

구동조건을 고려한 매입형 영구자석 동기 전동기의 철손 분석

임 우 경, 서 장 호, 정 현 교
 서울대학교 전기공학과

Iron Loss Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Machine considering Driving Condition

Woo-Gyong Yim, Jang-Ho Seo, and Hyun-Kyo Jung
 School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

Abstract - 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)은 다른 타입의 기기들 보다 많은 고조파 자속밀도 성분들을 가진다. 그러므로, 고속 영역에서의 고조파 철손을 계산하는 것은 그만큼 중요하다. 본 논문은 구동 조건을 고려한 IPMSM의 철손을 해석하였다.

1. 서 론

최근에, 증가하는 전력 요구에 맞춰 고출력의 교류기가 필요해지면서, 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)가 많은 산업분야에서 사용되고 있다.

일반적으로, IPMSM은 포화 영역에서 동작한다. 이러한 포화 특성 때문에, 많은 고조파 자속밀도 성분들을 가지게 된다.

고속 영역에서 발생하는 철손은 전동기의 발열과 관련이 있고, 과도한 열은 영구자석의 감자 및 기기의 저효율에 영향을 줄 수 있다. 따라서 IPMSM의 설계 단계에서 철손을 정확히 계산하는 것은 중요하다.

한편, 동작 조건에 따라 전류 조합을 얻기 위한 더욱 간편하고 빠른 방법을 소개한다. 그리고 동작 조건을 고려한 정 토크 영역 및 정 출력 영역에서의 철손 해석을 보여줄 것이다.

2. 본 론

2.1 IPMSM의 동작 조건

IPMSM은 돌극비(L_q/L_d)에 비례하는 넓은 정 출력 속도 영역을 갖는다. 제어를 하기 위해서 전류의 크기와 위상각을 변화시키는 방법이 일반적으로 사용된다.

IPMSM의 동작 영역은 그림 1과 같이 정 토크 영역과 정 출력 영역으로 나눌 수 있다. 높은 기동 토크는 단위 전류 당 최대 토크 제어를 적용함으로써 얻을 수 있고, 넓은 정 출력 속도 범위는 약계자 제어를 통해서 얻을 수 있다.

2.1.1 정 토크 영역 : MTPA 제어

MTPA (Maximum Torque Per Ampere) 제어는 영구자석 토크와 릴럭턴스 토크의 합을 최대화하는 것으로 정의된다. 이 때, 같은 토크를 만들어내는 d축과 q축 전류의 매우 많은 조합이 존재한다. 그림 2에서 볼 수 있듯이, 이러한 수많은 조합 중 최소한의 전류 크기를 가지는 d축과 q축 전류의 조합을 찾을 수 있고, 그것을 바로 MTPA 제어라고 부른다.

저속 영역에서 MTPA 제어가 주로 사용되며, 전류 제한 조건만이 적용된다. 왜냐하면 낮은 속도에서 충분한

전압 여유분을 가지기 때문이다.

2.1.2 정 출력 영역 : 약계자 제어

정 출력 영역에서, IPMSM의 속도가 증가하면, 인덕턴스와 영구자석에 의한 전압은 단자 전압의 제한값보다 커지게 된다. 식 (1)에서, 높은 속도를 유지하기 위해서는 d축 전류는 음의 값을 가져야 한다. 그림 3처럼, 약계자 제어에서의 동작점은 전류제한을 나타내는 타원과 전압제한을 나타내는 타원의 교점에서 구할 수 있다.

