

## 냉장고 컴프레서 구동용 IPMSM의 효율 개선 설계

이석희, 방량, 이근호, 홍정표  
한양대학교 기계공학부

### Efficiency Improvement Design of IPMSM for Refrigerator Compressor

Suk-Hee Lee, Liang Fang, Geun-Ho Lee, Jung-Pyo Hong  
School of Mechanical Engineering, Hanyang University

**Abstract** - 본 논문에서는 기존에 제작된 냉장고 컴프레서 구동용 IPMSM의 운전효율 향상을 위하여 손실평가를 통한 전기자 권선설계 및 고정자 코어의 형상설계 방법을 다룬다. 일반적으로 전동기의 효율은 동손과 철손이 같을 때 최대가 되며 이를 고려한 개선설계 방향을 제시하기 위해 실험을 통해 얻은 파라미터가 반영된 IPMSM의 d-q축 등가회로 해석을 수행하여 손실 및 효율을 평가함으로써 효율 향상 설계 방안을 제시한다.

#### 1. 서 론

환경에 대한 관심도가 급증하고 법적인 제약으로 인해 점차 소음이 작고 소비전력이 적은 고효율의 가전제품이 개발되고 있다. 특히 생활방식이 변화되고 에너지소비에 대한 사회인식이 증가되어 냉장고의 경우 큰 용량 및 저소음과 적은 전력소비가 요구되고 있다. 컴프레서 구동용 모터는 냉장고의 중요한 요소로 효율향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[1],[2]. 냉장고는 열역학적 사이클을 이용하여 온도를 유지하며, 이 때 사이클의 효율 증대를 통해 소비전력량을 저감 할 수 있다. 압축기 효율을 개선하기 위해 최적 사이클 사양 및 압축기 회전수별 운전 특성을 규명하기 위한 연구가 진행된 사례도 있다[3],[4]. 이러한 점을 고려하여 컴프레서의 주 운전 속도를 고려한 효율 향상을 하고자 하며 본 논문에서는 1800rpm과 3600rpm에서 주로 운전 되는 185W급 냉장고 컴프레서 구동용 IPMSM을 대상으로 두 속도에서의 효율을 92%이상 만족하기 위한 개선설계를 수행한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 해석이론 및 파라미터 측정 방법

IPMSM의 특성을 검토하기 위해 d-q축 등가회로를 구성 할 수 있으며 등가회로 해석을 위해 각 파라미터 값이 필요하다. 본 논문에서 대상 모터의 특성해석을 위해 d-q축 인덕턴스의 경우 유한요소해석을 통해 산정하였으며 철손등가저항 및 역기전력, 저항, 기계손은 측정 결과를 이용하였다. 여기서는 IPMSM의 등가회로와 특성 방정식 및 파라미터 측정방법에 대해 소개한다.

##### 2.1.1 해석이론

그림 1은 IPMSM의 정상상태에서의 d-q축 등가회로를 나타낸 것이며, 철손의 경우 철손 등가 저항  $R_c$ 로 고려하였다. 전압방정식 및 토크 방정식은 식(1)-(3)과 같다. d-q축 인덕턴스는 무부하시와 부하시의 쇠교자속( $\Psi_a, \Psi_o$ )의 크기와 위상차( $\alpha$ )의 관계로써 식(5)를 이용하여 산정한다[5].

##### 2.1.2 파라미터 측정 방법

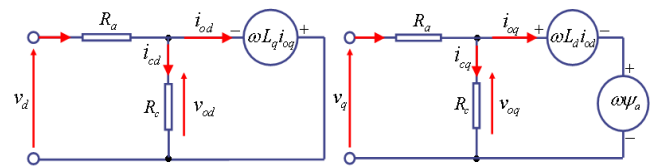
등가회로 해석을 하기위한 파라미터 중 역기전력, 철손 등가 저항, 상저항, 기계손은 측정을 통한 값을 반영하였다. 여기서는 파라미터 측정 시험 중 손실 분리시험에 대해 소개한다. 손실 분리시험은 무부하 철손 및 기계손을 측정하는 방법으로 다음의 세 단계로 이루어진다.

