



IPMSM의 집중권 분포권에 따른 열 특성 비교

Thermal Characteristic Comparison of IPMSM according to Concentrated and Distributed Winding

저자 (Authors)	김학순, 진준우, 박호용, 홍정표 Hak-Soon Kim , Jun-Woo Chin, Ho-Yong Park, Jung-Pyo Hong
출처 (Source)	대한전기학회 학술대회 논문집 , 2017.7, 781-782 (2 pages)
발행처 (Publisher)	대한전기학회 The Korean Institute of Electrical Engineers
URL	http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07232362
APA Style	김학순, 진준우, 박호용, 홍정표 (2017). IPMSM의 집중권 분포권에 따른 열 특성 비교. 대한전기학회 학술대회 논문집, 781-782.
이용정보 (Accessed)	한양대학교 166.***.168.149 2018/10/17 10:41 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독 계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

IPMSM의 집중권 분포권에 따른 열 특성 비교

김학순*, 진준우*, 박호용*, 홍정표*
한양대학교 *

Thermal Characteristic Comparison of IPMSM according to Concentrated and Distributed Winding

Hak-Soon Kim*, Jun-Woo Chin*, Ho-Yong Park*, Jung-Pyo Hong*
HanYang University

Abstract - 본 논문에서는 Interior Permanent Magnet Synchronous Motor(IPMSM)의 손실 분석 후 열 등가회로를 이용하여 고정자 권선 방식(집중권, 분포권)에 따른 열 특성을 분석하였다. IPMSM의 d, q축 전압방정식을 이용하여 전동기 특성을 분석하고 이를 바탕으로 손실을 산정한다. 산정된 손실을 구성된 IPMSM의 열 등가회로에 열원으로 반영하여 열 해석을 진행하였다. 열 해석을 통해 6극 9슬롯 집중권 모델과 6극 27슬롯 분포권 모델의 시간에 따른 부분별 온도를 비교 및 분석하였다. 이를 통해 분포권이 집중권에 비해 향상된 방열 특성을 가짐을 알 수 있다.

1. 서 론

최근 지구온난화, 미세먼지 등 환경오염이 이슈화되면서 친환경 차량에 대한 연구가 진행 중이다. 그에 대한 방안으로 부품의 전장화가 있는데 이 때문에 모터에 대한 연구가 활발하다. 그 중 IPMSM에 대한 연구 수요가 증가하고 있는데 그 이유는 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크를 동시에 이용할 수 있어 고효율을 낼 수 있으며 고효율, 넓은 운전 영역을 확보할 수 있기 때문이다.

IPMSM의 극수 슬롯수 조합에 따라서 고정자 권선 방식이 달라지는데 크게 집중권, 분포권, 치집중권이 있다. 3가지 방법 중에서 분포권은 열이 발생하는 권선을 분포시켜서 배치하기 때문에 상대적으로 방열 특성이 우수하다. 하지만 분포권은 집중권에 비해 엔드 와인딩의 길이가 길어 권선 저항에 의한 동손이 크게 발생할 우려가 있다.

손실이 커지면 전동기 내부 온도가 상승하고, 이에 따라 권선의 절연 계급 증가하여 비용이 상승한다. 또한 회로표형 영구자석을 사용한 경우 고온에서 감자가 발생하여 잔류자속밀도가 줄어들어 성능이 저하될 수 있다. 따라서 권선 방식에 따른 온도에 따른 특성을 검토할 필요성이 있다[1]. 본 논문에서는 집중권과 분포권을 비교 분석하고자 한다.

열 해석 기법으로 Computational Fluid Dynamics(CFD) 등의 방법이 있지만 형상 치수 및 권선 방법의 변화에 따른 열 특성을 확인하고자 할 때 다른 해석 기법에 비해서 해석 시간이 적은 Lumped Parameter Thermal Network(LPTN)을 적용하여 해석하고자 한다.

