

평형운전에 기초한 단상 유도전동기의 실용적인 설계

백수황*, 김병택**, 권병일*
*한양대학교, **군산대학교

Practical Optimum Design of Single-phase Induction Motor
Based on Balanced Operation Theory

Soo Whang Baek*, Byung Taek Kim**, Byung Il Kwon*
*Hanyang University, **Kunsan University

Abstract - In this paper, we research improvement in efficiency of single-phase induction motor by adapting the condition of the balanced and quasi-balanced operation. we maintain turns of auxiliary winding of the motor and adjust resistance and reactance. In this condition, resistance value and copper loss are much greater. Namely, this is the condition only for balancing MMF without consideration of copper loss of stator winding. To make more practical design, therefore, we will perform winding design which is based on balanced operation condition and applies copper loss minimum. The problem of deterioration of starting torque is completed by rotor bar shape design.

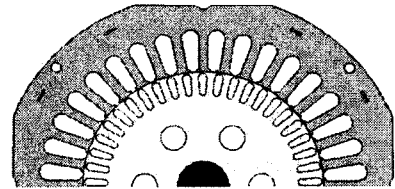


그림 1 기본모델 단상 유도전동기의 단면형상

표 1 단상 유도전동기 기본모델 사양

정격출력	750[W]	주파수	60[Hz]
정격전압	220[V]	극수	6
적층길이	100[mm]	공극길이	0.35[mm]
정동토크	10.288[Nm]	기동토크	1.397[Nm]
정적토크	6.184[Nm]	정적효율	79.3[%]

1. 서 론

단상 유도전동기는 일반적으로 가전기기 및 산업용 시스템에 주로 사용된다. 최근 유가의 상승과 에너지자원의 부족으로 인하여 가전기기 및 산업용 기기의 고효율화가 중요한 부분을 차지하고 있으며, 고효율 제품에 대한 여러 가지 규제 및 장려 정책을 통하여 고효율 제품 사용을 권장하므로 단상 유도전동기의 고효율화가 필수적이다. 단상 유도전동기에서 발생하는 자계는 순방향성분과 역방향성분을 동시에 갖는다. 이 때 역방향 회전자계는 역방향 전류 및 역방향출력을 발생시켜 효율을 저하시킨다. 단상 유도전동기의 효율개선을 위한 방안으로는 평형운전조건을 적용하여 운전하였을 때 효율에 악영향을 끼치는 역방향기자력 성분을 제거하고, 고정자의 동손도 저감시킬 수 있으므로 효율개선을 기대할 수 있다[1].

단상 유도전동기의 운전조건에 따라서 평형운전조건(Balanced Operation)[2]과 준 평형운전조건(Quasi-balanced Operation)[3]을 적용하여 효율 개선 설계를 수행한다. 농형유도전동기의 등가회로 해석 시에는 정확한 회로정수의 추출이 필수적이므로 Ladder-type network를 적용하여 기동토크의 개선을 위한 회전자 바의 형상을 결정한다[4-6].

본 논문에서는 효율 개선적인 측면에서 고정자 동손 최소화 설계를 수행하였고, 단상 유도전동기의 중요한 특성인 기동토크를 개선하기 위하여 Ladder-type network를 통하여 기동토크의 개선이 가능한 새로운 회전자 바의 형상을 설계 한다.

2. 단상 유도전동기의 고정자 동손최소화 설계

본 논문에서 사용한 단상 유도전동기의 형상은 그림 1과 같으며 사양은 표 1에 나타내었다.

2.1 평형운전조건과 준 평형운전조건

단상 유도전동기의 구조는, 주권선과 보조권선의 임피던스를 인위적으로 다르게 하여 전류의 위상차를 발생시키며, 이로 인해 토크를 유도한다. 이와 같은 구조적 특징 때문에, 단상 유도전동기의 주권선과 보조권선전류의 비와 위상차는 전동기 속도에 따라 변하며, 이 같은 특성이 단상 유도전동기 설계를 매우 어렵게 한다. 즉, 전동기의 효율향상을 위해서는 정격운전 점에서 평형운전조건을 적용하여 주권선과 보조권선의 기자력의 비를 같게 하고 위상차가 90도가 되도록 권선 및 콘덴서를 설계하는 것이 유리하다. 하지만, 실제로 이 경우에 기동시의 기자력 비와 위상차는 오히려 심한 차이가 발생하여 기동성능이 악화되는 현상이 발생한다. 이상적(ideal)인 평형운전조건을 구현하기 위해서는 현실적 문제점이 발생하므로 제약조건을 완화 할 필요가 있다. 따라서 보조권선의 저항을 실현가능한 수준으로 결정 한 뒤, 기자력의 크기만을 같게 하는 조건을 생각할 수 있다. 즉, 주권선과 보조권선의 기자력의 크기가 같으므로 이를 식(1)로 표현할 수 있다.

$$|\bar{I}_m| = a |\bar{I}_o| \tag{1}$$

여기서, a 는 주권선과 보조권선의 유효권수비이며, 식(1)을 준 평형운전조건이라 하기로 한다.

