

위상각제어에 의한 단상유도전동기의 토크제어기설계

임영철*, 최찬학*, 나석환*, 정영국*, 장학중*, 장영학**

* 전남대학교, ** 목포대학교

The design of a torque controller for single phase induction motor using phase angle

Y.C.Lim, C.H.Choi, S.H.Na, Y.G.Jung, H.C.Chang, Y.H.Chang
Chonnam National University Mokpo National University

Abstract

The single-Phase induction motor is widely used in many light duty applications, especially in home and the office. At present, many applications which use these motor require continuously adjustable speed control. In the general, the speed control of single-phase induction motor is accomplished at a few discrete speeds by using tapped-windings, pole switching or gear. These techniques is inefficient and complicated.

In this paper, auxiliary winding voltage phase angle of single-phase induction motor is used to continuously adjust electromagnetic torque. The analysis includes the determination of the relationship between the auxiliary winding voltage phase angle and torque. Simulation results of the motor's torque-speed characteristics using the controlled auxiliary winding supply are shown and discussed. The drive is tested using a dynamometer to experimentally verify the results of the theory and simulations.

I. 서 론

가정이나 사무실에는 단상전원이 공급되고 있으므로 가정용, 사무용 전기용용기기에는 구조가 간단하고 저렴한 단상유도전동기가 널리 사용되고 있다. 단상유도전동기는 전동기 자체로는 회전자속을 발생하지 못하므로 기동토크를 발생시키기 위한 별도의 외부장치를 필요로 한다. 외부기동장치로 사용되고 있는 콘덴서나 원심력스위치 등은 열악한 환경에서는 사용이 불가능하고 부품열화에 의한 파손 등의 문제점을 가지고 있다. 일반적으로 사용되고 있는 단상유도전동기의 속도제어방법으로는 기어등을 사용하는 기계적인 방법과 탭변환, 극수변환등의 전기적방법이 있다. 그러나 대부분의 경우 전동기를 풀스피드로 동작시킨 상태에서 벨브나 스위치의 개폐에 의한 속도제어방법을 사용하고 있다. 이러한 속도제어방법들은 속도제어가 불연속적이고 비효율적이며 제어성과 신뢰성이 낮고 제작이 복잡하며 제어기의 부피가 커지는 문제점들이 있다. 근래 소비자들의 고급화 추세에 따라 단상유도전동기를 사용하는 응용기기에 연속적인 가변속성과 더불어 높은 신뢰성이 요망되고 있다. 따라서 단상유도전동기를 사용하는 응용기기의 신뢰성향상

을 위해 원심력스위치나 외부콘덴서의 제거가 요구되고 연속적인 가변속제어를 위한 고도의 토크제어성능이 요구된다. 근래 E.R.Collins 등에 의해 연구되어진 가변주파수 속도제어방법은 기동토크가 적고 정역전 절환시 외부스위치가 필요하며, 여전히 기동을 위한 콘덴서나 원심력스위치 등을 사용하고 있다.^[1]

따라서 본 연구에서는 단상유도전동기의 주권선은 상용전원에 직접연결하고, 보조권선에 주권선공급전압과 위상차를 갖는 전압을 공급함으로써, 보조권선의 전압위상차에 의해 발생토크가 가변되는 토크제어기를 설계하였다. 제안한 제어기의 실현을 위해 전압위상각과 발생토크와의 관계를 고찰하였고 컴퓨터를 통해 시뮬레이션을 수행하였으며, 제어기를 제작하여 실험을 통해 제어기의 가변토크성능을 조사하였다.

II. 전압위상각에 의한 토크

Fig. 1은 단상유도전동기의 보조권선과 주권선의 등가회로이다.

