

단상 유도전동기의 벡터제어에 의한 고성능 운전

이 경 주, 이 득 기, *김 진 규, **정 종 진, ***김 흥 군
 경북대 전기공학과, *대구공업대 전기과, **성덕대 정보통신과, ***경북대 전자전기공학부

High Performance of Single-Phase Induction Motor with Vector Control

Lee Kyung-Joo, Lee Deuk-Ki, *Kim Jin-Kyu, **Jung Jong-Jin, Kim Heung-Gun
 Kyung-pook Nat. Univ., *Taegu Tech. College, ** Sungduk College

Abstract - This paper describes the vector control of a single-phase induction motor drive system to improve the dynamic performance for low power applications. Using auxiliary winding which is only utilized for starting, the single-phase induction motor is regarded as the unsymmetrical two-phase motor. This paper shows that the vector control of single-phase induction motor with new method achieves the high performance of the motor. The results of the new method are illustrated by the simulations.

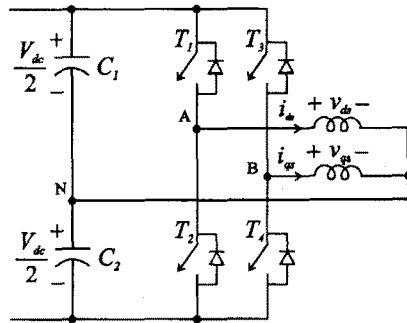


그림 1. 단상 유도전동기 구동 시스템

1. 서 론

일반적으로 단상 유도전동기는 가정용이나 3상 전원을 사용할 수 없는 산업용의 지전력 분야에 이용되고 있다. 그러나, 단상 유도전동기의 속도 제어는 전기적인 방법보다는 거의 기계적인 방법에 의해 이루어진다. 뿐만 아니라, 다른 종류의 전동기에 비하여 입력역률 및 효율이 낮은 편이다.

대개의 경우, 단상 유도전동기는 주권선에 의해서는 기동 토크를 발생시키지 못하기 때문에 기동을 위해서 공간적으로 90° 위상차를 가지는 보조권선을 사용한다. 필요에 따라서는 커패시터를 추가하여 사용하는데, 동일 전원을 이용하여 주권선과 보조권선에 흐르는 전류의 위상차에 의해서 기동하게 된다. 기동후 동기속도의 약 75%에 도달하면, 원심력 스위치에 의해서 보조권선은 개방되고 주권선만을 사용하게 된다.

이 보조권선을 하나의 상(phase)로 간주하면, 단상 유도전동기는 일종의 불평형 2상 유도전동기로서 해석이 가능하다[1]. 여기에 벡터제어의 개념을 도입하면, 단상 유도전동기의 속도 및 토크제어를 고전적인 방법보다 더 효율적으로 수행할 수 있다[2]. 더우기, 보조권선을 사용함으로써 최대출력을 더 크게 할 수 있으며, 권선 이용률 역시 높아진다.

본 논문에서는 전동기 모델링을 회전자축으로 환산하여 제어하는 것을 제안하였다. CRPWM 인버터를 사용할 경우, 회전자축 환산시 더욱 더 간단하게 제어가 가능하다. 그림 1은 전체 시스템 구성도를 나타낸다. 직류전압 V_{dc} 는 단상 정류기나 boost형 단상 AC/DC 변환기를 사용하여 얻을 수 있다. 4개의 스위치와 정류기 출력단의 커패시터의 중성점 N을 이용하여 2상 인버터를 구동시킨다.

본 논문에서는 단상 유도전동기의 벡터제어에 의한 동특성 향상을 위해 새로운 해석방법을 제안하였다. 제안한 해석방법의 타당성을 시뮬레이션을 통해서 증명하였다.

