

견인용 AC/DC 컨버터 4병렬 운전에 관한 연구

류홍제, 우명호, 김종수, 김원호, 임근희
한국전기연구소 전기물리연구팀

A Study on the Four AC/DC Converter Parallel Operation for a Traction Drive

Hong-Je Ryoo, Myung-Ho Woo, Jong-soo Kim, Won-Ho Kim, Geun-Hie Rim
KERI, Applied Electrophysics Team

Abstract - Front end AC to DC converters of the boost type are used in traction applications for generating the DC link for the inverters. A GTO based converter is usually switched with a switching frequency of 300 to 500Hz, resulting in low frequency harmonic problems. In order to avoid this, multiple converters with phase shifted carrier signals are used to suppress the low frequency harmonics. A detailed study of an AC to DC converter, parallel operated with reduced sensor and improved power-factor in light load conditions is presented in this paper.

1. 서 론

최근 대전력 견인용분야에 PWM 방식을 사용한 4상한 승압형 AC-DC 컨버터의 사용이 증대되고 있다. 4상한 AC-DC 컨버터는 상대적으로 많은 소자를 사용함에도 병렬 위상지연 운전으로 입력 전류의 하모닉을 효과적으로 저감할 수 있으며, 회생운전이 용이하고 전 운전 분야에서 역률을 1에 가깝게 제어 가능한 이점을 가지고 있다. 특히 최근 유도전동기 구동기술의 발달로 PWM인버터를 사용한 유도전동기가 견인용 전동기로 채택되면서 동일구조의 AC-DC PWM 컨버터를 사용하는 경우 단일모듈 설계로 유지 보수가 간편해지는 장점을 지니게 된다.[1-2]

컨버터의 승압용 인덕터는 변압기내의 누설 성분을 이용하여 변압기의 중량 및 사이즈를 줄일 수 있으나 변압기 권선 상호간의 간섭으로 변압기 1차측 전류가 왜곡되는 현상이 발생하게 된다. 이를 효과적으로 제어하기 위해 각 컨버터 전압에 의한 간섭을 제거하기 위한 제어 방법이 제시되었다.[3] 그러나 변압기 2차권선이 4권선, 6권선으로 많아지는 경우 이를 센싱하기 위한 불록이 증가되고 제어가 복잡해지는 단점이 발생한다.

본 논문에서는 4상한 컨버터의 4 병렬 운전을 위해 변압기 2차측 전류 상호간의 영향을 최소화하기 위한 변압기를 설계하고 변압기 1차측의 전류만을 센싱하여 센서 수를 줄이면서 자화전류에 의한 입력전류의 왜곡을 줄일 수 있는 방법을 제시하였다.

또한 제시된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 모의 시험을 위한 축소 모델을 제작하였으며, 실험을 통해 단위역률제어 및 무부하시 자화전류에 의한 왜곡이 보정됨을 확인하였다.

2. 모의 시험장치 설계

그림 1에 견인용 AC-DC 컨버터실험을 위한 모의 시험장치 구성을 나타내었다. 모의시험장치는 변압기 1대와 컨버터 4대, 인버터 두 대 및 견인전동기 4대로 구성된다. 4대의 견인 전동기는 하나의 플라이휠에 연결되어 플라이휠을 구동하는 구조로 설계되었다.

2.1 입력 변압기 설계

견인용 변압기의 설계시 중요한 고려사항중의 하나가 누설 인덕턴스이다. 누설 인덕턴스는 컨버터의 승압용 인덕터로 이용되며, 그 값이 클수록 변압기의 크기, 중량, 제작비용이 증가되며 무효전력의 증가로 DC 링크 커패시터 및 필터의 정격이 높아지고 누설 인덕턴스를 작게 하면 입력 전류의 고조파 함유 및 전류 리플이 커지게 된다. 그림 2에 대용량 고속전철시스템의 변압기 %임피던스 X_{pu} 와 컨버터의 스위칭주파수 및 입력 전류의 고조파 성분의 관계를 나타내었다.[2]

그림에서 동일 스위칭 주파수내에서 X_{pu} 가 0.3 이상의 영역에서는 고조파 전류가 크게 증가하지 않으며, X_{pu} 가 고정된 경우 스위칭 주파수 f_c 가 400Hz 이상의 영역에서는 스위칭 주파수의 증가에 따른 고조파 입력 전류의 큰 감소 효과가 없음을 알 수 있다. X_{pu} 의 값은 0.2~0.3의 값을 선택하는 것이 일반적이다.