- 1) DC모터를 무부하로 구동하여 입력( $P_0$ )을 측정한다.
- 2) 측정 대상 모터 중 영구자석이 착자 되지 않은 모델을 그림 2와 같이 DC모터와 연결하고 DC모터를 구동하여 DC모터의 입력( $P_1$ )을 측정한다.
- 3) 측정 대상 모터 중 영구자석이 착자 된 전동기를 그림 2와 같이 DC모터와 연결하고 DC모터를 구동하여 DC모터의 입력( $P_2$ )을 측정한다.

본 실험을 위해 영구자석이 착자 되지 않은 전동기를 제작하였으며 측정된 값과 식(6)을 이용하여 각 손실을 산정하였다. 측정된 무부하 철손( $W_i$ ) 및 선간 역기전력 실효값( $V_0$ )과 식(4)를 이용하여 철손 등가 저항  $R_c$ 를 산정 할 수 있다.

##### 2.2 대상 모델

그림 3은 기존에 제작된 185W급 냉장고 컴프레서 구동용 모터사진이며, 제원은 표 1과 같다. 주 운전 속도는 1800rpm과 3600rpm으로 두 속도 영역에서 92%효율을 목표로 개선설계를 방향을 검토한다.



<그림 1> d-q축 등가회로

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

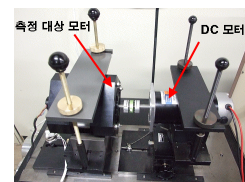
$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_d \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_a \end{bmatrix} \quad (2)$$

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

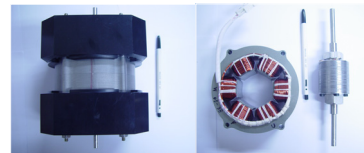
$$W_i = \frac{v_{od}^2 + v_{oq}^2}{R_c} = \frac{V_0^2}{R_c}, R_c = \frac{V_0^2}{W_i} \quad (4)$$

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

$$\text{무부하 철손} = P_2 - P_1, \text{ 기계손} = P_1 - P_0 \quad (6)$$



<그림 2> 손실 평가를 위한 측정 대상 모터와 DC모터의 결합사진



<그림 3> 대상 전동기 사진

##### <표 1> 대상 전동기 제원

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

### 2.2.1 기존 모델의 특성평가

그림 4는 기존 모델의 손실 분리시험 결과와 4000rpm에서의 무부하 선간 역기전력 측정결과를 나타낸 것이다. 측정 및 해석을 통해 얻은 파라미터를 적용하여 특성해석을 수행한 결과는 표 2와 같으며 1800rpm과 3600rpm에서의 부하철손 및 동손, 효율을 정리하였다. 이 때 특성해석에 적용된 d-q축 인덕턴스는 각각 d축 인덕턴스가 16.7mH, q축 인덕턴스가 26.2mH로 유효요소해석을 이용하여 산정하였다. 표 2의 손실결과를 보면 두 속도 모두에서 철손이 동손보다 큰 것을 알 수 있다.

### 2.3 효율 개선 설계

효율 개선 설계는 총 3단계로 진행되었다. 표 3은 개선 설계 과정에서 변경된 사양을 나타낸 것이며, 표 2는 대상 모델 및 1, 2, 3차 개선 모델의 특성해석 결과로 부하 철손, 동손 및 효율을 정리한 것이다. 각 단계의 개선 설계 과정을 소개한다.