2. 본 론

2.1 전동기 모델링

단상 유도전동기의 주권선을 정지 좌표계의 q 축으로, 보조권선을 정지 좌표계의 d 축으로 하여 해석하면, 정지 좌표계에서 회전자축으로 전동기 상수를 환산한 식이 아래와 같이 유도된다. 단, 회전자는 농형이다.

$$v_{ds}' = r_{ds}' i_{ds}' + p \lambda_{ds}' \quad (1)$$

$$v_{qs}' = r_{qs}' i_{qs}' + p \lambda_{qs}' \quad (2)$$

$$0 = r_r' i_{dr}' + p \lambda_{dr}' + \omega_r \lambda_{qr}' \quad (3)$$

$$0 = r_r' i_{qr}' + p \lambda_{qr}' - \omega_r \lambda_{dr}' \quad (4)$$

여기서,

$$\lambda_{ds}' = L_{ds}' i_{ds}' + L_m i_{dr}', \quad \lambda_{qs}' = L_{qs}' i_{qs}' + L_m i_{qr}'$$

$$\lambda_{dr}' = L_r' i_{dr}' + L_m i_{ds}', \quad \lambda_{qr}' = L_r' i_{qr}' + L_m i_{qs}'$$

$$L_{ds} = L_{lds} + L_m, \quad L_{qs} = L_{lqs} + L_m, \quad L_r = L_{lr} + L_m$$

이며, 토크식은

$$T_e = \frac{p}{2} L_m (i_{qs}' i_{dr}' - i_{ds}' i_{qr}') \quad (5)$$

과 같이 된다. 모든 파라미터는 회전자축 환산한 값이다. r_{ds}, L_{ds} 은 d 축 고정자 저항과 인덕턴스, r_{qs}, L_{qs} 는 q 축 고정자 저항과 인덕턴스, r_r, L_r 은 회전자 저항과 인덕턴스, L_m 은 자화 인덕턴스를 나타낸 것이다. v_{xy}, i_{xy} 는 d/q 축 고정자/회전자 전압/전류를 나타낸 것이다. ω_r 은 회전자의 속도이며, '는 회전자축으로 환산한 값을 의미한다.

모델링 방법은 3상 유도전동기의 dq 모델링 방법과 유사하다. 하지만, 주권선과 보조권선의 비대칭성에 의해서 고정자측 파라미터들이 일치하지 않는다. 그림 2는 정지 좌표계에서의 회전자 환산 등가회로를 나타낸 것이다.

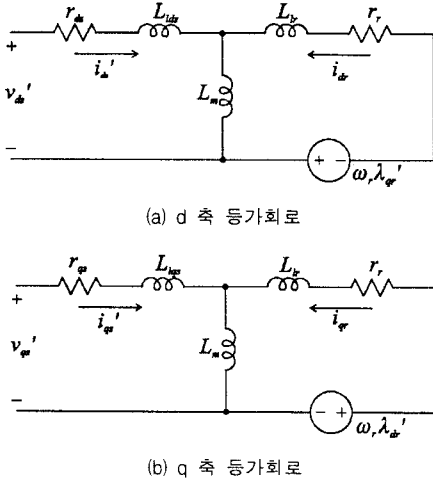


그림 2. 정지 좌표계에서의 회전자 환산 등가회로

동기속도 회전 좌표계에 대한 시스템 방정식은 식(1)~(5)를 변환함으로써 얻을 수 있는데, 그 식은 아래와 같다.

$$v_{ds}' = r_{ds} i_{ds}' + p \lambda_{dse}' - \omega_e \lambda_{qse}' \quad (6)$$

$$v_{qs}' = r_{qs} i_{qs}' + p \lambda_{qse}' + \omega_r \lambda_{dse}' \quad (7)$$

$$0 = r_r i_{dre} + p \lambda_{dre}' - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qre}' \quad (8)$$

$$0 = r_r i_{qre} + p \lambda_{qre}' + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dre}' \quad (9)$$

$$T_e = \frac{P}{2} \frac{\omega_e}{\omega_r} (L_{lds} - L_{lqs}) i_{dse}' i_{qse}' + \frac{P}{2} L_m (i_{qse}' i_{dre}' - i_{dse}' i_{qre}') \quad (10)$$

마지막 첨자 e 는 동기속도 회전 좌표계임을 의미한다. 그림 3은 동기속도 회전 좌표계에서의 등가회로를 나타낸 것이다.

