

대용량 싸이리스터 전원공급기의 전류기준값 전향보상 제어를 위한 미분기 및 LPF 설계

최일한, 송승호, 정승기, 오종석*, 최정완*, 서재학*
 광운대학교 전기공학과, 국가핵융합연구소*

Design of Differentiator and LPF for Feedforward Control of Current Reference in High Power Thyristor Dual Converter

Il-Han Choi, Seung-Ho Song, Seung-Gi Jeong, Jong-Seok Oh*, Jungwan Choi*, Jae-Hak Suh*
 Kwangwoon University, National Fusion Research Institute*

ABSTRACT

Ac-dc 싸이리스터 컨버터에서 전류기준값의 부호가 변화할 경우에 적분항 초기값을 통해 전류제어 과도특성을 개선하는 연구가 있었다. 이 논문에서는 전류기준값의 기울기에 변화가 있을 때 그 변화를 일으키기 위한 전압을 계산하고 그 값을 점호각 α 로 환산하여 시스템에 적용시켜 변곡점 부근에서의 전류제어 특성을 개선하는 방법을 제시하였다. 또한 전류기준값에 노이즈가 포함된 경우 LPF 유/무에 따른 특성변화와 노이즈가 포함되지 않은 경우 LPF 유/무에 따른 특성변화를 관찰하였다.

1. 서 론

토카막(TOKAMAK) 핵융합 실험장치의 한 부분인 코일 전원공급장치는 플라즈마의 발생 및 전류/온도/형상 제어를 위하여 코일 전류의 정확한 제어가 요구된다. 따라서, 안정된 전류의 제어, 또는 급격한 기울기의 전류운전 등이 중요한 제어 목표이다. PF(Poloidal Field) 코일 전원공급장치는 전류의 극성뿐만 아니라 정·역 기울기의 제어가 필요하기 때문에 4상한 운전이 가능한 ac-dc 싸이리스터 듀얼 컨버터를 이용한다. 대용량 싸이리스터 컨버터의 정확한 전류제어를 위한 여러 가지 연구가 진행되어 왔다. 이전에는 전류기준값의 부호가 변화할 경우에 적분항 초기값을 통해 전류제어 과도특성을 개선하는 연구가 있었다.^[1]

본 논문에서는 전류기준값의 부호가 변화하는 구간뿐만 아니라 전류기준값의 기울기에 변화가 있을 때 즉 변곡점 구간에서 그 변화를 일으키기 위한 전압을 계산하고 그 값을 점호각 α 로 환산하여 시스템에 적용시켜 변곡점 부근에서의 전류제어 특성을 개선하는 방법을 제시하였고 이 때 전류기준값에 노이즈가 포함된 경우 LPF 유/무에 따른 특성변화와 부하 파라미터 L값 변동에 따른 특성변화를 관찰하였다.

2. PI 전류제어기

2.1 기존의 PI 전류제어기

전원공급장치의 등가회로를 보면 R-L부하를 가진 회로로 나타낼 수 있으며, 여기에 흐르는 전류를 i_{ref} 라고 하면,

$$V = Ri_{ref} + L \frac{di_{ref}}{dt} \quad (1)$$

전압방정식은 식 (1)로 나타낼 수가 있다. 이 식을 통해 전류의 기울기가 바뀌는 순간에 L의 영향으로 변곡점 구간에서의 전류오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 다시 말해 출력 전류 기울기를 갑자기 바꿔야 할 때 출력 전압을 플러스에서 마이너스 부호로 점프 시키는 경우에 전류오차가 발생하는 것이다. 따라서 기존 PI전류제어기를 이용하면 전류의 방향이 바뀌는 시점에서는 전류제어가 잘 이루어지더라도 전류의 기울기가 바뀌는 시점은 고려하지 않았기 때문에 그 순간의 전류오차가 일어나는 것을 막을 수 없었다. 그렇기 때문에 전류기준값의 기울기가 바뀌는 시점에 그 변화를 일으키기 위한 전압을 계산 ($V_L = L \cdot di_L/dt$)하고 그 값을 기존 PI전류제어기 출력에 전향보상하여 그 값을 점호각 α 로 환산하여 시스템에 적용시켜 변곡점에서의 전류오차를 줄인다.

