

12 스텝 PWM 2상 인버터를 이용한 콘덴서형 단상 유도전동기의 연속제어 방안에 대한 연구

오석문, 이성동**, 유철로*
*전북대학교 전기공학과, ** 군산대학교 제어계측공학과

A Study on Continuous Control of 1 ϕ Condenser Type Induction Motor using 12 Step PWM 2 Phase Inverter

Oh Seog-Moon, Lee Sung-Ryong, Yu Chul-Ro
Dept. of Electrical Eng. Chonbuk Nat. Univ.
Dept. of Electrical Eng. Khunsan Nat. Univ.

Abstract

This paper presents continuous control concept of unsymmetrical 2 phase induction machine(IM.). For 2 phase driving of the unsymmetrical IM., variable voltage and variable frequency inverter is needed. In this paper, a new 12 step PWM 2 phase inverter was proposed. And then, proposed inverter fed 2 phase driving of unsymmetrical IM. was studied, especially on average torque and pulsation torque.

This system has merits like higher fundamental component and better harmonic characteristics. The simulation was done on this issue and experimental research is on the way.

I. 서론

본 논문의 목적은 하절기 피크 부하시 전력예비율 문제를 악화시키는 큰 요인으로 지적되고 있는 중,소규모의 냉방기기를 연속제어하여 궁극적으로 전동기를 고효율 운전하고자 함이다.

기존의 콘덴서형 단상 유도전동기(이하 단상 유도전동기)를 연속제어하는 데는 콘덴서를 VVVF 인버터로 대체하는 데 따른 경제적인 부담이 가장 큰 문제점이었다. 그러나 최근의 전력수급상의 위기를 고려한다면 이러한 경제적 부담은 연속제어시 기기당의 효율이 30% 이상 증가한다는 발표에 따르면 충분한 가치가 있을 거라고 판단된다.

따라서 본 연구에서는 기존의 단상 유도전동기에서 콘덴서를 제거한 후 인버터에 의하여 전동기를 구동하므로써 연속제어가 가능하도록 하고자 한다.

단상 유도전동기를 구동하기 위한 인버터로서 12 스텝 PWM 2상 인버터가 제안되었으며, 제안된 인버터의 출력특성을 기존의 다른 방식과 비교하여 그 우수성을 입증하였다. 또한 콘덴서를 제거한 단상 유도전동기를 비대칭 2상 유도전동기로 해석하여 인버터 구동시 최적 출력특성을 얻을 수 있는 조건을 결정하였다.

비대칭 2상 유도전동기를, 인버터 시스템으로 연속제어하는 경우 전동기 자체의 불평형 운전조건과 인버터 출력전압의 왜형파에 의해 전동기의 출력에 진동 토오르크 성분이 증가하는 데, 본 연구에서는 진동 토오르크를 최소화하면서 평균 토오르크를 일정치 이상으로 유

지시킬 수 있는 방법을 제시하였다.

II. 본론

1. 12 스텝 PWM 2상 인버터

(1) 주회로 구성 및 동작사항

그림 1과 그림 2는 각각 12 스텝 PWM 2상 인버터와 제안된 인버터의 동작파형을 나타낸다. 제안된 인버터는 참고문헌 [1]에 발표된바 있는 고조파 저감형 단상 12 스텝 전압원 인버터를 2상 PWM 출력을 발생시킬 수 있도록 개선한 것으로 기존 회로에 1대의 전브리저 인버터가 추가되어 구성되었다.

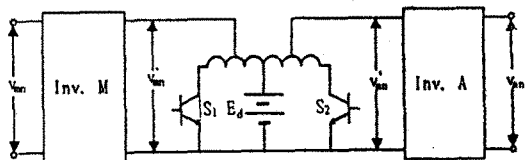


그림 1 제안된 12 스텝 PWM 2상 인버터

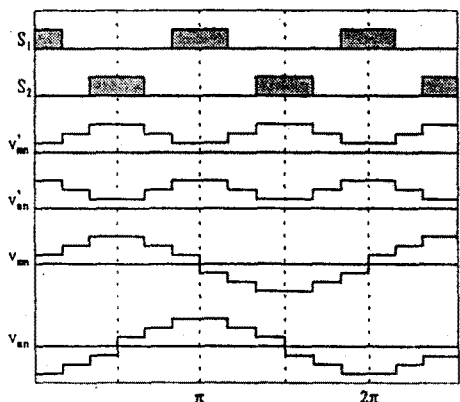


그림 2 각 부의 동작파형

변조지수(M)=1인 경우 인버터는 12 스텝의 전압파형을 출력하며 이에 대한 푸리에 급수 전개식은 식 (1)과 같다.

