

장하분배법을 이용한 3상유도전동기의 설계

한상진, 이승철, 이현준, 김세원, 김진범, 이유성, 김경훈, 백승훈, 이종호

국립한밭대학교

Design of three-phase induction motor using Loading distribution method

Sang-Jin Han*, Seung-Chul Lee*, Hyun-Jun Lee*, Se-Won Kim*, Jin-Bum Kim*, You-Sung Lee*, Kyung-Hoon Kim*, Seung-hun Beak*,
Jung-Ho Lee
Hanbat National University*

Abstract - This paper describes the design process of three-phase squirrel cage induction motor. stator and rotor were modelled with the result obtained from loading distribution on the provided specification. For proving validity of the result obtained from loading distribution, through Maxwell simulator the first test target values, output and efficiency, synchronous speed and etc, were compared with the design result.

1. 서 론

최근에 에너지를 절약하는 것은 세계에서 가장 중요한 과제이다. 이처럼, 고효율의 전기 기계와 기계장치를 얻는 것은 매우 중요하다. 유도기는 공업에 매우 중요한 한 부분을 차지하고 있다. 여러 해 동안, 3상 유도전동기의 작동 시 효율의 손실을 최소화함으로써 효율을 증가 시키는 것을 목표로 많은 연구가 이루어졌다. 유도기의 설계 원리는 여러 해 동안 변하지 않았다는 데 반해 기술자의 기술과 지식은 상당히 발전되었다. 더 잘 아는 것은 전동기의 손실을 최소화하는 것에 대하여 끊임없는 연구가 수행되어왔다. 본 논문에서는 최적설계를 위하여 장하분배법을 이용하여 고정자와 회전자를 모델링하였고 그 결과를 맥스웰 시뮬레이터로 분석하여 설계의 성능 및 특성을 비교, 분석하였다.

2. 본 론

2.1 유도전동기의 설계

<표 1> 모델 사양

출력	상수	극수	주파수	전압	동기속도	효율	역률
0.75[KW]	3상	4극	60[Hz]	220[V]	1800[rpm]	74[%]	75[%]

2.2 장하의 분배

효율과 역률을 각각 효율=0.74, 역률=0.75 정도로 예상해서

$$\text{입력[KVA]} = \frac{\text{출력}}{\text{효율} \times \text{역률}} = \frac{0.75}{0.74 \times 0.75} = 1.35[\text{KVA}]$$
가 나온다.
 고정자 권선을 Δ 결선하는 것으로 하면

$$\text{상전류 } I_1 = \frac{1.35 \times 10^3}{3 \times 220} = 2.045[\text{A}]$$

$$\text{선전류 } \sqrt{3} I_1 = \sqrt{3} \times 2.045 = 3.55[\text{A}]$$

$$\text{매극의 용량 } S = \frac{\text{입력}}{P} = \frac{1.35}{4} = 0.3375[\text{KVA}]$$

$$\text{비용량 } \frac{S}{f \times 10^{-2}} = \frac{0.3375}{60 \times 10^{-2}} = 0.563$$

<표 2> 최선의 설계기준 정수

	장하분배정수 Υ	기준 자기 장하 Φ_0
동기기	1.5	$(0.25 \sim 0.35) \times 10^{-2}$
유도기	1.3	
직류기	1.5	

유도기 설계이므로 $\Upsilon=1.3$ 으로 선정해서 계산하면,

$$\chi = \frac{\Phi}{\Phi_0} = \left(\frac{S}{f \times 10^{-2}} \right)^{\frac{\Upsilon}{1+\Upsilon}} = \left(\frac{0.3375}{60 \times 10^{-2}} \right)^{0.585} = 0.715$$

장하분배정수 $v=1.4/(1+v)=1.4/2.3=0.585 = \frac{\Upsilon}{1+\Upsilon}$ 유도기 0.585

유도기 기준 자기장하 <표 1>을 참조해서 $\Phi_0 = 0.335 \times 10^{-2}$

자기장하 $\Phi = \chi \Phi_0 = 0.715 \times 0.335 \times 10^{-2} = 0.24 \times 10^{-2} [\text{Wb}]$

매상의 직렬도선수 N_{ph} 는

$$N_{ph} = \frac{E_1}{2.1 \times \Phi \times f} = \frac{220}{2.1 \times 0.24 \times 10^{-2} \times 60} = 728[\text{개}]$$

고정자의 매극 매상의 슬롯수 $q_1 = 3$ 으로 선정하면 $Pq_1 = 12$,
 전 슬롯 수 $3Pq_1 = 36$ 이 된다.

