

고정자 절연파괴 고장에 의한 매입형 영구자석 BLDC 모터의 불가역 감자에 대한 동적해석 알고리즘

Dynamic Analysis Algorithm of Irreversible Demagnetization of IPM-type Brushless DC Motor by Stator Turn Fault

이 윤 석* · 김 경 태* · 허 진†
(Yoon-Seok Lee · Kyung-Tae Kim · Jin Hur)

Abstract - This paper studies the dynamic irreversible demagnetization characteristics of an interior permanent magnet (PM) brushless DC motor with a stator turn fault. A new algorithm, which is a finite element method (FEM) combined with a line voltage equation of the motor, is developed to analyze irreversible demagnetization under dynamic and transient states and considers a stator turn fault. The input current, circulating current, magnetic distribution characteristics, and operating property of the PM, including the irreversible demagnetization in the fault state, are analyzed using this algorithm by considering the magnetic saturation effect. The feasibility of the proposed method confirmed from the analysis results is verified via an experiment. Through this fault analysis, we can accurately check the fault phenomena of a PM motor against the demagnetization fault for fault prevention.

Key Words : Demagnetization, Finite-element method, Stator turn fault, Permanent magnet motors

1. 서 론

매입형 영구자석 brushless DC(BLDC) 모터는 고성능 및 고효율 그리고 고신뢰성 덕분에 산업계에서 많이 사용되고 있다. 특히 영구자석 중에 네오디움 영구자석은 높은 자기 에너지와 보자력을 가지고 있으며 네오디움 자석의 필수 원소인 디스프로슘(Dy)와 같은 중희토류 성분 덕분에 고온 환경에서도 사용할 수 있기 때문에 전기자동차, 산업용모터뿐만 아니라 다양한 응용분야에서 많이 사용되고 있다. 그러나 네오디움 자석의 높은 신뢰성에도 불구하고 모터에 고장이 발생했을 때는 네오디움 자석 또한 자기적 특성을 잃어버릴 수 있다. 모터 고장에는 크게 Stator turn fault, Power converter fault, Mechanical fault 고장이 존재한다. 특히 고장 중 가장 발생 확률이 높은 고장에는 진동이나 단자간의 파부하, 외부물질 유입, 제작상의 불량 등으로 인하여 권선의 절연이 점차적으로 파괴되어 단락이 발생하는 고정자 절연파괴 고장(stator turn fault)이 존재한다[1-3]. 고정자 절연파괴 고장이 발생이 되면 3상 입력전류가 왜곡되고 증가하며 단락된 코일에서 입력전류에 수배 높은 전류가 흐르며 따라서 흐르는 전류의 제곱에 비례하여 열이 발생한다. 이 열은 인접한 코일의 절연을 파괴하고 빠르게 전파되어 결국에 한 상 전체의 고장을 유발한다. 영구자석의 불가역 감자는 한 상전체가 고장이 나기 전에 발생이 된다. 최초

고정자 절연파괴 고장이 발생하고 고장권선이 증가 할수록 입력전류가 증가하게 되면 영구자석의 불가역감자에 영향을 미치는 온도와 전기자반작용 효과 중 전기자 반작용 효과를 상승시킴으로써 영구자석에 불가역 감자 고장이 발생하게 된다. 불가역감자 고장으로 인한 역기전력 감소와 고정자 절연파괴 고장으로 인한 입력전류의 증가가 더해져서 모터의 상태는 더욱 빠르게 악화된다. 만약 온도가 상온이나 낮은 온도에서 구동하는 모터에서는 전기자반작용 효과가 증가하더라도 가역감자만 발생하지만 고온 환경에서 구동하는 영구자석 모터 같은 경우 온도증가로 인한 변곡점의 상승으로 인하여 불가역감자 고장 발생 하게 된다. 특히, 전기자동차나 항공분야와 같은 안전이 필수적인 응용분야에서는 이러한 고장은 매우 큰 인명피해 및 재산피해를 가져올 수 있다. 따라서 이러한 응용분야에 사용되는 모터를 설계할 때는 고장분석을 통한 설계가 필수적으로 선행되어야 한다.

모터의 불가역감자에 대한 이전의 연구는 회전자 잠김상태와 기동상태와 같은 회전자가 정적인 상태에서의 연구만 이루어져 왔다[4-6]. 고정자 절연파괴고장은 모터의 회전자가 회전하는 동적인 상태에서 주로 발생되기 때문에 동적인 상태에서의 분석이 반드시 필요하다. 따라서 본 논문에서는 매입형 영구자석 BLDC 모터의 고정자 절연파괴 고장으로 인한 불가역감자가 일어나는 현상을 동적인 상태에서 분석하기 위해 유한요소법과 모터의 선간 전압방정식이 결합된 영구자석의 불가역감자 해석 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘을 이용하여 고정자 절연파괴 고장 시에 과도상태의 입력전류와 순환전류, 모터의 자기적 분포특성, 영구자석의 동작 특성, 불가역감자 진행특성을 자기포화효과를 고려하여 분석을 하였다. 그리고 분석결과는 실험적으로 증명하였다.

