

하이브리드 에너지 시스템에서 양방향 DC-DC 컨버터에 의한 축전지 제어 기법

정상민*, 조진상*, 최세완*, 한수빈**
*서울산업대학교, **한국에너지기술연구원

Battery Control Technique by Bidirectional DC-DC Converter in Hybrid Energy System

Sangmin Jung*, Jinsang Jo*, Sewan Choi*, and Soobin Han**
*Seoul National Univ. of Tech., **Korea Institute of Energy Research

ABSTRACT

본 연구에서는 축전지를 포함하는 하이브리드 시스템에서 최소 규모의 축전지를 양방향 컨버터를 이용하여 직류단에 연결함으로써 에너지를 충·방전시킬 수 있는 제어 기법을 제안한다. 사용된 양방향 컨버터는 본 연구에서 고려하는 시스템 사양에서 가장 경제적인 비절연형 single-phase 컨버터의 구조이다. 본 논문에서는 하이브리드 시스템 내에서의 양방향 컨버터의 동작 제어와 축전지를 효과적으로 관리할 수 있는 제어 알고리즘에 대해서 연구하였다.

1 서 론

최근에 다양한 형태의 에너지를 복합적이고 효과적으로 활용하기 위한 하이브리드 시스템에 대한 관심이 고조되고 있으며 특히 무정전 전원 시스템, 배터리 충·방전 시스템, 하이브리드 전기 자동차 그리고 연료전지와 태양전지 등 대체에너지를 위한 독립전원시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^{[1]-[5]}

대부분의 하이브리드 시스템에서는 축전지를 포함하게 되는데 축전지를 사용하는 경우 설비의 과다용적, 장기간 사용 시 발생하는 셀 간의 전압 불균형 발생 등 신뢰성 및 가격 면에서 많은 문제점이 있어 개선이 요구되고 있다. 특히 대체에너지와 관계된 시스템에서는 축전지의 역할이 주 전력공급 용보다는 과부하 또는 급속한 부하변화에 대한 에너지의 백업용으로 요구되기 때문에 축전지를 최소화하여 용적 면에서나 가격 면에서 시스템을 최적화하는 것이 중요한 과제가 된다.

그림 1은 본 논문에서 사용하고자 하는 양방향 컨버터와 관련된 하이브리드 에너지 시스템의 구성

도이다. 1차 에너지원으로는 연료전지나 태양전지가 사용될 수 있으며 직류에너지원으로부터 상용의 교류전압을 변환시키기 위해서 인버터가 사용된다. 사용되는 1차 에너지원으로 입력전압의 범위가 낮은 경우 상용전원에서 요구되는 전압을 위해 인버터 출력에 승압용 변압기가 연결된다. 1차 에너지원인 연료전지의 경우 에너지 저장기능이 없기 때문에 1차 에너지원에서의 전력공급이 중단되더라도 전력을 공급할 수 있도록 2차 에너지저장장치인 축전지를 사용하게 된다. 이 경우 표 1에서 요구되는 사양에 따라 1kW의 주 전력으로 연료전지에서 공급되는 에너지를 사용하되 과부하시에는 한정적인 시간동안 약 1kW의 용량을 축전지에서부터 추가로 공급한다. 이때 축전지를 직류단에 직접 연결할 경우는 다수의 축전지를 직렬로 연결하여야 하므로 앞에서 언급된 문제점이 발생하기 때문에 비효율적인 시스템이 된다. 그러나 그림 1과 같이 양방향 컨버터를 사용하여 최소 규모의 축전지로서 과부하시에는 부하로 에너지가 전달되도록 하고 정상시에는 연료전지로부터 충전에너지를 공급받게 할 경우 효율적인 시스템을 구성할 수 있게 된다.

