고속전철용 견인유도전동기의 최적화 설계에 관한 연구
Design Optimization of a Traction Motor for High Speed Trains

권병일[a] 박승찬[b] 김병택[c] 곽승용[d]
Kwon, Byung-Il Park, Seung-Chan Kim, Byung-Taek Kwak, Seung-Yong

이기호[e] 윤종학[f] 김근웅[g] 이상우[h]
Lee, Gee-Ho Yoon, Jong-Hack Kim, Geun-Woong Lee, Sang-Woo

ABSTRACT

Three phase squirrel cage induction motor is generally adopted as a traction motor to drive high speed trains because of its robustness for surrounding environment and easy maintenance. In the design of traction motor, reduction of weight is very important in order to reduce kinetic energy to accelerate the vehicle. Therefore, in this paper, design variables of a preliminary designed traction motor to minimize its weight is determined using the optimization technique. Before the optimization process, rotor slot number is determined to reduce vibration and noise by the analysis of magnetic force. As a result, a design example to reduce weight by 12% than that of the preliminary designed motor is presented.

1. 서 론

현재 국내에서 개발되고 있는 고속전철용 견인전동기는 견고하고, 유지보수가 거의 필요없는 3상 농형 유도전동기가 주를 이루고 있으며, 해외의 경우도 마찬가지이다[1]. 견인전동기의 경량화 설계는 차량 전체의 경량화에 영향을 많이 미치며, 고속 운전의 관점에 있어서도 매우 중요하다. 따라서, 견인전동기의 설계는 일반적으로 중량의 감소를 목표로 하고 있다. 또한, 견인전동기는 외부에 개방된 형태로 장착되어 있으므로, 진동 및 소음의 저감 문제 역시 중요하다. 진동 및 소음의 원인은 기계적인 요인도 있지만, 전동기의 설계자의 입장에서 보면, 전자력에 의한 진동 및 소음 감소를 위한 설계에 중점을 두게된다[2][3].

본 논문에서는 견인전동기의 기본 설계를 한 후, 먼저, 진동 및 소음의 저감을 위한 회전자 슬롯수를 결정한다. 그후, 설계 파라미터와 제약조건및 설계 평가 함수 즉, 목적함수를 설정하고, 최적화 설계 기법을 이용하여, 최적의 설계 파라미터 값을 구한다. 회전자의 슬롯수를 결정하기 위한 특성해석은 인버터의 출력전압을 고려한 시간 차분 유한요소법을 이용하며[4], 최적화 기법에 의한 최적화 설계에 있어서의 목적 함수및 제약 함수 값은 고조파 등가회로 해석법[1]을 이용하여

a 한양대학교 전기공학과 부교수, 비회원
b 한양대 공학기술연구소 선임연구원, 정회원
c 한양대 대학원 박사과정, 비회원
d 한양대 대학원 석사과정, 비회원
e 대우중공업(주) 철차연구소 책임연구원, 비회원
f 대우중공업(주) 철차연구소 책임연구원, 비회원
g 대우중공업(주) 철차연구소 주임연구원, 비회원
h 대우중공업(주) 철차연구소 연구원, 비회원

계산한다. 한편, 15개의 설계 변수와 23개의 제약 조건하에서 중량의 저감을 위한 견인전동기의 최적화 설계예를 제시한다.

2. 진동 및 소음 저감을 위한 회전자 슬롯수의 결정

2.1 저진동을 위한 슬롯 조합수

유도전동기의 진동, 소음의 발생 정도는 고정자와 회전자의 슬롯수 조합에 의하여 많이 변화하게 되므로, 전동기의 설계 변수 최적화에 앞서, 진동, 소음이 저감되는 회전자의 슬롯수를 결정한다. 극쌍수당 회전자와 고정자의 슬롯수를 각각 n_r 와 n_s 라고 하면, 고정자에 작용하는 전자력의 고조파 차수는 표 1과 같다[5].

