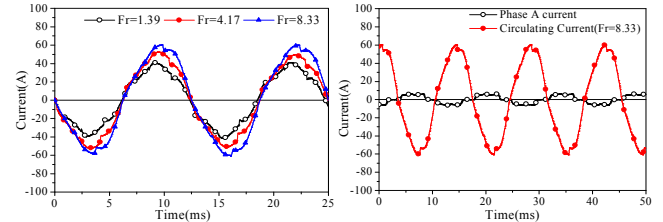


Fig.10 순환전류(I_f)의 변화

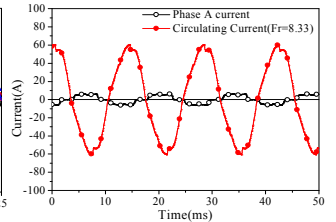
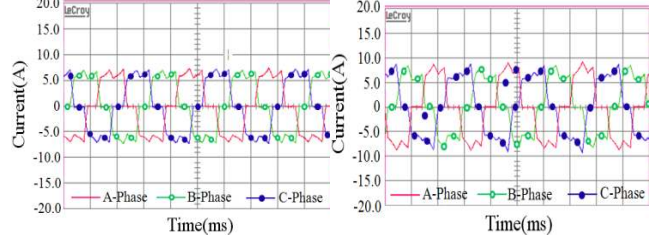


Fig.11 I_f와 I_a의 위상 비교



(a) With turn fault (Fr=1.39) (b) With turn fault (Fr=8.33)

Fig.12 입력 전류의 변화

본 논문에서 제안한 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 동일한 기기정수의 IPM Type 전동기의 권선에 단락이 진행 되었을 경우의 실험결과를 도출하였다.

Fig.10은 고장이 a상의 단락이 1.39%,4.17%,8.33% 발생시, 순환전류를 측정 한 것이고, Fig.11에서 입력전류 위상과 순환전류가 전기적으로 90도 차이가 나는 것을 확인 할 수 있다.

Fig.12에서 a상의 단락이 진행될수록 입력전류의 변화를 확인 할 수 있다. 고장이 발생한 A상의 전류는 증가하고, 인버터에서 A상과 통전되는 B, C상의 전류가 증가하였다.

4. 결론

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

유한 요소 법(FEM) 기반의 시뮬레이션 결과를 통하여, 인버터에서 입력되는 전류는 단락이 진행될수록 불평형을 이루게 되고 순환전류의 영향으로 자속밀도가 포화되어 출력 토크 평균이 저감하고, 토크 리플로 인한 진동과 소음이 증가함을 확인하였다.

제안된 모델의 타당성을 입증하기 위해 권선단락이 가능하도록 제작된 전동기와 6-스위치 인버터를 이용하여 동일한 고장 조건에서의 실험을 수행하였다.

Reference

- [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] 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.
- [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.