

구동 커패시터의 용량에 따른 단상유도전동기 출력특성에 관한 연구

*김철진, *이달은, 진용선, **최철용, **백수현
*한라대학교, (주)성신, **동국대학교

Output Characteristics of Capacitor-run type Single Phase Induction Motor considering Capacitance

Cherl-Jin Kim, Dal-Eun Lee, Yong-Sun Jin, Chul-Yong Choi, Soo-Hyun Baek
Halla Univ., Sungsin Motor, Dongguk Univ.

Abstract - Single phase induction motor is directly used usual source, it can be a source of an appliance such as mechanical fan, refrigerator, washing machine, etc. Especially capacitor-run single phase induction motor is suitable to make more inexpensive and high efficient products because it is more high efficiency, and good to start than other single phase induction motors.

Generally, voltage and current of capacitor-run single phase induction motor transfer to the part of positive phase and negative phase based on two motor theory. In this paper, we simulate the torque characteristics to capacitance variation from single phase induction motor's equivalent circuit.

Through the test using the real motor, we compare and investigate the maximum torque of run state related with capacitance and the adequacy of the converted model.

선과 보조권선의 권선분포가 같은 것으로 하고 등가적으로 변환한 것이다.

주권선의 권수 N_M 과 보조권선의 권수 N_A 로부터 권수 비 $a = \frac{N_A}{N_M}$ 를 결정하고 등가회로를 나타내면 그림1과 같이 된다.

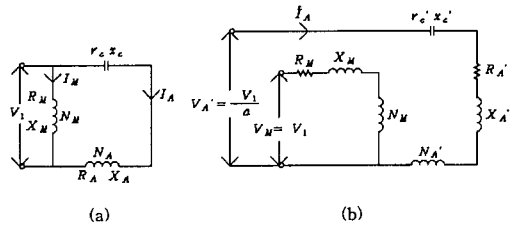


그림 1 커패시터 구동형 단상유도전동기의 등가회로변환

커패시터 구동형 단상유도전동기의 주권선과 보조권선의 임피던스는 다음 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} Z_M &= R_M + jX_M \\ Z_A' &= R_A' + jX_A' + r_c' - jx_c' \end{aligned} \quad (1)$$

전압의 대칭분을 정상분 (V_{1b}), 역상분 (V_{1n})으로 나누어 식(2)과 같이 나타낼 수 있고, 전류와 임피던스 차이와 같이 표현된다.

$$V_{1b} = \frac{V_M - jV_A'}{2}, \quad V_{1n} = \frac{V_M + jV_A'}{2} \quad (2)$$

평형 2상전동기의 정상분과 역상분전류에 대한 임피던스 Z_b, Z_n 는 식(3)과 같이 된다. 여기서 R_2'', X_2'' 는 각각 회전자 저항, 회전자 리액턴스를 의미한다.

$$\begin{aligned} Z_b &= \frac{1}{\frac{1}{jX_m'} + \frac{1}{\left(-\frac{R_2''}{s}\right) + jX_2''}} \\ Z_n &= \frac{1}{\frac{1}{jX_m'} + \frac{1}{\left(-\frac{R_2''}{-2-s}\right) + jX_2''}} \end{aligned} \quad (3)$$

그리고 평형 2상전동기에 정상분전류 I_{1b}, jI_{1b} 를 흘리려면 $I_{1b} Z_b, jI_{1b} Z_b$ 의 전압강하를 고려한 전압공급이 필요하고, 역상분전류 I_{1n}, jI_{1n} 를 흘리려면 $I_{1n} Z_n, -jI_{1n} Z_n$ 의 전압강하를 고려한 전압이 필요하다. 따라서 양 대칭분을 동시에 흘리려면, 평형 2상전동기의 주권선과 보조권선에는 각각 식(4)의 전압을 가하면 된다.

$$E_M = I_{1b} Z_b + I_{1n} Z_n, \quad E_A = jI_{1b} Z_b - jI_{1n} Z_n \quad (4)$$

1. 서 론

단상유도전동기는 세탁기, 에어컨 실내·외기, 펌프, 선풍기, 냉장고 등의 상용전원기기에 쓰이므로, 일반적으로 널리 사용되는 전동기중의 하나이지만, 3상 유도기와는 달리 구조상 회전자계를 얻지 못하는 단점이 존재한다.