2.2 고정자 동손 최소화 설계

주-보조권선의 기자력 크기를 동일하게 하는 준 평형운전을 만족하는 경우, 고정자 권선에서 발생하는 동손을 식(2), 식(3)으로 표현할 수 있다.

$$W_{CS} = R_m I_m^2 + R_o I_o^2 = R_m a^2 I_o^2 + R_o I_o^2 = I_o^2 (R_m a^2 + R_o) \tag{2}$$

$$W_{CS} = I_a^2 \frac{l_c}{\sigma} a n_m n_a f_{slot} \left(\frac{1}{-\left(S_m - \frac{S_{tot}}{2}\right)^2 + \left(\frac{S_{tot}}{2}\right)^2} \right) \quad (3)$$

여기서, l 는 권선의 도선율, l_c 는 도체의 길이, n_m , n_a 는 주권선과 보조권선의 총 권수, f_{slot} 은 슬롯내 도체의 점유율, S_m 은 주권선 슬롯점유면적, 그리고 S_{tot} 은 주권선과 보조권선의 슬롯점유면적의 합이다.

식 (3)을 최소화하기 위해서는 괄호안의 분모항이 최대가 되어야하므로, 식 (4)의 조건을 만족해야 한다.

$$S_m - \frac{S_{tot}}{2} = 0 \quad (4)$$

식 (4)로부터 보조권선의 저항을 주권선저항의 함수로 표현가능하며, 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 이는 고정자 동손을 최소화하는 준 평형운전조건이 된다.

$$R_a = \frac{n_a l_c}{\sigma q_a} = a^2 \frac{n_m l_c}{\sigma q_m} \quad (5)$$

$$= a^2 R_m$$

여기서 q_m , q_a 는 주, 보조권선의 선경이다. 즉, 준 평형운전 시 고정자 권선에서 발생하는 동손을 최소화하기 위해서는 주권선과 보조권선의 슬롯 점유면적이 동일해야 함을 의미한다. 표 2는 기본모델과 고정자 동손 최소화 설계를 통하여 얻어진 설계모델의 세부 사양과 특성비교를 나타낸다.

표 2 기본모델과 고정자 동손 최소화 설계를 통한 모델의 세부사양 및 특성 비교

		기본모델	고정자 동손 최소화 설계 모델
선경	주권선	φ0.85	φ0.95
	보조권선	φ0.75	φ0.85
턴수	주권선	50/25/0	50/25/0
	보조권선	0/32/65	0/31/63
운전커패시터		22[uF]	22[uF]
엔드링 길이/높이		14.5/7.0[mm]	14.5/7.0[mm]
정격효율		79.3[%]	80.8[%]
기동토크		1.397[Nm]	1.276[Nm]
정동토크		10.288[Nm]	10.634[Nm]

위 두 모델의 정격효율을 비교하면, 동손 최소화모델의 효율 값이 기존모델의 효율 값보다 크게 나타나고 있다. 이러한 결과의 원인으로서는 준 평형운전조건을 적용하여 주권선과 보조권선의 기자력의 크기를 같게 하고, 각각의 슬롯 점유면적을 동일하게 하여 역방향 자계성분을 제거하여 고정자 동손의 최소화를 이루게 되어 효율이 증가하였기 때문이다.

두 모델의 토크특성 비교 또한 고정자 동손 최소화모델의 경우 준 평형운전조건을 적용하여 역방향 자계성분으로 인한 역방향 토크성분 발생이 제거되었기 때문에 기존모델보다 고정자 동손 최소화모델의 토크 값이 전반적으로 크게 나타나지만 기동부분에서의 토크의 저하가 발생한다.

3. 기동특성 개선을 위한 회전자 바 형상설계

고정자 동손 최소화 설계를 통하여 단상 유도전동기의 효율개선이 가능함을 확인하였으나 약간의 기동토크 저하가 발생했다. 정격운전점에서 개선된 효율을 유지하면서 기본모델의 기동토크를 회복하는 것을 목표로 한다. 이를 위해서 고정자 동손 최소화 설계모델에 추가적

으로 기동특성 개선을 위한 회전자 바 형상을 개선하기 위해 Ladder-type network를 적용하여 새로운 회전자 바의 형상을 결정한다.