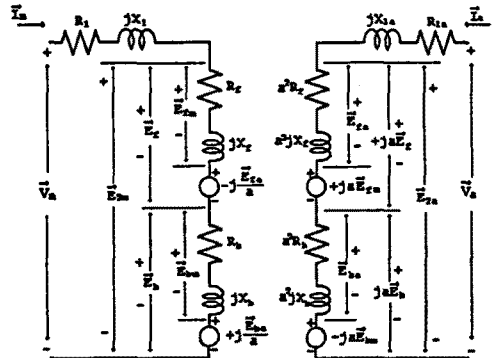


Fig. 1 Equivalent circuits of an induction motor with both stator windings.

Fig.1의 전압방정식은 다음과 같다.

$$\vec{V}_m = \vec{I}_m \vec{Z}_1 + \vec{I}_e \vec{Z}_2 \quad (1)$$

$$\vec{V}_a = \vec{I}_a \vec{Z}_1 + \vec{I}_e \vec{Z}_2 \quad (2)$$

$$\vec{V}_m = \vec{V}_m \angle \theta_m \quad (3)$$

$$\vec{V}_a = \vec{V}_a \angle \theta_a \quad (4)$$

여기서,

$$\vec{Z}_1 = R_{1m} + R_f + R_b + j(X_{1m} + X_f + X_b) \quad (5)$$

$$\vec{Z}_2 = -ja[(R_f - R_b) + j(X_f - X_b)] \quad (6)$$

$$\vec{Z}_3 = [R_{1a} + a^2(R_f + R_b)] + j[X_{1a} + a^2(X_f + X_b)] \quad (7)$$

$$\vec{Z}_4 = ja[(R_f - R_b) + j(X_f - X_b)] \quad (8)$$

전압방정식을 전류에 관하여 풀면 다음과 같다.

$$\vec{I}_m = (\vec{V}_m \vec{Z}_3 - \vec{V}_s \vec{Z}_2) / \vec{Z}_4 \quad (9)$$

$$\vec{I}_s = (\vec{V}_s \vec{Z}_1 - \vec{V}_m \vec{Z}_4) / \vec{Z}_4 \quad (10)$$

$$\vec{I}_m = I_m \angle \theta_m \quad (11)$$

$$\vec{I}_s = I_s \angle \theta_s \quad (12)$$

여기서, $\vec{Z}_4 = \vec{Z}_1 \vec{Z}_3 - \vec{Z}_2 \vec{Z}_4$ 이다. Fig. 1에 의하여 양방향 회전자계에 의한 출력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_M - P_{sb} = Re[(\vec{E}_f - \vec{E}_s) \vec{I}_m^* + j(\vec{E}_f - \vec{E}_s) \vec{I}_s^*] \quad (13)$$

식(1)은 다음과 같이 다시 표현될 수 있다.

$$P_M - P_{sb} = (R_f - R_b)[I_m^2 + (aI_s)^2] + Re\left[-j\frac{\vec{E}_f}{a} - j\frac{\vec{E}_s}{a}\right] \vec{I}_m^* + Re(ja\vec{E}_m + ja\vec{E}_m) \vec{I}_s^* \quad (14)$$

식(14)의 오른쪽 두번째항과 세번째항은 다음 과정에 의해 결합되어질 수 있다.

$$\begin{aligned} -\frac{j}{a}(\vec{E}_f + \vec{E}_s) \vec{I}_m^* &= -ja[R_f + R_b + j(X_f + X_b)] \vec{I}_s^* \vec{I}_m^* \\ &= [(X_f + X_b) - j(R_f + R_b)] a \vec{I}_s^* \vec{I}_m^* \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} ja(\vec{E}_m + \vec{E}_m) \vec{I}_s^* &= ja[R_f + R_b + j(X_f + X_b)] \vec{I}_s^* \vec{I}_m^* \\ &= [(X_f + X_b) - j(R_f + R_b)] a \vec{I}_s^* \vec{I}_m^* \end{aligned} \quad (16)$$

