

위상제어와 주기 제어를 이용한 단상유도기의 속도 제어

김철진*, 이관용*, 조영래*, 최철용**, 백수현**
 한라대학교*, 동국대학교**

Speed control of single-phase induction motor using
 phase control and integral cycle control

Cherl-Jin Kim*, Kwan-Yong Lee* , Young-Rae Cho*, Chul-Young Choi**, Soo-Hyun Baek**
 Halla University*, Dongguk University**

Abstract - Single phase induction motor is used widely in various electronic appliances by advantage that is simple structure and a low-cost. As high starting torque characteristic is mostly used capacitor run single phase induction motor.

In this paper, it is applied that speed controller of Capacitor run single phase induction motor of digital way used general microprocessor, and phase control method used average voltage. Torque get non-linearity to domain of low speed. Unstable domain of low speed is applied of integral cycle control. so it is wide that Speed control domain. Also, PID controller is used to improve characteristic of fast response. The validity of proposed method is verified from simulation and experiment result

두 권선의 공간적 상대위치 때문에, 보조권선의 정방향 회전자계에 의하여 주권선에 유기된 전압은 같은 자계에 의하여 보조권선에 유기된 전압에 90°앞선다.

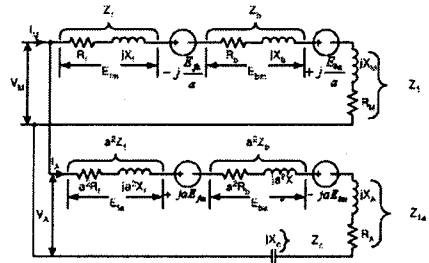


그림 1. 단상유도전기의 등가회로

보조권선의 자계에 의하여 주권선에 유기된 전압과 주권선 자계에 의하여 보조권선에 유기된 전압으로 등가회로에 대한 전압방정식은 식(1),(2)와 같다.

$$V_m = (Z_1 + Z_T + Z_0)I_m - ja(Z_T - Z_0)I_a \quad (1)$$

$$V_a = ja(Z_T - Z_0)I_m + (Z_c + Z_{1a} + a^2(Z_T - Z_0))I_a \quad (2)$$

주권선과 보조권선의 단자 임피던스를 각각 Z_T 와 Z_{T_a} 라고 한다. 주권선과 보조권선의 전류를 구하면 식(3),(4)와 같다.

$$I_m = \frac{V_m Z_{T_a} + jV_a a(Z_T - Z_0)}{Z_T Z_{T_a} - a^2(Z_T - Z_0)^2} \quad (3)$$

$$I_a = \frac{V_a Z_T - jV_m a(Z_T - Z_0)}{Z_T Z_{T_a} - a^2(Z_T - Z_0)^2} \quad (4)$$

단상유도기의 토크 방정식은 정방향과 역방향 자계에 의하여 유기되는 토크를 각각 구한다. 먼저 각각의 자계의 크기는 식(1)의 Z_T 와 Z_0 의 계수로 결정된다.

정방향 자계와 역방향 자계에 의하여 주권선에 유기된 전압은 식(5)와 같다.

$$E_T = (I_m - jaI_a)Z_T, \quad E_a = (I_m + jaI_a)Z_a \quad (5)$$

양 자계에 기인한 토크는 각각의 자계에 관계하는 저항에 전류를 제곱함으로써 구해질 수 있다. 정방향 자계에 의한 전류와 역방향 자계에 의한 전류는 그림 2와 같다. 보조권선의 전류 aI_a 와 주권선 전류 I_m 은 ϕ 의 위상차를 가진다.

1. 서론

단상유도전동기는 간단한 구조와 저가라는 장점으로 인해 각종 가전 기기에서 널리 사용되고 있으며, 그 중에서 기동특성이 양호한 콘덴서 구동형 단상유도전동기를 주로 사용한다.

본 논문에서는 콘덴서 구동형 단상유도 전동기의 속도제어를 위해 범용의 마이크로프로세서를 이용하여 평균값의 위상각 제어 방식을 적용하였으며, 토크의 비선형성을 갖는 불안정한 저속영역에서는 교류 주기 제어를 제한함으로써 폭 넓은 범위에서의 가변속 제어를 가능하게 하였다. 또한 제어 특성을 향상시키기 위해 PID제어기를 적용하였으며, 실험의 타당성을 입증하기 위해 시뮬레이션과 실험결과를 분석하였다.

