동적전압보상장치를 위한 양방향 충/방전 시스템의 디지털 제어

이정임, 이종현, 정안열, 이춘호, 박종후, 전희종
숭실대학교

Digital Control of Bidirectional Charger/Discharger for Dynamic Voltage Restorer System

Jung-Im Lee, Jong-Hyun Lee, An-Yoel Jung, Choon-Ho Lee, Joung-Hu Park, Hee-Jong Jeon
Soongsil University

ABSTRACT

양방향 DC-DC컨버터는 일반적으로 아날로그방식이 사용되고 있다. 그러나 충·방전기로 사용하게 되면 모드전환 시 과도응답특성이 좋지 않은 문제가 있다. 이에 대한 대안으로 디지털 제어기를 사용하게 되면 진보된 알고리즘들을 이용하여 시스템의 성능을 향상 시킬 수 있다.

본 본문에서는 전기이중층 콘덴서(EDLC)를 이용한 동적전압보상장치(DVR)의 양방향 충/방전 시스템을, Buck/Boost 양방향 컨버터를 이용하여 구현하고, DSP(TI사 TMS320F28335)를 이용한 디지털 제어기를 적용하였다. 모의실험 및 하드웨어를 구성하여 실험한 결과, 양방향 시스템의 과도응답특성 개선과 시스템 성능 향상을 보여준다.

1. 서 론

UPS의 단점을 극복하기 위해 DVR에 관한 많은 연구가 진행 되고있다. DVR은 정상적일 때는 대기 상태에 있다가 순시전압강하나 순간정전의 장해가 발생 시 순간적으로 전압보상 동작을 하게 된다. 이 때문에 운전효율은 높고 순간적인 보상시간으로 인해 급속한 충·방전이 가능한 전기이중층 콘덴서(EDLC)를 적용할 수 있다.

그러나 EDLC는 충/방전장치에 의하여 에너지의 효율과 수명에 직접적으로 영향을 받기 때문에 고효율 운전을 위해서는 정전류 충전, 정전압 방전제어를 수행하여야 한다. 따라서 본 논문에서는 EDLC를 에너지저장원으로 적용한 DVR의 고효율 충·방전 양방향 컨버터를 설계하고, 아날로그제어기 대신 DSP를 이용한 디지털제어기법을 제안하고 시뮬레이션 및 하드웨어 구성을 통해 타당성을 제시하고자 한다[1].

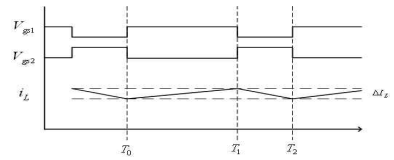
2. 본 문

2.1. 양방향 Buck/Boost컨버터

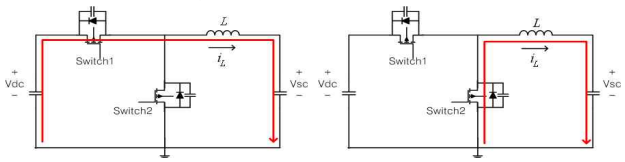
양방향 컨버터 중 가장 단순한 형태인 CCM (Condinous Conduction Mode) Buck/Boost 컨버터의 개발 시 벅컨버터의 다이오드가 부스트모드에서 스위치로 동작하므로 수동 소자인 다이오드 대신 MOSFET를 사용한다. 일반적인 컨버터는 주 스위치 턴 오프시에 freewheel 전류가 다이오드로 흘러 다이오드의 포워드 전압강하(Forward voltage drop)가 생긴다. 그러나 양방향컨버터는 다이오드대신 MOSFET를 사용하여 다이오드에 의한 손실을 줄여 보통의 컨버터에 비해 효율을 높일 수 있는 장점이 있다.

