

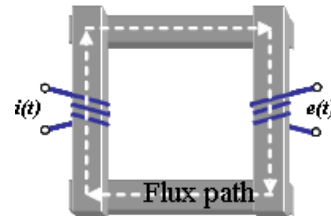
IPM 모터 철심의 포화를 고려한 특성 해석

하경호*, 안영준*, 나민수*
LG전자*

Characteristics Analysis of IPM Motor Considering Magnetic Saturation of Electrical Steel

Kyung-Ho Ha*, Young-Jun Ahn*, Min-Su Na*
LG Electronics*

Abstract - This paper deals with the characteristics analysis of Interior Permanent Magnet Type Motor varying with magnetization curve of electrical steel interpolated with several method in the high field region. The data of magnetization curve of electrical steel given by the steel maker is not enough in order to analysis the characteristics by means of FEM. Especially, the core in the bridge part have a severe saturation because the bridge width is narrow to reduce the flux leakage produced by the permanent magnet. This paper make the three kinds of magnetization curve by extrapolation and then the motor is analyzed by using these magnetization curve. The motor parameters are compared to explain the effects of magnetization curve.



〈그림 1〉 전기강판의 자화특성 측정방법(Epstein Test)

1. 서 론

지구 온난화 및 에너지 고갈 등으로 인해 효율에 관한 관심이 증대되고 에너지 효율 법제화 등과 같은 시장에서의 니즈 속도가 급격히 가속화되고 있다. 특히, 가전용 압축기에서는 이에 대응하기 위해 고효율 인버터 전동기 개발에 노력을 기울이고 있으며, 영구자석을 회전자에 삽입한 메입형 영구자석 전동기(Interior Permanent Magnet Type Motor: 이하 IPM)를 대상으로 고효율화를 위한 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 모터의 효율을 향상시키기 위해서 고정자의 권선 설계, 회전자 코어 형상 설계, 영구자석의 효율적 배치 설계, 가공 정도 향상, 고자속밀도의 영구자석 및 저철손 고자속밀도의 연자성 재료 채택 등의 연구가 제안되고 있다.

IPM의 회전자에는 영구자석의 삽입으로 인하여 Rib의 구조를 가지고 있으며, 이는 모터 운전시 영구자석의 비산을 방지하는 좋은 역할을 하나, Rib부위의 철심으로 자속이 지나가는 누설 경로가 된다. 즉, 영구자석에서 발생하는 자속은 1차적으로 회전자의 Rib의 철심으로 누설되고 이곳이 포화가 되면, 나머지 자속이 고정자로 넘어가 권선과 쇄교하는 유효자속이 된다. 따라서, 기계적 강도를 확보하면서 누설을 최소화하도록 Rib의 폭을 작게 설계하는 것이 중요하다.

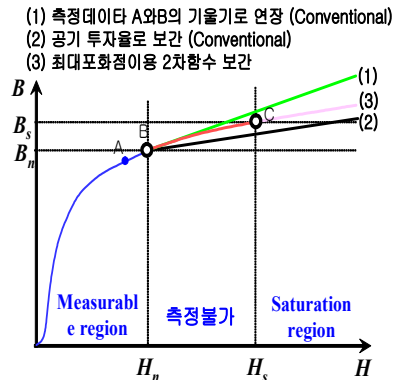
회전자 Rib에서의 포화는 철심의 재료인 전기강판의 자화특성에 영향을 받는다. 전기강판의 자화특성을 측정할 수 있는 Epstein 방법으로는 무방향성 전기강판의 자속밀도를 1.9[T]이상의 영역까지 측정하는 것이 쉽지 않다. 따라서, Rib에서 실제 동작되는 높은 포화영역까지 데이터가 확보되지 않아서 모터의 특성 예측 정도가 저하된다. 전자계 해석을 정밀히 수행하기 위해서는 측정 영역 이외의 고자속 밀도까지의 데이터가 반드시 필요하다. 일반적으로 기 측정된 데이터에 대한 보간 방법이나 또는 이러한 자화 특성을 함수화 하는 방법에 대해서는 연구가 보고되고 있으나[1], 고자장 영역에 대한 보간 방법에 대해서는 연구가 부족한 실정이다.

본 논문에서는 전기강판의 측정된 자화특성 데이터 이후의 영역을 최대포화자화량을 이용하여 2차 함수로 보간하여 모터 특성을 예측하였다. 또한, 전기강판의 B-H curve와 M-H curve를 이용하여 모터 파라미터에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 전기강판 자성 측정 방법

전기강판의 자기적 특성은 국제 규격에 의거 Epstein 시험기를 사용하여 측정하고 있다. 무방향성 전기강판의 경우 압연방향으로 30*(280~320) 8매, 압연 직각 방향으로 8매 시편을 절단하여 그림 1과 같이 배치하여 변압기와 같이 1차권선과 2차권선 시행 후, 1차측 코일에는 2차측 유기전압의 파형이 정현파가 되도록 전류를 인가한다. 1차 코일의 인가 전류, 2차측 코일에 유기되는 전압으로부터 인가 자계 H(t), 자속밀도 B(t)를 각각 계산하게 된다.