따라서 본 논문은 이러한 목적에 사용하기 위한 single-phase 형태의 부스트 양방향 컨버터에 대한

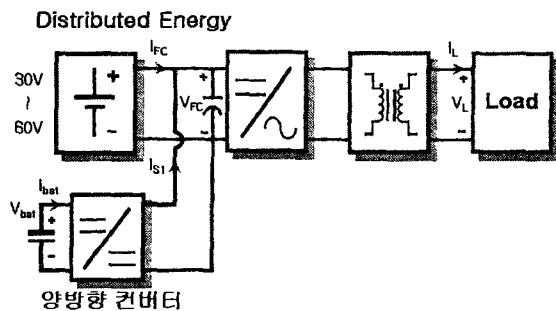
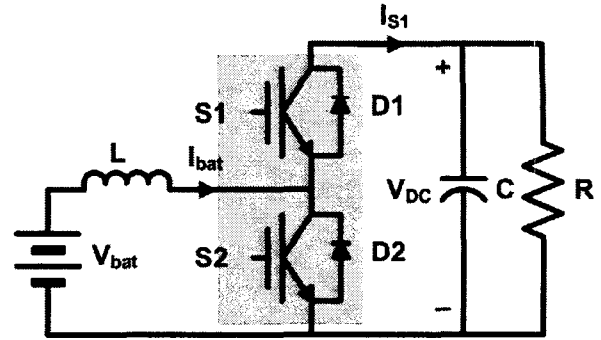


그림 1 하이브리드 에너지 시스템 구성

표 1 양방향 컨버터와 관련된 하이브리드 시스템 사양

항목		사양
Energy source	Source	30V~60V
	Battery	12V/80Ah
Output Power Capability	Nominal	독립운전시 250W~1KW저항부하
	Overload	1KW(최대 5초)



(a) 컨버터의 구조

연구로서 하이브리드 시스템 내에서의 양방향 컨버터의 동작 제어와 축전지를 효과적으로 관리할 수 있는 제어 알고리즘에 대해서 연구하고자 한다.

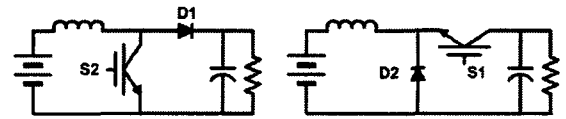
2. Single-phase 양방향 컨버터의 동작 원리 및 설계

본 논문의 시스템에서는 저전압측에 12V의 축전지를, 고압측은 30V~60V로 변동하는 연료전지를 사용하므로 그림 2와 같은 비절연형의 단상 부스트 토폴로지를 고려한다. 이는 2개의 스위치와 하나의 인덕터, 축전지, 그리고 캐패시터에 의한 직류단으로 구성되어 간단한 구조로 실현이 된다는 것이 큰 장점이다. 물론 입출력의 전압비가 커지거나 전류가 매우 커지는 경우에는 multi-phase 구조로 구현하던지^[2] Half-Bridge 또는 Full-Bridge 회로에 고주파 변압기를 사용한 방식을 구현해야 되지만^[3] 스위치의 수가 증가되고 효율이 감소할 수 있기 때문에 통상 전압비가 5이하인 목적에서는 가장 우선적으로 고려할 필요가 있는 구조이다.

두 개의 스위치 중 S2가 능동스위치로 동작할 경우 다이오드 D1의 동작으로 그림 2(b)의 부스트 컨버터가 되어 축전지에서 직류단으로 에너지가 전달되고 직류단측에 연결된 부하에서 에너지가 소비되는 방전모드로 동작한다. S1이 능동 스위치가 되는 경우 다이오드 D2의 동작으로 그림 2(c)의 벽 컨버터로 동작하여 직류단측에서 축전지로 에너지가 이동하게 되어 충전모드로 동작하게 된다.

