

# 컨버터에 의한 자기제어형 영구자석 동기전동기의 PLL 속도제어

윤병도 김운호 최원범 이영재  
충청대학교 전기공학과

## Phase-Locked Loop Speed Control system of Converter-fed Self-Controlled PMSM

Yoon Byung Do, Kim Yoon Ho, Choi Won Beom, Lee Young Jae  
Dept. of Electrical Engineering, Chung-Ang University

### Abstract

A digital phase-locked loop speed control system of a self-controlled permanent magnet synchronous motor fed by a voltage source inverter is presented. This paper describes the hardware and software design of the system. Variable speed control system for self-controlled permanent magnet synchronous motor is proposed. Simulation results demonstrate the validity of proposed methods. This proposed control technique is implemented by using a microprocessor-based system.

### 1. 서론

영구자석 동기전동기는 소용량의 다양한 속도 제어에 사용되고 있다. 속도제어를 위한 피드백 제어 시스템에서 phase-locked loop는 정확한 속도제어를 얻을 수 있다.[1]

본 연구의 구성은 위상 제어 컨버터와 인버터에 의하여 영구자석 동기전동기에 전력을 공급하고, 위치센서와 속도검출기의 신호로써 제어회로를 구성한다.[2]

위상제어 컨버터를 사용하여 2상한 운동을 가능하게 하고, 집호각에 의해서 인버터에 인가되는 직류 전압을 가변하여 운전성능을 향상시키고자 한다. 전압인 인버터의 스위칭 주파수는 자기제어 루프에 의해 전동기의 회전 각속도와 일치하게 함으로써 영구자석 동기전동기의 구동을 간단하게 할 수 있다. PLL 속도 제어 시스템은 위상제어 컨버터에 속도변화에 따라서 집호각을 가변하여 V/F 제어에 의한 일정한 속도의 성능을 얻는다. 또한, 영구자석 동기 전동기의 자기제어 루프를 이용한 위치 검출이 고속에서도 정확함을 기술한다.

제한한 시스템에서는 회전자의 위상과 속도 오차 검출, 직류전압의 결정등 모든 제어함수를 디지털로 처리하였다.

본 논문은 첫째, 영구자석 전동기를 모델링하고, 둘째 PLL 제어 시스템을 설계하고, 셋째 제한한 시스템을 구성하고, 시뮬레이션 결과로써 시스템의 타당성을 검증한다.

### 2. 영구자석 동기전동기의 수학적 모델링

영구자석 동기전동기는 3상 고정자 권선과 영구자석 회전자와 정현파 역기전력을 가지고 있다. 회전자에서 유도되는 전류를 무시하면 다음과 같은 전압방정식을 얻을 수 있다.

$$[V] = [R][I] + [L] P[I] + [E] \quad (1)$$

여기서,

$$[V] = [V_a \ V_b \ V_c]^t$$

$$[R] = R_a [U]$$

$$[U] = \text{Unity matrix}$$

$$[L] = \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ca} \\ L_{ab} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{bc} & L_c \end{bmatrix}$$

$$[E] = [e_a \ e_b \ e_c]^t$$

$$[I] = [i_a \ i_b \ i_c]^t$$

$$P = d/dt$$

각 상인덕턴스가 동일하고 회전자의 위치에 따른 자기저항의 변화를 무시하면

$$L_a = L_b = L_c = L$$

$$L_{ab} = L_{bc} = L_{ca}$$

여기서,  $L_m$ 은 상호 인덕턴스이고,  $L_s$ 는 상당 자기인덕턴스이다.

인덕턴스 행렬은 다음과 같다.

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s & L_m & L_m \\ L_m & L_s & L_m \\ L_m & L_m & L_s \end{bmatrix}$$

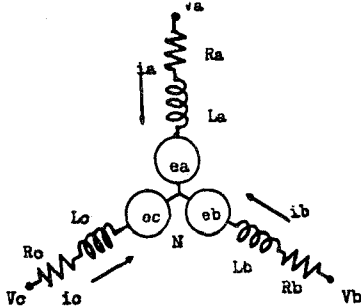


그림1. PMSM의 고정자 회로

그림1의 PMSM의 고정자 회로에서  $i_a + i_b + i_c = 0$  이 되어 다음의 인덕턴스 행렬을 얻는다.

$$[L] = \begin{bmatrix} L_s - L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_s - L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_s - L_m \end{bmatrix}$$

전압 방정식 (1)로부터 상태 방정식을 얻는다.

$$P[I] = [L]^{-1}([V] - [R][I] - [E]) \quad (2)$$

여기서,

$$[L]^{-1} = \begin{bmatrix} 1/(L_s - L_m) & 0 & 0 \\ 0 & 1/(L_s - L_m) & 0 \\ 0 & 0 & 1/(L_s - L_m) \end{bmatrix}$$

전기적 토오코르는

$$T_o = [e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c] / \omega_m \quad (3)$$

운동방정식은 다음과 같다.

$$P\omega_m = [T_o - T_L - B\omega_m] \quad (4)$$

여기서,  $T_L$ 은 부하토오코르이다. B는 마찰 계수이다. J는 전동기와 부하의 관성 모멘트이다.