〈그림 2〉 B-H곡선 고자장 보간방법

여기서 측정되는 자속밀도는 수식 (1)과 같이 철심의 자화성분과 공기 투자율에 의한 자속성분을 포함하고 있으나, Epstein 측정기에 공기 보상 코일을 가지고 있어, 수식 (3)의 두 번째 항이 "0"가 되도록 측정된 결과이다. 따라서, 실제 Epstein 측정기로 측정된 결과는 B-H 곡선이 아니라 M-H curve가 된다. 낮은 인가자계에서는 두 번째 항의 자속밀도가 매우 작은 수치이므로 이를 무시하고 M-H curve를 사용하여도 된다. 그러나, 수십만 정도의 높은 인가 자계에서는 수식 (1)의 두 번째 항, 즉 공기에서의 자속밀도가 높기 때문에 이를 배제할 수가 없다. 따라서, IPM 모터와 같이 포화가 심한 모델을 해석 할 경우에는 M-H curve가 아니라 B-H curve 사용해야한다.

$$B = M + \mu_0 H \tag{1}$$

2.2 B-H 곡선 보간 방법

일반 Epstein 측정기로는 고자장 영역을 측정하기 쉽지 않기 때문에 측정 데이터보다 높은 인가자계 영역을 보간 할 수 있는 방법을 그림 2에 나타내었다. 모터 특성의 비선형 해석에 사용되는 B-H 곡선의 고자장 영역 일반적 보간 방법은 그림 2의 (1)번과 (2)번 방법이다. 그림 2-(1)번의 방법은 측정된 마지막 데이터 A점과 B점의 기울기를 이용하여 보간하는 방법이며, 그림 2-(2)번 방법은 마지막 측정 데이터 B점 이후를 공기의 투자율로 보간 하는 방법이다. 인가 자계가 높을수록 그림 2-(1)번 방법은 철심에서 자속밀도가 과대평가, 그림 2-(2)번 방법은 과소평가되어 모터의 성능 평가에 영향을 미치게 된다.

본 논문에서는 B점과 C점의 사이는 수식 (2)와 같이 2차함수로 보간하고, C점이후는 공기의 투자율로 보간하였다. 이 방법은 그림 2-(1)번 방법과 그림 2-(2)번 방법의 중간 특성을 가진다. 수식 (4)의 미정 계수는 측정 데이터를 활용하여 이미 알고 있는 AB의 기울기, B의 데이터 그리고 C점(전기강판의 고유 포화점 M: 측정 가능)을 이용하여 미정계수를 풀어 함수를 만든다. 또한, C점 이후의 고자장 영역은 공기의 투자

을 μ_0 로 보간하였다.

$$H = aB^2 + bB + c \quad (2)$$

$$a = \frac{1 - \mu_0 m}{2\mu_0(B_s - B_m)}, \quad b = -2aB_s + \frac{1}{\mu_0}$$

$$c = \frac{B_s - M_s}{\mu_0} - (aB_s + b)B_s$$

$$B_s = \frac{2(M_s + \mu_0 H_m) - (1 + \mu_0 m)B_m}{1 - m\mu_0}$$

$$m = \frac{B_{n-1} - B_n}{H_{n-1} - H_n}$$

여기서, M_s 는 철이 가지고 있는 고유의 최대포화자화로 전기강판 제조 성분으로 추정을 하고나 또는 VSM 계측 장비로 측정 가능하다.

2.3 B-H 곡선 보간

상기 보간 방법을 이용하여 하기와 같이 3가지 종류의 전기강판의 자화특성을 그림 3과 같이 만들었으며, 이를 이용하여 모터 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

- Case A: 측정점 이후 공기의 투자율로 보간(B-H curve)
- Case B: 측정점 이후 이차 함수로 보간(M-H curve)
- Case C: 측정점 이후 이차 함수로 보간(B-H curve)

35PN440 전기강판을 대상으로 $0 \leq H \leq 14000$ (A/m)까지 Epstein으로 M-H curve를 측정하고 이를 다시 B-H curve의 데이터로 변환하였다. 고자장 영역은 Case A의 경우 공기의 투자율로 보간, Case B와 C는 본 연구에서 사용한 방법으로 보간 한 것이다. 즉, Case B와 C의 경우 $15000 \leq H \leq 150,000$ 까지는 수식 (2)로 보간, $150,000 \leq H$ 는 공기의 투자율로 보간한 것으로 Case B는 M-H curve이며, Case C는 B-H curve이다. 여기서, 2차 보간 함수를 만들기 위해서 사용된 35PN440의 최대포화자화는 2.016 [T]이다.

그림 3에서 Case C는 고자장 영역으로 갈수록 자속밀도 차이가 크게 벌어지고 있음을 알 수 있다. 또한 B-H curve와 M-H curve도 고자장 영역으로 갈 수록 차이가 커짐을 알 수 있다. 일반적인 전자계 해석 S/W에서는 User가 측정된 데이터를 S/W에 입력할 경우 고자장 영역은 Case A와 같이 보간하여 사용한다. 최근 J-MAG S/W는 User가 전기강판의 측정 데이터를 입력할 경우 B-H curve인지 M-H curve인지를 구별하여 입력토록 되어 있으며, M-H curve입력시 자동으로 B-H curve로 변환하여 해석시 사용한다.