2.1.1 벅모드(Buck mode) 동작분석

EDLC의 충전을 위해 DC-link의 전압을 강압시켜 에너지가 EDLC로 충전되는 동작(Regenerative braking)이다. 그림 1(a)는 벅 모드(Buck mode)의 동작 파형을 나타낸다.[1]



(a) 벅모드(Buck mode)동작 파형
(a) Operation Waveform of buck mode



(b) 벅모드 동작[T_0, T_1] (c) 벅모드 동작[T_1, T_2]
(b) Operation of buck mode[T_0, T_1] (c) Operation of buck mode[T_1, T_2]

그림 1 벅모드 (충전 시)동작파형
Fig. 1 Operation Waveform of buck mode(charge)

① [구간 T_0, T_1] : 스위치 1 턴 온 (Linearly charge)

그림 1의 (b)와 같이 스위치 1이 턴 온 되면 DC-link에서 넘어온 에너지가 인덕터에 저장되며, 이때 인덕터 전류는 다음식과 같이 선형적으로 증가하게 된다.

$$\triangle I_L = \frac{(V_{dc} - V_{sc})}{L} \cdot DT \qquad (1)$$

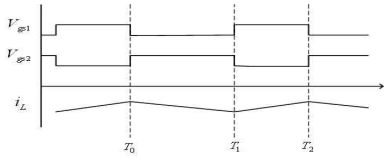
② [구간 T_1, T_2] : 스위치 2 턴 온 (Linearly discharge)

그림 1의 (c)와 같이 스위치 1이 턴 오프되고 스위치 2가 턴 온 되면 인덕터에 저장되었던 에너지가 EDLC로 저장되게 된다. 이때 인덕터 전류는 다음식과 같이 선형적으로 감소하게 된다.

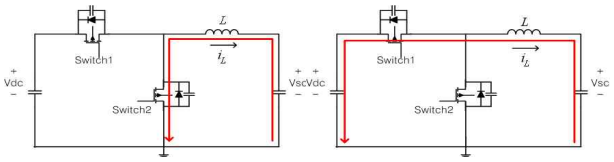
$$\triangle I_L = \frac{-V_{sc}}{L} \cdot (1-D)\,T \qquad (2)$$

2.1.2 부스트(Boost mode) 동작분석

그림2의 (a)는 EDLC에 저장되었던 에너지를 고압의 DC-link로 방전하는 동작특성을 보여준다. 이때 컨버터는 승압모드로 동작한다.



(a) 부스트모드(Boost mode) 동작파형
(a) Operation Waveform of boost mode



(b) 부스트모드 동작[T_0, T_1]　(c)부스트모드 동작[T_1, T_2]
(b) Operation of Boost mode [T_0, T_1]　(c) Operation of Boost mode [T_1, T_2]

그림 2 부스트모드 (방전 시)동작파형
Fig. 2 Operation Waveform of boost mode(discharge)

① [구간 T_0, T_1] : 스위치 2 턴 온 (Linearly charge)

그림 2의 (b)와 같이 스위치 2가 턴 온 되면 EDLC의 에너지가 인덕터에 저장되며, 이때 인덕터 전류는 선형적으로 증가하게 된다.

② [구간 T_1, T_2] : 스위치1 턴 온 (Linearly discharge)

그림 2의 (c)와 같이 스위치 2가 턴 오프되고 스위치 1이 턴 온 되면 인덕터에 저장되었던 에너지가 DC-link로 방전되며, 이때 인덕터 전류는 선형적으로 감소하게 된다.