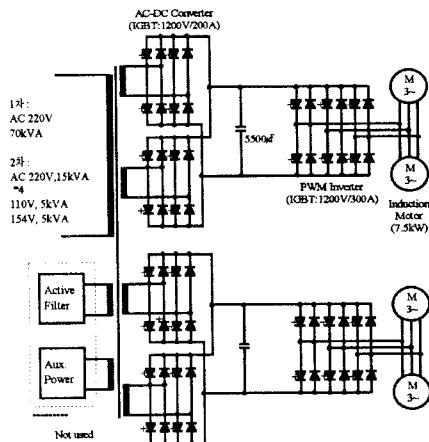


그림 1 실험장치 구성

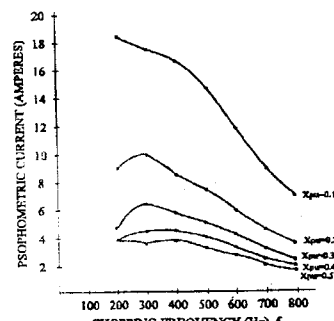


그림 2. 스위칭 주파수와 누설인덕턴스에 따른 입력 고조파 전류

표 1 변압기 설계사양

	전압(V)	용량(kVA)	Xpu(%)	비고
1차	220	70		
2차(추진)	220*4	15*4	18.4	24%(2차 상호)
2차(보조)	154	5	5	충전기용 능동필터용
	110	5	5	

표 1에 설계된 모의시험용 변압기 사양을 나타내었다. 외부의 인덕터 없이 변압기의 누설 인덕턴스만을 이용하여 승압용 컨버터를 병렬 운전하는 경우 2차측 상호간의 간섭으로 인해 컨버터 입력전류가 왜곡되고 운전이 어려워지게 된다. 본 논문에서는 이러한 2차 상호간의 간섭을 줄이기 위해 변압기 2차측 추진권선 상호간의 누설 인덕턴스 또한 20% 이상이 되도록 설계하였다.

2.2 컨버터 제어기 설계

단위역률로 제어되는 경우의 컨버터 입출력 식을 구해보면 다음과 같다.

$$V_s \cdot I_s = V_{DC} \cdot I_L \quad (1)$$

여기서 V_s , I_s 는 변압기 입력 전압, 전류의 실효치이며, V_{DC} 는 DC 링크전압, I_L 은 부하전류로 컨버터 출력 전류의 합이다.

$$I_L = I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} + I_{L4} = \frac{V_s \cdot I_s}{V_{DC}} \quad (2)$$

변압기의 저항성분을 무시하면, 컨버터 입력전압의 기본파 실효치를 V_c 라 할 때, 전압방정식은 다음과 같이 표현 가능하다

$$V_s = V_L + V_c \quad (3)$$

$$V_c = V_s - L \frac{di_s(t)}{dt}$$

샘플링 시간을 T , 각 컨버터의 입력전류를 I_c 라 할 때 $t+1$ 시점의 컨버터 한 대의 전압지령치는 식(4)로 계산된다.

$$V_{c(t+1)} = V_{c(t+1)} - \frac{L_s}{T} (I_{c(t+1)} - I_{c(t)}) \quad (4)$$

또한 변압기의 자화전류성분을 I_m 이라 하면, 변압기 1차측입력전류 I_s 는 다음 식으로 표현 가능하다.

$$I_s = I_{c1} + I_{c2} + I_{c3} + I_{c4} + I_m \quad (5)$$

이는 각 컨버터의 입력전류가 입력전압과 동상으로 제어되더라도 자화전류의 영향으로 변압기 입력전류에는 입력전압과의 위상차와 고조파성분이 포함됨을 의미한다. 이러한 자화전류에 의한 영향은 병렬운전되는 컨버터의 수가 적을수록, 또 부하가 작을수록 크게 나타나며 정격에서의 영향은 아주 작게 된다.

