

서보전동기의 제어시스템 설계고찰

김 태 응

(경상대 제어계측공학과 부교수)

본 글에서는 서보전동기의 제어시스템에 대한 설계방법을 고찰하고자 한다. 서보전동기의 제어기를 설계하기 위해 각 제어기의 폐루프 전달함수를 구한 후 보드선도를 이용하여 주파수영역응답 특성을 분석한 결과를 기반으로 전류 및 속도제어기를 설계한 후 계단시간응답을 통하여 설계한 제어기의 성능을 확인한다. 그리고 제안한 제어기 설계방법에 대한 설계예시를 보였으며 설계기법의 타당성을 입증하기 위해 PSIM 시뮬레이터를 이용하여 시뮬레이션을 수행한다.

1. 서론

서보전동기를 구동하기 위한 전력변환시스템으로 직접형 AC-AC 전력변환장치인 매트릭스 컨버터를 이용하여 AC 서보용 영구자석형 동기모터(PMSM)를 구동하기 위한 속도제어기 설계에 대하여 고찰한다.

서보전동기의 PI 제어기를 설계[1],[2][3],[4]하기 위해 각 제어기의 폐루프 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 고찰하며, PSIM 시뮬레이터를 이용하여 매트릭스 컨버터, 제어기 그리고 PMSM을 함께 구성한 시뮬레이션을 통해 제어시스템의 제어기설계에 대한 결과를 확인한다.

2. 제어시스템의 설계

제어시스템의 설계를 하기 위해서는, 먼저 주어진 제어대상에 특성을 파악한 후, 제어대상을 포함한 시스템의 안정도를 판별하는 기법을 이해해야 한다. 다음으로는 제어시스템(예, 서보전동기의 위치제어)의 구성형태를 정한 후 각각의 요소에 대한 관계를 파악하여 각 요소의 게인을 설정하는 방법을 선택해야 한다.

- 제어대상 : 모터
- 안정도판별법 : 특성방정식의 근의 해, 라우스후르위츠 안정도 판별법, 근궤적, 나이키스트선도, 보드선도
- 제어시스템의 구성 : 인버터, 전류제어기, 속도제어기, 위치제어기, 전류센서, 엔코더, 기타
- 요소의 게인 설정방법 : 제어기의 게인설정인 경우에 모델기반 PID 게인조정법과 경험적인 조정법(지글러-니콜스 조정법, 임계진동 게인 조정법, 1/4 감쇠 게인 조정법 등)

2.1 안정도

제어시스템은 미분방정식으로 표현되며 이에 대한 시스템의 전체응답은 식 (1)과 같이 과도상태와 정상상태로 나누어진다. 이 중 과도상태응답은 주어진 시스템의 안정도판별에 이용되며 지수함수(exponential function)의 형태 e^{st} 로 주어지며 지수(s)가 음일 경우에는 시간이 지날수록 영으로 수렴하여 안정하게 되고, 이와 반대로 양일 경우에는 불안정하게 되어 시스템이 발산하게 된다. 과도상태응답이 안정하다고 할 때에 정상상태응답은 입력이 유한한 값일 경우에 유한한 값으로 출력된다.

$$y = y_h + y_p = y_i + y_s \quad (1)$$

여기서 y 는 시스템의 전체응답, y_h 와 y_i 는 과도상태응답, y_p 와 y_s 는 정상상태응답을 의미한다.

