

매입형 영구자석 전동기의 약계자 제어로 인한 철손 분포에 관한 연구

이병화*, 권순오*, 홍정표*, 남 혁**
한양대*, LG전자**

Effect of Field Weakening Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor on Coreloss Distribution

Byeong-Hwa Lee*, Soon-O Kwon*, Jung-Pyo Hong*, Hyuk Nam**
Hanyang University*, LG Electronics**

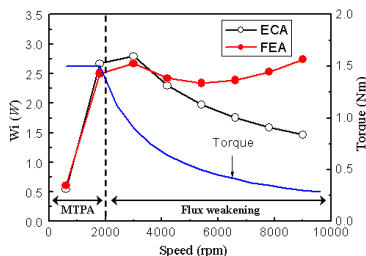
Abstract - This paper deals coreloss distribution of interior permanent magnet synchronous motor in the field weakening region and related problems to d-q axis equivalent analysis. Generally d-q axis equivalent circuit analysis is generally used for motor analysis, and it provides good analysis results. However, coreloss result of d-q axis equivalent circuit analysis results in significant difference with finite element analysis especially in the field weakening operation region. Reason of the difference is discussed and finite element analysis and d-q axis equivalent circuit analysis are used for field calculation and verification.

1. 서 론

매입형 영구자석 동기전동기(Interior PM synchronous motor : 이하 IPMSM)의 경우 고효율, 고출력 그리고 넓은 속도 운전 영역과 같은 많은 장점들 때문에 그 사용 비중이 점점 높아지고 있다. 특히 약계자 제어를 함으로써 속도 영역을 더욱 넓힐 수 있다. 그러므로 IPMSM의 적용 분야는 작은 것에서 큰 파워 시스템까지 영역이 매우 넓어지고 있는 추세다 [1], [2].

현재 IPMSM의 특성해석을 위하여 d-q축 등가회로를 이용하며 유한 요소해석 (FEA)을 이용할 경우 보다 많은 시간을 절약할 수 있다. 또한 다양한 제어 방법 및 부하 조건 및 속도에 따라 전동기의 특성을 짧은 시간에 확인할 수 있는 장점이 있다. 전동기 제어방법에는 여러 가지가 사용되고 있다. 약계자 제어를 할 경우 전동기 운전 영역을 넓힐 수 있는 장점이 있어 현재 많이 사용되고 있다. 특히 electric vehicle 이나 hybrid electric vehicle에 사용되고 있는 traction motor의 경우 이 제어 방법은 필수적이다. 그러나 d-q축 등가회로를 이용하여 고속에서 전동기의 약계자 제어를 할 경우, 그림 1에서와 같이 철손이 FEA와 특성해석 값이 많은 차이를 가짐을 확인할 수 있다. 그림 1의 경우 속도-토크 그래프에서 알 수 있듯이 2000rpm까지는 MTPA (Maximum torque per ampere) 제어를 그 이후에서는 약계자 제어를 이용하였다. MTPA 영역에서는 FEA와 d-q축 등가회로를 이용한 결과인 ECA가 거의 유사한 양상을 보이거나 약계자 영역에서는 반대의 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다 [3],[4].

따라서 본 논문에서는 철손이 FEA와 d-q축 등가회로로 산정된 철손이 다른 원인에 대하여 다루었다. 대상 모델을 이용하여 현상을 확인한 후 FEA와의 등가회로 철손을 비교하였으며 그 원인을 확인하고 검증하였다. 먼저 철손의 기본과 성분만을 다루었으며 만약 고조파 성분까지 고려하게 된다면 고속에서의 철손의 차이는 더 클 것으로 예상된다.



〈그림 1〉 주 운전 영역에서의 철손 비교

2. 해석 이론

2.1 IPMSM의 d-q축 등가회로

d-q축 등가회로는 일반적으로 전동기 특성 해석시 유용하게 사용하고 있다. FEA가 정확한 해석 결과를 도출하지만 넓은 운전 영역에서의 특

성해석을 하기 위해서는 비효율적이다.

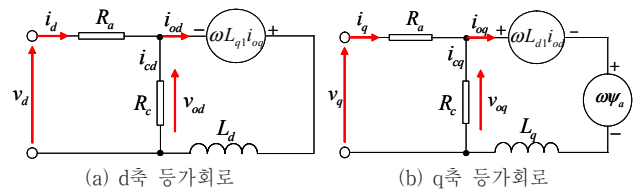
그림 2는 일반적인 IPMSM의 등가회로를 나타낸 것이다. R_c 는 철손 저항으로 병렬로 연결되어있으며 본 논문에서는 쇄교자속의 기본파만 고려하여 특성해석을 하였다.

2.2 FEA를 이용한 철손 해석

FEA를 이용하여 철손을 산정하기 위해서 철손 저항과 무부하시 철손을 산정해야한다. 철손 저항은 무부하 쇄교자속과 철손을 이용하여 속도에 따라 아래의 수식 (1)과 같이 모델링 할 수 있다.

$$R_c = a \cdot \omega_e^b \quad (1)$$

일반적으로 철손은 hysteresis와 eddy current loss로 구성되어있으며 철손 저항은 hysteresis와 eddy current loss로 표현되어져야한다.



