

속도 제어용 가변자속 메모리 모터의 특성 연구 및 감자전류 산정

김영현*, 이중호**
한밭대학교*

Characteristic Analysis and Demagnetization Current Determination of Variable Flux Memory Motor for variable Speed Control

Young-Hyun Kim*, Jung-Ho Lee**
Hanbat National University*

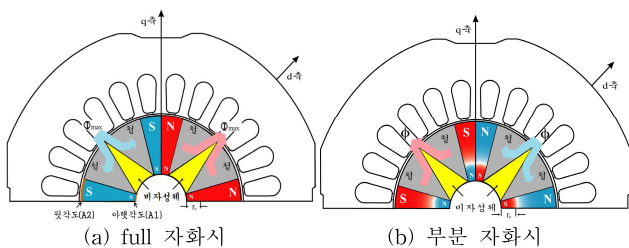
Abstract - 본 논문에서는 속도 제어를 위한 가변자속 메모리 모터(Variable Flux Memory Motor)의 특성과 감자전류 산정에 대하여 다루었다. 서론에서는 VFMM에 대한 특징 및 설계를 위한 분석 방안을 제시하였으며, 메모리모터의 동작 원리와, 정밀한 해석 방법은 본문을 통하여 자세히 다루었다. 감자전류는 프라이자흐 모델을 이용하여 초기 자석의 자화량을 비선형 적으로 구한 후 인가된 d축 전류에 따른 변화된 자화량 및 기전력 값들을 반복적인 연산을 통하여 신뢰성 있는 감자전류를 산정하였다.

1. 서 론

일반적인 영구자석형 전동기는 고출력, 고효율 및 약계자 제어를 통한 광범위한 운전속도영역 등 장점이 많은 우수한 전동기이다[1]. 영구자석형 전동기는 권선계자형 동기전동기와 달리 계자자속을 직접 제어하는 것이 가능하지 않다. 따라서, 널리 알려진 d축 전기자 반작용에 의한 감자효과를 이용하여 d축 방향의 자속을 감소시키는 약계자 제어방식을 많이 이용한다. 그러나 약계자 제어방식은 지속적인 감자전류를 인가해야 하기 때문에 손실이 증가하게 되는 단점이 있다. 반면에, 전기기기의 고출력 밀도와 함께 영구자석 매입 전동기의 자속 조절 능력을 결합시킨 것이 메모리 모터이다[2]-[3]. 가변자속 메모리모터(Variable Flux Memory Motor)의 특징은 회전자 마그넷에 의해 만들어진 공극 자속이 고정자 전류의 주기 동안의 비율 안에서 지속적으로 변화될 수 있는 것과 오직 짧은 펄스전류에 의해 간단히 자속 변화를 시킬 수 있다는 점이다. 따라서, 본 논문은 속도제어시 지속적인 감자전류가 필요 없기 때문에 운전시 손실을 저감할 수 있는 VFMM의 특성을 분석하고 프라이자흐 모델을 이용하여 산정된 감자전류를 성능시험을 통하여 해석기법의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 VFMM의 원리와 해석방법

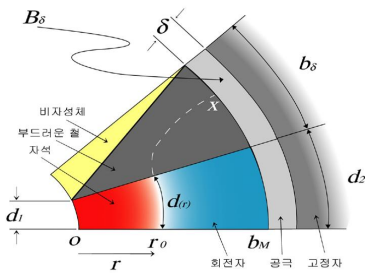


〈그림 1〉 착/감자 전류에 따른 자화된 VFMM의 횡단면

2.1.1 VFMM의 동작 원리

그림 1 (a)는 4극에서의 전부 자화된 VFMM의 횡단면을 나타낸다. 회전자는 코어와 비자성체, 영구자석으로 샌드위치 구조를 가지며 축에 기계적으로 고정되어 있다. 그림에서 알 수 있듯이, 자석만으로 자화되어 있는 영구자석의 N극에서 발생한 최대 자속 Φ_{max} 은 비자성체의 경계면을 따라 공극을 통해 고정자를 흐른 후 다시 공극으로 거쳐서 S극으로 흘러 들어오게 된다.