2.4 모터 특성 해석

본 연구에서 전기강판 자화특성이 모터 성능에 미치는 영향을 예측하기 위하여 4극 6슬롯, Nd 영구자석, 집중권 IPM모터를 사용하였으며, 유한 요소 해석법을 이용하여 비선형 해석으로 성능을 예측하였다.

그림 4는 그림 3의 전기강판 자화특성을 이용하여 무부하시의 역기전력을 해석 결과로써, Case C의 경우가 역기전력이 가장 작음을 알 수 있다. 이는 Case C의 곡선이 자속밀도가 높아 회전자 Rib에서의 누설이 증가하여 유효자속량 감소하였기 때문이다. 실제 실험치에 근접함을 알 수 있었다.

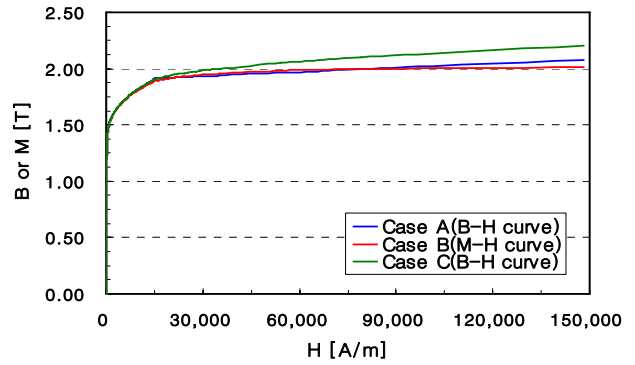
그림 5는 토크 리플 특성을 비교한 것으로, 평균 토크는 거의 유사 수준이나 토크 리플이 큰 특성을 보이고 있다. 표 4는 그림 4와 그림 5의 내용을 수치 비교하여 나타낸 것이며, 코깅 토크에는 큰 차이가 없는 것으로 보인다.

3. 결 론

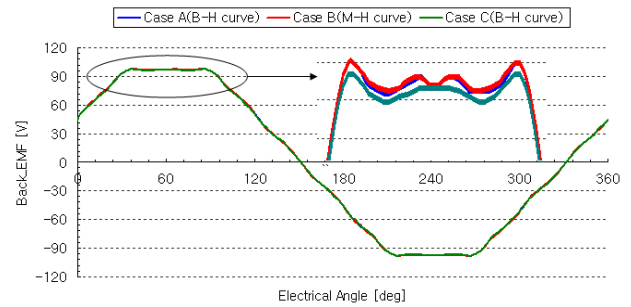
본 논문에서는 모터의 철심 재료인 전기강판 B-H curve을 고자장 영역 까지 모델링하여 모터 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 고자장 영역 보간 방법에 따라 역기전력과 토크 리플에 영향을 미침을 알 수 있다. 특히, IPM모터와 같이 자속밀도 포화가 심한 모터의 경우 해석 정도를 높이기 위해서는 신뢰성 있는 보간 방법이 매우 중요함을 보였다. 또한 측정된 방법을 확인하여 B-H curve와 M-H curve를 구분하여 사용하는 것이 필요하다. 본 연구는 IPM 모터의 특성 해석 예측에 매우 유용할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

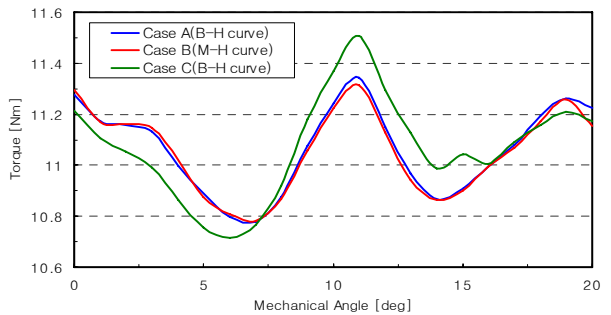
[1] Norio Takahashi, "Three Dimensional Finite Element Method", 전기학회, 2006



<그림 3> 35PN440 B-H곡선 고자장 보간



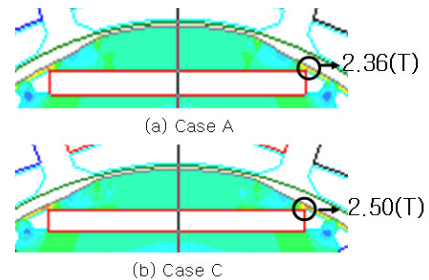
<그림 4> 역기전력 비교



<그림 5> 토크 리플 비교

<표 1> 자화곡선별 모터 특성

항목	Case A	Case B	Case C
역기전력 (V)	72.06	72.10	71.70
평균토크 (Nm)	11.07	11.06	11.07
토크 pk-pk (Nm)	0.56	0.53	0.79
토크리플 (%)	5.08	4.82	7.15
코깅토크 (Nm)	0.69	0.69	0.68



<그림 6> 회전자 Rib부에서의 자속밀도