

방향 전환이 자유로운 양방향 DC/DC 컨버터 개발

이우철*, 유창규*

*한경대학교 전기공학과

Development of a Bidirectional DC/DC Converter with Smooth Transition Between Different Operation Modes

*Lee Woo-Cheol, *Yoo Chang-Gyu

*Department of Electrical Engineering HanKyong National University

ABSTRACT

일반적으로 버크/부스트용 양방향 컨버터의 구현은 단전원을 사용하는 각각의 PWM IC, 전류제어 PWM 방식을 사용하게 된다. 이 경우 한쪽 모드로 동작시 다른 모드 제어기의 에러 앰프는 포화되기 때문에 모드 전환 동작시 마다 일정 시간 스위칭 동작을 멈추게 하는 회로가 필요하게 되어 원활한 방향 전환을 이룰 수 없게 된다. 본 연구에서는 양전원을 사용하는 하나의 제어기를 설계하여 방향 전환시의 문제점을 해결하고자 한다.

1. 서론

자동차는 탑승자의 안전과 편의성을 위해 각종 컴퓨터, 통신장치 및 전기 제어 장치들이 장착되는 추세로 발전하고 있다. 따라서 차량 내 전력 소모량도 매우 빠른 속도로 증가하고 있으며 현재 승용차에 채택되고 있는 기준 전압 14V의 전기 시스템으로는 너무 높은 전류용량이 요구되기 때문에 차량 제작의 용이성이나 탑승자의 안전을 고려할 때 기준 전압을 42V로 높일 필요성이 대두되었다.^[1] 그러나 하나의 부품 개발에 많은 시험 및 시간이 요구되는 자동차 부품 특성상 모든 부품이 42V 전원에 맞춰서 개발되기 전까지는 기존 14V 부하가 당분간 사용되어야 하므로 42V측과 14V측 모두에 배터리를 두고, 전체 연비를 높일 목적으로 42V에서 14V의 전력 변환 및 14V에서 42V로 전력 변환이 모두 가능한 양방향 DC/DC 컨버터와 42V용으로 개발된 발전기/전동기 기능의 IGS(Integrated Generator / Starter), 그리고 인버터를 채용한 그림 1과 같은 시스템이 제안되어 실용화되고 있다.

본 논문에서는 자동차 42V체계, 하이브리드 자동차 및 기타 유사 시스템에 필요한 양방향 DC/DC 컨버터의 제어기를 기존 시중품 PWM IC를 사용하여 구현했을 경우 발생하는 문제점을 고찰하고 이를 해결할 수 있는 새

로운 제어기를 제안하고 동작 상태를 시뮬레이션으로 확인하고자 한다.

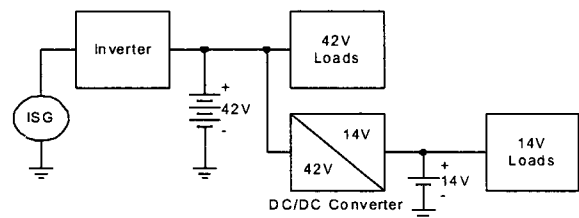


그림 1 듀얼 배터리 42V/14V 시스템
Fig. 1 Dual battery 42V/14V system

2. 기존 제어기 고찰

자동차 42V 체계와 같이 입출력 전압 차이가 크지 않고 입출력간에 절연이 필요없는 시스템의 DC/DC 컨버터는 하나의 스위치와 다이오드로 구성되는 벡 또는 부스트 토폴로지가 효율이 높고 회로가 간단하므로 많이 채용이 되며, 이를 조합하여 그림 2와 같이 싱크로너스 벡/부스트 형태로 구성하게 되면 두개의 스위칭 소자만으로 양방향 동작이 가능하므로 최적이라고 할 수 있다.

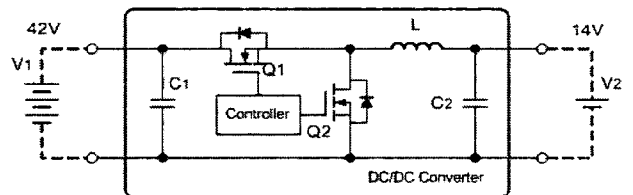


그림 2 입출력 모두에 전압원을 갖는 싱크로너스 벡/부스트 회로
Fig. 2 Synchronous Buck/Boost circuit with voltage sources in input and output

싱크로너스 벡/부스트에서 Q1과 Q2는 서로 교번적으로 ON/OFF 동작을 하게 되는데, Q1이 주 스위치 Q2가 다이오드 역할을 하게 되면 벡 동작이 되어 42V에서 14V로의 전력변환이 이루어지며, Q2가 주 스위치, Q1이 다이오드가 되면 14V에서 42V로의 전력변환이 이루어지