2.1 방전모드

그림 1과 같은 하이브리드 시스템에서 방전모드로 동작하는 경우는 최대부하가 걸리는 상태에서 추가로 과부하가 걸리는 경우와 경부하가 걸려있는 상태에서 과도한 부하의 증가가 있는 경우이다. 이러한 때에는 양방향 컨버터는 필요한 에너지를 공



(b) 부스트 방전 모드

(c) 벽 충전모드

그림 2 Single-phase 양방향 컨버터

급 시키기 위해 부스트 컨버터가 된다. 5초 이상의 기간동안 최고 1kW의 에너지를 축전지에서부터 부하로 공급해야 하며 이 경우 축전지의 전압 12V 기준일 때 인덕터에서의 방전전류 $I_{bat(ds)}$ 는 90A 이상의 전류를 공급해야한다.

2.2 충전모드

과부하가 걸리지 않는 대부분의 동작 시에는 축전지의 SOC를 항상 0.97이상으로 유지하기 위해 연료전지에서 발생하는 에너지로부터 충전을 하여야 하며 양방향 컨버터는 벽 컨버터가 되어 충전모드로 동작하게 된다. 이때 충전전류 $I_{bat(ch)}$ 는 축전지의 용량의 약 0.2C이상에 해당되는 전류를 공급한다. 본 연구에서는 15A를 공급하는 것으로 한다.

2.3 충·방전 모드변환의 과도 상태

충전모드에서 방전모드로 또는 방전모드에서 충전모드로의 변환 시에는 모드변환 과정에서 과도적 상태가 발생된다. 컨버터가 충전모드로 되어있어 $I_{bat(ch)}$ 의 전류로 충전되는 상태에서 방전전류 $I_{bat(ds)}$ 의 명령을 받게 되면 그림 2(c)의 벽 컨버터에서 S1이 off되고 다이오드 D2만 동작하여 충전전류는 감소하게 되고 최종에는 0이 된다. 그 이후에는 S2가 방전전류의 명령으로 on이 된 상태이므로 인덕터의 전류가 $I_{bat(ds)}$ 의 상태가 될 때까지 계속 도통된다. 이때 충전모드에서 방전모드로 이전하는 과도시간은 다음 식과 같다.

$$\Delta t = \frac{L}{V_{bat}} (I_{bat(ch)} + I_{bat(ds)}) \quad (1)$$

역으로 컨버터가 방전모드로 되어있어 $I_{bat(ds)}$ 의 전류로 방전되는 상태에서 충전전류 $I_{bat(ch)}$ 의 명령을 받게 되면 그림 2(b)의 부스터에서 S2가 off되고 다이오드 D1만 동작하여 방전전류는 감소하게 되고 최종에는 0이 된다. 그 이후에는 S1이 충전전류의 명령으로 on이 된 상태이므로 인덕터의 전류가 $I_{bat(ch)}$ 의 상태가 될 때까지 계속 도통된다. 이때 방전모드에서 충전모드로 이전하는 과도시간은 다음 식과 같다.

$$\Delta t = \frac{L}{V_{DC} - V_{bat}} (I_{bat(ch)} + I_{bat(ds)}) \quad (2)$$

결과적으로 방전에서 충전모드로의 변환시간보다 충전에서 방전모드의 변환시간이 더 걸리게 되지만 컨버터의 변환시간은 인덕턴스가 $100\mu H$ 인 경우 $1ms$ 이하의 충분히 짧은 시간이다.

2.4 인덕터의 설계

충·방전모드와 관련하여 인덕터의 전류는 항상 연속모드로 동작하도록 인덕턴스 값을 결정한다. 따라서 벡 컨버터로 동작할 경우는 다음 식을 만족하여야 한다.

$$L \geq \frac{DT_s}{2I_{bat(ch)}} (V_{DC} - V_{bat}) \quad (3)$$

또한 부스트 컨버터로 동작할 경우는 다음 식을 만족하여야 한다.

$$L \geq \frac{T_s D(1-D)}{2I_{bat(ds)}} V_{DC} \quad (4)$$

두 가지 모드와 양방향 컨버터의 입출력 동작 변화를 모두 감안하면 리플전류 10A에 대해 연속모드로 동작하기 위한 최소 인덕터의 값은 스위칭 주파수 20kHz를 기준으로 벡 모드에서 V_{DC} 가 60V, V_{bat} 가 12V, $D=0.2$ 인 조건일 때이며 이 경우 $48\mu H$ 가 된다. 따라서 설계값은 $100\mu H$ 로 결정하고 이 경우 벡 모드에서의 리플전류는 5A이며 축전지 정격의 0.2C수준인 15A의 충전전류를 유지할 경우 전류 리플은 33%에 해당되지만 충·방전전류 값이 증가할수록 적은 비율의 리플전류를 보이게 된다.