$$i_d^2 + i_q^2 \leq I_{smax}^2, \quad v_d^2 + v_q^2 \leq V_{smax}^2 \quad (1)$$

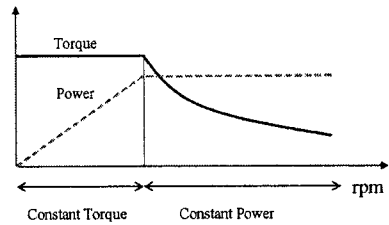


그림 1. 전동기의 능력 곡선

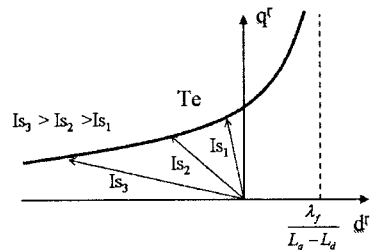


그림 2. 같은 토크를 만들어내는 고정자 전류

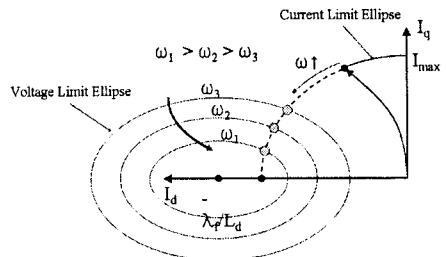


그림 3. 전압 제한 타원과 약계자 제어의 동작점

2.2 철손 해석

2.2.1 해석 모델

그림 4에서, 해석 모델을 100KW 출력의 IPMSM으로 설계하였다. 해석 모델의 기본 설계 사양은 표 1에 제시하였다. 그리고 역기전력의 낮은 THD값을 갖도록 자석의 형상을 배열하였다.

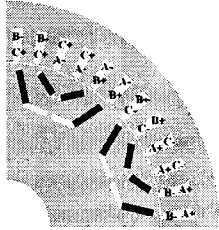


그림 4. 철손 계산을 위한 해석 모델 (48S 8P)

표 1. 해석 모델의 설계사양

Parameters	Value
Maximum speed	12000 [rpm]
Maximum power	100 [kW]
Maximum input current	565 [Apeak]
Permanent magnet	NdFeB, Br=1.3T
Core material	S08, 0.35t

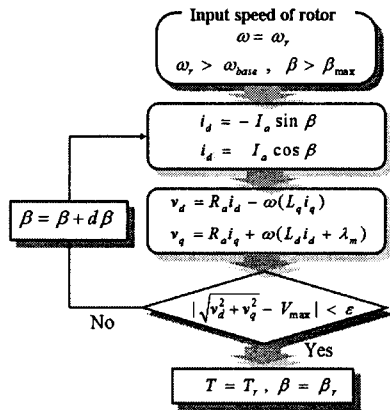


그림 5. 약계자 제어를 고려한 전류각과 토크 계산 순서도

2.2.2 동작점 추출

MPTA 제어는 기저 속도가 될 때까지 적용된다. 전류 위상각은 최대 토크가 되는 전류각인 β_{max} 로 고정된다. 이 때, 고정(일정) 토크 영역에서 전류각(β_{max})과 최대 토크(T_{max})는 다음 식으로 계산된다.

$$\frac{dT}{d\beta} = 0 \quad (2)$$

그림 5에서는 약계자 영역에서의 동작점을 계산하는 순서도를 제시하였다.

2.2.2 철손에 대한 수치해석 방법

단위무계당 철손(W_i)은 교번 자계가 철심에 적용될 시, 다음 식을 통해 얻어질 수 있다. [1]-[4]

$$W_i = K_e f^2 B_{max}^2 + K_h f B_{max}^2, \quad (3)$$

f 는 주파수, K_e, K_h 는 Epstein 실험에 의한 와전류와 히스테리시스 손실 계수, 우변의 첫 번째 항은 와전류 손실, 그리고 두 번째 항은 히스테리시스 손실을 의미한다.

일반적으로 IPMSM은 자계 포화 영역에서 동작되고, 다른 타입의 기기들보다 많은 고조파 성분들을 가진다.

철심의 와전류 손실은 유한요소법에 의해 얻어진 자속 밀도의 시간적 변화로부터 계산된다. 자계의 시간 고조파들을 고려하기 위하여 전체 철손은 각각의 자속밀도의 반경 방향 성분 B_r 과 접선 방향 성분 B_θ 에 의해 발생되는 고조파들의 합이라고 가정했다. 와전류 손실은 다음과 같이 표현될 수 있다[3]:

$$W_{lc} = \frac{K_e D}{2\pi^2} \int_{iron} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left\{ \left(\frac{B_r^{k+1} - B_r^k}{\Delta t} \right)^2 + \left(\frac{B_\theta^{k+1} - B_\theta^k}{\Delta t} \right)^2 \right\} dv, \quad (4)$$

Δt 는 자속밀도파형의 시간 간격, K_e 는 와전류계수, D 는 전기강판의 밀도, 그리고 N 은 한 주기당 전체 시간 step의 수를 말한다.