본 논문에서는 역행, 타행, 회생을 반복하는 건인용 용분야의 자화전류성분에 의한 왜곡을 줄이고 전류센서의 수를 줄이면서도 효과적인 제어를 가능하게 하기 위해 변압기 1차측 전류를 센싱하여 사용하는 방식을 사용하였다. 또한 위상제어 알고리즘을 포함시켜 단위역률 제어 뿐 아니라 원하는 위상차를 갖는 임의의 역률제어도 가능하도록 시스템을 구성하였다. 그림 3에 제어 블록도를 나타내었다.

위상제어 루프를 제거하는 경우 제안된 제어방식에서는 단위역률제어가 이루어지게 되나 전류를 변압기 2차측에서 센싱하는 경우에는 위상차가 발생하게 되며 위상 제어루프에 의해 기본파 성분은 보상 가능하다.

3. 실험 결과

그림 4는 저항부하를 사용하여 컨버터 4대 병렬운전시의 변압기 1차측 전압 전류 파형, 컨버터 두 대의 입력전류 및 전류의 고조파 스펙트럼 및 컨버터 입력전류를 나타낸다. 540Hz의 낮은 스위칭 주파수에도 불구하고

고 4병렬 운전시의 변압기 1차측 전류에는 고조파 성분이 거의 없음을 알 수 있다.

그림 5는 역률제어의 지령치를 30도 진상 및 지상으로 주었을 경우의 전류 전압 파형이다. 설계된 제어기는 임의의 역률로 제어 가능함을 보여준다.

그림 6은 인버터로 구동되는 유도전동기를 부하로 달은 경우의 각 운전 모드에서의 변압기 입력전압 및 전류 파형이다. 역행, 타행 및 회생운전시 항상 역률이 1로 유지됨을 볼 수 있다.

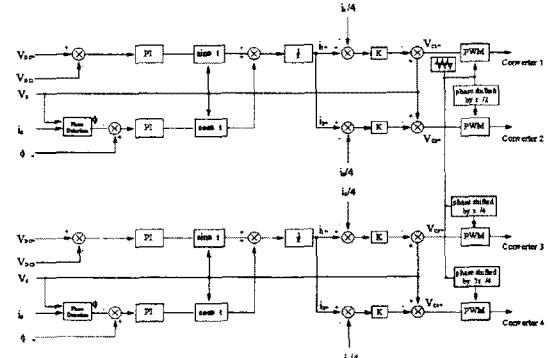
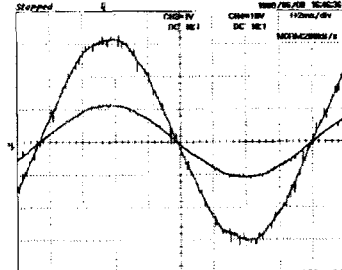
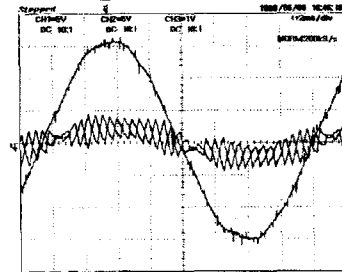


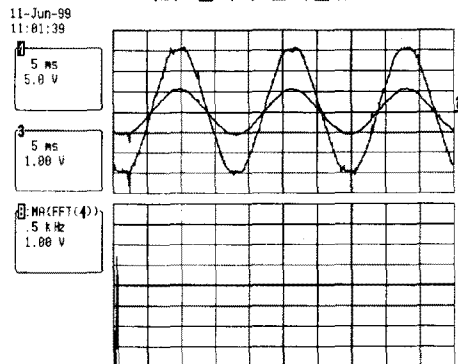
그림 3. 컨버터 제어 블록도



(a) 변압기 1차측 전압, 전류

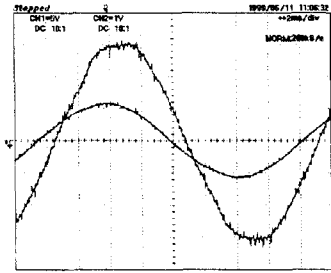


(b) 컨버터 입력전류

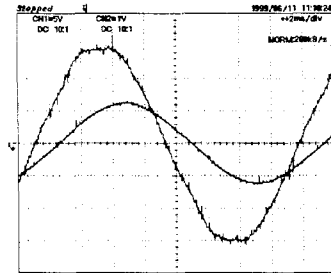


(c) 고조파 스펙트럼

그림 4. 각부 파형 및 고조파 스펙트럼 (100V/div. 187A/div. 500Hz/div)