* School of Electrical Eng. University of Ulsan, Korea

† Corresponding Author : School of Electrical Eng., University of Ulsan, Korea

E-mail : jinhur@ulsan.ac.kr

Received : September 25, 2013; Accepted : November 13, 2013

2. 유한요소 정식화와 제안된 알고리즘

2.1 고정자 절연파괴 고장 모델

고정자 절연파괴 고장은 모터의 권선이 열적, 기계적, 전기적 스트레스를 받음으로써 권선절연이 파괴되어 의도치 않은 부분에서 단락이 일어나서 발생하는 고장이다[7-9]. 고정자 절연파괴 고장이 발생을 하면 단락된 권선은 주권선과는 독립이 된다. 다시 말해서 고장이 발생한 권선은 주권선의 전기적 회로 변수에 의한 영향을 받지 않게 된다. 그러나 영구자석과 주권선과의 상호작용에 의해 발생하는 자속에 의하여 독립된 고장권선에는 유기기전력이 발생하고 그에 따라서 순환전류(Circulating Current)가 단락권선에 흐르게 된다. 고장권선은 권선저항과 누설인덕턴스가 굉장히 작기 때문에 입력전류에 비해 굉장히 큰 전류가 흘러 입력전류를 왜곡시킨다. 고장권선이 증가할수록, 3상 입력전류는 증가하고 반면에 고장권선의 저항증가로 순환전류는 감소하게 된다.

그림 1은 3상 권선에 고정자 절연파괴 고장이 발생했을 때의 고장 모델을 나타낸다. 코일과 코일사이의 단락으로 인하여 고장권선은 자기적으로는 연결이 되었지만 전기회로적으로는 주권선과는 분리가 되었다.

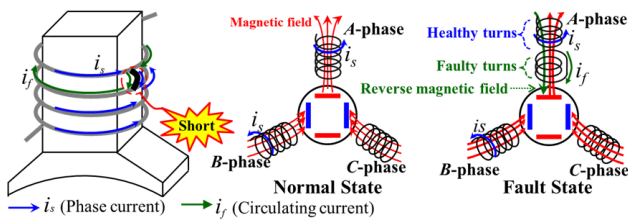


그림 1 고정자 절연파괴 고장이 일어난 3상권선의 고장모델
Fig. 1 Turn fault model of a three phase winding with a stator turn fault

2.2 유한요소 정식화

영구자석 BLDC 모터의 2차원 지배 방정식은 자기벡터 포텐셜 A에 대하여 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j_0 - \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} + \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (1)$$

여기서 μ , J_0 , M_x , M_y 는 각각 투자율과 전류밀도 그리고 자화 M의 x와 y성분을 나타낸다.

영구자석 BLDC모터는 일반적으로 120°구형과전압에 의해 구동이 된다. 만약 이상적인 BLDC드라이버 회로인 경우에는 단지 두 개의 상만 통전이 되지만 실제의 드라이버 회로는 이상적이지 못하여 MOSFET와 같은 스위칭 소자의 환류다이오드를 통하여 인덕터의 에너지를 소비하는 환류모드가 존재한다. 환류모드 때문에 주전류루프와 환류전류루프 2개의 전류루프가 회로에 흐르게 되고 구동 시에 환류모드와 비환류모드를 반복적으로 전환하며 동작하게 된다. 그림 2는 정상상태의 영구자석 BLDC 모터의 통전상태를 보여준다. 정상상태의 환류모드 시의 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 2R_s i_1 + 2L_s \frac{di_1}{dt} + \frac{d\phi_a}{dt} - \frac{d\phi_c}{dt} &= V_{dc} \\ 2R_s i_2 + 2L_s \frac{di_2}{dt} + \frac{d\phi_a}{dt} - \frac{d\phi_b}{dt} + V_d &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 R_s , L_s , i_1 , i_2 , V_{dc} , V_d 는 각각 상 저항, 상 누설인덕턴스, 선간 전류, 순환전류, DC link단 전압, 환류다이오드의 전압강하이다. ϕ 는 영구자석에 의해 각 상에 쇄교되는 자속을 의미한다. (2)의 두 번째 방정식을 제외시키면 정상상태의 영구자석 BLDC 모터의 비환류모드 방정식을 구할 수 있다.

영구자석 BLDC 모터에 고정자권선고장이 발생할 경우에는 정상회로와는 독립된 전류루프인 순환전류루프가 만들어지기 때문에 그림 3과 같이 총 3개의 전류루프가 있게 된다. 구동 시에 순환전류루프에는 순환전류가 지속적으로 흐르고, 환류전류 루프는 환류모드와 비환류모드를 전환하면서 흐르므로 드라이버 회로는 지속적으로 2개의 전류루프와 3개의 전류루프를 전환하게 된다. 고정자 절연파괴 고장이 발생한 영구자석 BLDC 모터의 선간전압방정식은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} 2R_s i_1 + 2L_s \frac{di_1}{dt} + \frac{d\phi_a}{dt} - \frac{d\phi_c}{dt} &= V_{dc} \\ 2R_s i_2 + 2L_s \frac{di_2}{dt} + \frac{d\phi_a}{dt} - \frac{d\phi_b}{dt} + V_d &= 0 \\ R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + \frac{d\phi_f}{dt} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

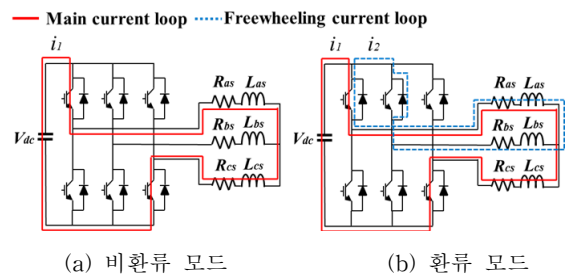


그림 2 정상상태의 영구자석 BLDC모터의 통전상태
Fig. 2 Commutation state of PM BLDC motor in normal state

