CAE를 이용한 전동기의 설계 해석 기술 동향

Technical trend of Design & Analysis for Electric motor using CAE

이정종 · 김영균 · 유세현 · 정인성

J. J. Lee, Y. K. Kim, S. H. Rhyu, I. S. Jung

1. 서 론

오늘날 경제와 산업의 발전은 각종 요소기술의 발달에 의존하는 바가 크며 세계적으로 첨단산업을 선도하고 있는 선진국의 경우를 보면 신소재의 개발, 고도의 기계가공기술 설계 및 제어기술등 생산 기술의 향상을 기업 뿐 아니라 국가적 목표로 삼고 있다. 1980년도부터 주목을 받고 있는 메카트로닉스 분야의 중요 핵심기기인 전동기의 성능 분야는 80년대 이전의 해석기법에 의존한 설계에서 90년대 수치해석기법이 도입됨으로서 획기적인 발전을 거듭하였다. 현재는 전동기 분야에서 선도적인 CAE 기법들을 보유한 상용 소프트웨어들을 활용하여 전동기 설계 분야에서 활용하고 있다¹⁾.

전동기의 설계 및 해석 단계는 일반적으로 등가회로기법을 이용한 방법을 이용하고, 등가회로에 필요한 파라미터를 FEM 해석을 이용하여 산정하는 방법을 사용하였으나, 최근에는 컴퓨터 성능이 향상되고 해석기법의 발전에 힘입어 등가회로와 FEM이 Coupling되어 Transient 해석기법이 도입되어 비교적 전동기 초보자라고 하더라도 특성해석을 수행할 수 있다. 하지만 Transient 해석의 경우 해석 시간이 긴 단점을 가지고 있으므로 전통적인 등가회로 기법을 사용하는 방법이 여전히 많이 활용되고 있다²⁻⁴⁾.

본 해석에서는 DC전동기와 최근 많은 연구가 이루어지고 있는 영구자석 매입형 동기전동기(이하 IPMSM)에 대한 등가회로 기법을 소개하고, 유한요소 해석을 수행하여 특성해석을 산정하는 방법에 대하여 간략하게 기술하였다. DC전동기에서는 온도 변화에 따른 속도, 출력 특성변화를 서술하였으며, IPMSM에서는 전류위상각 변화에 따른 특성 결과를 나타내었다. IPMSM 모터는 제작된 실험을 통하여 CAE타당성을 검증하였으며, IPMSM의 전류벡터 운전 구간에 대하여 기술하였다.

2. DC 직류 전동기의 특성 해석

2.1 DC 직류모터의 등가회로

일반적으로 브러쉬 저항을 고려하지 않은 DC전동기의 등가회로는 그림 1과 같이 표현 할 수 있다. 등가회로의 회로 방정식은 식(1)과 같이 표현하고, 역기전력은 식(2), 출력토크는 식(3)과 같이 표현된다. 여기서, k_e 와 k_t 는 각각 역기전력 상수와, 토크 상수를 나타내고, $k_e = k_t$ 가 성립한다.

그림 1. DC 전동기의 등가회로

$$V = I_a R_a + E_a \quad (1)$$

$$E_a = k_e \cdot \omega \quad (2)$$

$$T = k_t \cdot I_a \quad (3)$$

여기서, V 는 전압(V), I_a 는 전류(A), R_a 는 저항(Ω), E_a 는역기전력, k_e 역기전력상수 (V/rad/sec), ω 는 각속도 (rad/sec), T 는 토크(Nm), k_t 는 토크 상수 (Nm/A) 를 나타낸다.

2.2 DC 직류 모터의 유한요소 해석

DC전동기는 역기전력 상수와 토크 상수가 자속이 포화 되지 않은 상태에서는 동일한 값을 가지므로 토크상수를 산정한 후 역기전력 상수로 환산이 가능하다. 표 1과 같은 전동기대상으로 유한요소 해석을 한 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2(a)는 자속밀도 분포로써 영구자석의 동작점, 철심의 포화 상태를 확인 할 수 있고, 회전자의 회전력을 산정 할 수 있다. 그림 2(b)는 자속의 흐름을 알 수 있고, 극당 자속량 및 코일의 쇠교자속량이 산정 가능하다.