2.2 제안된 PI 전류제어기

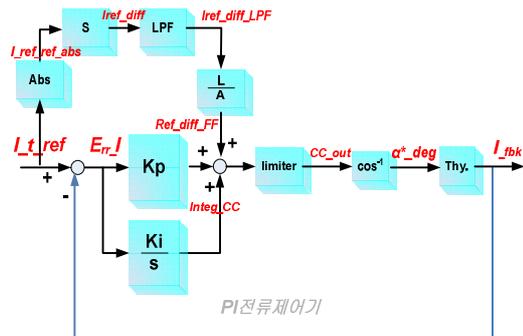


그림 1 제안된 PI 전류제어기 블록도
 Fig. 1 Block diagram of the proposed PI current controller

전류기준값에 절대값을 취하고 미분하여 di/dt 를 만들고 인덕터 부하 크기를 곱해서 $L \cdot di/dt$ 를 만들어주어 이 전압만큼의 크기를 기존의 전류제어기 출력값에 전향보상하는 방법을 이용하였다. 여기서 전류기준값을 절대값을 취해서 미분하는 이유는 그림 2의 파형처럼 변곡점 구간은 미분값이 떨어질 때를 이용해 보상하기 위해서이다.

전류기준값을 미분한 값에 인덕턴스를 곱하여 출력값에 $L \cdot di/dt$ 가 나가게 하면 이 값은 전압이고 단위는 [V]가 된다. 하지만 PI제어기 출력에서 나오는 값은 일반적으로 전압 [V]이 나오지만 위 그림의 제어기 출력은 단위가 없는 매우 작은 값이 출력이 된다.

제어기 출력을 살펴보면,

$$V^*(s) = \frac{1}{A} (K_{pcc} + \frac{K_{iac}}{s}) Err_I \quad (2)$$

여기서, 정류기이득 $A = \frac{3\sqrt{2} V_s}{\pi}$

따라서 $\alpha = \cos^{-1}(V^*)$ (3)

위 그림의 제어기 출력은 블록도에는 보이지 않지만 제어기내에서 정류기 이득의 역수만큼이 곱해져서 제어기 출력으로 나오는 것이다. 이와 마찬가지로 제어기 출력값에 전향보상해 주기 위해서는 전향보상하여 나오는 출력값 $L \cdot di/dt$ 에 똑같은 크기인 $1/A$ 만큼을 곱해주어 제어기 출력에 보상을 해주어야 한다.

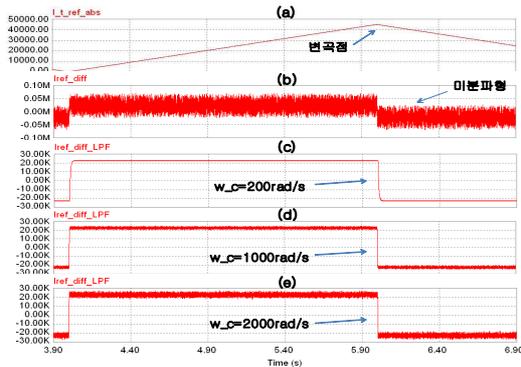


그림 2 전류기준값의 약 0.01%정도의 noise 삽입 했을 때 (a) 전류기준값의 절대값 (b) (a)값의 미분값 (c) LPF를 통과한 값($w_{cc}=200rad/s$) (d) $w_{cc}=1000rad/s$ (e) $w_{cc}=2000rad/s$
 Fig. 2 Including approximately 0.01% noise of current reference (a) absolute value of the current reference (b) differential value of the (a) (c) value with LPF ($w_{cc}=200rad/s$) (d) $w_{cc}=1000rad/s$ (e) $w_{cc}=2000rad/s$

그림 1의 블록도에서 LPF가 쓰인 이유는 전류기준값에 작은 값의 노이즈가 있을 때에 그 값을 미분하여 주면 그 결과값이 깨끗하지 않기 때문에 그 값이 그대로 전향보상 될 경우 원하는 전류제어를 할 수 없기 때문이다. 따라서 LPF를 통과시켜 최종 출력을 개선하여 전향보상을 해준다. 앞으로 나오는 시뮬레이션 파형의 LPF의 $w_{cc}=1000rad/s$ 이다.

