

단상유도전동기의 효율개선을 위한 평형운전에 관한 연구

백수황*, 김병택**, 권병일*
*한양대학교, **군산대학교

A Study on Balanced Operation for Efficiency Improvement of Single Phase Induction Motor

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

Abstract - In this paper, single phase induction motor achieved improvement in efficiency by adapting the condition of Balanced operation and Quasi-balanced operation. Also, the process of efficiency improvement to find the optimum point of secondary resistance and running capacitor for working single phase induction motor is performed in order to attain the conclusion to put out the maximum efficiency at the rated operation point with meeting the starting torque.

1. 서 론

단상 유도전동기는 가전기기 및 산업용 시스템에 주로 사용되며, 총 전력소비량 중 많은 부분을 차지하고 있으므로 가전기기 및 산업용 기기의 고효율화가 중요하게 대두되고 있다. 또한, 선진국에서는 일정 수준의 효율을 갖추지 못한 제품에 대하여 수입을 금지하고 있으며 국내에서도 고효율 제품에 대한 여러 가지 규제 및 장려 정책을 통하여 고효율 제품 사용을 권장하므로 단상 유도전동기의 고효율화가 필수적이다.

단상유도전동기는 평형운전조건으로 운전시 효율에 악 영향을 끼치는 역방향기자력 성분을 제거하고, 고정자 동손도 저감 시킬 수 있으므로 효율개선을 기대할 수 있다[1,2]. 따라서 본 논문에서는 단상유도전동기의 운전조건에 따른 평형운전과 준 평형운전조건을 적용한 특성을 해석하고, 이를 통해 기동성능을 만족하며 정격점에서의 고효율을 유지하는 최적파라미터를 산출한다.

2. 운전조건에 따른 특성

단상유도전동기의 형상은 그림 1과 같으며 사양은 표 1에 나타내었다. 농형회전자를 사용하며, 고정자 측의 권선은 동심권(concentric winding)으로 구성되어져있고, 회전자 바는 알루미늄 다이캐스팅으로 제작되었으며, 콘덴서 구동형 단상유도전동기로서 보조권선 측에는 6[uF]의 운전커패시터가 직렬로 연결되어져있다.

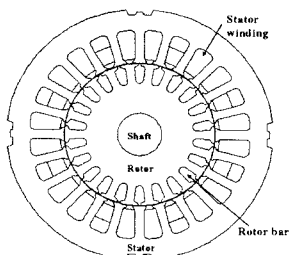


그림 1 기본모델 단상유도전동기의 단면

표 1 단상유도전동기 기본모델 사양

정격출력	90[W]	주파수	60[Hz]
정격전압	220[V]	극수	4
적극길이	65[mm]	공극길이	0.2[mm]
운전커패시터	6[uF]	정격효율	69.6[%]
정격토크	0.506[Nm]	기동토크	0.690[Nm]

2.1 평형운전시의 특성해석

단상 유도전동기에서 발생하는 자계는 순방향성분과 역방향성분을 동시에 보유한다. 이때 역방향 회전자계는 역방향 전류 및 역방향출력을 발생시켜 효율을 저하시킨다. 역방향자계가 제거된다면 전동기는 평형운전상태가 되며 이를 위한조건은 주권선과 보조권선의 전류위상차는 90도를 유지하고, 각 권선으로부터 발생하는 기자력의 크기가 동일함을 요구한다. 이를 식(1)로 나타낼 수 있으며 이는 다시 식(2)로 표현된다.

$$|\bar{I}_m| = a|\bar{I}_a|, \bar{I}_m \perp \bar{I}_a; j\bar{I}_m = a\bar{I}_a \quad (1)$$

$$j \frac{\bar{V}(\bar{Z}_{1a} + j\alpha(\bar{Z}_f - \bar{Z}_b))}{\bar{Z}_f \bar{Z}_{1a} - \alpha^2(\bar{Z}_f - \bar{Z}_b)^2} - a \frac{\bar{V}(\bar{Z}_f - j\alpha(\bar{Z}_f - \bar{Z}_b))}{\bar{Z}_f \bar{Z}_{1a} - \alpha^2(\bar{Z}_f - \bar{Z}_b)^2} = 0 \quad (2)$$

