

주 운전영역을 고려한 냉장고 컴프레서 구동용 IPMSM의 고효율 설계

이석희, 방량, 홍정표
한양대학교 자동차공학과

High Efficiency Design of IPMSM for the Refrigerator Compressor Considering Operating Point

Suk-Hee Lee, Fang Liang, Jung-Pyo Hong
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

Abstract - This paper presents high efficiency IPMSM design for compressor of refrigerator having main operation speed of 1800rpm and 3600rpm. The characteristics of IPMSM greatly vary according to back-EMF and inductance. Therefore the design is to estimate the range of back-EMF and inductance satisfying the requirements of IPMSM in the initial design. Thereafter the optimization is performed to consider magnetic saturation and reduce torque ripple. In the end the validity of the design process proposed in this paper is verified by test.

1. 서 론

에너지 절약을 위한 가전제품의 효율이 점차 중요시 된다. 특히 상시 전원을 켜두는 냉장고에 대한 최저효율제도 및 고효율 등급표시제도가 강화되고 있으며 고효율 제품에 대해서는 환급 제도를 시행함으로써 효율 향상에 만연할 기하고 있다. 이러한 경제적, 사회적 요구로 인해 고효율의 냉장고에 대한 필요성이 증대됨에 따라 냉장고 소비전력을 최소화하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 냉장고의 경우 설정된 온도 이상이 되면 온도를 낮추기 위해 컴프레서나 Fan이 운전되며 이때 효율을 높이기 위해 다양한 제어방법이 연구되고 있다 [1]. 또한 냉장고는 열역학적 사이클을 이용하여 온도를 유지하게 되는데 이 때 사이클의 효율 증대를 통하여 소비전력량을 저감하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다 [2]. 압축기 효율을 개선하기 위해 최적 사이클 사양 및 압축기 회전수별 운전특성을 규명하기 위한 연구가 진행된 사례도 있으며 이러한 점을 고려하여 불 때 냉장고의 효율을 높이기 위하여 컴프레서 구동용 전동기의 주 운전영역을 고려한 고효율 설계가 요구된다 [2], [3]. 본 논문에서는 185W급 냉장고 컴프레서 구동용 전동기의 설계에 대하여 다루고자 한다. 파라미터 변화에 따른 특성 분석을 위한 EL-map을 구성하고 주 운전속도인 1800rpm과 3600rpm에서 효율이 최대가 되는 파라미터 범위를 결정하여 설계를 수행하였다. 최적의 형상을 찾기 위하여 반응표면법과 연계된 실험계획법을 유한요소해석을 통하여 수행하였으며, 최적 설계된 전동기는 시작품을 제작하여 설계에 대한 평가와 검증 을 하였다.

2. 본 론

2.1 해석이론

돌극성을 가지는 IPMSM의 특성해석을 위해 역기전력과 d-q축 인덕턴스 및 상 저항과 철손 등가 저항을 산정하여 d-q축 등가회로를 구성하였다. 본 장에서는 IPMSM의 등가회로 및 파라미터 산정 방법에 대하여 소개한다.

2.1.1 IPMSM의 등가회로

그림 1은 IPMSM의 정상 상태에서의 철손을 고려한 등가회로를 보여 준다. 철손 저항은 식 (1)에 등가 저항 R_c 로써 고려되어져 있으며 d-q축 전압방정식과 토크방정식은 식 (1)-(3)과 같이 주어진다 [4].