표 1. 저차의 시간고조파차수와 공간고조파차수의 조합

시간 고조파 차수	공간 고조파 차수
$-(1-s)n_r$	n_s-n_r
$(1-s)n_r$	$-n_s+n_r$
$2-(1-s)n_r$	$2+n_s-n_r$
$2+(1-s)n_r$	$2-n_s+n_r$

전자력에 의한 고정자의 변형모드(m)는 극쌍수(p)와 전자력의 공간차수(k)의 곱으로(m=pk) 나타나며, 특히 4극기인 경우에 p=2이므로, 공간차수 1차와 변형모드 2가 대응된다. 진동에 의한 고정자 프레임 표면의 변위는 m^4에 반비례하므로, m=2보다 큰 변형모드에서는 즉, 저차의 공간차수(특히 1차 공간차수)를 제외한 차수에서는 진동에 거의 영향을 주지 않는다[5].

표 1의 수식에 기초로 하여 슬롯조합에 따른 고조파 차수의 계산 결과를 표 2에 나타내었으며, 진동의 원인이 되는 1차의 공간차수가 나타나지 않는 회전자의 슬롯수인 52, 68, 72, 74를 선택하여 특성고찰을 한다. 표 2에서 고정자의 슬롯수는 기본 설계시에 선택한 60개로 고정하였다.

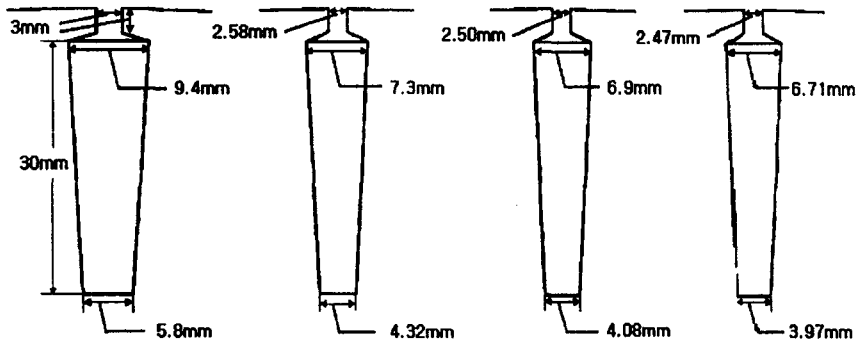
표 2 고정자 및 회전자의 슬롯수 조합에 따른 시간 및 공간고조파 차수(슬립 s = 0)

슬롯수 조합 (고정자슬롯수,회전자슬롯수)	(60,48)	(60,50)	(60,52)	(60,54)	(60,56)	(60,58)	(60,60)
n_s	30	30	30	30	30	30	30
n_r	24	25	26	27	28	29	30
(시간고조파차수, 공간고조파차수) ($-n_r$, n_s-n_r)	(-24, 6)	(-25, 5)	(-26, 4)	(-27, 3)	(-28, 2)	(-29, 1)	(-30, 0)
(시간고조파차수, 공간고조파차수) ($2-n_r$, $2+n_s-n_r$)	(-22, 8)	(-23, 7)	(-24, 6)	(-25, 5)	(-26, 4)	(-27, 3)	(-28, 2)
(시간고조파차수, 공간고조파차수) ($2+n_r$, $2-n_s+n_r$)	(26,-4)	(27,-3)	(28,-2)	(29,-1)	(30, 0)	(31, 1)	(32, 2)
슬롯수 조합 (고정자슬롯수,회전자슬롯수)	(60,62)	(60,64)	(60,66)	(60,68)	(60,70)	(60,72)	(60,74)
n_s	30	30	30	30	30	30	30
n_r	31	32	33	34	35	36	37
(시간고조파차수, 공간고조파차수) ($-n_r$, n_s-n_r)	(-31,-1)	(-32,-2)	(-33,-3)	(-34,-4)	(-35,-5)	(-36,-6)	(-37,-7)
(시간고조파차수, 공간고조파차수) ($2-n_r$, $2+n_s-n_r$)	(-29, 1)	(-30, 0)	(-31,-1)	(-32,-2)	(-33,-3)	(-34,-4)	(-35,-5)
(시간고조파차수, 공간고조파차수) ($2+n_r$, $2-n_s+n_r$)	(33, 3)	(34, 4)	(35, 5)	(36, 6)	(37, 7)	(38, 8)	(39, 9)

