

소프트 스위칭을 이용한 절연형 고효율 DC/DC 컨버터

박성준*, 송성근**, 허민호***
 전남대학교*, 전자부품연구원**, 준성이엔엘***

High Efficiency Isolated DC/DC Converter Using Soft Switching

Sung-Jun Park*, Sung-Geun Song**, Min-Ho Heo***
 Chonnam University*, KETI**, Junsung E&R***

Abstract - 현재 학계에서는 Soft Switching 방식에 대한 다양한 토폴로지 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 논문에서는 Soft Switching을 이용한 새로운 절연형 DC/DC 컨버터 토폴로지를 제안하였다. 제안된 토폴로지는 입력전압의 거의 모든 영역에 대하여 97% 이상의 효율을 가짐을 검증하였다.

1. 서 론

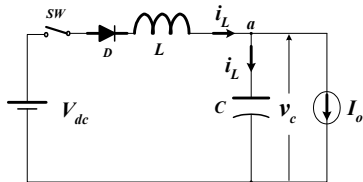
Hard Switching 방식의 PWM 컨버터는 출력제어 성능은 우수하나, 높은 Switching Stresses나 많은 Switching Loss 및 스위칭 주파수에 비례하여 증가하는 단점이 있다[1]. 이러한 문제로 인하여 효율 및 단위 체적당 전력밀도 높이는 데어 한계가 있다. 또한 이러한 스위칭 방식은 스위치 On, Off시 큰 전류 기울기나 전압기울기로 기인하여 EMI(Electro Magnetic Interference) 문제가 크게 나타나며 이에 대한 대책이 필요하다. 따라서 이러한 결점을 극복하기 위해 스위치 양단의 전압 도는 전류가 영인 순간에 스위치의 상태를 조작하는 Soft Switching 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 Soft Switching 방식을 이용한 절연형 DC/DC컨버터의 새로운 토폴로지 형태를 제안한다. 또한 시뮬레이션을 통하여 제안된 방식의 타당성을 검증 하였다.

2. 본 론

2.1 L-C Resonant Tank의 해석

대부분 Soft Switching 방식 컨버터는 L-C resonant Tank 회로를 이용하여 Tank의 공진에 의한 전압, 전류가 Oscillating하여 부하에 공급되며, 스위치는 영전압 또는 영전류에서 상태를 조작한다. 본 연구에서 사용되는 Tank 타입은 콘덴서에 병렬로드를 가진 Series Resonant Circuit를 이용하는 Soft Switching DC/DC컨버터이다.



<그림 1> 콘덴서에 병렬로드를 가진 Series Resonant Circuit

그림 1과 같이 Series Resonant Circuit에서 다이오드는 공진시 에러 지 회수를 방지하기 위한 것이며, 스위치가 온 되었을 때 전압방정식은 및 a점에서 KCL은 아래와 같다.

$$v_c = V_{dc} - L \frac{di_L}{dt} \tag{1}$$

$$i_L - i_c = I_o \tag{2}$$

공진형 Tank C의 전류는 아래와 같다.

$$i_c = C \frac{dv_c}{dt} = -LC \frac{d^2 i_L}{dt^2} \tag{3}$$

식 (1)을 식 (3)에 대입하면 2차 미분방정식은 아래와 같다.

$$\frac{d^2 i_L}{dt^2} + \omega_n^2 i_L - \omega_n^2 I_o = 0 \tag{4}$$

단, $\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ (Angular Resonance Frequency)

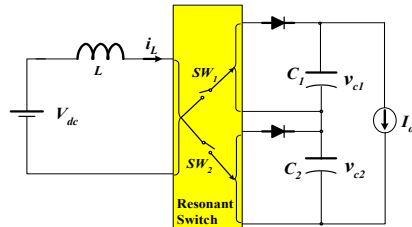
식 4에서 알 수 있듯이 공진 주파수는 인덕터와 콘덴서에 의해 결정되며, 콘덴서는 부하전류를 담당할 수 있는 용량으로 결정되어야 한다. 위의 방정식 해는 아래와 같다.