그림 1 (b)는 부분 자화된 VFMM의 횡단면으로, 전부 자화되어 있는 모터에 d축 방향으로 펄스 전류 i_d 를 인가하게 되면, 회전자의 영구자석은 부분적으로 감자하게 되며, 이로 인하여 자석에서 발생한 자속과 펄스 전류에 의해 감자시키는 자속의 경계지점 "0"인 곳이 발생하게 되고 이 지점을 제로플럭스 반경(Zero Flux Radius) r_0 라 한다.



〈그림 2〉 부분 자화된 VFMM의 자속의 미분경로

2.1.2 VFMM의 해석

그림 2은 부분 자화된 VFMM의 분석을 위한 미분경로와 각각의 변수들을 정의하였다.

마그넷의 잔류 자속밀도 B_r , 보자력 H_c , 공극 자속 밀도를 B_δ , 그리고 기기 길이를 l 로 표현한다면 마그넷 퍼미언스 미분형 dG_M 과 공극 퍼미언스 미분형 dG_δ 을 다음과 같이 나타낸다.

$$dG_M = \frac{B_r l d_r}{H_c d(r)} = \frac{B_r l}{H_c \left[d_1 + \frac{d_2 - d_1}{b_M} r \right]} dr, \quad dG_\delta = \frac{\mu_0 l}{\delta} dx \quad (1)$$

$$d\Phi_r = d\Phi_M = d\Phi_\delta, \quad d\Phi_\delta = B_\delta l dx, \quad d\Phi_r = B_r l dr \quad (2)$$

$$d\Phi_\delta = \frac{d\Phi_r}{1 + \frac{dG_M}{dG_\delta}} \quad (3)$$

위 식(1)~(3)으로부터 다음과 같은 미분 방정식이 도출된다.

$$\frac{dx}{dr} = \frac{B_r}{B_\delta} - \frac{\delta}{d_1 + \frac{d_2 - d_1}{b_M} r} \cdot \frac{B_r}{\mu_0 H_c} \quad (4)$$

반경 방향 좌표 r 과 등포텐셜인 원주방향 좌표 x 에 대한 해는

$$x = \frac{B_r}{B_\delta} r - \frac{\delta B_r}{\mu_0 H_c} \cdot \frac{b_M}{d_2 - d_1} \ln \left(\frac{d_2 - d_1}{d_1 b_M} r + 1 \right) \quad (5)$$

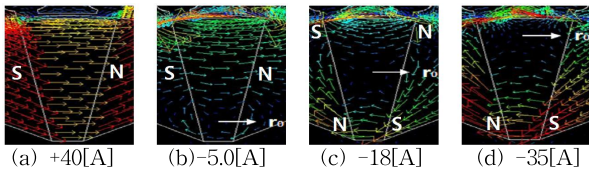
식(5)에서 x 와 r 은 공극 x 와 마그넷 r 을 통해 흐르는 자속선 좌표로 정의한다.

2.2 프라이자흐 모델링을 적용한 유한요소해석의 적용

초기 자석의 자화량을 프라이자흐 모델링으로 비선형 적으로 구한 후 d축으로 펄스 전류를 인가하게 되면, 자화량 및 기전력의 값들이 변화하게 된다. 오차를 줄이기 위하여 몇 번의 반복 연산으로 신뢰성 있는 값을 찾아내고 이러한 값들로 자화 양상을 확인 할 수 있다.