2.2 회전자 슬롯수의 결정

(1) 회전자 슬롯의 형상

회전자 슬롯수가 52, 68, 72, 74 인 경우의 회전자 슬롯의 개구폭과 형상은 그림 1에 나타내었다. 각각의 회전자 슬롯의 형상은 회전자 도체가 차지하는 총면적과 슬롯깊이를 동일하게 하도록 정하였고, 또한 회전자 도체의 위, 아래의 폭은 슬롯수 변화에 따른 치의 포화를 고려하여 조정하였으며, 고조파 동손을 감소시키기 위하여 가능한 한 도체의 윗 부분을 넓게 하였다. 슬롯갯수가 변화하더라도 유효 공극의 길이를 동일하게 하기 위하여, 카터계수를 이용하여 회전자 슬롯의 개구폭(slot opening)을 설계하였다.



(a) 52개의 경우 (b) 68개의 경우 (c) 72개의 경우 (d) 74개의 경우

그림 1. 회전자 슬롯의 형상

(2) 슬롯수 변화에 따른 특성 해석

회전자 슬롯수의 변화(52개, 68개, 72개, 74개)에 따른 토오크 리플, 고정자 전류, 회전자 바 손실의 고조파 특성을 기본 설계시의 기저주파수인 60[Hz]에서 시간 차분 유한요소법을 이용하여 해석하였다[4]. 견인전동기는 기저주파수에서 1 펄스 모드의 6-step 인버터로 구동되므로, 이때의 전압 파형을 고려하였다. DC link 전압은 2,800 [V] 이다. 또한, 통풍홀 구조는 1차 설계 결과를 채택하였다. 그림 2와 그림 3은 토오크 리플 특성과 고조파 토오크 특성을 나타낸다. 또한, 그림 4, 그림 5는 회전자 바의 손실특성을, 그림 6, 그림 7은 고정자 전류 특성을 나타낸다.

