

IGCT를 이용한 단상 PWM정류기 병렬운전

이현원 장성영 김연준 이광주 김남해
현대중공업(주) 마북리연구소

The Parallel Operation of Single Phase PWM Rectifier using IGCT

HW.LEE SY.JANG YJ.KIM KJ.LEE N.H.KIM
HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES CO.,LTD MABOOKRI RESEARCH INSTITUTE

Abstract : The AC-to-DC single-phase PWM rectifier for traction applications using high power semiconductor, IGCT is made and tested. Parallel operation of two PWM converter is adopted for increasing capacity of converters. For reducing harmonics, the harmonic content is eliminated by the phase shift between two converters switching phase. The output voltage control is achieved by internal calculation without detecting the input current. The part of PLL used for controlling power factor is simply implemented by software.

1. 서론

철도차량 구동을 위한 주전력변환장치는 컨버터 부와 인버터 부로 구성되는데 종래에는 컨버터 부의 경우 다이오드정류기 또는 싸이리스터 위상정류기를 많이 사용하였으나 최근에는 역률 및 전압제어특성이 뛰어나고 회생이 가능한 PWM방식의 정류기를 주로 사용하는 추세이다. 철도차량용 PWM컨버터는 도시형 전철이나 고속전철 모두 고압, 대용량의 정격이 요구된다. 따라서 시스템에 사용할 수 있는 소자는 자기소호기능을 갖는 GTO싸이리스터나 IGBT정도로 제한되며 이중 IGBT는 GTO에 비해 여러 가지 장점이 있으나 전압, 전류정격이 부족하여 주로 GTO싸이리스터가 사용되고 있는 실정이다. GTO싸이리스터를 사용할 경우 스위칭 주파수의 제한에 따라 여러 가지 단점이 발생되므로 이러한 단점을 개선할 수 있는 시스템 구성 및 제어부가 필요하다. 본 논문에선 GTO소자와 비슷한 정격용량을 가지며 턴-오프, 턴-온 손실면에서 성능이 뛰어난 IGCT를 사용하여 철도차량용PWM컨버터를 제작, 시험하여 시스템의 기본적인 성능입증결과를 제시하였다.

2. IGCT의 특성

IGCT는 GTO소자의 구조에 기초한 전력반도체이지만 턴-오프 동작에 차이가 있다. GTO소자의 단점은 턴-오프시 dv/dt 에 의해 재트리거 위험이 있어

dv/dt 의 제한이 필수적이지만 IGCT는 턴-오프과정에서 트랜지스터와 같이 턴-오프시 npn부를 불활성시키고 pnp부의 base전류를 빼앗아서 전체 애노드전류를 매우 짧은 시간에 캐소드로부터 게이트로 전류하기 때문에 dv/dt 를 제한하기 위한 스누버회로가 필요하지 않으며 GTO대비 약30%정도의 턴-오프손실을 감소시킬 수 있다. 또한 턴-온시 IGCT는 게이트회로에 낮은 인덕턴스를 갖게 하여 수 $kA/\mu s$ 정도의 빠른 상승시간을 허용할 수 있어 전체적으로 게이트가 턴-온을 하기 위한 초기부터 테일 지점까지의 시간이 GTO소자에 비해 약5배정도 빠르기 때문에 턴-온 손실도 작아진다. 이러한 장점 이외에도 동일한 용량의 시스템을 GTO, IGCT, IGBT등을 이용해 구성한다면 스누버회로와 상품화되고 있는 소자의 정격 등을 비교할 때 IGCT로 구성하는 것이 전체 구성부품수를 가장 줄일 수 있다는 장점이 있다.

