

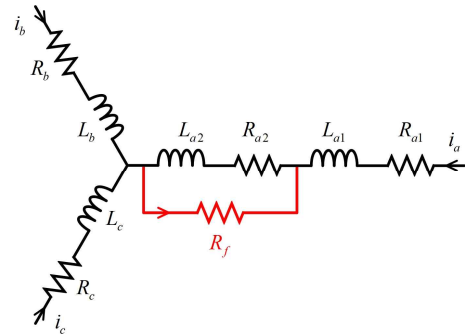
유도전동기의 전류 패턴에 따른 Inter-turn 고장진단법의 연구

김현우*, 민영근*, 김솔**, 이호준***, 배재남****, 이주*
 한양대학교*, 유한대학교**, 부산과학기술대학교**, 동양미래대학교****

Study on the Inter-turn Fault Diagnosis Method of Induction Motor According Current Pattern

Hyunwoo Kim*, Younggeun Min*, Sol Kim**, Ho-Joon Lee***, Jaenam Bae****, Ju Lee*
 Hanyang University*, YuHan University**, Busan Institute of Science And Technology***, Dongyang Mirae University****

Abstract - 본 논문은 유도전동기의 전류패턴에 따른 Inter-turn 고장진단법에 대한 연구이다. Inter-turn 고장이 발생한 유도전동기에 반시계방향으로 회전하는 회전자계를 입력하면 반시계방향으로 회전하는 성분뿐만 아니라 시계방향으로 회전하는 회전자계가 발생하게 된다. 이에 따라 고정좌표계에서 바라본 전류의 패턴이 변화하게 된다. 만약 Health인 경우에는 반시계방향으로 회전하는 회전자계에 의해 원의 패턴으로 발생하게 되지만 Fault인 경우에는 시계방향으로 회전하는 회전자계가 더해져 타원의 패턴이 발생하게 된다. 이를 검증하기 위해 연동 해석을 통해 Inter-turn 고장을 구현하였고, Health인 경우와 Fault인 경우의 전류패턴을 분석하였다.



1. 서 론

최근 전기자동차의 개발에 따라 전기자동차의 구동 모터의 개발이 이뤄지고 있다. 또한, 전기자동차의 신뢰성 문제가 대두되면서 전동기의 고장 진단 연구가 활발히 진행 중에 있다. 전동기의 고장은 고정자 고장, 회전자 고장으로 구분할 수 있다. 고정자 고장은 한 상과 다른 상 사이의 고장, 한 상과 중성점사이의 고장, 권선과 권선 사이의 고장 등이 있고, 회전자 고장은 Broken bar, 편심 고장, 베어링 고장, 영구자석 감자 등이 있다. 이 중에서도 베어링 고장은 69[%]로 제일 높은 비중을 차지하며 그 다음으로는 권선 고장이 21[%]로 높은 비중을 차지한다[1]. 따라서 권선 고장진단에 대한 연구가 활발히 이뤄지고 있다.

전동기의 고장진단에는 online과 offline 진단법이 있다. online 진단법은 전동기 구동 중에 고장진단을 수행하는 방법이다. 반면, offline 진단법은 전동기를 정지시킨 상태에서 수행하는 방법이다. online 진단법의 경우 구동 중에 고장진단을 수행할 수 있기 때문에 실시간으로 고장이 파악할 수 있다. 하지만, 전동기 구동 제어와 고장 진단 제어를 모두 수행해야하므로 DSP에 부하가 커져 고장진단 성능이 저하될 수 있다. 반면, offline 진단법의 경우 전동기의 정지상태에서 진단하므로 실시간 고장진단을 할 수 없으나 구동 중에 발생하는 외란이 존재하지 않으므로 고장진단 성능을 향상시킬 수 있다[2].

본 논문에서는 offline 진단법을 이용하여 유도전동기의 Inter-turn 고장 진단을 수행하였다. 유도전동기의 Inter-turn 고장시 전압방정식으로부터 전류를 구하였고, 전류패턴을 분석하였다. 또한, Finite Element Analysis (FEA)를 통해 유도전동기의 정지상태에서 인버터를 통해 정상분 전압을 인가하였고, 정지좌표계에서 전류패턴을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 유도전동기의 Inter-turn 고장시 전압방정식

Inter-turn 고장이 발생하게 된다면 고장이 발생한 권선과 고장이 발생하지 않은 권선으로 나뉘게 되고, 고장이 발생한 권선에는 병렬로 접촉저항이 발생하게 된다. 따라서 A상에 Inter-turn 고장이 발생할 경우 <그림 1>과 같이 수학적 모델을 나타낼 수 있다. 수학적 모델을 통해 유도전동기의 고정좌표계에서 전압방정식을 구하면 식 (1)과 같다. 또한, 식 (1)의 전압

<그림 1> 정상분과 역상분 전류에 따른 전류패턴

정식을 정상분과 역상분으로 표현하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[3].