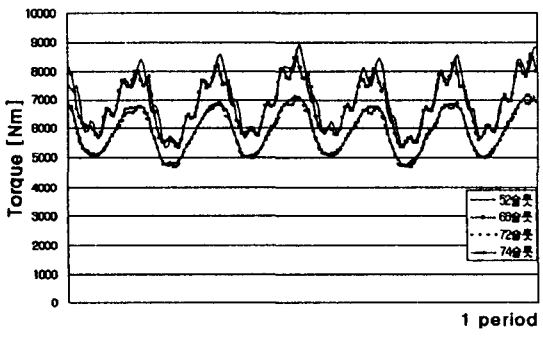


그림 2. 토오크 리플

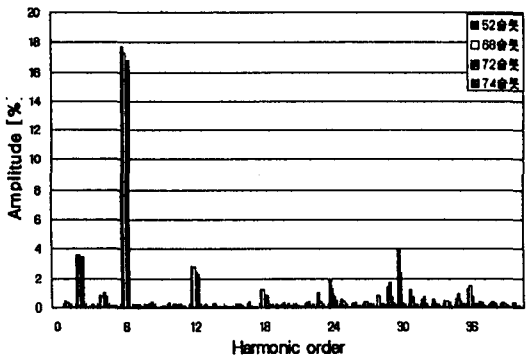


그림 3. 평균 토오크 대비 고조파 토오크

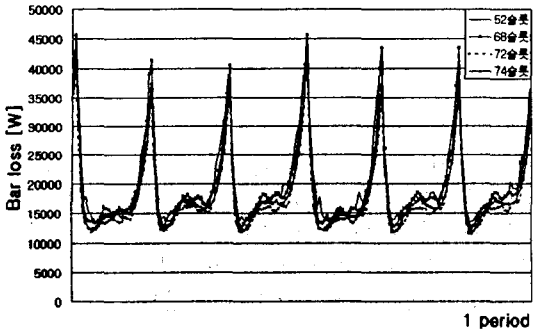


그림 4. 회전자 바의 손실 파형

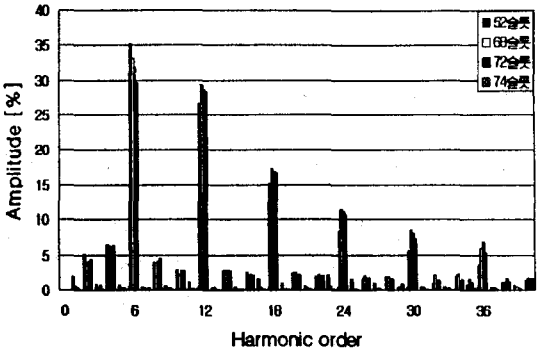


그림 5. 회전자 바 손실의 고조파 분석

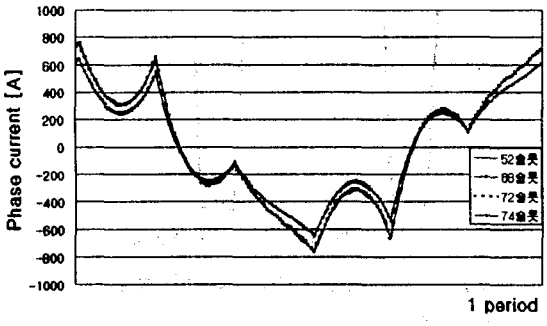


그림 6. 고정자 전류 파형

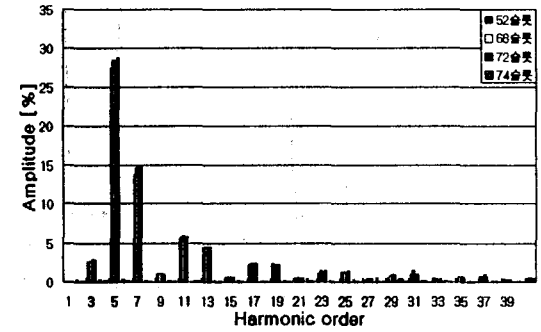


그림 7. 고정자 전류의 고조파 분석

(3) 해석 결과 고찰 및 슬롯수의 결정

회전자 슬롯수의 변화(52개, 68개, 72개, 74개)에 대하여 토오크 리플을 해석한 결과, 토오크 리플의 고조파 실효치 값은 그림 3에서 74개의 경우가 72개의 경우와 동일하게 가장 작게 발생한다. 그러나, 표 3에서 알 수 있듯이 74개의 경우가, 다른 슬롯 개수의 경우보다 높은 차수의 토오크 리플 성분이 제거되므로, 전동기의 장착 시스템의 횡진동에 의한 소음저감에 효과적이라 사료된다.

회전자 바의 손실에 있어서도, 74개 슬롯의 경우가 고조파 성분의 실효치가 가장 작게 나타나므로, 인버터 구동시 회전자 바에서의 고조파 손실을 감소시킬 수 있음을 알 수 있다.

고정자 전류 특성에 있어서는 74개 슬롯의 경우가 고조파 성분의 실효치가 가장 크게 나타나지만, 동일한 정격 토오크를 발생시키는 조건하(슬립의 조정) 에서는 rms 전류값이 다른 슬롯수 보다 작게 나타나므로[4], 고정자 동손은 오히려 감소되리라 본다.

이상의 결과 고찰로부터, 진동 및 소음, 고조파 손실등을 감소기키는데에 가장 적합한 회전자 슬롯수는 74개임을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 최적화 기법에 의한 설계변수의 최적화에 앞서, 최적의 회전자 슬롯수를 74개로 결정한다.

표 3. 토오크의 고조파 성분 실효치 비교

회전자 슬롯수	평균토오크	고조파 실효치
52슬롯	6950.7 [Nm]	19.19 [%]
68슬롯	6857.1 [Nm]	18.46 [%]
72슬롯	5872.0 [Nm]	17.38 [%]
74슬롯	5936.5 [Nm]	17.38 [%]

표 4. 회전자 바손실의 고조파 성분 실효치 비교

회전자 슬롯수	평균손실	고조파 실효치
52슬롯	19794.6 [W]	50.25 [%]
68슬롯	19732.2 [W]	52.03 [%]
72슬롯	17496.5 [W]	50.78 [%]
74슬롯	18091.7 [W]	48.63 [%]

표 5. 고정자 전류의 고조파 성분 실효치 비교

회전자 슬롯수	기본파 성분의 실효치	고조파 실효치	rms 전류값
52슬롯	406.5 [A]	31.94 [%]	426.72 [A]
68슬롯	401.6 [A]	33.25 [%]	423.19 [A]
72슬롯	344.6 [A]	33.03 [%]	362.94 [A]
74슬롯	340.8 [A]	33.68 [%]	359.60 [A]

3. 최적화 기법에 의한 설계 변수 최적화

3.1 비선형 최적화 문제의 정식화

일반적으로 비선형 최적화 문제는 주어진 제약조건하에서, 목적함수를 최소화 시키는 식 (1)의 해를 구하는 것으로 정의된다.