3. 시스템구성 및 제어방식

3.1 시스템 구성

현재 상용화되고 있는 전력소자의 용량을 고려하면 철도차량용 컨버터는 2대이상 병렬운전을 해야만 시스템의 용량정격을 만족시킬 수 있다. PWM컨버터병렬운전시 각각의 컨버터 스위칭 각이 차이가 나도록 제어하면 입력측변압기를 통해 각컨버터의 맥동분이

상쇄되므로 전원의 고조파함유율을 크게 줄일 수 있다. 컨버터 m대를 병렬 운전할 경우 각컨버터를 스위칭주기 T_s 내에서 $\frac{T_s}{2m}$ 만큼 위상차를 두고 스위칭하면 맥동분을 상쇄시킬 수 있으므로 2대 병렬운전의 경우 각 컨버터의 스위칭 각의 차이를 T_s 한 주기의 30도로 한다. 또한 승압을 위한 입력측 리액터는 시스템의 부피 및 중량을 고려해 입력변압기 내부의 누설임피던스형태로 포함시켰다. 그림1은 시스템의 전력회로구성이다.

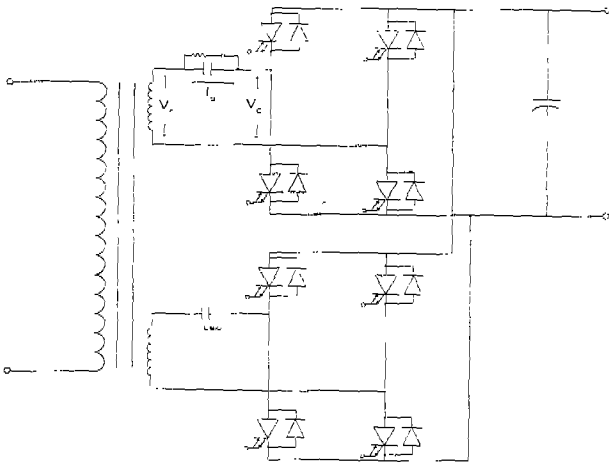


그림1 PWM컨버터 전력회로

3.2 시스템제어

직류출력전압제어를 위한 전류제어방식으로는 대상 시스템이 IGCT를 사용하는 대용량 시스템이므로 소자의 스위칭주파수제한에 따라 순시치제어보다 실효치 제어방식을 채용하고 입력변압기 및 리액터의 임피던스강하분을 계산하여 컨버터의 제어전압을 발생하도록 한다. 이와 같은 방식을 사용하면 실제 전류를 측정하지 않아도 되는 장점이 있는 반면 변압기 및 리액터상수에 따라 제어동작이 영향을 받는 단점이 있다. 시스템의 2개 교류전원 중 컨버터입력전압을 펄스폭변조를 통해 변경시킬 수 있으므로 컨버터 입력기준전압 V_c^* 를 식3-1과 같이 구할 수 있다.

$$V_c^* = V_m \cdot \angle \phi$$

$$V_m = \sqrt{(V_s - I_s^* \cdot R)^2 + (\omega L \cdot I_s^*)^2} \quad \text{---(3-1)}$$

- V_c^* : 컨버터입력기준전압,
- V_s : 전원전압, I_s^* : 입력기준전류
- R : 입력측저항성임피던스, L : 입력측리액턴스,
- ϕ : 컨버터전압과 전원전압위상차

여기서 입력기준전류는 전압오차에 대한 PI제어를 통해 구하며 이러한 컨버터 기준전압의 크기를 갖

고 시스템의 단위역률유지를 위해선 그림2와 같이 입력전압과 입력전류가 동상일 때의 컨버터 입력전압위상을 식3-2와 같이 계산하여 컨버터기준전압에 대한 펄스폭변조를 하면 입력전압과 입력전류를 동상으로 유지할 수 있다.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{|\omega L \cdot I_s^*|}{|V_s - I_s^* \cdot R|} + SW_{comp} \quad \text{---(3-2)}$$

$$V_c^* = V_m \cdot (\theta + \phi), \quad \theta : \text{전원전압 위상각}$$

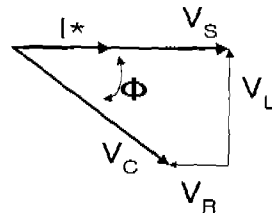


그림2 단위역률시 전압, 전류벡터

한편 펄스폭변조는 제어부에서 구해진 컨버터기준 입력값으로 삼각파 비교방식을 근사한 평균전압 출력방식으로 수행하고 스위칭 주기의 반주기마다 제어를 수행하여 동일한 스위칭 주파수에서 출력전압특성을 개선해 직류출력전압 제어응답속도를 향상시켰다. 그림3A는 시스템의 IGCT소자 게이트 파형이며 그림3B는 컨버터간 게이트 파형의 위상차를 나타낸다.