$$i_L(t) = I_o + I_o \cos(\omega_n t) + \frac{V_{dc} - V_{co}}{Z_n} \sin(\omega_n t) \tag{5}$$

$$v_c(t) = V_{dc} - (V_{dc} - V_{co}) \cos(\omega_n t) - Z_n I_o \sin(\omega_n t) \tag{6}$$

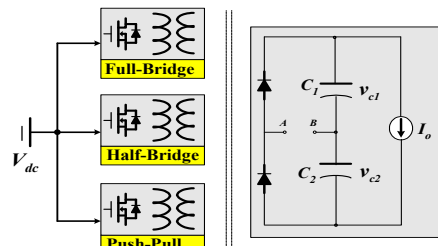
단, $Z_n = \sqrt{\frac{L}{C}}$ (특성 임피던스)

2.2 제안된 Soft Stitching의 구조



<그림 2> 제안된 공진형 Soft Stitching의 구조

그림 2는 본 논문에서 제안한 공진형 Soft Switching DC/DC 컨버터의 기본 구조를 나타내고 있다. 콘덴서에 병렬로드를 가진 Series Resonant Circuit에서 공진시 전류가 영인 시간에는 다음 공진이 일어날 수 있는 조건이 되지 못하고, 어느 정도 시간이 지나 V_co가 입력 직류전압보다 다소 낮아야 파워가 전달되는 공진조건이 되며, 이는 공진전류의 피크치를 크게 하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 두 개의 Tank 콘덴서를 이용하고, 리액터는 공유함으로써 공진전류 피크치를 저감하고, 전압 승압비를 2배로 하는 타입을 사용하였다, 즉 그림에서 Resonant Switch 2가 교번하면서 스위치 하도록 하였다. 이 방식은 고주파 변압기를 사용할 시 정류의 교번자계를 형성함으로써 변압기의 자속 변동분을 크게 할 수 있는 구조를 취하고 있다.

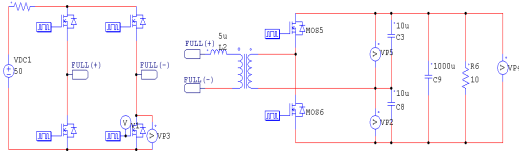


<그림 3> 절연형 Soft Stitching의 구조

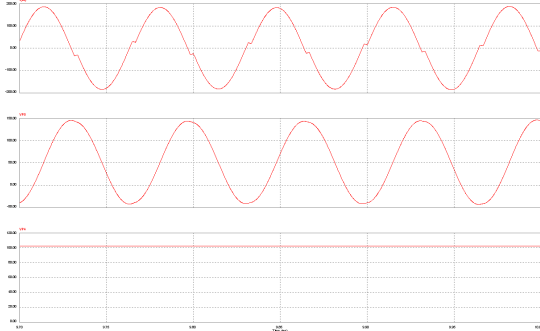
그림 3은 Series Resonant Circuit를 이용한 절연형 Soft Stitching의 구성 방식에 대한 것이다. 교번 전압을 인가하기 위한 변압기 1차측 전력변환기의 스위칭 구조는 크게 Push-Pull, Half-Bridge, Full-Bridge로 구별될 수 있으며, Push-Pull 컨버터는 낮은 입력전압 및 대 전류용에 적합하며, Half-Bridge 컨버터는 높은 입력전압의 경우에 적합하며, Full-Bridge는 노이즈 저감을 위한 위상 변위형 컨버터로 사용 시 적합한 구조이다. 2차측 구조에는 반파정류방식 및 더블러가 고려될 수 있으며, 반파정류방식은 변압기의 2차권선이 2개라는 단점이 있으며, 더블러 방식은 변압기의 2차권선이 1개이며, 이 방식이 보편적으로 우수하다.

