

# 매트릭스 컨버터에 의한 AC 서보 영구자석형 동기전동기의 제어기 설계에 대한 고찰 : 속도제어기

정충일<sup>†</sup>, 이상철, 모동영, 최창영, 김태웅, 박귀근<sup>†</sup>  
<sup>†</sup>LG전자, 경상대학교

## Study on Controller Design of AC Servo Permanent Magnet Synchronous Motor by Matrix Converter : Speed Controller

Chung-II Jeong<sup>†</sup>, Sang-Cheol Lee, Dong-Yeong Mo, Chang-Young Choi, Tae-Woong Kim, Gwi-Geun Park<sup>†</sup>

<sup>†</sup>LG Electronics, GyeongSang National University

### ABSTRACT

This paper deals with the design for speed controller to drive PMSM by matrix converter without DC-link circuit as the power conversion system of AC servo motor drive. To design the speed controller of PMSM drive, the closed-loop transfer function of speed controller is calculated and then the frequency-domain response characteristics are analyzed by bode plot using Matlab. Based on the results by bode plot, the speed control gains are determined. As the real effects of controller designed in the frequency-domain display in the time-domain, the performance of speed controller is confirmed by the step response of speed controller. The design examples are shown and its validity of the design method mentioned in the paper is verified through PSIM simulation.

### 1. 서론

현재 대부분 AC 서보모터를 구동하기 위한 전력변환시스템으로서 다이오드 정류기 및 PWM 컨버터(AC-DC 변환)와 PWM 인버터(DC-AC 변환)를 결합한 간접형 AC-AC 전력변환장치를 사용하고 있다. 이러한 방식은 AC-DC 컨버터와 DC-AC 인버터 사이에 직류 리액터와 대용량 평활용 전해콘덴서로 구성된 DC-link 회로를 포함하고 있어 전체 전력변환시스템의 크기가 커지는 원인이 된다. 그리고 특히 정류다이오드를 이용한 AC-DC 전력변환장치는 고조파 전류의 원인이 되며, 이는 전력계통에 대한 전력품질 저하시키는 원인이 될 뿐만 아니라 이를 제거하기 위해서는 큰 용량의 AC 입력필터가 요구된다.<sup>[1]-[2]</sup> 이는 전체 시스템의 크기를 키우게 하는 또 다른 요인이기도 하다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 AC 서보모터를 구동하기 위한 전력변환시스템으로 직접형 AC-AC 전력변환장치인 매트릭스 컨버터를 이용하여 AC 서보용 영구자석형 동기모터(PMSM)를 구동하기 위한 속도제어기 설계에 대하여 고찰한다.

그림 1에 보여준 매트릭스 컨버터는 직접 AC-AC 전력변환시스템으로서 기존의 전력변환시스템과는 달리 9개의 양방향 스위치로 구성되어 있으며, DC-link 회로를 포함하고 있지 않아 전체 시스템의 크기를 작게 하는 것이 가능하며, AC 입력필터 역시 기존의 필터보다 작은 용량으로 고조파 전류를 제거할 수 있어 전력변

환시스템의 사이즈를 작게 할 수 있다.<sup>[4]-[7]</sup> 또한 4상한 운전을 쉽게 구현할 수 있으며 뛰어난 역률제어능력도 지니고 있다. 그러나 입력과 출력의 직접적인 연결로 인해 낮은 전압이용률을 나타내며, 입력의 외란에 민감하다. 그리고 많은 스위칭소자를 사용하기에 제어기법이 복잡하다는 단점이 있지만 새로운 제어기법 그리고 스위칭 소자와 마이크로프로세서의 발달로 이를 구현할 수 있게 되었다.