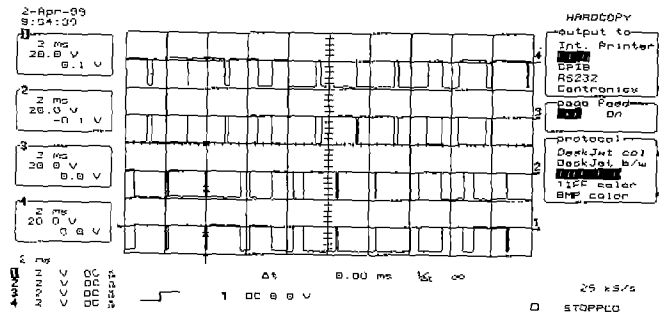


그림3A 컨버터1군 게이트 파형

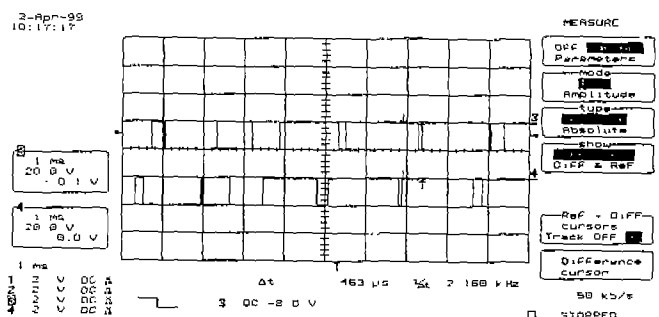


그림3B 컨버터간 게이트 위상차

3.3 전원전압 위상검지

컨버터 입력기준전압을 나타내는 식3-2에서 전원전압 위상각 θ 의 검지를 위해 사용한 방식은 전원전압의 영점통과를 검출하지 않고 전원전압의 최대 값을 계산한 후 순시검지된 전원전압의 크기를 위상으로 변환하여 그 위상을 추종하도록 하는 방식이며 오차보상을 위해 P 게인 만을 사용 비교적 정확한 위상을 얻어낼 수 있다. 위상검지는 게이트펄스가 발생하기 전 수행하여 정상적인 위상검지처리 조건아래에서만 전류제어 및 PWM을 수행하도록 하며 위상검지실패가 수회이상 계속 될 경우 별도의 보호동작을 수행하도록 한다.

4. 시험

시스템 시험은 출력전압제어시험, 부하변동시험, 회생시험등을 표1의 조건에 의해 실시하였다.

항목	내용
1. 입력전압	변압기1차 : 220V 변압기2차 : 300V
2. 출력전압	600VDC ~ 900VDC
3. 부하형태	저항부하, VVVF인버터+유도전동기
4. 부하용량	40 kW
5. 시험항목	출력전압변동시험 부하변동시험 회생시험

표1 시험조건

4.1 출력전압제어

그림4와 같이 시스템 초기기동시 위상차이에 의한 과전류현상을 방지하기 위해 출력전압기준값의 상승률을 제한하여 기동하는 방식을 사용하였으며 약 30kW부하시 출력전압에는 그림5와 같이 입력전원주파수의 2배인 120Hz 맥동성분이 포함되므로 전압제어시 이 맥동성분을 제거한 값을 기준값으로 사용한다.