2.3 시뮬레이션

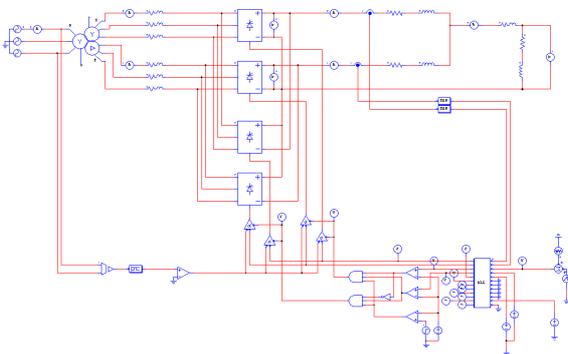


그림 3 전자식 전원공급장치의 시뮬레이션 회로도
 Fig. 3 Circuit diagram for simulation of MPS system

시뮬레이션에서는 부하 전류제어특성, 충전류제어특성, 정역 절환시의 부하 전류제어특성 및 변곡점에서의 전류제어특성을

모의할 수 있도록 그림과 같이 6-펄스 위상제어 정류회로를 두 개씩 역병렬로 총 4개를 사용하였다. 그리고 DLL연산 블록을 통하여 C코드를 이용하여 시스템을 제어하였다.

2.3.1 전류기준값에 노이즈가 없을 때 LPF의 유·무에 따른 시뮬레이션

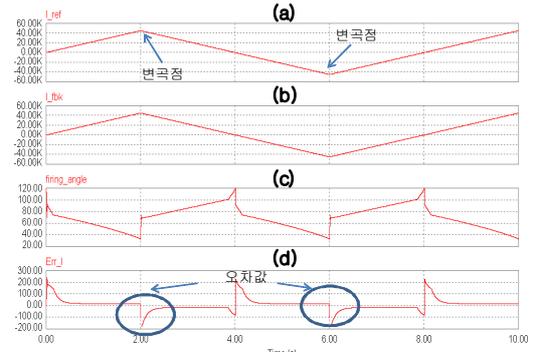


그림 4 기존 시뮬레이션 파형(LPF가 없을 때) (a) 전류 기준값 (b) 피드백전류(부하전류) (c) 점화각 (d) 오차값
 Fig. 4 Simulated results of preexistence(without LPF) (a) current reference (b) feedback current(load current) (c) firing angle (d) error value

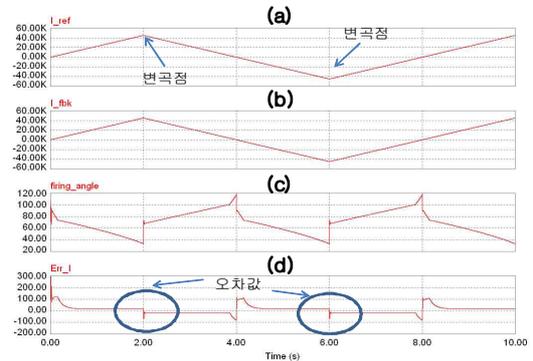


그림 5 제안된 시뮬레이션 파형(LPF가 없을 때) (a) 전류기준값 (b) 피드백전류(부하전류) (c) 점화각 (d) 오차값
 Fig. 5 Proposed simulation waveforms(without LPF) (a) current reference (b) feedback current(load current) (c) firing angle (d) error value