표 1. DC 전동기 사양

Item	Unit	Value
구동전압	V	24
정격전류	A	18
정격속도	rpm	600
정격토크	Nm	4
정격출력	W	250W

(a) DC 전동기의 자속밀도 분포

(b) DC 전동기의 등포텐셜 분포

그림 2. FEA 해석 결과

FEM 해석 결과로부터 산정된 k_t 와 k_e 를 바탕으로 수식 (1)~(3)을 이용하여 특성해석을 수행할 수 있다. 그림 3은 해석된 출력 곡선을 나타낸다. 정격 4Nm에서 속도 600rpm 달성이 가능하고 효율은 약 75%가 가능하다. 다소 효율이 낮지만 유압용 기기로 대부분 4Nm의 이하 1~2Nm에서 동작하기 때문에 주 운전 구간에서는 85% 이상의 효율을 가질 수 있다.

그림 3. DC전동기의 등가회로 해석 결과

2.2 온도 변화에 따른 DC 전동기의 특성변화

영구자석을 사용하는 전동기는 온도에 따라서 특성이 변화된다. 주요 변화 재질은 영구자석의 잔류자속밀도와 코일의 저항이 변경되며, 표1은 주변 온도에 따른 영구자석 잔류자속밀도와 코일의 저항을 나타낸다. 영구자석온도가 상온 20℃의 영구자석이 -55℃에서는 잔류자속밀도가 1.24로 상승하게 되고 운전온도인 80℃에서는 1.07로 잔류자속밀도가 낮아진다. 온도 변화를 고려하여 전동기의 토크-속도-전류 특성해석을 수행하면 그림 4와 같이 나타난다. 주변 온도가 올라 갈수록 무부하 회전속도는 증가하고, 최대 출력토크는 줄어든다. 그 이유는 영구자석온도가 올라가면 자속량이 감소함으로써 역기전력이 줄어들게 되어 무부하 회전속도가 증가하고, 코일 저항이 커짐으로써 최대출력 토크는 줄어들게 된다.

표 2. 온도변화에 따른 특성변화

구분	온도 (°C)		Br (T)	저항(Ω)
	영구자석	코일	영구자석	코일
1	-55	-55	1.24	0.260
2	20	20	1.15	0.350
3	80	100	1.07	0.446

그림 4. 온도를 고려한 DC전동기의 특성

3. 매입형 영구자석 전동기 설계 및 해석

3.1 3상 영구자석 전동기의 등가회로

3상 IPMSM의 출력특성 해석을 쉽게 도출하기 위해서, 3상 전압방정식을 좌표 변환 행렬을 이용하여 d-q 등가 전압방정식 모델을 일반적으로 사용한다. 이는 3상 전동기를 마치 직류기처럼 특성해석을

용이하게 할 수 있도록 하는 좌표변환 기법을 이용하는 것이다.

철손저항 R_c 를 도입하여 IPMSM의 기본등가회로에 병렬로 삽입하게 되면, 철손을 고려한 등가회로는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 이것으로 부터 철손을 고려한 IPMSM의 전압방정식은 아래와 같이 모델링 할 수 있다 [1-3].