$$V_{mn}' = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4E}{n\pi} [(1-a_{m1}) + a_{m1} \cos n\alpha_1 + a_{m2} \cos n\alpha_2] \sin n\theta \quad (n = \text{odd}) \quad (1)$$

식 (1)에서 뒤틀린 회로의 주요 변수인 단권 변압기의 권수비 및 뒤틀린 제어각의 최적값 역시 기준에 제안된 방법에 의해 계산되었으며 그 값은 다음과 같다.

$$\alpha_1 = 30^\circ, \quad \alpha_2 = 60^\circ$$

$$a_{m1} = 0.63, \quad a_{m2} = 0.37$$

(2) 12 스텝 등간격 PWM 출력파형

제안된 시스템의 2상 12 스텝 출력전압 파형은 M<1으로 제어함에 따라 PWM 파형을 나타내는데 그림 3은 등간격 PWM 출력전압 발생원리를 나타내고 있다.

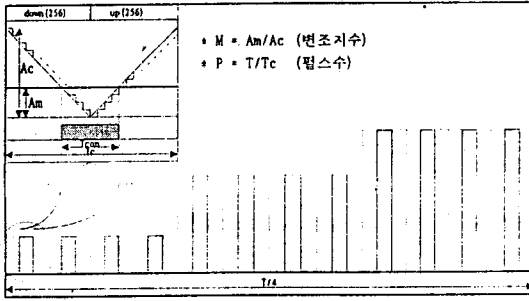


그림 3 등간격 12 스텝 PWM 출력전압 발생원리

그림 3에서 P는 출력전압 1 주기당 발생 펄스의 수로써 넓은 범위의 저차 고조파를 제거하기 위해서는 비교적 큰 값을 선택해야한다. 본 방식에서는 P=48인 경우를 고려하였다. 이 때 출력전압의 푸리에 급수 전개식은 식 (2)와 같다.

$$V_{mn} = \frac{4E}{\pi n} \sum_{p=1}^4 [(1-a_{m1}) \sum_{q=1}^{2p-1} (\cos n\alpha_{2p-1} - \cos n\alpha_{2p}) + \sum_{q=5}^{2p} (\cos n\alpha_{2p-1} - \cos n\alpha_{2p}) + (1+a_{m2}) \sum_{q=9}^{2p} (\cos n\alpha_{2p-1} - \cos n\alpha_{2p})] \times \sin nt \quad (2)$$

$$\alpha_{2p-1} = \frac{Tc}{2}(2p-1) - M \quad (3)$$

$$\alpha_{2p} = \frac{Tc}{2}(2p-1) + M \quad (4)$$

$$(p = 1, 2, \dots, 12)$$

2. 비대칭 2상 유도전동기 해석

콘덴서를 제거한 단상 유도전동기는 비대칭 2상 유도전동기로 고려될 수 있다[2]. 비대칭 2상 유도전동기는 단상 전원에서 동작하도록 설계되어 있으므로 고정자의 주권선과 보조권선에 인가되는 전압전압은 항상 불평형 2상 전압이 된다. 이것은 주권선과 보조권선의 임피던스가 서로 같지 않기 때문이며, 참고문헌 [2]의 저자 P.C. Krause에 따르면 비대칭 2상 유도전동기 주권선과 보조권선의 극축에 정지 기준 좌표계(Stationary Reference Frame)를 설정하여 변수변환 함으로써 권선간의 상호 인덕턴스의 영향을 제거할 수 있는 것으로 되어있다. 그림 4는 비대칭 2상 유도전동기의 등가회로를 나타내고 있으며, 식 (5)는 정상상태 해석을 위한 페이지 형식의 전압 방정식을 나타내고 있다.

인버터에 의해 전동기를 구동하는 경우 기본파 외에 많은 고조파 전압이 전동기의 고정자에 인가되므로 전동기의 토오크 해석시 고조파의 영향을 고려하지 않으면 않된다.