2.2 P/I/D 제어기

제어시스템을 제어하여 원하는 성능을 얻기 위해서는 일반적으로 P/I/D제어기가 사용하며 이에 대한 제어기의 개별 역할 및 특징을 이해한다면 적절한 조합을 가진 제어기를 선택하여 사용할 수 있다. 표 1에서 보여주듯이 비례(P)계인은 지령입력에 대해 출력이 항상 편차를 지니고 있으며 이를 줄이기 위해 비례계인만으로는 어렵다. 이를 보상하기 위해 적분(I)계인과 병렬로 연결하여 비례적분(PI)계인으로 구성하여 적용하면 좋은 성능(편차의 최소화 및 속응성의 향상)을 얻을 수 있다. 그러나 적분계인은 주어진 제어시스템을 불안정하게 하는 요소가 포함되어 있기 때문에 시간응답특성 및 주파수응답특성을 관찰함으로써 이를 적절하게 설정해야 한다. 그리고 속응성을 더욱 향상시키기 위해서는 미분(D)계인을 비례적분제어기와 병렬로 연결하여 조합된 비례적분미분(PID)제어기를 구성할 수 있으며 식 (2)와 같이 표현할 수 있으며 또한 그림 1에 이에 대한 구성을 보여준다.

$$K_p(1 + \frac{1}{T_i} \int dt + T_d \frac{d}{dt}) = K_p(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d) \quad (2)$$

여기서 K_p : 비례계인, T_i : 적분시간, T_d : 미분시간

표 1 P/I/D 제어기의 개별 역할 및 특징

제어기 요소	역할	특징
비례계인	오차에 비례	편차존재 현재성분요소
적분계인	오차의 누적에 비례	편차의 최소화 가능 과거성분요소
미분계인	오차의 변화율에 비례	속응성 향상 가능 미래성분요소

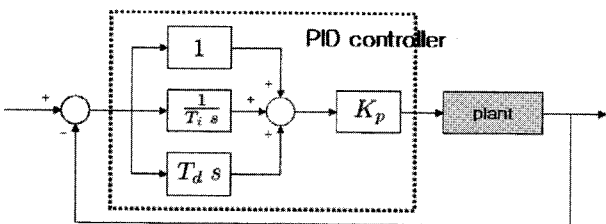


그림 2 제어시스템의 비례적분미분제어기의 구성

PID제어기의 미분계인은 퍼워드보상과 같은 요소를 내포하고 있기 때문에 주어진 제어시스템의 정확하게 파악하지 못하면 시스템이 손쉽게 불안정하게 된다. 상기와 달리 P/I/D의 다른 조합도 있으며 이에 대한 조합의 종류 및 특징은 표 2에 보여준다.

2.3 제어기 설계의 기본지침

주어진 시스템에 대한 제어기 성능정도를 표현할 때에 일반적으로 주파수응답특성이란 용어를 사용한다. 이에 대한 평가방법으로는 나이퀴스트선도와 보드선도가 있는데 이중 보드선도가 가장 실용적인 수단으로서 이론적 해석 및 실험적 해석 측면에서 제어시스템의 성능평가를 수행할 때에 다른 방법보다 많이 사용하고 있다.

2.3.1 보드선도

주파수응답이란, 입력신호인 정현파함수의 주파수가 0에서부터 임의 설정주파수까지 변화(sweep)하는 경우에 나타나는 정상상태 출력신호의 크기와 위상에는 변화가 있지만 주파수는 입력신호와 동일한 정현파로 나타나는 것을 말한다. 이처럼, 정현파 입력의 주파수에 대한 시스템 전달함수 크기와 위상을 주파수영역에서 나타낸 그래프를 보드선도라고 하며, 페루프전달함수 $T(s)$ 를 단위인 주파수에 대하여 $T(s)$ 의 크기와 위상을 동시에 표시한 그래프이며 그림 3에 보여준다.

2.3.2 주파수응답특성

주파수응답특성분석 요소에는 대역계인 G_B , 차단 주파수 ω_c , 대역폭 ω_B , 공진주파수 ω_r , 공진 최대치 M_r , 그리고 안정도 여유 S_{margin} 가 있다. 본 논문에서는 대표적으로 대역폭, 공진주파수 그리고 공진 최고값을 기준으로 제어기의 계인을 설정하였다. 대역폭은 저주파 영역에서의 대수계인(단위, 데시벨)으로부터, 대수계인이 -3dB로 떨어졌을 때의 주파수이다. 대역폭은 시스템이 입력신호를 잘 재생해