$$\begin{aligned}
 [v_{\alpha\beta s}] &= [R_s][i_{\alpha\beta s}] + [L_s][\dot{i}_{\alpha\beta s}] + [L_{sr}]\frac{d}{dt}[i_{\alpha\beta r}] \\
 &\quad - \frac{2}{3}\mu R_s \begin{bmatrix} i_f \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{2}{3}\mu L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_f \\ 0 \end{bmatrix} \\
 [v_{\alpha\beta r}] &= [R_r][i_{\alpha\beta r}] + [L_r][\dot{i}_{\alpha\beta r}] + [L_{sr}]\frac{d}{dt}[i_{\alpha\beta s}] \\
 &\quad + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & -L_{sr} \\ L_{sr} & 0 \end{bmatrix} [i_{\alpha\beta s}] + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & -L_r \\ L_r & 0 \end{bmatrix} [i_{\alpha\beta r}] \\
 &\quad - \frac{2}{3}\mu L_{sr} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_f \\ 0 \end{bmatrix} - \frac{2}{3}\mu \omega_r L_{sr} \begin{bmatrix} 0 \\ i_f \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $v_{\alpha\beta s}$ 는 정지좌표계의 고정자 전압, $v_{\alpha\beta r}$ 는 정지좌표계에서의 회전자 전압, $i_{\alpha\beta s}$ 는 정지좌표계에서의 고정자 전류, $i_{\alpha\beta r}$ 는 정지좌표계에서의 회전자 전류, R_s, R_r 은 고정자 저항과 회전자 저항, ω_r 는 회전자의 속도, L_s, L_r, L_{sr} 은 각각 고정자 자기인덕턴스, 회전자 자기인덕턴스, 상호인덕턴스, μ 는 Health 턴수와 Fault 턴수의 비율, i_f 는 접촉저항에 흐르는 전류이다.

$$\begin{aligned}
 V_{sp} &= (R_s + j\omega_e L_s)(I_{sp} - 1/3\mu I_f) + j\omega_e L_{sr} I_{rp} \\
 V_{sn} &= (R_s + j\omega_e L_s)(I_{sn} - 1/3\mu I_f) + j\omega_e L_{sr} I_{rn} \\
 0 &= (R_r/s + j\omega_s L_r)I_{rp} + j\omega_e L_{sr}(I_{sp} - 1/3\mu I_f) \\
 0 &= (R_r/(2-s) + j\omega_e L_r)I_{rn} + j\omega_e L_{sr}(I_{sn} - 1/3\mu I_f) \\
 \mu(V_{sp} + V_{sn}) &= \mu(1 - 2/3\mu)(R_s + j\omega_e L_s)I_f + R_f I_f
 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 V_{sn}, V_{sp} 는 각각 정상분, 역상분 전압, I_{sp}, I_{sn} 은 각각 정상분, 역상분 전류, ω_e 는 동기회전속도, s 는 슬립이다.

2.1.1 유도전동기의 Inter-turn 고장시 전류

어드미턴스 행렬을 이용하여 식 (2)를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} I_{sp} \\ I_{sn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{pp} & Y_{sn} \\ Y_{sn} & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sp} \\ V_{sn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$Y_{pn} = Y_{np} = \frac{\mu^2/3}{R_f + \mu(R_s + j\omega_e L_{ls})}$$

여기서 Y_{pp} 와 Y_{nn} 은 각각 정상분, 역상분 어드미턴스, Y_{pn} , Y_{np} 는 Fault에 의해 발생하는 정상분과 역상분 간의 어드미턴스이다.

식 (3)으로부터 알 수 있듯이 Health상태에서 Y_{pn} 는 존재하지 않으므로 정상분 전압을 인가하면 정상분 전류만 존재하게 된다. 하지만, Inter-turn 고장이 발생할 경우에는 정상분 전류뿐만 아니라 역상분 전류도 발생하게 된다. 따라서 Health상태와 Fault상태에서 고정좌표계에서 정상분과 역상분의 전류에 따른 특성을 분석한다면 고장진단을 수행할 수 있다.

2.1.2 정상분과 역상분에 의한 전류패턴

고정좌표계에 정상분과 역상분 전류가 존재할 경우 식 (4)와 같은 전류가 발생하게 된다.