2.5 축전지 용량의 선정

축전지의 경우는 12V, 80Ah의 연축전지를 사용한다. 방전 시 1C이상인 90A의 방전전류가 흐르게 되지만 5초 이하의 백업시간이므로 축전지에 무리를 주지 않는다. 방전 시 축전지의 최저 방전전압은 10V로 제한한다.

3. 양방향 컨버터에 의한 축전지 충·방전 제어

3.1 모드의 결정

충전모드 또는 방전모드의 결정과 필요한 에너지의 양은 인버터와 출력변압기의 효율 η_{inv} 을 고려하고 다음 식과 같이 연료전지의 출력과 부하의 전력의 차이 P_{req} 를 계산함으로써 결정한다.

$$\begin{aligned} P_{req} &= \frac{P_{load}}{\eta_{inv}} - P_{FC} \\ &= \frac{v_L \cdot i_L}{\eta_{inv}} - v_{FC} \cdot i_{FC} \end{aligned} \quad (5)$$

P_{req} 가 0보다 큰 경우는 양방향 컨버터는 방전모드로 동작하고 0보다 작은 경우는 충전모드로 동작하게 된다.

3.2 방전모드에서의 전류 제어

방전모드에서 부스트 컨버터의 전류 명령값은 측정된 P_{req} 와 양방향 컨버터의 효율 η_{bc} 그리고 축전지 전압 v_{bat} 에 의해 다음 식에 따라서 결정된다.

$$i_{bat(ds)}^* = \frac{P_{req}}{\eta_{bc} \cdot v_{bat}} \quad (6)$$

3.3 충전모드에서의 전류제어

충전모드에서 부스트 컨버터의 전류 명령값은 다음 식에서 계산된 축전지의 SOC(state of charge)에 따른 제어를 수행한다.

$$SOC = \frac{Q_o - \int i_{bat} dt}{Q_n} \quad (7)$$

식에서 Q_o 는 축전지의 초기 충전 전하량으로 만충전상태를 기준으로 한다. Q_n 은 축전지의 정격용량 80Ah이다.

충전모드에서는 축전지의 SOC를 항상 0.97이상 이 되도록 유지하는 것이 목표로 평상시 하이브리드 시스템은 방전모드로 동작하는 시간이 많지 않으므로 충전모드 시에 약 0.2C의 충전전류로 항상

충전하도록 제어한다. 그러나 SOC가 0.85이하로 유지되는 상태가 발생되면 충전전류는 식(8)과 같이 연료전지의 최대 출력할 수 있는 에너지 즉 연료전지의 최대용량 P_{FCmax} 에 부하에서 사용하는 에너지의 차로 충전지를 충전시키도록 한다.

$$i_{bat(ch)}^* = \frac{\eta_{inv} \cdot P_{FCmax} - P_{load}}{\eta_{inv} \cdot \eta_{dc} \cdot v_{bat}} \quad (8)$$

3.4 제어 동작의 알고리즘

그림 3과 그림 4는 양방향 컨버터의 제어 블록도와 알고리즘의 흐름도이다. 시스템의 주제어기에서 연료전지의 출력전력과 부하의 요구량의 차이를 계산하여 충전모드 및 방전모드에 대한 판단을 한 후 각각 해당 전류 명령값을 계산하고 양방향 컨버터를 동작시킨다. 전체적으로 충전지의 SOC는 매 제어주기마다 계산되어 저장되어야 한다. 이러한 알고리즘에 의해서 과부하에 대해 추가로 필요한 에너지의 공급뿐만 아니라 부하의 급격한 증가 시에도 연료전지의 출력 전력과 부하의 요구량의 차이만큼 전력을 순간적으로 방전시켜 연료전지의 느린 응

