

Four-Switch Buck-Boost 컨버터의 효율 개선을 위한 Quadrangle Modulation

윤준희¹, 김진욱², 정형건¹, 김성민¹
 한양대학교 에리카 캠퍼스¹, 한화에어로스페이스²

Quadrangle Modulation for Efficiency Enhancement of Four-Switch Buck-Boost Converters

Junhee Yoon¹, Kim Jinuk², Jung Hyunggun¹, Kim Sungmin¹
 Hanyang University ERICA Campus¹, Hanwha Aerospace²

ABSTRACT

Four-Switch Buck Boost(FSBB) 컨버터는 비절연형 양방향 전력 전달을 위한 DC/DC 컨버터로 주목을 받고 있다. FSBB 컨버터는 양 직류단에 Half-Bridge 컨버터를 각각 구현하고, 두 Half-Bridge 컨버터 사이에 직렬 인덕터를 위치시킨다.

FSBB 컨버터의 기존 제어 방식은 Step-up 또는 Step-down 동작에 따라 Continuous Conduction Mode(CCM)로 동작하기 때문에 Hard Switching으로 인한 높은 손실이 발생한다.

이러한 문제를 해결하기 위해, Zero-Voltage Switching(ZVS)을 달성할 수 있는 다양한 Quadrangle Modulation 기법이 제안되었다. 본 논문에서는 기존 Quadrangle Modulation과 비교하여 새로운 Quadrangle Modulation을 제안한다. 제안한 Modulation은 직렬 인덕터에 흐르는 전류의 RMS 값과 Peak 값이 작다는 장점이 존재한다.

250kW급 FSBB 컨버터에 대한 PLECS 시뮬레이션을 통해 제안하는 Modulation의 실효성을 검증한다.

1. Introduction

최근 EV(Electric Vehicle) 충전기, PV(Photovoltaic) 시스템, 반도체 변압기 등 다양한 어플리케이션에서 넓은 입/출력 전압 범위를 갖는 양방향 DC/DC 컨버터가 주목받고 있다. 양방향 DC/DC 컨버터 중 FSBB 컨버터는 비절연형 양방향 DC/DC 컨버터로서 적은 수의 능동 및 수동 소자로 구성할 수 있고, 비반전(Non-Inverting) 출력 특성을 갖는 점에서 큰 장점을 갖고 있다.

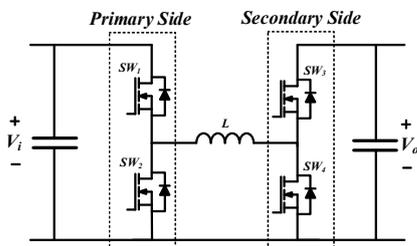


그림 1 Four-switch buck-boost 컨버터
 Fig. 1 Four-switch buck-boost(FSBB) converter

기존 FSBB 컨버터 제어는 승압을 위한 Step-up 동작과 강

압을 위한 Step-down 동작에 따라, 한 쪽 Half-bridge의 스위치 동작을 고정하고 나머지 한 쪽을 스위칭 하는 방식으로 이루어진다. 하지만 이러한 스위칭 방식은 ZVS 또는 ZCS(Zero-Current Switching)를 고려하지 않은 Hard Switching이기 때문에, 스위치의 턴-온/오프 시 스위칭 손실이 발생하여 컨버터 효율이 낮다는 단점이 존재한다.

이를 해결하기 위해, 추가적인 수동 및 능동 소자 없이 ZVS를 달성할 수 있는 Quadrangle Modulation이 제안되었다^[1]. Quadrangle Modulation은 직렬 인덕터 전류를 ZVS를 위한 음의 전류값 I_{ZVS} 를 기준으로 사각파 형태로 만드는 기법을 말한다. Quadrangle Modulation을 위한 스위칭 방식은 그림 2와 같이 FSBB 컨버터 1,2차측 Half-bridge의 듀티(D_1, D_2)와 위상차(ϕ_{12})에 의해 결정된다. 최근 Quadrangle Modulation을 수행하기 위한 많은 기법들이 연구되고 있지만 인덕터 전류의 RMS값과 Peak 값을 최소로 하지 않거나, 스위칭을 위한 듀티와 위상차를 실시간으로 제어하기 어려워 Look-up 테이블이 필요하다는 단점이 존재한다.