#### 2.3.1 1차 개선 설계

대상 모델의 동손과 철손의 비율을 조절하기 위해 고정자 치와 요크 폭을 증가시켜 철손비율을 감소시켰다. 이 때 치 폭과 요크 폭의 비율을 유지하며 치 폭을 기존 17mm에서 20mm까지 1mm씩 증가시켰다. 그에 따라 슬롯 면적이 작아지게 되어 동일 턴 수 및 점적률을 유지하기 위해 권선 직경을 감소시켰다. 그림 5의 (a)는 치 폭 증가에 따른 효율을 나타낸 것이며 그림 5의 (b)는 치 폭이 17mm와 20mm일 때의 손실을 비교한 것이다. 1차 개선 설계를 통해 3600rpm에서 철손을 35.8% 감소 시키기에 따라 효율이 1%이상 향상되었다. 반면 1800rpm에서는 효율 향상 폭이 작아 91.45%로 목표효율인 92%를 만족하지 못하였다.

#### 2.3.2 2차 개선 설계

2차 설계로 권선 직경을 증가시켜 동손을 감소시킴으로써 1800rpm에서 92% 효율을 만족하고자 하였다. 이 때 제작성을 고려하기 위해 효율을 만족하면서 최소 점적률을 갖는 권선직경을 검토하였다. 92%를 만족하기 위해 추정되는 동손 최대치는 3.18W이며(철손은 2.04W, 입력전류 0.96A 일 때) 이를 만족하기 위한 전기자 권선의 상 저항 값은 1.15Ω 미만이다. 따라서 1차 개선 설계 시 0.77mm이던 권선 직경을 0.85mm로 변경하였다. 표 2의 2차 설계 모델의 특성결과에서 1800rpm에서 92.24%, 3600rpm에서 92.62%로 두 속도 모두에서 목표효율을 만족함을 알 수 있다. 이 때 점적률은 31.6%에서 38.2%로 증가하였다.

#### 2.3.3 3차 개선 설계

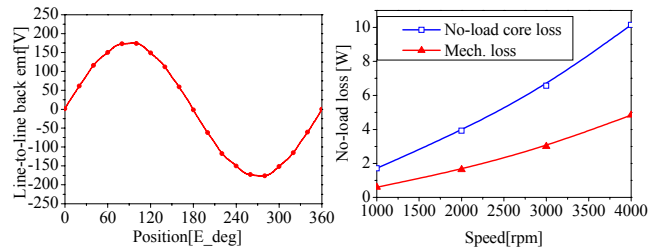
3차 개선 설계의 경우 치 폭과 요크 폭 비율에 따른 무부하 철손이 최소가 되는 형상을 검토한 것으로 치 폭을 20mm에서 1mm씩 줄여 4가지 모델(M1-M4)을 검토하였다. 단, 이 때 각 모델의 슬롯 단면적은 동일하게 유지하였다. 그림 6은 각 모델의 철손 검토결과를 나타낸 것이다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 치 폭이 19mm인 M2 모델이 최소의 철손을 가진다. 기존 모델과 최종 개선 모델을 그림 7에 나타내었다.

## 3. 결 론

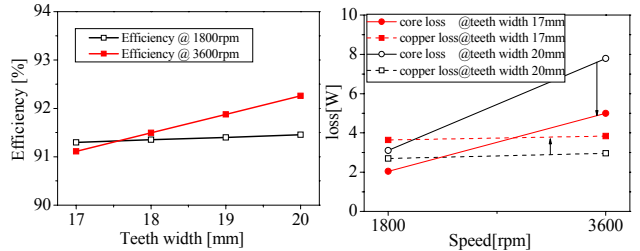
본 논문은 기존에 설계된 냉장고 컴프레서 구동용 IPMSM의 주 운전 속도 영역인 1800rpm과 3600rpm에서의 효율을 향상하기 위한 방안으로 동손과 철손의 비율을 조절하기 위한 고정자 형상 설계와 권선 설계 및 치 폭, 요크 폭에 비율에 따른 철손 최소화 설계를 진행하였다. 그 결과 효율이 1800rpm과 3600rpm에서 각각 92.25%, 92.66%로 두 속도 모두에서 약 1% 효율이 향상되어 목표효율을 만족하였다. 전동기 효율 향상 설계를 위해 동손과 철손의 비율을 조절하는 방법과 치 폭, 요크 폭에 따른 철손 저감 방법은 유용하게 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

