

3상 고주파 변압기 최적 설계에 의한 대전력 ZVS 푸쉬풀 컨버터

박준성, 이상원*, 최세완
 서울산업대학교, *(주)창성

A High Power ZVS Push-Pull Converter by Optimized Design of Three-Phase High Frequency Transformer

Junsung Park, Sangwon Lee*, Sewan Choi
 Seoul National Univ. of Tech., *Changsung, Inc.

ABSTRACT

본 논문에서는 고출력 대전력 3상 DC-DC 컨버터의 핵심부품인 3상 고주파변압기를 상용 EI코어를 이용하여 설계한 방법을 제시한다. 제안한 설계방법은 부피 및 자화인덕턴스 등 불균형 요소를 최소화하고 진동에도 우수한 구조를 갖는다. 5kW급의 시작품으로부터 제안한 컨버터의 타당성 및 성능을 검증한다.

1. 서론

친환경자동차, UPS시스템, 태양광 및 연료전지 시스템 등 여러 응용분야에서 승압형 대전력 DC-DC 컨버터의 사용이 증대되고 있다. 특히 연료전지와 같은 응용에서 고효율의 저전압대전류 DC-DC컨버터가 요구되는데 연료전지가 5kW급 정도만 되더라도 기존의 단상을 기본으로 하는 토폴로지로는 소자의 전류부담이 크고 소자의 선정도 용이하지 않다.

따라서 고출력 대전력이 요구되는 응용에서 3상 DC-DC 컨버터가 활발히 연구되고 있다. 3상 DC-DC 컨버터는 전류를 분배하여 스위치의 전류부담을 줄이고 인터리빙으로 입-출력 필터의 부피를 줄일 수 있으며, 3상 변압기를 사용하여 변압기 부피도 줄일 수 있는 장점이 있다.^[1] 연료전지 응용으로 최근 발표된 3상 전류원 푸쉬풀 컨버터^[2]는 구조가 간단하고 승압비가 큰 장점이 있지만 하드스위칭으로 인한 스위칭 손실과 수동클램프에서의 손실이 커서 스위칭 주파수 및 용량을 증대시키기 어렵고 듀티범위가 0.33이하에서 동작하지 않아 별도의 기동회로가 필요한 문제가 있었다. 이를 개선하기 위하여 ZVS 턴온이 가능한 능동클램프 방식의 3상 전류원 푸쉬풀 컨버터^[3]가 제안되었다. 이 컨버터의 성능을 좌우하는 핵심소자인 3상 고주파변압기는 다양한 사양에 따른 상용제품의 수급이 용이하지 않은 문제가 있다.

본 논문에서는 3상 DC-DC 컨버터에 적용을 목적으로 상용 EI코어를 이용한 3상 고주파변압기를 설계방법을 제시한다. 제안한 설계방법은 패키징시 부피 및 자화인덕턴스 등 불균형 요소를 최소화하고 진동에도 우수한 구조를 갖는다. 5kW급의 시작품으로부터 제안한 컨버터의 타당성 및 성능을 검증한다.

2. 제안한 컨버터의 동작원리

그림 1에서 보듯이 제안하는 컨버터는 3상 변압기의 1차측은 스위치와 인덕터 및 클램프 회로로, 2차측은 3상 다이오드

브릿지로 각각 구성된다. 제안하는 컨버터는 0부터 1까지의 전 듀티 범위를 사용할 수 있으며 메인스위치와 클램프 스위치가 비대칭 상보적 스위칭 하며 각 상은 120도 위상차를 갖는다. 그림 2는 듀티 범위가 0.66이상일 때의 주요파형을 나타낸 것이다. 메인스위치와 클램프 스위치 모두 ZVS 턴 온되며 다이오드도 ZCS 턴 오프 되는 것을 알 수 있다.

