

MOSFET 대용량 펄스 정류기 구현을 위한 제어기 설계

*선덕현, *조내수, **윤경섭, ***김우현, *권우현
*경북대학교 전자전기공학부, **거창대 훙넷정보전자과, ***영남이공대 로보테크과

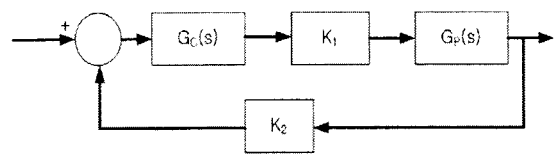
Controller design of high current pulse rectifier utilizing MOSFET driving method

*Duk-Han Sun, *Nae-Soo Cho, **Kyung Sup Youn, ***Woo Hyun Kim, *Woo Hyen Kwon
*Dept. of Electronic & Electrical Engineering, Kyungpook National University
**Dept. of Information Electronics, GyeongNam Provincial College in Geochang
***Dept. of Robot Technology, Yeungnam College of Science & Technology

Abstract - 도금 산업 분야에 이용되는 펄스 정류기의 경우 정밀한 도금을 위해 큰 용량에 오버슈트가 전혀 없는 아주 빠른 시스템 응답 특성을 요구한다. 이러한 특성을 만족시키기 위한 방안으로 ITAE 성능지수를 이용한 PID 제어기 설계 방법을 시스템에 적용하여 PID 제어기의 K_D , K_P , K_I 를 찾는 과정을 알아보고, 선택된 제어 요소에 따라 시스템의 응답특성이 어떻게 변화되는지 모의실험을 통해 살펴본다.

2차 함수로 간략화 될 수 있다.

그림2는 시스템의 전달함수에 대한 블록도를 도시한 것이며, 각 블록의 전달함수는 다음과 같다.



<그림 2> 시스템 블록선도

$$G_p(s) = \frac{R_L}{L_S C_S R_L S^2 + L_S S + R_L} \quad (1)$$

$$G_c(s) = \frac{K_D S^2 + K_P S + K_I}{S} \quad (2)$$

$$T(s) = \frac{K_1 (G_c(s) G_p(s))}{1 + K_1 K_2 (G_c(s) G_p(s))} \quad (3)$$

$$= \frac{K_1 (K_D S^2 + K_P S + K_I)}{L_S C_S S^3 + \frac{L_S}{R_L} S^2 + S + K_1 K_2 (K_D S^2 + K_P S + K_I)}$$

식(1),(2)을 통해 폐루프 시스템의 전달함수 $T(s)$ 는 식(3)과 같이 주어진다. 여기서 K_1 , K_2 는 비례상수로, K_1 은 예러 신호에 대한 증폭 또는 제어기 이후에 증폭되는 비로 나타낼 수도 있고, 제어기의 K_D , K_P , K_I 의 값을 $1/K_1$ 로 할 수도 있다. K_2 는 피드백 되는 전류 값이 매우 작기 때문에, 센싱에 필요한 값을 비교기 입력 전 적절한 값으로 증폭시켜주는 역할을 한다.

1. 서 론

전기 도금에 이용되는 대용량 정류기는 시스템의 경량, 소형화 일환으로 MOSFET 병렬 구동 방식을 채택하고 있다.[1]

또한 기존의 직류 정류기는 도금 탱크속의 금속 이온 석출시 전류 밀도가 금속의 예지부분에 집중되는 현상으로 인하여 균일한 도금 두께를 얻기 어려우므로, 이를 해결하기 위해 전류 밀도를 여러 형태로 조작할 수 있는 펄스 정류기를 사용하여 도금 두께 편차를 최소화 시키고 있다.[2]

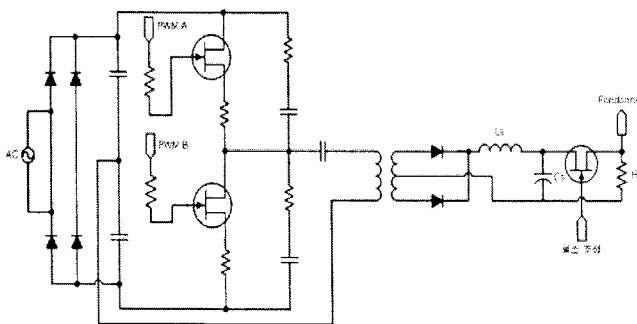
이러한 조작 가능하고, 불규칙한 펄스 신호 발생과, 다른 반도체 스위치 소자에 비해 스위칭 주파수가 높은 MOSFET의 특성으로 인해 정류기는 빠른 응답시간과 함께 적절한 시스템 응답 특성을 요구하게 된다.[3][4][5]

기존 직류정류기는 정상상태 오차만을 고려해서 설계함으로 PI 또는 I 제어기를 이용하는 것이 일반적이나, 펄스 정류기의 경우 응답시간을 개선하기 위해 D제어기 성분이 추가되어야 함으로써, 시스템에는 기존 PI제어기가 아닌 PID 제어기가 설계되어야 한다.