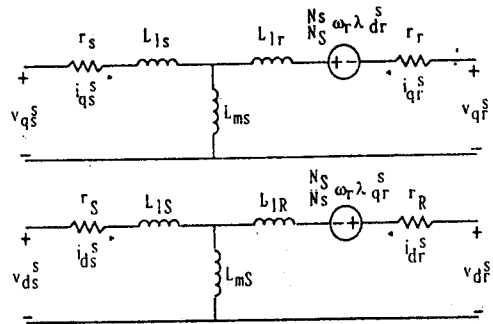


그림 4 비대칭 2상 유도전동기의 등가회로

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{qst}^s \\ \dot{V}_{dst}^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + j\omega_{stk}/w_b X_{ss} & 0 \\ 0 & r_s + j\omega_{stk}/w_b X_{ss} \\ j\omega_{stk}/w_b X_{ms} & -w_{stk}/nw_b X_{ms} \\ nw_r/w_b X_{ms} & j\omega_{stk}/w_b X_{ms} \\ j\omega_{stk}/w_b X_{ms} & 0 \\ 0 & j\omega_{stk}/w_b X_{ms} \\ r_r + j\omega_{stk}/w_b X_{rr} & -w_r/nw_b X_{rr} \\ nw_r/w_b X_{rr} & r_r + j\omega_{stk}/w_b X_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{qst}^s \\ \dot{I}_{dst}^s \\ \dot{I}_{qst}^r \\ \dot{I}_{dst}^r \end{bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)로 부터의 고조파 전압을 고려한 토오크 방정식은 식 (6)과 같다.

$$T_e = \left(\frac{P}{2} \right) \left(\frac{N_s}{N_r} \right) \left(\frac{X_{ms}}{w_b} \right) \sum_{k=0}^{\infty} \sum_{K=0}^{\infty} \begin{bmatrix} \text{Re}(\dot{I}_{qst}^r \dot{I}_{dk}^s - \dot{I}_{dst}^r \dot{I}_{qk}^s) \cos(\omega_{stk} - \omega_{esk})t \\ + \text{Re}(\dot{I}_{qst}^r \dot{I}_{dk}^s - \dot{I}_{dst}^r \dot{I}_{qk}^s) \cos(\omega_{stk} + \omega_{esk})t \\ + \text{Re}(-j\dot{I}_{qst}^r \dot{I}_{dk}^s + \dot{I}_{dst}^r \dot{I}_{qk}^s) \sin(\omega_{stk} - \omega_{esk})t \\ + \text{Re}(-j\dot{I}_{qst}^r \dot{I}_{dk}^s + \dot{I}_{dst}^r \dot{I}_{qk}^s) \sin(\omega_{stk} + \omega_{esk})t \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (6)은 전동기 회전자의 회전속도를 상수로 놓으면 전동기 전압방정식이 선형적으로 표시되고, 선형인 전압방정식은 중첩의 정리를 이용할 수 있으므로 왜형파 전압이 인가되었을 경우 토오크를 주파수 별로 나누어 구할 수 있으며 전체 토오크는 이 것들의 합으로써 구할 수 있음에 근거한다.[3]

참고문헌 [3]에 따르면 전동기에 기본파 전압에 n 조파 전압이 인가되었을 때 전동기에 발생하는 토오크 성분은 여자전원 전압에 따른 평균 토오크(r_o), n조파 전압에 따른 평균 토오크(r_{on}), 여자전원의 2배인 각주파수를 갖는 진동 토오크(r_{2no}), 각 주파수가 (n-1) w_o 인 진동 토오크(r_{n-1}), 각 주파수가 (n+1) w_o 인 진동 토오크(r_{n+1}), 각 주파수가 2mw_o인 진동 토오크(r_{2n})의 6 종류인 것으로 밝혀졌다.