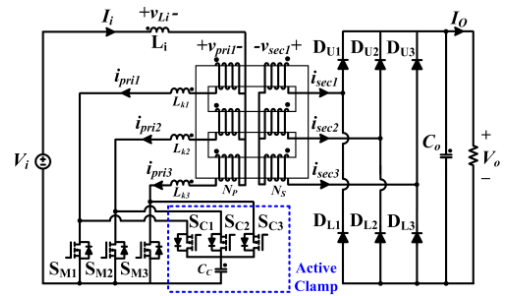


그림 1 제안하는 3상 능동 클램프 푸쉬풀 컨버터

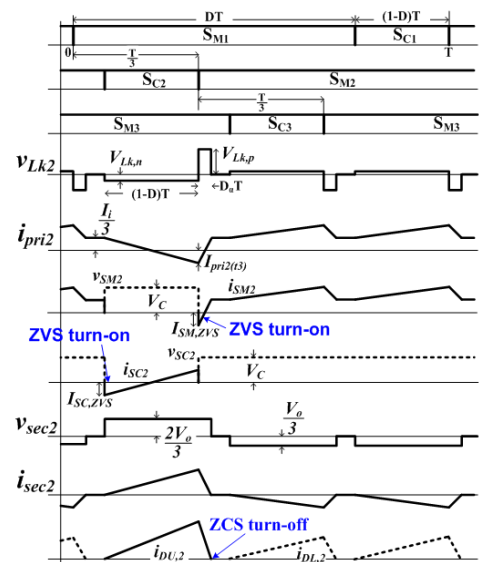


그림 2 제안하는 컨버터의 주요파형(D>0.66)

누설 인덕턴스를 무시한 제안하는 컨버터의 승압비는

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{N_s}{N_p} \frac{1}{1-D} \quad (1)$$

이고 제안한 컨버터의 클램프 커패시터 전압은

$$V_C = \frac{V_i}{1-D} \quad (2)$$

이다.

3. 3상 고주파변압기 설계

제안한 3상 푸쉬풀 컨버터의 3상 고주파변압기 제작시 3상 전용코어를 사용^[4]할 수 있으나 이러한 전용코어는 수급이 용이하지 않고 가격이 높은 단점이 있다. 또한 기존의 U-코어 3개를 이용하여 제작한 방법^[5]이 있다. 본 논문에서는 상용화된 EI 코어를 이용하여 보다 부피가 작고 내진동이 우수한 3상 변압기의 설계기법을 제안한다. 설계에 사용된 사양은 다음과 같다.

- P_o : 5kW
- V_i : 60 ~ 110V
- V_o : 380V
- ΔV_o : 5%
- ΔV_c : 5%
- ΔI_i : 10%
- D : 0.708
- Lk : 1.1μH
- f_s : 50kHz

턴비 선정: 제안한 컨버터의 전압전달비 식(1)로부터 다음과 같은 관계식을 구할 수 있다.

$$\frac{N_s}{N_p} > \frac{V_o}{V_{i,\min}}(1-D) \quad (3)$$

여기서 $D=0.708$, $V_{i,\min}=60V$ 이므로 $N_p/N_s > 1.9$ 이 되어 턴비를 2로 선정한다.

코어 선정: 그림 3은 상용 EI 타입 코어를 이용한 권선방법을 나타낸다. 1, 2차측을 포함한 각 상의 권선에 필요한 원도우 면적과 코어 단면적을 이용하여 필요한 코어 총면적(A_p)을 구하면 다음과 같다.

$$A_p = \frac{2V_{pri} \times I_{pri} \times (1-D+D_\alpha)}{B_m \times J \times K_f \times f_s} \quad (4)$$

$$= 45.1cm^4$$

여기서 전류밀도는 $J=3[A/mm^2]$, fill factor는 $K_f=0.2$, $B_m=B_{sat} \times 70\%$ [T], $D_\alpha=0.02$ 임. 포화를 막기 위한 전압 마진, 자화인덕턴스로 들어가는 전류를 고려한 전류 마진, 절연지 마진 등을 고려하여 $A_p=203cm^4$ 인 EI-118(코어전기) 코어를 선정하였다.

턴수 선정: 선정된 코어를 기준으로 다음과 같이 턴수의 관계식을 구할 수 있다.

$$\frac{V_{pri}}{A_c} \frac{(1-D+D_\alpha)}{2B_m \times f_s} < N_p < \frac{1}{4} \frac{W_a \times J \times K_f}{I_{pri}} \quad (5)$$

따라서 $1.53 < N_p < 8.7$ 이 되어 $N_p=8$, $N_s=16$ 으로 선정한다.

