

경량전철용 보조전원장치의 새로운 제어 기법

이은규, 최재호
(주)우진산전, 충북대학교

New control strategy of Static Inverter for the Light Rail Transit

Eun-Kyu, Lee, Jae-Ho, Choi
Woojin Industrial Systems co., Ltd., Chungbuk National University

Abstract - This paper proposes 40 [KVA] rated SIV(Static Inverter) system for Light Rail Transit. The SIV provide power of a fluorescent light in the car, Air-conditioner, and other equipments. To control output voltage it is used voltage control loop for constant voltage control and simultaneously used current control loop for instantaneous control at load changing. The performance of SIV system will be verified by experimental results.

1. 서론

SIV는 광범위하게 전압이 변동하는 가선으로부터 직류 또는 교류 전력을 공급받아 일정한 주파수와 일정한 전압을 만들어 부하에 교류 전력을 공급하는 전력변환장치이다.

종전에는 이러한 직교류 변환 장치로 전동 발전기 방식이나 브러시리스 직류 전동기를 사용하였으나, 소음, 중량이 큰 단점을 가지고 있었다.

따라서, 최근에는 반도체 소자를 이용한 저보수화, 저소음화, 소형경량화 그리고 고효율화가 기대되는 SIV방식이 주류가 되고 있다.[1]

최근, 철도 차량의 경량화 및 고급화에 따라 고정밀 전자 장비들의 사용이 급증되고 있으며 이들은 전압 및 주파수 변동 그리고 고조파의 영향에 민감하여 정보의 전송이나 수신에 오류를 가져옴으로써 사고를 유발할 수 있는 확률이 높아지고 있다.[2]

기존 통근 열차에서는 입력 전압이 DC 1500V를 사용하는 고전압 시스템이었기 때문에 인버터 출력전압을 정밀하게 하기 위하여 12상 제어방식 또는, 이중 채퍼 구성의 인버터를 많이 사용하였고, 6상의 인버터들이 개발되어 왔지만 스위칭 주파수가 낮음으로 인하여 출력전압의 제어 성능이 나쁘고, 인버터의 소음이 증대되어 환경에 나쁜 영향을 많이 끼쳐 왔다.

한편, 경량 전철에서는 특히 무인 자동 운전이 주로 사용되며 승차감과 주변 소음이 없는 패적한 환경이 주로 요구되어지고 있다. 따라서, 기존의 보조전원장치와는 소음 및 전압의 안정성을 갖는 보조전원장치의 개발이 필수적이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 고속 스위칭 소자인 IGBT를 사용하여 고속 스위칭을 통한 전압의 안정화 및 저소음화를 달성하였고, 순시 전류, 전압 제어를 위하여 회전 좌표계상에서 PI제어를 행함으로써 출력 전압을 정상 편차 없이 고용답, 고정밀로 제어가 가능하고 부하의 변동에 대해서도 높은 추종 특성을 가질 수 있도록 하였다.[3]

또한, 경량 전철용 보조전원장치로서 40[KVA]급 SIV를 제작하였고, 출력 필터의 구성과 스위칭 주파수

의 변화에 따른 주파수 대역별 소음을 분석하여 고속 스위칭을 수행하는 경량 전철 보조전원장치의 출력 필터를 제안하였다. 그리고 제안된 제어 알고리즘을 보조전원장치에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

2. SIV 시스템의 구성

Fig. 1은 SIV 시스템의 주 회로도를 나타낸다. 가선 입력 측은 DC Link 캐패시터의 초기 충전시 돌입 전류를 방지하기 위한 FL(Filter reactor)과 RC 필터, 그리고 충전 저항과 On Thyristor로 구성되어 있다.

그리고, 인버터의 출력단은 인버터의 스위칭으로 출력된 펄스파를 평활화시키기 위하여 리액터와 $\Delta-Y$ 트랜스포머와 3상 캐패시터로 이루어진다.

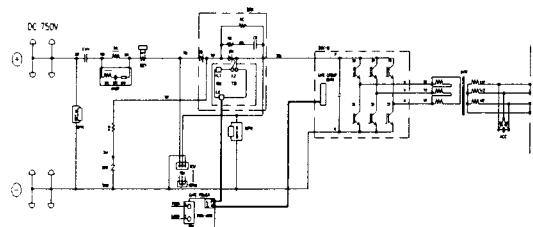


Fig. 1 SIV 시스템의 주회로도

Fig. 2는 제작된 40[KVA]급 SIV의 외형을 보여준다.



Fig. 2 SIV 시스템의 외형

보조전원장치는 출력전압의 안정성과 소음의 감소 및 빠른 제어성능을 얻기 위하여 스위칭 주파수가 2~6 khz 정도로 사용하고 있기 때문에 인버터 출력전압의 필터 설계는 중요한 항목이라고 할 수 있다.

