

비직교 권선 분포를 갖는 단상유도전동기의 해석 및 설계

최 명현, 김 병택

국립 군산대학교 공과대학 전자정보공학부

Design and Analysis of a Single-phase Induction Motor with Windings in Space Non-quadrature

Myoung-Hyun Choi and Byung-Taek Kim

Dept. of Electrical Eng., Kunsan National University

Abstract - 본 논문에서는 일반적인 단상유도기의 권선 배치를 가지는 경우, 즉 주권선과 보조권선의 배치가 임의의 각을 가지는 경우에 대하여 등가회로를 구성하였다. 이때, 등가회로를 이용하여 최적 효율 확보 방법으로 평형 운전 및 고정자 동손 최소화를 적용하였다. 설계된 전동기에 대해 2차원 유한요소해석을 수행함으로써 비직교 권선 분포 설계 시 자기적 평형상태와 이로 인한 철손 및 회전자 저항손 저감 및 효율 개선 효과를 검증하였다.

1. 서 론

단상 유도전동기는 상용전원을 직접 사용할 수 있다는 장점이 있어 냉장고, 에어컨, 선풍기 등과 같은 가전기기에 널리 사용되고 있다. 이 중 냉장고와 같이 상시 운전하는 시스템에서는 고효율화가 매우 중요하다 [1], [2].

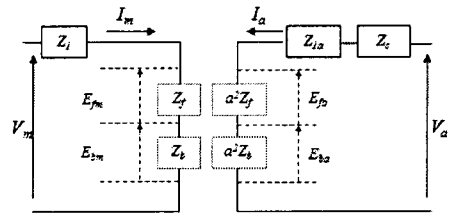
일반적으로 단상 유도전동기의 권선은 기동토크를 향상시키기 위해서 주권선과 보조권선으로 나뉘고 두 권선의 임피던스를 다르게 설계하며, 경우에 따라 콘덴서를 추가로 연결시킨다. 이 때 1개의 전원으로 부터 공급되는 두 권선의 전류는 크기와 위상의 관점에서 불평형 상태이며 공극에서 타원 자계를 형성한다. 이 타원자계는 순방향과 역방향의 자계로 나눌 수 있으며, 이중 역방향 자계는 효율, 소음, 진동 등을 악화 시키는 역할을 한다. 따라서 불필요한 역방향 자계를 제거할 수 있다면 전동기의 자계는 평형운전상태가 되며 효율을 개선시킬 수 있다. 평형운전 조건은 이미 G.Veinott에 의해 제시된 바 있다[3], [4].

본 논문에서는 주권선과 보조권선의 배치가 직교인 경우를 포함하여 임의의 배치를 갖는 경우에 대해 특성을 분석할 수 있도록 등가회로를 구성하였다. 그리고 최적의 효율을 확보할 수 있도록 평형운전 및 고정자 동손 최소화 조건을 적용했다. 제시된 조건에 만족 여부를 확인하기 위하여 2차원 유한요소해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 자기적 평형 상태로 인한 토크 맥동과 철손의 감소, 그리고 2차 동손의 저감 효과를 볼 수 있었으며, 효율 개선 효과를 확인할 수 있었다.

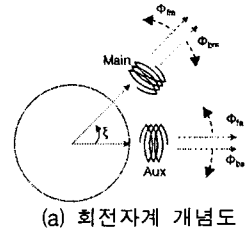
2. 단상 유도전동기 해석 및 설계 방법

2.1 비 직교권선을 갖는 경우의 등가회로 구성

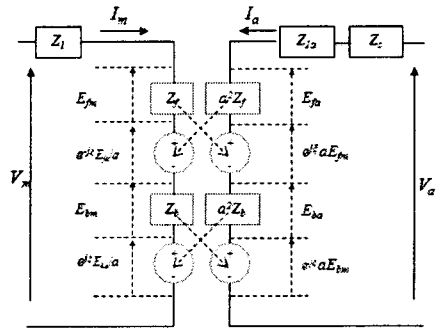
단상유도전동기의 등가회로는 revolving field 이론으로부터 전개될 수 있으며, 주권선과 보조권선 독립적으로 운전되는 경우라면, 각각의 회로는 그림 1과 같이 표현될 수 있다 [2]. 여기서 보조권선 회로의 임피던스는 고정자 권선의 임피던스를 기준으로 권수비 a 를 가지는 것을 가정하였다. 반면 두 권선이 하나의 고정자에 그림 2(a)와 같이 공간적 배치를 가지면서 존재한다면 각각의 권선으로부터 발생한 자계는 서로 영향을 미치게 된다.



