

자기포화를 고려한 PMSM타입 전동기의 영구자석 평균온도 간접 추정 방법

강경호, 진형석, 유석진, 안효철
현대로템 기술연구소

An indirect calculating method of average temperature in permanent magnet for PMSM type motor considering the effect of magnetic saturation

Kyong-Ho Kang, Hyong-Suk Chin, Suk-Jin Yu, Hyo-Chul Ahn
Hyundai Rotem Company R&D Center

Abstract - 본 논문에서는 영구자석 동기전동기의 영구자석 평균온도를 다이내모 시험을 통해 얻어진 토크 데이터로부터 간접적으로 계산하는 방법이 제시된다. 특히 영구자석의 온도에 따른 잔류자속밀도 변화에 자기 포화 효과를 고려하여 다양한 운전점에서의 온도추이를 간단하고 정확히 계산할 수 있다.

변화 범위는 큐리온도 특성을 고려하면 관심온도 범위보다 훨씬 넓기 때문에 본 논문에서는 λ_{PM} 의 영향만 고려하고자 한다. 따라서, 온도에 따른 영구자석의 출력토크는 영구자석에 의한 자속 쇄교량인 λ_{PM} 의 온도특성에 좌우되며, 이는 자석의 고유특성인 잔류자속밀도(Br)값에 비례하게 된다[3].

1. 서 론

친환경 차량의 증가 및 고효율화에 대한 시장요구에 따라 백터제어가 가능한 영구자석형 동기전동기(PMSM:Permanent Magnet Synchronous Motor)의 적용이 증가되고 있다. 특히 희토류 재질을 적용한 영구자석 동기전동기는 높은 출력밀도와 효율, 넓은 정출력 영역으로 인해 하이브리드카 및 전기자동차 구동용 전동기로 적용된다. 희토류 재질의 영구자석은 크게 네오디뮴(NdFeB)과 사마륨(SmCo)계열로 분류되며 네오디뮴 계열의 적용이 일반적이다. 그러나, 네오디뮴 영구자석은 자석내부의 온도가 증가할수록 잔류자속밀도와 보자력이 감소하는 고온감자특성을 가지고 있어 고온영역에서 운전되는 견인전동기의 경우, 출력 저감이 발생할 수 있다. 따라서, 설계 및 성능 검증 단계에서 자석의 온도 상승을 합리적으로 반영하기 위한 다양한 연구가 학계에서 진행되어 왔다.

2.2 영구자석의 온도 특성

영구자석 동기전동기에 적용되는 영구자석 재질은 희토류 계열과 세라믹 계열 및 금속계 자석재질로 구분된다. 각 재질에 따라 온도에 따른 잔류자속밀도의 감자특성이 다르게 나타나는데 일반적인 대퓯값을 아래 표 1과 같이 정리하였다.

<표 1> 영구자석 재질별 잔류자속밀도(Br) 온도계수 비교

자석 종류	잔류자속밀도 온도계수	단위	비고
NdFeB	-0.1	%/°C	희토류계
Sm ₂ Co ₁₇	-0.025	%/°C	
Ceramic	-0.2	%/°C	세라믹계
Alnico 5-7	-0.02	%/°C	금속계

영구자석 동기전동기의 자석 내부 온도를 측정하는 방법으로는 크게 직접 계측 방식과 간접 계측 방식으로 나눌 수 있다. 직접계측방식은 회전자 자석표면에 부착한 온도센서를 외부의 슬립링을 통해 아날로그 신호로 변환하는 방식과 무선 계측기를 적용한 방식으로 구분된다[1]. 간접 계측방식은 제어기 내부에서 복잡한 신호처리 알고리즘을 이용하거나 코일온도에서 간접 추정하는 방식이 연구되고 있다.

표 1에 정리된 영구자석 잔류자속밀도의 감자계수는 자기회로가 구성되지 않은 상태에서 Lorentz 코일에 의해 계측된 값으로 실제 전동기와 같은 복잡한 자기회로를 구성할 경우 자기포화에 의한 영향 및 비선형 재질특성을 고려하는 방법이 요구된다.

본 논문에서는 다이내모 시험을 통해 얻어진 운전점별 토크 추이 데이터로부터 영구자석 온도의 시간에 따른 변화를 별도의 계측장비 없이 수치해석 기법을 이용하여 간접적으로 계산할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2.3 자기포화를 고려한 온도계수의 산정

본 논문에서는 자기포화현상을 고려하여 특정 운전점에서의 온도계수를 산정하기 위해 상용 전자장 수치해석 SW를 이용하였다. 아래 그림 1과 같이 전류벡터를 고정하여 온도별 잔류자속밀도 데이터를 입력한 후, 토크를 계산하면 출력토크와 자석 온도별 상관관계를 얻을 수 있다.