여기서 $\bar{Z}'_{1a} = R'_{1a} + jX'_{1a}, \bar{Z}_f = R_f + jX_f, \bar{Z}_1 = R_1 + jX_1$ 이므로 이를 대입하고 다시 정리하면 다음과 같다.

$$-(X'_{1a} + aR_1 + 2aR_f + 2a^2X_f) + j(R'_{1a} - aX_1 + 2a^2R_f - 2aX_f) = 0 \quad (3)$$

식 (3)은 단상유도전동기의 평형운전조건을 만족하기위한 방정식이 되며, 이 방정식을 보조권선의 부가임피던스의 R'_{1a} 와 X'_{1a} 항에 대해 적용하면 식 (4)와 (5)를 얻는다.

$$R'_{1a} = -aX_1 - 2aX_f - 2a^2R_f \quad (4)$$

$$X'_{1a} = -aR_1 - 2aR_f - 2a^2X_f \quad (5)$$

$$\bar{Z}'_{1a} = -ja\bar{Z}_1 - \bar{Z}_f(j2a + 2a^2) \quad (6)$$

즉, 보조권선의 부가임피던스가 식 (6)을 만족한다면 전동기는 평형운전상태가 된다고 볼 수 있다. 그림 2는 전동기의 평형운전조건을 만족시키는 저항성분과 리액턴스 성분을 나타낸 것이다. 이때 저항의 경우 기동 시 평형운전조건을 만족하기 위해서는 수[Ω]에 지나지 않으나 구간에 따라 음(-)의 값을 필요로 하며 또한 동기속도근방에서는 400[Ω]이상이 되는 등 일정치(constant value)가 아니므로 현실적으로는 전 속도구간에서 평형운전을 유지할 수 없게 된다. 구해진 평형운전을 위한 저항과 리액턴스를 이용하여 주-보조권선의 위상과 크기를 계산할 수 있으며 그림 (3)과 (4)에 각각 제시하였다. 이를 통해 권선전류의 위상은 속도와 무관하게 pi/2(rad)를 유지하며, 전류비는 권선비의 역수($N_a/N_m=1.04$)와 같으므로 식 (1) 처럼 기자력의 완전평형을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

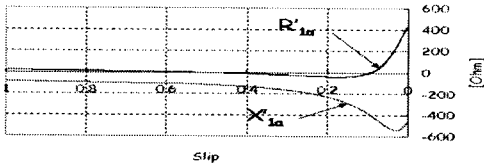


그림 2 평형운전 시 Z'_{1a}

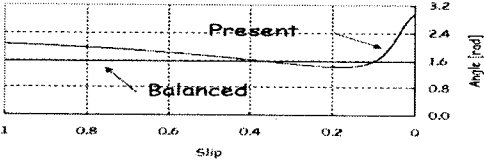


그림 3 주-보조권선전류의 위상차

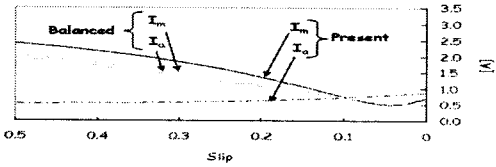


그림 4 평형운전 시 주-보조권선 전류 크기

평형운전조건을 적용하여 전동기 특성을 계산할 수 있으며 토크와 출력특성을 그림 5에 제시하였다. 평형운전시의 토크가 기존 전동기보다 기동을 포함한 전 영역에서 월등히 큰 것을 알 수 있다. 그림 6에는 전동기의 효율특성을 비교하였으며, 이는 전동기의 보조권선 권수를 유지하고 저항과 리액턴스성분을 조절함으로써 강제적으로 평형운전을 시키는 조건을 찾은 것으로서 요구 저항값은 300[Ω]근방이 되어 저항 손실이 매우 커진다. 즉 고정자 동손의 고려 없이 기자력 평형만을 위한 조건이 되어 현실적으로 불가능하거나 효율적으로 의미 없는 결과가 된다.