농형유도전동기 모델의 등가회로 해석 시에는 정확한 회로정수의 추출이 필수적이다. 회로정수는 크게 1차측과 2차측의 저항과 누설인덕턴스 성분들로 구성된다. 누설 인덕턴스는 1, 2차측을 동시에 쇄교 하지 못하는 누설자속에 의한 것으로서 코일끝단(End turn)에서의 누설, 엔드링(End-ring)에서의 누설, 스큐(Skew)에 의한 누설, 지그재그(Zigzag)누설로 분류할 수 있다. 농형유도전동기는 운전상태에 따라 회전자 슬롯의 포화 및 도체의 표피효과와 같은 현상이 매우 심하게 발생하므로, 회전자의 회로정수 예측이 어렵다. 특히 이러한 현상들은 회전자 바 저항과 슬롯 인덕턴스에 큰 영향을 미치게 된다.

본 논문에서 사용한 Ladder-type network기법은 등가회로해석법의 일종으로서 전동기의 회전자 구조를 기하학적으로 간이화하고 회전자 회로정수의 예측을 위해 회전자 바의 높이를 표피효과의 영향을 받지 않는 충분한 길이로 결정한 다음, 임의의 각층으로 나누어 각층에 해당하는 직병렬 등가회로로 간단하게 모델링 하며, 각층에 해당하는 회전자 바의 저항과 인덕턴스 성분을 계산하는 방법이며, 해석시간이 매우 짧은 장점이 있다.

그림 2는 기본모델의 회전자 바의 형상과 Ladder-type network기법을 이용하여 회전자 회로정수를 구하기 위한 여러 층으로 나눈 회전자 바의 분할도를 보여주고 있다.



(a) 회전자 바 (b) 회전자 바의 분할도
그림 2 회전자 바의 형상과 분할도

그림 2.(b)에서처럼 일정한 높이를 가지며, 9층으로 나눈 회전자 바 요소들을 각 층들에서의 저항과 인덕턴스를 직병렬회로로 구성하여 만들어진 Ladder-type network 등가회로를 그림 3에 나타내었다.

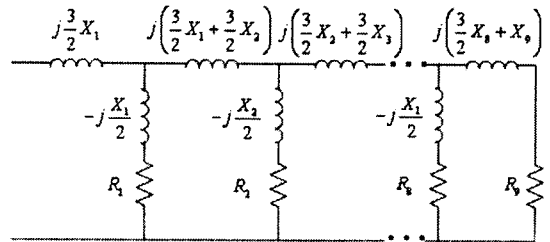


그림 3 Ladder-type network으로 나타난 회전자 바의 등가회로

그림 4는 본 논문에서 수행한 단상 유도전동기의 설계 과정이다. 먼저 회전자 바의 각층의 높이를 선정하여 나는 다음, 기본모델로부터 얻어진 바의 치수를 이용하여 각층의 폭에 해당하는 최소경계, 최대경계를 설정하여 폭을 결정한다. Ladder-type network을 통하여 회전자 바의 회로정수 R_2 , X_2 를 추출한다. 얻어진 회로정수를 이용하여 회전자 바의 형상을 결정짓고, 준 평형운전 조건을 적용하여 단상 유도전동기의 설계를 수행한다.

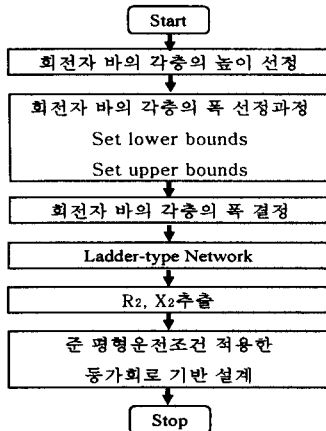


그림 4 Ladder-type network을 이용한 설계 과정

그림 5.(a)는 Ladder-type network을 적용하여 회전자 바를 20개의 층으로 나눈 것이며, 각층의 높이는 표피효과가 무시될 수 있는 정도의 0.515[mm]로 나누었다. 그림 5.(b)는 기본모델과 Ladder-type network을 적용한 모델의 기본모델대비 회전자 바의 형상변화를 보여준다. 회전자 바의 면적은 서로 동일하여야 하므로, 슬릿으로 인하여 줄어든 면적만큼 바의 길이가 아래로 길어져 deep-bar 형태로 변화하였다.