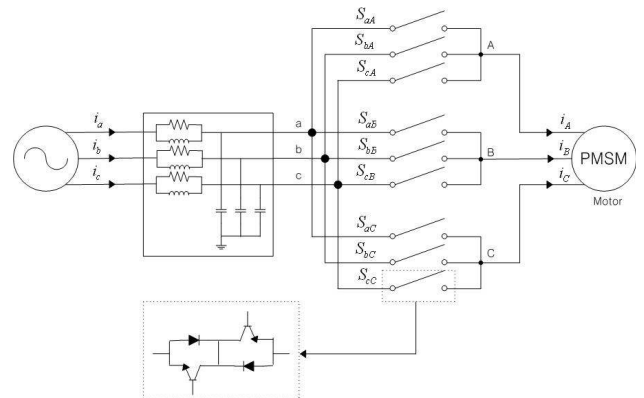


그림 1 매트릭스컨버터의 구조  
 Fig. 1 Configuration of matrix converter

PMSM의 PI 제어기를 설계하기 위해 각 제어기의 페루프 전달함수를 구한 후 전달함수의 보드선도를 통해 주파수응답특성을 분석하여 적절한 응답특성과 오버슈트를 가지면서 안정한 제어시스템이 되도록 제어기의 게인을 설정해야 한다. 주파수영역에서 제어시스템을 설계하면 설계과정이나 변수에 약간의 오차가 있더라도 제어시스템의 성능이 어느 정도 보장되기 때문에 시간영역에서 설계하는 것에 비해 상당히 견실한 제어시스템을 구성할 수 있으며 시간을 절약할 수 있다.

특히 본 논문에서는 Matlab을 기반으로 하여 속도의 PI 제어기에 대한 게인튜닝하는 방법에 대하여 논하였으며, PSIM 시뮬레이터를 이용하여 매트릭스 컨버터, 제어기 그리고 PMSM을 함께 구성한 가상실험을 통해 이에 대한 고찰결과를 확인한다.

### 2. 제어기 설계

#### 2.1 제어기 설계를 위한 기본원리

보드선도를 이용하여 주파수 영역에서 제어시스템의 응답특성

을 분석하여 PI 제어기의 게인을 설정한 후, 이에 따른 시간영역에서의 계단응답을 확인한다. 주파수응답특성을 고찰할 시에는 대역이득, 차단주파수, 대역폭, 공진주파수, 공진최대치 그리고 안정도 여유를 고려한다. 대표적으로 대역폭과 공진최대치를 고려하여 비례적분(PI) 제어기의 각 게인을 설정한다. 대역폭은 저주파 영역에서의 대수이득  $20\log|G(j\omega)|$ 로부터, 대수이득이  $-3\text{dB}$ 로 떨어졌을 때의 주파수이며, 제어시스템이 입력신호를 잘 재생해 내는 정도를 표현하는 척도로서, 시간 영역의 상승시간과 밀접한 관계가 있다. 일반적으로 대역폭이 넓어질수록 제어시스템의 응답성능이 좋아진다. 공진주파수는 주파수 응답의 크기가 주변 주파수에서의 크기보다 커지는 부분의 주파수이며, 공진최대치는 공진주파수에서의 크기를 나타낸다. 주파수 영역에서 제어시스템을 설계할 경우, 페루프 시스템의 주파수응답은 공진최대치의 크기를 억제하고 대역폭을 크게 설정하여 오버슈트를 줄이고 응답속도를 빠르게 하는 것이 바람직하다.

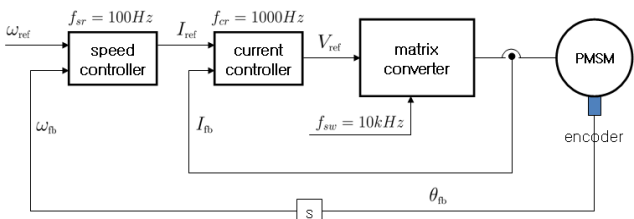


그림 2 AC 서보용 PMSM의 제어시스템(대역폭 설정)  
Fig. 2 Control system of AC servo PMSM(bandwidth setting)