그림 3은 반복 연산으로 구해진 값을 이용하여 시뮬레이션한 것으로 본 연구의 결과가 만족할 만한 것임을 보여 주고 있으며, 초기 자석만으로 자화 되었을 시의 자속의 패턴은 자화 방향이 좌에서 우로 되어 있

지만 d축으로 펄스 전류를 인가함으로써 인해 축에 가까운 부분부터(자석 두께가 얇은 부분부터) 자화 방향이 흐트러지면서 바뀌게 되며, 그로 인해 Zero Flux Radius가 발생하는 것을 알 수 있다. 뿐만 아니라 d축에 인가하는 전류의 양을 크게 하면 자석의 자화량을 넘어서는 역 방향 자속이 발생한다는 점을 발견하였다.

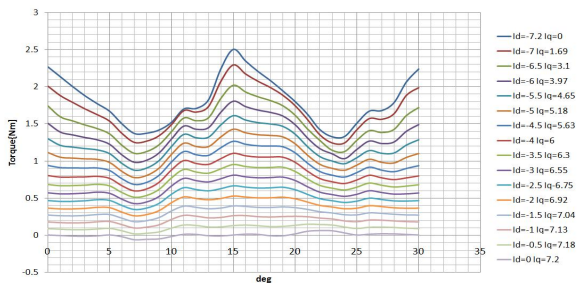


<그림 3> d축 펄스 전류에 따른 자화 방향과 자석의 자속 패턴 [(a) 착자 전류 (b), (c), (d) 감자 전류]

또한, 영구자석에서 계자자속을 얻는 PMSM은 권선계자형 동기모터의 경우처럼 계자자속을 직접 제어하는 것이 가능하지 않다. 그러나 VFMM은 양의 q축 전류를 흐르게 함으로써, q축 전기자 반작용에 의한 감자 효과를 이용하여 q축 방향의 자속을 감소시키는 것이 가능하고, 등가적인 약계자 제어가 실현 가능하고, q축 전류가 증가했을 때, 토크가 감소하는 것을 알 수 있다. 다음의 표 1과 그림4는 전류 Ia=7.2A 일 때의 토크 특성을 나타내고 있다.

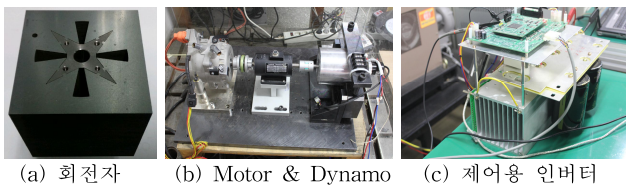
<표 1> 전류 벡터에 따른 토크와 토크리플

		PM=0.4	
Id[A]	Iq[A]	토크[Nm]	토크 리플[%]
-7.2	0	1.801	65.320
-7	1.69	1.675	62.743
-6.5	3.1	1.499	61.413
...
-1	7.13	0.202	82.548
-0.5	7.18	0.101	129.935
0	7.2	0	-



<그림 4> 전류 벡터에 따른 토크 특성곡선

2.3 VFMM의 제작 및 성능 평가

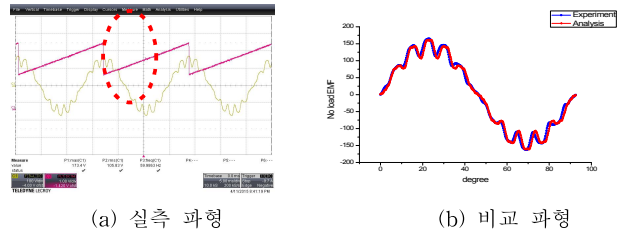


<그림 5> 제작된 전동기와 성능평가용 실험 장비

그림 5 (a)는 가공전의 VFMM의 회전자 형상이다. 제작성을 고려하여 코어를 직충 및 가공 후 마그넷과 비자성체(스파이더 형상)를 삽입하는 방식으로 제작하였다. 그림 5 (b)는 모터와 커플링된 다이내모이며, 그림 5 (c)는 제어용 인버터이다. 인버터로 d/q축 전류 제어가 가능하며 약 100[A] 정도의 착자 전류를 인가할 수 있다.