인버터의 스위칭 출력 과정에는 스위칭에 따른 고조파

노이즈와 피크 전압, 전류들이 발생되게 되는데 이러한 노이즈는 차량의 일반 전원을 사용하는 기타 장치에게 오동작 및 발열, 수명을 단축시키는 원인을 제공하게 된다. 따라서 적절한 필터회로의 구성이 필요하게 된다.

SIV의 출력필터 회로는 일반적으로 인버터회로와 트랜스포머 사이에 필터 리액터를 설치하고 트랜스포머 후단에 캐패시터를 설치하는 방법과 트랜스포머의 내부에 리액터 성분을 추가하고 트랜스포머 후단에 리액터와 캐패시터의 조합에 의한 필터회로를 구성하는 방식으로 구분될 수 있다.

이 경우 각각의 사이즈 저감 및 용량의 증대라는 장점과 단점이 존재하는데 이는 설계시에 고려하여야 하는 항목들이라고 할 수 있다.

인버터장치의 소음은 스위칭 소음과 자기 이음에 의한 소음으로 구분되는데, 인버터 스위칭 주파수를 2kHz 이상으로 스위칭 하게 될 경우, 인버터부에서 일어나는 반도체 소자의 스위칭 소음은 저감시킬 수 있게 되지만 필터회로로 사용하는 코아류의 떨림으로 인한 소음은 오히려 증대되어진다.

이는 코아 및 코일에 스위칭 파형에 의한 영향으로 코아 및 코일의 온도 상승과 자기 이음의 발생 원인이 된다. 이러한 소음과 열은 코아의 재질을 실리콘소재가 활용된 제품을 사용함으로 저감시켜 줄 수 있지만, 가격의 증대와 제작에 어려움이라는 문제점을 안고 있다. 경량 전철의 출력필터는 소음과 온도상승을 고려할 때, 인버터와 트랜스포머 사이에 장착하여 사용하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다.

보조전원장치의 인버터 장치는 자연 냉각 구조의 Heat Sink로 구성하여 Fan의 소음이 없도록 구성하였다. 입력부의 캐패시터는 전해 캐패시터를 사용하여 충분한 용량을 갖으며 취부시 중량의 감소를 가질 수 있도록 하였다.

제어장치는 TI 사의 TMS320C32를 적용하여 빠른 연산이 가능하도록 하였으며 출력부의 인터페이스는 FPGA를 사용하여 변경이 편리하게 하였고 차량의 종합제어장치와의 인터페이스는 Current loop를 통하여 인터페이스를 수행하도록 하였다.

Table 1은 SIV 시스템의 정격 사양을 나타낸다.

Table 1 40(KVA) 경전철용 SIV의 정격사양

항 목	사 양
정격 용량	40KVA
가선 전압	750V DC [DC 500 ~ DC 900V]
냉각 방식	열전도 방식에 의한 자연 냉각 방식
주파수	60(Hz)
출력 상수	3상 4선식
정격 출력	교류 출력 3상 380V
출력 전압 변동	5%
순시 전압 변동폭	20%
효율	92%이상

3. 제어 방식

인버터의 출력 전압을 제어하기 위해서 전압 제어기와 전류 제어기를 가지는 이중 제어 루프를 사용하였다. Fig. 3에서와 같이 전압 제어기는 출력 전압의 기준치 (V_c^*)와 피드백된 전압(V_c)을 비교하여 PI제어기를 통하여 제어한다. 이 제어 값은 리액터 전류의 기준치

(i_{aq}^*)가 되며 전류 제어기의 기준치로 입력되어 제어한다.

3.1 전압 제어

인버터의 출력 전압 V_c^* 가 기준 전압 V_c 를 잘 추종하도록 전압 제어기가 전류 제어기로 주는 i_{aqd}^* 는 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$i_{aq}^* = i_{Lq}^* + K_p(V_{cq}^* - V_{cq}) + \omega C_f v_{cq}^* \quad (1)$$

$$i_{ad}^* = i_{Ld}^* + K_p(V_{cd}^* - V_{cd}) - \omega C_f v_{cd}^*$$

단. k_p : PI 제어기의 Gain

즉, 전압 제어기는 출력 전압의 기령치와 피드백 값을 비교하여 PI제어기를 통해 보상하게 된다. 이 값과 부하 전류의 예측값을 더해 전류 제어기의 입력을 만들어 내며 커플링 항을 제거하기 위해 $\omega C_f v_{cd}$ 와 $\omega C_f v_{cq}$ 의 전향 보상항을 추가하였다.