표 2 P/I/D 제어기의 조합 및 특징

제어기 모드	사용빈도	비고
P	3	가끔 사용
PI	5	일반적으로 많이 사용
PD	1	매우 드물게 사용
PID	4	가끔 사용하지만
I	1	P모드를 사용할 수 없는 특수상황에 사용
ID	1	I모드 대신하여 사용하는 경우
D	0	사용하지 않음
I-P	3	가끔 사용하며 오버슈트 억제가능 PI와 하이브리드 형태로 사용

내는 정도를 표현하는 척도로서, 시간 영역의 상승시간과 밀접한 관계가 있다. 일반적으로 대역폭이 넓을수록 시스템의 응답이 빨라진다. 공진주파수는 주파수 응답의 크기가 주변 주파수에서의 크기보다 커지는 부분의 주파수이며, 공진 최대치는 공진주파수에서의 크기를 나타낸다. 일반적인 2차 시스템의 경우 ω_B , ω_r , M_r 은 고유진동수 ω_n , 감쇠비 ζ 와 각각 식 (3), (4), (5)의 관계가 있으며 감쇠비에 따른 주파수응답과 계단응답을 그림 3과 4에 보여준다. 감쇠비가 작을수록 대역폭이 커지고 응답이 빨라지만 오퍼슈트가 커지고 진동이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 주파수영역에서 제어시스템을 설계할 경우, 페루프 시스템의 주파수응답은 공진최대치의 크기를 억제하고 대역폭을 크게 하여 오퍼슈트를 줄이고 응답을 빠르게 하는 것이 바람직 하다.

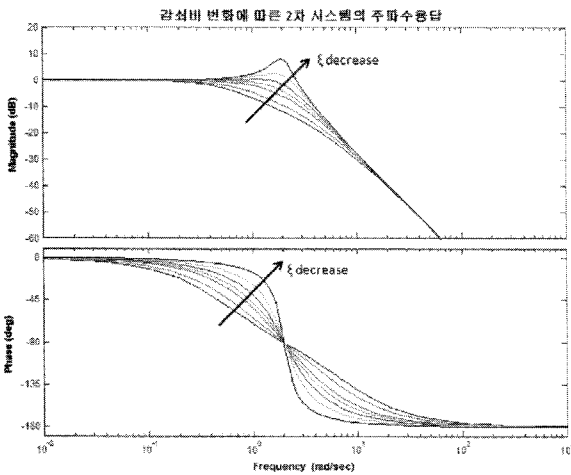


그림 3 댐핑요소에 따른 제어기의 주파수응답특성

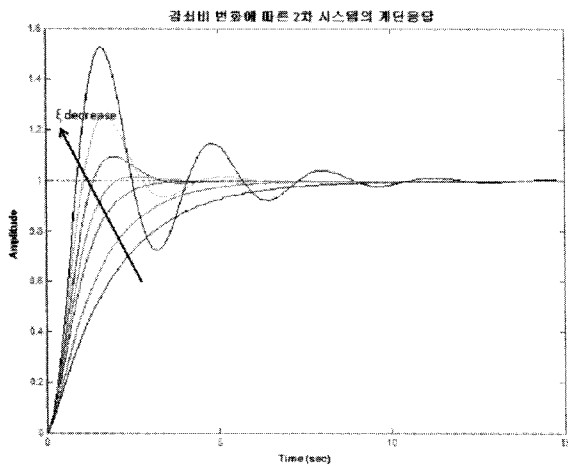


그림 4 댐핑요소에 따른 제어기의 계단시간응답특성

$$\omega_B / \omega_n = -1.19\zeta + 1.85 \quad (3)$$

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad \text{at } 0 < \zeta < 1/\sqrt{2} \quad (4)$$

$$M_r = \begin{cases} \frac{1}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}} & \text{at } 0 < \zeta < 1/\sqrt{2} \\ 1, & \text{at } 1/\sqrt{2} < \zeta \end{cases} \quad (5)$$

2.4 제어시스템의 게인 설정

주어진 제어시스템에 대한 제어기 설계는 그림 5를 기반으로 다음과 같은 요소를 고려하여 수행해야 하며 각각의 요소에 대한 관계를 정확하게 이해해야만 우수한 서보성능(응답 주파수특성)을 얻을 수 있다.