$g_j(X) \le 0 \quad (j=1,2,\ldots,m)$ 의 조건하에서 $f(X)$를

최소화시키는 $X = \{X_1, X_2, \ldots, X_n\}$ 를 구한다. (1)

여기서, $f(X)$는 목적함수, $g_j(X)$는 제약함수이며, X는 설계변수의 집합을 나타낸다.

본 논문에서는 설계변수를 최적화 하기 위하여, SUMT(sequential unconstrained minimization technique)를 사용하였다[6-11]. 이 방법은 식 (1)의 최적화 문제를 다른 형식으로 변환시킨 다음 일련의 비제약 최소화 문제를 풀어냄으로써 최적 해를 구한다. 이때의 변환함수 ϕ_k는 일반적으로 다음의 식을 많이 사용한다.

$$\phi_k = \phi(X, r_k) = f(X) - r_k \sum_{j=1}^{m} 1/g_j(X) \qquad (2)$$

식 (2) 의 우변 제 2항을 penalty 항이라 부르며, r_k 는 penalty parameter로서, $r_{k+1} = cr_k$ (c 는 1보다 작은 상수)의 관계가 있다. SUMT에서의 비제약 최소화는 variable metric method를 이용하였다[6]. 또한, 최적설계 프로그램의 순서도를 그림 8에 나타내었다.

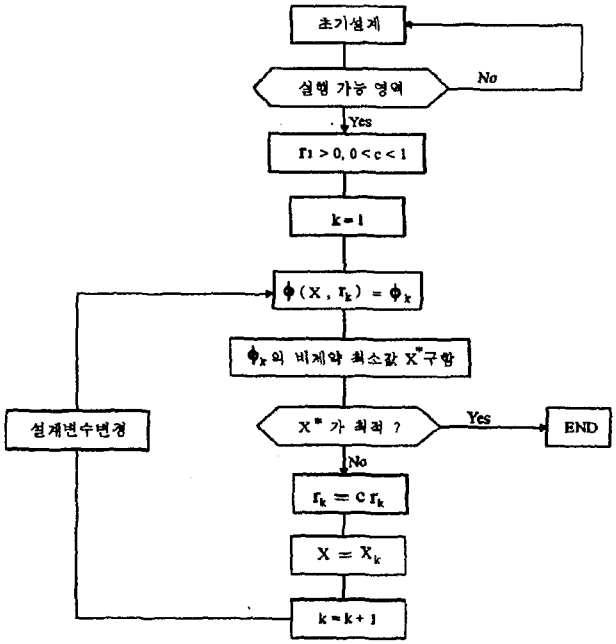


그림 8 최적설계의 순서도

3.2 목적함수, 설계변수 및 제약함수

(1) 목적함수

전인 유도전동기는 중량의 감소가 최우선이므로, 본 논문에서는 전동기의 총중량을 목적함수로 하였다. 즉, 목적함수는 식(3) 과 같다.

$$f(X) = Weight \tag{3}$$

(2) 설계변수

설계변수는 전동기의 형상에 관계되는 13개의 변수와 슬립주파수를 결정짓는 2개의 변수를 선택하였다. 이를 표 6에 나타내었다.

(3) 제약 조건

제약 조건은 표 7에서와 같이 모두 23개이며, 각각의 제약함수식을 만들때에는 각 조건의 하한치 또는 상한치로 나누어 정규화한다.

3상 유도전동기의 토오크는 V/f=일정 운전시에 2차 전류에 비례하여 발생하며, 이때는 자속이 일정하여 여자 전류 또한 일정하게 유지되므로 결국, 토오크는 1차 전류에 거의 비례한다고 볼 수 있다. 표 7에서의 기동 토오크 T_{start} 를 발생하기 위한 기동전류(430 [A] 이하로 제한됨.) I_{start} 는, 근사적으로 식 (4)를 이용하여 구할 수 있다.

$$I_{start} = I_{base} \times \left(\frac{T_{start}}{T_{base}}\right) \quad [A] \tag{4}$$

여기서, I_{base}, T_{base} 는 각각 기저속도(base speed)에서의 rms 전류 및, 토오크 값이다.

