

가변 인덕턴스를 활용한 홀드-업 보상 회로를 가진 하프브리지 LLC 공진형 컨버터

정연호, 이재범, 문건우
한국과학기술원

ABSTRACT - 서버용 전원장치는 경부하 조건에서의 효율이 점점 강조되고 있다. 이를 만족하기 위해 LLC 공진형 컨버터는 많이 사용되고 서버용 전원장치에서 요구되는 홀드-업 시간을 만족하기 위하여 넓은 입력 전압 범위에서 동작 가능하게 설계되어 있다. 이는 컨버터의 1차측 도통 손실과 턴-오프 스위칭 손실을 증가시켜 정상상태의 효율을 감소시킨다. 본 논문에서는 변압기의 보조 권선을 포함한 제어 회로를 통해 변압기의 인덕턴스를 변경하는 방식을 하프브리지 LLC 공진형 컨버터에 적용함으로써 정상 상태에서는 높은 자화인덕턴스를 적용하고 홀드-업 시간에서 낮은 자화인덕턴스를 적용하여 각각의 상태에서 요구되는 고효율과 최대 전압이득을 모두 만족 한다. 실험을 통해 제안된 방식의 유용성을 검증한다.

1. 서론

서버용 전원 장치에 있어서, 고효율 및 고전력밀도는 지속적으로 요구되고 있다. 이러한 요구는 관리 비용의 절감 및 환경의 보호를 위해 그 필요성이 더욱 증대되고 있다. 또한 이를 여러 단체에서 규제를 통해 관리하고 있으며 그 중 대표적으로 Climate Savers Computing Initiative(CSCI)는 50% 부하조건에서 최고의 효율을 요구하고 있다. 그리고 최근 새롭게 제시된 Titanium Level에서는 20% 조건에서 효율 기준 상승이 크고 10% 부하 조건이 새롭게 추가되는 등 경부하에서의 효율 규제가 더욱 강화되고 있다^[1]. 이는 서버 시스템 동작의 대부분이 경부하에서 동작하는 실제 환경을 고려한 것이다^[2].

고효율 및 고전력밀도의 요구를 만족하기 위해서 서버용 전원장치는 여러 종류의 토폴로지가 연구되어 왔다. 그 중 그림 1에서 나타내는 하프브리지(HB) LLC 공진형 컨버터는 간단한 구조와 높은 성능으로 많이 사용되고 있다. 특히, 경부하의 효율의 중요성이 강조 되는 시점에서 전 부하 영역에서 영전압 스위칭(ZVS)이 가능하고 출력 인덕터가 없는 구조에 의한 낮은 코어 손실을 가지는 특징으로 인해 그 사용량은 더욱 증가하고 있다.

한편, 서버 전원 시스템에서 가장 중요한 요구 조건 중 하나는 홀드-업 시간이다^[3]. 어떤 외부적인 요인에 의해 AC입력 전압이 손실되는 경우, 전원 장치의 출력 전압은 서버 시스템의 데이터 저장에 위한 시간을 확보하기 위해 수십 밀리초(ms)의 홀드-업 시간을 필요로 한다. 이러한 홀드-업 시간에 대한 요구 조건은 높은 정전 용량을 갖는 링크 커패시터를 사용함으로써 간단히 해결할 수 있으나, 이 방법은 고전력밀도가 요구되는 서버 전원장치에서는 적용하기 힘들다. 따라서 LLC 공진형 컨버터에서 넓은 입력 범위에서 동작하기 위하여 작은 자화인덕턴스(L_m)을 가지고 설계되어야 하며, 이는 큰 1차측 도통 손실을 발생시켜 효율이 감소되는 원인이 된다.

본 논문에서는 가변 인덕턴스가 적용된 홀드-업 보상회로를 가지는 고효율 하프브리지 LLC 공진형 컨버터를 제안한다. 또한, 홀드-업 시간 동안 작은 L_m 을 가지고, 정상상태에서는 큰 L_m 이 적용되는 가변 인덕턴스에 대해 설명하고, 제안된 방법의 실제 구현 방법에 대해서 다룬다. 본 논문에서는 제안된 컨버터에 대해 설명하고 그 구현 방법에 대해서 설명한다. 끝으로, 제안된 방법은 유효성에 대해 실험을 통해 검증한다.