- PWM 인버터시스템의 캐리어주파수
- 전류제어기의 제어주기
- 속도제어기의 제어주기
- 위치제어기의 제어주기
- 전류 및 위치검출기의 분해능 및 기타 지연요소

2.4.1 제어기의 설계고찰

그림 6에 PMSM의 전체 제어시스템을 나타낸다. 센서를 통해 검출된 위치 및 전류정보가 각각 속도제어기와 전류제어기로 피드백 되어진다. 본 논문에서는 임의적으로 캐리어 주파수를 10kHz, 전류응답 주파수를 1kHz, 속도응답 주파수를 100Hz로 설정하였다. PMSM의 q축 전압/전류 방정식 (d축 전압방정식은 유사하므로 생략)과 운동 방정식은 각각 식 (6), (7)과 같다.

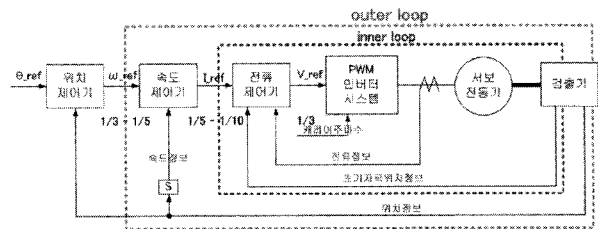


그림 5 서보전동기의 제어시스템에 대한 대역폭 설정관계

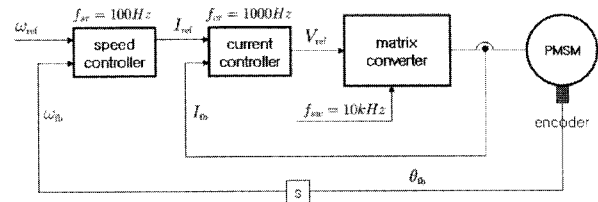


그림 6 AC서보용 PMSM의 제어시스템(대역폭 설정)

$$V_q = Ri_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega(L_d i_d + \lambda_{af}) \quad (6)$$

$$T_e = D\omega + J \frac{d}{dt} \omega + T_L \quad (7)$$

여기서, V_d 와 V_q 는 d, q축 전압, R 은 고정자 저항, i_d 와 i_q 는 d, q축 전류, L_d 와 L_q 는 d, q축 인덕턴스, λ_{af} 는 쇠교자속, K_T 는 토크상수, P 는 pole pair, J 는 inertia, D 는 댐핑상수, T_L 은 외란, T_e 는 발생토크, ω 는 속도이다.

식 (6)의 오른쪽 제1항은 비례요소, 제2항은 미분성분으로 정상상태에서는 무시가능하고, 제3항은 퍼워드 요소로 적분기로 보상가능하다. 식 (7)의 제1항은 비례요소, 제2항은 미분성분으로 정상상태에서는 무시가능하고, 제3항은 외란으로서 적분기로 보상하면 된다. 상기의 내용을 기반으로 하여 제어기를 전류 및 속도의 PI 제어기 형태로 식 (6) 및 (7)을 대체하면 PI제어기를 포함한 새로운 전압-전류 방정식과 운동 방정식을 식 (8) 및 (9)와 같이 표현해 낼 수 있으며 이를 블록선도로 나타낸 것이 그림 7과 같이 된다.

$$V_q^* = K_{pc} \left(1 + \frac{1}{sT_{ic}}\right) (i_q^* - i_q) + \omega(L_d i_d + \lambda_{af}) \quad (8)$$

$$T_e^* = K_{ps} \left(1 + \frac{1}{sT_{is}}\right) (\omega^* - \omega) \quad (9)$$

여기서 V_q^* 는 q축 지령전압, i_q^* 는 q축 지령전류, ω^* 는 지령속도, K_{pc} 와 T_{ic} 는 각각 전류제어기의 비례계인과 적분시간, K_{ps} , T_{is} 는 각각 속도제어기의 비례계인과 적분시간이다.