또한, 최고 주파수 운전시의 정동 토오크는 근사적으로 다음과 같이 구한다[12].

$$T_{max} = \frac{3}{4}\frac{P}{\omega_e}\frac{V_s}{\sqrt{R_s^2+\omega_e^2(L_{ls}+L_{lr})^2} + R_s} \quad [Nm] \tag{5}$$

여기서, P 는 극수, V_s 는 상전압, R_s , L_{ls}, L_{lr} 는 각각 고정자 저항, 고정자의 누설 인덕턴스 및 회전자의 누설 인덕턴스이다.

표 6. 설계 변수

설계 변수	기 호
1. 고정자 외경	X_1
2. 고정자 내경	X_2
3. 회전자 내경	X_3
4. 고정자 적층폭	X_4
5. 고정자 슬롯 높이	X_5
6. 고정자 슬롯 폭	X_6
7. 공극	X_7
8. 회전자 슬롯 개구폭	X_8
9. 회전자 바 높이	X_9
10. 회전자 바 상단부 폭	X_{10}
11. 회전자 바 하단부 폭	X_{11}
12. 엔드링 높이	X_{12}
13. 엔드링 폭	X_{13}
14. 주파수	X_{14}
15. 슬립	X_{15}

표 7. 제약 조건

제약 조건	기 호
1. 효율(하한치)	G_1
2. 역률(하한치)	G_2
3. 기동전류(상한치)	G_3
4. 최고속도시의 정동토오크(하한치)	G_4
5. 정격토오크(하한치)	G_5
6. base speed(상한치)	G_6
7. 고정자치 자속밀도(상한치)	G_7
8. 고정자 요오크 자속밀도(상한치)	G_8
9. 회전자 치 자속밀도(상한치)	G_9
10. 회전자 요오크 자속밀도(상한치)	G_{10}
11. 고정자 권선의 온도상승(상한치)	G_{11}
12. 회전자 바의 온도상승(상한치)	G_{12}
13. 고정자 외경(상한치)	G_{13}
14. 회전자 내경(하한치)	G_{14}
15. 고정자 철심 길이(상한치)	G_{15}
16. 고정자 치폭(하한치)	G_{16}
17. 회전자 치폭(하한치)	G_{17}
18. 공극(하한치)	G_{18}
19. 회전자 슬롯 개구폭(상한치)	G_{19}
20. 엔드링 높이(하한치)	G_{20}
21. 엔드링 폭(하한치)	G_{21}
22. 슬립(하한치)	G_{22}
23. 기계적 출력(하한치)	G_{23}

3.3 설계 변수 최적화 결과

전동기의 중량을 최소로 하는 설계변수의 최적화 결과와 이때의 목적함수 값인 전동기의 중량을 표 8에 나타내었으며, 이때의 제약 함수 값을 표 9에 나타내었다. 본 논문에서 사용한 최적화 기법인 SUMT는, 전역 최소점(global minimum)이 아닌 국부 최소점(local minimum)의 값에 수렴할 우려가 있으므로, 표 8에 제시한 결과가 전역 최소점이 아닌 국부적 최소해일 수 있다. 그러나, 구하고자 하는 최소해의 근사해로 볼 수 있으므로, 실용상 문제가 되지 않는다고 판단된다.

설계 변수를 최적화한 결과, 특히 회전자의 바 높이의 설계 민감도가 매우 커서, 초기 설계값에 비하여 회전자 바의 높이가 가장 많이 변화됨을 알 수 있었다. 또한, 전동기의 순수 중량은 초기 설계보다 약 12% 감소하였다.