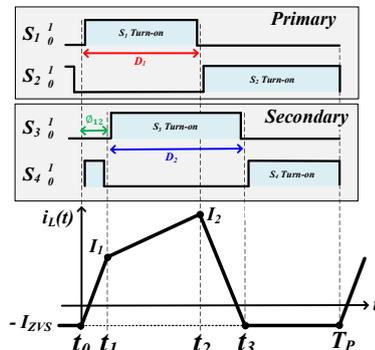


그림 2 Quadrangle modulation의 인덕터 전류 및 스위칭 파형
 Fig. 2 Quadrangle modulation with inductor current and switch signal

본 논문에서는 인덕터 전류의 RMS 와 Peak 값이 가장 작으며, 동시에 Look-up 테이블 없이 전력식을 통해 실시간 제어가 가능한 Quadrangle Modulation 제어 기법을 제안한다. 또한 제안하는 Quadrangle Modulation 적용을 위한 250kW급 FSBB 컨버터의 시스템 제정수를 설계한다. PLECS 시뮬레이션을 통해 제안하는 Modulation을 검증하고, 기존 기법들과 비교 분석하였다.

2. Proposed Quadrangle Modulation

2.1 Proposed Quadrangle Modulation Principle

그림 3은 제안하는 Quadrangle Modulation을 나타내며, 크게 Light load mode와 Heavy load mode로 구분된다. Step-up 동작과 Step-down 동작에 따라 Light load mode에서 전달할 수 있는 경계 전력량(Marginal Power, $P_{Light,max}$)이 각각 결정되고, Light load mode의 경계 전력량을 초과하는 경우 Heavy load mode로 전환되어 전력을 공급한다.

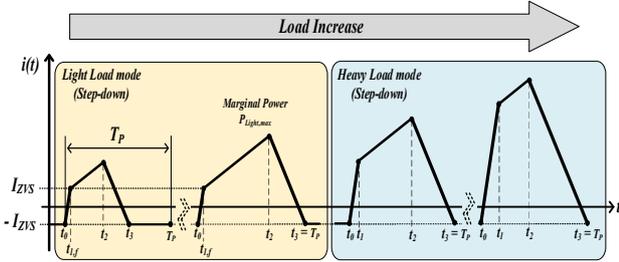


그림 3 제안하는 Quadrangle modulation 기법
Fig. 3 The proposed quadrangle modulation method

2.2 Calculating of the Switching Times

각 동작 Mode에 따른 듀티와 위상차는 FSBB 컨버터의 전력 식으로부터 도출할 수 있다.

FSBB 컨버터의 전력식은 직렬 인덕터에 흐르는 전류를 적분하여 계산할 수 있다. 스위칭 한 주기동안 인덕터에 흐르는 전류는 다음과 같다.

$$i_L(t) \begin{cases} -I_{ZVS} + \frac{V_i}{L}t & (0 \leq t < t_1) \\ -I_{ZVS} + \frac{V_o}{L}t_1 + \frac{V_i - V_o}{L}t & (t_1 \leq t < t_2) \quad \dots (1) \\ -I_{ZVS} + \frac{V_o}{L}t_1 + \frac{V_i}{L}t_2 - \frac{V_o}{L}t & (t_2 \leq t < t_3) \\ -I_{ZVS} & (t_3 \leq t < T_p) \end{cases}$$

V_i , V_o 는 FSBB 컨버터의 입/출력 전압, L 은 직렬 인덕터, T_p 는 스위칭 주기를 나타낸다. 식 (1)을 통해 컨버터의 출력 전력을 계산할 수 있다.