2. 본 론

2.1 출력 토크의 정의

3상 영구자석 동기전동기의 출력토크는 다음과 같이 정의된다[2].

$$T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_d I_q - \lambda_q I_d) \quad \text{-----(1)}$$

또는

$$T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{PM} I_q + (L_d - L_q) I_d I_q) \quad \text{-----(2)}$$

T : 토크

P : 극수

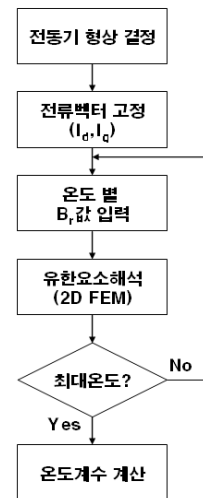
λ_d, λ_q : d, q축 쇄교 자속

λ_{PM} : 영구자석에 의한 쇄교 자속

I_d, I_q : d, q축 전류

L_d, L_q : d, q축 인덕턴스

식 (2)에서 인가된 전류벡터가 고정된다고 고려하면, 온도 변화에 영향을 받는 항은 λ_{PM} 과 L_d, L_q 로 영구자석 및 자성체 강판 재질의 온도특성에 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다. 자성체 강판 투자율의 온도



<그림 1> 자기포화를 고려한 온도계수 계산 순서

영구자석 온도별 잔류자속밀도 물성치에 대해 계산된 출력토크와 온도와의 관계는 식 (3)과 같이 1차 선형회귀식으로 나타나게 된다.

$$T = \alpha \cdot Temp + \beta \text{ -----(3)}$$

Temp : 온도 [°C]

식 (3)의 각 항을 시간에 대하여 미분하게 되면 식 (4)와 같다.

$$\Delta T = \alpha \cdot \Delta Temp \text{ -----(4)}$$

따라서,

$$\Delta Temp = \frac{\Delta T}{\alpha} \text{ 가 되어, 초기 온도값에 적산하여 시간에 따른 온도변화를 토크 데이터로부터 간접적으로 계산하는 것이 가능하게 된다.}$$

2.4 영구자석 온도의 추정 및 계산

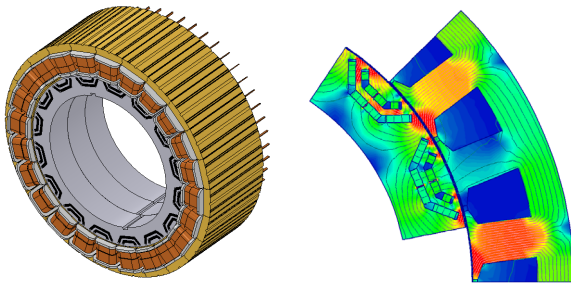
자기 포화에 대한 효과가 상대적으로 큰 매입자석형 영구자석 동기전동기를 해석 대상 모델로 선정하여 다이노모 시험기에서 실제 측정할 일정 운전점에서의 토크 감쇄 곡선으로부터 온도계수 산정 및 온도 추이 데이터를 추정하고자 한다.

2.4.1 해석 모델 정의

본 논문의 해석대상인 영구자석 동기전동기는 3상 매입자석형으로 설계되었으며, 표 2은 설계 및 제작된 전동기의 주요 제원을 정리한 것이다.

<표 2> 전동기의 주요 제원

항 목	값 [단위]	비 고
극 수/슬롯 수	16극 / 24슬롯	▷분할코어 적용 ▷각동선 권선
권선방식	집중권	
상 수	3상	
고정자 외경/내경	360 / 266 [mm]	
회전자 외경/내경	264 / 204 [mm]	
적층길이 / 공극길이	120 / 1.0 [mm]	
로터 구조	IPM타입 (2층)	