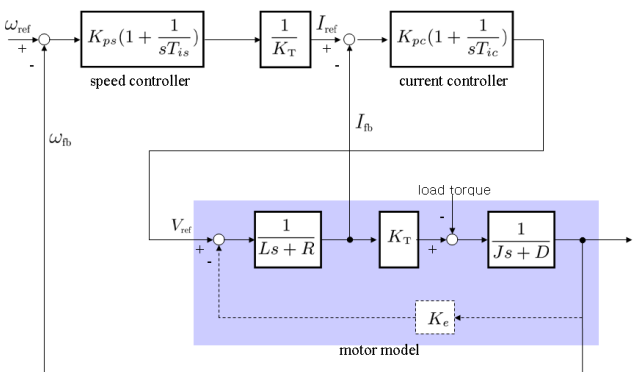


그림 3 전류 및 속도루프의 PI 제어기 구성  
Fig. 3 Configuration of PI controller

## 2.2 PMSM 제어시스템의 제어기 게인설정 방법

그림 2에 PMSM의 전체 제어시스템을 나타낸다. 센서를 통해 검출된 위치 및 전류정보가 각각 속도제어기와 전류제어기로 피드백 되어진다. 본 논문에서는 임의적으로 캐리어 주파수를  $10\text{kHz}$ , 전류응답 주파수를  $1\text{kHz}$ , 속도응답 주파수를  $100\text{Hz}$ 로 설정하였다. PMSM의 전압/전류 방정식과 운동 방정식은 각각 식 (1)과 (2)와 같다.<sup>[5]</sup> 식 (1)의 오른쪽 1항은 비례요소, 2항은 미분성분으로 정상상태에서는 무시가능하고, 3항은 피드포워드 요소로 적분기로 보상가능하다. 식 (2)의 1항은 비례요소, 2항은 미분성분으로 정상상태에서는 무시가능하고, 3항은 외란으로서 적분기로 보상하면 된다. 상기의 내용을 기반으로 하여 제어기를 전류 및 속도의 PI 제어기 형태로 식 (1) 및 (2)를 대체하면 식 (3) 및 (4)를 각각 얻을 수 있고,<sup>[9]</sup> 이를 블록선도화 한 것을 그림 3에 보여준다. 본 논문에서는 특히 속도제어기를 중심으로 하여 제어기설계에 대해 설명하도록 한다.

$$V_q = R i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega (L_d i_d + \lambda_{af}) \quad (1)$$

$$T_e = D\omega + J \frac{d}{dt} \omega + T_L \quad (2)$$

$$V_q^* = K_{pc} \left(1 + \frac{1}{sT_{ic}}\right) (i_q^* - i_q) + \omega (L_d i_d + \lambda_{af}) \quad (3)$$

$$T_e^* = K_{ps} \left(1 + \frac{1}{sT_{is}}\right) (\omega^* - \omega) \quad (4)$$

여기서  $V_d$ 와  $V_q$ 는 d, q축 전압,  $R$ 은 고정자 저항,  $i_d$ 와  $i_q$ 는 d, q축 고정자 전류,  $L_d$ 와  $L_q$ 는 d, q축 인덕턴스,  $\lambda_{af}$ 는 쇠교자속,  $J$ 는 이너서,  $D$ 는 댐핑 상수,  $T_L$ 은 부하,  $T_e$ 는 발생토크,  $\omega$ 는 각속도,  $K_{pc}$ 와  $T_{ic}$ 는 각각 전류제어기의 비례게인과 적분시간이고  $K_{ps}$ ,  $T_{is}$ 는 각각 속도제어기의 비례게인과 적분시간을 나타낸다.

속도제어기를 설계하기 위해서는 우선적으로 전류제어기의 응답주파수를 속도제어기에 비해 충분히 크도록 설정해야 하는데 본 논문에서는  $1000\text{Hz}$ 로 미리 설정하였다. 이를 바탕으로 하여 속도제어기의 응답주파수  $f_{sr}$ 은  $100\text{Hz}$ , 비례게인은  $K_{ps} = 2\pi f_{sr} J$ 로 결정하여 대역폭  $\omega_B = 718\text{rad/s}$ 로 얻었으며, 적분시간  $T_{is}$ 의 변화에 따른 시스템의 주파수응답과 계단응답을 그림 4와 5에 각각 나타내었다. 본 결과를 통해 적분시간  $T_{ic}$ 가 점점 작아짐에 따라 제동비  $\zeta$ 도 작아지고 오버슈트가 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 대역폭  $\omega_B$ 는 점점 커져 시스템의 응답속도가 빨라지는 것을 볼 수 있으며 이는 그림 5의 계단 응답을 통해서도 확인할 수 있다.