2.1.2 파라미터 산정 방법

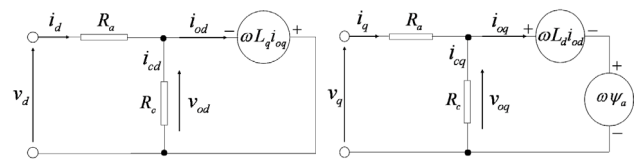
그림 1의 등가회로를 이용하기 위해서는 영구자석에 의한 무부하 쇠교 자속 Ψ_a 와 전기자 권선저항 R_a , 철손 등가 저항 R_c , 그리고 d-q축 인덕턴스 L_d, L_q 를 산정해야 한다. 여기서는 철손 등가 저항 R_c 와 L_d, L_q 의 산정방법에 대해 설명한다 [4]. 철손 등가 저항은 식 (4)를 사용하여 산정하였으며 여기서 무부하 선간 역기전력 실효치 V_o 와 철손 W_i 는 유한요소해석을 통해 산정하였다. d-q축 인덕턴스는 무부하시와 부하시의 쇠교자속의 크기와 위상차의 관계로써 구해진다. 이는 식 (5)로 나타내어진다.

2.2. 설계 과정

설계는 그림 2와 같이 주어진 시스템의 요구사항과 전동기 제약조건에 따른 EL-map분석과 공간고조파법을 이용한 초기설계, 효율 향상을 위한 최적설계로 진행된다. EL-map의 경우 주 운전속도에서 효율을 검토하기 위해 1800rpm과 3600rpm에서의 효율 및 역률이 최대인 지점을 찾고 최대 속도인 4000rpm에서 단자전압이 사양을 만족하는지를 검토한다. 최적설계를 위하여 실험계획법으로 토크리플의 주요인자 및 상호작용을 분석하고 반응표면법을 이용하여 토크리플을 최소화한다.

2.2.1 대상 전동기 설계 사양

설계 대상 전동기의 사양은 표 1과 같으며 1800rpm과 3600rpm에서의 목표효율은 90%이다. 축 방향 길이의 경우 기존 컴프레서 형상에 따라 45~52mm의 범위로 제한되며 설계 시에는 45mm로 하여 코어의 사용량 및 중량을 최소화 한다.



〈그림 1〉 d-q축 등가회로

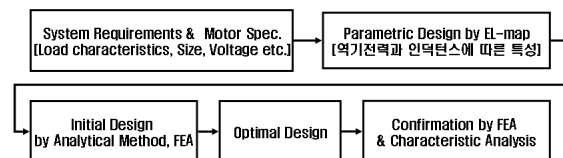
$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_a \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \left(1 + \frac{R_c}{R_a}\right) \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T = P_n \{ \Psi_a i_{oq} + (L_d - L_q) i_{od} i_{oq} \} \quad (3)$$

$$W_i = \frac{v_{od}^2 + v_{oq}^2}{R_c} = \frac{V_o^2}{R_c}, R_c = \frac{V_o^2}{W_i} \quad (4)$$

$$L_d = \frac{\Psi_o \cos \alpha - \Psi_a}{i_d}, L_q = \frac{\Psi_o \sin \alpha}{i_q} \quad (5)$$



〈그림 2〉 Design Process

〈표 1〉 설계 사양

DC Link 전압[V]	310	최대 출력@4000rpm	185
경격 토크[kgf-cm]	4.5	주요 운전 속도[rpm]	1800, 3600
최대 전류[Arms]	1	구동방식	Sinwave
적층 길이[mm]	45~52	동작 온도[°C]	75
고정자 외경[mm]	117	효율[%]	90 이상
/회전자 내경[mm]	/26.4	@1800rpm, 3600rpm	

2.2.2 EL-map을 이용한 초기설계

표 2는 EL-map 산정 시의 선간 역기전력과 인덕턴스의 검토범위와 손실 조건을 나타낸 것이며 이때 철손은 무시하였다. 그림 4의 (a), (b)로 두 운전속도에서 효율을 비교해 볼 때 1800rpm의 경우는 인덕턴스에 따른 효율 차이는 나타나지 않지만 역기전력이 높아질수록 효율이 높게 나타난다. 반면 3600rpm의 경우는 A영역에서 최대효율을 가질 것으로 판단된다. 그림 4의 (c)에서 인덕턴스가 낮은 영역에서 역률이 높아짐을 알 수 있으며 (d)로부터 최대 속도에서 단자전압이 설계 조건을 만족할 것으로 예상된다. EL-map상의 효율 값을 비교해 볼 때 전반적으로 1800rpm에서의 효율이 높게 나타나기 때문에 역기전력과 인덕턴스의 설계범위는 3600rpm에서 최대효율을 가지도록 표 3과 같이 결정한다. 그리고 앞서 결정된 역기전력과 인덕턴스 범위를 만족하도록 공간고조파법을 이용하여 전동기의 초기 형상을 결정하였다.