(a)주권선 등가회로 (b)보조권선 등가회로
그림 1. 단상유도전동기 등가회로(주, 보조권선이 독립일 때)



(a) 회전자계 개념도



(b) 등가회로

그림 2. 주, 보조권선이 임의의 배치를 가질 때 회전자계 및 등가회로

즉, 주권선과 보조권선에 의한 교번 기자력으로부터 발생한 양방향 자계를 각각 ϕ_{fm} , ϕ_{fa} , ϕ_{bm} , ϕ_{ba} 로 표현한다면, 주권선에 보조권선 양방향 자속에 의한 전압이 유도되며, 마찬가지로 보조권선에 주권선 양방향 자속에 의한 전압이 유도된다. 이를 정성적으로 설명하면, 보조권선의 순방향전압 E_{fa} 는 크기는 $1/a$ 이며 위상은 ξ 만큼 뒤서는 전압을 주권선에 유도시키며, 또한 보조권선의 역방향전압 E_{ba} 는 크기는 $1/a$ 이나 위상은 ξ 만큼 앞서는 주권선에 유도시킨다. 같은 논리로 고정자의 양방향자속으로부터 유도되는 회전자전압을 유추할 수 있다. 이로부터 유도된 단상유도전동기의 등가회로를 그림 2에 나

타내었으며, 권선배치가 ξ 가 90일 때, 이미 알고 있는 기존의 등가회로와 동일하게 된다.

따라서 주권선과 보조권선의 배치가 임의의 각 ξ 를 가질 때, 전동기의 특성을 그림 2의 등가회로로부터 계산할 수 있으며 전류는 다음과 같이 표현된다.

$$I_m = V \frac{Z_{T\alpha} - a(e^{j\xi}Z_f + e^{-j\xi}Z_b)}{Z_{Tm}Z_{T\alpha} - a^2(Z_f^2 + Z_b^2 + e^{j2\xi}Z_fZ_b + e^{-j2\xi}Z_fZ_b)} \quad (1-a)$$

$$I_o = V \frac{Z_{Tm} - a(e^{-j\xi}Z_f + e^{j\xi}Z_b)}{Z_{Tm}Z_{T\alpha} - a^2(Z_f^2 + Z_b^2 + e^{j2\xi}Z_fZ_b + e^{-j2\xi}Z_fZ_b)} \quad (1-b)$$

위에서 Z_{Tm} 과 $Z_{T\alpha}$ 는 (2)와 같다.

$$Z_{Tm} = Z_1 + Z_f + Z_b \quad (2-a)$$

$$Z_{T\alpha} = Z_{l\alpha} + Z_c + a^2(Z_f + Z_b) \quad (2-b)$$

기타 전동기의 토크, 손실 등의 특성은 기존의 식과 동일하며 다음과 같으며, 토크 식을 (3)에 나타내었다.

$$T = T_f - T_b \\ = [I_m^2 + (aI_o)^2](R_f - R_b) + (2aI_mI_o \sin \phi)(R_f + R_b) \quad (3)$$

2.2 평형운전 및 동손최소화 설계조건

임의의 권선배치 갖는 경우에 대한 등가회로를 이용하여, 전동기의 최적설계를 진행하였다. 기존 직교권선의 경우에 평형운전 조건을 유도함으로써 효율개선을 시도한 적이 있으나, 설계결과와 비현실성 등이 문제가 됨을 분석한바 있다 [3]. 따라서 본 논문에서는 2.1절에서 유도한 비 직교 권선의 경우를 포함하여, 즉 임의의 권선각에 대해 평형운전조건을 만족시키도록 하는 경우, 전동기 최적설계결과를 살펴기로 하였다. 평행운전이란 기자의 크기가 같고, 위상이 서로 90°의 차이를 가질 때를 말하며, 이때 backward성분은 상쇄된다. 그림 3과 같이 주권선과 보조권선이 ξ 의 공간적 배치를 가질 때, 주권선과 보조권선의 기자력을 각각 $n_m \vec{I}_m$, $n_a \vec{I}_a$ 라고 하면, x축 성분과 y축 성분을 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

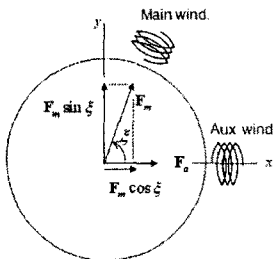


그림 3. 비 직교 권선의 경우 평형운전조건

$$\vec{F}_x = n_a \vec{I}_a + n_m \vec{I}_m \cos \xi \quad (4-a)$$

$$\vec{F}_y = n_m \vec{I}_m \sin \xi \quad (4-b)$$

x축과 y축 두 성분이 평형운전조건을 만족하기 위해서는 (5)를 만족해야 한다.

$$\vec{F}_y = -j\vec{F}_x \quad (5)$$

식 (4)로부터 권선 배치가 비직교일 때의 평형운전조건을 얻을 수 있으며, 이로부터 (6)을 도출할 수 있다.