폐이서 합의 실수값은 폐이서 실수값들의 합과 같다. 그리고 식(15)와 식(16)의 합은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} -\frac{j}{a}(\vec{E}_f + \vec{E}_s) \vec{I}_m^* + ja(\vec{E}_m + \vec{E}_m) \vec{I}_s^* \\ = [(X_f + X_b) - j(R_f + R_b)] a (\vec{I}_s^* \vec{I}_m^* - \vec{I}_m^* \vec{I}_s^*) \end{aligned} \quad (17)$$

만약, $\vec{I}_s = I_s e^{j\theta_s}$ 이고 $\vec{I}_m = I_m e^{j\theta_m}$ 이라면

$$\begin{aligned} \vec{I}_s^* \vec{I}_m^* - \vec{I}_m^* \vec{I}_s^* &= I_s I_m [\varepsilon^{j(\theta_s - \theta_m)} - \varepsilon^{-j(\theta_s - \theta_m)}] \\ &= j2I_s I_m \sin(\theta_s - \theta_m) \end{aligned} \quad (18)$$

그러므로, 식(14)에서 아래와 같은항은

$$Re\left[-j\frac{\vec{E}_f}{a} - j\frac{\vec{E}_s}{a}\right] \vec{I}_m^* + Re(ja\vec{E}_m + ja\vec{E}_m) \vec{I}_s^*$$

다음식과 같이 표현되고

$$2aI_s I_m (R_f + R_b) \sin(\theta_s - \theta_m) \quad (19)$$

식(14)는 다음과 같이 다시 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} P_M - P_{sb} &= [I_m^2 + (aI_s)^2](R_f - R_b) \\ &\quad + 2aI_s I_m (R_f + R_b) \sin(\theta_s - \theta_m) \end{aligned} \quad (20)$$

따라서, 발생되는 토크 T_{em} 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} T_{em} &= \frac{1}{\omega_e} [I_m^2 + (aI_s)^2](R_f - R_b) \\ &\quad + 2aI_s I_m (R_f + R_b) \sin(\theta_s - \theta_m) \end{aligned} \quad (21)$$

$$T_{em} = f(\theta_{sv} - \theta_{mv}) \quad (22)$$

식(21)로부터 발생토크는 주권선과 보조권선의 전류위상각에 의해 가변될 수 있음을 알 수 있다. 그러나 전류위상각은

식(9)와 식(10)에서 전압위상각의 함수이므로, 식(22)와 같이 발생토크는 전압위상각에 의한 함수임을 알 수 있다.

III. 시뮬레이션

주권선과 보조권선의 공급전압 위상각에 의한 토크제어의 타당성을 검증하기 위해 컴퓨터를 통한 시뮬레이션을 수행하였다. Table 1은 시뮬레이션에 사용한 단상유도전동기의 파라미터로써 대우모터에서 생산하고 있는 세탁기용 모터, 모델 WMOS16의 파라미터이다.

Table 1 Induction motor parameters(WMOS16)

Parameters	Values
고정자 주권선저항(R_{1m})	15 [Ohm]
고정자 보조권선저항(R_{1a})	30 [Ohm]
고정자 주권선리액턴스(X_{1a})	2.8 [Ohm]
고정자 보조권선리액턴스(X_{1a})	2.8 [Ohm]
회전자 저항(R_2)	70 [Ohm]
회전자 리액턴스(X_2)	2.1 [Ohm]
상호 리액턴스(X_m)	66.5 [Ohm]

식(9)와 식(10)의 주권선과 보조권선의 전압크기와 위상각에 의해 식(22)의 발생토크식으로 부터 속도변화에 따른 토크특성을 시뮬레이션하였다. Fig.2는 전압위상각을 0° 부터 90° 까지 15° 간격으로 0 rpm에서부터 1800 rpm까지의 토크특성곡선이다.