는 부스트 모드가 되게 된다. 이 자동차용 듀얼 배터리 42V 체계용 DC/DC 컨버터를 일반적인 DC/DC 컨버터와 비교해 보면 일반 컨버터는 출력에 부하만이 존재하는데 비해, 듀얼 배터리 42V 체계에서는 42V 배터리와 14V 배터리가 모두 사용되므로 컨버터 입출력 양단 모두에는 부하 이외에 전압원이라고 볼 수 있는 배터리가 연결된다는 점이 특징이다.

양방향 싱크로너스 벅/부스트는 그림 3과 같이 동작 방향에 따라 각각 별도의 제어기를 두고 각 제어기에서 출력되는 게이트 구동 신호를 묶어서 스위치를 구동하는 형태가 일반적이며, 이때 제어기는 스위칭 전원용으로 개발된 PWM IC중 하나를 사용하게 되고 여러 가지 장점을 가지고 있는 피크 전류 모드 방식의 IC를 채택하는 것이 일반적이다.^{[2][3]}

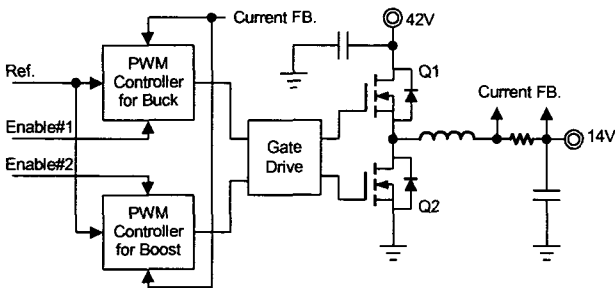


그림 3 일반적인 양방향 싱크로너스 벅/부스트 제어기
Fig. 3 Typical controller for bidirectional synchronous Buck/Boost

싱크로너스 벅/부스트 컨버터의 전압 변환율은 다음과 같다.

$$\frac{V_{14V}}{V_{42V}} = \frac{T_{Q1_{ON}}}{T_{Q1_{ON}} + T_{Q1_{OFF}}}$$

$$T_{Q1_{OFF}} = T_{Q2_{ON}} \cdot T_{Q2_{OFF}} = T_{Q1_{ON}} \quad (1)$$

여기서 V_{14V} 와 V_{42V} 는 컨버터의 입출력 전압, T는 스위치 Q1, Q2의 ON 또는 OFF 시간을 의미한다.

일반적인 스위칭 전원에서는 전원 투입시 스위칭 듀티가 0에서 서서히 증가하여 정상 상태에 도달하게 하는 소프트 스타트 기능으로 소자에 가해지는 스트레스를 줄이게 된다. 하지만 본 DC/DC 컨버터는 입력과 출력 모두에 전압원이 존재하므로 제어기가 기동과 동시에 식 (1)로 표현되는 정상 듀티를 내지 않으면 듀티가 정상 상태에 도달할 때까지 전류 방향이 반대로 되는 결과를 초래할 수 있다.

전류 모드 PWM에서는 편차 앰프의 출력이 스위치 전류와 비교가 되어 PWM 듀티가 결정이 되는데, 시판 중인 제품들은 거의 모두 참고문헌[2]에서 채택한 그림 4의 IC와 비슷하게 내부 비교기의 노이즈 마진을 충분히 확보할 수 있도록 편차 앰프 출력이나 스위치 전류 센싱

부 중 한 곳에 1V 내외의 오프셋 전압을 부가하게 된다.

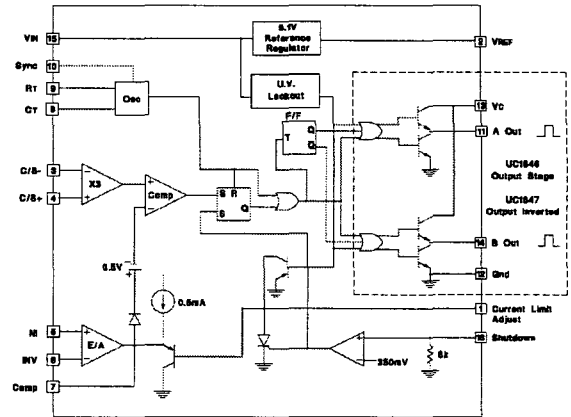


그림 4 전류모드 PWM IC 예(UC3846)
Fig. 4 Example of Current mode PWM IC (UC3846)