그림 4는 Full-Bridge 방식 Soft DC/DC 컨버터의 구조를 나타내고 있

으며, 공진을 위한 Tank용 콘덴서는 10[uF], 인덕터는 5[uH]이다. 그림 5는 그림 4의 Full-Bridge 방식의 시뮬레이션 결과이며, 위에서부터 변압기 입력전류, Tank C의 전압 및 출력전압을 나타내고 있다.



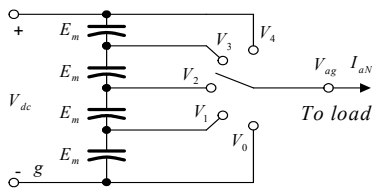
<그림 4> Full-Bridge 방식 Soft DC/DC 컨버터의 구조



<그림 5> Full-Bridge 방식 컨버터의 시뮬레이션 결과

2.3 제안된 다중레벨 Soft Stitching의 구조

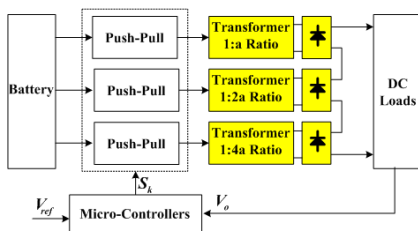
그림 6은 5-레벨 전력변환기에 대한 개념도를 나타내고 있으며, 여기서 다중레벨 전력변환기의 출력 V_{ag} 는 V_1, V_2 등의 노드전압을 선택함에 따라 임의의 전압레벨이 된다. 그러므로 다중레벨 전력변환기는 다채널 단극 스위치(Single pole multi throw)로 생각할 수 있다. 즉, 한 번에 한 노드에 연결된 스위치에 의해 한 개의 원하는 출력을 형성한다. 다중레벨 전력변환기의 구조는 일반적으로 동일 전압 또는 이상 전압을 갖는 독립된 직류 전압으로부터 몇 개의 직류 전압 레벨을 출력지령전압에 가깝게 합성 시키는 것으로 레벨 수를 증가 시킬수록 합성된 출력 파형의 정도는 증대된다.



<그림 6> 다중레벨 인버터의 단상 개념도

그러므로 다중레벨 전력변환기는 다채널 단극 스위치(Single pole multi throw)로 생각할 수 있다. 즉, 한 번에 한 노드에 연결된 스위치에 의해 한 개의 원하는 출력을 형성한다. 다중레벨 전력변환기의 구조는 일반적으로 동일 전압 또는 이상 전압을 갖는 독립된 직류 전압으로부터 몇 개의 직류 전압 레벨을 출력지령전압에 가깝게 합성 시키는 것으로 레벨 수를 증가 시킬수록 합성된 출력 파형의 정도는 증대된다.

일반적으로 컨버터에서는 한 개의 전원전압을 사용하기 위해 변압기 절연방식을 사용하였으며, 변압기의 권수비를 이용하여 출력전압 레벨 증대를 이룬 전력변환기이다. 위와 같은 다중레벨 전력변환기에서 다수의 인버터를 사용하여 효율적으로 많은 인버터의 출력전압 레벨을 발생하기 위해서는 인버터의 출력전압 레벨을 적절히 선택할 필요성이 있다. 이때 출력전압의 적절한 레벨선택은 변압기의 권수비 설정이다. 권수비 설정에서 최대레벨을 발생시킬 권수비는 아래 식과 같다.