그러므로 본 방식에서는 12 스텝 PWM 2상 인버터에 의해 공급되는 비대칭 2상 유도전동기의 토오크 성분을 각각 평균 토오크와 진동 토오크로 나누어 고찰하였다. 이 때 평균 토오크(T_{avg})와 진동 토오크(T_{pul})는 각각 식 (7)과 (8)이다.

$$T_{avg} = r_o + r_{on} \quad (7)$$

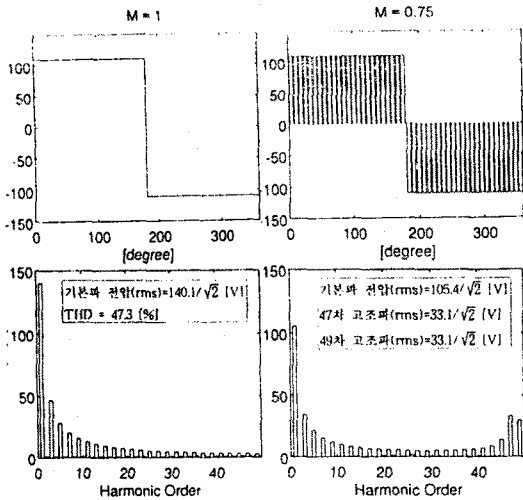
$$T_{pul} = r_{2no} + r_{n-1} + r_{n+1} + r_{2n} \quad (8)$$

제안된 12 스텝 PWM 2상 인버터는 비대칭 2상 유도전동기의 진동 토크와 평균 토크 특성을 종래의 단상 유도전동기의 경우 보다 향상시킬 수 있으며, 출력 전압의 주파수를 가변하여 전동기를 연속제어할 수 있도록 설계되었다. 이 때 진동 토크와 평균 토크의 최적점은 다음 장의 시뮬레이션을 통해서 결정되었다.

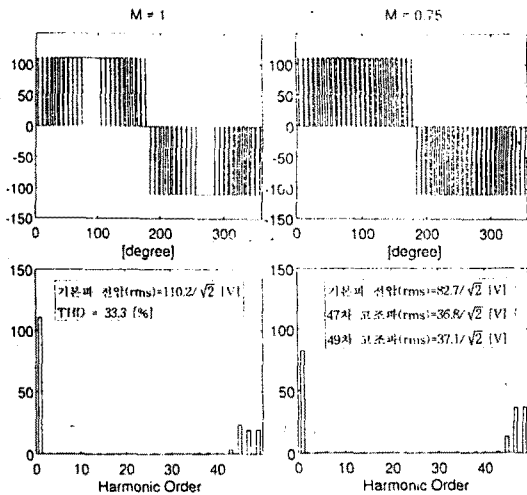
III. 시뮬레이션

1. 12 스텝 PWM 2상 인버터의 고조파 해석

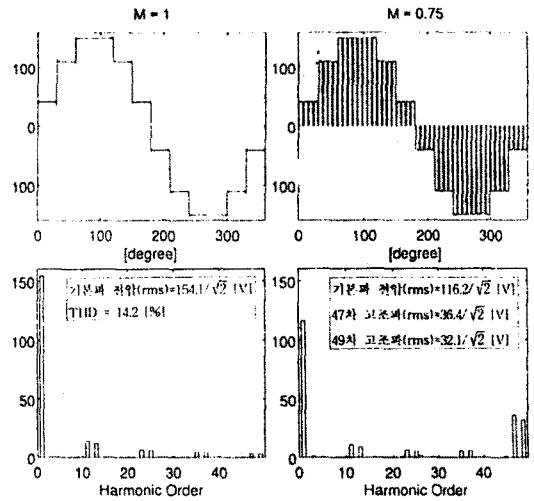
제안된 12 스텝 PWM 2상 인버터의 출력전압은 $M=1$ 로 제어되었을 때 12 스텝 파형으로 되고, $M<1$ 로 제어 되었을 때 12 스텝 PWM 파형으로 되어 인버터 출력전압의 실효값을 제어할 수 있게한다. 그림 5(a), (b) 및 (c)는 각각 구형파 방식, 정현파 방식 및 제안된 방식의 인버터가 $M=1, 0.75$ 로 제어되었을 때의 출력전압 파형 및 고조파 스펙트럼을 나타내고 있다.



