

등가 열저항을 이용한 R-EPSS용 전동기의 정상상태 열해석

오영진, 하경호, 임양수, 홍정표, 진종학*, 정대중*
 창원대학교 전기공학과, (주)만도*

Steady State Thermal Analysis of Brushless Motor for Rack Type Electric Power Steering Using Equivalent Thermal Resistance

Young-Jin Oh, Kyung-Ho Ha, Jung-Pyo Hong, Jong-Hak Jin*, Dae-Jong Jung*
 Dept. of Electrical Engineering, Changwon Nat'l Univ., Mando Corporation*

Abstract - This paper deals with the characteristic and thermal analysis of brushless motors for Rack assist type Electric Power Steering(REPS). The performance of permanent magnet is under the influence of temperature. To predict the motor performance, the thermal analysis is necessary. The equivalent thermal network is composed of the thermal resistance and the temperature of major parts is calculated according to the operating condition.

도시하였다. 표1에 각 부분의 열저항 계산시 사용된 각 재질에 대한 열전도율 및 열대류 계수를 제시하였다.

1. 서 론

자동차 기술이 발전하고 자동차에 대한 환경 및 안전 규제가 강화됨에 따라 자동차의 동력 장치는 기계적인 장치에서 전동기와 제어장치를 사용한 전기/전자 장치로 대체되고 있다. 기존의 유압식 조향장치를 대체하기 위한 새로운 전동기 조향 장치의 핵심 부품으로 영구자석을 사용한 브러시리스 전동기를 적용을 위한 연구가 가속화되고 있다 [1-2].

그러나 전동기가 경박 단소화로 내부 온도의 상승과, 엔진 실내의 주위에 취부되어 외기 온도가 높은 열악한 환경에서 운전됨으로써 영구 자석의 감자나 자성 재료의 전자기적 특성을 변화시켜 전동기의 성능을 저하시키는 요인으로 작용하고, 또한 기계적 변형을 일으켜 전동기의 수명을 단축하기도 한다[3,4]. 따라서, 전동기 성능을 만족하기 위하여 회전자 내 영구자석과 코일 내부의 온도에 대한 예측으로부터 이를 고려한 전동기의 설계가 이루어져야 한다.

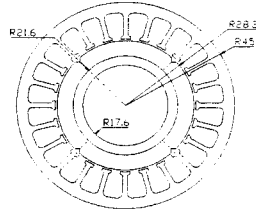
본 논문에서는 R-EPSS(Rack assist type Electric Power Steering)용 전동기를 대상으로 열전달 해석방법 중의 하나인 등가열저항을 이용한 해석을 수행하여 전동기 내부의 주요 부분에서 발생하는 온도를 예측하였다. 이 방법은 전동기 내부 열원에 기인한 온도를 빠르게 예측할 수 있으므로 전동기의 설계에 온도의 영향을 반영할 수 있는 장점이 있다 [3,4].

R-EPSS용 전동기 내부 열의 발생으로 전동기 특성 변화 평가를 위해 단순화된 모델로부터 집중 정수 형태의 열저항 요소를 계산하고 이를 회로망으로 구성하여 외기 온도 변화에 따라 주요부(코일, 철심, 영구 자석)의 온도를 산정하였다. 본 논문에서 전동기 내부의 주요 열원으로는 동손과 철손만을 고려하였으며, 유한요소 해석으로부터 철심에서의 평균 자속밀도와 특성 해석을 수행하여 철손과 속도에 따른 전류로부터 동손을 계산하였다. 또한 특성 해석의 타당성을 검증하기 위하여 실험치와 비교 분석하였다.

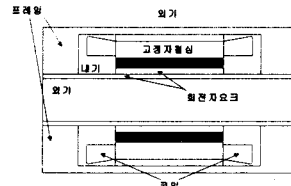
2. 본 론

2.1 해석 모델

해석 모델은 3상 정현파구동방식의 브러시리스 전동기로서 해석 모델의 형상과 각 부분에서의 재질을 그림1에



(a) 전동기의 단면도



(b) 각부 재질명 및 구조

그림 1. 해석 모델의 형상 및 주요 치수(단위:[mm])