그러나 단상유도전동기의 주권선과 병렬연결된 보조권선에 커패시터를 직렬로 연결함으로써 보조권선 전류의 위상이 진상으로 앞서게되어 전동기의 기동이 가능하며, 기동후 시간의 경과에 따라 맥동하는 자계를 발생하고 이 자계에 의해 지속적인 토크를 발생시킬 수 있게된다.

단상유도전동기의 커패시터용량을 선정할 때, 운전중의 출력특성을 주목적으로 하는 경우 기동시 커패시터용량이 적기 때문에 기동토크가 적다. 또, 기동시에 적용한 비교적 대용량의 커패시터를 구동 중에도 계속 사용하게 되면 무부하 및 경부하시 효율이 저하하고, 보조권선의 포화 및 불평형운전에 의한 심한 자기진동을 발생한다. [1] 따라서 적절한 커패시터용량의 선정에 충분한 주의가 필요하다.

본 연구에서는 단상유도전동기의 전압과 전류를 정상 및 역상성분으로 변환한 모델을 기초로 한 등가회로부터 커패시터용량에 따른 토크를 산출하였으며, MATLAB을 사용한 시뮬레이션을 통해 커패시터용량에 따른 출력토크의 변화를 예측하였다.

실제의 모터를 이용한 실험을 통하여, 변환 모델의 타당성과 커패시터용량에 따른 구동상태의 최대 토크를 비교 검토하였다.

2. 커패시터 구동형 단상유도전동기

2.1 전동기 특성

그림1은 커패시터구동 단상유도전동기의 회로를 주권

2.2 등가회로

주권선에 주권선 임피던스 Z_M 과 보조권선 임피던스 Z_{A1} 이 접속되어 있으므로, 전동기의 1차 단자전압은 식(5)와 같고, 인가전압은 식(6)과 같이 전개할 수 있다.

$$\dot{V}_M = \dot{E}_M + I_M Z_M, \quad \dot{V}_A' = \dot{E}_A + I_A' Z_{A1} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_M &= \dot{V}_1 = I_{1p} Z_p + I_{1n} Z_n + (I_{1p} + I_{1n})(Z_{1n} + Z_{1p}) \\ &= I_M \left(Z_M + \frac{Z_p + Z_n}{2} \right) - ja I_A \left(\frac{Z_p - Z_n}{2} \right) \\ \dot{V}_A' &= \frac{\dot{V}_1}{a} = j I_{1p} Z_p - j I_{1n} Z_n + (j I_{1p} - j I_{1n})(Z_{1n} - Z_{1p}) \\ &= I_A \left(a^2 Z_A' + a^2 \frac{Z_p + Z_n}{2} \right) + ja I_M \left(\frac{Z_p - Z_n}{2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

식(3)에서 Z_p, Z_n 은 1차 전권수에 대한 1차측환산 2차 임피던스이고, X_m', R_2'', X_2'' 에 대응하는 것이나, 이것을 1차권수의 $\frac{1}{2}$ 에 대한 1차측환산 2차 임피던스로 생각하면 식(7)과 같이 X_m, R_2', X_2' 에 대응하며 보조권선의 임피던스를 변환한 식(8)로부터 커패시터 구동형 단상유도전동기의 등가회로의 전압식은 식(9)와 같이 표현할 수 있다.