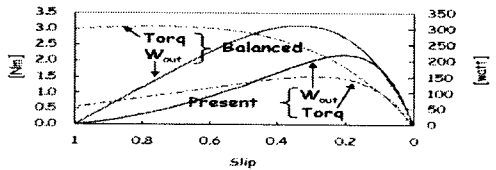


그림 5 평형운전 시 출력 및 토크 특성

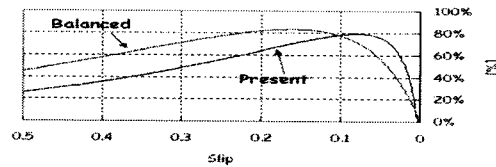


그림 6 효율 특성

2.2 준 평형운전시의 특성해석

이상적 평형운전조건을 구현하기 위해서는 현실적 문제점이 발생하므로 제약조건을 완화 할 필요가 있다. 따라서 보조권선의 저항을 실현가능한 수준으로 결정할 뒤, 기자력의 크기만을 같게 하는 조건을 생각할 수 있다. 이를 준 평형운전조건이라 하기로 하며, 다음과 같이 나타낸다. 즉 주-보조권선의 기자력의 크기가 같으므로 이를 식 (7)로 나타내고 이는 다시 식 (8)로 표현된다.

$$|I_m| = a |I_a| \quad (7)$$

보조권선의 부가임피던스는 권선의 저항과 누설리액턴

스 및 콘덴서리액턴스를 합한 값이 되며 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$|R'_{1a} + jX'_{1a} + a^2(\bar{Z}_f + \bar{Z}_s) + ja(\bar{Z}_r - \bar{Z}_s)| = |a(\bar{Z}_r + ja(\bar{Z}_f - \bar{Z}_s))| \quad (8)$$

이 때 보조권선의 저항 R'_{1a} 를 적정수준으로 결정할 수 있다면 준 평형운전조건을 만족시키는 X'_{1a} 는 식 (9)와 같이 계산된다.

$$X'_{1a} = \sqrt{a^2(\bar{Z}_r + ja(\bar{Z}_f - \bar{Z}_s))^2 - \{Re(R'_{1a} + a^2(\bar{Z}_f + \bar{Z}_s) + ja(\bar{Z}_r - \bar{Z}_s))\} - Im(a^2(\bar{Z}_f + \bar{Z}_s) + ja(\bar{Z}_f - \bar{Z}_s))} \quad (9)$$

기존 전동기에 대해 이상의 조건을 만족하는 보조권선의 부가임피던스를 계산하여 그림 7에 제시하였다. 권선의 저항은 전 속도구간에서 일정하지만, 리액턴스 값은 심하게 변동한다. 따라서 전 속도구간에서 이 같은 리액턴스 값을 갖는 콘덴서는 존재하지 않으므로 현실적으로 이를 만족시킬 수는 없다. 전류의 위상차는 90도를 만족하지 않지만 전류량의 크기는 정확히 권수비의 역수로서 양 권선에 발생시키는 기자력의 크기는 동일하게 됨을 알 수 있으며 식(7)의 준 평형운전조건을 만족한다.

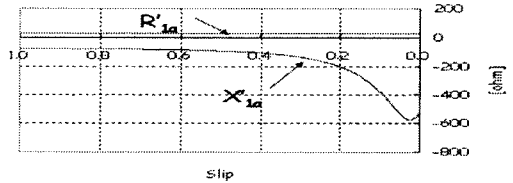


그림 7 준 평형운전을 위한 보조권선의 부가임피던스

전 속도구간에서 준 평형상태를 만족할 때, 전동기 토크특성을 계산하여 그림 8에 나타내었으며, 이로부터 평형상태와 유사하게 기존대비 월등히 우수한 토크특성을 확인할 수 있다. 그림 9는 전동기효율을 비교하였으며, 고정자 동손최소화 조건을 만족시키므로 기존 대비 약 5[%]의 효율상승을 기대할 수 있다.