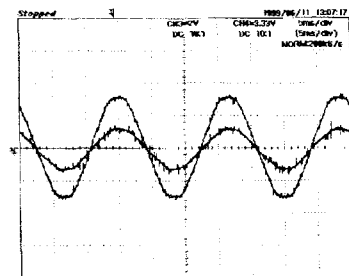


(a) 전역률($\phi = -30^\circ$)

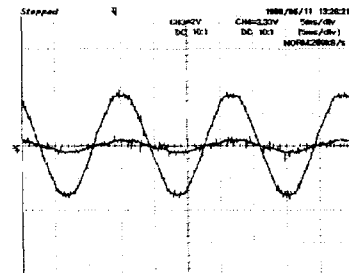


(a) 지역률($\phi = 30^\circ$)

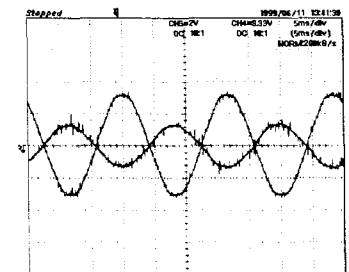
그림 5. 역률 제어 (100V/div. 125A/div.)



(a) 역행운전시

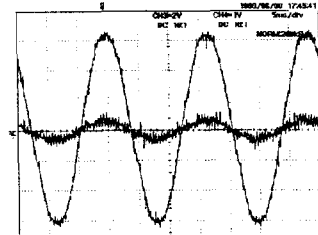


(b) 타행운전시

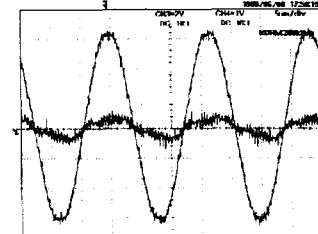


(c) 회생제동시

그림 6. 인버터 운전시의 변압기 입력 전압 전류파형 (200V/div. 125A/div.)



(a) 1차측전류센싱에 의한 제어



(b) 2차측전류센싱에 의한 제어

그림 7. 컨버터 2병렬 운전시(무부하) 변압기 1차측 입력전압 전류파형 (100V/div. 75A/div.)

그림 7은 운전중 하나의 견인블럭이 격리 된 경우 즉, 변압기 2차측 추진 4권선중 2권선만이 운전되는 경우 무부하시의 각 제어 방식의 입력전류 전압 파형을 비교한 것이다. 이 경우 1차측 전류 피드백에 의한 제어는 자화 전류성분을 보상하여 단위 역률에 가깝게 제어되나 2차측 전류 피드백에 의한 제어시에는 위상제어기에 의해 자화전류성분의 기본파 성분은 보상되나 고조파 성분은 보상되지 않아, 3고조파 성분이 실려 입력전류에 왜곡이 크게 나타남을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 견인용 4상한 컨버터의 4 병렬 운전을 위해 변압기의 누설 성분을 이용하여 승압하는 경우 발생하는 2차측 전류 상호간의 영향을 최소화하기 위한 변압기를 설계하고 변압기 1차측의 전류만을 센싱하여 센서 수를 줄이면서도 변압기 자화 전류 성분에 의한 전류의 왜곡을 줄일 수 있는 방법을 제시하였다.

또한 제시된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 모의 실험을 위한 축소 모델을 제작하였으며, 실험을 통해 단위역률제어 및 무부하시 자화전류에 의한 왜곡이 보상을 확인하였다.

본 논문의 연구는 건설교통부, 산업자원부, 과학기술부 공동주관 아래 선도기술개발사업으로 시행되는 고속전철기술개발사업에 의해 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드립니다.

(참 고 문 헌)

- [1] Rusong Wu, S.B Dewan, G.R Slemon: A PWM AC to DC converter with fixed switching frequency, IEEE, IAS, Conf., pp. 706 711., 1988.
- [2] J Shen et, al., "The Simplified Analysis and Design of a PWM Converter System for a Three-Phase Traction Drive", The Seminar on the Railway Technology Event, IME, 1994
- [3] 이동춘, 최중우, 이현동, 실승기 "전철용 단상 GTO PWM 컨버터의 병렬운전"전기학회지 제 44권 6호, 1995.