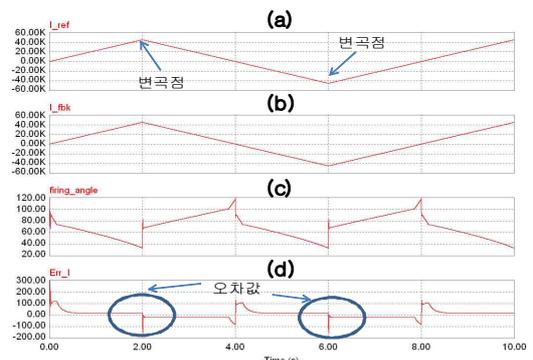


그림 6 제안된 시뮬레이션 파형(LPF가 있을 때) (a) 전류기준값 (b) 피드백전류(부하전류) (c) 점화각 (d) 오차값
 Fig. 6 Proposed simulation waveforms(with LPF) (a) current reference (b) feedback current(load current) (c) firing angle (d) error value

기존 시뮬레이션과 제안된 시뮬레이션 파형을 비교해보면, 변곡

점 구간에서의 오차값이 작아진 것을 확인할 수가 있다. 또한 전류기준값에 노이즈 성분이 없더라도 LPF의 유·무에 따라서 즉, LPF의 특성에 의해 오차값에 영향을 주는 것을 확인할 수가 있다.

2.3.2 전류기준값에 노이즈가 있을 때 LPF의 유·무에 따른 시뮬레이션

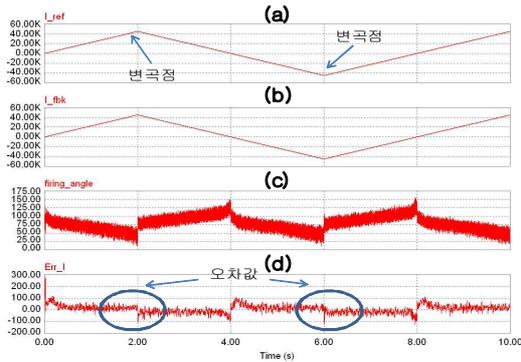


그림 7 전류레퍼런스 크기의 약 0.01%정도의 noise 삽입 했을 때 (LPF 없을 때) (a) 전류기준값 (b) 피드백전류(부하전류) (c) 점호각 (d) 오차값

Fig. 7 Including approximately 0.01% noise of current reference(without LPF) (a) current reference (b) feedback current(load current) (c) firing angle (d) error value

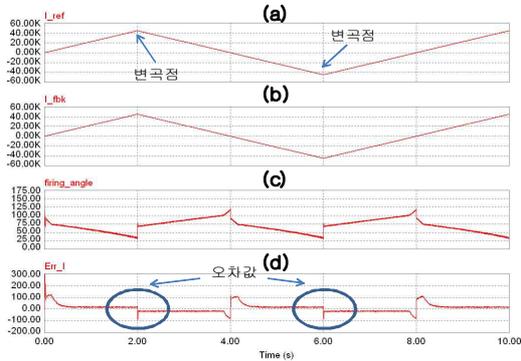


그림 8 전류레퍼런스 크기의 약 0.01%정도의 noise 삽입 했을 때 (LPF 있을 때) (a) 전류기준값 (b) 피드백전류(부하전류) (c) 점호각 (d) 오차값

Fig. 8 Including approximately 0.01% noise of current reference(with LPF) (a) current reference (b) feedback current(load current) (c) firing angle (d) error value

전류기준값에 노이즈가 존재할 때 미분값은 깨끗하지 않고 그 값을 전향 보상을 하기 때문에 그림 7에서처럼 파형을 볼 수 있다. 하지만 그림 8처럼 LPF를 거치게 함으로써 노이즈를 차단시켜 전향보상을 하게하여 보완된 결과값을 얻을 수 있다. 그림 9, 10은 변곡점 구간을 확대한 파형이다.

