

온도상승을 고려한 교류 서보전동기 특성해석

"임정필, *천장성, *정현교, **윤중석
서울대학교 공과대학 전기공학부
** LG 산전(주) 제어기기그룹 연구소

Characteristics Analysis of AC Servomotor Considering the Temperature Rise

"Jeong-Pil Lim, *Jang-Sung Chun, *Hyun-Kyo Jung and **Joong-Seok Yoon
*School of Electrical Engineering, Seoul National University
**LG Industrial Systems Co.,Ltd. R&D Center

Abstract - The problem of the heat flow in the Surface Permanent Magnet Synchronous Motor (SPMSM) at various load condition is solved by use of the thermal equivalent network method. For the correction of the design parameters of SPMSM and for the exact analysis of several characteristics, the iterative method combining the characteristics analysis and the thermal analysis. Then the analyzed results and the measured data are compared.

논문에서 고려하는 것은 열해석시의 온도계수를 보정하는 것이다. 열등가회로망의 회로정수인 열저항의 계산 시에 필요한 대류 계수, 전도 계수 등은 온도의 함수이기 때문에 이러한 열적 상수들을 온도에 따라 보정해 줌으로써 보다 정확한 열해석이 이루어질 수 있다.

결론적으로 온도를 고려한 열등가회로망에 의한 열해석과 열해석의 결과로써 정수들을 보정하는, 새로운 교류 서보전동기의 특성 해석 방법을 제시하며 실험 결과와의 비교, 검증을 통해 그 타당성을 확인한다.

1. 서론

교류 서보전동기는 영구 자석 재료의 발전, 제어 성능의 향상, 가공 기술의 진보와 더불어 그 사용분야가 날로 확대되고 있다. 로봇시스템 등의 고정밀도를 요하는 곳에 사용되는 경우, 전동기의 정확한 해석은 그 무엇보다 중요하다. 특히 전동기의 온도상승은 전동기의 크기, 냉각 방식, 절연 계급 등을 결정하는 중요한 요인이다. 뿐만 아니라, 전동기의 특성을 해석하는 경우, 자기동가회로의 정수들은 온도에 따라 변화하게 되므로 특성해석시 열해석의 결과인 전동기의 온도상승값을 고려하여야 해석의 정확도를 높일 수 있다. 그러나, 이전의 특성 해석방법은 임의로 설정된 한 온도로 모든 부하에 대해 특성 해석을 하게 되므로 모든 부하에 대해 만족스러운 해석 결과를 얻을 수는 없다. 따라서 본 논문에서는 다음의 두 가지를 고려하여 전동기의 정확한 해석 결과를 얻고자 한다. 먼저 본 논문에서는 열등가회로망의 회로전수인 전동기 각 부의 열저항을 계산한다. 그리고 특정 운전 조건과 온도 상태에서 손실 분포를 전동기 설계식으로부터 계산한다. 이때 계산된 손실 분포는 열등가회로망의 열원이 된다. 이렇게 구성된 열등가회로망은 간단한 수치 해석 방법으로 계산이 되는데 그 결과값은 전동기 각 부에서의 온도 상승 포화치를 나타낸다. 그러나, 이 계산 결과와 손실 분포를 계산할 때 가정한 온도와는 차이가 있기 때문에 반복법을 사용하여 수렴시켜야 한다. 즉, 손실을 계산할 때 가정하는 온도 상승치와 열등가회로망을 꾸민 후에 계산된 온도 상승치가 일정 범위내로 수렴할 때까지 계산을 반복하게 된다. 두 번째로 본

2. 회로 정수의 계산과 열등가회로망의 구성

2.1 동기전동기의 열등가회로망 구성

본 논문에서 해석하는 전동기는 주로 제어 분야에 사용되는 교류 서보전동기로써 표면부착형 영구자석 동기전동기이다. 어떤 강제 통풍 방식도 채용하지 않는 영구 자석 동기전동기는 그림 1과 같이 주로 8개의 부분으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 전동기의 축을 중심으로 대칭성을 가정하고 해석한다.(대부분의 전동기는 이 가정이 유효하다.)

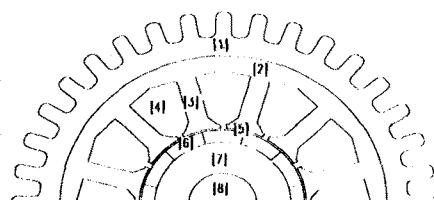


그림 1. 표면부착형 영구자석 동기전동기의 단면도

- [1] 프레임 [2] 고정자 철심 [3] 고정자 치
[4] 고정자 권선 [5] 공극 [6] 영구 자석
[7] 회전자 철심 [8] 축

위의 영구자석 동기전동기에 해당하는 열등가회로망은 그림 2

와 같다.