3.1 컨버터의 디지털제어

3.1.1 양방향 컨버터의 아날로그제어 문제점

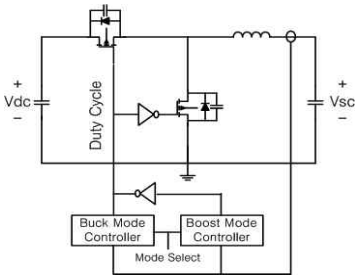


그림 3 양방향컨버터의 일반적인 아날로그 제어방법
Fig.3 General analog control method of bidirectional converter

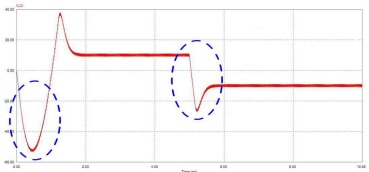


그림 4 아날로그제어에서 나타나는 충 · 방전 전류 과도응답현상[3]
Fig.4 Transient response of the current in an analog control method[3]

양방향 컨버터에 대한 아날로그 제어 방법을 그림 3에 나타내었다. 이들 PWM IC 들은 초기 동작 순간에 도통율을 천천히 증가시키기 위한 Soft-starter기능과 잡음에 의한 오작동을 방지하기 위한 전압 오프셋이 소자 내에 존재한다.[2] 이로 인해 아날로그 제어를 사용할 경우 그림 4와 같이 벅/부스트모드 변환 시 전류의 순간적인 overshoot가 발생되어 능동 소자들의 스트레스를 증가시켜 파괴에까지 이를 수 있는 과도응답 특성이 나타나게 된다. 이는 초기 기동 시 PWM IC 특성에 의해 인덕터에 제어 대상 방향과 반대의 전류가 흐르기 때문이다. 또한, 시스템 상위 알고리즘에 의해 모드 변환 동작을 수행할 경우에도 비활성화된 부스트제어기가 벅측 제어모드 동안 항상 포화되어있기 때문에 포화 전압에서 정상 동작구간으로 진입하기까지 시비율이 1로 열려있는 시간이 존재하기 때문이다.

3.1.2 디지털제어기의 구현방안

제어를 위한 한 스위칭 주기 내 타이밍 시퀀스는 그림 5와 같다(One-Switching-One-Sample-One-Delay). 동기 삼각파형태의 PWM을 Carrier기본 주파수로 사용하여, PWM 시비율을 발생시킴과 동시에 한 번의 샘플링으로 정확히 인덕터의 평균전류를 측정한다.[3]

디지털 프로세서의 특성 중 인터럽트를 발생시킬 수 있는 것을 이용하여, 생성되는 시비율로 인해 인가되는 인덕터 전류 파형의 상승이나 하강 시점의 가운데에 인터럽트를 발생시킨다. 그렇기 때문에 스위칭 동작에 의해 생성되는 인덕터 전류 파형 부분에서 비교적 노이즈에 강한 부분을 측정함으로써 추가필터의 사용 없이 제어루프 내의 위상지연을 최소화할 수 있다.

디지털 제어기는 연속 신호인 제어상대를 ADC(Analog-to Digital Converter)를 통해 이산화 시킨 뒤 변수화 하여 제어알고리즘을 통해 그 역할을 수행한다. 이로 인해, 디지털 제어기의 샘플링과 시간지연이 나타난다. 그러나, 아날로그 제어기에 비해 디지털제어기는 감도 특성이 좋기 때문에 위상마진을 약간 작게 가진다면 실제로 대역폭의 감소폭은 그리 크지 않다.

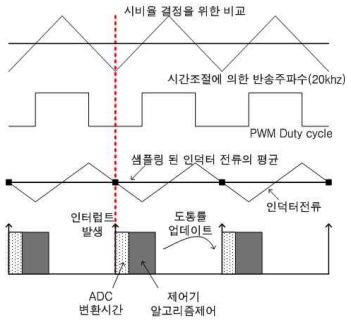


그림 5 DSP 알고리즘 구현개념도[3]
Fig.5 Implementation concept of DSP algorithm[3]

상태공간평균화법을 이용하여 각 상태방정식을 구해 소신호 모델링을 한 후 제어전달함수를 구하여 보드선도를 그리면 그림 6과 같다.