이에 따라 본 논문에서는 d, q축 전압방정식을 통해 모델별 출력 및 동손, 철손 등의 손실을 계산하고 LPTN에 적용하여 시간에 따른 부분별 온도를 분석할 것이다. 이를 통해 집중권과 분포권 모델의 열 특성에 대해 검토하고자 한다.

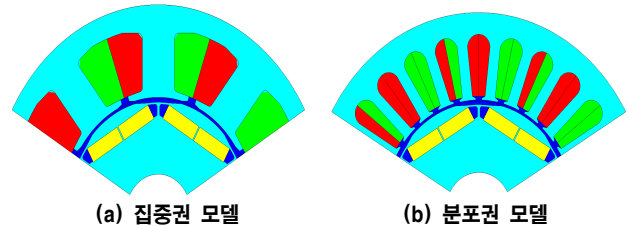
2. 본 론

2.1 대상 모델

본 논문에서 다룬 대상 전동기들의 형상 정보와 운전점에 대한 정보는 아래의 <표 1>과 <그림 1>에 정리하였다. <그림 1>은 각 모델들의 120° 모델을 나타낸 것이다.

<표 1> 모델별 형상치수

	집중권	분포권
극수 슬롯수	6극 9슬롯	6극 27슬롯
정격 속도	3000rpm	
정격 토크	57.3Nm	
고정자 외경	110mm	
고정자 내경	61.6mm	
회전자 외경	60.1mm	
적층길이	150mm	
공극 길이	1.5mm	



<그림 1> 모델별 형상

2.2 각 모델별 손실 분석

2.2.1 손실 분석

고정자 권선 방식에 따른 손실을 분석하기 위해 d, q축 전압방정식 기반으로 구동시 발생하는 손실들을 구하고자 한다. 아래의 식 (1) ~ (4)을 이용하여 동손과 철손을 구하고 실험을 통해 얻은 기계손을 반영하였다. 단, 본 논문에서는 영구자석 와전류손은 고려하지 않는다.

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

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -wL_q \\ wL_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ w\Psi_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$W_c = R_a I_a^2 = R_a (i_d^2 + i_q^2) \quad (3)$$

$$W_i = \frac{V_o^2}{R_c} = \frac{v_{od}^2 + v_{oq}^2}{R_c} = \frac{w^2 (L_d i_{od} + \Psi_a)^2 + (L_q i_{oq})^2}{R_c} \quad (4)$$

위 식 (1) ~ (4)에서 v_d 는 d축 전기자 전압, v_q 는 q축 전기자 전압, v_{od} 는 d축 철손분 전압, v_{oq} 는 q축 철손분 전압, i_{od} 는 d축 철손분 전류, i_{oq} 는 q축 철손분 전류, R_a 는 권선저항, R_c 는 등가철손저항, w 는 전기 각속도, Ψ_a 는 영구자석에 의한 쇄교자속, W_c 는 동손, W_i 는 철손을 의미한다.

2.2.2 분석 결과

아래의 <표 2>에서 알 수 있듯이 동손은 분포권이 집중권보다 더 높고 철손은 집중권이 분포권보다 크다. 분포권은 엔드 와인딩의 길이가 집중권에 비해 길기 때문에 상대적으로 동손이 더 큰 것을 알 수 있었다. 철손은 상대적으로 집중권이 분포권에 비해서 크다. 그 이유는 집중권의 자속밀도가 분포권에 비해 크기 때문이다. 기계손을 합한 총 손실량은 집중권 469.52W이고 분포권이 475.32W로 분포권의 손실이 더 크다.