### 3. PLL 제어기 설계

PLL 시스템은 속도지령치와 응답의 상차를 위상검출기에서 비교하고 그 오차를 필터에서 오차전압으로 만들어 VCO에 입력하여, 지령치와 동일한 위상을 갖도록 하는 수평동기 시스템이다. 본 연구에서는 VCO를 전동기로 보고, 필터는 PI 제어기와 같은 역할을 갖고 있다.

그림 2는 PLL 제어 시스템 블록선도이다.

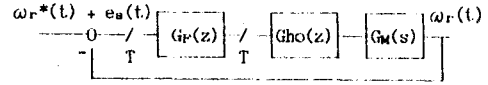


그림 2. PLL Control System

$G_{ho}(z)$  : zero-order hold 전달함수

$\omega_r^*(t)$  : 속도지령

$G_f(z)$  : 필터 전달 함수

T : 샘플링 주기

$G_m(s)$  : 전동기 전달 함수

$e_a(t)$  : 속도 편차

필터는 오차를 곱한 항과 적분한 항을 더해서 제어 입력으로 보내는 제어방법으로 다음 식으로 쓸 수 있다. [3].

$$G_f(z) = K_p + K_i \frac{T(z+1)}{2(z-1)} = \frac{(2K_p + K_i T)z + K_i T - 2K_p}{2(z-1)} \quad (5)$$

전동기의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_m(s) = \frac{K_t}{JLs^2 + (JR + BL)s + (K_t k_w + BR)} \quad (6)$$

여기서,

B : damping constant [N·m/rad·sec]

J : moment of inertia [kg·m<sup>2</sup>]

L : stator inductance [mH]

$K_t$  : torque constant [N·m/A]

$K_e$  : back emf constant [V/rad·sec<sup>-1</sup>]

R : stator resistance [ohms]

제로오더 홀더(zero-order holder)를 포함한 이산계의 전달함수  $G_{zM}(z)$ 는

$$G_{zM}(z) = G_{ho}(z)G_m(s) = (1-z^{-1})Z[G_m(s)/s] = \frac{Az + B}{(z+C)(z+D)} \quad (7)$$

계수 A, B, C, D는 전동기의 파라미터를 식(6)에 대입해서 z 변환한 값이다.

전체 전달함수는

$$G_f(z)G_{zM}(z) = \frac{(2K_p + K_i T)z + K_i T - 2K_p}{2(z-1)}$$

$$\times \frac{AZ + B}{(2+C)(2+D)} \quad (8)$$

$K_p, K_i$ 는 임의적으로 정할 수 있으므로, 전동기는 전달함수의 극점을 제거하기 위해 제어기에 영점을 만들면 선형적인 방정식 2개를 얻어 값을 구할 수 있다.

시스템에 안정한  $K_p, K_i, T$ 를 구하여 식(12)에 대입하여 보상한 시스템의 보드선도를 그림 3에 나타낸다.

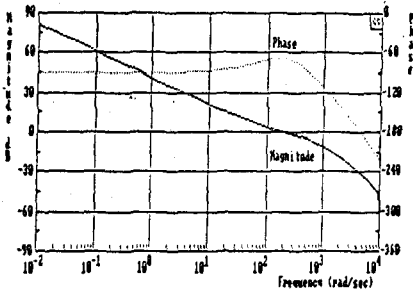


그림 3. 보상된 시스템의 보드선도

#### 4. 시스템의 구성

자기제어 루프는 인크리멘탈 엔코더의 펄스를 위치 검출기를 사용하여 위치를 마이크로프로세서에서 판별하여 인버터에 스위칭한다. Phase-Locked Loop는 속도 편차를 마이크로프로세서를 통해 보상한 전압편차를 D/A 변환하여 3상 교류전원과 동기시켜서 신호 증폭 회로에서 변조파와 펄프 비교하여 위상제어 컨버터에 인가한다. 전력 변환회로는 브랜치스터로 구성되었고, 그림 4는 시스템의 구성도이다.