$$\vec{I}_m = -a\vec{I}_a e^{j\xi} \quad (6)$$

식 (1)을 (6)에 대입하면 평형운전 조건을 만족하는 보조권선의 임피던스를 도출할 수 있으며, 다음과 같다.

$$R_o = -a^2(1 - \cos 2\xi)R_f + X_f(2a \sin \xi - a^2 \sin 2\xi) - a(R_l \cos \xi - X_l \sin \xi) \quad (7-a)$$

$$X_o = -a^2(1 - \cos 2\xi)X_f - R_f(2a \sin \xi - a^2 \sin 2\xi) - a(R_l \sin \xi + X_l \cos \xi) - X_{l\alpha} \quad (7-b)$$

평형운전은 불필요한 역방향 자계가 사라짐을 의미한다. 즉, 최소의 회전자 손실이 발생됨을 의미한다. 그러나 이때, 고정자의 동손이 고려되지 않았으므로 고효율 설계를 위해서는 고정자 동손을 최소화할 필요가 있다. 우선 (6)의 조건을 만족한다면, 고정자 동손을 최소화하기 위한 조건은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$W_{CS} = R_l I_m^2 + R_{l\alpha} I_o^2 = I_o^2 (R_l a^2 + R_{l\alpha}) \\ = I_o^2 \frac{L}{\sigma} a n_m n_a S_{tot} \left[-\left(S_m - \frac{S_{tot}}{2} \right)^2 + \left(\frac{S_{tot}}{2} \right)^2 \right] \quad (8)$$

여기서 권선저항은 R_l 과 $R_{l\alpha}$ 로 나타낼 수 있으며, 이것은 다시 권수비, 권선의 수, 도선의 단면적, 그리고 도선의 길이로 표현된다. 이때 S_{tot} 는 도선의 총 단면적이고, S_m 과 S_a 는 각각 주·권선과 보조권선 도선의 단면적을 나타낸다. 식(8)에서 동손을 최소화하기 위해서는 분모가 최대가 되어야 하므로 두 권선의 점유면적이 동일해야 함을 알 수 있다. 따라서, 두 권선들에 대한 저항 조건을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{l\alpha} = a^2 R_l \quad (9)$$

2.3 단상 유도전동기의 설계

표 1. 기존 모델과 최적설계 모델 사양 비교

구분	기존모델	최적화 모델
주권선 유효턴수	1	1.04
보조권선 유효턴수	1	1.05
회전자 저항	1	0.98
콘덴서용량	12 [μF]	17 [μF]
주·보조권선 배치	90°	77.14°

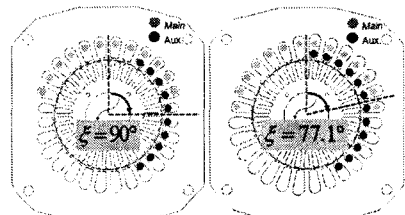


그림 4. 기존모델과 최적설계 모델의 비교

단상유도전동기의 설계를 위해 제시한 두 가지 조건과 최적설계알고리즘을 사용하여 최적치를 찾을 수 있었다. 이때 최적결과를 비교하기 위한 초기 데이터로 기존 상용 단상유도전동기를 선택하였다. 기존 모델과 재료 사용량을 동일하게 하기 위하여 총 슬롯면적을 동일하게 하는 제약조건을 주고, 주권선과 보조권선의 턴수 및 권선의 배치 각을 변수로 하여 변수의 다양한 변화에 따라 평형운전과 동손 최소화를 만족하는 설계조건을 찾았으

며 이중 최적의 설계안을 결정하였다. 설계결과를 표 1과 그림 4에 나타내었다. 표 1의 각 항목은 기존 모델 사양의 값을 1로 할 때의 비율로 표시하였다. 주목할 것은 그림과 표에 제시한 바와 같이 최적 설계 모델의 경우 주권선과 보조권선의 공간각이 77.14°로 일반적인 경우와 다른 배치를 가짐을 알 수 있다.