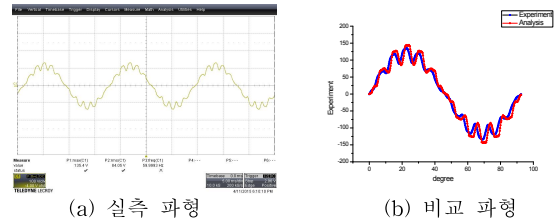
그림 6 ~ 9는 제어용 인버터를 통한 착/감자 전류인가 후 실제 측정된 무부하 기전력과 프라이자흐 모델을 이용한 유한요소해석(FEM)을 통해 분석한 무부하 기전력을 비교한 결과 파형이다. 그리고 그림 3과 같은 역착자 현상을 검증하기 위하여 회전자 위치를 검출하기 위하여 부착해 놓은 엔코더의 Z펄스를 이용하였다. 착자전류 +40[A]와 감자전류 -5[A]를 인가하였을 때에는 Z펄스가 A상 피크 중앙에 위치함을 확인하였으며, 감자전류 -18[A]와 -35[A]를 인가하였을 때에는 Z펄스가

90° 틀어짐을 확인하였다. 이로써, 프라이자흐모델을 이용한 감자전류 산정 해석기법의 우수성과 권선을 이용한 인가전류에 의해 착/감자가 이루어지며, 지속적인 감자전류 없이 약자속제어가 가능함을 확인하였다.



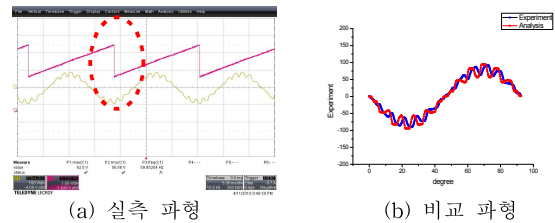
(a) 실측 파형 (b) 비교 파형

<그림 6> Full 착자 전류 (+40[A]) 인가



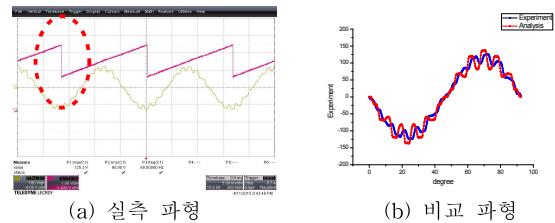
(a) 실측 파형 (b) 비교 파형

<그림 7> 감자 전류 (-5.0[A]) 인가



(a) 실측 파형 (b) 비교 파형

<그림 8> 감자 전류 (-18[A]) 인가



(a) 실측 파형 (b) 비교 파형

<그림 9> 감자 전류 (-35[A]) 인가

3. 결 론

본 논문의 주안점은 착/감자 전류 인가에 따른 자속 가변 특성을 이용한 속도 가변용 메모리 모터의 특성 연구로써, 2가지 타입의 약계자 제어방법에 대한 특성분석을 수행 하였다. 하나는, 일반적으로 적용되고 있는 약계자 제어의 단점인 지속적인 감자전류를 사용하지 않고 계자자속을 가변시킴으로써 손실을 저감할 수 있는 방법이며, 다른 하나는, 일반 PMSM과 유사한 방식의 양의 q축 전류를 인가함으로써 약계자 제어가 실현 가능함을 FEM과 실험을 통하여 그 타당성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

[1] C. Cavallaro, A. O. Di Tommaso, R. Miceli, A. Raciti, G. R. Galluzzo, and M. Trapanese, "Efficiency enhancement of permanent-magnet synchronous motor drives by online loss minimization approaches," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 52, no.4, pp. 1153 - 1160, Aug. 2005.

[2] V. Ostovic, "Pole changing permanent magnet machines," IEEE Trans on Industry Applications, Vol. 38, No., pp.1493-1499 Dec. 2002

[3] V. Ostovic, "Memory motor - A new class of controllable flux PM machines for a true wide speed operation" in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 2001, pp.2577-2584.