2.2.3 Optimal Design

최적설계에서 토크리플을 목적 함수로 하여 그림 5와 표 4에서 나타낸 것과 같이 변수를 선정하고 서로의 영향도를 분석함으로써 토크리플이 최소가 되는 형상을 찾는다. 초기설계 시와 최적설계 시의 토크리플과 최적설계 시의 특성해석 결과를 그림 6에 나타내었다. 이 결과에서 주 운전속도인 1800rpm에서 92.34%, 3600rpm에서 92.48%의 효율로써 두 속도 모두에서 목표효율을 만족하였다.

2.2.4 손실 실험 및 효율 측정

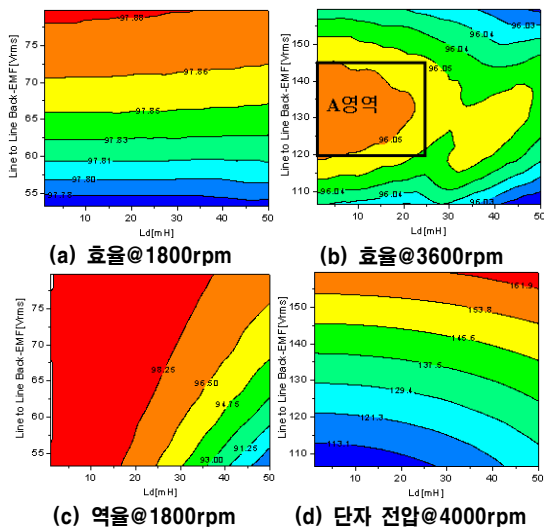
설계된 전동기의 시작기를 제작하여 기계손 및 효율 측정을 하였다. 기계손 측정결과 해석값보다 약 18% 높게 측정되었지만 그 값의 차이가 1W미만으로 효율의 0.5%이내의 오차를 가진다. 효율 측정은 정격 부하인 4.5kgf-cm일 때 600rpm부터 3600rpm까지 600rpm단위로 측정하였으며 해석값과 비교하여 그림 7에 나타내었다. 측정 결과는 1800rpm에서 92.43%, 3600rpm에서 91.65%이며 해석값과 1%미만의 오차로 제시된 설계 방법의 신뢰도를 검증하였다. 그림 8은 효율 측정 실험 사진이다.

3. 결 론

کمپ레서 구동용 IPMSM의 주 운전속도를 고려한 고효율 설계 방법으로 각 속도에서 역기전력과 인덕턴스에 따른 특성을 검토하는 방법을 제시하였다. 그리고 효율이 최대인 설계 범위를 결정하고 범위 내에 파라미터가 있도록 설계를 진행함으로써 고효율 설계를 하고자 하였다. 또한 시작기를 제작하여 효율 측정 실험을 진행함으로써 해석값을 검증하였다. 효율의 해석값과 실험값의 오차는 1%미만이며 실험시 효율이 목표효율인 90%보다 높은 1800rpm에서 92.43%, 3600rpm에서 91.65%로 측정되었다. 이로써 제시된 설계 방법에 대한 타당성을 검증하였으며 주 운전속도를 고려한 고효율 IPMSM 설계 시에 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

〈표 2〉 EL-map 산정 조건

선간 역기전력	118.2~177.3	D축 인덕턴스[mH]	1~50
실효치 범위[Vllrms]	@4000rpm	/돌극비(Lq/Ld)	/1.5
상 저항[mΩ]	100	기계손[W]@1000rpm	0.49