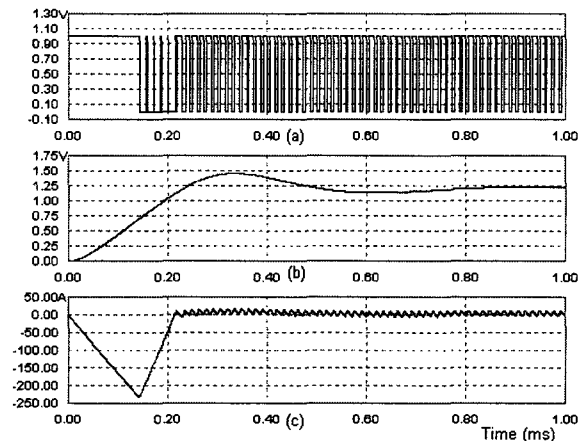


그림 5 벅 모드 기동시 전류 상태 시뮬레이션
Fig. 5 Transient current simulation during Buck mode startup (a)Q2 PWM signal (b)Error amp output voltage (c)Inductor current

제어 루프에는 안정성 확보를 위해 용량성 성분이 필연적이고, 그림 4에서와 같이 제어 루프에 노이즈 마진을 확보하기위한 오프셋이 존재하면 싱크로너스 벅/부스트 컨버터에서는 편차 앰프의 출력이 증가하여 오프셋 전압에 도달할 때까지 스위치 Q1, Q2가 스위칭 동작을 하지 못하고 운전 모드에 따라 하나가 계속 ON되는 상태가 되어 그림 5의 시뮬레이션 결과와 같이 이 시간동안 매우 큰 전류가 흐르게 된다.

기동시 이런 과도한 전류는 스위칭 소자, 인덕터 및 기타 소자들 수명에 많은 영향을 미치게 되므로 듀티가 정상 상태에 도달할 때까지 스위칭 소자 구동을 억제하는 기법 등을 통해 제거하여야 하는데, 이런 현상이 운전 방향에 따라 하나의 제어기를 사용하는 제어 특성상 나머지 제어기는 편차 앰프 출력이 0 또는 최대값으로 포화될 것이기 때문에 기동시 뿐만 아니라 방향 전환시에도 동일한 문제가 발생하게 되므로 동일한 대책이 필요하며 원활한 방향 전환이 불가능하게 된다.

또한 스위치 전류 검출에 필요한 차동 증폭기를 내장한 형태의 단전원 싱크로너스 벡/부스트 전용의 PWM IC를 사용할 경우에는 회로 구성이 간단해지기는 하지만 제어기에서 음의 스위치 전류 검출이 불가능하므로 음의 과도 전류 보호가 불가능하다.

또한 입출력 모두에 전압원을 갖는 싱크로너스 벡/부스트는 음의 방향으로 전류가 흐를 수 있는 통로가 존재하므로 항상 연속모드로 동작이 되나 제어기에서는 음의 전류 검출이 불가능하므로 전류 크기에 따라 제어기 게인이 바뀌게 되는 문제가 발생한다.

3. 제안하는 제어기

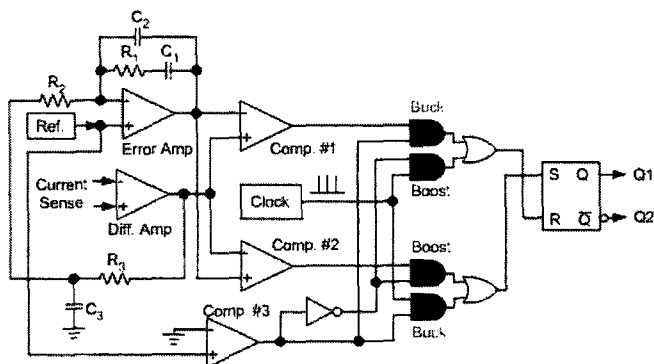


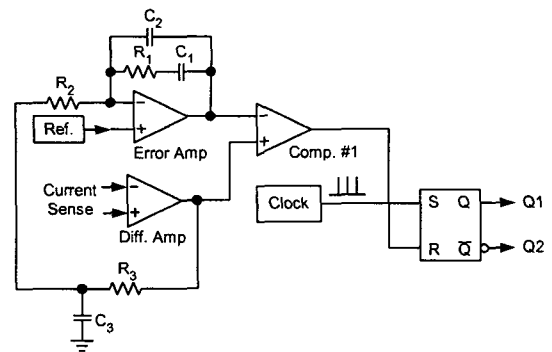
그림 6 제안하는 양방향 DC/DC 컨버터용 제어기
Fig. 6 Proposed controller for bidirectional DC/DC converter