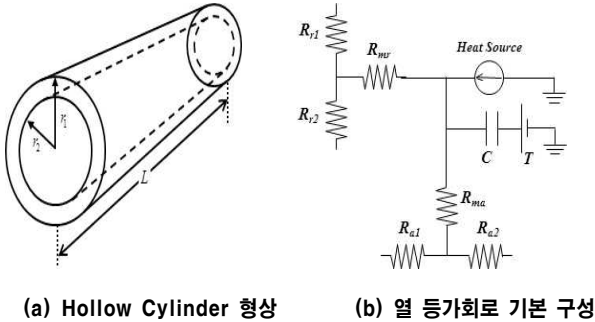
<표 2> 모델별 손실분석

	집중권	분포권
동손	201.5W	226.9W
철손	233.3W	213.7W
기계손	34.72W	34.72W
합계	469.52W	475.32W

2.3 열 등가회로를 이용한 열 특성 분석

2.3.1 열 등가회로 구성 원리

열 등가회로는 열원, 열저항, 열용량을 기본 구성요소로 하며 각각 전류원, 저항, 캐패시터로 모델링한다. 그리고 전동기는 원통형 구조를 가지고 있는 점을 이용하여 각 부분별로 Hollow Cylinder 형상으로 단순화시킨다. 이후 부분별로 열 등가회로를 구성하여 열 해석을 진행한다. 아래의 <그림 2>의 (a)는 전동기를 Hollow Cylinder 형태로 단순화한 그림이고 (b)는 (a)의 열 등가회로를 구성하는 기본 회로도이다.



<그림 2> 열 등가회로 기본 구성

<그림 2>의 (b)와 같이 열원, 열용량, 외기온도에 대한 모델링을 각각 전류원, 캐패시터, 전압원으로 하며 열전달이 독립적으로 발생하는 방향인 반경방향, 축방향으로 열저항을 구성한다. 본 논문에서는 부분별로 발생한 손실을 반영하였고 외기온도 $T = 20^{\circ}\text{C}$ 라고 가정한다. 열저항과 열용량은 아래의 식 (5) ~ (10)를 통해 계산한다[2, 3].

$$R_{ma} = \frac{-L}{6\pi k_a (r_o^2 - r_i^2)} \quad (5)$$

$$R_{mr} = \frac{-1}{8\pi k_r L (r_o^2 - r_i^2)} \left\{ r_o^2 + r_i^2 - \frac{4r_o^2 r_i^2 \ln(r_o/r_i)}{r_o^2 - r_i^2} \right\} \quad (6)$$

$$R_{a1} = R_{a2} = \frac{L}{2\pi k_a (r_o^2 - r_i^2)} \quad (7)$$

$$R_{r1} = \frac{1}{4\pi k_r L} \left\{ 1 - \frac{2r_i^2 \ln(r_o/r_i)}{r_o^2 - r_i^2} \right\} \quad (8)$$

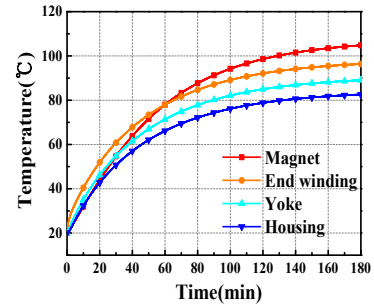
$$R_{r2} = \frac{1}{4\pi k_r L} \left\{ \frac{2r_o^2 \ln(r_o/r_i)}{r_o^2 - r_i^2} - 1 \right\} \quad (9)$$

$$C = \rho c \pi (r_o^2 - r_i^2) \quad (10)$$

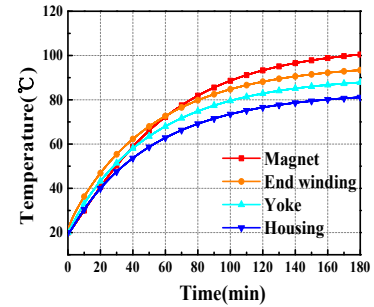
위의 식 (5) ~ (10)에서 R_{ma} 는 축방향 보정 열저항, R_{mr} 는 반경방향 보정 열저항, R_{a1} 는 축방향 전도 열저항, R_{a2} 는 축방향 전도 열저항, R_{r1} 는 중심측 반경방향 전도열저항, R_{r2} 는 외부측 반경방향 전도열저항, r_o 는 외부 반지름, r_i 는 내부 반지름, k_a 는 축방향 전도열전달계수, k_r 는 반경방향 전도열전달 계수, L 은 원통길이, C 는 열용량, c 는 비열, ρ 는 밀도를 의미한다.