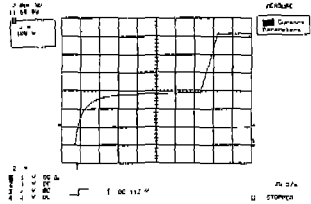


그림4 기동시 출력전압

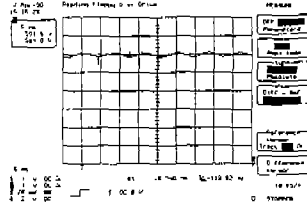


그림5 출력전압의 맥동

PWM정류기는 출력전압의 승압이 가능하며 부하로 사용되는 VVVF의 운전효율만을 생각하면 직류 출력전압을 높게 유지하는 것이 유리하나 전원전압변동률, PWM방식의 선형변조대역, 입력측 리액터의 전압강하율, 제어범위의 한계 및 고조파특성등을 감안하여 출력제어전압을 결정한다. 본 논문의 시험에선 전원전압의 크기를 고려 출력전압의 출력범위를 600VDC~900VDC로 하여 시험하였으며 그림6과 같이 전압범위 내에서 임의의 전압출력이 가능함을 입증하였다.

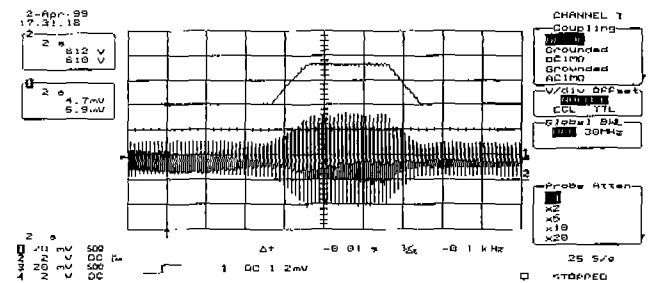


그림6 출력전압 임의제어

한편 PWM정류기 부하급변시 출력전압에 큰 뒀이 생기며 이러한 현상은 대용량 전력소자의 스위칭주파수와 관련되어 피할 수 없다. 따라서 가능한 출력전압의 뒀을 억제하기 위해 부하전류량의 변동분 만큼 피드포워드로 보상하는 것이 필요하다. 부하의 형태가 저항성분인 경우 부하전류를 직접검지하여 피드포워드 보상하는 것이 가능하지만 PWM정류기의 부하로서 유도전동기 구동용VVVF인버터를 사용할 경우 부하전류의 형태가 펄스형태로 되어 직류량의 반영을 위해서 필터를 사용하게 되면 시간의 지연이 생기는 단점이 있으므로 이에 대한 고려도 필요하다. 그림7은 부하급변시 출력전압과형이다.

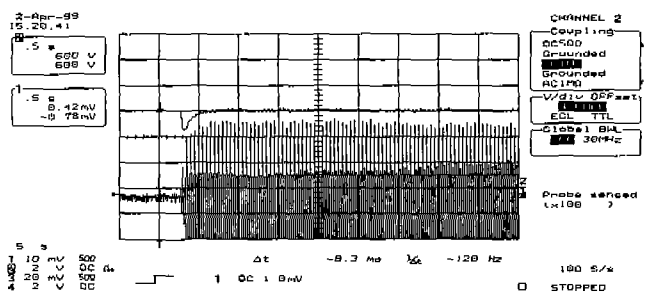


그림7 부하변동(무부하->부하40kW)

4.2 역률 제어

PWM정류기를 사용하면 입력 측에서의 역률을 추

가적인 회로 없이 단위역률로 유지가 가능하다. 철도 차량용 PWM정류기에선 부하역행 또는 회생시 모두 역률 제어가 가능하여야 하며 이와 같은 역률제어가 잘 이루어지고 있음을 그림8과 그림9에서 알 수 있

전력회로의 기본기능을 시험하여 그 결과를 보였으며 IGCT의 이용시 GTO소자에 비해 최소 턴-온, 턴-오프시간을 축소해 보다 양호한 시스템성능을 얻을 수 있음을 예측할 수 있었다. 앞으로 이시험결과를 토대로 수MVA 용량의 PWM컨버터를 제작, 저항부하 및 VVVF+유도전동기, 관성부하등을 이용해 철도차량용 PWM정류기의 상용화 개발을 서두를 예정이다.