식(9)를 적용한 등가회로는 그림2와 같다.

$$\begin{aligned} \frac{Z_p}{2} = Z_f &= \frac{1}{\frac{1}{jX_m'} + \frac{1}{\frac{R_2'}{s} + jX_2'}} \\ \frac{Z_n}{2} = Z_b &= \frac{1}{\frac{1}{jX_m'} + \frac{1}{\frac{R_2'}{2-s} + jX_2'}} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Z_A &= a^2 Z_A' = a^2 (R_A' + jX_A' + r_c' - jx_c') \\ &= R_A + jX_A + r_c - jx_c \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_M &= I_M (Z_M + Z_f + Z_b) - ja I_A (Z_f - Z_b) \\ \dot{V}_A &= I_A \{ Z_A + a^2 (Z_f + Z_b) \} + ja I_M (Z_f - Z_b) \end{aligned} \quad (9)$$

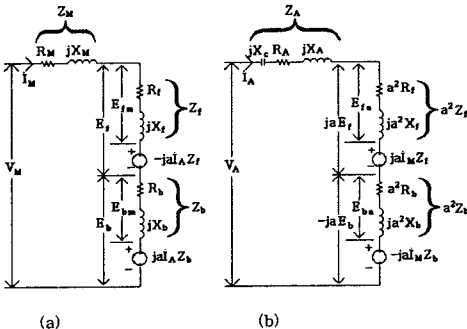


그림 2 커패시터 구동형 단상유도전동기의 등가회로
(a) 주권선의 등가회로 (b) 보조권선의 등가회로

2.3 토크(Torque)

슬립 s 에서의 전동기의 합성토크 T 는 순방향토크에서 역방향토크의 차에 의해 나타나므로 식(10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = T_f - T_b = \frac{P_M - P_{Rb}}{\omega_{syn}} \quad (10)$$

동기각속도 ω_{syn} 는 $\omega_{syn} = 2\pi N_{syn}$ 관계를 갖는다.

순방향과 역방향의 전력은 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_M &= \text{Re}[E_f I_M + ja E_f I_A] \\ P_{Rb} &= \text{Re}[E_b I_M - ja E_b I_A] \end{aligned} \quad (11)$$

그림 2의 등가회로로부터 주권선, 보조권선에 유기되는 기전력은 식(12)와 같다.

$$\begin{aligned} E_f &= R_f + jX_f - ja I_A Z_f \\ E_b &= R_b + jX_b + ja I_A Z_b \\ ja E_f &= a^2 R_f + ja^2 X_f + ja I_M Z_f \\ -ja E_b &= a^2 R_b + ja^2 X_b - ja I_M Z_b \end{aligned} \quad (12)$$

식(2)와 같이 정·역상전류를 이용하여 $I_M = I_{1p} + I_{1n}$, $I_A = \frac{1}{a}(j I_{1p} - j I_{1n})$ 로부터 1차측의 정·역상전류는 식(13)과 같으며, 정·역상임피던스는 $Z_{1p} = \frac{1}{2}(Z_M - Z_A)$, $Z_{1n} = \frac{1}{2}(Z_M + Z_A)$ 이다.

$$\begin{aligned} I_{1p} &= \frac{V_1}{2} \cdot \frac{(1 - \frac{j}{a})(Z_n + Z_{1n}) - (1 + \frac{j}{a})Z_{1p}}{Z_p Z_n + Z_{1n}(Z_p + Z_n) + Z_M Z_A} \\ I_{1n} &= \frac{V_1}{2} \cdot \frac{(1 + \frac{j}{a})(Z_p + Z_{1n}) - (1 - \frac{j}{a})Z_{1p}}{Z_p Z_n + Z_{1n}(Z_p + Z_n) + Z_M Z_A} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, 정·역상분 저항과 리액턴스성분 R_f, R_b, X_f, X_b 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_f &= -s R_2' X_m \left\{ \frac{X_2' - (X_2' + X_m)}{R_2'^2 + s^2 (X_2' + X_m)^2} \right\} \\ jX_f &= j X_m \left\{ \frac{R_2'^2 + s^2 X_2' (X_2' + X_m)}{R_2'^2 + s^2 (X_2' + X_m)^2} \right\} \\ R_b &= -(2-s) R_2' X_m \left\{ \frac{X_2' - (X_2' + X_m)}{R_2'^2 + (2-s)^2 (X_2' + X_m)^2} \right\} \\ jX_b &= j X_m \left\{ \frac{R_2'^2 + (2-s)^2 X_2' (X_2' + X_m)}{R_2'^2 + (2-s)^2 (X_2' + X_m)^2} \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

3. 특성해석

본 연구에서는 그림2의 등가회로로부터 나타내어진 커패시터-토크 관계수식 모델설정의 타당성을 입증하기 위하여 커패시터의 변화에 따른 토크의 세부적인 변화를 모델링 하였다.