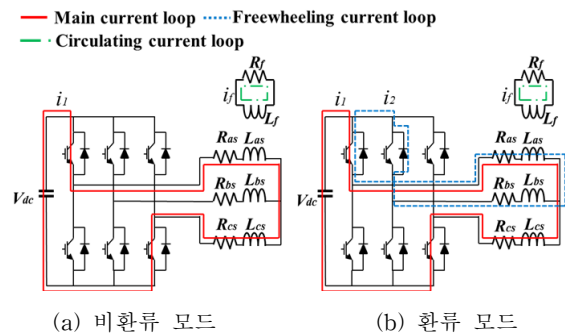


그림 3 고장상태의 영구자석 BLDC 모터의 통전상태
Fig. 3 Commutation state of PM BLDC motor in fault state

여기서 R_f, L_f, i_f 는 각각 고장권선의 저항, 고장권선의 누설인덕턴스, 순환전류를 나타낸다. (3)의 2번째 방정식을 제외시키면 비환류모드 시의 영구자석 BLDC 모터의 선간전압방정식이 된다.

영구자석 BLDC 모터의 계행렬 방정식은 기기의 선간전압방정식과 지배방정식의 결합에 의해 구성된다. 정상상태의 영구자석 BLDC 모터의 계행렬 방정식은 (1)과 (2)의 결합에 의해 다음과 같이 구성된다.

$$\begin{bmatrix} [S] & [C_1] & [C_2] \\ [F_1] & -\Delta t(2R_s + 2L_s)/l_f & 0 \\ [F_2] & 0 & -\Delta t(2R_s + 2L_s)/l_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A]^{1+\Delta t} \\ i_f \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ [F_1] & -\Delta t(2L_s)/l_f & 0 \\ [F_2] & 0 & -\Delta t(2L_s)/l_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A]^t \\ i_f \\ i_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J_0] \\ -\Delta t(V_{dc})/l_f \\ \Delta t(V_f)/l_f \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서 S, C, F, l_f 는 각각 투자율과 관련된 행렬, 고정자의 권선과 관련된 행렬, 역기전력과 관련된 행렬, 모터의 축방향 길이를 나타낸다. (4)의 3번째 행과 열을 제외시키면 비환류모드 시의 계행렬 방정식을 얻을 수 있다.

고정자 절연과 고장시의 영구자석 BLDC 모터의 계행렬 방정식은 (1)과 (3)의 결합에 의하여 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S] & [C_1] & [C_2] & [C_f] \\ [F_1] & -\Delta t(2R_s + 2L_s)/l_f & 0 & 0 \\ [F_2] & 0 & -\Delta t(2R_s + 2L_s)/l_f & 0 \\ [F_f] & 0 & 0 & -\Delta t(R_f + L_f)/l_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A]^{1+\Delta t} \\ i_f \\ i_f \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ [F_1] & -\Delta t(2L_s)/l_f & 0 & 0 \\ [F_2] & 0 & -\Delta t(2L_s)/l_f & 0 \\ [F_f] & 0 & 0 & -\Delta t(L_f)/l_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A]^t \\ i_f \\ i_f \\ i_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J_0] \\ -\Delta t(V_{dc})/l_f \\ \Delta t(V_f)/l_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

(5)의 3번째 행과 열을 제외시키면 고장상태의 영구자석 BLDC 모터의 비환류모드시 계행렬 방정식을 얻을 수 있다.

2.3 불가역 감자 알고리즘

그림 4은 고정자 절연과 고장이 발생한 영구자석 BLDC 모터의 불가역감자를 동적으로 해석하기 위한 알고리즘이다. 알고리즘의 흐름은 정상상태에서 시작하여 임의로 정한 특정 시점에서 고정자 절연과 고장이 발생하고 점차 고장권선의 수가 증가하게 된다. 고장권선수가 증가할수록 입력전류가 왜곡이 되며 증가를 하게 되며 결과적으로 입력전류증가에 의한 전기자반작용 효과가 커지기 때문에 불가역감자가 발생하게 된다. 본 알고리즘에서는 정상상태에서는 수식(4)과 같은 정상상태의 BLDC모터의 계행렬 방정식을 이용하여 유한요소해석을 하고, 고장이 발생한 순간부터는 수식(5)과 같은 고장상태의 BLDC모터의 계행렬 방정식을 이용하여 자기벡터포텐셜, 선간전류, 순환전류를 구하게 된다. 전체요소의 자속밀도를 구하기 위해 유한요소해석에서 계행렬 방정식을 풀어서 구해진 해인 자기벡터포텐

셜이 이용이 되고 비선형특성을 가지고 있는 철심의 포화효과가 고려되어서 전체요소의 자속밀도 구한다. 그 중에 영구자석 요소의 자속밀도와 알고리즘에 삽입되어 있는 영구자석의 B-H곡선을 이용하여 불가역감자의 발생을 판단을 하게 된다. 영구자석의 불가역 감자에 대한 해석은 각각의 영구자석 요소들마다 판단을 하게 되며 현재의 영구자석의 요소가 불가역감자가 되지 않았다면 기존의 자속밀도를 그대로 다음해석에 사용되고 만약 불가역감자가 되었으면 불가역감자의 정도에 따라서 다음해석에서 그 영구자석 요소에는 감소된 잔류자속밀도로 갱신된다. 결과적으로 고정자 절연과 고장과 더불어 영구자석이 불가역 감자로 인해 입력전류는 더욱 왜곡되고 증가하게 된다.

