

등가회로법과 유한요소법에 의한 고속 영구자석 전동기의 특성해석

정연호, 이기창, 구대현
한국전기연구원

Characteristic Analysis of a High Speed Permanent Magnet Motor by using Equivalent Circuit Method and Finite Element Method

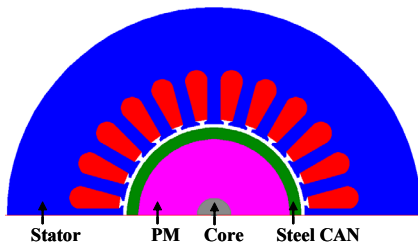
Y.H. Jeong, K.C. Lee, D.H. Koo
Korea Electrotechnology Research Institute

Abstract - 본 논문에서는 철손과 와류손이 고려된 등가회로를 이용하여 고속 영구자석 전동기의 정밀한 특성분석을 수행하였는데, 철손과 와류손으로 구성된 자기적인 손실을 등가저항으로 취급하고 이들이 포함된 등가회로를 이용하여 등가 손실저항과 정격 전류를 수치해석으로 계산하는 방법을 제안하였다.

1. 서 론

고속 회전기는 고속회전을 이용하여 기존의 저속 회전기보다 소형, 경량, 고출력, 고효율 성능을 얻을 수 있기 때문에 응용 시스템의 간소화, 고효율화를 목적으로 고속 회전기를 응용한 산업용 기기의 개발이 확대될 전망이다. 최근에는 터보 공기압축기, 터보 송풍기, 진공펌프, 원심분리기 등의 산업용 터보기기와 플라이휠 에너지 저장장치, 마이크로 터빈용 발전시스템 등 에너지 분야에 고속 영구자석 회전기가 응용되어 상업화되고 있다.

일반적으로 전동기의 손실은 마찰 및 풍손에 의한 기계적인 손실, 고정자 권선에 의한 동손, 고정자 및 회전자 철심에서 발생하는 철손으로서 크게 3가지 성분으로 구분할 수 있다. 회전속도 수 만 rpm급 이상의 고속 구동시스템에 응용되는 영구자석 전동기는 영구자석 표면부착형이 대부분으로서 고속회전으로 인한 원심력으로부터 영구자석의 비산을 방지하고 회전자의 구조를 견고하게 하기 위해 그림 1과 같이 회전자의 영구자석 외측에 비자성의 금속 캔을 부착한다. 금속 캔은 도전율을 가지고 있기 때문에 슬롯과 치로 구성된 고정자의 자기회로에 의한 국부적인 자속밀도의 변화로 인해 금속 캔에 와전류가 발생하여 고속 영구자석 전동기에서 발생하는 손실은 동손, 철손, 와류손, 기계손으로서 4가지 성분으로 분류할 수 있다.



〈그림 1〉 고속 영구자석 전동기의 형태

본 논문에서는 철손과 와류손으로 구성되는 자기적인 손실을 계산하고 이 손실을 자기손실 저항으로 등가화하며 이 과정에서 전기적인 정격을 동시에 계산하여 고속 영구자석 전동기의 특성을 보다 정밀하게 계산하는 방법을 제안한다.

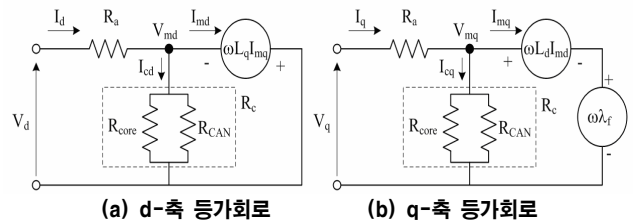
2. 고속 영구자석 전동기의 특성계산

2.1 고속 영구자석 전동기의 등가회로

금속 캔에서 발생하는 와류손과 고정자 철심에서 발생하는 철손이 고려된 영구자석 전동기의 dq-축 등가회로는 그림 2와 같이 표현된다. 그림 2로부터 영구자석 전동기의 전압방정식은 정상상태에서 식(1)과 식(2)로 표현할 수 있다[1][2].

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = R_a \begin{bmatrix} I_{od} \\ I_{oq} \end{bmatrix} + \left(1 + \frac{R_a}{R_c}\right) \begin{bmatrix} V_{od} \\ V_{oq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{od} \\ V_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_{qs} \\ \omega L_{ds} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{md} \\ I_{mq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \lambda_f \end{bmatrix} \quad (2)$$



(a) d-축 등가회로 (b) q-축 등가회로

〈그림 2〉 고속 영구자석 전동기의 dq-축 등가회로

여기서,

$$I_{md} = I_d - I_{cd} \quad (3)$$

$$I_{mq} = I_q - I_{cq} \quad (4)$$

$$I_{cd} = -\frac{\omega L_q I_{mq}}{R_c} \quad (5)$$

$$I_{cq} = \frac{\omega(\lambda_f + L_d I_{md})}{R_c} \quad (6)$$

$$\frac{1}{R_c} = \frac{1}{R_{core}} + \frac{1}{R_{CAN}} \quad (7)$$

- I_d, I_q : 상전류의 d-와 q-축 성분
- I_{cd}, I_{cq} : 자기적 손실의 d-와 q-축 성분
- V_d, V_q : 상전압의 d-와 q-축 성분
- λ_f : 영구자석에 의한 상당 쇄교자속수, rms
- L_d, L_q : 인덕턴스의 d-와 q-축 성분
- R_{CAN}, R_{core}, R_c : 와전류손, 철손 그리고 자기손실