1슬롯에 넣어야 할 도선 수 $\frac{N_{ph}}{Pq_1} = \frac{728}{12} = 60.6 \approx 61$ 개

1슬롯 당 도선 수는 짝수로 해야 하므로 62개를 선정하면
 역산으로 $N_{ph} = 62 \times 12 = 744$ 개가 된다. 이것은 앞의 728보다 크므로 코
 일피치를 2슬롯분 단절로 해서 제 1슬롯에서 제 8슬롯으로 취한다. 이
 경우 단절비율 $\beta = 7/9 = 0.778$ 이 되어 단절계수 $K_p = 0.94$ 분포계수
 $K_d = 0.96$ 권선계수 $K_w = K_p \times K_d = 0.902$ 자속률 계산하면

$$\Phi = \frac{220}{2.22 \times 0.902 \times 744 \times 60} = 0.25 \times 10^{-2} [\text{Wb}]$$

<표 3> 유도전동기의 비장하

비장하	기계의 대소	소형	중형	
	전압	저압	저압	고압
전기비장하 ac		100~350	300~500	350~500
자기비장하 B_g		0.65~0.85	0.65~0.85	0.6~0.8

전기장하 AC는

$$AC = \frac{3N_{ph}I}{P} = \frac{3 \times 744 \times 2.045}{2} = 1.14 \times 10^3$$

2.3 비장하와 주요 치수

비장하와 주요 치수를 $ac = 260 [\text{AC/cm}]$, $B_g = 0.85 [\text{T}]$ 선정하면

극간격 $\tau = \frac{AC}{ac} = \frac{1140}{260} = 4.38 [\text{cm}]$

고정자 내경 $D = \frac{P\tau}{\pi} = \frac{4 \times 4.38}{\pi} = 5.58 [\text{cm}]$

$D = 8.3 [\text{cm}]$ 로 하면 $\tau = \frac{D\pi}{P} = \frac{8.3 \times \pi}{4} = 6.519 [\text{cm}]$

역산으로 $ac = 174.9$ 로 수정된다.

매극의 유효면적 $(\pi_i) = \frac{\Phi \times 10^4}{2/\pi \times B_g} = \frac{0.25 \times 10^{-2} \times 10^4}{2/\pi \times 0.85} = 46.2 [\text{cm}^2]$

철심의 유효 성층 두께 $l_i = \frac{(\pi_i)}{\tau} = \frac{46.2}{6.519} = 7.08 [\text{cm}] \approx 8 [\text{cm}]$ 선정을 $8 [\text{cm}] l_i$ 로

하면 B_g 는 $B_g = \frac{\Phi \times 10^4}{\pi_i} = 0.753 [\text{T}]$ 가 된다. 이 정도의 l_i 인 경우 덕트가 필요 없으므로 $l_1 = l = l_i = 8 [\text{cm}]$ 가 된다.

2.4 고정자 철심의 치수

고정자 전류밀도를 $\Delta_1 = 5.5[\text{A}/\text{mm}^2]$ 로 선정하면

$$\text{도선 단면적 } q_a = \frac{2.045}{5.5} = 0.372[\text{mm}^2]$$

$$\text{등근선을 사용하면 직경 } d_1 = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times q_a} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \times 0.372} = 0.69[\text{mm}]$$

직경 0.7[mm]의 에나멜 동선을 사용하는 것으로 선정하면 피막두께 0.019mm를 포함해서 절연포함 최대 완성 본 0.776mm도선 선정한다. q_a 는 역산으로 0.473[mm²]이 되고 마찬가지로 $\Delta_1 = 4.32[\text{A}/\text{mm}^2]$ 이 된다.