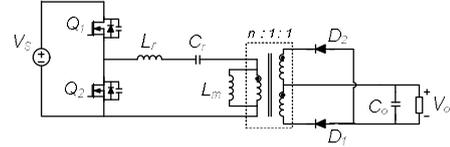


그림1. 하프브리지(HB) LLC 공진형 컨버터

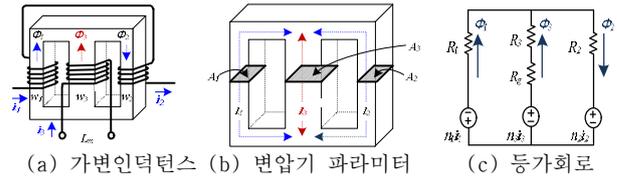


그림2. 가변 인덕턴스의 구현 및 등가 회로

2. 제안된 컨버터

2.1 제안된 방법에 대한 설명

HB LLC 공진형 컨버터의 전압이득은 다음 수식과 같다^[4].

$$Gain = \frac{nV_o}{V_{in}} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\left\{1 + \frac{1}{k} \left[1 - \left(\frac{f_r}{f_{sw}}\right)^2\right]\right\}^2 + \left[\frac{\pi^2}{8n^2} Q \left(\frac{f_{sw}}{f_r} - \frac{f_r}{f_{sw}}\right)\right]^2}} \quad (1)$$

여기서, $k = L_m/L_r$, $Q = \sqrt{L_r/C_r}/R_o$, $f_r = 1/2\pi\sqrt{L_r C_r}$ 그리고 f_{sw} 는 동작하는 스위칭 주파수이다.

컨버터의 최대 이득값은 공진 탱크단에 의해서 결정된다. 그 중 k 계수는 변압기의 자화인덕턴스(L_m)와 공진 인덕턴스(L_r)의 관계를 나타낸 것이다. 홀드-업 시간을 만족하기 위한 높은 최대 전압 이득을 갖기 위해서는 낮은 k 계수로 공진 탱크단이 설계되어야 한다. 즉, 작은 L_m 을 갖게 된다. 이 때, L_m 의 인덕턴스에 따라 L_m 의 전류(i_{Lm})의 최대값은 변한다. L_m 이 감소할수록 i_{Lm} 의 최대값이 증가하여 도통 손실과 턴-오프 스위칭 손실을 증가시킨다. 반대로, 높은 k 값을 가질 경우는 최대 전압 이득은 낮아지게 되지만 i_{Lm} 의 최대값이 감소하여 낮은 k 계수를 가지는 설계에 비해 1차측 도통 손실 감소에 따라 상대적으로 높은 효율을 가지게 된다. 제안된 컨버터에서는 가변 L_m 을 활용하여 정상 상태에서 작은 L_m 을 적용하고 홀드-업 시간에서 작은 L_m 을 적용하여 각 상태에서 요구하는 효율과 최대 전압이득을 만족하는 최적화된 k 계수를 가질 수 있다.

2.2 가변 인덕턴스

가변 인덕턴스는 그림 2(a)와 같이 EE형 코어에 사이드-레그에 감긴 두 개의 권선(w_1 와 w_2)과 센터-레그에 감긴 하나의 권선(w_3)으로 구성되어 있다^[5]. 그리고 사이드-레그에 감긴 2개의 권선은 서로 연결한다. 코어의 각 파라미터는 그림 2(b)와 같고, 그림 2(c)와 같은 등가 모델로 나타낼 수 있다.

변압기의 인덕턴스는 식 (2)에 따라 결정된다. 변압기의 사이드-레그 권선에 흘려주는 DC 바이어스에 따라 코어는 부분적인 포화 상태가 되면서 투자율(Permeability)은 변하고 변압기의 인덕턴스 또한 선형적으로 변하게 된다.

$$L = \frac{\mu n^2 A_c}{l} \quad (2)$$

여기서 L , n , μ , A_c , 그리고 l 은 각각 인덕턴스, 변압기 턴비, 투자율, 코어의 단면적, 그리고 어의 길이이다.

