

손실 저감을 위한 인버터 구동 유도 전동기의 고정자 슬롯 형상 최적화

김재우, 권병일
한양대학교

Optimal Stator Slot Design of Inverter-Fed Induction Motor for Reduction of Core and Winding Losses

Jae Woo Kim, Byung Il Kwon
Hanyang Univ.

Abstract - In this paper, optimal stator slot shape of 3-phase inverter-fed induction motor is designed to reduce stator core and winding losses. For the analysis, the F.E.M on 1 phase band periodic condition in stator is coupled with harmonic equivalent circuit. For the optimal design, the conjugate gradient method is used as an optimizing algorithm. The stator core and winding losses are reduced by the design method. The results are verified by those of the time-step finite element analysis.

1. 서 론

최근 가변속 주파수 AC 유도 전동기의 수요가 증가하는 추세이다. DC 전동기에 비하여 AC 유도 전동기는 DC 전동기에 비해 가격이 저렴하고 유지 보수가 용이하다. 최근 인버터의 성능 향상으로 인버터 구동 AC 유도 전동기의 수요는 더욱 증가할 것이다. 인버터 구동 유도 전동기는 인버터에서 공급되는 전원에 포함된 시간 고조파의 영향으로 동손과 철손이 증가하고, 따라서 추가적인 열을 발생시키는 단점이 있다. 인버터 구동 유도 전동기의 고조파에 의한 열 손실을 저감시키는 방법으로 전동기의 부피를 증가시키고 냉각 시스템을 보완하거나, 전동기의 슬롯 형상을 최적화하는 방법이 있는데 전자의 경우는 제작 시 추가적인 비용이 발생한다. 유도 전동기의 고정자 슬롯 형상 설계에 대한 연구 배경으로, 시간 차분 유한요소 해석에 의한 고정자 슬롯 형상 설계 방법을 사용하여 고정자 철손을 저감하였고[1], 등가회로를 사용하여 인버터 구동 유도 전동기의 고정자 슬롯 형상을 설계 하였다[2]. 이전 연구에서 1 슬롯 회전자 주기 경계 조건을 이용한 유한요소 해석 방법을 고조파 등가회로와 결합하여 인버터 구동 유도 전동기의 회전자 슬롯 형상을 최적 설계한 바 있다[3]. 6-step 인버터 구동 유도 전동기의 고정자 형상 최적 설계의 경우, 첫째, 점적율의 제한 사항, 둘째, 6-step 인버터 출력 전압에 포함된 시간 고조파의 영향을 고려하여야 한다. 실용적이고 효율적인 해석과 설계 방법을 사용하여 6-step 인버터 구동 유도 전동기의 고정자 철손과 동손을 감소시켜 전동기의 성능을 향상시키는 것이 필요하다.

본 논문에서는 인버터 구동 유도 전동기의 성능 향상을 위하여 고정자 슬롯의 형상을 최적화하였다. 해석 방법으로는 1 phase band 주기 경계 조건에 의한 유한요소 해석을 하였고, 여기서 추출한 parameter들을 가지고 고조파 등가회로를 구성하였다. 설계 방법으로는 conjugate gradient method를 최적화 알고리즘으로 사용하였다. 점적율과 고조파를 고려한 목적 함수를 설정하였고, 목적 함수값이 최소화 되도록 슬롯 형상을 반복적으로 remesh하였다.

2. 최적 설계에 대한 해석방법 및 절차

2.1 최적화 모델

3상 4극 1.5[kW] 220[V] AC 농형 유도 전동기가 최적화 모델로 사용되었고, 인버터 6-step 출력 전압이 이 전동기에 인가되었다. 구체적인 모델의 사양은 Table 1 과 같다.

표 1 유도 전동기 모델 사양

Table 1 Specification of the induction motor

| | | | |
|---------------|----------|------------------|-----------|
| phase | 3 | stator outer dia | 135 [mm] |
| pole | 4 | # of stator slot | 36 |
| output power | 1.5 [kW] | # of rotor slot | 28 |
| input voltage | 220 [V] | air gap length | 0.35 [mm] |

인버터 구동 유도 전동기의 최적화 설계를 위한 초기 모델은 고정자의 외경이 135mm이고 lamination의 적층 폭이 80mm인 농형 유도 전동기이다. 회전자 바의 최적 설계 시 폭 증가에 따른 철심의 포화를 고려하여 회전자의 슬롯 수를 이전 연구[3]에서 설정했던 44개 슬롯에서 28 개 슬롯으로 설계하였다.