등가 자화 인덕턴스 L_m 계산: $L_{m,pk}$ 로 자화전류의 실효값 $I_{Lm,rms}$ 을 구해 권선전류 I_{pri} 의 5%이하로 제한^[6]하기 위한 각 상의 자화인덕턴스 L_m 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$L_m > \frac{V_{Lm} \times (1-D+D_\alpha)}{2 \times \sqrt{\left(\frac{N_p}{N_s} \times I_{sec} \times 0.1\right)^2}} \times f_s \quad (6)$$

$$> 826\mu H$$

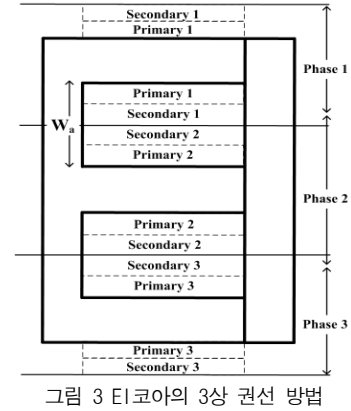
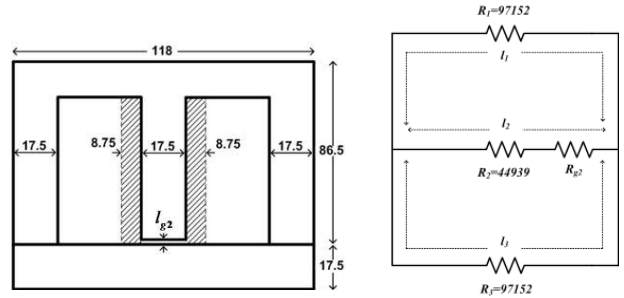


그림 3 EI코어의 3상 권선 방법



(a) 3상 코어 외형 (b) 코어 자기 등가회로

그림 4 갭을 갖는 수정된 EI 코어

$$(A_p = 191cm^4, W_a = 22.6cm^2, A_c = 8.5cm^2, B_{sat} = 0.3T, \mu_r = 2500)$$

코어 커팅: 선정된 턴 수를 이용해 수정 전 코어의 1차측에서 본 자기저항을 이용해 L_m 을 계산^[7]하면 표 1(수정 전)과 같다. 수정 전 코어의 양쪽 레그의 L_m 이 식(6)에서 구한 값보다 작으므로 턴 수를 증가시켜야 한다. 턴 수 증가를 위하여 가운데 레그를 양쪽 레그의 단면적과 같도록 그림 4와 같이 빗금친 부분을 커팅하면 코어의 단면적이 반으로 감소하고, 창면적이 30% 증가한다. 따라서 식(5)을 이용하여 턴 수를 다시 계산하면 $2.223 < N_p < 11.94$ 이므로 턴수를 각각 $N_p=11$, $N_s=22$ 으로 재선정 한다.

형상이 변함에 따라 가운데 레그의 자기저항이 증가하였고 각 상의 1차측에서 본 L_m 을 다시 계산하면 표 1(수정 후)과 같다. 그러나 이와 같이 1차측에서 본 L_m 의 30%정도의 불균형은 권선전류의 불균형을 초래할 수 있다.^[8]

공극 추가: 본 연구에서는 이러한 불균형을 없애기 위하여 그림 4(a)과 같이 가운데 레그에 약간의 공극을 추가하여 각 상의 1차측에서 본 자화인덕턴스를 같게 한다.

그림 4(b)는 공극이 추가된 3상 코어의 자기적 등가회로를 나타낸다. 이때 $R_1=R_3=R_2+R_{g2}=97152$ 되기 위한 R_{g2} 는 52212이다. 따라서 공극의 길이 l_{g2} 는 다음과 같이 계산된다.

$$l_{g2} = R_{g2} \times \mu_0 \times A_c = 0.056mm \quad (7)$$

또한 공극추가 후 일치된 각 상의 등가 자화인덕턴스는 다음과 같다.

$$L_{m1} = L_{m2} = L_{m3} = 830\mu H \quad (8)$$

표 1 코아 수정에 따른 변압기 주요 파라메타

	수정 전	커팅 후	공극 추가후
N_p	8	11	11
R_1	87800	97152	97152
R_2	22488	44939	97152
R_3	87800	97152	97152
L_{m1}	0.606mH	0.95mH	0.83mH
L_{m2}	0.958mH	1.29mH	0.83mH
L_{m3}	0.606mH	0.95mH	0.83mH

4. 실험결과

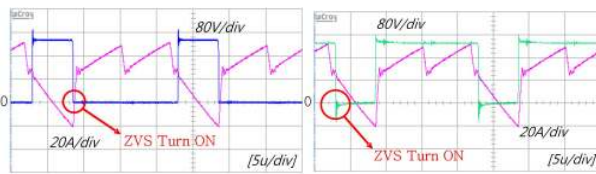
제안한 컨버터는 3절의 3상 고주파변압기 설계사양과 동일한 값을 사용하여 제작하였다. 여기서 각 상의 변압기의 누설인덕턴스는 각각 $1.07\mu H$, $1.13\mu H$, $1.11\mu H$ 로 측정되었고 각 상의 자화 인덕턴스는 각각 $834\mu H$, $848\mu H$, $837\mu H$ 가 측정 되었다.