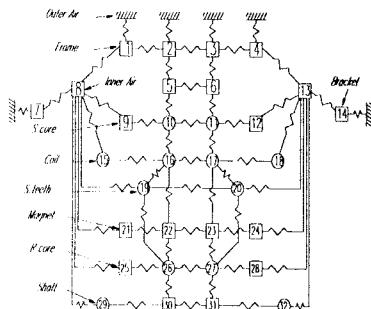


그림 2. 동기전동기의 열등가화로망

오늘날의 많은 전동기는 소형, 경량화의 목적을 달성하기 위하여 냉각 방식의 선정에 많은 비중을 두고 있다. 냉각을 원활히 하기 위한 재료의 선정뿐만 아니라, 추가되는 비용을 감수하면서도 타력 통풍 방식을 채택하는 경우가 많다. 이러한 타력 통풍 방식의 전동기에 대해 열해석을 하는 경우 바람의 속도와 풍량 등을 고려해야 하는 등 어려움이 많으나, 본 논문에서 해석한 모델은 프레임과 외기간의 자연대류가 주된 냉각 방식으로 비교적 쉬운 해석이 될 수 있다.

2.2 열저항 계산

영구자석 동기전동기의 열호흡 방식은 크게 나누어 세가지로 분류할 수 있다. 열의 전도, 대류, 복사가 바로 이에 해당된다. 고정자, 퀸션, 회전자자의 영구자석, 철심 등에서의 열의 흐름은 전도의 형태로 이루어진다. 즉, 열의 전도는 주로 영구자석 동기전동기의 고체로 이루어진 부분에서 발생한다. 다음 식 (1)이 열의 전도를 나타내는 열호흡 방정식이다.

$$Q = \frac{k_m \cdot A}{X} \Delta \theta \quad (1)$$

여기서,

Q	: 열량	[W]
k_m	: 평균 열전도도	[W/ $^{\circ}$ C · m]
A	: 열전달 매체의 단면적 [m^2]	
X	: 열전달 매체의 길이 [m]	
$\Delta \theta$: 온도 차분	[$^{\circ}$ C]

식 (1) 우변의 $\frac{X}{k_m \cdot A}$ 항은 전동기 각 부분의 전도 열저항에 해당하는 식이다.

열의 대류는 열을 방산하는 물체와 냉각 매체와의 사이에 발생하는 열의 흐름을 설명하는 방식이다. 즉, 전동기 프레임과 외기, 전동기 내부의 각 부분과 내기간에서 열의 대류가 일어난다. 이러한 대류를 나타내는 열호흡 방정식은 식 (2)와 같다.

$$Q = A \cdot h \cdot \Delta \theta \quad (2)$$

여기서,

A	: 열방산 물체의 표면적 [m^2]
-----	-------------------------

Q	: 열량	[W]
h	: 대류 열전달 계수	[W/ $^{\circ}$ C · m ²]
$\Delta \theta$: 온도 차분	[$^{\circ}$ C]

식 (2) 우변의 $\frac{1}{A \cdot h}$ 항이 열의 대류를 나타내는 열저항에 해당된다.

그 외의 열호흡 방식에 열의 복사가 있으나, 이는 전동기에서 일어나는 열호흡 방식 중 가장 미미한 부분으로, 많은 경우 대류 열전달 계수를 약간 크게 조정하여 이를 고려한다.

2.3 손실의 계산

영구자석 전동기의 손실은 크게 나누어 고정자 동손(P_{st}), 고정자 철손(P_{ch}), 기계손 또는 무부하손실(P_{mech}) 등으로 나뉘어 진다.

$$P_{st} = \frac{36 \rho_c N_t^2 f_s^2}{\pi f_s d_s (r_s + d_s)} (l_r + \frac{\pi r_s k_s}{p}) \quad (3)$$

$$P_{ch} = \frac{16 k_d}{\pi p} S r_s l_r d_s B_s^2 \omega_s^2 + \frac{16 k_d}{p} (r_s + d_s + \frac{d_s}{2}) \frac{r_s^2 k_s l_r a}{d_s} B_s^2 \omega_s^2 \quad (4)$$

여기서,

d_s	: 슬롯 깊이
d_y	: 계철부의 두께
f_s	: 슬롯 접적율
k_d	: 철손 계수
k_s	: 오버행 계수
S	: 슬롯수
ρ_c	: 권선의 저항률

그러나, 기계손은 일반적으로 운전 조건에 따라서 많이 변화하는 값이 아니기 때문에 본 논문에서는 일정한 값으로 둔다. 이외의 다른 손실(stray load loss, rotor loss)은 무시 가능한 값이므로 여기서는 고려하지 않는다. 따라서, 영구자석 동기전동기의 대부분의 손실은 고정자에서 발생한다.