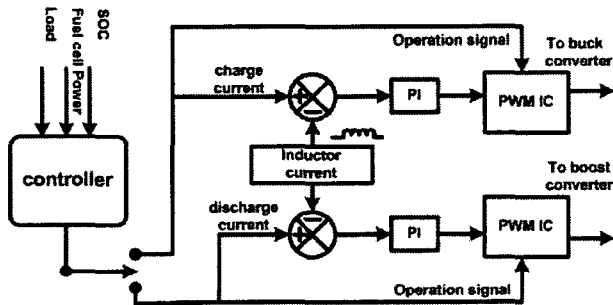


그림 3 양방향 컨버터의 제어 블록도

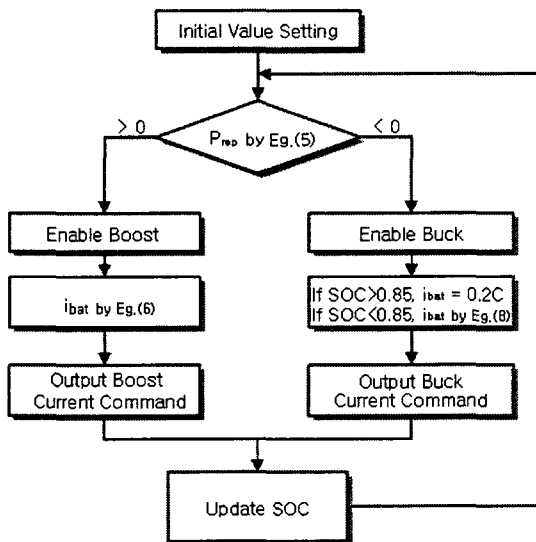
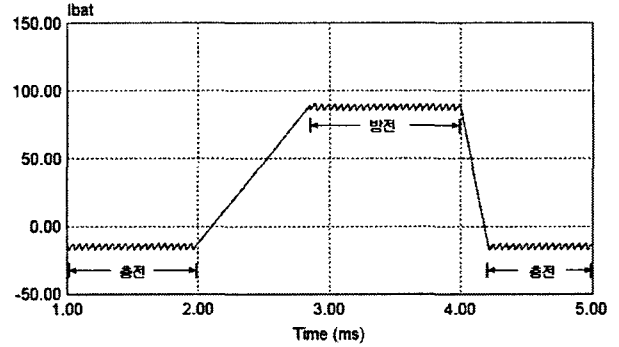
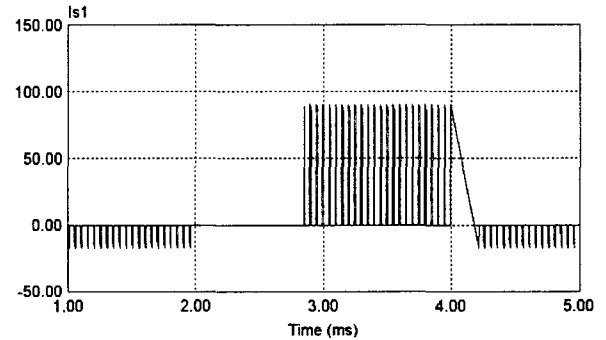


그림 4 양방향 컨버터의 충·방전 제어 알고리즘

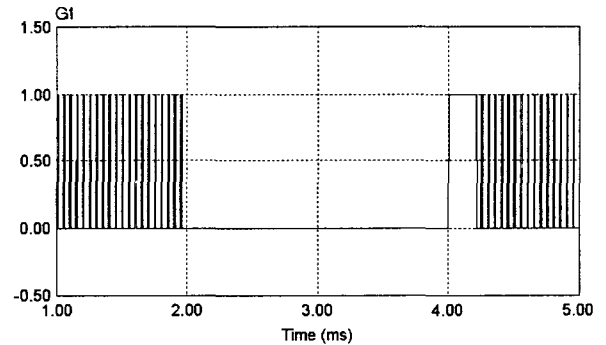
답을 보완하게 된다. 그리고 연료전지로부터의 출력이 증가하여 부하전력을 충분히 공급할 수 있는 시점에서 양방향 DC-DC 컨버터가 충전모드로 변환되어 배터리를 충전하게 된다.