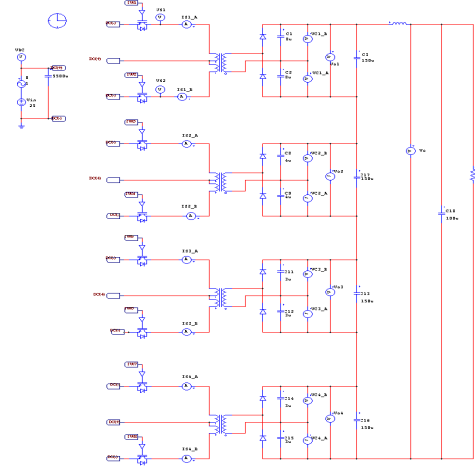


<그림 7> 직류전원 발생용 8 레벨 전력변환기

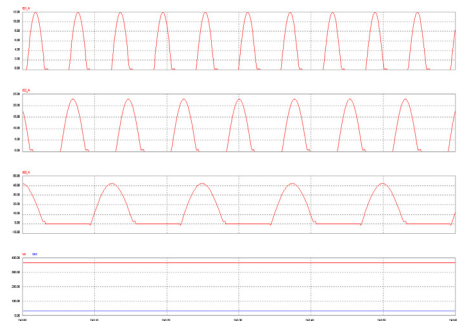
그림 3과 같은 구조에서는 부의 전압을 발생할 수 없어 변압기의 권수비는 $a_n = 2^{n-1}$ 에 의해 계산된다.

그림 8은 Push_Pull 방식 다중레벨 Soft DC/DC 컨버터의 구조를 나타내고 있다. 본 Soft DC/DC 컨버터의 구조는 출력전압제어가 불가능한 구조로 출력전압을 제어하기 위해서는 다수의 컨버터를 사용하여 불연속적으로 제어를 행하여야 하며, 연속적 제어를 위해서는 하드 스위칭용 연속제어기와 결합하는 구조를 취하여야 한다. 그림 10은 변압기의 권수비를 설정함으로써 16레벨의 다중레벨 컨버터의 구성을 나타내고 있다. 본 전력변환기에서는 변압기의 권수비를 1: 2: 4: 16으로 설정하였다. 출력전압을 직렬로 연결하는 구조를 취하고 있다. 따라서 변압기의 용량비는 또한 1: 2: 4: 16으로 제작하여야 하며, 이로 인하여 변압기의 각 누설리액터가 상이하고, Tank용 콘덴서의 전압이 다름으로 공진주파수의 설정이 상이하게 설계되어야 한다.

그림 9는 그림 8에 대한 시뮬레이션 결과로 Push_Pull의 1차측 2권선 중 한 권선에 입력되는 전류를 나타내고 있다. 그림 10의 전력변환기에서 위에서부터 변압기 권수비가 1: 2: 4인 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이 변압기 권수비가 적을수록 누설 인덕터가 적어 공진주파수가 증가함을 알 수 있다.



<그림 8> Push_Pull 방식 다중레벨 Soft DC/DC 컨버터의 구조



<그림 9> Push_Pull 방식 다중레벨 컨버터의 시뮬레이션 결과

3. 결 론

본 논문에서는 하드스위칭 컨버터에서 치명적인 약점을 보완하기 위해 Soft Switching 방식을 이용한 절연형 DC/DC 컨버터의 새로운 다양한 토폴로지 형태를 제안하고, 시뮬레이션을 통하여 제안된 방식의 타당성을 검증 하였다. 또한 제안된 L, C 공진타입 DC/DC 컨버터는 변압기에 존재하는 기생 인덕터 성분을 공진회로에 이용함으로써 기생발진을 최소화 시킬 수 있는 특성을 갖고 있으며, 공진을 위한 인덕터를 누설 인덕터로 대체함으로써 고전력 밀도화를 이룰 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] Jain, M.; Jain, P.K.; Daniele, M, "Analysis of a bi-directional DC-DC converter topology for low power application", IEEE 1997 Canadian Conference on, Volume 2, 25-28 May 1997 Page(s):548 - 551 vol.2
 [2] 이봉준, 안태영, "소프트 스위칭 방식의 새로운 DC-DC 컨버터에 관한 연구", 전력전자학회 2003년 학술대회논문집, pp. 332~336, 2003. 7