표 1 열해석 관련 물질상수

재질명	물성치
공기의 열전도율	0.0317(100) [W/m ² °C]
코일의 열전도율 : 구리(100° C)	376.0 [W/m °C]
고정자 철심 열전도율 : 규소강판 (Si 1%)	42.0 [W/m °C]
프레임 열전도율: 주철	48.0 [W/m °C]
회전자 코어 열전도율 : 탄소강 (C 0.5%이하)	53.0 [W/m °C]
영구자석 열전율(Ferrite류)	1.26 [W/m °C]
내기에서 프레임간 대류 열계수	30, 40[W/m ² °C]
슬롯 내부 코일과 철심사의 열통과 계수(전도/대류)	120[W/m ² °C]
고정자 코어 철심과 프레임간 열통과 계수(전도/대류)	1200[W/m ² °C]
공기의 비열	1098[Ws/m ³ °C]
공기의 동점성 계수	0.239×10 ⁻⁴ [m ² /s]

2.2 전동기의 열적 등가회로도

2.2.1 해석상 가정

해석의 편의를 위하여 다음과 같은 가정을 두고 열해석을 수행하였다.

- 열전달은 전도와 대류만을 고려한다.
- 열전도율을 가지는 재료는 등방성이고 균일하다.
- 손실에 의한 열원은 동손과 고정자의 철손을 고려하며, 기타의 손실에 의한 영향은 무시한다.
- 회전자 중양은 비어 있어 외기와 같이 취급한다.
- 전동기 내부 열원의 전달은 방사 방향만을 고려한다.
- 공극부에서 공기의 유동은 측류만을 고려한다.

2.2.2 열등가회로의 구성

R-EPS용 브러시리스 전동기 구조에서 열원의 전달 경로를 가정하여 그림 2와 같이 간이 등가회로를 구성하였다. 전동기의 동손과 철손의 손실을 열원으로 하여 코일과 철심의 온도(node heat source) T_c, T_i 를 기준으로 열전달 경로의 각 부분에서의 등가 열저항을 계산하여 열 등가 회로를 구성하였다.

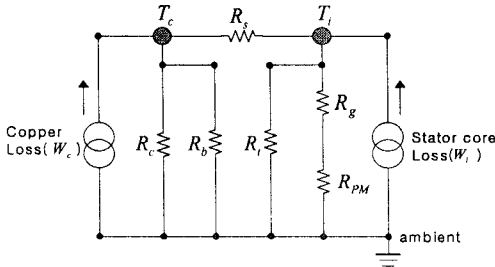


그림 2 해석모델의 열적 등가회로

그림2의 등가 회로망에 연결된 각 부분에서의 등가 열저항에 대한 열전달 경로와 열원에 대한 설명은 다음과 같다.

가) 열원: 등가 회로에서의 열원은 고정자 동손과 철손만을 고려하였다.

W_c : 고정자의 동손,

W_s : 히스테리손과 와류손을 포함한 철손

나) 열원의 온도

T_c : 고정자 철심, T_i : 코일의 온도

다) 열저항:

R_c : 좌측단 코일의 엔드에서 외기까지의 열저항

R_b : 우측단 코일의 엔드에서 외기까지의 열저항

R_i : 고정자 치의 평균 온도 위치에서 요크-프레임-외기까지의 열저항

R_g : 공극의 열저항

R_s : 코일과 철심의 평균온도위치사이의 열저항

R_{PM} : 영구 자석에서 회전자요크-축-외기까지의 열저항

2.2.3 열원 및 열저항 계산 [5,6]

가) 열원

R-EPS의 열해석을 위한 손실은 크게 고정자의 동손과 철손으로 나뉜다. 동손은 아래의 식(1)과 같다.

$$W_c = 3 \times (I_p)^2 \times R_p \quad (1)$$

이 때, I_p 는 부하 조건마다 다르며, 상저항 R_p 는 0.029[Ω]이다. 고정자의 철손은 일반적으로 사용되는 실험식을 이용하여 구하였다.

$$P_H = k_H \cdot \epsilon \cdot f \cdot \frac{B^2}{100} \quad [W/kg] \quad (2)$$

$$P_E = k_E \cdot \sigma \cdot (f \cdot \frac{B}{100})^2 \quad [W/kg] \quad (3)$$

유한요소 해석으로부터 철심부의 자속밀도는 1.5[T]로 치부의 자속밀도는 1.7[T]이다.

나) 열저항

· 열저항 R_c, R_b (그림3(a))는 코일 엔드에서 내기까지의 열저항과 내기에서 프레임간을 통과하여 외측 공기까지의 열저항으로 나뉜다. 코일에서 내기까지의 열저항 R_{ci} 는 대류 열저항으로 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$R_{ci} = \frac{1}{h_e \cdot S_e} \quad (4)$$

h_e 는 내기의 대류열계수이며 S_e 는 코일 엔드의 표면적이 된다. 내기에서 프레임간을 통과하여 외측 공기까지의 열저항은 열통과 계수로 처리하였다.