2.4 반복법과 회로 정수의 보정

본 논문에서 제안하는 반복법이란 전동기의 특성해석과 열해석이 서로 상호 보완되는 해석 방법을 말한다. 즉, 고정자 권선의 저항과 영구자석의 잔류 자속은 온도에 의존하는 값이므로 열해석의 결과로 이를 보정해야 한다. 이렇게 보정된 값은 정확한 전동기의 손실 계산이 가능하게 한다. 뿐만 아니라, 열해석 과정에서도 열상수들을 온도의 함수로 처리하기 때문에 보다 더 정확한 전동기 해석 결과를 보장한다. 그러나, 기준의 전동기 해석 방법은 전부하에 대해 임의로 정한 하나의 온도를 가정하기 때문에 해석상 큰 차이를 나타내게 된다. 특히 임의로 가정하는 온도를 대부분의 경우 온도 상승 허용 한계치에 맞추기 때문에 낮은 부하 조건에서 특히 많은 차이를 보이게 된다. 본 논문에서 제안하는 방법은 이를 보완하는 방법으로 그 해석 흐름도는 그림 3과 같다.

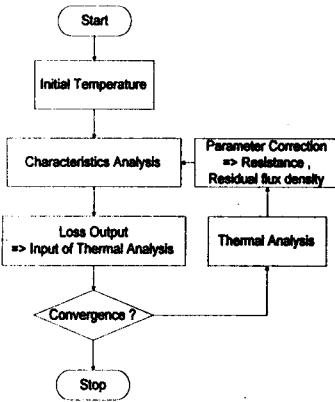


그림 3 제안된 방법의 흐름도

3. 열등가회로망의 해석

영구자석 동기전동기의 열등가회로망은 위의 과정으로부터 구해질 수 있다. 이렇게 구성된 열등가회로망은 간단한 수치해석 방법을 사용하여 계산할 수 있다. 즉, 열등가회로망의 각 절점에 KCL을 적용하면 식 (3)과 같은 시스템 행렬이 만들어진다. 즉, 전동기의 손실, 온도상승, 열저항 등은 회로망에서 전류원, 각 절점의 전압, 전기적인 저항등에 해당된다. 시스템 행렬 (3)을 풀면 각 절점에서의 온도 상승치가 구해지는 데, 이로부터 고정자 퀸선의 저항, 잔류 자속 밀도 등이 구해진다.

$$[P][\theta] = [Q] \quad (3)$$

여기서,

[P] : 퍼미언스 행렬 (열저항의 역수로 구성된 행렬)

[\theta] : 온도 행렬

[Q] : 손실 행렬

4. 해석 결과

본 논문의 해석에 사용된 동기전동기의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 생플 전동기의 사양

항목	사양
I _{cont} [A]	1.7
T _{cont} [kg.cm]	22.96
N _{max} [rpm]	2500
P _{cont} [W]	589
I _{peak} [A]	6
T _{peak} [kg.cm]	76.53
P _{peak} [W]	1963
V _{rated} [V]	224.7
V _{max} [V]	250

해석은 8가지 부하 조건에 대하여 행하였다. 그리고, 그 해석 결과들을 기존의 방법으로 해석한 결과들(온도를 하나의 값으로

가정한 경우)과 비교하여 나타내었다. 그림 4는 전동기 특성 중의 하나인 효율에 대한 결과이며, 그림 5는 손실을 비교하여 나타낸 것이다. 이를 통하여 본 논문에서 제안하는 방법으로 전동기를 해석한 결과가 실험치에 보다 더 근접함을 알 수 있다.

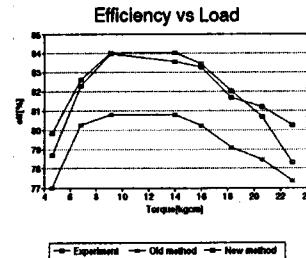


그림 4 제안된 방법의 해석결과와 기존 방법의 비교-효율

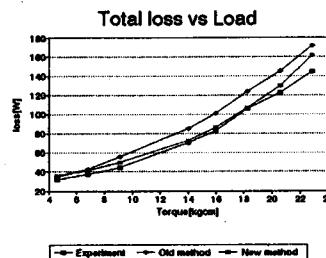


그림 5 제안된 방법의 해석결과와 기존 방법의 비교-손실

5. 결론

본 논문에서는 열등가회로망을 이용한 표면부착형 영구자석 동기전동기의 특성해석 방법을 제안하였다. 본 방법은 전동기의 특성 해석과 열해석을 서로 상호 보완하는 반복법으로써 기존의 특성해석 방법에 비하여 보다 나은 특성 해석이 가능하게 한다. 뿐만 아니라, 열적 상수들을 온도의 함수로 처리함으로써 열해석의 정확성도 향상시켰다. 본 방법은 다른 전동기의 특성 해석에도 쉽게 적용되어 우수한 해석 결과를 가져다 줄 수 있을 것이다.

참고 문헌

- [1] P.H.Mellor, "Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design," *IEE Proceedings -B*, vol.138, no.5, pp.205-218, september 1991.
- [2] A.H.Eltom, "Motor temperature estimation incorporating dynamic rotor impedance," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol.6, no.1, pp.107-113, march 1991.
- [3] S.Sonaka, "Aanlysis of Ventilation and Cooling System for Induction Motors," *IEEE Trans. on PAS*, PAS-100, 11, pp. 4636-4643, 1981
- [4] 천 장성 외, "유도전동기의 열해석에 관한 연구" 전기학회 학술대회 논문집, pp. 961-963, 1993