특성해석을 위해 적용한 모터의 출력은 4극, 40[W]이며, 파라미터는 실제 모터의 기본데이터로부터 시뮬레이션하였고, 커패시터 저항 r_c 는 매우 미소하여 무시하였다. 시뮬레이션에 적용한 단상유도전동기의 파라미터는 표1과 같다.

표 1 모터의 파라미터

파라미터(Parameter)	수 치
주권선 저항 R_M [Ω]	63.5729
주권선 리액턴스 X_M [Ω]	49.8734
보조권선 저항 R_A [Ω]	76.2024
보조권선 리액턴스 X_A [Ω]	71.0875
회전자 저항 R_2'' [Ω]	199.895
회전자 리액턴스 X_2'' [Ω]	82.2302
자화 리액턴스 X_m' [Ω]	849.654
슬립 s	0.2775
권수비 a	1.09155

다음의 그림4는 커패시터의 용량별 토크특성을 나타낸 결과이다. 여기서, 커패시터의 용량이 증가함에 따라 구동토크가 일정한 용량(7.5[μ F])에서 최대토크가 발생하며, 보다 용량이 증가하는 경우에는 구동토크가 저감하는 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

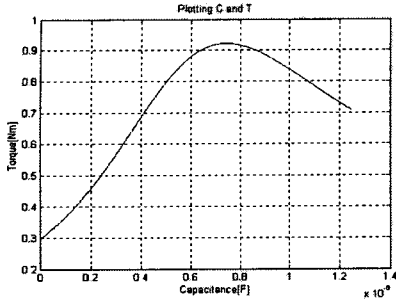


그림 3 구동시($s=0.28$) 커패시터용량의 변화에 따른 토크변화

4. 실험결과 및 고찰

실제의 모터를 이용하여 커패시터를 0.65[μ F]-12.5[μ F]로 각각 변화시켜서 속도-토크, 커패시터용량-토크, 효율을 시뮬레이션과 실험으로 비교하였다.

시뮬레이션에 의한 계산결과 그림3은 실험결과 그림4와 거의 일치하고 있다. 따라서 제안된 특성해석은 파라미터를 적용하면 출력이 다른 커패시터구동형 단상유도전동기도 최대토크를 발생하는 커패시터용량을 결정할 수 있음을 확인하였다.

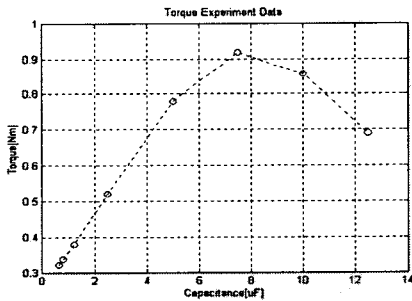


그림 4 최대토크곡선

그림5에 실험 데이터에 의한 속도-토크특성을 나타내었다. 또한, 커패시터 용량의 증가에 따라 기동토크는 증가하며 최대 토크점은 저속으로 이동하는 것을 확인할 수 있다. 12.5[μ F]의 커패시터를 이용하여 모터구동시 기동시의 토크는 최대나 속도가 증가할수록 서서히 저감되어 슬립s를 고려한 동기속도 N_s 에서의 구동최대토크는 약 0.7[Nm]을 나타낸다.

본 연구에 사용한 모터모델에서 최대토크를 발생하기 위한 커패시터용량은 7.5[μ F]이고, 이 용량을 초과하면 토크가 저감됨을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다.