· 열저항 R_i (그림3(b))는 슬롯에서 철심 치까지의 열저항을 나타내고 있으며 실제 절연물과 공기 층을 포함한 전체 열저항은 다음 식으로 나타낸다.

$$R_i = \frac{1}{k_s \cdot A_s} \quad (5)$$

k_s 는 전도 및 대류 열계수를 포함한 영역의 열저항을 구할 때 사용되는 열통과 계수이다.

· R_T (그림3(c))는 철심의 평균 온도 위치에서 치 부분의 열저항 R_{Ti} , 요크 부분에서 평균 열저항 R_{Ty} , 철심과 프레임간의 접촉 열저항 R_{Tz} , 프레임의 전도 열저항 R_{Tf} 로 나뉘는데 전도 열저항 $A_{T1}, A_{T1.5}$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$R_{T1} = \frac{L_{T1}}{3\lambda_{T1} \cdot S_{T1}} \quad (6)$$

$$R_{T1.5} = \frac{1}{2\pi\lambda_{T1.5}L_{T1.5}} \cdot \log\left(\frac{D_{T1.5}}{d_{T1.5}}\right) \quad (7)$$

이 때, λ_{T1} 과 $\lambda_{T1.5}$ 는 각각 철심과 프레임의 열전도율을 나타내고 있다. 접촉 열저항 A_{T2} 는 아래와 같다.

$$R_{T2} = \frac{1}{k_{T2} \cdot A_{T2}} \quad (8)$$

K_{T2} 는 접촉 열저항 산정 시 적용되는 열통과계수다.

· R_{PM} 은 영구자석-회전자 요크부-축에서 공극축의 외기까지의 전도열저항의 합으로 계산되며 이는 원통형 열저항 계산 공식 식(7)과 동일하다.

· 공극부의 열저항 R_g 를 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_g = \frac{1}{k_g \cdot S_g}, \quad k_g = Nm \times \frac{\lambda_g}{\delta} \quad (\text{열통과 계수}) \quad (9)$$

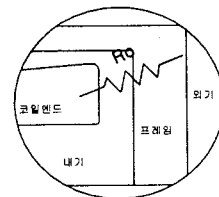
Nm 은 누셀트 수로서 무차원 파라미터이다. λ_g 는 공기의 열전도율이며 δ 는 공극 길이를 나타낸다.

여기서, 레이놀드 수: $Re = V_r \cdot \delta / \nu_g$

$$Re \leq 41: Nm = 2.2$$

$$41 < Re \leq 100: Nm = 0.23 \times Re^{0.63} Pr^{0.27}$$

$$\text{프란틀 수: } Pr = \frac{C_p \cdot \nu_g}{\lambda_g}$$



(a) 열저항 R_c

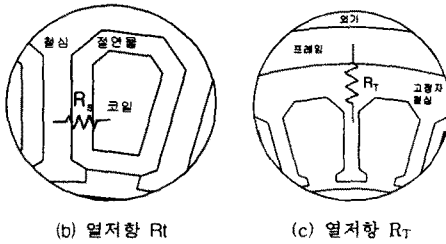


그림 3. 각부분에서의 열전달 경로

2.3 전동기의 특성해석

특성해석에서는 인가전압이 정현적이라 가정한다. 그러나, PWM 제어에 의한 선간 단자 전압은 많은 고조파 성분을 포함하므로 고조파 분석에 의해 전동기의 성능에 유효하게 영향을 미치는 기본파 성분만을 추출하여 특성 해석을 하였다. 부하의 변동에 따른 선간전압에 대한 기본파 성분은 실험으로부터 전동기 단자전압의 91.8[%]로 두었다. 그림 3은 무부하 손실 및 선간 기본파 전압만을 고려하여 유한요소 해석으로부터 특성곡선 추출한 것으로 실험치와 잘 일치함을 알 수 있다. 표 2는 시험 전동기의 부하 변화에 따른 속도, 토크와 그때의 전압을 측정 한 실험 데이터이다.