$$P_o = \frac{1}{T_p} V_o \int_{t_1}^{t_3} i_L(t) dt \\ = \frac{V_o I_{ZVS}}{T_p} (t_1 - t_3) + \frac{V_o}{2T_p L} (-V_o t_3^2 - V_i t_2^2 - (V_i + V_o)t_1^2 + 2V_o t_1 t_3 + 2V_i t_2 t_3) \quad \dots (2)$$

$t = t_3$ 시점에서의 인덕터 전류는 $-I_{ZVS}$ 와 동일해야 하므로 다음과 같은 조건을 얻을 수 있다.

$$-I_{ZVS} + \frac{V_o}{L}t_1 + \frac{V_i}{L}t_2 - \frac{V_o}{L}t_3 = -I_{ZVS} \\ t_2 = \frac{V_o}{V_i}(t_3 - t_1) \quad \dots (3)$$

식 (3)을 식(2)에 대입하게 되면, 최종적으로 컨버터의 출력 전력은 식 (4)와 같이 t_1 과 t_3 에 의해 결정된다.

$$P_o = \frac{V_o I_{ZVS}}{T_p} (t_1 - t_3) - \frac{V_o}{2T_p L} \left(\frac{V_o^2}{V_i} (t_3 - t_1)^2 + (V_i + V_o)t_1^2 - V_o t_3^2 \right) \quad \dots (4)$$

전력 전달 시, 인덕터 전류의 RMS 및 Peak 값을 최소로 하기 위해서는 t_1 과 t_2 사이의 구간을 최대로 유지하며 전력을 전달해야 한다^[2]. 따라서 Light load mode에서는 t_1 을 ZVS 조건을 만족시킬 수 있는 t_1 의 최솟값으로 고정하고, t_3 를 제어함으로써 전력을 전달한다. Light load mode의 Step-up 동작에서 ZVS 조건을 만족시키기 위해서는 그림 2의 I_2 가 I_{ZVS} 보다 커야 하고 Step-down 동작에서는 I_1 이 I_{ZVS} 보다 커야 한다. 따라서 Step-up/down 동작에 따른 t_1 의 최솟값은 다음과 같다.

$$\text{Light Load Mode(Step up): } t_1 = \frac{2I_{ZVS}LV_i}{V_o^2} - \frac{(V_i - V_o)}{V_o} t_3 \quad \dots (5)$$

$$\text{Light Load Mode(Step down): } t_1 = \frac{2I_{ZVS}L}{V_i}$$

최종적으로 식 (5)를 통해 출력 전력은 t_3 에 의해 결정되며, Light load mode의 전력식을 t_3 에 대해 전개하면 다음과 같다.

$$\text{Step up: } t_3 = \frac{I_{ZVS}L(V_o^2 - 2V_i^2) + V_o \sqrt{LV_o(LV_o I_{ZVS}^2 + 2P_{ref}T_p(V_o - V_i))}}{V_o(V_i V_o - V_i^2)} \quad \dots (6)$$

$$\text{Step down: } t_3 = \frac{I_{ZVS}L(V_o^2 - 2V_i^2) + V_o \sqrt{LV_o(LV_o I_{ZVS}^2 + 2P_{ref}T_p(V_o - V_i))}}{V_o(V_i V_o - V_i^2)}$$

P_{ref} 는 출력단 캐패시터 에너지 제어기의 출력인 전력 지령을 의미한다. 캐패시터 에너지 제어기는 직류단 캐패시터에 저장된 에너지를 일정하게 제어하며, 이는 직류단 전압을 일정하게 제어하는 것과 동일하다.