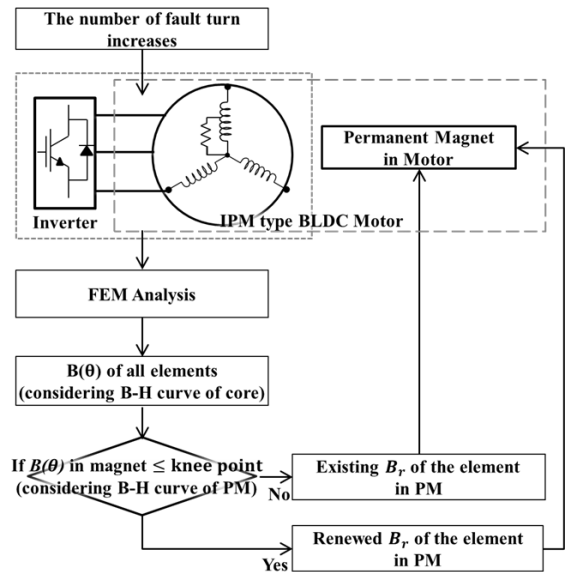


그림 4 불가역감자 알고리즘
Fig. 4 Irreversible demagnetization algorithm

3. 시뮬레이션 결과

영구자석은 정상적인 구동을 할 수 있는 최대 온도치인 150[°C]의 영구자석 B-H곡선이 사용되었다. 시뮬레이션은 정상상태에서 시작하여 고정자 절연과 고장이 11.11[ms]에서 발생시켰고 점차 고장권선의 권선수를 증가시켰다. 실제 모터의 인버터가 회로보호를 위해 전류제한이 50[A]가 설정 되어 있기 때문에 해석에서 전류가 50[A]가 되었을 때 해석을 종료하였다.

3.1 입력전류

그림 5는 알고리즘에 의해 계산된 입력전류 파형이다. 정상상태에서는 3상전류가 크기도 같고 파형 또한 대칭적이다. 11.11[ms]에서 4턴 고장이 발생했을 때 입력전류가 왜곡되고 전류가 증가하였고 과도상태 이후에는 크기를 유지하였다. 31.11[ms]에서 8턴 고장이 발생하였고 4턴 고장이 발생했을 때 보다 전류가 더 왜곡되고 증가하였다. 8턴에서 입력전류의 상승으로 인한 전기자 반작용 효과가 증가하여 자석을 불가역감자를 시켰고, 불가역감자로 인하여 전류가 지속적으로 증가함을 확인할 수 있다. 전류가 지속적으로

증가를 하다가 인버터 전류 제한 값인 50[A]에 도달 하고 잠시 뒤 50[ms]에 도달하였을 때 해석을 종료하였다. 그림 6은 순환전류 파형이다. 정상상태에서는 순환전류가 0[A]이다가 11.11[ms]에서 고장이 발생했을 때 정상상태 입력전류보다 약 4배의 전류가 급격하게 고장권선에 흐름을 확인할 수 있다. 권선의 열은 전류의 제곱에 비례해서 발생을 한다. 만약 고장이 발생하면 정상상태의 입력전류의 4배의 전류가 권선에 흐르기 때문에 고장권선에서 발생하는 열로 인하여 고정자 절연과피 고장이 빠르게 번져갈 것이라는 예상을 할 수 있다. 31.11[ms]에서 8턴 고장이 발생했을 때는 순환전류가 줄어들었다. 그 이유는 고장권선이 증가해서 저항이 증가하고 고장권선에 흐르는 순환전류가 같은 치의 정상 전류와는 180도 위상차를 가져서 순환전류의 기자력이 영구자석에서 발생한 자속을 상쇄시키기 때문이다.

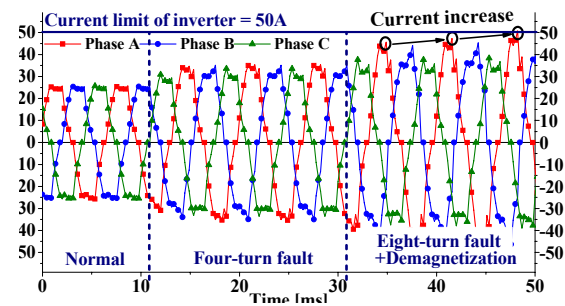


그림 5 입력전류 파형
Fig. 5 Input current wave form

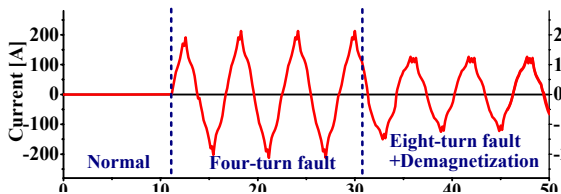


그림 6 순환전류 파형
Fig. 6 Circulating current wave form

3.2 자기적 분포 특성과 불가역감자 진행과정

그림 7은 영구자석 BLDC 모터가 A상과 B상이 통전하는 시점에 정상상태와 고장상태의 자속밀도분포 특성을 보여준다. 시뮬레이션에서 고정자 절연과피 고장은 A상의 첫 번째 치에 감겨있는 권선에 발생을 시켰다. 정상상태에서는 자속 밀도분포가 대칭적인 분포를 보이고 자속 장벽(barrier) 윗부분의 림(rib)을 제외 하고는 자기포화가 발생하지 않았다. 고정자 절연과피 고장이 발생했을 때는 모터의 전체적인 자속분포가 비대칭적인 분포를 보이고 A상 고장권선의 기자력의 방향이 같은 치에 감겨있는 정상권선의 기자력의 방향과 반대이기 때문에 고장권선에서 발생하는 자속이 같은 치의 정상권선에서 발생하는 자속을 상쇄시켜서 고장권선을 가지는 치부분의 자속밀도가 정상상태보다 현저히 줄어들음을 확인할 수 있다. 고장권선을 가지는 치는 자속밀도가 작아지지만 고장이 발생한 A상의 다른 두 개의 치와 고장이 발생하지 않은 B와 C상의 치들의 자속밀도는 입력전류