2.4 등가회로에 의한 열해석 결과

2.3.1 열저항 및 온도 계산결과

표 2는 각부의 열저항 계산결과를 나타내고 표 3은 등가 열저항 회로계산에 의한 주요부의 온도를 나타낸 것으로 외기 온도가 25[°C]일 때와 80[°C]일 때의 경우 각각 속도에 따라 비교하였다. 부하의 변화에 따라 사용된 동손은 선행된 특성해석으로부터 계산된 전류를 근거로 한 것이다. 전동기의 주위 외기 온도가 25[°C]인 경우 R-EPSC용 전동기가 사용되는 최대 부하에서 영구자석의 온도는 36[°C]로 전동기의 구동 특성에는 영향을 미치지 않으나 외기 온도가 80[°C]인 경우 영구자석의 온도는 93[°C] 이상이다. 페라이트 영구자석은 온도가 상승할 경우 잔류자속밀도가 감소하므로 전동기의 성능이 저하되리라 판단된다.

3. 결 론

본 논문에서는 조향장치용 브러시리스 전동기를 대상으로 해석모델을 등가열저항으로 회로망을 구성하여 전동기의 운전범위에서 외기 온도에 따라 정상상태 열분포를 해석하였다. 주요 열의 유동의 경로만을 고려하여 간단히 등가 열회로망을 구성함으로써 비교적 쉽게 전동기 내부의 온도 분포를 예측할 수 있었다.

표 1 속도-토크 특성 실험치

선간 전압 [V]	7.74	7.51	6.85	6.05
토크[kgf-cm]	26.0	40.6	71.4	79.4
속도 [rpm]	1000	800	400	240
토크 상수 [kgf-cm/A]	0.988	1.004	1.028	1.011

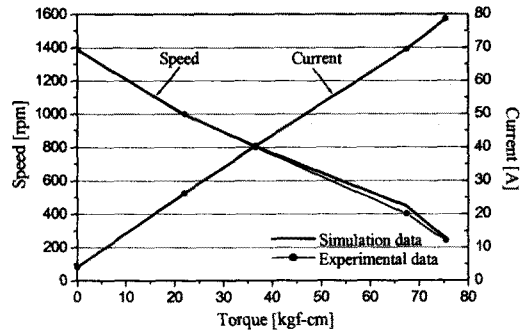


그림 5. 전동기 특성곡선 (실험치와 이론치의 비교)

표 2 열저항

각 부 열저항	열저항값 [°C/W]		
R _c , R _B	R _{c1}	6.7295	1.3332
	R _{c2}	6.6970	5.3963
R _s	0.1088		
	R _{t1}		0.0109
R _t	R _{t2}	0.0484	0.0040
	R _{t3}		0.0236
	R _{t4}		0.0018
	1.8759(80[°C])		
R _g (850[rpm])	2.2736(25[°C])		
	R _{om1}	0.3148	0.3046
R _{pm}	R _{om2}		0.0074
	R _{om3}		0.0028

표 3 코일, 철심, 영구자석의 온도

전류[A]	외기 온도	코일 온도	철심 온도	영구자석의 온도[°C]
/속도[rpm]	[°C]	[°C]	[°C]	
25.94/1000	25	35.97	29.23	26.33
36.73/ 850	25	46.00	32.44	27.55
68.60/ 400	25	96.11	48.49	33.65
78.76/ 240	25	118.80	55.75	36.40
25.94/1000	80	90.95	84.22	81.57
36.73/ 850	80	100.97	87.42	83.01
68.60/ 400	80	151.04	103.41	92.20
78.76/ 240	80	173.7	110.66	93.46

[참고 문헌]

- [1] Cheryl, "Electric Steering System Challenges Traditional Steering Approaches", *Electronic Design*, July 7, 1997
- [2] Nakayama et al., "Present & Future of Electrical Power Steering," *Automotive Technology*, Vol. 44, No. 1, pp. 106-111, 1990.
- [3] P.H. Mellor, D. Roberts and D.R. Turner, "Lumped Parameter Thermal Model for Electrical Machines of TEFC Design," *IEE Prod.-B*, Vol. 138, No. 5, pp. 205-218, 1991.
- [4] J. Faiz, R. Iranpour and P. Pillay, "Thermal Model for a Switched Reluctance Motor of TEFC Design During Steady and Transient Operation," *Electric Machines and Power System*, pp. 77-91, 1998.
- [5] 糸見 和信, "實用モータ設計 マニュアル", 總合電子出版社, pp.317-338, 1992
- [6] E. S. Hamdi, "Design of Small Electrical Machines", John Wiley & Sons Ltd, pp. 25-50, 1994