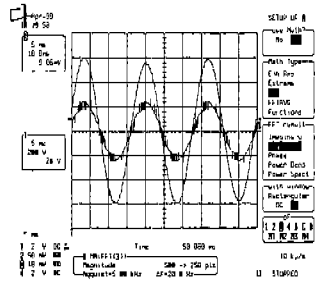


그림 8 역행시 위상

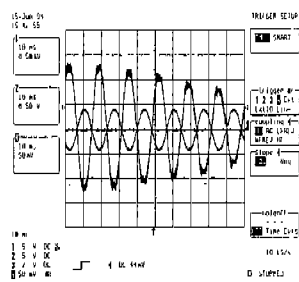


그림9 회생시 위상

4.3 고조파성분감소

2대의 PWM 정류기를 스위칭 각 차이를 두어 운전하므로써 실제 유효스위칭 주파수를 2배로 증가시키는 효과가 있음이 그림10과 그림11을 통해 알 수 있으며 그림3A에서 보이듯이 실제 전력소자의 스위칭 주파수는 전원전압의 9배인 540Hz로 이루어지지만 유니폴라 스위칭과 병렬운전을 통해 전원입력전류에 나타나는 유효스위칭 주파수는 4배로 증가하여 거의 정현파에 가까운 입력전류를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

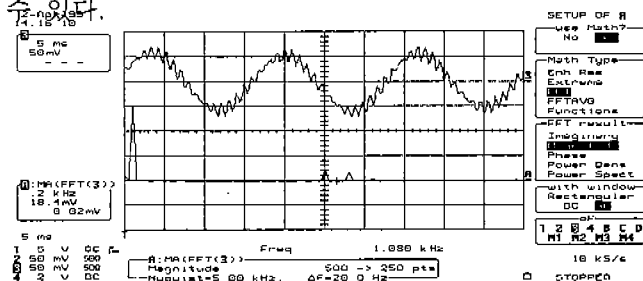


그림 10 컨버터1군 입력전류

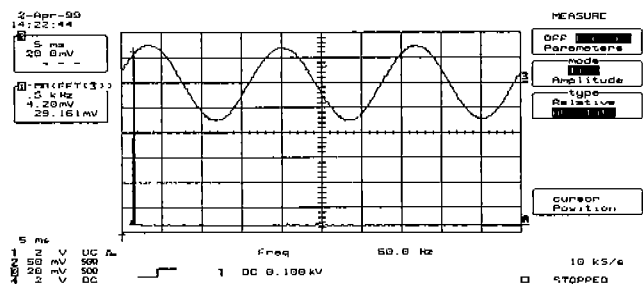


그림 11 전원전류 FFT

참고문헌

- [1] M. Morimoto, "New Single-Phase Unity Power Factor PWM Converter-Inverter System", IEEE Power electron Conf.(PESC) Rec., pp. 217-221, 1989.
- [2] J. Holtz, "Adaptive Optimal Pulse-Width Modulation for the Line-Side Converter of Electric Locomotives", IEEE Trans. power electronics., vol 7, no. 1, pp. 205-211, January. 1992.
- [3] 민성식, "Development of Single Phase PWM Converter for AC Traction System", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 505-508, 1994.
- [4] 한국과학기술연구원 "주동력 및 보조전원용 인버터/컨버터 기술개발" 과학기술처 2차년도 보고서 1996.
- [5] T. Takeshita, "Current control of Single-Phase PWM Converter without Source Phase Angle and Voltage Detectors", 平成 4年 電氣學會産業応用部門 全國大會, pp. 390-395, 1996.
- [6] 마북리연구소 전력전자연구실 "고역률정류기 최적제어기술개발" 현대중공업(주) 연구보고서, 1998.

5. 결론

본 논문에선 IGCT를 사용하여 구성한 철도차량용 PWM정류기의 정격용량 시험에 앞서 제어의 성과