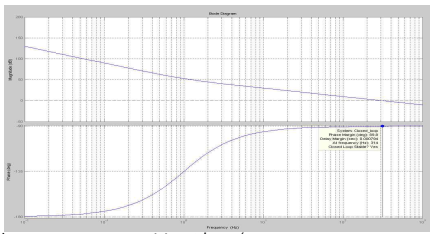


그림 6 closed loop 보드선도 ($K_p = 0.0159$, $K_i = 0.1$)
Fig.6 Bode diagram of closed loop

4.1 제안된 디지털제어기의 모의실험

4.1.1 양방향 충·방전기 시뮬레이션

양방향 충/방전기 모의실험을 위하여 MATLAB SIMULINK를 이용하여 회로를 구성하였다. 디지털 제어기 역할을 하는 모듈에서 전류 센싱을 받아 그 값에 따른 시비율값(Duty Ratio)을 스위칭모듈에 준다. 전류 레퍼런스를 양방향

충·방전제어동작을 확인하기 위하여 5A와 -5A사이에서 스텝변화를 주었다.

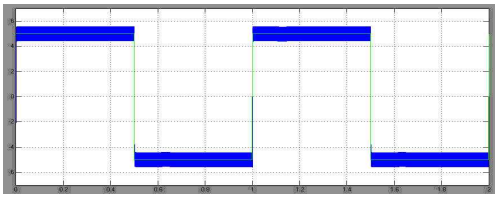


그림 7 레퍼런스 스텝변화에 따른 인덕터 전류의 추종치
Fig.7 Step reference of the Inductor current

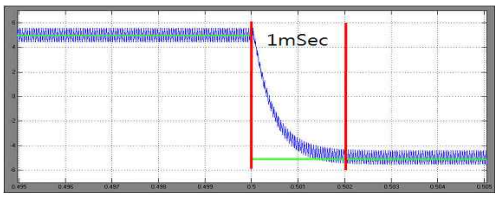


그림 8 방전모드로 전환 시 인덕터 전류 파형변화
Fig.8 Zoom-in of the Inductor current at a mode charge

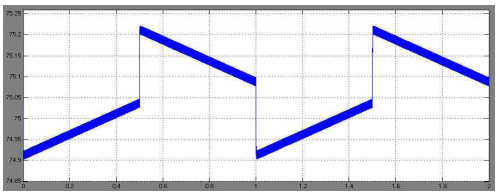


그림 9 충/방전 전류 값에 따른 EDLC출력전압
Fig.9 Output voltage of EDLC by charging/discharging current

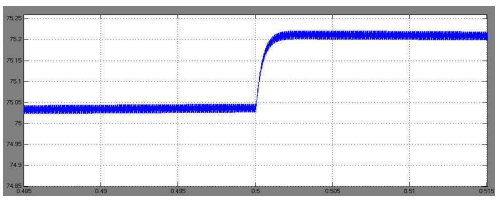


그림 10 충전모드로 전환 시 EDLC 전압 파형변화
Fig.10 Zoom-in of the EDLC voltage at a mode charge

그림 8은 그림 7을, 그림 10은 그림 9를 확대한 파형으로, 제안된 디지털 제어방법의 모의실험 결과이다. 레퍼런스에 따라 인덕터 전류가 추종되는 것을 볼 수 있으며, 초기출발과 양방향모드 전환 시 자연스러운 과도응답특성을 보임을 알 수 있다.

5. 실험결과

표1 .실험에 사용된 각 파라미터 값
Table 1. Experimental parameters.