의 증가로 인하여 자속밀도가 증가하게 된다. 입력전류의 상승에 의한 자속밀도 증가로 자료가 좁은 치의 슈(Shoe)부분은 자기포화가 일어나는 것을 확인할 수 가 있다. 그림 8

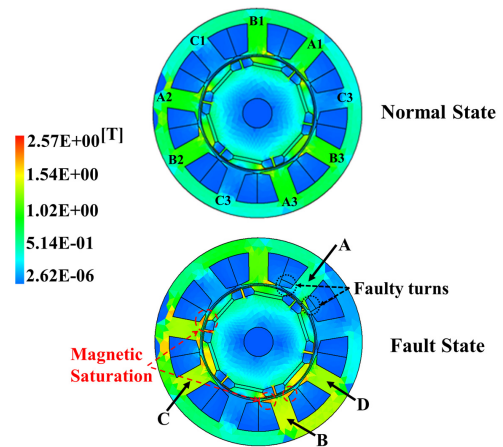
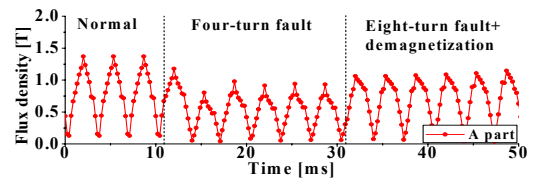
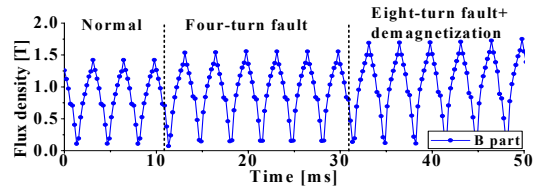


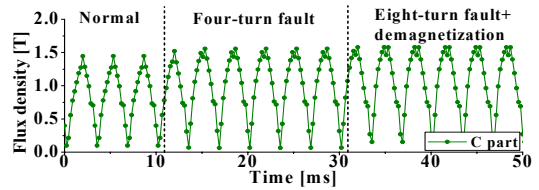
그림 7 자속밀도 분포
Fig. 7 Magnetic flux density distribution



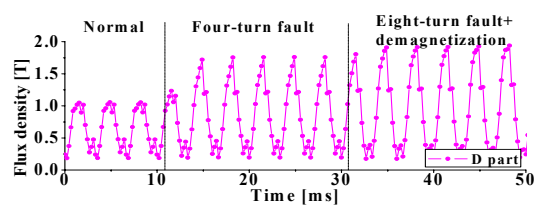
(a) A요소의 자속밀도



(b) B요소의 자속밀도



(c) C요소의 자속밀도



(d) D요소의 자속밀도

그림 8 요소의 자속밀도
Fig. 8 Flux density in the elements

은 주요 요소의 정상상태부터 8턴 고장상태까지의 자속밀도 변화를 나타낸다. 기호 A는 고장권선을 가지는 치의 요소를 나타내고 B는 고장상의 고장권선을 가지지 않는 치의 요소, C는 정상상의 정상치의 D는 치의 슈부분의 요소를 나타낸다. 정상상태 일 때는 3상의 치의 자속밀도들이 크기와 형태가 거의 같은 파형을 가지고 있는 것을 확인 할 수 있고 고장이 발생했을 때 A요소의 자속밀도가 급격하게 감소가 되는 것으로 보아 순환전류에 의한 자계가 정상권선의 자계를 상쇄시킴을 확인 할 수 있다. B요소와 C요소의 자속밀도는 입력전류의 증가로 인하여 증가를 하였고 상대적으로 자료가 좁은 D요소에서는 정상상태 자속밀도가 약 1[T]였지만 약 2[T]까지 자속밀도가 올라가면서 자기포화가 이루어짐을 확인할 수 있다.

그림 9는 해석시간 전체영역에 대하여 영구자석의 B-H곡선 상에서의 영구자석의 Weak point의 동작특성을 나타낸다. Weak point는 그림 10에 보이듯이 불가역감자가 가장 쉽게 일어나는 영구자석의 부분으로 정의하였다. 일반 상온이나 낮은 온도에서 동작하는 영구자석 모터인 경우 영구자석의 B-H곡선의 변곡점이 3사분면에 존재하여 전기자반작용에 의한 불가역감자에 대한 내성이 강하지만 위 논문에서 사용된 모터와 같이 고온 환경에서 사용되는 모터인 경우 환경온도와 내부 손실에 의한 열로 인하여 자석의 온도가 상승으로 감자에 취약하게 된다. 본 논문에서는 모터가 정상구동을 안전하게 할 수 있는 영구자석의 최대온도인 150 [°C]에서 해석을 하였다. 영구자석의 온도가 20[°C]에서는 변곡점이 2사분면에서 볼 수가 없고 150[°C]에서 변곡점이 3사분면으로 올라왔음을 확인을 할 수가 있다. 정상상태에서 모터가 동작 할 때 영구자석은 0.63-0.73[T]사이에서 동작점(Operating point)이 반복적으로 움직였다. 4턴 고장이 발생했을 때는 0.58-0.7[T]사이에서 움직였으며 전기자반작용 효과가 증가하여 동작점이 정상상태보다 아래로 내려왔고 동작점 움직임의 폭도 커졌다. 그러나 영구자석 동작점이 변