표 8 최적화된 설계변수 및 목적함수값

설계 변수명	설계 변수값
1. 고정자 외경	641.97 [mm]
2. 고정자 내경	395.59 [mm]
3. 회전자 내경	154.68 [mm]
4. 고정자 적층폭	427.15 [mm]
5. 고정자 슬롯 높이	36.17 [mm]
6. 고정자 슬롯 폭	8.86 [mm]
7. 공극	2.21 [mm]
8. 회전자 슬롯 개구폭	2.16 [mm]
9. 회전자 바 높이	20.35 [mm]
10. 회전자 바 상단부폭	7.83 [mm]
11. 회전자 바 하단부폭	2.17 [mm]
12. 엔드링 높이	41.83 [mm]
13. 엔드링 폭	25.14 [mm]
14. 주파수	59.84 [Hz]
15. 슬립	1.87 [%]
목적 함수	목적함수 값
전동기 중량	906.04 [kg]

표 9 최적화 후의 제약함수 값

제약 함수	제약 함수 값
1. 효율	93.51 [%]
2. 역률	80.24 [%]
3. 기동전류	416.14 [A]
4. 정격토오크	4937.7 [Nm]
5. 최고속도시의 정동토오크	3078.02 [Nm]
6. base speed	1761.73 [rpm]
7. 고정자치 자속밀도	1.891 [T]
8. 고정자 요오크 자속밀도	1.787 [T]
9. 회전자 치 자속밀도	1.918 [T]
10. 회전자 요오크 자속밀도	1.619 [T]
11. 고정자 권선의 온도상승	149.25 [deg.]
12. 회전자 바의 온도상승	179.62 [deg.]
13. 고정자 외경	642 [mm]
14. 회전자 내경	156.8 [mm]
15. 고정자 철심 길이	427.1 [mm]
16. 고정자 치폭	11.9 [mm]
17. 회전자 치폭	8.5 [mm]
18. 공극	2.21 [mm]
19. 회전자 슬롯 개구폭	2.2 [mm]
20. 엔드링 높이	41.8 [mm]
21. 엔드링 폭	25.1 [mm]
22. 슬립	1.87 [%]
23. 기계적 출력	910.94 [kW]

4. 결 론

본 논문에서는 고속전철용 견인 유도전동기의 설계 최적화를 위하여, 진동및 소음이 저감되는 회전자 슬롯수를 먼저 결정한 후, 고조파 등가회로 해석과 최적화 기법인 SUMT를 이용하여 전동기의 중량을 최소로 하는 설계변수를 구하였다. 최적화 설계 결과, 기본 설계시보다 중량이 12% 정도 감소된 설계예를 제시할 수 있었다.

참고문헌

1. 대우중공업(1997), "견인전동기 개발(1차년도 연차보고서)".
2. Ronnie J.M.Belmans, Dirk Verdyck, Willy Geysen, Raymond D.Findlay (1991),"Electro-Mechanical Analysis of the Audible Noise of an Inverter-Fed Squirrel-cage Induction Motor", IEEE Trans. on Inducstry Applications, Vol.27, No.3, pp.539.
3. Ekkehard Bolte, Dieter Gerling (1990), "Noise Analysis of Inverter-Fed Variable-Speed Induction Motor Drives", Proc. of ICEM, pp.326-331.
4. 김병택, 곽승용, 권병일, 박승찬, 이기호, 김근용, 윤종학 (1998), "고속전철용 견인 유도전동기의 회전자 슬롯수 변화에 따른 특성 고찰", 대한전기학회 논문지, 제 47권, 10호.
5. 小林 孝司(1996), "誘導電動機の電機設計と騒音", '96 技術シンポジウム.
6. S. S. Rao(1984), "Optimization Theory and Applications", John Wiely & Sons.
7. Uri Kirsch(1981), "Optimum Structural Design", McGraw-Hill Book Company.
8. J.Appelbaum, I.A.Khan, E.F.Fuchs(1987), "Optimization of Three-phase Induction Motor Design", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.2, No.3, pp.415-422.
9. R.Ramaratham, B.G.Desai(1971), "Optimization of Polyphase Induction Motor Design", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.90, No.2, pp. 570-578.
10. Bhim Singh, B.P.Singh, S.S.Murthy, C.S.Jha (1983), "Experience in Design Optimization of Induction Motor Using 'SUMT' Algorithm", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.102, No.10.
11. Z.Zhang, F.Profumo, A.Tenconi(1996), "Improved Design for Electric Vehicle Induction Motors Using an Optimization Procedure", IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol.143, No.6, pp.410-416.
12. B.K.Bose(1986), "Power Electronics and AC Drives", Prentice-Hall.