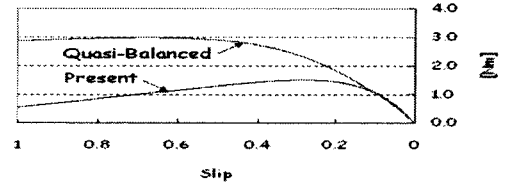


그림 8 준 평형운전 시 토크특성비교

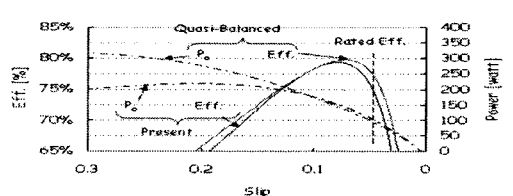


그림 9 준 평형운전 시 출력 및 효율 특성비교

이상과 같이 준 평형상태로 전동기를 운전시킬 수 있다면 효율 및 기동특성이 향상될 수 있으나 요구되는 부가리액턴스는 실제로 구현 불가능하다. 따라서 정격 운전점에서 준 평형운전이 될 수 있도록 콘덴서 용량을 정하고 전동기 특성을 다시 분석할 필요가 있다. 준 평형운전을 하기위한 콘덴서용량을 산출하면 4.64[μF]이 된다. 이 때 정격 출력 점에서는 준 평형운전 시와 동일한 효율 및 토크특성을 발생시키므로 5[%]의 효율 상승치는 유지한다고 볼 수 있다. 반면 기동을 포함한 전 속도구간에서 토크가 감소되는 문제가 발생한다.

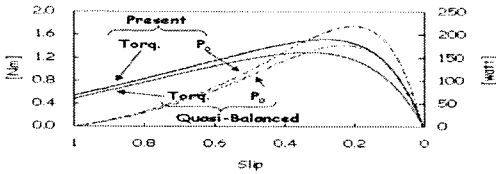


그림 10 정격 운전전 기준의 준 평형운전 시 전동기 토크 및 출력 특성

3. 기동성을 고려한 설계 방법

준 평형운전에 기인한 기동성저하는 전동기의 운전에 있어서 반드시 개선해야 한다. 기동토크에 영향을 주는 큰 변수는 식 (10)의 회전자저항 r_2 와 권수비 a 임을 알 수 있다.

$$T_{st} = 4aI_m I_s \sin \phi \cdot R_f \Big|_{s=1} \cong 2aV^2 \frac{r_2}{|Z_r| |Z_{r2}|} \sin \phi \Big|_{s=1} \quad (10)$$

기동성을 개선하기 위한 설계변수로서 회전자저항 r_2 와 권수비 a , 그리고 콘덴서용량 C_r 을 선택하기로 한다. 임의의 권수비에 대해 최적의 콘덴서용량과 회전자저항을 선정하는 방법을 먼저 결정하고 이 방법을 권수비 변화에 대해 적용함으로써 최적의 권수비와 콘덴서용량 및 회전자 저항을 선정하도록 한다. 그림 11은 준 평형운전을 위한 설계안으로부터 기동성을 만족하며 고효율을 유지하는 설계의 알고리즘이다.

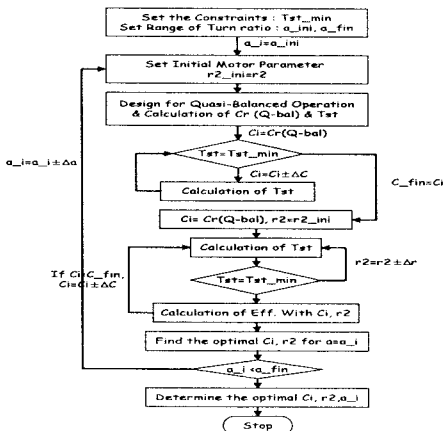


그림 11 설계 알고리즘

기본모델인 90W급 단상유도전동기의 기동토크를 제한 조건으로 효율을 극대화하는 것을 목표로 하였으며, 전동기 설계를 위해 설계 알고리즘에 제시된 설계변수 이외에 주 권선의 사양을 포함시켰다. 주 권선에 대한 보조 권선의 권선 비 a 의 범위는 0.8~1.2로 선정하여 각각의 조건에 대한 효율을 그림 12에 제시하였다. 주 권선 사양은 기존과 동일하게하며 보조권선 대 주권선의 권선 비는 1.2일 때 최대효율을 발생시킴을 알 수 있다.