(a) 구형파 방식



(b) 정현파 방식



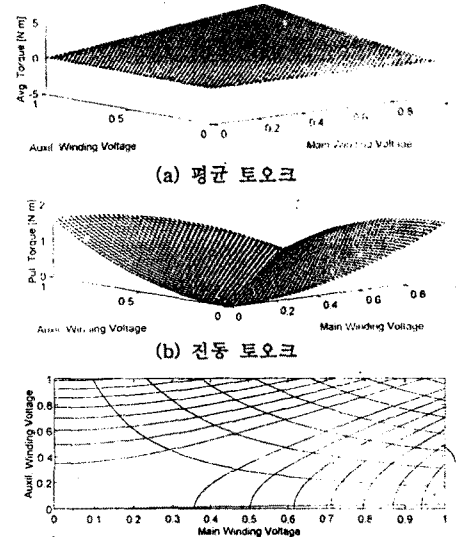
(c) 제안된 방식

그림 5 각 인버터의 출력전압 및 고조파 분석

그림 5에 나타난 바와 같이 $M=1$ 인 경우, (a), (b) 방식은 50차 까지 계산된 THD가 다소 큰 반면 제안된 방식은 보다 낮은 값을 유지한다. 또한 기본파 실효값 역시 제안된 방식에서 최고치를 갖는다. $M<1$ 인 경우 캐리어 주파수 대역의 고조파 크기는 3가지 방식이 모두 비슷한 값을 유지하는 반면 기본파 실효값은 제안된 방식에 최고치를 보이고 있다.

2. 비대칭 2상 유도전동기 최적운전 조건

비대칭 2상 유도전동기의 최적운전 조건은 전동기의 평균 토크와 진동토크를 비교하므로써 결정된다. 본 논문에서 사용된 비대칭 2상 유도 전동기의 파라미터는 4극, 110[V], 1/4 마력, $r_s=2.02$, $r_r=4.12$, $X_{ms}=66.8$, $X_{ls}=2.79$, $X_{lr}=2.12$, $r_s=7.14$, $r_r=5.74$, $X_{ms}=92.9$, $X_{ls}=3.22$, $X_{lr}=2.95[\Omega]$, $n=(N_s/N_r)=1.18$, $J=0.0146$ [Kg.m]이다.



(c) 평균 토크와 진동 토크의 등고

그림 6 비대칭 2상 유도전동기의 최적 출력특성

그림 6은 주어진 파라미터에 대한 전동기의 최적 출력특성을 나타내고 있는데, (a)는 평균 토오크, (b)는 진동 토오크를 나타내며, (c)는 (a)와 (b)의 등고(contour)를 나타낸다. 그림 6에 나타난 바와 같이 주권선과 보조권선의 전압위상차를 110° 로 하면 평균 토오크의 최대값과 진동 토오크의 최소값을 주권선과 보조권선의 전압비 1:1로 제어하므로써 얻을 수 있다.

그러나, 제안된 인버터 시스템은 위상차 제어기능이 없으므로 출력전압 위상차는 90° 로 고정된다. 만약 각 상의 위상차를 90° 이외로 제어하면 출력전압은 12 스텝 파형을 얻을 수 없게된다. 그림 7은 각 구동방식에 따른 전동기의 출력특성을 나타낸 것이다.

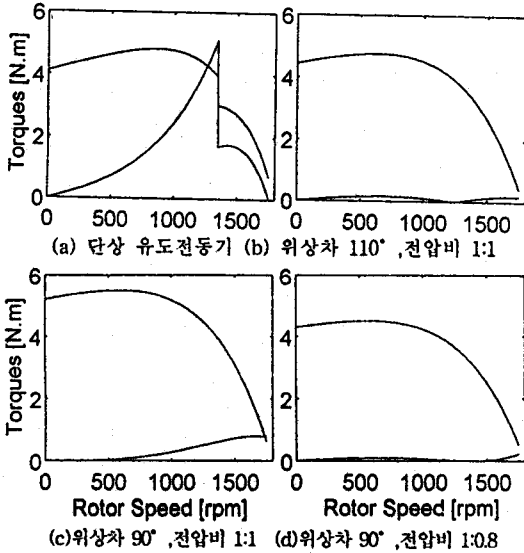
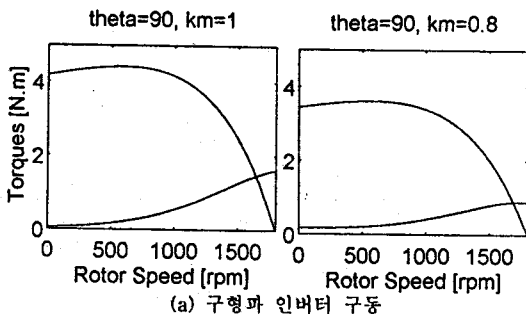