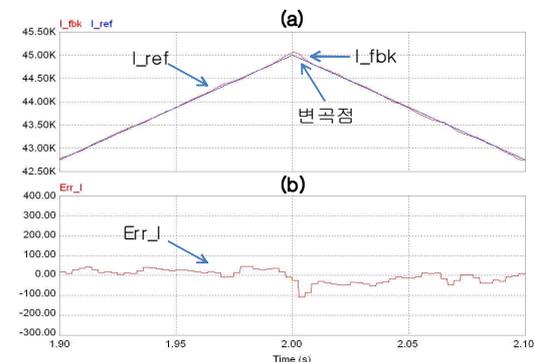


그림 9 전류레퍼런스 크기의 약 0.01%정도의 noise 삽입 했을 때 (LPF 없을 때 변곡점 구간 확대) (a) 변곡점에서의 전류기준값과 피드백전류 (b) 오차값

Fig. 9 Including approximately 0.01% noise of current reference(without LPF, zoom in point of inflection) (a) current reference and feedback current in point of inflection (b) error value

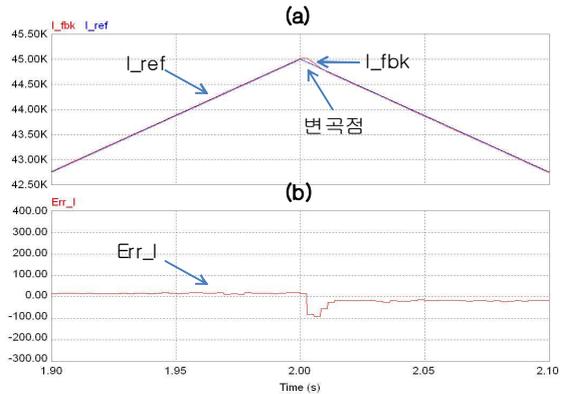


그림 10 전류레퍼런스 크기의 약 0.01%정도의 noise 삽입 했을 때(LPf 있을 때 변곡점 구간 확대) (a) 변곡점에서의 전류기준값과 피드백전류 (b) 오차값

Fig. 10 Including approximately 0.01% noise of current reference(with LPF, zoom in point of inflection) (a) current reference and feedback current in point of inflection (b) error value

3. 결론

본 논문에서는 대용량 12펄스 양방향 컨버터의 전류제어를 개발하였다. 기존에 있던 전류제어기는 전류기준값이 정방향(+)에서 역방향(-)으로 바뀔 때 전류기준값을 빨리 따라가기 위해 첫 점호각을 전류기준값을 참조하여 적절하게 선정하여 전류응답 시간은 짧게하고 오버슈트 또한 작게 하였다. 여기서는 이것과 더불어 전류의 기울기가 변하는 변곡점 구간에서 그 변화를 일으키기 위한 전압을 계산하고 그 값을 점호각 α 로 환산하여 시스템에 적용시켜 변곡점 부근에서의 전류제어 특성을 개선하여 전류제어오차를 줄이는 방법을 제안하였다. 따라서 정역구간 뿐만 아니라 전류의 기울기가 변하는 변곡점에서의 전류제어도 용이하게 되었다. 또한 LPF를 삽입하여 안정성도 높게 되었다. 이와 같은 싸이리스터 컨버터의 대전류 병렬 운전기술은 고전압 직렬운전 기술과 더불어 대용량 직류 전원공급장치 분야에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부, 지식경제부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 국책연구사업임(No. 2009-0081593)

참고 문헌

[1] 송승호, “대전류 코일 전원 공급장치를 위한 12펄스 듀얼 컨버터의 전류제어”, 전력전자학회 논문지, 제7권 제4호, pp. 332~338, 2002. 8
 [2] Sang-Joon Lee, Jun-Koo Kang, and Seung-Ki Sul, “A New Phase Detecting Method for Power Conversion Systems Considering Distorted Conditions in Power System”, 1999 IAS Annual Meeting, Vol 4, pp. 2167~2172, 1999.