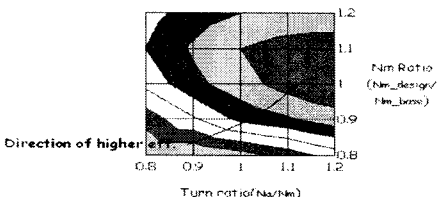


그림 12 권선 비에 대한 효율변화

그림 13에 주권선 변화율이 1일 때, 권선 비에 대한 효

율변화를 자세히 나타내었으며, 이로부터 권선비가 1.2일 때 기존동등의 기동토크를 유지하며 효율은 약 2.5% 개선 가능함을 알 수 있다. 단, 여기서 효율은 철손을 제외한 값으로 실제보다 약 6[%]가 높게 산정된 값이다.

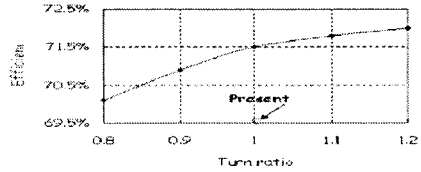


그림 13 최적 C_r , r_2 조합에 의한 효율

그림 14에 각각의 권수비에 대해 최적의 C_r , r_2 조합을 나타내었으며 권수비 1.2일 때가 최고효율을 나타내므로 콘덴서용량 C_r 은 4[μ F], r_2 는 72[Ω]로 결정한다.

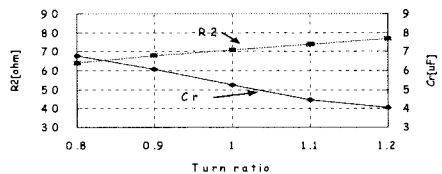


그림 14 권수비에 따른 최적의 C_r , r_2 조합

최적 설계로부터 도출된 조건을 실제 전동기에 적용하기 위해서는 실제 제품으로 사용가능한 권선경과 콘덴서 용량으로 결정하여야한다. 따라서 설계안의 일부 수정을 통해 최종 결정된 사양을 설계모델로 하였다. 결정된 전동기 사양을 표 2에 기존전동기 사양과 비교하였다.

표 2 전동기 설계 사양 비교

	기존모델	설계모델
주권선 턴수	136/68/0	150/68/0
보조권선 턴수	0/71/143	0/72/151
주/보조권선 선경	0.4/0.4[mm]	0.4/0.4[mm]
콘덴서용량	6 μ F	5 μ F
엔드링 높이/길이	1.4mm/5.6[mm]	0.7mm/5.6[mm]
효율	63.2[%]	66.3[%]

4. 결 론

본 논문에서는 단상유도전동기의 효율개선을 위하여 평형운전조건과 준 평형운전조건을 적용하여 운전하였으며 각각의 특성을 비교하였다. 그 결과 평형운전시 고정자 동손의 고려 없이 기자력 평형만을 위한 조건이 되므로 이때 얻은 효율은 현실적으로 구현하기 어렵게 된다. 따라서 보조권선의 저항을 실현가능한 수준으로 결정된 뒤, 두 권선의 기자력의 크기만을 같게 하는 준 평형운전시의 조건을 적용하였으며 이때의 정격효율은 기존모델보다 상승함을 확인할 수 있었으나 기동특성이 저하되었다. 기동성을 만족하며 효율을 최대화할 수 있는 회전자 저항 r_2 와 콘덴서 용량 C_r 을 찾아 기동토크의 제한조건을 충족시키며 효율개선의 효과를 낼 수 있는 결과를 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] Cyril G. Veinott, "Theory and Design of Small Induction Motors", McGraw-Hill pp447-452, 1959
 [2] P. H. Trickley, "Design of Capacitor motors for balanced operation" Transactions of the AIEE, v.51 no.3, pp.780-785, 1932