DC 바이어스 전류가 없는 경우, L_m 은 일반적인 방식에서 권선 w_3 에 의한 L_m 의 인덕턴스를 동일하게 가진다. 하지만, 사이드-레그 권선 w_1 과 w_2 에 DC 바이어스 전류가 흐를 경우, (3)과 같이 $L_{m,var}$ 로 정의될 수 있다^[5].

$$L_{m,var} = \left(\frac{\mu_0 \mu_3 n_3^2 A_3}{l_3} + \frac{\mu_0 n_3^2 A_3}{l_g} \right) \parallel \left(\frac{\mu_0 \mu_1 n_1^2 A_1}{l_1} + \frac{\mu_0 \mu_2 n_2^2 A_2}{l_2} \right) \quad (3)$$

여기서 l_g 는 센터-레그의 에어갭, μ_0 은 공기의 투자율이다.

즉, 사이드-레그 권선에 DC 바이어스 전류가 흐를 경우는 사이드-레그의 인덕턴스가 센터-레그에 의한 인덕턴스와 병렬로 추가된 형태로 보이게 되어 L_m 의 인덕턴스를 기존보다 감소된 $L_{m,var}$ 로 변경하게 된다. 이러한 가변 인덕턴스를 LLC 공진형 컨버터에 적용할 경우, 홀드-업 시간 동안에는 DC 바이어스 전류를 인가하여 감소된 인덕턴스를 가지는 $L_{m,var}$ 을 적용하여 LLC 공진형 컨버터가 높은 전압이득을 가질 수 있도록 한다. 또한, 정상 상태에서는 DC 바이어스 전류를 차단하여 큰 L_m 을 적용하여 높은 효율을 이룰 수 있다.

2.3 제안된 컨버터의 구현

제안된 컨버터의 구현은 그림 3(a)와 같이 기존의 하프브리지 LLC 공진형 컨버터에 변압기의 권선과 제어 회로만을 추가하여 구현 가능하다. 변압기의 권선은 기본적인 센터-레그의 L_m 을 구성하는 권선과 가변 인덕턴스의 구현을 위한 2개의 사이드-레그 권선, 그리고 DC 바이어스 생성을 위한 보조 권선을 센터-레그에 추가하여 구성된다.

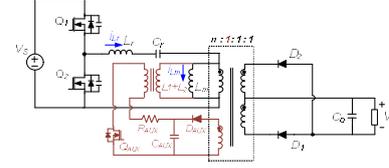
보조 회로의 구성은 D_{AUX} , C_{AUX} , R_{AUX} , 그리고 Q_{AUX} 로 구성되며 그림 3(b)와 같이 작은 크기로 구현 가능하다. 변압기의 센터-레그에 추가된 보조 권선과 D_{AUX} , C_{AUX} 를 통해 일정한 보조 전압을 생성 후, R_{AUX} 를 통해 전류원으로 변경한다. 이 때 R_{AUX} 로 결정된 DC 바이어스 전류를 변압기의 사이드-레그 권선에 인가한다. Q_{AUX} 는 컨버터의 입력 전압 상태를 검출하여 DC 바이어스의 인가 여부를 제어한다. AC 전압이 정상적으로 인가되면, Q_{AUX} 를 턴-오프되어 DC 바이어스 전류를 차단한다. 홀드-업 시간에는 Q_{AUX} 를 턴-온시켜 DC 바이어스 전류를 흘려서 L_m 의 인덕턴스를 감소시킨다.

3. 실험 결과

본 논문에서는 제안된 컨버터의 성능을 400V의 입력 전압 (V_s) 및 350W 출력 사양(56V/6.25A)을 가지는 서버용 전원 장치를 제작하여 검증하였다. 이 때, 주어진 홀드-업 시간 사양은 16ms 이상이다. 변압기의 L_m 은 기존 컨버터에서는 최대 전압이득을 고려하여 180uH로 설정하였다. 제안된 컨버터에서는 최대 전압이득을 고려한 인덕턴스는 기존 컨버터와 동일한 180uH를 $L_{m,var}$ 을 설정하고, 정상상태에서는 ZVS 조건만을 고려하여 640uH로 설정하였다.