〈그림 2〉 d-q축 등가회로

3. 약계자 제어에서의 철손

3.1 대상 모델

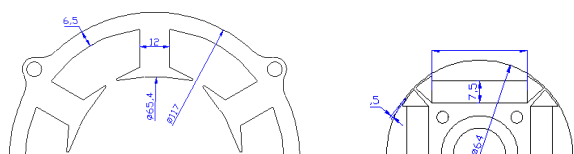
표 1은 대상 전동기의 사양을 나타낸 것이며 4극 6슬롯의 냉장고 컴프레서용 전동기이다. 그림 3은 대상 전동기의 고정자와 회전자자의 형상 및 치수를 나타내었다.

3.2 무부하 해석

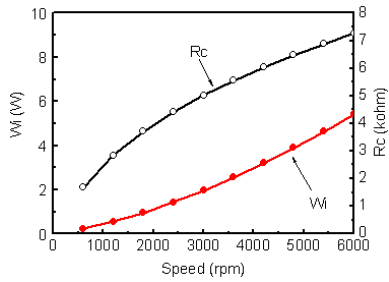
그림 4는 FEA를 이용하여 속도에 따라 산정된 무부하 철손과 철손 저항을 나타낸 것이다. 이때 속도에 따라 산정된 철손은 기본파와 쇄교자속만을 이용하였다. 약계자 제어에서는 철손 저항은 낮은 속도에서 높은 값을 가지며 높은 속도에서 철손 저항이 줄어들어야 FEA 결과와 비슷한 양상을 가질 것으로 판단된다.

〈표 1〉 대상 전동기 사양

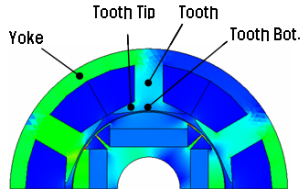
Item	Description
Motor type	IPMSM
Phase/ Pole/ Slot number	3/ 4/ 9
Stator/ Rotor / Stack diameter (mm)	90/ 41/ 45
Remanent flux density of PM (T)	1.1
Rc	$114.03 \cdot \omega_e^{0.583}$



〈그림 3〉 고정자와 회전자자의 형상 및 치수



〈그림 4〉 고정자와 회전자 형상의 특성 및 치수



〈그림 5〉 부분별 명칭

3.3 부하 해석

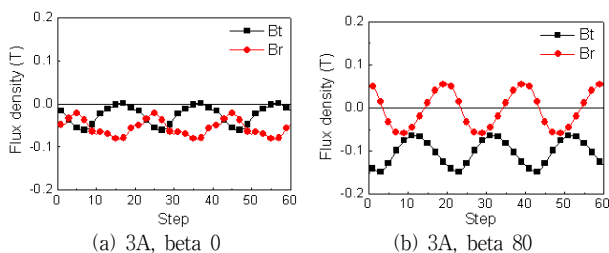
약제자 제어시 d축 전류가 증가되어진다. 따라서 전류 위상각에 따른 tooth와 yoke에서의 자속밀도를 FEA를 이용하여 비교하였다. 그림 5는 본 논문에서 사용된 전동기의 부분별 명칭에 대해 나타내었다. 그리고 그림 6과 7에서는 tooth tip, tooth 그리고 yoke에서의 자속 밀도 변화를 살펴보았다. 그 결과 무부하시 및 부하시 전류 위상각이 작을 때에는 자속 밀도 변화가 정현적으로 나타나나 전류 위상각이 커질 경우 파형이 많이 찌그러짐을 확인할 수 있었다. 여기서 입력 전류는 정격 전류인 3A를 인가하였다. 따라서 IPMSM의 약제자 제어시 전류 위상각이 점점 커지므로 이에 따른 tooth tip, tooth 와 yoke에서 쇄교자속의 고조파 성분은 많이 발생함을 확인할 수 있다. 이에 의한 정확한 수치는 표 2에 나타내었다.

그리고 그림 8은 부하 시 그리고 전류 위상각에 따른 철손 분포를 나타낸 것이다. 그림 6 (a)는 부하시 (3A, 전류 위상각 0) 철손의 분포와 그때의 자속 밀도 및 등토펙선 라인을 나타낸 것이며 그림 6 (b)는 부하시 전류 위상각이 80도 일 때의 철손 분포를 나타내었다. 전류 위상각이 0에서 운전할 경우 철손의 대부분이 tooth와 yoke에 분포하지만 전류 위상각이 80도 일 경우 tooth tip에서 철손이 높게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 여기서 쇄교되는 대부분의 자속은 고정자와 쇄교하지 않고 끝단부로 돌아 들어가는 성분이며 전동기의 쇄교자속으로 작용하지 않고 손실로 더해지는 것을 확인할 수 있다.

