2008년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2008. 7. 16 - 18

열 등가회로를 이용한 SPMSM 전동기의 온도 예측

김도진 , 권순오, 정재우, 홍정표
한양대학교 기계공학부

Prediction of temperature using equivalent thermal network in SPMSM

Do-Jin Kim, Soon-O Kwon, Jae-Woo Jung and Jung-Pyo Hong
School of Mechanical Engineering, Hanyang University

Abstract - This paper deals with the temperature calculation using equivalent thermal network for surface mounted permanent magnet synchronous motor(SPMSM) under the steady-state condition. In the equivalent thermal network, heat sources are generated from copper loss and iron loss. Heat transfer consists of conduction, convection and radiation. However, radiation is neglected in this paper because its effect is much smaller than others. Although the heat transfer coefficient in conduction use material property, heat transfer coefficient in convection is difficult to measure due to the atmosphere and ambient condition. Temperatures of each region in SPMSM are measured by thermocouple in operating condition and the thermal resistances of convection are calculated by kirchhoff's current law(KCL) and experimental result. In order to verify the validation and reliability of the proposed equivalent thermal network, temperature which is calculated other load condition is compared with experimental results. Accordingly, temperatures of each region in other SPMSMs will be easily predicted by the proposed equivalent thermal network.

1. 서 론

일반적으로 표면 부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM)는 매입형 영구자석 동기전동기(IPMSM)에 비해서 코깅 토크가 작으며, 인덕턴스가 일정하기 때문에 제어가 용이하다는 장점을 가지고 있다. 따라서 자동차의 Electric power steering(EPS)용 전동기로 SPMSM이 많이 이용된다. 엔진에 의해서 항상 운전되는 기존의 Hydraulic Power Steering(HPS)과 비교해 보면 EPS는 연료 경제성 향상, CO_2 방출 저감 그리고 윤활유를 제거할 수 있어 환경적인 측면에서 많은 장점을 가진다. 그러므로 최근 HPS에서 EPS로 대체되고 있는 추세이다.

EPS가 성능을 만족하면서 운전을 하기 위해서 중요한 조건중의 하나가 온도이다. 온도가 높아질 경우 영구자석의 보자력이 감소하게 되고, 이 때 전기자 반작용에 의해서 영구자석의 감자가 일어나게 되어 전동기의 성능을 저하시킨다. 그리고 기계적 변형을 일으켜 전동기의 수명을 단축시킨다. 따라서 전동기의 성능을 만족하기 위하여 코일, 철심, 영구자석, 하우징 등과 같은 전동기의 주요부에 대한 온도 예측이 필요하다. 온도 예측을 하기 위해서 중요한 파라미터는 열 저항과 열원이다. 열원은 동손과 철손에 의해서 발생되며 열 전달 방법에는 전도, 대류, 복사가 있다. 전동기에서 복사의 영향은 전도와 대류에 비해서 매우 작으므로 복사는 해석시에 고려하지 않는다. 전도는 재질의 고유 물성치인 열전도 계수를 이용한다. 대류 열 저항은 산정하기가 어려우므로 실험결과를 바탕으로 하여 KCL을 이용해서 산정한다. 특정한 부하조건에서의 실험(1126rpm, 50A)을 통해서 산정된 열 저항을 이용하여 추후 다른 부하조건(1126rpm , 30A) 운전 시 온도를 예측 하고 산정된 온도를 측정된 온도와 비교한다.

2. 본 론

2.1 해석 과정

열 등가회로를 이용하여 열 해석을 수행하기 위한 과정은 그림 1과 같다.

<그림 1> 등가 열 저항 산정 과정

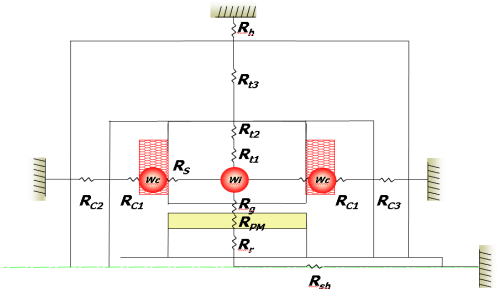
2.1.1 해석 시 가정

1. 열 전달은 전도와 대류만을 고려한다.
2. 열 전도율을 가지는 재질은 등방성이다.
3. 손실에 의한 열원은 동손과 고정자의 철손만을 고려하였으며, 기타 손실에 의한 영향은 무시하였다.
4. 공극부에서 공기의 유동은 층류만을 고려하였다.