따라서 본 논문에서는 MOSFET 대용량 펄스 정류기 구현을 위한 PID 제어기 설계 방안의 하나인 ITAE 성능지수를 이용한 방법을 제시하고, 선택된 파라미터에 따라 시스템 응답 특성의 변화를 모의실험을 통해 확인해 본다.

2. 본 론

2.1 시스템의 구성



<그림 1> 펄스 정류기의 회로 구성

펄스 정류기는 그림1과 같이 단상 Half bridge DC-DC 컨버터 출력단에 스위칭 소자를 연결하고, 게이트 신호를 조절함으로써, 펄스폭과, 펄스 주기의 가변이 가능하게 된다.[6][7]

1차측 스위칭 주파수가 높을수록 2차측 LC 필터 값은 작게 설계될 수 있으며, 이는 시스템의 경량, 소형화 시킬 수 있는 장점뿐만 아니라, 펄스 신호에 대한 응답 특성을 좋게 하는 결과를 가져온다. 따라서 1차측의 반도체 스위치 소자로 스위칭 주파수가 높은 MOSFET을 이용하는 것이 효과적이다.[8]

2.2 전달함수

회로에서 기생 커패시터, 선로 저항 및 인덕터 등은 아주 작다고 무시하고, 변압기, PWM Driver등 장치들이 이상적이라고 가정했을 경우, 특정상수로 대체될 수 있어, 플랜트의 전달함수($G_p(s)$)는 LC 필터와 부하저항만의

2.3 PID 제어기 설계

계단응답에 대한 ITAE(Integral of Time-multiplied Absolute Error) 성능지수를 만족하는 특성방정식의 최적계수는 식(4)와 같이 주어진다.[9]

$$S^3 + 1.75\omega_n S^2 + 2.15\omega_n^2 S + \omega_n^3 \quad (4)$$

식(3)을 식(4)의 특성방정식 형식으로 변경하면 아래 식(5)과 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 $B = 1/L_S C_S$ 로써 K_D , K_P , K_I 를 결정하는 중요한 요소가 된다.

$$T(s) = \frac{BK_1 (K_D S^2 + K_P S + K_I)}{S^3 + \frac{BL_S}{R_L} S^2 + BS + BK_1 K_2 (K_D S^2 + K_P S + K_I)} \quad (5)$$

$$B = \frac{1}{L_S C_S}$$

따라서 식(4),(5)을 이용하여 방정식의 계수를 서로 비교하면, PID 제어기의 K_D , K_P , K_I 은 다음 식(6)과 같이 구할 수 있다.

$$K_D = \frac{1.75\omega_n - \frac{BL_S}{R_L}}{BK_1 K_2} \quad (6)$$

$$K_P = \frac{2.15\omega_n^2 - B}{BK_1 K_2}, \quad K_I = \frac{\omega_n^3}{BK_1 K_2}$$

2.4 모의실험 결과

표1은 시스템에 주어진 요구조건이며, 조건에 만족하는 ω_n (Natural Frequency)은 2% Setting time을 구하는 식(7)에 의해 구해진다.

$$t_s = \frac{4}{\xi\omega_n} \quad (7)$$

〈표 1〉 모의실험을 위한 시스템의 요구조건 및 파라미터

시스템 요구조건		제어기 설계를 위한 파라미터	
오버슈트	1%이내	K_I, K_2	1, 1
Setting time	10[us]	L_s, C_s	5[uH], 200[uF]
정상상태오차	0 %	R_L	30[mΩ]

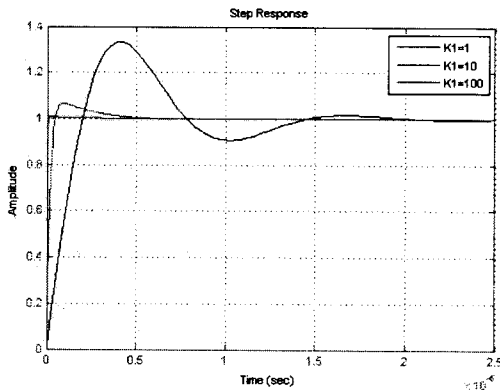
식(4)로부터 $2\xi=1.75(\xi=0.87)$ 이며, 식(7)에 주어진 Setting time을 대입하면 $\omega_n=46 \times 10^4$ 이 된다.

주어진 표1의 파라미터를 이용하여 PID 제어기의 K_D, K_P, K_I 를 구하면 다음과 같다.