운전 방향에 따라 단전원 PWM IC 두개를 사용하는 기존 시스템의 문제를 해결하기 위해서 그림 6과 같이 편차 앰프와 스위치 전류를 검출하는 차동 앰프 전원으로 양전원을 사용하고 운전 방향에 상관없이 하나의 제어기로 양방향 동작이 가능한 회로를 설계하였다. 외부로부터의 지령 신호는 여러 컨버터를 병렬 구동하여 차량에서 요구되는 전력 용량을 얻을 경우를 대비하여 전류로 하고, 지령 신호가 양이면 벡 동작, 음이면 부스트 동작을 하도록 전력 변환 방향이 결정된다.

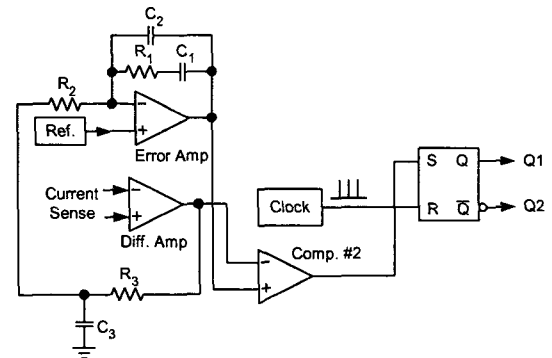
PWM 주파수는 클럭 회로에 의해 고정 주파수로 결정이 되며, 이 클럭 신호는 비교기 #3에서 출력하는 운전 방향 신호와 AND 게이트에 입력되어 그림 7과 같이 벡 동작일 때는 클럭 신호가 RS 플립플롭의 셋 단자에, 부스트 동작일 때는 리셋 단자에 가해지게 하여, 벡 동작일 때는 Q1이 주 스위치 역할을, 부스트 동작일 때는 Q2가 주스위치 역할을 할 수 있도록 한다.

편차 앰프와 스위치 전류를 검출하는 차동 앰프는 전원으로 양전원을 사용하므로 입력 조건에 따라 출력이 양 또는 음이 될 수 있으며 비교기 #1과 #2에서 비교되어 모드별 주 스위치의 OFF 시점이 결정된다.

본 제어기에서는 지령신호에 따라 DC/DC 컨버터의 운전 방향이 자동으로 결정이 되므로 제어기 자체는 약간 복잡해지지만 컨버터 운전 방향에 따른 제어기 선택



(a)



(b)

그림 7 모드별 제어기 동작

Fig. 7 Controller operation

(a) Buck mode (b) Boost mode

로직이 필요한 기존 제어기 시스템에 비해서 외부 부가 회로가 훨씬 줄어들며, 방향 전환시 편차 앰프 포화 등과 같은 문제가 없기 때문에 원활한 방향 전환을 이룰 수 있는 장점이 있다.

4. 시뮬레이션 결과

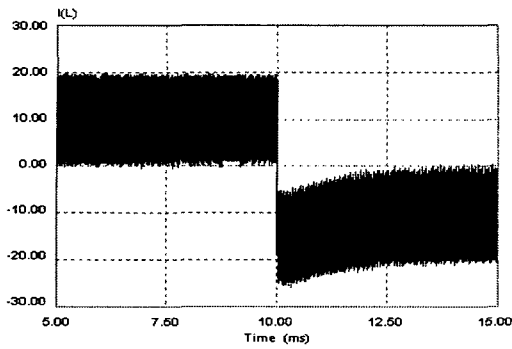
다음 그림은 시뮬레이션 프로그램 PSIM을 이용하여 그림 2의 싱크로너스 벡/부스트 컨버터를 모델링 하여 수행한 시뮬레이션 결과이며 표 1은 시뮬레이션의 시스템 파라미터이다.