슬롯내동선의 총 단면적은 피복을 포함해서

$$62 \times \frac{\pi}{4} \times 0.776^2 = 29.32[\text{mm}^2] \text{이 되므로,}$$

슬롯단면적=동선의 총 단면적/점적률 이므로 점적률은 52.36%가 된다. 여기서 고정자 슬롯 단면적은 위 식으로 구하면 고정자 슬롯 단면적 = 29.32/52.36 = 56[mm²]가 된다

계철부분의 자속밀도를 $B_{c1} = 1.4[\text{T}]$ 로 우선 선정하면

$$(h_{c1}l) = \frac{\Phi \times 10^4}{2 \times 0.97 \times B_{c1}} = \frac{0.24 \times 10^{-2} \times 10^4}{2 \times 0.97 \times 1.4} = 8.84[\text{cm}] \text{가 나온다.}$$

$$l = 8[\text{cm}] \text{로 선정하면 역산으로 } B_{c1} = \frac{0.24 \times 10^2}{2 \times 0.97 \times 8} = 1.55[\text{T}] \text{가 된다.}$$

그리고 $h_{c1} = 1[\text{cm}]$, $h_{t1} = 1.6[\text{cm}]$ 로 선정하면 고정자철심의 경

$$D_e = D + (h_{t1} + h_{c1}) = 8.3 + 2(1 + 1.6) = 13.5[\text{cm}]$$

2.5 공극의 길이

공극의 길이는 짧을수록 특성이 좋지만 우리는 일단 $C = 0.08$ 로 선정하여 앞에서 구한 전기 장하 $AC = 1140$ 고정자의 자속밀도 $B_g = 0.753$ 를 이용하여 공극을 계산하면

$$\delta = 0.08 \times 10^{-4} \times \frac{1.4 \times 10^3}{0.753} = 0.0148[\text{cm}] \approx 0.15[\text{mm}] \text{ 나오므로 공극은}$$

$$\delta = 0.15[\text{mm}] \text{로 선정한다.}$$

2.6 농형회로의 전류

도봉에 흐르는 전류 I_b 는 1쌍의 자극의 간격 2τ 를 1주기로 하는 정현파 형태로 분포하므로, 회전자의 슬롯수를 Z_2 라고 하면, 상수가 직렬도 채수가 되어, 회전자 전체에서는 P/2개만큼 같은 상태가 반복되므로, 1상에서는 P/2개의 병렬회로가 있는 것으로 생각할 수가 있다.

회전자 도봉의 전류 I_b 는 권선형의 경우와 같이 2차 입력의 (1-S)배가 기계적 출력과 같다는 관계에서 구할 수가 있다. 농형 회전자의 경우에는 앞에서 다른 바와 같은 방법에 따라, 정지시 도봉의 유기전압을 E_b 라고 하면

$$2\text{차 입력} = \frac{Z_2}{P/2} E_b \times I_b \times \frac{P}{2} \times \cos\Phi_2 \text{ 이므로 출력} = (1-S) Z_2 E_b \cos\Phi_2 \text{이}$$

된다. 보통의 경우 $(1-S)\cos\Phi_2 \approx 0.9$ 로 볼 수 있으므로

도봉의 유기전압 E_b

$$E_b = \frac{E_1}{k_w N_{ph}} = \frac{220}{0.902 \times 744} = 0.327[\text{V}] \text{가 나오게 된다.}$$

회전자 슬롯수를 $Z_2 = 36$ 로 선정하면

$$I_b = \frac{\text{출력}}{0.9 \times Z_2 E_b} = \frac{0.75 \times 10^3}{0.9 \times 36 \times 0.327} = 70.8[\text{A}] \text{가 나온다.}$$

$$\text{엔드링 전류 } I_r = \frac{44}{P \times \pi} \times I_b = \frac{36}{4 \times \pi} \times 70.8 = 202.82[\text{A}]$$

농형 회전자 도봉의 전류밀도는 소형 농형 유도전동기이므로 알루미늄을 도체로 사용하는 것으로 하여 $\Delta_b = 3.3[\text{A}/\text{mm}^2]$ 로 선정해서 계산하면

$$\text{도봉의 단면적은 } q_b = \frac{I_b}{\Delta_b} = \frac{70.8}{3.3} = 21.4[\text{mm}^2]$$