그림 7. 구동방식에 따른 전동기의 출력특성

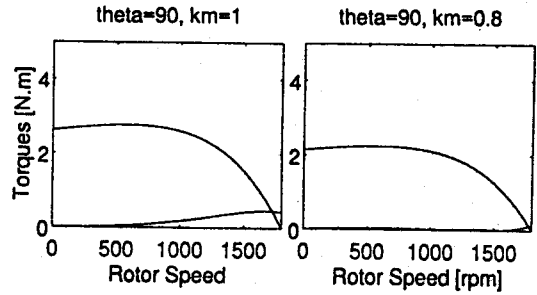
그림 7 (a)는 기존의 콘덴서형 단상 유도전동기의 출력특성으로 동기속도의 75%에서 콘덴서가 절체된 모습을 보이고 있다. (b)는 위상차 110° 에서 전압비 1:1 제어 했을 때의 출력특성이다. (c)와 (d)는 위상차 90° 에서 주권선의 전압을 제어했을 경우로 (d)의 경우는 (b)의 경우와 거의 같은 특성을 나타내고 (c)의 경우 역시 (a)의 경우 보다 개선된 특성을 보인다.

3. 12 스텝 PWM 2상 인버터로 구동되는 비대칭 2상 유도전동기의 출력특성

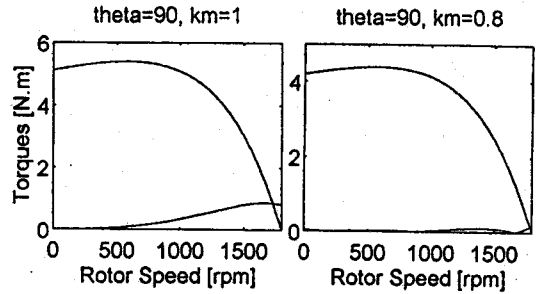
이 절에서는 인버터에 의한 전압제어 특성과 출력전압의 고조파 특성이 비대칭 2상 유도전동기 출력특성에 미치는 영향을 고찰하였다.



(a) 구형과 인버터 구동



(b) 정현파 인버터 구동



(c) 제안된 인버터 구동

그림 8 인버터로 구동되는 비대칭 2상 유도전동기의 출력특성

III 1 절에서 소개된 3 가지 형태의 인버터로 구동되는 전동기의 출력특성을 그림 8에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 제안된 방식은 (a), (b) 방식에 비해 전동기 출력특성이 우수함을 알 수 있는데, 이는 제안된 인버터의 기본과 이용 및 고조파 특성 다른 방법에 비해 우수하기 때문이다.

IV. 결 론

본 논문은 콘덴서형 단상 유도전동기의 콘덴서를 제거하여 연속제어할 수 있는 방안을 제시했으며, 아울러 12 스텝 PWM 2상 인버터를 제안하였다. 제안된 인버터와 제안된 방식의 인버터로 구동되는 비대칭 2상 유도전동기의 시뮬레이션 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

첫째, 제안된 12 스텝 PWM 2상 인버터는 $M=1$ 및 $M<1$ 로 제어되었을 경우에 기본과 이용 및 고조파 특성에서 다른 방식들 보다 우수하였다.

둘째, 제안된 인버터로 비대칭 2상 유도전동기를 구동할 경우, 출력전압의 위상차가 90° 로 고정되어 있는 상태에서 주권선의 인가전압을 제어하여, 최적조건인 경우와 거의 동등한 출력특성을 얻을 수 있었다.

셋째, 제안된 인버터로 구동된 전동기의 진동 토오크 특성이 가장 우수했는데, 이는 제안된 인버터의 고조파 특성이 다른 방식에 비해 우수하기 때문이라고 사료된다.

참고문헌

- [1] 이성룡, "새로운 고조파 저감형 단상 12 스텝 전압인 인버터", 대한전기학회 논문지, 43권, 10호, pp. 1625-1634, 1994
- [2] P.C. Krause, "Analysis of Electric Machine", McGraw-Hill, 1987
- [3] Hiroshi Kurokui, "An Analysis of 2-Phase Servo-Motor", Trans. on JIEE, 53-B1, pp. 94-100