2. 단상유도전동기의 속도제어

2.1 단상유도전동기의 기동원리

단상 유도기는 기동토크를 발생하기 위해 콘덴서를 보조권선에 직렬로 연결하여 주권선과의 위상차를 이용한다. 두 권선에 인가된 전압은 각각 V_m 과 V_a 이며 대부분 $V_m = V_a$ 이다. 권선이 직교하면 두 고정자 권선에는 상호 리액턴스가 생기지 않는다. 그러나 네 개의 회전자계 각각에 의한 전압이 고정자 권선에 유기된다. 보조권선의 전류가 주권선의 전류보다 시간적으로 앞서기 때문에 보조권선으로부터 주권선 방향으로 회전한다.

주권선에 의하여 형성된 두 회전자계 성분에 의하여 주권선에 유기된 전압과 보조권선에 의하여 형성된 두 자계 성분에 의하여 보조권선에 유기된 전압을 구한다. a 는 주권선의 유효 도체수에 대한 보조권선의 유효 도체수이다. 그림 1은 단상유도전동기의 등가회로를 나타낸다. 보조권선에 의한 자계는 주권선에 전압을 유기하고 보조권선에 생긴 전압의 $1/a$ 배의 크기를 갖는다. 그러나

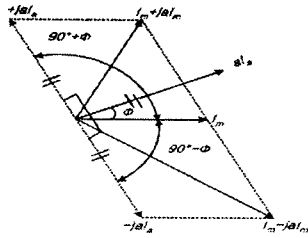


그림 2. 단상유도전동기의 전류벡터

정방향 전류와 역방향 전류는 식(6), (7)과 같이 나타낸다.

$$(I_m - jaI_a)^2 = I_m^2 + (aI_a)^2 + 2aI_m I_a \sin\phi \quad (6)$$

$$(I_m + jaI_a)^2 = I_m^2 + (aI_a)^2 - 2aI_m I_a \sin\phi \quad (7)$$

식(6),(7)을 이용하여 토크를 전력으로 나타내면 식(8),(9)와 같이 나타낸다.

$$T_f = [I_m^2 + (aI_a)^2 + 2aI_m I_a \sin\phi] R_f \quad (8)$$

$$T_b = [I_m^2 + (aI_a)^2 - 2aI_m I_a \sin\phi] R_b \quad (9)$$

발생토크 T는 정방향토크와 역방향토크의 차로써 식(10)과 같다.

$$T = [I_m^2 + (aI_a)^2] (R_f - R_b) + (2aI_m I_a \sin\phi) (R_f + R_b) \quad (10)$$

식 (10)에서 발생토크는 주권선과 보조 권선의 전류위상각에 의해 가변될 수 있음을 알 수 있고, 전류위상각은 전압위상각의 함수이므로, 발생토크는 전압위상각에 의해 제어될 수 있음을 알 수 있다.

2.2 시스템 구성 및 디지털 방식의 제어기 설계

콘덴서 구동형 단상유도전동기의 속도 제어를 위해 범용의 마이크로프로세서를 이용하여 평균전압 제어를 수행하였으며, 최대 토크의 약 1/6 지점에서 전압강하 등의 이유로 위상제어가 불안정한 저속 영역에서는 모터의 관성을 이용한 교류주기제어를 적용함으로써 보다 저속에서 제어가 가능하게 되었다. 속도검출기로부터 검출된 속도 오차는 지상 및 진상 보상으로 양호한 특성과 제어가 강인한 PID제어기로 속도를 보상한다. 그러나 시스템의 외란 및 노이즈에 영향을 줄이기 위해 본 논문에서는 K_D 를 제외한 디지털 PI제어기를 적용한다. 그림 3은 구동 시스템의 블록선도를 나타낸다.

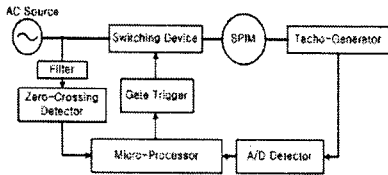


그림 3. 시스템의 블록선도

구동 시스템의 제어 흐름도는 그림 4에 나타내었다. 속도 지령값을 설정한 후 제어모드를 선정한다. 선정된 제어모드에서 영전압 검출을 입력받고, 검출된 신호를 기준으로 트리거 신호를 결정한다. 속도검출기로부터 A/D 컨버터를 통해 현재 속도를 검출한 후 오차를 검출하여 모터의 속도가 지령값에 추종하도록 설계하였다.