먼저, 제안된 컨버터의 동작 파형은 그림 4와 같다. 그림 4(a)는 제안된 컨버터의 정상상태에서의 파형이며 ZVS가 달성됨을 확인하였다. 그림 4(b)에서는 홀드-업 시간 동안의 동작 파형이다. 정상상태에 비해 감소된 L_m 에 의해 i_{Lm} 의 기울기와 최대 값이 증가되었음을 확인할 수 있다. 그림 4(c)에서는 제안된 방식의 가변 인덕턴스가 적용될 경우, 17.33ms의 홀드-업 시간

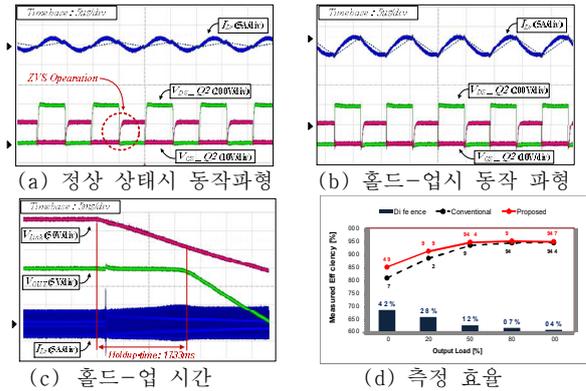
을 확보하여 주어진 홀드-업 시간 사양을 만족하고 있음을 확인하였다.



(a) 제안 방식

(b) 실제 구현 회로

그림 3. 제안된 회로의 구현 회로



(a) 정상 상태시 동작파형

(b) 홀드-업시 동작 파형

(c) 홀드-업 시간

(d) 측정 효율

그림 4. 제안된 컨버터의 실험 결과

마지막으로, 정상상태에서 증가된 L_m 에 의한 1차측 도통 손실 및 턴-오프 스위칭 손실의 감소에 따른 효율 상승효과에 대해 검증하였고, 그림 4(d)와 같이 전 부하에서 효율이 상승하는 효과를 확인하였다. 특히, 경부하 조건인 10%와 20% 부하조건에서 각각 4.2%와 2.8%의 효율 상승이 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 높은 효율을 가지는 하프브리지 LLC 공진 컨버터를 제안하였다. 제안된 컨버터는 전력 스위치 소자의 추가 없이 변압기의 권선과 간단한 제어 회로만을 추가한 가변 인덕턴스를 적용한 홀드-업 시간 보상회로를 가진다. 홀드-업 시간 동안에는 필요한 최대 전압이득을 만족하기 위해 낮은 자화 인덕턴스를 적용하고, 정상상태에서는 높은 효율을 얻기 위해 높은 자화인덕턴스 값을 각각 적용하였다. 결과적으로, 정상상태에서 증가된 자화인덕턴스에 의해 1차측의 도통 손실 및 스위치의 턴-오프 손실이 감소됨에 따라 10%와 20%의 경부하 조건에서 각각 4.2%와 2.8%의 효율이 상승하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2010-0028680).

참고 문헌

- [1] Climate Savers Computing Initiative (CSCI) Web Site [Online], <http://www.climatesaverscomputing.org/>.
- [2] IBM "2008 Power and cooling technology symposium," presented at the T. J. Watson Research Auditorium, Yorktown Heights, NY, Oct. 1, 2008
- [3] Jang, Yungtaek, Milan M. Jovanovic, and Dave L. Dillman. "Hold-up time extension circuit with integrated magnetics.", APEC 2005. Twentieth Annual IEEE. Vol. 1. IEEE, 2005.
- [4] B. Yang, P. Xu, and F. C. Lee, "Range winding for wide input range front endDC/DC converter," in Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo., 2001, pp. 476-479.
- [5] Medini, Dror, and S. Ben-Yaakov. "A current-controlled