2.1.2 형상 간략화

해석대상 전동기는 형상이 복잡하므로 해석을 위하여 그림 2와 같이 형상을 간략화 하였다. 또한 전동기를 조립하기 위해 사용된 볼트와 너트 등은 해석의 편의성을 위해서 생략하였다.

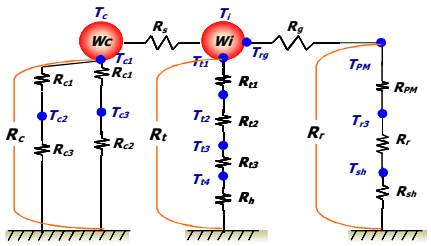
그림 2의 열 등가회로에서 열 저항 명칭에 대한 설명은 표 1과 같다.



<그림 2> 전동기 형상 간략화

<표 1> 열 등가회로 저항

R_{c1}	엔드코일 - 내부공기	R_{t3}	하우징
R_{c2}	내부공기 - 대기	R_h	전동기 측면 - 대기
R_{c3}	내부공기 - 대기	R_g	공극
R_s	코일 - 고정자	R_{pm}	영구자석
R_{t1}	고정자 치	R_r	회전자
R_{t2}	고정자 요크	R_{sh}	샤프트



<그림 3> 열 등가회로도

2.1.3 손실 계산

전동기에서 발생하는 동손과 철손은 열원으로써 작용하며 동손 관련 수식은 다음과 같다.

$$W_c = 3 \times I_p^{\,2} \times R_p \qquad (1)$$

여기서, I_p는 상전류, R_p는 상저항을 나타낸다.

철손은 철심 재질의 철손데이터와 유한요소법을 이용하여 고조파를 포함한 자속밀도 변화를 고려할 수 있는 해석 방법을 사용하였다.[5]

$$P_c = k_h f B^2 + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \qquad (2)$$

여기서, f는 외부에서 인가되는 자계의 주파수, B는 자속밀도, k_h, k_e 그리고 k_a는 각각 히스테리시스 손실 계수와 와전류 손실계수 그리고 anomalous loss coefficient를 나타낸다.

2.2 열 등가회로

전동기의 동손과 철손을 열원으로 코일과 철심에서 열이 대기로 전달되는 경로를 열 저항으로 표현하여 열 등가회로를 구성하고 그림 3과 같다.

2.3 열 저항 산정

우선 열 저항을 산정하기 위해서 에너지 보존 법칙이 이용되며 이는 그림 4와 같다. 에너지 보존 법칙의 수식은 다음과 같다.

$$\dot{E}_{in} + \dot{E}_g = \dot{E}_{out} + \dot{E}_{st} \qquad (3)$$

여기서 $\dot{E}_{in}$은 검사 체적(control volume)으로 유입되는 에너지, $\dot{E}_{out}$은 방출되는 에너지, $\dot{E}_g$는 생성되는 에너지 그리고 $\dot{E}_{st}$는 저장되는 에너지이다.

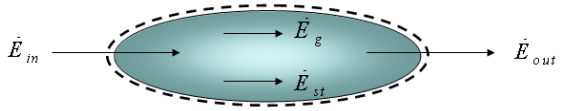
2.3.1 전도 열 저항 산정

전도 열 저항 계수는 재질의 고유 특성이므로 저항 산정시 전동기 치수로 산정할 수 있다.[2] 저항 산정은 문헌을 이용하였다. 전도에 의한 열 저항을 등가회로에 표시하면 그림 5와 같다.