전류 I_a , 상 전압 V_a , 그리고 토크 T_q 는 각각 식(8)로부터 식(10)까지와 같이 표현할 수 있다.

$$I_a = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \quad (8)$$

$$V_a = \sqrt{(R_a I_d - \omega L_q I_{mq})^2 + (R_a I_q + \omega(\lambda_f + L_d I_{md}))^2} \quad (9)$$

$$T_q = pm[\lambda_f I_{mq} + (L_d - L_q) I_{md} I_{mq}] \quad (10)$$

식(10)에서 p 는 쌍극수, m 은 상수를 나타낸다. 식(1)로부터 식(10)까지에 주어진 방정식에 의해 전기적인 파라미터와 손실저항을 이용하여 영구자석 전동기의 출력특성을 정밀하게 계산할 수 있다.

2.2 정격전류와 손실저항의 계산

식(3)~식(6)을 검토하면 손실저항과 정격전류는 상호 종속적인 관계를 갖기 때문에 자기적인 손실로부터 등가 손실저항 R_c 를 계산하기 위해서는 dq-축 정격전류를 동시에 계산해야 한다. 표면부착형 영구자석 전동기에서는 $L_d = L_q$ 이므로 식(10)을 토크전류 I_{mq} 로 정리하면 식(11)과 같다.

$$I_{mq} = \frac{T_q}{pm\lambda_f} \quad (11)$$

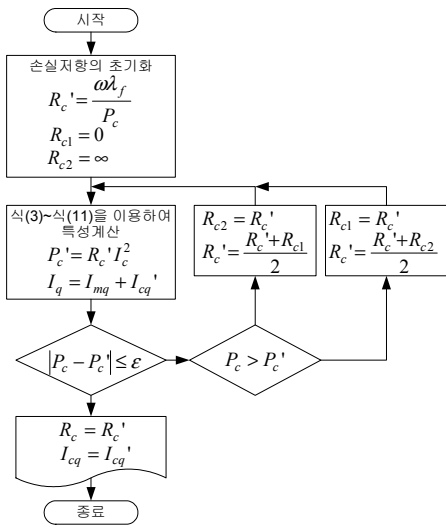
식(11)에 따르면 토크전류 I_{mq} 는 손실과는 무관하게 독립적으로 결정할 수 있다. 그리고 손실저항 R_c 가 주어지면 식(5)에 의해 손실전류의 d-축 성분인 I_{cd} 도 결정할 수 있으며, 단위 전류당 최대 토크를 얻기 위해 d-축 전류는 일반적으로 0으로 설정하여 전동기를 제어하므로 이 경

우에 $I_{md} = -I_{cd}$ 의 관계가 성립하여 식(3)으로부터 식(10)까지의 방정식을 이용하여 영구자석 전동기의 정격전압, 전류 등의 출력특성을 계산할 수 있다. 또한 손실저항은 초기치를 가정하여 전술한 절차에 따라 수치해석적인 방법으로 계산할 수 있다.

우선, 초기에 손실저항에서의 전압강하를 무부하 유기기전력과 동일하다고 가정하면, 초기의 손실저항 R_c' 는 철손과 와전류손실이 포함된 자기손실 P_c 로부터 식(12)와 같이 계산된다.

$$R_c' = \frac{\omega \lambda_f}{P_c} \quad (12)$$

식(12)에 의해 계산된 손실저항 R_c' 를 식(5)와 식(6)에 대입하면 임시적으로 자기손실 전류 I_{cd}' , I_{cq}' 와 자기손실 P_c' 를 계산할 수 있다. 이때 P_c' 가 미리 계산된 자기손실 P_c 와 같으면 현재의 각 전기량이 정격치가 되고, $P_c - P_c'$ 의 결과에 따라 2분법을 이용하여 손실저항을 작거나 크게 조정한다. 상술한 계산절차를 흐름도로 나타내면 그림 3과 같다. 보다 정밀한 계산을 위해서는 유한요소법을 이용한 손실계산과 등가회로법을 이용한 손실저항 및 정격전류 계산을 반복해야 한다.



〈그림 3〉 손실저항 및 전기적인 정격 계산 흐름도

2.3 고속 영구자석 전동기의 정상상태 특성계산

특성계산을 위한 고속 영구자석 전동기의 사양은 표1과 같으며 정격 출력은 225kW이다. 표1에서 정격 토크는 회전축에서 발생하는 순수한 출력토크이며, 마찰 및 풍손을 고려한 기계손실 토크는 정격토크의 약 1.91%로 가정하였다.