히스테리시스 손실은 다음과 같이 표현될 수 있다 [3]:

$$W_{th} = \frac{K_h D}{T} \sum_{i=1}^{NE} \frac{\Delta V_i}{2} \left(\sum_{j=1}^{N_{pr}^i} (B_{mr}^{ij})^2 + \sum_{j=1}^{N_{p\theta}^i} (B_{m\theta}^{ij})^2 \right), \quad (5)$$

NE 는 철심에서의 유한 요소의 개수, K_h 는 히스테리시스 계수, ΔV_i 는 i 번째 유한 요소에 해당되는 부피, $N_{pr}^i, N_{p\theta}^i$ 는 r, θ 방향의 시변 자계를 가지는 i 번째 유한 요소의 상대적인 최대, 최소 수, 그리고 $B_{mr}, B_{m\theta}$ 은 히스테리시스 루프의 진폭이다. 히스테리시스 손실과 와전류 손실은 각각 f 와 f^2 에 비례한다는 가정 하에 Epstein 실험 데이터로부터 K_e 와 K_h 를 구할 수 있다.

2.3 해석 결과

2.3.1 IPMSM의 동작점

구동 조건을 고려한 철손을 계산하기 위하여, 식 (2)와 그림 5의 순서도를 해석 모델에 적용하였다. 그림 6은 동작 속도에 대한 동작점 변화를 나타낸다. 기저 속도는 3600[rpm] 정도이고, 전류 위상각은 79[deg]까지 증가한다.

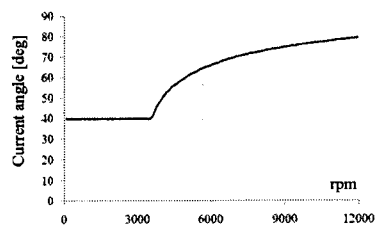


그림 6. 해석 모델의 전류 위상각

2.3.2 시뮬레이션 결과

그림 7에서는 전동기의 동작 조건을 고려한 철손 결과를 보여준다. 약계자 제어는 속도 3600[rpm]에서 시작되므로, 철손이 즉시 감소하는 경향을 보인다. 기기의 속도가 증가할수록, 고조파 성분들은 기본파 자속 밀도보다 철손에 더 많은 영향을 준다. 그러므로 속도가 높아질 때, 철손은 더욱 커지게 된다.

그림 8와 9에서는 동작 조건을 고려한 정수 슬롯 모델의 자속 밀도 파형과 철손 분포를 나타낸다.

그림 9에서는 기기의 속도가 12000[rpm]일 때, 철손 계산 결과를 보여주고 있다. 그리고 3600[rpm]일 때의 그림 8과 비교하여 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 약계자 동작 시, 고정자 전류와 영구자석의 기본파 자속은 서로 상쇄된다. 그러므로 전체 자속 밀도는 낮아지고 고정자 철심의 자계 포화는 발생하지 않는다. 그러나 자속의 고조파 성분들은 서로 상쇄되지 않는다. 따라서 약계자 제어가 동작하는 고속 동작 영역에서는 자속 파형의 왜곡이 심하다.

철손의 고조파 성분들은 약계자 동작 시, 철손의 기본 성분들 보다 더 주요한 부분을 차지한다. 이 상의 결과로부터, 약계자 제어 동작 시, 고조파 철손이 기본파 성분보다 더 주요하게 발생한다고 말할 수 있다.