엔드링의 전류밀도 $\Delta_r = 3[\text{A}/\text{mm}^2]$ 로 선정하면

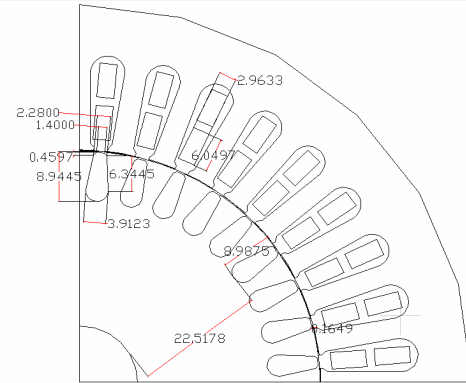
$$\text{엔드링의 단면적은 } q_r = \frac{I_r}{\Delta_r} = \frac{202.82}{3} = 67.8[\text{mm}^2] \text{가 나온다.}$$

회전자 철심의 내경을 1.9[cm]라 하면

$$\begin{aligned} \text{계철부 높이 } h_{c2} &= \frac{D - D_t}{2} - (\delta + ht_2) \quad h_{t2} = 0.9[\text{cm}] \text{라 한다.} \\ &= \frac{8.3 - 2}{2} - (0.015 + 0.9) = 2.235[\text{cm}] \end{aligned}$$

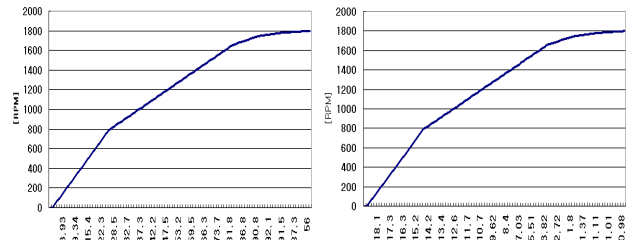
$$\text{자속밀도 } B_{c2} = \frac{\Phi/2}{0.97 \times hc_2} \times 10^4 = \frac{0.25 \times 10^{-2} \times 10^4}{2 \times 0.97 \times 2.235 \times 10} = 0.577[\text{T}] \text{가}$$

되므로 포화할 염려는 없다.



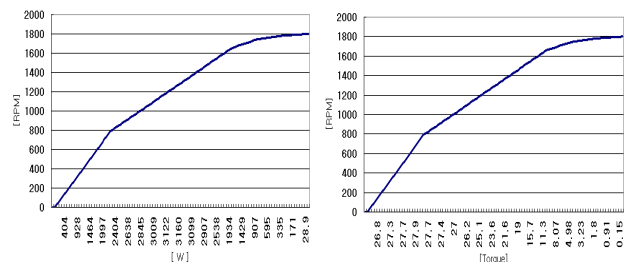
<그림 1> 3상유도기 도면

시뮬레이션 결과



<그림2> 효율과 동기속도

<그림3> 출력과 동기속도



<그림4> 입력전류와 동기속도

<그림5> 출력토크와 동기속도

3. 결 론

본 논문에서는 일반적인 3상 농형유도전동기의 슬롯과는 다른 형상의 슬롯의 운전특성을 해석하였다. 0.7kW급의 3상 유도전동기를 장하분배법을 이용하여 설계하였다. 독립변수로서는 극간격, 철심 적층폭, 공극, 슬롯폭과 슬롯피치의 비, 2차 도체판의 두께로 택하였다.

이로부터 결정된 고정자와 회전자와의 기본형상과 도봉의 단면적을 유지하되, 회전자는 슬롯 형상을 일반적인 농형 슬롯과 달리 슬롯의 끝단을 타원형 모양으로 설계하여 시뮬레이션 결과 처음에 목적인 15% 이상 향상됨을 알 수 있었다. 제시된 설계 및 해석 방법을 이용하여 부하시스템에 적합한 고정자와 회전자 형태를 설계할 수 있을 것으로 사려된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 竹内壽太郎 著, 元鍾洙 譯, "(大學課程)電機設計學", pp. 144-161, 1994
- [2] Gyu-Tak kim, Gyu-Hong Kang, Tae-Hee Choi, "Optimal Design of Industrial Linear Induction Motor by Loading Distribution and SUMT Method", THE TRANSACTIONS OF THE KOREAN INSTITUTE OF ELECTRICAL ENGINEERS, VOL.42 NO.11, 1993