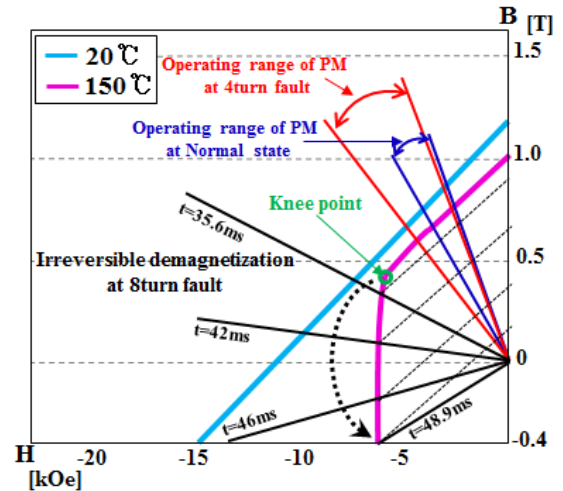


그림 9 고정자 절연파괴 고장 증가에 따른 영구자석의 Weak point의 동작범위
 Fig. 9 Operating range of the weak point of the PM according to the increase in the fault

곡점 위에 있기 때문에 불가역감자는 일어나지 않고 가역감자만 일어났다. 8턴 고장이 발생했을 때부터 영구자석의 동작점이 변곡점 아래로 내려오면서 불가역감자가 서서히 발생을 하였고, 시간이 경과할수록 입력전류증가에 의한 전기자반작용의 효과가 커짐으로써 불가역감자 고장도 빠르게 진행되었으며 영구자석의 Weak point같은 경우 48.9[ms]에서는 거의 모든 자기적 성질을 잃어버렸다.

그림 10은 영구자석의 불가역감자 진행과정이다. 일반적으로 영구자석 모터가 구동이 될 때 영구자석의 앞쪽부분(Front part)는 영구자석의 자화방향과 같은 외부자계를 받고 뒤쪽부분(Back part)같은 경우 영구자석의 자화방향과 반대방향의 외부자계를 받게 된다. 그러므로 영구자석의 앞

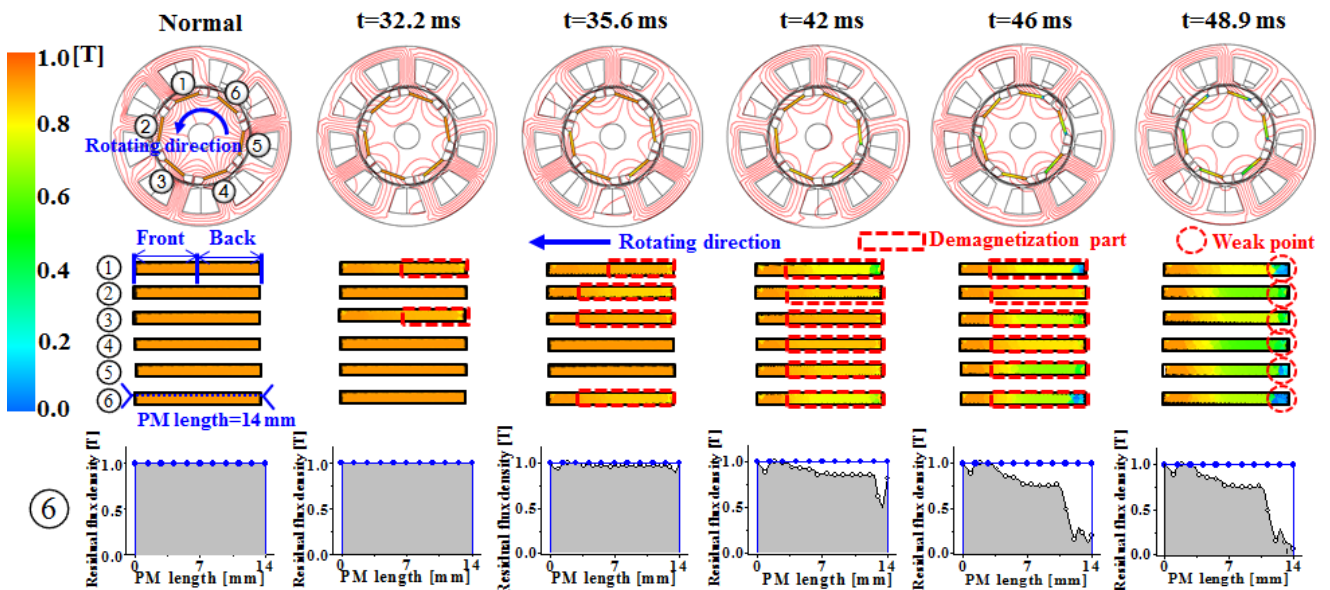


그림 10 6개의 영구자석의 불가역감자 진행과정
 Fig. 10 Irreversible demagnetization progress of six PMs

쪽부분은 자기적 흡입력을 생성하고 영구자석의 뒤쪽부분은 자기적 반발력을 생성하여 모터에 토크를 발생시킨다. 고정자 절연과피가 발생하였을 때 입력전류의 증가와 왜곡으로 인하여 외부자계의 상승으로 전기자반작용 효과가 증가하여 영구자석의 뒤쪽부분은 영구자석의 자화방향과는 반대방향의 외부자계를 받기 때문에 불가역감자가 쉽게 발생하게 된다. 그림 10에서 8턴 고장이 발생하고 32.2[ms]에 최초로 불가역 감자가 극소하지만 발생을 하였고 시간이 경과할수록 영구자석의 뒤쪽부분부터 시작하여 불가역감자 고장이 번져나감을 확인 할 수 있다. 영구자석의 뒤쪽부분의 끝부분인 Weak point같은 경우 불가역감자의 고장정도가 심한 것을 볼 수 있다.