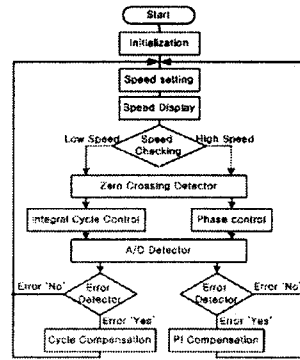
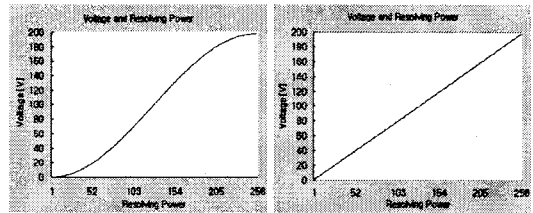


그림 4. 시스템의 제어 흐름도

2.2.1 위상제어기의 설계

단상유도전동기의 속도제어를 디지털 방식으로 제어함으로써 상용주파수의 반주기인 180° 범위에서 0부터 255스텝까지 0.7°의 분해능을 가지며 펄스를 발생시켜 속도를 제어할 수 있다. 그러나 제어속도는 공급 전압의 평균값에 비례적이므로 균등한 평균값의 분해능을 갖도록 위상각을 설계하였으며, 한 스텝 당 전압은 약 0.8[V]로 되며 비교적 원활한 속도제어 특성을 갖는다. 균등한 평균값을 갖는 위상각은 아래의 식(11)과 같다.

$$V_a = \frac{V_m}{\pi} \int_0^{\pi} \sin\theta d\theta = \frac{V_m}{\pi} [-\cos\theta]_0^{\pi} \\ = \frac{V_m}{\pi} [1 - \cos\theta] \quad (11) \\ \therefore \theta = \cos^{-1} \left(1 - \frac{V_a \pi}{V_m} \right)$$



(a) 위상각 일정 (b) 전압 일정

그림 5. 위상제어의 제어 전압 비교

그림 5는 상용주파수의 반주기인 180° 범위에서 256스텝의 분해능을 가질 때의 각 스텝의 불균등한 전압량을 가지므로 제한된 범위에서 속도제어가 이루어진다. 따라서 각 스텝 당 일정전압을 갖도록 위상각을 설계함으로써 비교적 양호한 속도제어가 이루어진다.

위상각 제어모드에서 속도 오차를 보상하기 위해 PI제어기를 적용하였으며, PI제어기의 이득 K_P, K_I 는 Ziegler-Nichols가 제안한 스텝 응답법을 적용하여 $K_P = 1, K_I = 0.9$ 로 설정하였다.

2.2.2 교류주기제어기의 설계

위상각제어는 전압강하 및 비선형적 토크 특성을 갖는 저속영역에서는 불안정한 제어가 된다. 따라서 저속에서는 모터의 관성을 이용한 교류주기제어(on/off control)를 제안하였다. 모터의 속도 응답이 늦은 저속영역에 교류주기제어를 적용하여 불연속적인 회전자계와 회전자의 관성으로 일정속도를 유지하게 된다. n은 on주기를 m은 off주기를 나타내며, 부하전압 V는 식 (12)에 의해 실효치 공급전압으로 나타낸다.

$$V_o = V[n/(n+m)]^{1/2} \quad (12)$$

식 (13)은 on주기를 α 에서 β 라고 하여 on주기의 제어 전압을 실효치를 나타낸다.

$$V_o = \left[\frac{1}{2\pi(n+m)} \int_{\alpha}^{\beta} (\sqrt{2} V \sin \omega t)^2 (d\omega t) \right]^{1/2} \quad (13)$$

$$= V \left[\frac{1}{2\pi(n+m)} \left\{ (\beta - \alpha) + \frac{1}{2} (\sin 2\beta - \sin 2\alpha) \right\} \right]^{1/2}$$

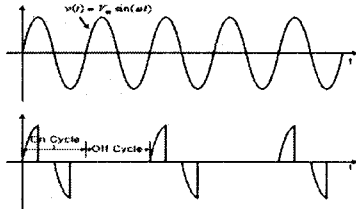


그림 6. 교류 주기 제어

그림 6은 교류주기제어방식을 이용한 공급전압을 나타낸다. 교류주기제어는 주기의 on구간과 off 구간의 비율을 가변함으로써 속도를 제어한다. 또한 임의의 위상각으로 on 구간과 Off구간의 비율을 가변함으로써 보다 정밀한 속도제어를 갖도록 설계하였다.

2.3 특성 해석

시뮬레이션을 위한 콘덴서 구동형 단상유도전동기의 파라미터는 표1에 제시하였다. 식 (10)의 토크방정식과 표1의 파라미터를 이용해 Matlab으로 시뮬레이션을 수행하였다.

표 1. 전동기의 파라미터

Parameter	Value
주권선 저항(R_M)	88.4496[Ω]
주권선 리액턴스(X_M)	95.6519[Ω]
보조권선 저항(R_A)	40.4573[Ω]
보조권선 리액턴스(X_A)	48.7085[Ω]
회전자 저항(R_2)	163.736[Ω]
회전자 리액턴스(X_2)	52.1172[Ω]
자화 리액턴스(X_m)	659.056[Ω]
권수비	1
입력전압(V)	220[V]

그림 7은 전압변화에 대한 속도-토크곡선을 나타내었다.