- step 1 : 각 제어루프의 관계 하에 시스템의 응답주파수 설정
- step 2 : 비례제어기만을 포함한 시스템의 폐루프 전달함수 $T(s)_{closed1}$ 구함
- step 3 : $T(s)_{closed1}$ 의 보드선도를 통해 $\omega_B = 2\pi f_r$ 을 만족시키는 비례계인 K_p 결정
- step 4 : 비례적분제어기를 포함한 시스템의 폐루프 전달함수 $T(s)_{closed2}$ 를 구함
- step 5 : $T(s)_{closed2}$ 의 보드선도를 통해 사용자 요구사항

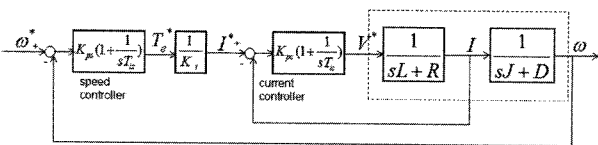


그림 7 전류 및 속도 PI제어기의 구성

(ω_B, M_r)에 맞는 적분시간 T_i 결정

- step 6 : $T(s)_{closed2}$ 의 계단응답을 확인한 후, 만족스런 결과를 얻지 못한 경우 step 1 과정으로 되돌아가 재설계

2.4.2 속도제어기 설계에서

- step 1 : 속도제어기 응답주파수는 전류제어기 응답주파수의 1/100인 100Hz로 설정
- step 2 : 비례제어기만을 포함한 폐루프 전달함수 $T(s)_{closed1}$ 계산
- step 3 : 상기의 step 2에서 구한 $T(s)_{closed1}$ 의 보드선도를 통하여 $\omega_B = 2\pi f_r$ 를 만족하는 비례계인 K_{ps} 을 결정하고 응답속도를 좀 더 빠르게 하기 위하여 ω_B 를 $2\pi f_{sr}$ 보다 좀 더 크게 하여 대역폭 ω_B 가 718rad/s이 되도록 K_{ps} 는 $2\pi f_{sr} J$ 로 결정
- step 4 : 비례와 적분 제어기를 포함한 폐루프 전달함수 $T(s)_{closed2}$ 계산
- step 5 : 상기의 step 4에서 구한 $T(s)_{closed2}$ 의 보드선도를 통해 (3)에서 구한 대역폭 ω_B 와 오버슈트 최고값 M_r 을 고려하여 T_{is} 결정 (보드선도를 통해 적분시간 T_{is} 의 변화에 따른 시스템의 주파수 응답 특성을 별도로 정리하여 참조할 것)
- step 6 : $T(s)_{closed2}$ 의 시간영역에서의 계단응답 확인 후, 만족스런 결과를 얻지 못한 경우 step 1 과정으로 되돌아가 재설계

속도제어기를 설계하기 위해서는 우선적으로 전류제어기의 응답주파수를 속도제어기에 비해 충분히 크도록 설정해야 하는데 본 논문에서는 1000Hz로 미리 설정하였다. 이를 바탕으로 하여 속도제어기의 응답주파수 f_{cr} 은 100Hz, 비례계인은 $2\pi f_{sr} J$ 의 관계식으로 결정하여 대역폭 $\omega_B = 718 \text{ rad/s}$ 을 얻었으며, 적분시간 T_{is} 의 변화에 따른 시스템의 주파수 응답과 계단응답을 그림 8과 9에 각각 나타내었다. 본 결과를 통해 적분시간 T_{ic} 가 점점 작아짐에 따라 계동비도 작아지고 오버슈트가 커지는 것을 볼 수 있다. 또한 대역폭은 점점 커져 시스템의 응답속도가 빨라지는 것을 볼 수 있으며 이는 그림 9의 계단 응답을 통해서도 확인할 수 있다.