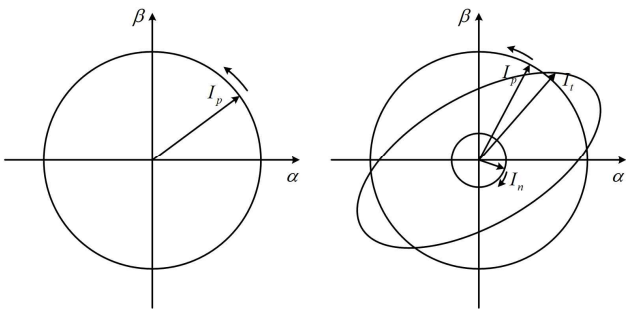
$$I_t = I_p e^{j(\omega t + \theta_p)} + I_n e^{-j(\omega t + \theta_n)} = I_\alpha + jI_\beta \quad (4)$$

$$I_\alpha = I_p \cos(\omega t + \theta_p) + I_n \cos(\omega t + \theta_n)$$

$$I_\beta = I_p \sin(\omega t + \theta_p) - I_n \sin(\omega t + \theta_n)$$

식 (4)를 이용하여 고정좌표계의 전류의 관계식을 구하면 식 (5)와 같이 나타나며 타원방정식으로 나타난다. 따라서 전류패턴이 타원으로 발생한다는 것을 알 수 있다. <그림 2>는 정상분 전류만 존재할 경우 전류패턴과 정상분과 역상분 전류가 존재할 경우 전류 패턴을 나타낸다.

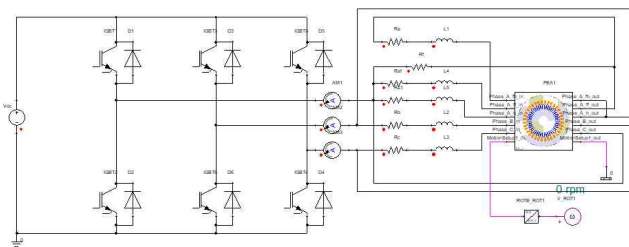
$$AI_\alpha^2 + BI_\alpha I_\beta + CI_\beta^2 = 1 \quad (B^2 - 4AC < 0) \quad (5)$$



(a) 정상분 성분 (b) 정상분과 역상분 성분
 <그림 2> 정상분과 역상분에 따른 전류패턴

2.2 Inter-turn 고장진단 시뮬레이션

유도전동기의 Inter-turn 고장시 전류패턴을 분석하기 위해 <그림 3>과 같은 FEA를 구현하였다. <그림 3>에서 나타낸 것과 같이 A상에 Inter-turn 고장이 발생하도록 구현하였고, 정상분 전압을 인가하기 위한 인버터를 구현하였다. 고장진단 시뮬레이션 조건은 <표 1>과 같다.



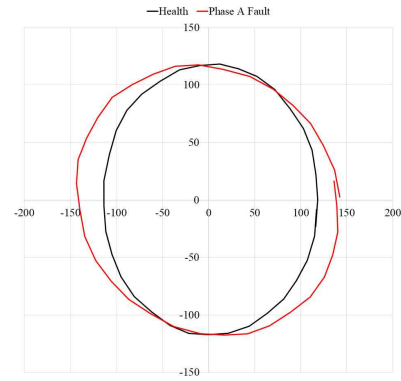
<그림 3> Inter-turn 고장진단을 위한 FEA 모델

<표 1> 고장진단 시뮬레이션 조건

DC Voltage [V]	Frequency [Hz]	Switching Frequency [kHz]	Fault Resistance [mΩ]
48	300	10	4.3

2.2.1 고장 상에 따른 전류패턴

<그림 4>는 유도전동기에 정상분 전압을 인가했을 때 고정좌표계에서의 전류패턴을 나타낸다. 유도전동기의 전압방정식으로부터 도출한 결과와 동일하게 정지좌표계에서 전류패턴은 Health일 때 원으로, Fault일 때 타원으로 나타남을 확인하였다.



<그림 4> Inter-turn 고장진단 FEA 결과

3. 결 론

본 논문은 Inter-turn 고장에 따른 유도전동기의 전류 패턴을 분석하였다. Health상태에 유도전동기에 정상분 전압을 인가하게 된다면 정상분 전류만 발생하여 전류패턴이 원으로 발생한다. 반면, Inter-turn 고장이 발생할 경우 정상분 전류뿐만 아니라 역상분 전류도 발생하므로 전류패턴이 타원으로 발생하게 된다. 따라서 고정좌표계에서 전류패턴을 분석한다면 유도전동기의 Inter-turn 고장진단을 수행할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20174030201750)

본 연구는 2018년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2018201010633A)

[참 고 문 헌]

- [1] A. H. Bonnett and C. Yung, "Increased Efficiency Versus Increased Reliability - A comparison of pre-EPAct, EPAct, and premium-efficient motors", IEEE Ind. Appl. Magazine, vol. 14, pp. 29-36, Jan-Feb 2008.
- [2] B. Du, S. Wu, S. Han and S. Cui, "Interturn Fault Diagnosis Strategy for Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor of Electric Vehicles Based on Digital Signal Processor", IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 63, no. 3, pp. 1694-1706, Mar. 2016.
- [3] R. M. Tallam, T. G. Habetler and R. G. Harley, "Transient Model for Induction Machines With Stator Winding Turn Faults", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 38, no. 3, pp. 632-637, May/June 2002.