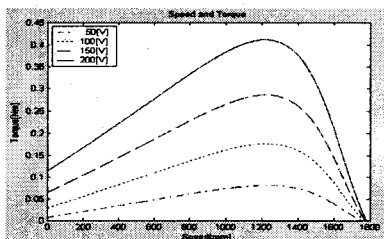


그림 7 전압 변화에 대한 토크-속도곡선

2.4 실험결과 및 고찰

콘덴서 구동형 단상유도전동기의 폭 넓은 속도제어를 위해 위상제어 모드와 주기제어 모드를 적용하였다. 또한, 위상제어 모드에서는 원활한 속도제어를 위해 평균 전압제어 방식을 적용하여 수행하였다. 그림 8은 본 논문에서 제안된 제어모드로 속도제어를 수행하여 전동기의 공급전압을 제어하는 스위칭 소자 Triac의 드레인파

소스 양단전압과 전동기의 일체형인 타코제너레이터로부터 정류된 현재속도에 대한 DC 레벨을 나타낸다.

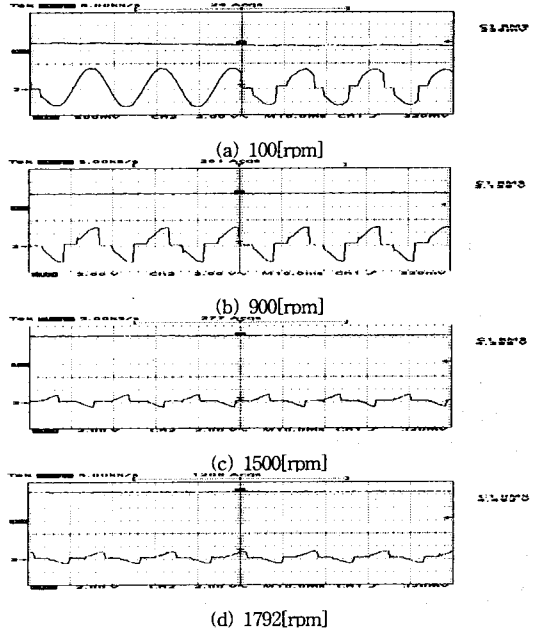


그림 8 SPIM의 공급전압 및 DC레벨

그림 8의 (a)는 교류주기제어를 적용하여 4주기 on과 2주기 off로 DC레벨 500mV/div에서 약 240[mV]를 나타내고 있다. 그림 8의 (b), (c), (d)는 위상제어를 적용하여 전동기 공급전압과 DC레벨을 900[rpm], 1500[rpm], 1792[rpm]에서 나타내었다. 그림 8의 (d)는 최대전압으로 DC레벨 2V/div에서 약 4.3[V]를 나타내고 있다.

3. 결 론

콘덴서 구동형 단상유도전동기는 전압강하 및 비선형적인 토크를 갖는 저속영역의 속도제어는 불안정하다. 본 연구에서는 단상유도전동기의 불안정한 속도제어를 갖는 저속영역에 교류주기제어를 제한함으로써 보다 폭 넓은 범위에서 속도제어가 가능하게 하였다. 40[W]급 콘덴서 구동형 단상유도전동기의 등가회로에서 구해진 토크식을 이용하여 Matlab으로 토크-속도곡선을 확인하였고, 실험을 통해 평균값위상제어와 교류주기제어는 1790~100[rpm]까지 비교적 폭 넓은 영역에서 속도제어가 이루어지는 것을 확인하였다. 그리고 보다 정밀한 제어를 위해 평균값의 위상 제어를 통해 단위 스텝 당 약 7[rpm]으로 일정하게 나타났다. 또한, PI제어기로 오차를 보상하여 속도성을 향상시킴으로써 부하변동에 빠른 응답을 나타내었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 백수현, "소형모터설계편람", pp 47~53
- [2] Longya Xu, "Dynamic Model of an Integral-Cycle Controlled Single-Phase Induction Machine", IEEE, Vol.7, No.4, Dec ember 1992.
- [3] W. Piyarat, P. Thepsatorn and Y. Paraken, "BRM Technique for Space Vector Decomposition Reactive Power of SPI M", IEEE, PEDS'99, July 1999
- [4] Syed A. Nasar, "Electric Machines and Power Systems", Volume 1, Electric Machines, McGraw-Hill, pp.143-201, 1995
- [5] M.Syed Jamil Asghar, "Smooth Speed Control of Single-Phase Induction Motors by Integral-Cycle Switching", IEEE, Vol. 14, No. 4, December 1999