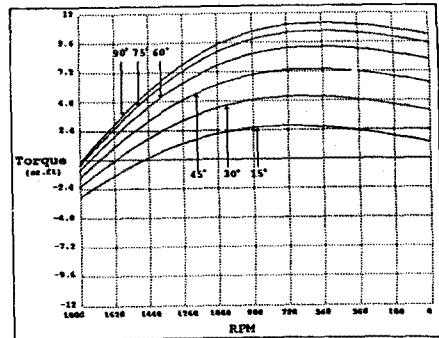


Fig.2. Torque-speed curves for the auxiliary voltage phase angle 90° 75° 60° 45° 30° 15°.(simulated)

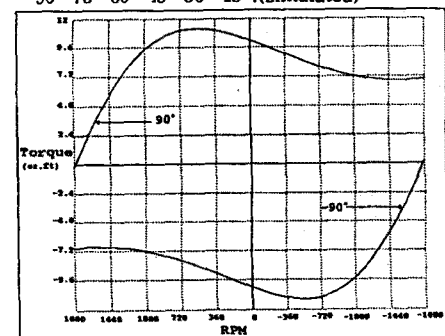


Fig.3. Torque-speed curves for the auxiliary voltage phase angle 90° -90°.(simulated)

Fig.3은 보조권선의 전압위상각에 의한 정역전시의 토크특성이다.

보조권선의 전압위상각 가변에 의한 발생토크의 시뮬레이션 결과로부터 보조권선의 전압위상각에 의해 토크제어가 가능함을 알 수 있었으며, 콘덴서나 원심력스위치 사용하지 않고도 높은 기동토크가 발생됨을 알 수 있었다. 그리고 전압위상각의 부호변환에 의해 정역전운전이 가능하며 가속토크제어가 가능함을 시뮬레이션을 통해 알 수 있었다.

IV. 토크제어기 설계

단상유도전동기의 주권선은 상용라인에 직접연결하고 보조권선은 상용라인으로 부터 인버터를 거쳐 원하는 위상각차를 갖는 전압을 보조권선에 공급하므로써 발생토크를 제어하는 토크제어기를 설계하였다.

보조권선에 전압을 공급하는 인버터는 다이오드 정류기, 직류콘덴서, 풀브릿지 인버터로 구성되어 있다. 여기서 인버터의 스위칭소자는 파워모스펫트, IRF840을 사용하였으며, 제어회로로부터 정현파와 삼각파의 비교에 의한 가변위상각 PWM스위칭 패턴은 인버터의 스위칭소자를 구동하도록 하였다. 인버터로부터 보조권선에 공급되는 전압의 실효치는 100V로 고정하였다. Fig.4는 주권선과 원하는 위상각의 PWM스위칭 패턴을 발생하는 제어회로의 블럭선도이다.

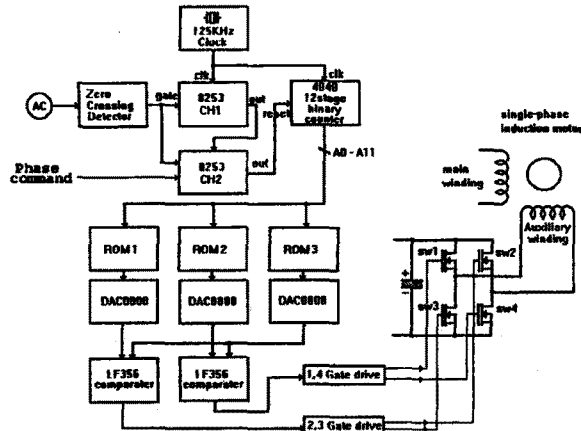


Fig.4. A functional block diagram of the auxiliary winding control circuit and power circuit.

V. 실험 및 결과

보조권선의 전압위상각에 의해 토크를 가변하는 토크제어기를 제작하여, 전압위상각변화에 따른 발생토크특성을 조사하였다. 실험에 사용한 단상유도전동기는 대우모터에서 제작한 세탁기용 콘덴서운전형 유도전동기 모델 WMOS16을 사용하였다. WMOS16은 110V, 4극, 소비전력 125W이다 토크측정을 위한 측정기는 ZTEST(Computerized Test System JSL.Corp. in U.S.A)를 사용하였다.