2.2 해석 방법

Fig. 1은 유한요소 해석을 위해 사용된 1 phase band 고정자 주기 경계 모델을 보여준다.

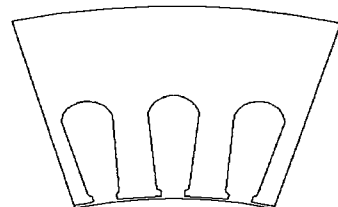


그림 1 1 phase band 고정자 형상
Fig. 1 1 phase band stator shape

인버터 6-step 전원 구동 농형 유도 전동기의 고정자 최적 설계를 위한 해석 방법은 다음과 같다. 첫째, 고정자 슬롯의 형상 변화를 위한 설계 변수들의 위치를 선정한다. 이 설계 변수들과 최적 설계된 회전자

설계 변수를 결합하여 초기 등가회로를 구성한다. 둘째, 정격 슬립에서 유한요소 해석을 실시하고 투자율을 결정한다. 셋째, 1 phase band 주기 경계 조건에 대한 유한요소 해석을 실시하고 정격 슬립에서의 parameter들을 추출한다. 이 parameter들로 구성된 고조파 등가회로를 증첩하여 특성해석을 실시한다.

2.3 최적 설계 절차

최적 설계 절차는 Fig. 2와 같다.

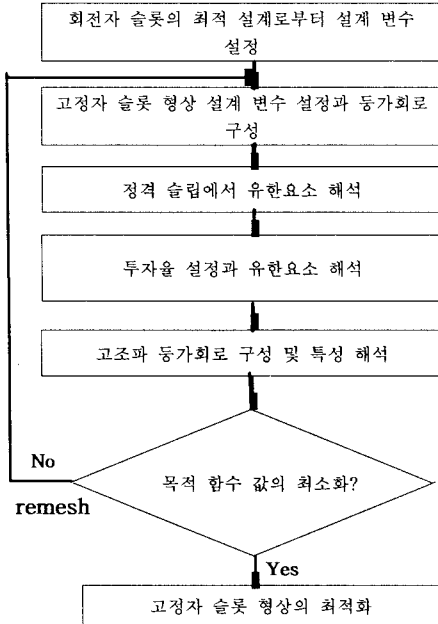


그림 2 최적 설계 절차
Fig. 2 Optimal design process

최적화된 회전자 형상과 최적화가 되지 않은 초기 고정자 형상을 결합하여 최적 설계를 위한 초기 모델을 설정한다. 초기 모델에 대한 설계 변수와 parameter를 가지고 등가회로를 구성한 후 정격 슬립을 구하고, 1 phase band 고정자 주기 경계 조건에 대한 유한요소 해석 방법과 고조파 등가회로 해석 방법을 사용하여 특성 해석을 실시한다. 특성 해석 결과로부터 목적 함수 값을 구하고 설계 변수의 최적화 여부를 판단한다. 목적 함수의 식은 (1)과 같다.

$$f(P) = \frac{1}{C_1} + kC_2 + |FF/BF - 1| \alpha \quad (1)$$

여기서 C_1 은 효율이고 C_2 는 최대 토오크 비율인데, 만약 C_2 가 3.0보다 크면 $k=0$ 이므로 C_2 는 함수에 영향을 미치지 않는다. FF 는 설계 변수의 변경에 의해 재설계된 고정자 슬롯 형상에 대한 점적율이고, BF 는 고정자 슬롯의 기준 점적율이며, α 는 점적율 가중 계수이다. 기준 점적율은 57.4%이고 초기 고정자 슬롯의 점적율과 일치한다. 만약 $FF/BF \leq 1$ 이면 $\alpha=0$ 이므로 함수에 영향을 주지 않게 된다. 이 조건을 사용하여 초기 점적율과 동일한 점적율에서 반복적인 해석과 형상 진화를 통해 목적 함수 값이 최소가 되는 고정자의 최적 형상을 얻는다. 형상 설계 과정에서 최적화 알고리즘인 conjugate gradient method를 사용하여 새로운 고정자 형상 설계 변수 값을 구하고 형상을 remesh하는 방식으로 특성 해석을 실시한다. 이 과정은 목적 함수 값이 최소가 될 때까지 반복된다.

3. 최적 설계 결과와 손실 비교

Fig. 3은 고정자 슬롯 형상의 설계 변수를 나타낸다.