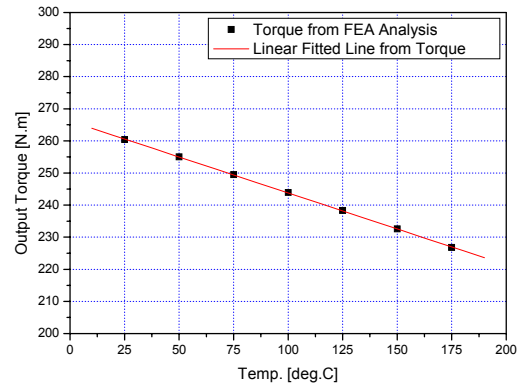
<그림 2> 전동기 설계 형상 및 해석 모델

2.4.2 온도계수의 계산 및 온도 추정

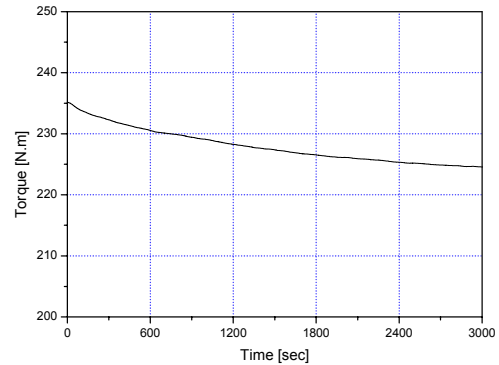
그림 2에 나타난 해석모델을 대상으로 전류벡터를 고정환 후, 온도와 출력 토크의 관계를 그림 3과 같이 상용 전자기장 해석툴을 이용하여 구할 수 있다. 그림 3에서 온도별 영구자석의 잔류자속밀도(Br)값을 변화시켜 출력토크의 저감 정도를 해석한 결과, 다음 식(5)와 같은 출력토크와 온도에 대한 1차 선형회귀식을 얻을 수 있다.

$$T = (-0.224) \cdot Temp + 266.18 \text{ -----(5)}$$

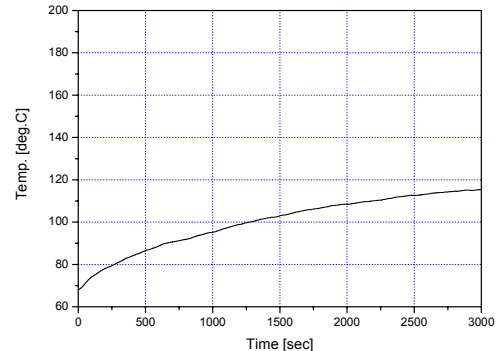
따라서, 제작 전동기의 해당 온도에서의 온도계수는 -0.224로 계산된다. 다이노모 시험기를 이용하여 운전속도를 일정하게 고정환 후, 토크 감쇄곡선을 얻기 위해 전류 지령은 각각 Id=-74.7A, Iq=198.8A를 인가하였다. 이 때의 토크 감쇄곡선이 그림 4와 같으며, 영구자석의 온도 추이를 정확히 확인하기 위해 토크 변화가 거의 없을 때 까지 1시간 정도 운전시켰으며, 외부의 냉각 조건에 따른 영향을 최소화하기 위해 외기 온도 및 냉각 조건은 일정하게 유지하였다.



<그림 3> 온도별 영구자석 잔류자속밀도값에 따른 출력토크 변화
식 (5)에서 구한 온도계수와 그림 4의 토크 감쇄 곡선에서 그림 5와 같은 영구자석 내부 평균온도를 추정할 수 있다.



<그림 4> 일정 운전점에서의 토크 감쇄 곡선 시험결과 (2,500RPM)



<그림 5> 추정된 영구자석 평균온도 변화 곡선

그림 5에서 인가된 전류 지령에 대하여 운전 1시간 후 추정된 영구자석의 평균온도는 118.3도로 예측된다.

3. 결 론

본 논문에서는 영구자석 전동기의 성능 및 제어에 영향을 미치는 영구자석의 고온감자 특성을 이용하여, 출력 토크와 자석 내부 온도간의 관계로부터 부하 상태에서의 온도계수를 계산하였다. 이를 이용하여 동일한 전류를 인가하여 시험한 토크 감쇄 곡선으로부터 토크의 시간에 따른 변화와 계산된 온도계수를 이용하여 운전 시 영구자석 내부 평균 온도를 추정하는 방법을 제시하였다. 해당 방법의 타당성을 추가적인 시험을 통해 입증할 예정이며, 영구자석 와류손 및 회전자 철손에 의한 온도상승 영향을 검증하기 위해 제안된 방법의 활용이 기대된다.

[참 고 문 헌]

[1] A.E.Fitzgerald, C.Kingsley, and S.D.Umans, *Electric Machinery*. New York:Mcgraw-Hill, 1989.
 [2] 윤명근, “무선계측기를 이용한 회전자팬 및 엔드링에서의 대류 열전달”, 대한기계학회 논문집 B권, 22권 제4호, 510-519, 1998
 [3] 김연수, “매입형 영구자석 동기전동기의 온도에 따른 제어특성에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 공학석사학위 논문, 2007