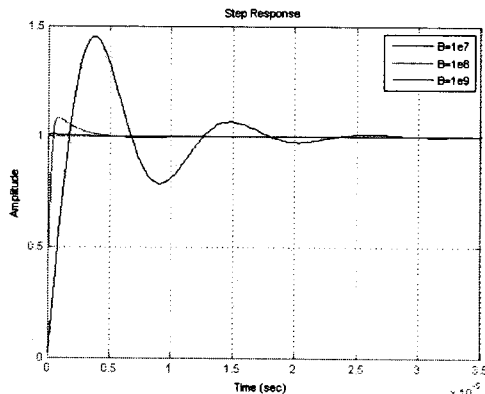
$$K_D = 6.38 \times 10^{-4}, K_P = 453.94, K_I = 9.7336 \times 10^7 (B = 10^9)$$

그림3은 설계된 PID제어기를 적용하여 시스템의 Step 응답을 MATLAB을 통해 Simulation한 결과이다. 그림3에서와 같이 K_I 값 증가에 따라 시스템의 과도상태에서의 오버슈트와 Setting time이 현저하게 개선되는 것을 알 수 있다. 따라서 앞선 시스템 요구조건을 충족시키기 위해 K_I 값은 100으로 두어야 한다. 여기서 K_I 증폭을 100으로 해 준다는 것은 식(6)에 따라 제어기의 K_D, K_P, K_I 값을 1/100로 해 주는 것과 동일한 의미를 가진다.

그림4는 $K_I=100$ 일 경우 B에 따른 시스템의 특성을 나타낸 것으로 B값이 클수록 시스템의 성능이 좋아지는 것을 알 수 있다. 다시 말해 LC필터 값이 작을수록 시스템의 과도응답이 좋아지므로, 설계시 최대한 LC필터 값을 줄여야 한다.



〈그림 3〉 PID 제어기를 추가한 시스템의 Step 응답



〈그림 4〉 B값의 변화에 따른 시스템의 Step 응답($K_I=100$ 일 경우)

3. 결 론

본 논문에서 제안한 ITAE 성능지수를 이용한 대용량 펄스 정류기의 PID 제어기 설계는 K_D, K_P, K_I 값이 모두 LC 필터값에 의해 비례한다는 것을 보여주며, 과도상태 응답은 보상기 앞뒤 단에 위치할 K_I 값에 의해 조절이 가능하다는 것을 모의실험을 통해 알 수 있었다.

그리고 PI 또는 I 제어기로 설계한 직류 정류기는 응답시간이 수~수십ms

인것에 비해 모의실험을 통해 PID제어기로 설계된 펄스 정류기는 응답시간이 기존 직류 정류기에 비해 월등히 빨라진다는 것을 알 수 있었다.

실제 시스템 적용을 위해서는 앞에서 제어기 설계를 간략화 하기 위해 가정된 요소들을 고려한 시스템 환경 변수에 맞추어야 함으로 설계된 K_D, K_P, K_I 값의 튜닝이 필요할 것으로 여겨진다. 또한 전달함수에 대한 주파수 응답을 보드선도로 확인한 결과 마진과, Bandwidth가 적당하다는 것을 확인할 수 있었으나, 실제 펄스 정류기 구현을 통해 펄스 주기를 짧게 할 경우의 시스템 응답특성을 살펴볼 필요가 있다.

더불어 $K_I=1$ 일 경우 30%넘는 오버슈트로 인해 $K_I=100$ 으로 증가시켜 오버슈트를 거의 0에 가깝게 설계하였으나, 만약 시스템에서 K_I 의 증가가 불가능하다면 예비필터(Prefilter) 설계를 고려해야 할 것이다.

【참 고 문 헌】

- [1] 선덕한, 조내수, 김우현 “MOSFET 병렬 구동을 이용한 대용량 정류기 구현” 한국산업융합학회논문집 10권 4호 2007년
- [2] 주형길 “도금용 고속 역펄스 정류기 개발” 한국산업기술대학교 산업기술/경영대학원 석사논문 pp1-15
- [3] 노의철, 정규범, 최남섭 공저 “전력전자공학” 문운당 pp325-361
- [4] 장동열 “IGBT_MOSFET 병렬 스위치를 이용한 고효율 직류-직류 변환기” 전력전자학회 논문지 4권 2호 pp152-158 1999년 4월
- [5] 박건태 “중.대용량 인버터용 IGBT 병렬 운전 연구” 전력전자학회 논문집 pp430-433 2003년 7월
- [6] Mohan, Undeland, Robbins “Power Electronics” Wiley Second Edition pp301-353
- [7] Muhammad H. Rashid “Power Electronics” Prentice Hall Second Edition pp 356-413
- [8] 이현원 “IGCT를 이용한 단상 PWM정류기 병렬운전” 전력전자학회 논문집 pp11-18 1999년
- [9] 박제삼 “제어시스템 해석 및 설계” 기전연구사 pp301-317