2.3.2 열 등가회로를 이용한 열 특성 분석

위와 같은 원리를 토대로 IPMSM의 집중권, 분포권 모델에 대한 열 등가회로를 구성한 후 열 해석을 진행하였다. 아래의 <그림 3>과 <그림 4>는 집중권과 분포권 모델의 시간에 따른 온도 그래프이다. 위의 그림에서 알 수 있듯이 $t = 0$ 부터 180분 동안의 해석을 진행하였다. 위 해석을 진행하는 동안 약 8초 소요되었다. 측정 완료 시점에 상승한 온도를 아래의 <표 3>에 기재하였다.



<그림 3> 집중권 모델 부분별 온도 그래프



<그림 4> 분포권 모델 부분별 온도 그래프

<표 3> 해석 완료시 부분별 온도

	집중권	분포권
Magnet	104.81 $^{\circ}\text{C}$	100.44 $^{\circ}\text{C}$
End winding	96.35 $^{\circ}\text{C}$	93.39 $^{\circ}\text{C}$
Yoke	89.05 $^{\circ}\text{C}$	87.83 $^{\circ}\text{C}$
Housing	82.59 $^{\circ}\text{C}$	81.13 $^{\circ}\text{C}$

2.3.3 분석 결과

위의 그림에서 알 수 있듯이 초기온도 20°C 에서 시작하여 측정 완료 시점에 부분별 상승한 온도가 <표 3>와 같다. 집중권에 비해 분포권이 손실이 더 큼에도 불구하고 온도 특성이 우수한 것을 알 수 있다. 이는 열을 발생시키는 권선들을 분포시킴으로서 열전달률을 개선시켰기 때문이다.

하지만 집중권과 분포권에서 자석의 온도가 각각 104.81°C 와 100.44°C 로 굉장히 온도가 높음을 알 수 있다. 영구자석 와전류손을 고려하지 않았기 때문에 위의 온도는 상당히 높다는 것을 알 수 있다. 이는 기계손과 회전자에서 발생하는 철손의 열전달이 대부분 대류로 이루어져 열전달이 잘 이루어지지 않기 때문이다.

3. 결 론

IPMSM의 d, q축 전압방정식을 기반으로 손실을 분석한 결과 동손의 영향으로 분포권의 손실이 더 큼을 알 수 있었다. 하지만 열 등가회로를 통해 온도포화점을 파악한 결과 분포권이 더 낮았다. 그 이유는 열을 발생시키는 권선들을 분포시킴으로서 방열 면적을 증가시켰기 때문이다. 이를 통해 집중권에 비해서 분포권의 열 특성이 더 우수함을 알 수 있었다. 하지만 위에서 알 수 있듯이 자석의 온도가 가장 높았는데 온도를 감소시키기 위한 연구가 필요하다고 판단된다. 본 논문에서 제시한 해석 방법과 결과를 통해 향후 전동기의 신뢰성 확보에 기여할 수 있다고 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 진준우, 박민로, 김해중, 홍정표, "EV Traction용 매입형 영구자석 동기전동기의 집중권/분포권에 따른 특성 비교", 2015 KSAE 부문 종합학술대회, 1030-1034, 2015. 5
- [2] Kyu-Seob Kim, Byeong-Hwa Lee, Hae-Joong Kin, Jung-Pyo Hong, Jang-Hyun Jun, "Thermal analysis of Outer Rotor Type IPMSM Using Thermal Equivalent Circuit", Electrical Machines and System(ICEMS), 2012 15th International Conference on 1 - 4, 2012
- [3] P.H. Mellor, D.Roberts, and D.R. Turner, "Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design", *Proc. Inst. Elect.Eng.*, B, vol. 138, no. 5, Sep. 1991