2.4 기존모델과 최적설계모델의 유한요소 해석비교

설계모델의 개선효과를 검증하기 기존모델과 최적설계된 모델에 대해 시간차분 유한요소해석을 수행하였으며, 전류, 토크, 손실 및 효율특성 등을 그림 5~7에 나타내었다. 그림 5는 두 권선에 흐르는 전류특성을 나타내며 이로부터 기자력분포를 예측할 수 있다. 즉 기존 모델의 경우 기자력의 불평형 상태가 매우 심한 반면, 최적설계모델의 경우, 평형상태에 매우 근접하게 운전되고 있음을 알 수 있다. 즉, 기존 모델의 경우 주권선 전류의 크기가 상이하며 위상이 권선 배치각과 90°와 상이하다는 것을 알 수 있고, 최적 설계 모델의 경우 주권선과 보조권선 전류의 크기가 기존모델에 비해 평형상태에 근접하며, 위상 또한 권선 배치각 77°와 상호 보완적인 관계가 되어 평형상태에 근접한 것을 볼 수 있다. 그림 6.a의 토크맥스에서 실제로 나타남을 보여준다. 기존 모델의 토크맥동의 크기가 0.5Nm이상인데 반해, 제안된 모델의 토크맥동은 0.15Nm로 매우 저감되었다. 또한 평형 운전에 의한 결과는 그림 6.b의 회전자의 저항손에서도 잘 나타난다. 토크는 고정자와 회전자전류의 상호작용에 의해 나타나게 되므로 토크맥동이 큰 경우가 회전자 전류 및 저항손이 크게 되므로 설계된 전동기의 경우, 회전자손실이 저감됨을 알 수 있다. 마지막으로 두 전동기의 효율을 그림 7로부터 알 수 있으며 약 1%의 효율개선이 발생하였으며, 설계결과와 유용성을 나타낸다.

3. 결론

본 논문에서는 주권선과 보조권선이 임의의 배치를 가질 경우에 대해 특성을 분석할 수 있는 등가회로를 구성하였다. 그리고 이를 이용하여 평형운전 및 고정자 동손 최소화 조건을 적용하여 최적설계를 수행하였다. 특성 해석은 시간차분 유한요소법을 이용하였으며, 해석결과로부터 평형 운전에 의해 발생하는 토크 리플 및 회전자 저항손실 저감효과를 확인하였다. 본 연구에서 제시한 설계방법이 단상유도전동기의 고 효율화에 크게 도움이 될 것으로 사료된다.

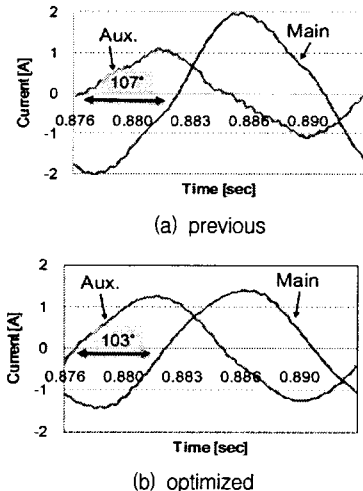
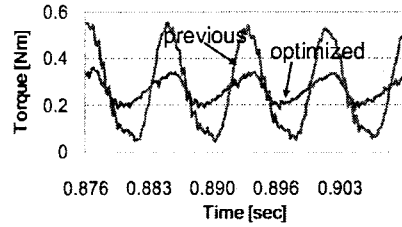
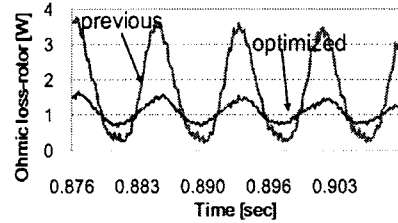


그림 5. 기존 모델과 최적화 모델 전류 비교



(a) 토크리플 비교



(b) 회전자 저항손 비교

그림 6. 기존 모델과 최적설계 모델의 토크 및 회전자 저항손실 비교

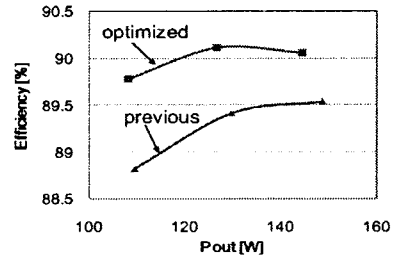


그림 7. 기존 모델과 최적설계 모델의 효율 비교

감사의 글

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

[참고 문헌]

- [1] 이성근, "산업부문의 고효율유도전동기 보급실태 조사 및 활성화 방안 연구", 에너지경제 연구원, 2003. 12.
- [2] Aldo Boglietti, Andrea Cavagnino, Luca Ferraris, Mario Lazzari, and Giorgio Luparia, "No Tooling Cost Process for Induction Motors Energy Efficiency Improvements", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol.41, No.3, pp808-816, 2005.
- [3] Cyril G.Veinott, *Theory and design of small induction motors*, McGRAW-HILL, pp207-215, 1959.
- [4] P. H. Trickey. "Design of capacitor motors for balanced operation" *Transactions of the AIEE*, Vol.51, No.3 pp780-785, 1932.
- [5] 백수황 외 2, "단상 유도전동기의 고정자 동손 최소화를 위한 설계 방법", *전기학회논문지*, 제 57권 제 9호, pp.1536-1545, 2008.