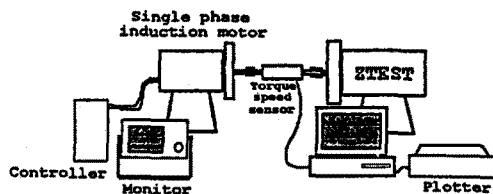
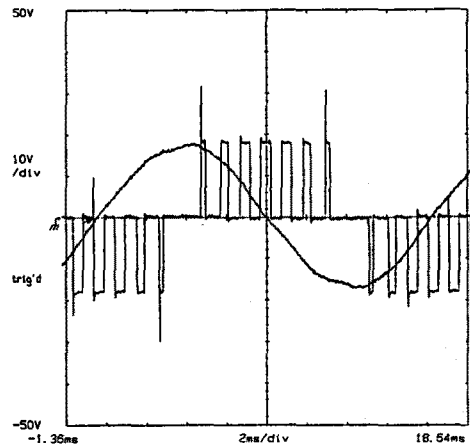
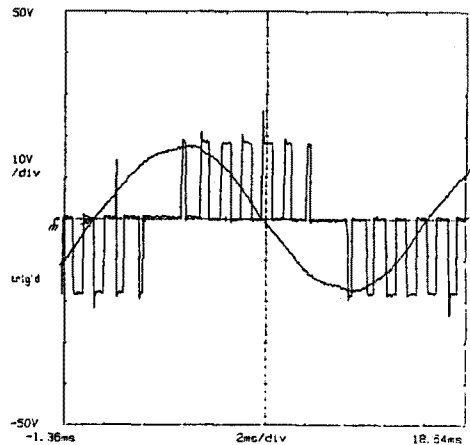


Fig.5. Experimental set.

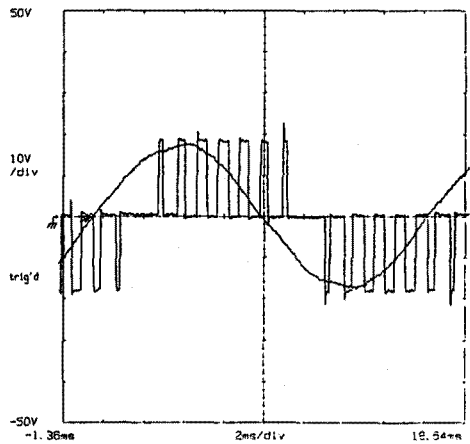
Fig.5는 전체 실험셋의 구성도이다. Fig.6은 오실로스코프 상에 나타난 주권선과 보조권선의 전압위상각이다.



(a) 90°



(b) 60°



(c) 30°

Fig.6. Voltage phase angle between main winding and aux winding.

실험은 먼저 전압위상각차를 0° 부터 90° 까지 15° 간격으로 토크제어기에 입력하여 발생하는 토크특성을 ZTEST의 플로터로 출력하였고, 토크제어기를 제거하고 단상유도전동기에 콘덴서를 부착한 상태에서 토크특성을 플로터로 출력하였다. Fig.7은 전압위상각에 의한 각각의 발생토크곡선이고 Fig.8은 전압위상각차 90°에서의 토크곡선과 콘덴서운전시 토크곡선을 비교하여 나타내었다.

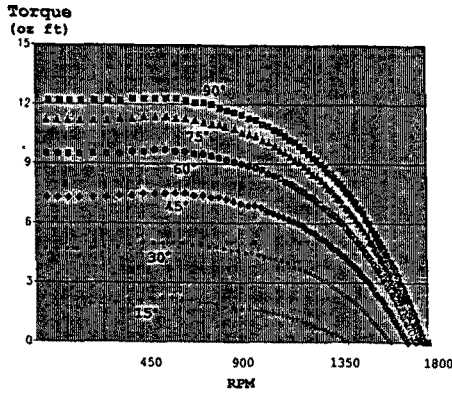


Fig.7. Torque-speed curves for the auxiliary voltage phase angle 15° 30° 45° 60° 75° 90°.