4. 실험 결과

표 1은 실험에 사용된 영구자석 BLDC 모터의 제원이다. 실험에서 사용된 모터는 고온 환경에서 구동되기 위하여 절연계급이 높은 권선으로 설계 되어 젖고 내열성이 우수한 윤활액이 들어간 베어링이 사용되었다. 그림 11은 실험에 사용된 모터의 사진이다. 실험에 사용된 모터는 고장권선수를 편하게 적용하기 위하여 모터 하우징 하부에 탭(Tap)이 설치되어졌다. 그림 12는 불가역감자 실험을 위한 장비이다. 가열챔버(Heating chamber)는 모터의 영구자석의 동작점을 150[°C]로 맞춰주기 위하여 가열챔버 내부의 온도를 높여주는 역할을 한다. 챔버 내부의 온도를 올림으로써 영구자석 뿐만 아니라 모터전체의 재질온도가 올라가겠지만 재질 모두가 고온 환경에서 구동되도록 설계되었기 때문에 영향력을 무시하였다. 영구자석의 내부온도를 측정하기 위해서 온도센서를 사용하여 확인을 하였다. 온도센서-1(Temperature sensor-1)은 모터의 외부 하우징(Housing)온도를 측정하고 온도센서-2(Temperature sensor-2)는 모터의 내부온도를 측정한다. 서보모터는 실험모터의 정격부하를 잡아주기 위하여 사용이 되었다.

실험은 가열챔버를 이용하여 약 2시간 정도 모터 내부까지 열이 전달되기 위하여 내부를 가열을 한다. 모터 내부의 영구자석의 온도가 150[°C]까지 충분히 가열이 된 것을 온도센서를 이용하여 확인하고 나서 실험모터를 무부하 운전을 하다가 서보모터를 이용하여 정격부하로 구동을 시켰다. 정격부하에서 고장권선의 턴 수를 증가시켰고 고장권선의 턴 수가 증가할수록 입력전류가 왜곡되고 증가하였다. 고장권선의 턴 수가 8턴이 되었을 때부터 불가역감자가 일어나서 고장 턴 수를 증가 시키지 않아도 입력전류가 서서히 증가를 하다가 인버터전류제한치인 50[A]에 입력전류가 도달 하였을 때 인버터에서 전류를 차단하여 실험이 종료 되었다. 영구자석 BLDC 모터의 불가역감자가 발생을 했는지 여부를 알기 위하여 실험 모터는 모터 내부까지 충분히 열을 식히고 나서 상온이 된 것을 온도센서-2를 통하여 확인한 후에 역기전력을 측정하였다. 그림 13은 영구자석이 정상일 때와 불가역감자가 되었을 때의 3000[rpm]에서의 역기전력 측정값이다. 역기전력을 통하여 시뮬레이션 결과와 똑같이 고장권선이 8턴에서 불가역 감자가 발생을 하였고 불가역감자가로 인한 자석의 성능감소도 거의 같게 나타남을 확인 하였으며 더 이상 영구자석 BLDC 모터는 정상구동을 할 수 없을 정도로 역기전력이 약 절반으로 감소하였다.

표 1 영구자석 BLDC 모터의 제원

Table 1 The specifications of the PM BLDC motor

제원	값	제원	값
고정자 외경[mm]	100	회전자 외경[mm]	56
적층 폭[mm]	40	공극길이[mm]	1
극 수	6	슬롯 수	9
영구자석두께[mm]	1.5	영구자석 폭[mm]	14
상당 턴 수[turn]	72	상 당 저항[Ω]	0.07
권선 절연 재질	Polyester-imide	절연계급	AI-EIW