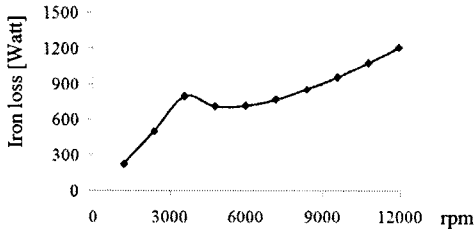


그림 7. 속도에 따른 해석 모델의 철손

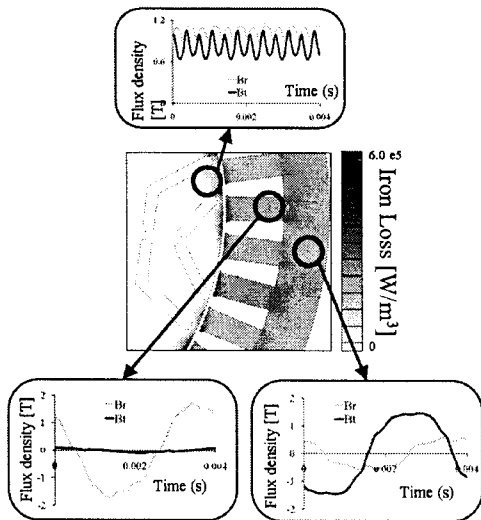


그림 8. 해석 모델의 철손 분포 (3600 [rpm], $\beta=41$)

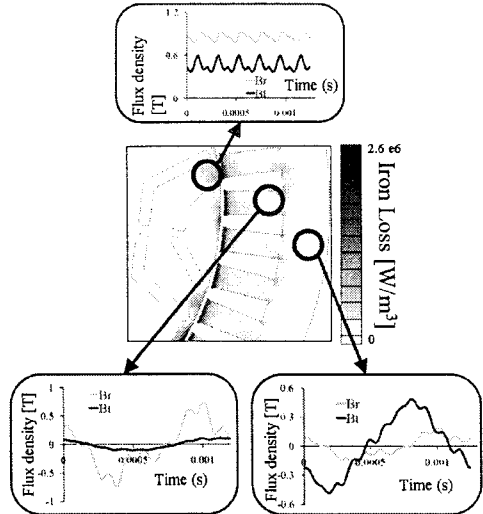


그림 9. 해석 모델의 철손 분포 (12000 [rpm], $\beta=79$)

3. 결 론

본 논문에서는 구동 조건을 고려한 IPMSM의 철손을 계산하였고, 구동조건에 따른 전류 벡터를 찾는 향상된 방법을 적용하였다. 그래서 속도에 따른 전류 벡터를 찾는 계산 시간은 단축되었다. 게다가, 구동 조건을 고려한 철손을 해석하고 제시하였다.

본 결과로부터, 약계자 제어가 동작하는 고속 영역에서의 철손은 고조파 성분의 철손이 주요하다고 말할 수 있다. 또한, 이 결과들은 고속으로 동작하는 IPMSM의 설계와 온도 해석에 유용할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비 지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] K. Yamazaki, and Y. Seto, "Iron loss analysis of interior permanent-magnet synchronous motors-variation of main loss factors due to driving condition," IEEETrans. Ind. Appl., vol. 33, no. 4, pp. 1045-1052, Jul. /Aug. 2006.
- [2] H. Domeki, Y. Ishihara, Y. Kawase, S. Kitamura, T. Shimomura, N. Takahashi, T. Yamada, and K. Yamazaki, "Investigation of benchmark model for estimating iron loss in rotating machine," IEEETrans. Magn., vol. 40, no. 2, pp. 794-797, March 2004.
- [3] K. Yamazaki, "Torque and efficiency calculation of an interior permanent magnet motor considering harmonic iron losses of both the stator and rotor," IEEETrans. Magn., vol. 39, no. 3, pp. 1460-1463, May 2003.
- [4] D. M. Ionel, M. Popescu, M. I. McGilp, T. J. E. Miller, S. J. Dellinger, and R. J. Heideman, "Computation of core losses in electrical machines using improved models for laminated steel," IEEETrans. Ind. Appl., vol. 43, no. 6, pp. 1544-1564, Nov. /Dec. 2007.