그러나, 7.5[μ F]의 커패시터를 이용하여 구동할 때 고장자, 회전자에 작용하는 주기적인 전자기적 가진력에 의한 철심의 진동에 기인하여 생기는 소음과 공극부의 고주파 자속에 의한 진동음으로 추정되는 소음·진동현상이 발생되므로 7.5[μ F]으로 구동시 최대토크를 얻을 수 있으나, 효율이 저하되는 현상을 나타내고 있다.

그림6에 나타난 바와 같이 측정된 효율을 비교해보면 2.5[μ F]에서 최적의 상태를 확인할 수 있었다.

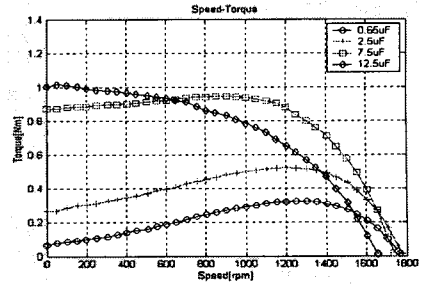


그림 5 속도-토크 특성

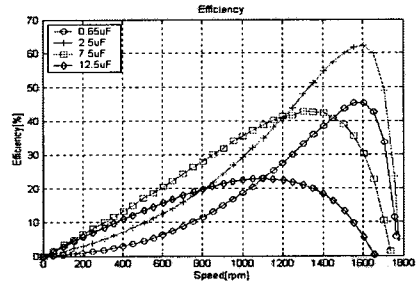


그림 6 커패시터 용량별 효율

5. 결론

커패시터구동형 단상유도전동기는 전동기의 제 파라미터 크기와 커패시터용량에 의해 속도 및 출력이 결정된다. 본 연구에서는 평형2상전동기의 기동 및 구동용 커패시터에 의한 불평형 임피던스가 가해진 경우의 불평형 전압 (V_M, V_A') 인가에 따른 전동기의 특성을 대표방법을 적용하여 해석하였다.

커패시터구동형 단상유도전동기의 등가회로로부터 커패시터변화에 대한 토크식을 도출하고 이를 Matlab으로 특성해석 하였다. 해석결과의 타당성을 확인하기 위하여 220V, 4극, 40[W]용량의 실제모터를 이용하여 실험을 수행하였으며 최적의 커패시터용량을 산출하였다.

실험에 적용한 40[W]출력의 전동기의 경우 약1600[rpm]에서 2.5[μ F]을 적용하면 효율이 최대(63[%])가 되며 1300[rpm]에서 최대토크는 0.47[Nm]를 나타내었다.

본 연구의 특성해석결과와 더불어 출력용량과 다양한 형상에 대해서도 적용할 수 있는 보다 일반성을 갖는 관계를 도출하기 위한 연구가 이루어 진다면 산업적으로 매우 유용한 응용이 가능할 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 박민호, 유도기기, 동명사, pp.286-562, 1969.
- [2] 장도현외, 전기기기공학, 사이텍미디어, pp.381-419, 1998.
- [3] 류준형 이광원, "보조전선 전압제어에 의한 커패시터 런 유도전동기의 속도제어", KIEE, Vol.48B, NO.7, pp.357-362, July, 1999.
- [4] E. R. Collins, Jr., "Operating Characteristics of Single-Phase Capacitor Motors Driven from Variable Frequency Supplies", IEEE IAS'91, pp.52-57, 1991.
- [5] Eduard Muljadi, "Adjustable ac Capacitor for a Single-Phase Induction Motor", IEEE, Vol.29, NO.3, pp.479-485, 1993.
- [6] E. R. Collins, Jr., "Improved methods for determining the equivalent circuit parameters for single-phase induction motor models", IEEE IAS'93, pp.390-395, 1993
- [7] H. Huang, "OPTIMAL PLACEMENT OF THE RUN CAPACITOR IN SINGLE-PHASE INDUCTION MOTOR DESIGNS", IEEE, Vol.3, No.3, pp.647-652, 1988