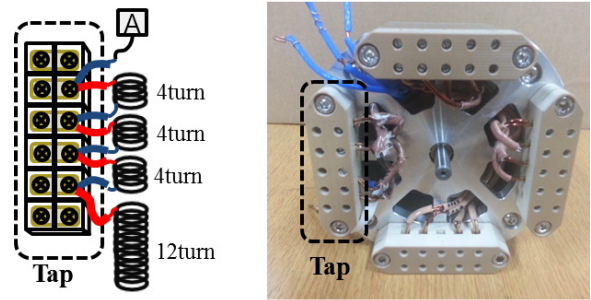


그림 11 실험 모터

Fig. 11 Experiment motor

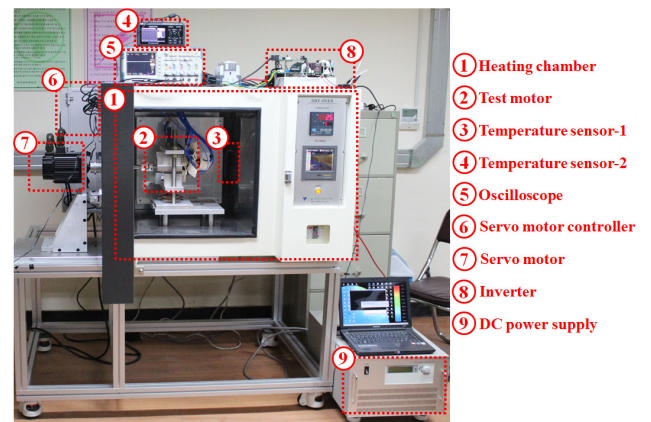


그림 12 실험 장비

Fig. 12 Experiment equipments

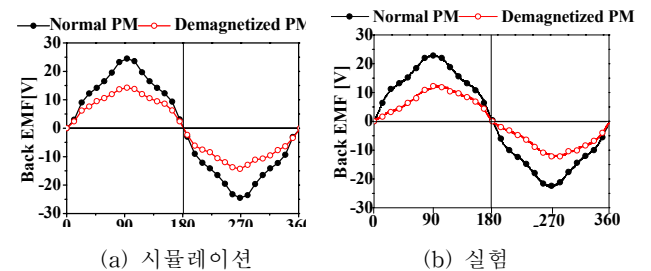


그림 13 역기전력

Fig. 13 Back electromotive force

5. 결 론

본 논문은 매입형 영구자석 BLDC 모터의 고정자절연과피 고장에 의한 불가역감자를 해석을 하였다. 과도해석과 동적해석을 위하여 선간전압방정식이 결합된 유한요소기반의 알고리즘을 개발을 하였다. 개발한 알고리즘을 이용하여 고정자 절연과피 고장과 불가역감자 고장에 의한 자기적, 전기적 특성에 대한 정확한 파악과 함께 영구자석의 불가역감자 고장에 대한 고장진행양상을 확인을 하였다. 알고리즘과 시뮬레이션 결과에 대한 유효성은 실험으로 검증을 하였다. 개발된 알고리즘은 안전이 필수적으로 필요하거나 높은 신뢰성이 요구되는 응용분야에 사용되는 모터를 설계할 때 불가역 감자고장에 대한 고장회피 설계가 가능하므로 인명피해와 자산 손실을 최소화 시킬 수 있다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부 및 울산광역시 과학연구 육성사업 2013년 기초·원천 R&D과제 지원사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.

This work was supported by the development program of local science park funded by the ULSAN Metropolitan City and the MSIP(Ministry of Science, ICT and Future Planning

References

[1] W. N. Fu and S. L. Ho, "Dynamic demagnetization computation of permanent magnet motors using finite element method with normal magnetization curves," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 20, pp. 851 - 855, June 2010.

[2] X. Xi, C. Changming, and Z. Meng, "Magnet demagnetization observation for permanent magnet synchronous motor," presented at 2011 *Int. Conf. Elect. Mach. Syst.* (ICEMS), Wuhan, 2011.

[3] J. R. Ruiz, J. A. Rosero, A. G. Espinosa, and L. Romeral, "Detection of demagnetization faults in permanent-magnet synchronous motors under non-stationary conditions," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, pp. 2961 - 2969, July 2009.

[4] G. H. Kang, J. Hur, H. Nam, J. P. Hong, and G. T. Kim, "Analysis of irreversible magnet demagnetization in line-start motors based on the finite-element method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, pp. 1488 - 1491, May 2003.

[5] W. Lu, M. Liu, Y. Luo, and Y. Liu, "Influencing factors on the demagnetization of line-start permanent magnet synchronous motor during its starting algorithm," presented at 2011 *Int. Conf. Elect. Mach. Syst.* (ICEMS), Beijing, 2011.

[6] K. W. Lee, D. K. Kim, B. T. Kim, and B. I. Kwon,

"A novel starting method of the surface permanent-magnet BLDC motors without position sensor for reciprocating compressor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 44, pp.85 - 92, Jan./Feb. 2008.

[7] B. Vaseghi, B. Nahid-Mobarakeh, and N. Takorabet, "Experimentally validated dynamic fault model for PMSM with stator winding inter-turn fault," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting.*, pp. 1 - 5, 2008.

[8] D. Shah, S. Nandi, and P. Neti, "Stator inter-turn fault detection of doubly-fed induction generators using rotor current and search coil voltage signature analysis," *IEEE Industry Applications Conference* (IAS), pp. 1948 - 1953, 2007.

[9] I. S. Jung, K. H. Nam, B. G. Gu, and I. S. Jung "Dynamic modeling for PMSM with internal turn short fault," *IEEE Power Electronics and ECCE Asia* (ICPE & ECCE), pp. 2525 - 2528, 2011.

저 자 소 개



이 윤 석 (李潤碩)

2012년 울산대학교 전기공학부 졸업, 공학사, 2012년~현재, 울산대학교 대학원 전기공학부 석사과정.

Tel : 052-259-1532

E-mail : pollyone@hanmail.net



김 경 태 (金耿兌)

2010년 울산대학교 전기공학부 졸업, 공학사, 2012년, 울산대학교 대학원 전기공학부 석사과정 졸업, 2012년~현재, 울산대학교 대학원 전기공학부 박사과정.

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 부교수, 2004년~현재 IEEE Senior Member, 2006년~현재, Associate Editor, IEEE Trans. on Power Elec., 2009년~현재, KIEE Senior Member 및 B부문 학술위원장.

Tel : 052-259-1282

E-mail : jinhur@ulsan.ac.kr