(a) d 축 등가회로

(b) q축 등가회로

그림 5. 철손을 고려한 IPMSM의 등가회로

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_a \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \left(1 + \frac{R_a}{R_c}\right) \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ -\omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Phi \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$i_{cd} = -\frac{\omega L_q i_{oq}}{R_c}, i_{cq} = \frac{\omega(\Phi_a + L_d i_{od})}{R_c} \quad (6)$$

$$i_{od} = i_d - i_{cd}, i_{oq} = i_q - i_{cq} \quad (7)$$

(4)~식(7)로부터 유효전류 i_{od}, i_{oq} 를 계산할 수 있으며, 이것으로부터 발생토크(T)는 식(8), 동손(W_c)은 식(9), 철손(W_i)은 식(10) 그리고 IPMSM의 총손실(W_{loss})는 식(11), 효율(η)은 식(12)와 같이 각각 표현할 수 있다.

$$T = P_n \{ \Phi_a i_{oq} + (L_d - L_q) i_{od} i_{oq} \} \quad (8)$$

$$W_c = R_a I_a^2 = R_a (i_d^2 + i_q^2) \quad (9)$$

$$W_i = \frac{V_o^2}{R_c} = \frac{v_{od}^2 + v_{oq}^2}{R_c} \quad (10)$$

$$W_{loss} = W_c + W_i \quad (11)$$

$$\eta = \frac{P}{P + W_{loss}} \quad (12)$$

여기서, v_d, v_q 는 d-q축 전압, i_d, i_q 는 d-q축 전류, L_d, L_q 는 d-q축 인덕턴스, R_a 는 상저항 그리고 Φ_a 는 영구자석 쇠교자속량을 각각 나타낸다.

3.2 8kW급 영구자석 매입형 전동기 해석모델

영구자석 매입형 동기 전동기(이하 IPMSM) 해석예제는 6극 24슬롯으로 표3과 같은 요구 사양을 가지며, 그림 6과 같이 형상을 가진다.

표 3. IPMSM 해석 모델 사양

Item	Unit	Value
구동전압	Vdc	300
정격전류	A	18
정격속도	rpm	600
정격토크	Nm	35 이상
정격출력	kW	8.8
최대토크	Nm	110
최대출력	kW	18kW
효율	%	90 이상
외경	mm	200
적층길이	mm	70

그림 6. 16극 24슬롯 IPMSM 단면도

3.3 IPMSM 전동기의 유한요소 해석

IPMSM을 해석하기 위해서 Jmag v8.4를 사용하였다. 그림 7은 유한요소 해석 결과의 자속밀도를 나타낸다. 치에서 자속밀도는 1.8T로 포화된 상태이고 Yoke 자속밀도는 1.4T 근처로 다소 높은 상태로 나타난다. 그림 8은 실제 제작된 IPMSM의 형상을 나타낸다. 등가회로 특성해석을 위한 주요 파라미터로써 역기전력, 인덕턴스 성분이 중요한데, 그림 9는 유한요소 해석의 역기전력 파형과 실험 파형을 비교하였다. 1000rpm에서 역기전력은 해석 결과와 파형의 왜곡율(THD) 및 크기에서 매우 유사한 결과를 나타낸다.

그림 7. IPMSM 유한요소 해석 결과

그림 8. IPMSM proto type

그림 10과 표4는 정격 토크 영역에서 동일한 전류에서 전류 위상각에 따른 유한요소 해석 결과를 나타내었다. 전류위상각 25~30도 부근에 발생토크는 최대가 되며, 토크리플은 7%수준이다.

(a) 해석 결과

(b) 시험결과

그림 9. IPMSM 역기전력 시험 결과 비교

그림 10. 전류위상각 변화에 따른 정격토크 특성해석 결과

표 4. 전류위상각에 따른 정격토크 특성

구 분	전류위상각 (deg.)					
	0	15	20	25	30	35
평균토크 (Nm)	34.3	39.5	40.7	41.7	42.2	42.2
토크리플 (%)	11.6	7.5	6.9	6.4	6.8	7.5

그림 11은 설계된 proto type IPMSM의 전운전범위에서의 운전가능한 출력맵을 나타낸다. 운전영역 A는 최대토크구간으로 2분 연속운전 범위를 나타내고, 운전영역 B는 정격운전 범위로서 60분 이상의 연속운전이 가능한 범위를 도시하고 있다.