3. 시뮬레이션 해석

3.1 시스템 구성

PSIM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 그림 10에 시뮬레이션의 전체 구성을 블록 다이어그램으로 나타내었다. 매트릭스 컨버터를 제어하기 위하여 입력과 출력 각각 공간 벡터변조방식을 사용하였고 이를 위해서 샘플링 주기마다 입

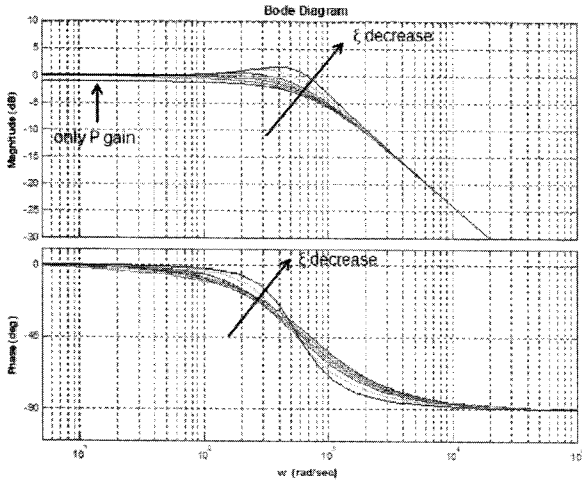


그림 8 댐핑요소에 따른 속도제어기의 주파수응답특성

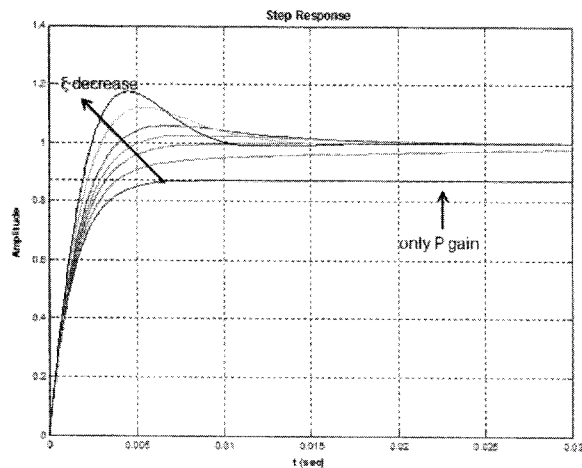


그림 9 댐핑요소에 따른 속도제어기의 계단시간응답

력전압과 출력전류를 검출한다. 입력측 전류와 출력측 전압에 대한 각각의 공간벡터 조합으로부터 36개의 섹터조합이 존재하며 이를 look-up 테이블로 만들어서 사용하였다. 또한 공간벡터 조합으로부터 공간벡터 시간을 계산하고 이를 통해 PWM 신호를 발생한다.

본 논문에서 있어서 매트릭스컨버터에 의한 PMSM의 속도제어에 관한 시뮬레이션은 PSIM을 이용하여 수행었고 이에 사용한 AC 서보모터(PMSM)는 설계 예시에서 사용하였던 모터와 동일한 영구자석형 동기모터를 제어대상으로 한다. 따라서 설계예시에서 설정한 제어기의 게인을 시뮬레이션에서도 동일하게 적용하였다.