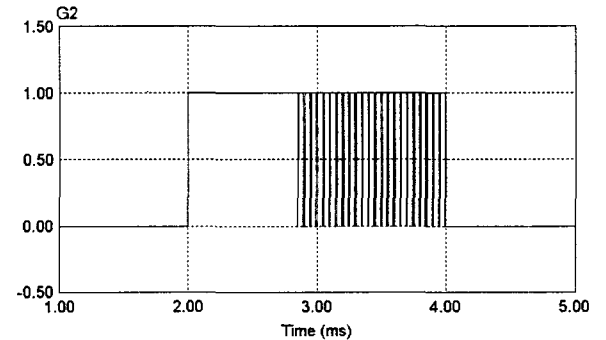
(a) 충전지 전류 I_{bat}



(b) 직류단 전류 I_{L1}



(c) 게이트 신호 $G1$



(d) 게이트 신호 $G2$

그림 5 충·방전 모드 시뮬레이션

3.5 모드 변화 시뮬레이션

그림 5(a)와 (b)는 양방향 컨버터가 0.2C의 전류로 충전되고 있는 상태에서 1kW에 해당되는 방전전류에 대한 명령을 받은 후 다시 0.2C의 충전전류의 명령을 받는 경우 컨버터의 축전지 전류와 직류단 전류의 변화상태이고 그림 5(c)와 (d)는 스위치 S1과 S2의 게이트 신호이다. 전류리플은 설계된 대로 5A이며 충·방전의 모드 변화의 시간은 모두 식(1)과 (2)의 결과에 일치한다.

4. 결 론

본 연구에서는 그림 1과 같은 하이브리드 시스템에서 최소한의 축전지를 사용하여 부하의 상태에 따른 충·방전 기능을 만족시킬 수 있도록 하는 양방향 컨버터의 활용에 대해서 연구하였다. single-phase 부스트형의 동작에 대한 분석과 양방향 에너지의 제어방식 그리고 하이브리드 시스템 내에서 상호 관련 제어 알고리즘에 대해 제안하였다. 제안된 알고리즘에 대해서는 향후 하이브리드 시스템의 제작과 관련하여 실험을 할 예정이다.

이 논문은 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력 연구원(R-2003-B-315)주관으로 수행된 과제임

참 고 문 헌

- [1] R.M. Schupbach, J.C. Balda, "Comparing DC-DC Converter for Power Management in Hybrid Electric Vehicles", Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International., Vol.3, pp.1369-1374, June 2003.
- [2] K. Wang, C.Y. Lin, L. Zhu, D. Qu, F.C. Lee, J.S. Lai, "Bi-directional DC to DC Converters for Fuel Cell Systems", Power Electronics in Transportation., pp.47-51, 22-23 Oct. 1998.
- [3] Peng F.Z., Hui·Li, Gui-Jia Su, Lawler J.S., "A New ZVS Bidirectional DC-DC Converter for Fuel Cell and Battery Application", Power Electronics, IEEE Transactions on., Vol.19, pp.54-65, Jan. 2004.
- [4] 이진희, 조진상, 장민수, 최세완, 한수빈, "고체 산화물형 연료전지를 위한 10kW급 독립전력 변환장치의 개발", 전력전자학회논문지, 제8권 6호, pp.551-560, 2003. 12.

- [5] 최세완, "연료전지 발전시스템에서의 전력전자 기술", 전력전자학회지 특집기사, pp.30-35 2003. 8.