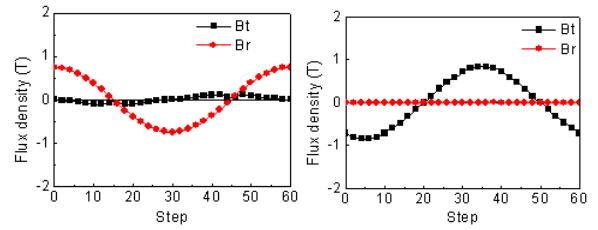
여기서 고조파 성분으로 발생되어 손실로 작용하는 성분들은 d-q축 등가회로를 이용하여 시뮬레이션 할 경우 반영하기가 힘들며 이것이 철손 성분의 오차의 원인이 된다. 따라서 현재 등가회로를 이용하여 전동기 특성해석 할 경우 발생하는 손실의 오차의 원인을 분석하였으며 향후 논문에서는 오차를 줄일 수 있는 철손 저하 모델링에 관하여 다루도록 하겠다.

〈표 2〉 전류 위상에 따른 쇄교자속, 자속밀도, 철손 변화

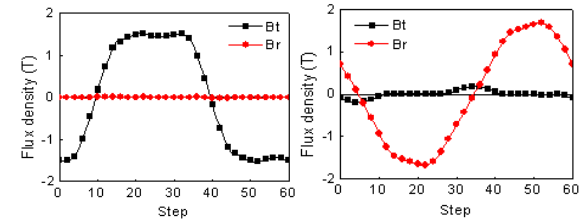
Beta(deg.)	0	40	80	No-load
$\Psi_o(Wb)$	0.280(217%)	0.206(159%)	0.138(107%)	0.129(100%)
Byoke (T, tangential)	1.768(213%)	1.24(150%)	0.296(35%)	0.828(100%)
Btooth (T, radial)	1.686(224%)	1.30(173%)	0.298(39%)	0.751(100%)
Wi (W, @3000rpm)	9.068(453%)	5.149(257%)	0.740(37%)	2.000(100%)



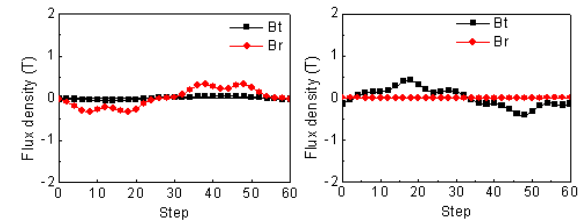
〈그림 6〉 Tooth tip에서 자속밀도 변화



(a) 무부하시 tooth와 yoke에서의 자속 밀도 변화

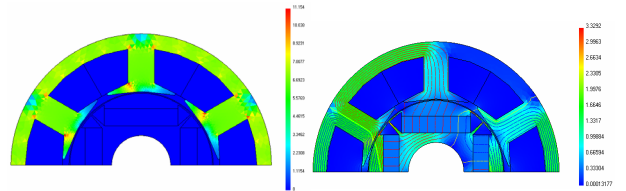


(b) 부하시 tooth와 yoke에서의 자속 밀도 변화 (3A, beta 0)

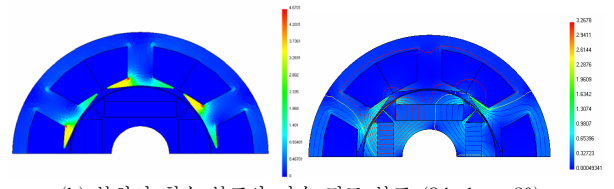


(c) 부하시 tooth와 yoke에서의 자속 밀도 변화 (3A, beta 80)

〈그림 7〉 Tooth와 yoke에서의 자속밀도 변화



(a) 부하시 철손 분포와 자속 밀도 분포 (3A, beta 0)



(b) 부하시 철손 분포와 자속 밀도 분포 (3A, beta 80)

〈그림 8〉 전류 위상각에 따른 철손 분포 및 자속밀도 분포

3. 결 론

본 논문에서는 IPMSM의 약제자 제어시 d-q축 등가회로를 이용한 철손값과 FEA를 이용한 철손값이 차이나는 원인에 대하여 분석하였다. 그 원인은 전류 위상각이 커짐에 따라 tooth tip, tooth 그리고 yoke에서의 자속 밀도의 변화 파형이 많이 왜곡되며 이때의 고조파 성분들이 철손에 영향을 미침을 확인하였다. 그리고 이 성분은 tooth tip에 집중되는 것을 확인하였다. 이것으로 d-q축 등가회로를 이용하여 전동기 특성해석을 할 경우 약제자 제어 영역에서 철손의 평가가 어려워진다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ji-Young Lee, Sang-Ho Lee, Geun-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, and Jin Hur, "Determination of Parameters Considering Magnetic Nonlinearity in an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 4, pp.1303-1306, April 2006.
- [2] J. B. Eom, etc., "Minimization of Cogging Torque in Permanent Magnet Motors by Stator Pole Shoe Pairing and Magnet Arc Design using Genetic Algorithm", KIEE Transactions on Electric Machinery, Vol. 51, No. 1, pp. 1-6, December 2002.
- [3] T.A Lipo, "Introductino to AC Machine Design vol.1", Wisconsin power electronics research center University of Wisconsin, 1996