3.2 결과

본 논문에서 검토한 속도제어기의 설계기법을 적용하여 매

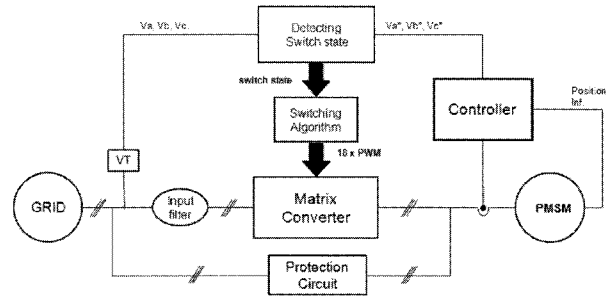


그림 10 PMSM 속도제어의 시뮬레이션 회로구성도

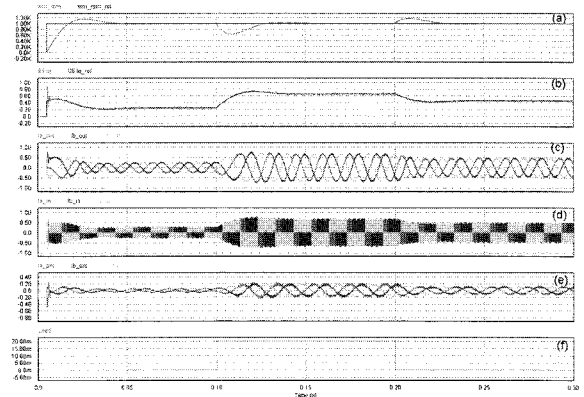



그림 11 계단지령속도 및 부하에 따른 시뮬레이션 파형; (a) 속도, (b) q축 전류, (c) 3상 출력전류, (d) AC필터 통과 전 3상 입력전류, (e) AC필터 통과 후 3상 입력전류, (f) 부하

트릭스 컨버터에 의한 PMSM의 속도제어에 대한 시뮬레이션결과를 그림 11에 보여준다.

1000rpm의 지령속도를 5ms의 시점에서 계단입력으로 인가하였을 때 지령속도의 63%에 도달하는 시간이 약 11ms, 27ms에서 약 20%의 최고 오버슈트를 나타내었다. 그리고 약 50ms 후 정상상태에 도달하는 것을 확인하였다. 정상상태 도달 한 후 100ms에서 모터 정격토크의 20%부하를 그림 11의 (f)와 같이 100ms동안 인가하였다. 부하를 인가하였을 때 잠시 모터의 속도가 감소함과 동시에 q축 전류가 증가하는 것을 볼 수 있으며 곧 속도와 q축 전류가 지령속도 및 q축 지령전류를 잘 추종함을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 매트릭스 컨버터를 이용하여 서보전동기를 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 보드선도를 통해 주파수 영역에서 제어기의 특성을 분석하여 제어기의 게인을 설정하였다. 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. 

참고문헌

- [1] 김태웅, “서보 동기전동기 제어시스템 기초설계”, 교류 서보전동기 제어시스템 실무교육 Workshop, 2005.
- [2] H. Sugimoto, M. Koyama, S. Tamai, “ACサーボシステムの理論と設計の際,” 総合電子出版社, 1990.
- [3] 정충일, 이상철, 모동영, 최창영, 김태웅, 박귀근, “매트릭스 컨버터에 의한 AC 서보 영구자석형 동기전동기의 제어기 설계에 대한 고찰 : 속도제어기”, 전력전자학술대회논문집, pp.106-108, 2008.
- [4] 정충일 “매트릭스 컨버터에 의한 PMSM의 제어기 설계”, 경상대학교 석사논문, 2008.

〈 필 자 소 개 〉



김태웅(金泰雄)

1964년 12월 29일생. 1990년 충북대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 일본 요코하마국립대학 졸업(공학). 1996년 4월~2001년 9월 일본 야스가와전기 서보연구개발에 종사. 2001년 9월~2002년 9월

올보대학 연구조교수. 2006년 9월~2007년 8월 노퍽현대학 방문교수. 2002년 10월~현재 경상대 제어계측공학과 부교수. 전력전자, 서보제어, 신재생에너지에 관한 연구에 종사. 2001년 IEEE/IES논문지논문상 수상. IEEE, 일본전기학회, 전력전자학회, 경상대 공학연구원 및 컴퓨터 정보통신연구소 등 회원.