### [참고 문헌]

- [1] Masaaki Yabe, Kazunori Sakanobe, Mamoru Kawakubo "High Efficient Motor Drive Technology for Refrigerator", ECODIM. Fourth International Symposium on, pp. 708-709, 2005.
- [2] Teruya Tanaka, "Environment friendly revolution in home appliances", ISPSD '01. Proceedings of the 13th International Symposium on, pp.91-95, 2001.
- [3] 한인철, 박진구, "가정용 전기냉장고의 냉동사이클 전사해석(1)", 설비공학 논문집 공냉론, 4권, 4호, pp. 277-288, 1992.
- [4] 윤원재, 안지훈, 김영현, 서국정, 이계승, 최도철, "고효율 BLDC Inverter 컴프레서를 적용한 가정용 냉장고의 최적운전에 관한 연구", 대한설비공학회 하계학술발표대회 논문집, pp. 46, 2004.
- [5] 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 Trans. Magn.*, Vol. 42, No. 4, pp. 1303-1306, 2006.



(a) 선간 역기전력 측정 결과 (b) 무부하 손실 측정 결과  
**〈그림 4〉 역기전력 및 손실 측정 결과**



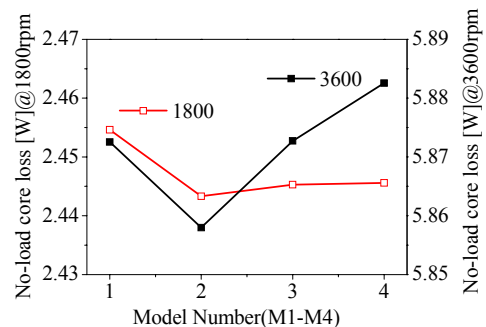
(a) 치 폭에 따른 효율 (b) 치 폭에 따른 철손 및 동손  
**〈그림 5〉 치 폭에 따른 손실 및 효율**

**〈표 2〉 대상 모델 및 개선 모델의 특성해석 결과**

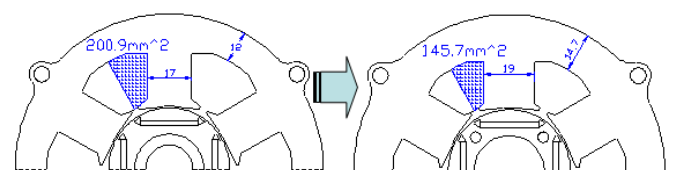
		기존 모델	개선 모델		
			1차	2차	3차
1800rpm	철손[W]	3.11	2.04	2.16	2.15
	동손[W]	2.70	3.64	2.99	2.99
	효율[%]	91.28	91.45	92.24	92.25
3600rpm	철손[W]	7.79	5.00	5.19	5.11
	동손[W]	2.96	3.84	3.07	3.10
	효율[%]	91.11	92.26	92.62	92.66

**〈표 3〉 개선 설계 과정에서 변경된 사양**

	기존 모델	개선 모델		
		1차	2차	3차
권선 직경[mm]	0.9	0.77	0.85	0.85
전기자 상저항[Ω]	1.028	1.405	1.153	1.153
상 당 직렬 턴 수[turns]	198	198	198	198
슬롯 면적[mm <sup>2</sup> ]	200.9	145.7	145.7	145.7
치 폭[mm]	17	20	20	19
요크 폭[mm]	12	14	14	14.7
점적률[%]	31.3	31.6	38.2	38.2



**〈그림 6〉 치 폭/ 요크 폭에 따른 철손**



**〈그림 7〉 대상 모델 및 최종 개선 모델 형상**