제안한 컨버터의 시작품 사진은 그림 5와 같으며 변압기 전류 및 각부 스위치 전압파형을 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)와 (b)에서 볼 수 있듯 1차측 변압기전류가 메인스위치와 클램프스위치로 흐르면서 ZVS 성취하는 것을 볼 수 있다. 또한 그림 6(c)로부터 각 권선전류의 실효값은 34.9A, 33A, 33.5A로 불균형은 약 6%미만으로 발생하는 것을 확인하였다.

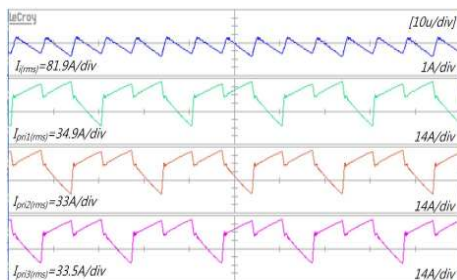
그림 7은 제안한 컨버터의 측정효율을 나타내는데 대부분의 부하영역에서 90%이상의 효율을 달성하였고, 최대효율은 약 2.2kW에서 96.7%가 측정되었다. 또한 최대부하에서도 94.5%를 달성하였다.



그림 5 5kW급 시작품 사진



(a) 메인 스위치 (b) 클램프 스위치



(c) 권선 전류 파형

그림 6 실험 파형 (D=0.708)

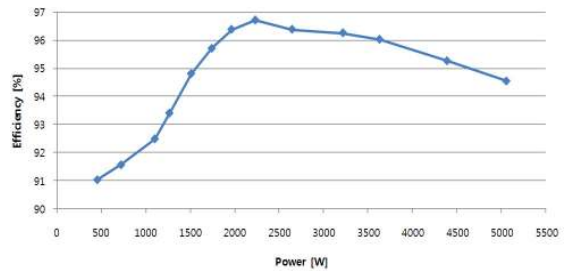


그림 7 측정 효율

5. 결론

본 논문에서는 수 kW 이상의 연료전지와 같은 저전압 대 전류 응용에 적합한 3상 전류원 푸쉬풀 컨버터를 제안하였다. 이 방식의 효율과 성능을 좌우하는 3상 고주파변압기를 상용 EI코어를 이용하여 불균형을 최소화하기 위한 설계 방법을 제시하였고 기존의 3상 변압기에 비해 가격, 부피 및 진동 등에 장점을 갖는다. 5kW급의 시작품으로 제안한 방식의 타당성을 검증하였다.

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (20101020300260) 주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- [1] D. M. Divan and R. De Doncker, "A three phase soft switched high-power density dc/dc converter for high power applications," IEEE Trans. Ind. Applicat, vol. 27, no. 1, pp. 63-73, Jan./Feb. 1991.
- [2] R. Leandro and I. Barbi, "A Three-Phase Current-Fed Push-Pull DC-DC Converter" IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 24, Issue 2, pp.358 - 368, Feb. 2009.
- [3] S. Lee, S. Choi, "A three-phase current-fed push-pull DC-DC converter with active clamp for fuel cell applications, " IEEE APEC, pp.1934-1941, Feb. 2010.
- [4] D. M. Divan and R. De Doncker, "A three phase soft switched high-power density dc/dc converter for high power applications," IEEE Trans. Ind. Applicat, vol. 27, no. 1, pp. 63-73, Jan./Feb. 1991.
- [5] J. A-Garcia, G. Moon, "High-Power-Density Three-phase Converter Utilizing a Balanced-Flux Transformer Core," IEEE ECCE, pp.1039 - 1045 Sept. 2009.
- [6] A. I. Pressman, K. Billings: Switchmode power supply design, 3rd ed., McGraw-Hill, chapter2, pp. 64-107, 2009
- [7] 이상원, 윤창우, 최세완, "연료전지 응용을 위한 3상 능동 클램프 전류원 푸쉬풀 컨버터", 2009년도 하계학술대회 논문집, 2009. 7, pp.308-310.
- [8] C. S. Walker, "The excitation requirement of 3-phase core-type 3-legged y-connected transformer," AIEE Trans., pp. 1113-1119, Dec. 1957.