Light load mode에서 t_3 가 스위칭 주기인 T_p 에 도달하는 경우, Light load mode의 최대 전력량에 도달하며 Heavy load mode로 전환된다. Heavy load mode에서는 t_3 를 T_p 로 고정시키고, 고정되어 있던 t_1 을 점차 늘리며 전력을 전달한다. 따라서 Heavy load mode에서 전달하는 전력은 t_1 에 의해 결정되며, Heavy load mode의 전력식을 식 (7)과 같이 t_1 에 대해 전개할 수 있다.

$$t_1 = \frac{T_p V_o^3 - \sqrt{-V_i V_o (I_{ZVS} L V_i V_o (2T_p V_i + 2T_p V_o - I_{ZVS} L) + 2P_{ref} T_p L (V_i^2 + V_i V_o + V_o^2) - (T_p V_i V_o)^2}}}{V_i^2 V_o + V_i V_o^2 + V_o^3} \quad \dots (7)$$

각 동작 Mode에 따라 계산된 스위칭 시점 t_1 , t_2 , t_3 를 듀티와 위상차로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{cases} D_1 = t_2 \\ D_2 = t_3 - t_1 \quad \dots (8) \\ \varphi_{12} = t_1 \end{cases}$$

2.3 Design of Series Inductance

FSBB 컨버터의 직렬 인덕턴스를 너무 크게 설계하는 경우, 최대 전력 조건에서 부하에 정격 전력을 전달할 수 없으며, 인덕턴스를 너무 작게 설계하는 경우 제어 민감도가 높아지게 된다. 따라서 직렬 인덕턴스는 시스템 정격 전력을 고려하여, 정격 전력을 전달할 수 있는 범위 내에서 가장 큰 값으로 선정한다.

Heavy load mode에서 최대 전력 전달 시 t_1 의 값은 전력식 $P_{tr,heavy}$ 을 t_1 에 대해 미분한 후, 0이 되는 t_1 의 값으로 구할 수 있다.

$$t_{1,max} = \frac{V_o^2 T_p + V_i I_o L}{V_i^2 + V_i V_o + V_o^2} \quad \dots (9)$$

$t_{1,max}$ 를 통해 Heavy load mode에서의 최대 전력량을 계산할 수 있으며, 최대 전력량을 시스템의 정격 전력으로 설정하여 직렬 인덕턴스를 설계한다.

3. Simulation Results

본 논문에서는 250kW급 FSBB 컨버터 시스템 제정수를 설계한 후, PLECS를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 FSBB 컨버터의 시스템 사양을 나타낸다.

Parameter	Abbreviation	Value
정격 전력	P_{Rated}	250[kW]
입력 전압	V_i	700~900[V]
출력 전압	V_o	800[V]
스위칭 주파수	f_{sw}	20[kHz]
직렬 인덕턴스	L	18.17[μ H]
ZVS 전류	I_{ZVS}	10.8[A]

표 1 FSBB 컨버터의 시스템 제정수
Table 1 FSBB converter system parameters

그림 4(a)는 Step-up 동작에서의 인덕터 전류 시뮬레이션 파형이며, 그림 4(b)는 Step-down 동작에서의 인덕터 전류 시뮬레이션 결과 파형이다.

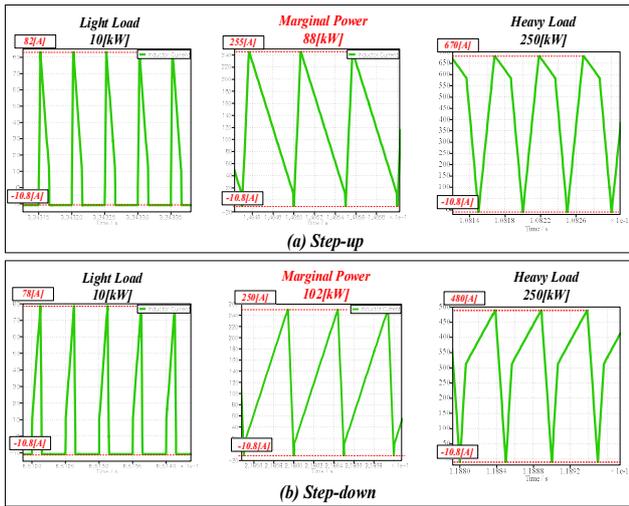


그림 4 제안하는 Quadrangle modulation 적용 시, 인덕터 전류 시뮬레이션 파형 (a) Step-up (b) Step-down
Fig. 4 Inductor current simulation results of proposed quadrangle modulation (a) Step-up (b) Step-down

각 동작에 따른 시뮬레이션은 10[kW] 경부하 조건, Light load mode의 경계 전력 전달 조건, 250[kW] 정격 전력 전달 조건을 모의하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 인덕터 전류가 설계한 음의 전류값 I_{ZVS} 을 유지하며 정상적으로 전력을 전달하는 것을 확인하였다.