2.2 단상 유도전동기의 벡터제어

회전자 자속 벡터를 동기속도 회전자표계의 실수축에 일치 시키면

$$\Delta_{dae}' = \lambda_{dr}' , \lambda_{qr}' = 0 \quad (11)$$

이 된다.

전류제어형 PWM(Current Regulated PWM) 인버터로 구동된다면 고정자 전류를 직접제어하게 되므로, 고정자측 전압방정식은 시스템에서 제외된다. 따라서, 회전자 전압방정식, 자속식 및 토크식은 다음과 같다.

$$0 = r_r i_{dre} + p \lambda_{dre}' \quad (12)$$

$$0 = r_r i_{qre} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dre}' \quad (13)$$

$$\lambda_{dre}' = L_r i_{dre} + L_m i_{dse}' \quad (14)$$

$$\lambda_{qre}' = L_r i_{qre} + L_m i_{qse}' = 0 \quad (15)$$

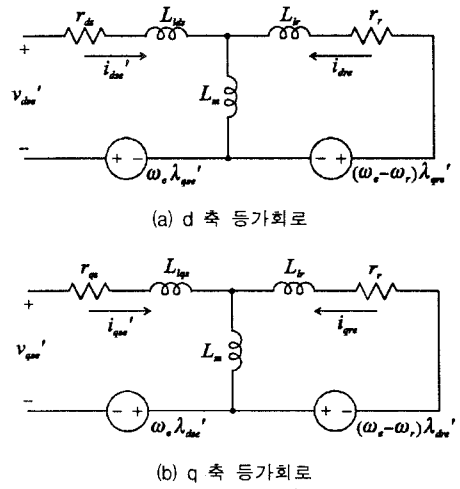


그림 3. 동기속도 회전 좌표계에서의 회전자 환산 등가회로

$$T_e = \frac{P}{2} \left\{ \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dre}' i_{qse}' + \frac{\omega_e}{\omega_r} (L_{lds} - L_{lqs}) i_{dse}' i_{qse}' \right\} \quad (16)$$

식(16)에서와 같이 토크는 회전자 자속과 고정자 q 축 전류에 비례함을 알 수 있다. 또한, 회전자 자속은 시정수 τ_r 을 가지면서, $L_m i_{dse}'$ 로 수렴하게 된다.

$$\lambda_{dre}' = L_m i_{dse}' \quad (17)$$

따라서, 토크와 자속을 고정자 q 축 전류 i_{qse}' , d 축 전류 i_{dse}' 에 의해서 제어 가능하다.

2.3 회전자측 등가회로의 획득

회전자측 등가회로를 구하기 위해선 회전자측 유효 권선수를 알아야 하지만, 실제 회전자는 농형이기 때문에 유효 권선수를 알 수가 없다. 주권선과 보조권선에 대한 고정자측 등가회로는 각 권선에 대한 DC test, 무부하 시험, 구속 시험을 통해서 얻을 수가 있다. 각각의 권선에 대한 고정자측 등가회로에서의 회전자 파라미터들은 같은 비율을 가지게 된다. 즉,

$$\frac{r_{qr}}{r_{dr}} = \frac{L_{qr}}{L_{dr}} = a^2 \quad (18)$$

의 관계가 된다. 여기서, r_{qr}, L_{qr} 은 주권선의 회전자 저항과 인덕턴스, r_{dr}, L_{dr} 은 보조권선의 회전자 저항과 인덕턴스를 의미한다.