〈표 1〉 정격계산을 위한 고속 영구자석 전동기의 사양

항 목	사 양
정격 속도 [rpm]	60,000
정격 토크 [Nm]	35.81
극수	2
저항 [mΩ]	1.723
d-, q-축 인덕턴스 [uH]	14.877
상당 채교자속 [V/rad/s], peak	0.040458
기계손실 토크 [Nm]	0.68437

고속 영구자석 전동기의 금속 캔에서 발생하는 와전류 손실과 고정자 철심의 철손은 유한요소법에 의한 과도해석을 이용하여 계산하였다. 유한요소해석에서 적용한 철손계산식은 통계이론에 근거하여 3개의 손실 성분으로 분리한 식(13)과 같다[3].

$$P_e = k_h B_{max}^2 f + k_c (B_{max} \cdot f)^2 + k_e (B_{max} \cdot f)^{1.5} \quad (13)$$

여기서, B_{max} 와 f 는 자속밀도의 최대치와 주파수이고, k_h , k_c 그리고 k_e 는 각각 히스테리시스 손실계수, 와전류 손실계수 그리고 excess 손실계수이며, 상수 β 는 보통 2가 사용된다.

유한요소법을 이용하여 정격출력에서 계산한 철손과 금속 캔의 와전류 손실은 표2와 같다. 2.2절에서 서술한 방법을 이용하여 표1에 나타난 고속 영구자석 전동기의 전기적인 출력특성을 계산하면 표3과 같다.

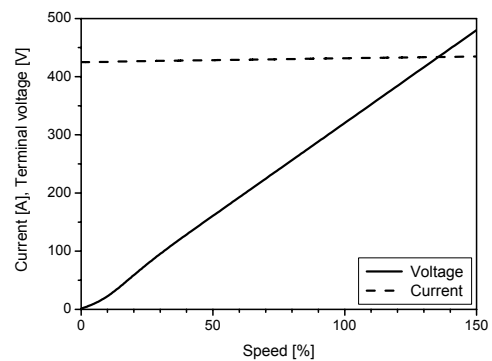
〈표 2〉 손실 계산결과

전기적인 손실[W]			기계손실[W]
동손실	와전류 손실	철손	
962.8	1,794	1,809.4	4,300

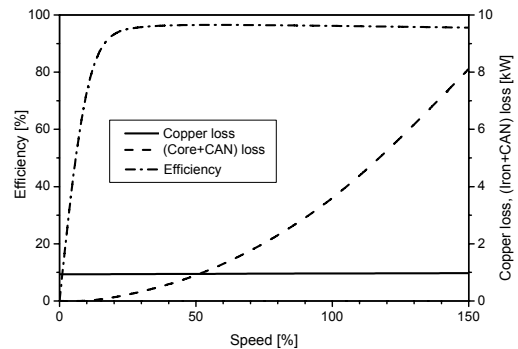
〈표 3〉 등가회로법에 의한 전기적인 출력특성

항 목	V_d [V]	V_q [V]	V_{md} [V]	V_{mq} [V]	역률	효율[%]
사 양	-39.747	180.625	-39.747	179.882	0.9766	96.21
항 목	I_d [A]	I_q [A]	I_{md} [A]	I_{mq} [A]	I_{cd} [A]	I_{cq} [A]
사 양	0	431.586	1.407	425.22	-1.407	6.367

정격출력에서 철손과 와전류손실을 나타내는 상당 손실저항 R_c 는 28.25[Ω]이며, 자기손실전류는 6.52[A]로 계산되어 이를 각 손실전류로 분리하면 철손전류는 3.27[A], 와전류는 3.25[A]이다. 그림 4와 그림 5는 속도에 따른 정격 선간전압 $\sqrt{3} V_a$ 및 정격전류 I_a , 효율 및 손실변화를 각각 나타낸다. 그림 5에 따르면 계산에 사용된 고속 영구자석 전동기의 효율은 넓은 속도범위에서 약 96.2[%]로 일정한 값을 나타내고 있다.



〈그림 4〉 속도에 따른 정격전압과 정격전류



〈그림 5〉 속도에 따른 효율과 손실변화

3. 결 론

본 논문에서는 유한요소법과 자기적인 손실이 고려된 등가회로법을 이용하여 고속 영구자석 전동기의 출력특성을 정밀하게 계산하였다. 계산방식에서는 수치해석적인 방법으로 금속 캔에 발생한 와전류손실과 고정자 철심의 철손을 자기손실저항으로 등가화 하였으며 이를 이용하여 전기적인 정격출력을 정밀하게 계산할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] R.S.Colby and D.W.Novotny, "Efficient operation of surface mounted PM synchronous motors", IEEE Trans. Ind. Appl. vol.IA-23, pp.1048-1054, Nov./Dec.1987.
- [2] S.Morimoto, Y.Tong, Y.Takeda and T.Hirasa, "Loss Minimization Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Electronics, vol.41(5), pp.511-517, Oct. 1994.
- [3] G. Bertotti, "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials", IEEE Trans. Magn., vol.24, pp.621-630, 1988.