그림 5는 제안하는 Quadrangle Modulation을 동일한 전력 전달 조건에서 기존 방법들과 비교한 인덕터 전류 시뮬레이션 파형이다[2][3]. 경부하 조건인 50[kW] 및 정격 전력 250[kW] 전달 시, 제안하는 Quadrangle Modulation은 기존의 두 방법과 비교하여 인덕터의 RMS 와 Peak 전류가 작다는 것을 확인할 수 있다.

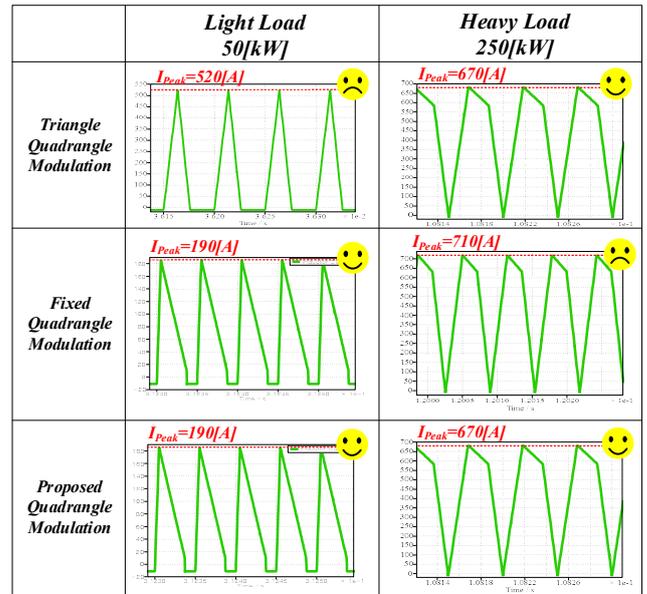


그림 5 제안하는 Quadrangle modulation과 기존 modulation 방법 비교 시뮬레이션 파형

Fig. 5 Comparison simulation results between the proposed and conventional modulation

4. Conclusion

본 논문에서는 FSBB 컨버터의 ZVS 동작을 위한 Quadrangle Modulation을 제안하였다. 기존의 방법들과 비교하여 전력 전달 시, 인덕터 전류의 RMS 와 Peak 값이 작고 실시간 계산을 통해 Modulation이 가능하다는 장점이 존재한다. 250[kW]급 FSBB 컨버터의 시스템 제정수를 설계하고 PLECS 시뮬레이션을 통해 제안하는 방법을 기존의 방법들과 비교하여 검증하였다.

이 논문은 2024년 한화에너지스페이스 E-Drive HUB의 지원을 받아 수행된 연구임

참 고 문 헌

- [1] S. Waffler and J. W. Kolar, "A Novel Low-Loss Modulation Strategy for High-Power Bidirectional Buck+Boost Converters," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 6, pp. 1589–1599, June 2009
- [2] L. Tian, X. Wu, C. Jiang and J. Yang, "A Simplified Real-Time Digital Control Scheme for ZVS Four-Switch Buck-Boost With Low Inductor Current," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 8, pp. 7920–7929, Aug. 2022
- [3] Y. Bai, Y. Cao, V. Mitrovic, B. Fan, R. Burgos and D. Boroyevich, "A Simplified Quadrangle Current Modulation for Four-Switched Buck-Boost Converter (FSBB) with a Novel Small Signal Model," 2023 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Orlando, FL, USA, 2023