표 1 시뮬레이션 시스템 파라미터

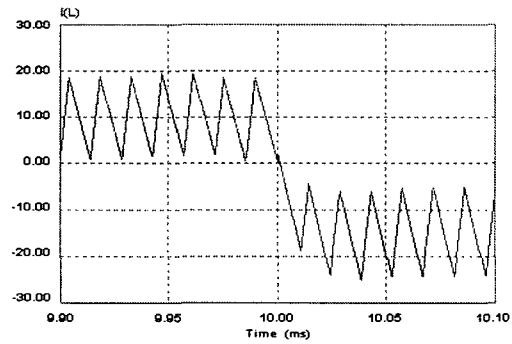
Table 1 Simulation parameters

Parameters	Value
Input/Output Voltage (V_1, V_2)	42V, 14V
Inductor (L)	7 μ H
Capacitor (C_1, C_2)	22 μ F, 20 μ F
Switching Frequency	70KHz
Current Detecting Resistor(R)	0.003 Ω

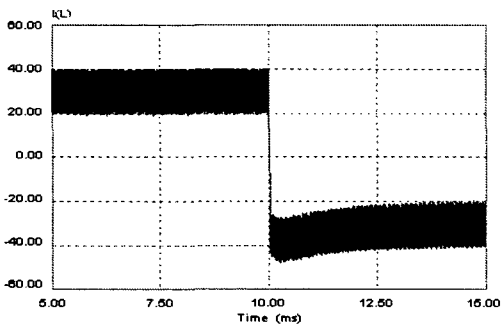
그림 8은 전류 지령치를 10A와 30A로 하여 벡 모드로 동작 중에 지령을 -10A와 -30A로 스텝으로 변화시켜 부스트 모드로 방향을 전환하였을 때 인덕터 전류를 시뮬레이션한 결과이다.



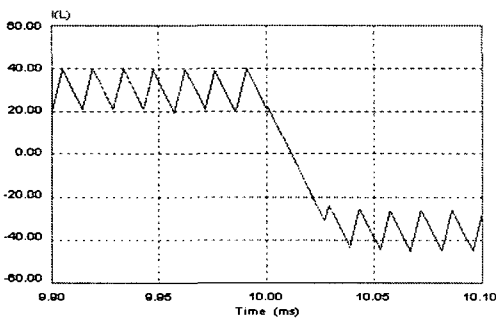
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 8 방향 절환시 인덕터 전류

Fig. 8 Inductor current during direction change

- (a) Macro View of $\pm 10A$ change
- (b) Micro View of $\pm 10A$ change
- (c) Macro View of $\pm 30A$ change
- (d) Micro View of $\pm 30A$ change

시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 지령 전류의 크기에 상관없이 컨버터가 잘 동작함을 알 수 있고, 지령 전류의 극성 변화에 의해서 방향 절환이 원활하게 이루어질 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

DC/DC 컨버터의 제어기는 일반적으로 범용 스위칭 전원용 PWM IC를 사용하여 구성한다. 그러나 이런 상용 IC들은 모두 단전원을 이용하는 제품들이고 주/부 스위치를 절환하는 기능을 가지고 있지 않으므로 운전 모드에 따라 전류 방향과 주/부 스위치를 바꿀 필요가 있는 양방향 컨버터는 하나의 범용 PWM IC만으로 회로 구현이 어렵다. 특히, 전류 모드 PWM 방식을 사용할 경우에는 스위치에 흐르는 전류로 스위칭 Off 시점을 결정하기 때문에 스위치 전류 방향이 바뀌는 양방향 컨버터에서는 모드별로 PWM IC를 각각 따로 사용하게 된다. 개개의 제어기를 사용시 PWM 제어 루프 즉, 벡 모드일 때는 부스트 제어 루프, 부스트 모드일 때는 벡 제어 루프의 에리 편차 앰프가 한쪽으로 포화될 것이기 때문에 모드 절환 동작시마다 PWM 듀티가 입력 전압과 출력 전압으로 결정되는 값이 될 때까지 일정 시간동안 스위칭 동작이 멈추게하는 회로가 필요하므로 원활한 방향 절환을 이룰 수 없게 된다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하고자 전원으로 양전원을 사용하고 하나의 제어기로 양방향 동작이 가능하게 하는 회로를 제안하였으며 시뮬레이션으로 그 유효성을 검증해보았다. 향후 본 회로를 바탕으로 시제품을 제작하고 실험을 할 예정이다.

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2004-003-D00117)

참 고 문 헌

- [1] J.M. Miller, P.R. Nicasri, "The Next Generation Automotive Electrical Power System Architecture: Issues and Challenges" DASC98 Digital Avionic Systems Conference, Bellevue, WA, Oct.31-Nov.6, 1998
- [2] A. Pfaelzer, M. Weiner, and A. Parker, "Bi-Directional Automotive 42/14 Volt Bus DC/DC Converter", SAE Transitioning to 42-Volt Electrical Systems(SP-1556), Warrendale, PA, 2000, pp.77-88
- [3] T.C. Neugebauer, D.J. Perreault, "Computer-Aided Optimization of dc/dc Converters for Automotive Applications" Power Electronics Specialists Conference 2000, Galway, Ireland, Jun18-23, 20