그림 12는 proto type IPMSM의 전운전범위에서의 단위전류당 최대토크 운전을 시행할 경우의 운전가능한 전류벡터 영역을 나타낸다.

그림 11. 전운전영역의 출력(W) 맵

그림 12. 전운전영역의 전류벡터궤적

4. 결 론

본 해설에서는 250W급 DC전동기와 견인용 10kW급 IPMSM의 제반 출력 특성을 산정하기 위한 해석 방법에 대하여 기술하였다. 각 전동기를 해석함에 있어서 모터의 등가회로에 대한 방정식 도출하고, 각 파라미터를 CAE를 활용하여 산정함으로써 특성해석에 활용하는 방법을 사용하였다. DC 전동기는 IPMSM에 비하여 해석적으로 수식이 간단하고, 역기전력과 저항성분을 도출하면 등가회로를 이용하여 비교적 간단하게 특성을 도출할 수 있다. IPMSM 전동기는 해석방법적으로 타 전동기

에 비하여 복잡하지만 넓은 운전 범위를 가질 수 있고, 영구자석의 표면부착형에 비하여 기계적인 안정성이 높으므로 향후 많은 발전이 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) 이은웅, 김일중, “소형 정밀 전동기의 기술동향과 해석기법”, 대한전기학회지 제45권 2호, 1996년, 2월
- 2) 장세명, 정현술, 장강원, 양인영, 이원중 “보조동력장치 연료 공급용 서보밸브 토크모터의 기초 수치모사 연구”, 유공압시스템학회지 제6권 2호, 2009년, 6월
- 3) L. Fang, S. J. Lee, B. H. Lee, J. P. Hong, "Study on Machine Characteristics in Interior Permanent Magnet Synchronous Motor According to Pole/Slot Combinations with Radial Vibration Force Consideration", Trans. KIEE. Vol. 60, No. 5, pp. 949-952 May, 2011.
- 4) 홍정표, 허진, “차세대 자동차용 전동구동 시스템 개발동향”, 전기의 세계, 2010년 제59권 제9호, pp. 20~29

[저자 소개]

이정중(책임저자)

E-mail : leejj@keti.re.kr

Tel : 032-621-2844

1976년 3월 10일생.

2002년 창원대학교 전기공학과 석사 졸업,

2011년 한양대 자동차공학과 박사 졸업

현재 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터 선임연구원, 자동차용 파워트레인 모터, 로봇산업, 고정밀/고출력/고효율 전동기 개발 연구에 종사, 대한전기학회, 한국자동차공학회 회원

김영균(공동저자)

E-mail : ykkim@keti.re.kr

Tel : 031-621-2869

1971년 12월 14일생, 2000년 창원대학교 전

기공학과 대학원 석사, 2004년 동 대학원

박사, 2004년~2006년 삼성전자 가전

연구소 책임연구원, 현재 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터 책임연구원, 로봇산업, 정보가전산업, 자동차산업 분야용 고정밀/고출력/고효율 전동기 개발 연구에 종사, 대한전기학회, 한국자동차공학회 회원, 공학박사.

유세현(공동저자)

E-mail : rhyush@keti.re.kr

Tel : 032-621-2848

1970년 11월 16일생.

1998년 한양대학교 전기공학과

석사, 2006년 동 대학원 전자전기제어계측
공학과 박사,

1999년~현재 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터 책임
연구원, 정밀모터 및 액추에이터 연구개발에 종사, 대한전기학
회 EMECS부문의 편집위원.

정인성(공동저자)

E-mail : isjung@keti.re.kr

Tel : 032-621-2845

1971년 3월 10일생.

1993년 한양대학교 전기공학과 졸업

2000년 동 대학원 공학박사 졸업.

2000년~현재 전자부품연구원 지능메카트로닉스연구센터 센터
장. 가전·로봇·산업·수송 분야의 제어용 전동기 및 이를 적
용한 액추에이터 개발 연구에 종사. IEEE 및 대한전기학회
Senior Member, 전력전자학회, 한국자동차공학회 회원.