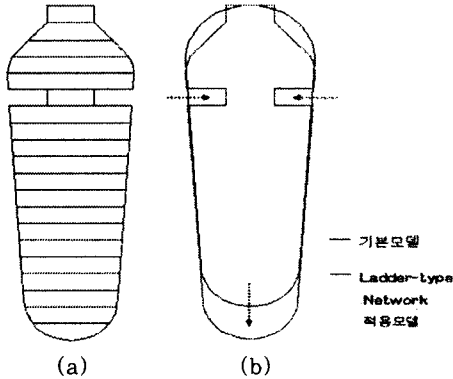


그림 5 Ladder-type network을 통한 회전자바 형상

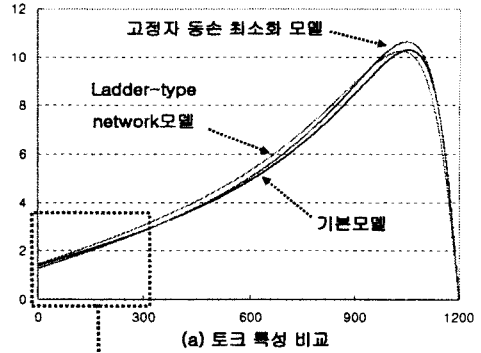
4. 해석 결과

Ladder-type network을 통하여 회전자 바의 형상이 변화하였으므로 회전자 회로정수 R_2 , X_2 또한 변하게 된다. 변경된 회전자 바를 이용하여 준 평형운전조건을 적용한 설계를 수행하였다. 표 3에는 기본모델, 고정자 동손 최소화 모델 및 Ladder-type network 모델 각각의 변화된 특성들을 보여준다. 효율은 서로 동일한 수준을 유지하는 조건으로 수행하였으며, 회로정수 R_2 의 증가로 기동토크 또한 증가함을 확인할 수 있다. 반면에 정동토크는 약간 감소하였으며 이는 회전자 누설리액턴스 X_2 의 증가로 인한 것임을 확인하였다.

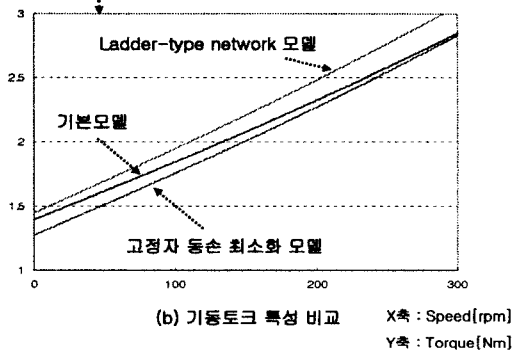
표 3 기본모델과 Ladder-type network 모델 특성비교

	기본모델	고정자 동손 최소화 모델	Ladder-type network 모델
R_2	4.18[Ω]	4.18[Ω]	4.95[Ω]
X_2	8.67[Ω]	8.67[Ω]	9.50[Ω]
정적효율	79.3[%]	80.8[%]	80.1[%]
기동토크	1.397[Nm]	1.276[Nm]	1.450[Nm]
정동토크	10.288[Nm]	10.634[Nm]	10.248[Nm]

그림 6은 위 3개의 모델의 (a)토크특성과 (b)세부적인 기동토크 특성을 비교한 그래프이다.



(a) 토크 특성 비교



(b) 기동토크 특성 비교 X축 : Speed[rpm]
Y축 : Torque[Nm]

그림 6 토크 특성 비교

5. 결 론

본 논문에서는 단상 유도전동기의 효율 개선을 위하여 고정자 동손 최소화 설계를 기반으로 준 평형운전조건을 적용하여 효율이 개선되어짐을 확인하였으며, 기동토크의 개선을 위하여 2차측 회전자 회로정수 R_2 , X_2 를 Ladder-type network을 적용하여 추출하였으며, 이를 이용하여 회전자 바의 형상을 결정하는 설계로 기동토크의 개선여부를 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 이로 인하여 제안된 설계방법이 타당하며 효율 및 기동토크가 개선되었다고 볼 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Cyril G. Veinott, "Theory and Design of Small Induction Motors", McGraw-Hill pp.447~452, 1959
- [2] P. H. Trickey, "Design of Capacitor motors for balanced operation" Transactions of the AIEE, v.51 no.3, pp.780-785, 1932
- [3] S. W. Baek, B. T. Kim, G. H. Kang, H. S. Kim and B. I. Kwon, "A Study of the Efficiency Improvement of Single-phase Induction Motor", ICEMS2006 LS4B-6, 2006
- [4] Paul. L. Cochran, "Polyphase Induction Motors", Marcel Dekker, Inc. pp.278~312, 1989
- [5] A. Arkkio, "Analys of Induction Motors Based on the Numerical Solution of the Magnetic Field and Circuit Equation", Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series, No.59, 1987
- [6] Bruges, W. E., "Evaluation and Application of Certain Ladder-type networks", IEEE trans., MAG-17, (1), pp.175-186, 1946