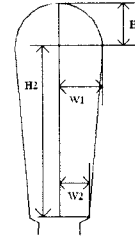


그림 3 고정자 슬롯 형상 설계 변수
Fig. 3 Design variables for stator slot shape

- H1 : Height of slot top head
- H2 : Height of slot body
- W1 : width of slot top
- W2 : width of slot bottom

Fig. 4에서 초기 고정자 슬롯의 형상(점적율: 57.4%)과 최적 형상(점적율: 57.4%)을 동시에 비교하였다.

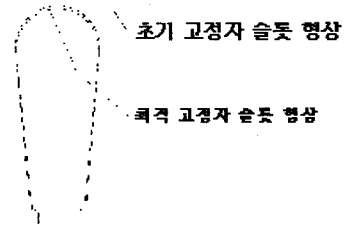


그림 4 초기와 최적 고정자 슬롯 형상 비교
Fig. 4 Comparison of slot shapes

점적율 57.4%에서의 최적화 슬롯 형상은 초기 슬롯과 비교하여 상단부 head 부분이 약간 감소한 반면, 하단부는 약간 증가한 것을 볼 수 있다. 초기와 최적 고정자 슬롯 형상의 치수 비교를 위하여 Table 2에서 상단 head의 높이와 폭, 그리고 body의 높이를 설계 변수의 값으로 나타낸다.

표 2 초기와 최적화 슬롯 치수 비교
Table 2 Comparison of design variables

(mm)

| design variable | initial | optimal |
|-----------------|---------|---------|
| H1 | 2.69 | 2.37 |
| H2 | 10.00 | 10.48 |
| W1 | 2.80 | 2.72 |
| W2 | 1.82 | 1.70 |

고정자 슬롯 head의 높이와 body의 높이의 합(H1+H2)이 초기 형상과 최적 형상에 대하여 각각 12.69mm와 12.85mm이고 초기 모델의 값이 최적 모델의 값과 비교하여 0.16mm 만큼 감소하였다. 고정자 슬롯 head의 폭(W1)은 2.80mm에서 2.72mm로 초기 모델의 값이 0.08mm 감소하였다. 고정자 슬롯 하단 폭(W2)은 초기 모델의 값 1.82mm에서 최적 모델의 값 1.70mm로 0.12mm 만큼 감소하여, 동일 점적율에서 최적 모델의 고정자 치의 폭이 증가하게 된다. Table 3은 초기 모델과

최적 모델의 고정자 철손과 동손의 비교를 나타낸다.

표 3 초기와 최적 모델의 고정자 철손 비교
Table 3 Comparison of core losses

| | initial | optimal |
|----|---------|---------|
| 철손 | 149.0 | 141.5 |
| 동손 | 154.3 | 151.5 |

점적율 57.4%에서 고정자 철손은 초기 모델값보다 최적 모델의 값이 7.5 [W] 만큼 감소하였다. 두 모델의 철손은 hysteresis loss와 eddy current loss의 기본파에 성분에 해당하는 손실만을 나타내고 고조파에 성분에 해당하는 손실은 고려되지 않았다. 고정자 권선의 동손은 최적 모델이 초기 모델과 비교하여 2.8 [W] 만큼 감소하였는데, 여기서 고정자 권선의 기본파 동손이 2.2 [W], 고조파 동손이 0.6 [W] 만큼 각각 감소하였다. Fig. 5는 초기 모델과 최적 모델의 고조파 고정자 동손의 비교를 나타낸다.

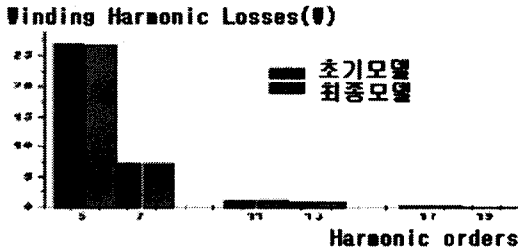


그림 5 고조파 고정자 동손 비교

Fig. 5 Comparison of winding harmonic losses

고조파 고정자 동손은 5차와 7차에서 가장 크게 나타났고 초기 모델에서 5차와 7차의 고조파 고정자 동손의 합은 전체 고조파 고정자 동손의 94.7%이다. 초기와 최적의 고조파 고정자 손실의 비교로부터 최적 모델의 5 고조파 고정자 동손이 초기 모델보다 0.39 [W], 7 고조파 고정자 동손은 0.11 [W] 감소한 것으로 나타난다. Fig. 6은 시간차분 유한요소 해석에 의한 고정자 권선 전류 파형을 나타낸다.