2.3.2 KCL(Kirchhoff's current law)

열 회로와 전기회로는 유사성은 표 2에 나타낸다. 손실, 측정된 온도, 전도 열 저항으로 식 (3)을 이용하여 측정되지 않은 온도와 대류 열 저항을 산정할 수 있다. 산정된 열 저항값과 열원으로 측정되지 않은 영역의 온도를 산정할 수 있으며 그림 6과 같다.

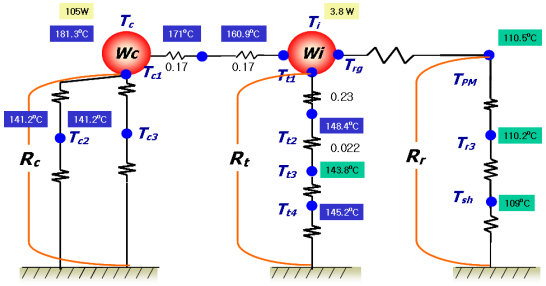
$$\nabla \cdot J = 0 \qquad (4)$$



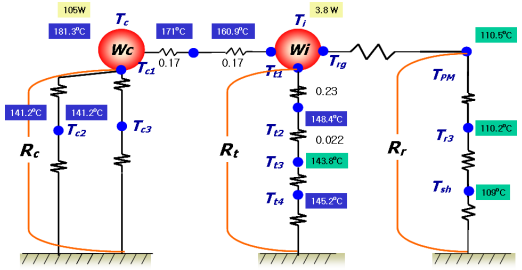
<그림 4> 에너지 보존 법칙

<표 2> 열 등가회로 저항

전기계		열계	
i	Current flow	q	Rate of heat flow
C	Electrical capacity	C	Thermal capacity
R	Electrical Resistance	R	Thermal Resistance
E-E∞	Electrical potential	T-T∞	Thermal potential



<그림 5> 측정된 온도, 전도 열 저항, 손실



<그림 6> 열 등가회로의 열 저항과 온도

<표 3> 부하 조건 변화에 따른 산정치와 실험치 비교

	산정치[℃]	실험치 [℃]	오차 [%]
T_c	68	70.8	4
T_i	63	65.8	4.3
T_s	65.5	67.9	3.5
T_{c2}	56.6	59.5	4.9
T_{c3}	56.6	59.5	4.9
T_{t2}	59.3	61.4	3.4
T_{t2}	58.4	60	2.7

2.4 부하 조건의 변화에 따른 온도 비교

산정 된 열 저항을 이용하여 다른 부하조건(1126rpm, 30A)에서 실험한 결과와 비교하여 신뢰성을 확보한다. 산정된 온도와 실험 결과는 다음 표 3과 같다.

3. 결 론

전동기의 운전 시 성능을 만족하면서 운전하는데 중요한 요소 중 하나가 온도이지만 전동기의 내부 온도를 부하조건에 따라 측정하는 것은 매우 어려운 일이다. 본 논문에서 제시한 열 등가회로를 이용하여 여러 가지 운전 조건에서 전동기가 운전을 할 경우 온도를 미리 예측할 수 있다. 예측된 온도를 이용하여 전동기의 냉각 방법 및 전류밀도를 결정할 수 있어 전동기 부하에 따른 온도 특성을 고려한 설계가 가능하다.

[참 고 문 헌]

[1] Y. Shimizu and T. Kawai, "Development of Electric Power Steering", *SAE Transactions*, no. 1991-0014, 1991.

[2] Holman, J. P. "Heat Transfer", McGraw-Hill, New York, 1976

[3] Ayman M. EL-Refaie, Nathan C. Harris, Thomas M. Jahns, Khwaja M. Rahman "Thermal Analysis of Multibarrier Intrrior PM Synchronous Machine Using Lumped Parameter Model", IEEE, 2004

[4] Y. A. Cengel, "Heat Transfer", A Practical Approach by, McGraw Hill, 2nd Edition 2004

[5] Sang-Ho Lee, Ji-Young lee, Jung-Pho Hong, Jin-Hur, Ha-gyeong Sung, " 3D Core Loss Calculation in BLDC Motor made of SMC Material," ICEMS, in CD, 2004