보조권선의 회전자측 파라미터들을 주권선의 파라미터들과 일치시키면, 보조권선의 전압은 a 배, 전류는 $1/a$ 배, 고정자측 파라미터들은 a^2 배가 된다. 이렇게 하면 그림 3과 같은 등가회로를 간접적으로 얻을 수 있다.

2.4 Simulation

제안한 단상 유도전동기 벡터제어의 방법을 검증하기 위하여 ACSL(Advanced Continuous Simulation Language)을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션에 사용한 단상 유도전동기는 Capacitor-Start 형, 60 Hz, 4 극, 1 hp 전동기이다. 이 전동기의 파라미터들은 표 1과 같다.

표 1. 단상 유도전동기 파라미터

r_{as}	0.416 Ω	L_{as}	55.867 mH
r_{ds}	1.197 Ω	L_{ds}	56.034 mH
r_r	0.646 Ω	L_r	55.867 mH
L_m	53.146 mH	a^2	0.5

그림 4는 단상 유도전동기의 벡터제어를 위한 전체 블록 선도를 나타낸 것이다. 속도제어와 전류제어를 위해 PI 제어기를 사용하였고, 삼각파 비교 PWM 인버터 방식을 사용하였다. 인버터의 스위칭 주파수는 10 kHz 이다.

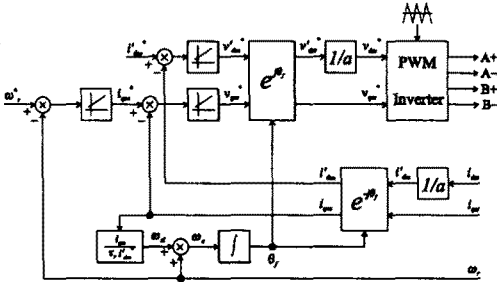


그림 4. 단상 유도전동기의 벡터 제어를 위한 블록선도

그림 5.(a)는 무부하시 90° 위상차가 나는 전압을 크기를 다르게 하였을 때의 속도 특성을 나타낸 것이다. 그림 5.(b)/(c)는 그 때의 토크와 동기속도 좌표계에서의 고정자 d/q 전류를 나타낸 것이다. 그림 6은 제어를 했을 경우의 속도, 토크, 동기속도 좌표계에서의 고정자 d/q 전류를 나타낸 것이다. 그림 5와 6을 비교해 보면, 제어시에 속도특성이 향상되었고, 토크와 동기속도 좌표계에서의 고정자 전류의 맥동이 현저히 줄어들었음을 알 수 있다.

그림 7은 기준속도를 400 rpm 에서 200 rpm 으로 낮추었을 때의 속도 및 토크 특성을 나타낸 것이다.

3. 결 론

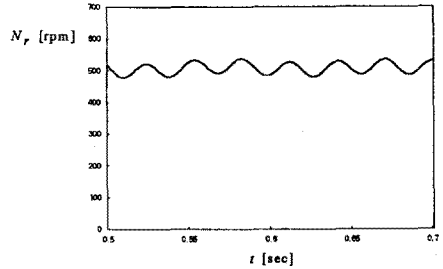
단상 유도전동기는 저전력용으로 널리 이용되고 있지만 효율이 낮고, 기동을 위한 별도의 조치가 필요하다. 그리고 기동을 위한 보조권선은 정상 운전시에는 사용되지 않는다. 본 논문에서는 보조권선을 하나의 상으로 취급하여, 단상 유도전동기를 불평형 2상 유도전동기로 모델링하였다. 또한, 새로운 해석방법으로 벡터제어를 적용하였다. 속도 및 토크 특성의 향상을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

앞으로, 벡터제어에 의한 보조권선을 이용한 단상 유도전동기의 동특성 향상을 시뮬레이션으로 검증된 것을 실험을 통해서 보일 것이다. 뿐만 아니라, 정확한 파라미터 측정예 대한 연구도 이어질 것이다.