입력전압(Vdc)	310[V]
EDLC전압(Vsc)	70[V]
EDLC 캐패시터	20[F]
인덕터(L)	2.5[mH]
스위칭주파수(Fsw)	20[KHz]
주스위칭소자	IRF 450A (500V, 13A)

그림 11는 제안된 디지털제어기를 적용한 양방향컨버터의 실험결과를 나타낸 파형이다. 벅모드에서 부스트모드로 또는 부스트모드에서 벅모드로의 모드전환 시 레퍼런스을 주었을 때 실험결과를 그림 12과 그림 13에 나타내었다. 실험결과를 보면 아날로그제어기에서 나타나는 문제점과 다르게 레퍼런스에 따라 인덕터 전류가 overshoot없이 추종되는 것을 볼 수 있으며, 초기출발과 양방향모드 전환 시에도 자연스러운 과도응답특성을 보임을 알 수 있다. 과도상태 및 정상상태에서 제어가 잘 수행되며, 모의 실험결과와도 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

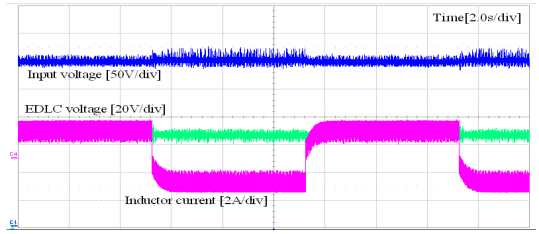


그림 11 제안된 디지털제어기를 적용한 양방향컨버터의 실험결과
Fig.11 Key wave forms of the digitally-controlled bidirectional converter

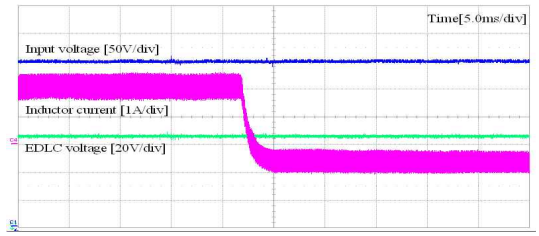


그림 12 벅모드에서 부스트모드로의 모드전환 과도응답 확대파형
Fig.12 The mode transition from buck to boost mode operation

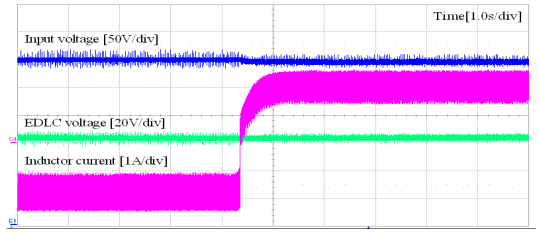


그림 13 벅모드에서 부스트모드로의 모드전환 과도응답 확대파형
Fig.13 The mode transition from boost to buck mode operation

6. 결론

본 논문에서는 전기이중층 콘덴서(EDLC)를 이용한 동적전압보상장치(DVR)의 Buck/Boost양방향 컨버터를 구현하고, TMS320F28335를 이용한 디지털 제어기의 적용을 제안하였다. 모의실험 및 하드웨어를 제작하여 실험한 결과, 컨버터의 양방향동작이 잘 수행되고 있으며, 과도상태 및 정상상태에서 전류제어가 잘 수행되고 있어, 모의실험결과와 거의 일치함을 알 수 있었다.

따라서, 아날로그 제어기 대신 디지털 제어기를 이용함으로써 되면 양방향 시스템의 과도응답특성이 개선되어 시스템 성능이 향상됨을 볼 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] Xunwei Zhou; Donati, M.; Amoroso, L,; Lee, F.C.; "Improve Light Load Efficiency for Synchronous Rectifier Buck Converter". Applied Power Electronics Conference and Exposition, Fourteenth Annual, Volum: 1, 14-18 March 1999 , Page(s): 295-302 vol.1

[2] Jingquan Chen; Maksimovic, D.; Erickson, R.., "A New Low-Stress Buck-Boost Converter for Universal-Input PFC Applications" IEEE sixteenth Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, Vol.1, pp. 343-349, 2001.

[3] Hyun-Su Bae, Jeong-Hwan Yang, Jae-Ho Lee and Bo-Hyung Cho, "Digital State Feedback Current Control using the Pole Placement Technique", JPE, Vol.7, No.3, July 2007, pp. 213-221