〈그림 4〉 EL-map 산정 결과

〔참 고 문 헌〕

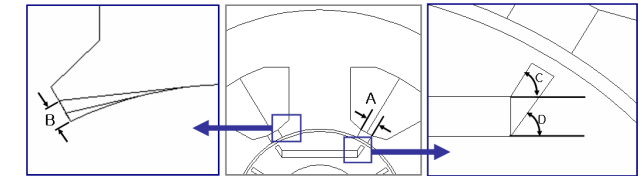
- [1] 이재승, 서국경, 임재훈, 박용서, 이홍원, 이해민, “고효율 독립 냉각 SYSTEM과 그 제어방법”, 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집, pp. 358-363, 1995.
- [2] 한인철, 박진구, “가정용 전기냉장고의 냉동사이클 전사해석(1)”, 설비공학 논문집 공냉론, 4권, 4호, pp. 277-288, 1992.
- [3] 윤원재, 안지훈, 김영현, 서국경, 이재승, 최도철, “고효율 BLDC Inverter 압축기를 적용한 가정용 냉장고의 최적운전에 관한 연구”, 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 46, 2004.
- [4] Ji-Young Lee, Sang-Ho Lee, Geun-Ho Lee, Jung-Pyo Hong, and Jin Hur, “Determination of Parameters Considering Magnetic Nonlinearity in an Interior Permanent Magnet Synchronous Motor”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 42, No. 4, pp. 1303-1306, 2006.

〈표 3〉 역기전력 및 인덕턴스 설계 범위@4000rpm

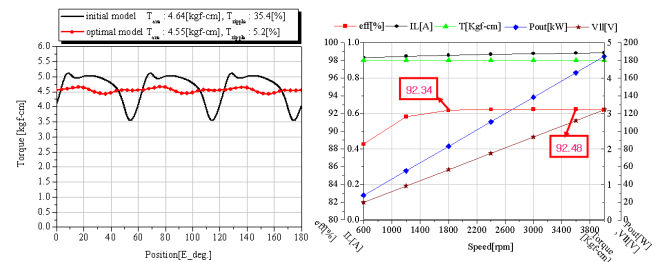
선간 역기전력 실효치 범위[Vllrms]	135~160
D축 인덕턴스 범위[mH]	1~25

〈표 4〉 변수 및 목적함수

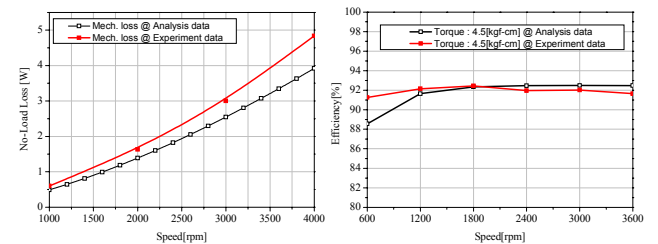
목적 함수 : 토크 리플 6%이하, 제약조건 : 평균토크 4.5kgf-cm이상			
변수	범위	변수	범위
A : Slot open	2~4[mm]	C : Flux barrier1	30~120[°]
B : Chamfer	0~1.5[mm]	D : Flux barrier2	30~56[°]



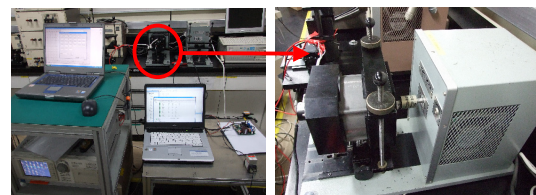
〈그림 5〉 설계 변수



〈그림 6〉 토크리플 및 특성해석 결과



〈그림 7〉 기계손 및 효율 측정 결과와 해석값



〈그림 8〉 효율 측정 실험 사진