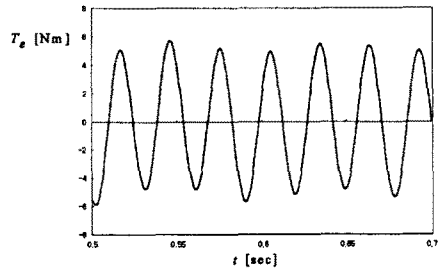
(참 고 문 헌)

- [1] P.C. Krause, O. Wasynczuk, and S.D. Sudhoff, Analysis of Electric Machinery. IEEE Press, Piscataway, 1995.
- [2] M.B.R. Correa, C.B. Jacobina, A.M.N. Lima and E.R.C. da Silva, "Field Oriented Control of Single-Phase Induction Motor Drive". IEEE PESC Conf.Rec., Vol.2 ,pp.990-996, 1998

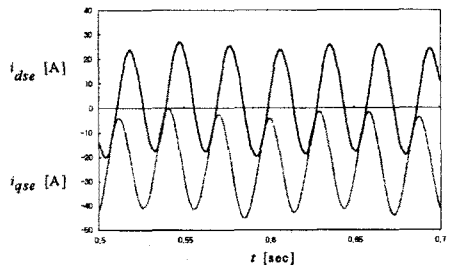
- [3] M.F. Rahman and L. Zhong, "A Current-Forced Reversible Rectifier Fed Single-Phase Variable Speed Induction Motor Drive". IEEE IAS Conf. Rec.,pp.114-119, 1996
- [4] D.G. Holmes and A. Kotsopoulos, "Variable Speed Control of Three Phase Voltage Source Inverter". IEEE IAS Conf. Rec.,pp.613-620, 1993



(a) 속도 특성



(b) 토크 특성



(c) 동기속도 좌표계에서의 고정자 d/q 전류

그림 5. 무부하 시험(비제어시)

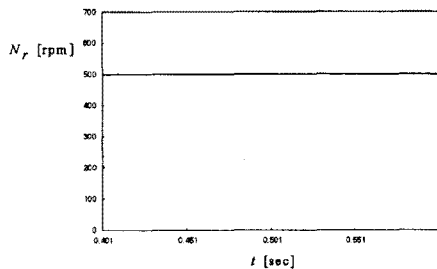
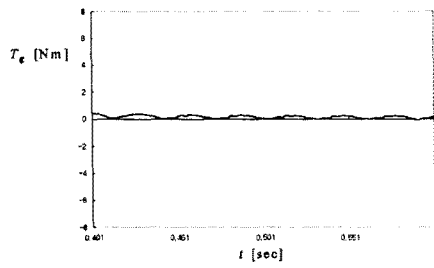
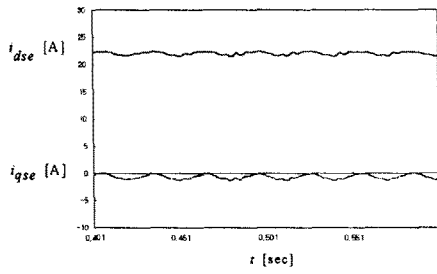


그림 6.(a) 속도 특성 (Nr = 500 rpm)



(b) 토크 특성



(c) 동기속도 좌표계에서의 고정자 d/q 전류

그림 6. 속도 제어시의 특성

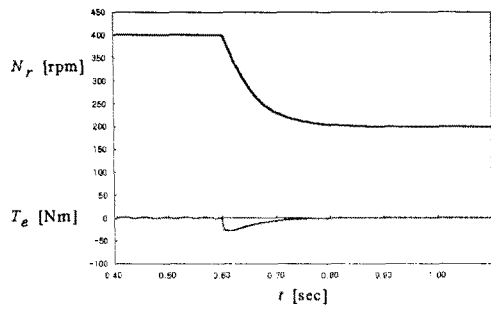


그림 7. 기준속도에 따른 속도 및 토크 특성