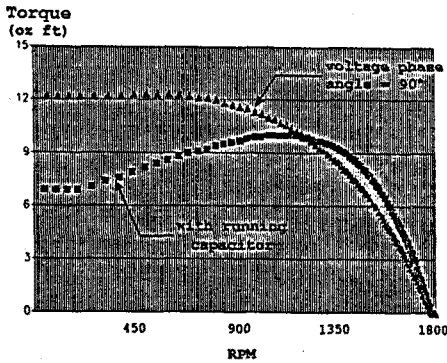


Fig.8. Torque-speed curves for the auxiliary voltage phase angle 90° and running condenser.

Table II The characteristics of WMOS16 induction motor experimented with aux. winding voltage phase angle controller and with running condenser.

검 사 함 목 단 위	가변위상각 실험 결과 (90°)	콘덴서 운전형 실험 결과 (20.8μF)	증 감
기동토크	oz. ft 12.21	6.15	↑ 98.5%
최대토크	oz. ft 12.33	10.05	↑ 22.6%

이상의 실험으로부터 보조권선의 전압위상각을 조절하여 발생토크가 가변됨을 확인하였고 단상유도전동기를 사용하는 용용기기들의 속도제어에 적용이 가능함을 알 수 있었다. 또한 전압위상각의 조절에 의해 최대 토크가 가변됨으로써, 부하의 가속비가 쉽게 제어될 수 있음을 알 수 있었다. 그리고 전압위상각 90°에서의 토크특성곡선과 콘덴서운전시 토크특성곡선을 비교한 결과 전압위상각제어에 의한 기동토크가 콘덴서운전형에 비해 98.5% 향상되었으며, 최대토크는 22.6% 향상되었다.

VI. 결 론

위상각제어에 의한 단상유도전동기의 토크제어기 설계에 대한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

보조권선의 전압위상각 가변에 의해 고정부하 및 가변부하에 대해 속도제어가 가능하고 가속토크비제어가 가능함을 확인하였다. 실험결과, 표준형 콘덴서운전형에 비해 기동토크가 약100%, 최대토크가 약20% 향상되었다. 외부의 방향결환 스위치 없이 위상각제어에 의해 용이하게 정역전이 가능함을 알 수 있었고 위상각의 역전에 의해 제동토크 발생이 가능함을 알 수 있었다. 외부콘덴서나 원심력스위치 등의 주변요소들을 제거함으로써 전체적인 부피가 감소되고, 부품 열화에 의한 신뢰성 저하의 문제점을 개선시킬 수 있었다.

참 고 문 헌

1. E.R.Collins, "Operating Characteristics of Single-Phase Capacitor Motors Driven from Variable Frequency Supplies", IAS'91, pp52-57.
2. C.G.Veinott, "Theory and Design of small induction motors", McGraw-Hill, 1959.
3. Leander W.Matsch, "Electromagnetic and Electromechanical Machines" John Wiley & Sons, Canada, 1987.
4. P.S.Bimbhra, "Generalised circuit theory Electrical Machines", Khanna Publishers, 1975.
5. B.S.Guru, "Revolving-field analysis of capacitor motors with on quadrature windings", Elec.Mach and Electromechanics, vol.3, no1, pp11-20, 1978.
6. S.B.Dewan, G.R.Slemon, "Power Semiconductor Drives" John wiley & sons, U.S.A, 1984.
7. N.Mohan, "Power Electronics and Design", John wiley & sons, U.S.A, 1989.
8. W.Leonhard, "Control of Electrical Drives" spring-verlag Berlin, Germany, 1990.