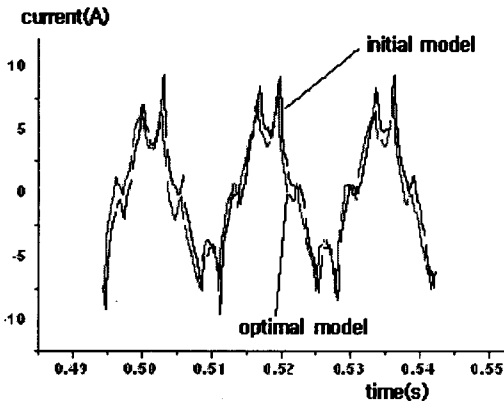


그림 6 고정자 권선의 전류 파형 비교

Fig. 6 Comparison of winding current waves

초기 모델의 고정자 권선 전류 파형은 최적 모델의 전류

파형보다 더 높은 피크값을 나타낸다. 전류의 파형 비교만으로는 차이를 구분하기 어려우므로 discrete fourier transform을 이용하여 전류 파형의 고조파 스펙트럼 형식으로 Fig. 7에서 비교하였다.

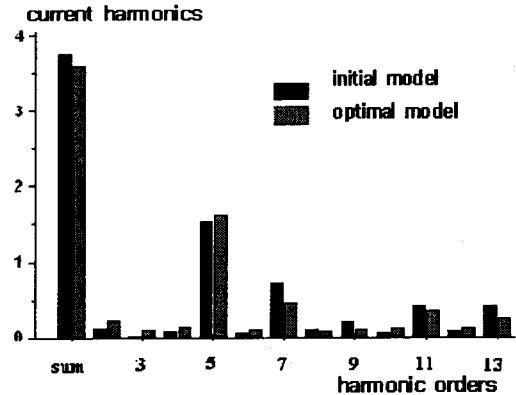


그림 7 전류 파형의 고조파 스펙트럼

Fig. 7 Comparison of winding current harmonic spectrum

그림의 X축 하단 원편에 있는 sum은 기본파를 제외한 고조파 차수별 권선 전류를 13차까지 합계한 것이고 최적 모델의 합계값이 초기 모델보다 감소한 것으로 나타난다. 5차 이하에서는 초기 모델의 전류 고조파의 값이 더 작은 것으로 나타나나 7차 이상에서는 최적 모델의 전류 고조파의 값이 더 감소한 것으로 나타난다. 특히 7차, 11차, 13차에서는 상대적으로 큰 감소를 나타낸다.

4. 결 론

고정자 슬롯의 최적 형상 설계를 위하여 1 phase band 주기 경계 조건에 대한 유한요소 해석과 고조파 등가회로 해석 방법을 결합하여 사용하였다. 최적화 알고리즘으로 conjugate gradient method를 사용하였고 점적율을 고려한 목적 함수를 사용하여 초기 모델의 슬롯 점적율과 최대 토오크 비율을 유지하면서 철손과 동손을 감소시키는 설계 방법을 실시하였다. 최적 설계의 결과로부터 얻은 최적 모델의 철손과 동손을 초기 모델과 비교하였고 시간차분 유한요소 해석을 통하여 얻은 초기 모델과 최적 모델의 손실 특성이 일치하는 것으로 나타났다. 본 논문의 고정자 최적 설계 방법은 점적율의 기준을 달리하는 경우나 기존의 점적율을 가능한 최소의 점적율로 설계하고자 할 때 단 시간에 효율적으로 적용될 수 있다.

고조파에 의한 고정자 철손의 추가적인 손실에 대한 연구를 진행하여 6-step 인버터 구동 유도 전동기의 고정자 슬롯 형상에 따른 손실 특성을 좀 더 정확하게 분석할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Hak-Yong Lee "Shape design of stator slot for the reduction of stator core loss in the induction motor" Electric Machines and Drives Conference Record, May 1997
- [2] Lopez, J.R "The effect of induction motor design on losses and efficiency for adjustable-frequency drives" IEEE ISIE proceedings, May 1994
- [3] 김병택, 권병일, "Optimal design of the rotor slot for the performance improvement of inverter-fed induction motors", 대한 전기학회 추계학술대회 논문집, pp250-253, 2000