- step 1 속도제어루프의 관계 하에 시스템의 응답주파수 설정
- step 2 비례제어기만을 포함한 시스템의 페루프 전달함수  $T(s)_{\text{closed1}}$  구함
- step 3  $T(s)_{\text{closed1}}$ 의 보드선도를 통해  $\omega_B = 2\pi f_r$ 을 만족시키는 비례게인  $K_p$  결정
- step 4 비례적분제어기를 포함한 시스템의 페루프 전달함수  $T(s)_{\text{closed2}}$ 를 구함
- step 5  $T(s)_{\text{closed2}}$ 의 보드선도를 통해 사용자 요구사항( $\omega_B$ ,  $M_r$ )에 맞는 적분시간  $T_i$  결정
- step 6  $T(s)_{\text{closed2}}$ 의 계단응답을 확인한 후, 만족스런 결과를 얻지 못한 경우 step 1 과정으로 되돌아가 재설계

## 3. 시뮬레이션

### 3.1 시스템 구성

사용한 AC 서보모터는 영구자석형 동기전동기(Metronics사의 APM-SAR3ACN)이다. 속도제어기와 전류제어기의 게인(응답주파수)은 각각  $100\text{Hz}$ ,  $1000\text{Hz}$ 로 설정하였다. 보호회로는 다이오드 정류기를 입력단과 출력단에 연결하고 R과 C와 함께 병렬로 연결하여 구성하였다.<sup>[3][4]</sup> 입력 필터는 LC 필터의 L에 감쇄저항 R을 병렬로 연결하여 LRC 필터를 구성하였다.<sup>[2]</sup> 그림 6은 PSIM에 의한 시뮬레이션의 전체 시스템의 블록 다이어그램을 보여준다. 매트릭스 컨버터를 제어하기 위하여 공간벡터변조방식을 사용하였고 이를 위해서 샘플링 주기마다 입력전압, 출력전류 그리고 위치정보를 검출한다. 그리고 실시간으로 각 상전류의 방향을 검출한다. 입력과 출력의 전압과 전류에 대한 각각의 공간벡터의 조합으로 공간벡터 시간을 계산하고 이를 이용하여 스위치 상태를 검출한다. 그리고 실시간으로 각 상전류의 방향을 검출하여 전류방향에 따른 스위칭을 통해 PWM 신호를 발생한다.

## 4.2. 시뮬레이션 결과

그림 6은 계단지령속도에 대한 시뮬레이션 결과파형으로서 지령속도를 1000rpm의 계단으로 주었을 때 과도응답 시 약 20%의 오버슈트를 나타내고 있으며 50ms 후 정상상태에 도달하였다. 그리고 70ms에 모터정격토크의 20%를 부하로 10ms동안 인가하였다. 부하의 계단인가 시 모터의 속도가 감소하고 전류가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

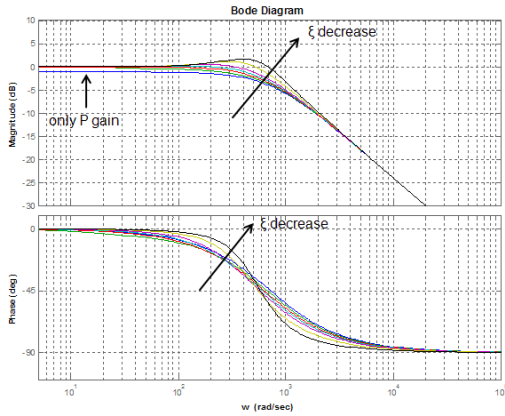


그림 4 댐핑요소에 따른 속도제어기의 주파수응답특성곡선  
Fig. 4 Frequency response characteristic of speed controller by  $\xi$  change