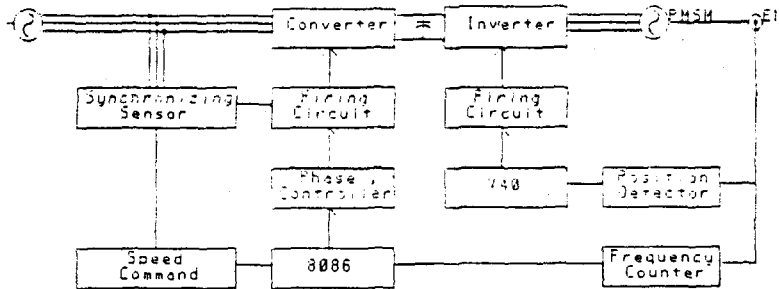


그림 4. 시스템 구성도

운전제어 흐름도는 다음과 같다.

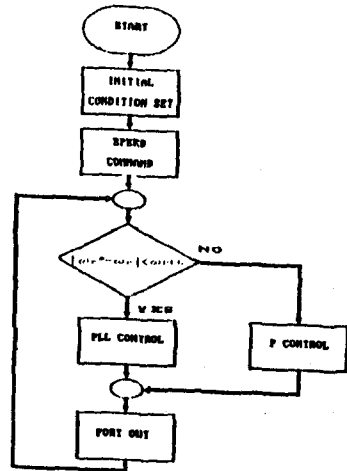


그림 5. 운전제어 흐름도

#### 5. 시뮬레이션 결과

그림 6은 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 2절의 (2), (4)의 상태방정식과 3절에서 구한 계인값으로 실행시킨 전류, 모모르, 속도 응답이다.

시뮬레이션에 사용한 전동기의 정격은 표 1에 표시하였다.

그림 6(C)의 속도에서 오버슈트없는 빠른 속도응답 특성을 나타내고 있다.

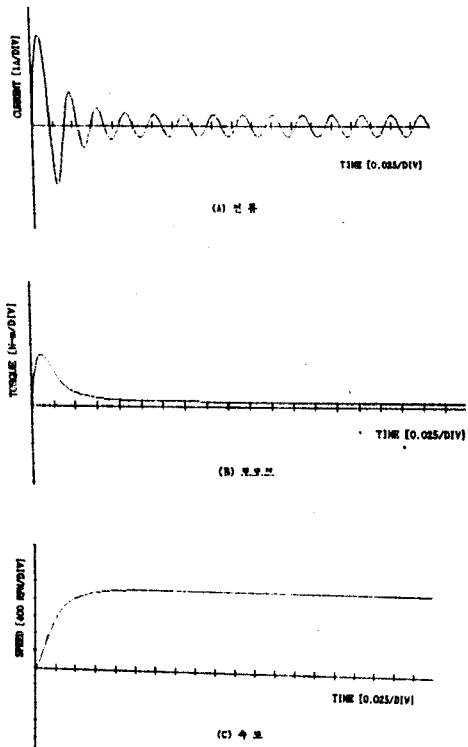


그림6. PMSM의 전류,토크,속도 특성

참고문헌

[1] N. V. Ahmed, "Time Domain Modelling and Digital Simulation of Variable-Frequency AC Motor Speed Control Using PLL Technique," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA19, no. 2, Mar/Apr, 1983.  
 [2] Fumio Harashina, "A Microprocessor-based PLL Speed Control System Converter-Fed Synchronous Motor," IEEE Trans. Ind. Elec. and Cont. Ins., vol. IEIC1-27, no. 3, Aug 1980.  
 [3] B.C. Kuo, Digital Control System, Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1980  
 [4] B. K. Bose, Power Electronics and AC Drives, Prentice-Hall, 1986  
 [5] Gerald T. Volpe, "A Phase-Locked Loop Control System for a Synchronous Motor," IEEE Trans. Auto. Cont., vol. AC-15, no. 1, Feb 1970.

표1. 영구자석 동기전동기의 정격

정격출력 200[W]	정격회전수 2500[rpm]
정격전류 3.1[A]	정격토크 7.25[kg-cm]
정격전압 120[V]	극 수 2극
상당 저항 3.61[Ω]	상당 인덕턴스 16.0[mH]
관성 0.0043[kg-cm-s <sup>2</sup> ]	토크상수 3.54 kg-cm/A]
유기전압상수 0.021[V/rpm]	
점성마찰계수 0.000129[Nm/rad/s]	

6. 결론

본 논문에서는 PLL 시스템을 사용하여 빠른 영구자석 동기전동기의 속도제어의 응답과 PLL 제어기의 시스템 파라미터 결정을 연구하였다. 정현파 PWM을 사용한 자기제어를 디지털적으로 실현한 영구자석 동기전동기 구동시스템을 설계하였고, 마이크로프로세서에 의한 제어기의 구성으로 시스템을 간단하게 하였다.

제안한 시스템이 오류비슈트없는 빠른 특성을 검증하였다.