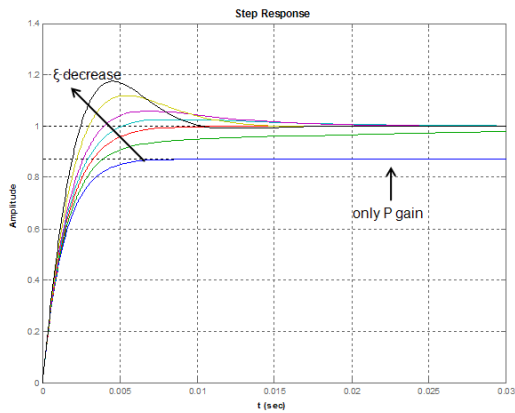


그림 5 댐핑요소에 따른 속도제어기의 계단응답관계  
Fig. 5 Step response of speed controller by  $\xi$  change

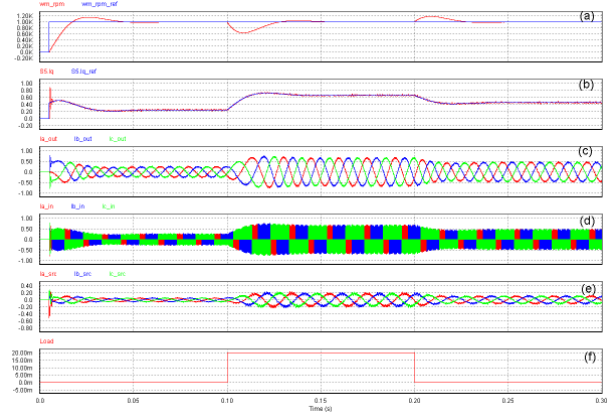


그림 6 계단지령속도 및 부하에 따른 시뮬레이션 파형  
Fig. 6 Simulation waveform at reference speed step: (a) speed, (b) q-axis current, (c) 3 phase output current, (d) 3 phase input current before AC filter, (e) 3 phase input current after AC input filter, (f) load change

## 4. 결론

본 논문에서는 매트릭스 컨버터를 이용하여 서보 PMSM을 구동하기 위한 속도 제어기 설계기법을 고찰하였다. 매트릭스 컨버터 시스템은 기존의 간접형 AC-AC 전력변환시스템보다 고조파 전류가 감소되고 전체 시스템의 크기를 소형화할 수 있는 장점이 있다. 속도 PI 제어기의 게인설정은 Matlab을 기반으로 하여 보드 선도를 통해 주파수 영역에서 제어기의 특성을 분석하여 제어기를 게인튜닝하였다. 제어기 설계 시 고려해야 할 주파수 영역 특성요소 중 대역폭과 공진 최고값을 고려하여 게인튜닝을 수행하였으며 Matlab을 이용함으로써 손쉽게 주파수 영역 특성분석이 가능하였다. 마지막으로 PSIM을 이용한 시뮬레이션의 수행결과에 의해 제안한 설계기법의 타당성을 입증하였다.

## 참고 문헌

- [1] "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems," IEEE Std 519-1992, 1993.
- [2] T.W. Kim, H.S. Kim, and J.H. Choi, "Input Filter Design for Current Source PWM GTO Converter," PCC- Yokohama pp.32-37, 1993.
- [3] L. Huber and D. Borjovic, "Space Vector Modulated Three-phase to Three-phase Matrix Converter with Input Power Factor Correction," IEEE Trans. on IA, vol.31, pp.1234-1246, 1995.
- [4] 김성곤, 김주진, 김태웅, 박기락, 최재호, "3상 직접형 AC/AC 컨버터의 효율개선", 전력전자추계학술대회 논문집, pp.208-212, 2004.
- [5] T.W. Kim, "서보 동기전동기 제어시스템 기초설계", 교류서보 전동기 제어시스템 실무교육 Workshop, 2005.