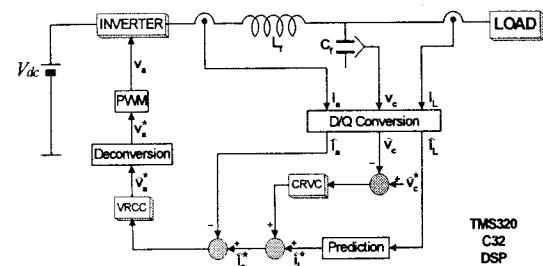


Fig. 3 SIV 제어기의 블럭도

Fig. 4는 PI 전압 제어기를 구조를 보여준다.

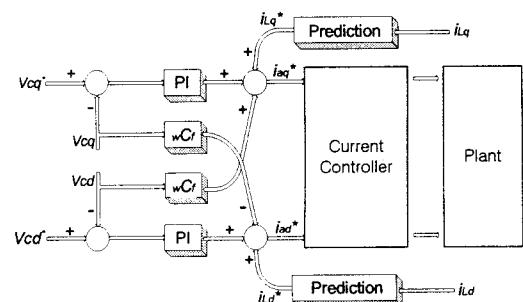


Fig. 4 전압 제어기

3.2 전류 제어

전압형 인버터의 경우 전류의 변화율은 전압보다 훨씬 크다. 따라서 전류를 제어하면 그 제어의 속도는 전압보다 훨씬 빠르게 동작된다.

제어의 대상은 캐패시터 전류나 리액터 전류 들 중 어느 것이라도 무방하지만, 부하 전류가 포함된 리액터 전류를 제어하는 것이 부하 변동에 따른 제어에 있어서는 더욱 효과적이다.

전압 제어기로부터 지령치를 받는 전류 제어기의 출력은 인버터의 출력 전압(L-C필터의 전단)이 된다. 인버

터 출력 전압을 V_a 라 하면 전류 제어기는 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{aq}^* &= v_{cq}^* + K_p(i_{aq}^* - i_{aq}) + \omega L_f i_{ad}^* \\ v_{ad}^* &= v_{cd}^* + K_p(i_{ad}^* - i_{ad}) - \omega L_f i_{aq}^* \end{aligned} \quad (2)$$

전압 제어기와 마찬가지로 상간 간섭 항인 커플링 항을 제거하기 위해 전단에 $\omega L_f i_{ad}$ 와 $-\omega L_f i_{aq}$ 의 전향 보상항을 추가하였다. PI제어기를 이용한 전류 제어기의 블록도는 Fig. 5와 같다.

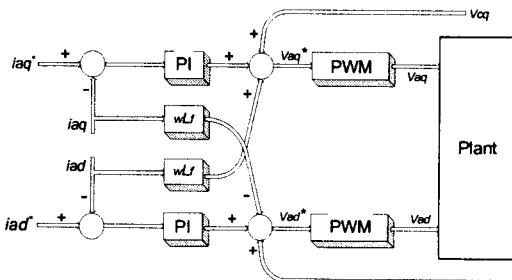
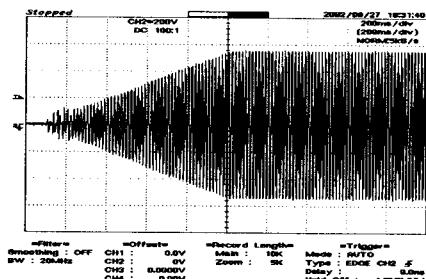


Fig. 5 전류 제어기

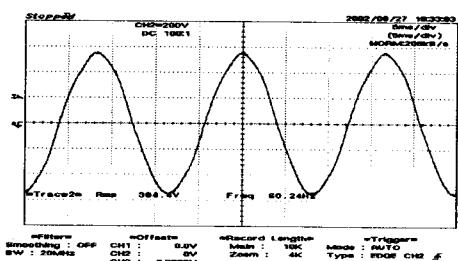
5. 실험 결과

다음 Fig. 6부터 Fig. 8은 Fig. 2에서 보인 SIV의 실험 과정이다. 시험시 가선전압은 750[Vdc]를 사용하였으며, 출력전압 지령치는 선간 전압 380[Vrms], 60Hz이다.

Fig. 6은 무부하에서 초기 기동시와 정상 상태의 선간 전압 과형을 보여준다. 초기 기동시는 소프트 스타팅으로 전압이 서서히 증가하는 모습을 볼 수 있으며, 정상 상태에서 380V, 60Hz의 선간 전압이 출력되는 것을 볼 수 있다.



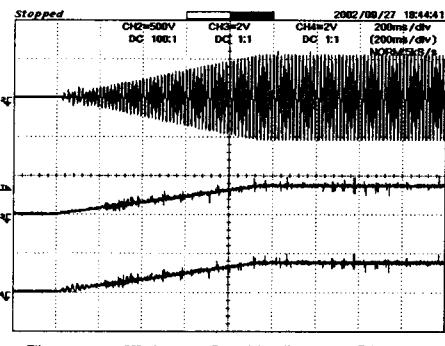
(a) 초기 기동시(Initial start)



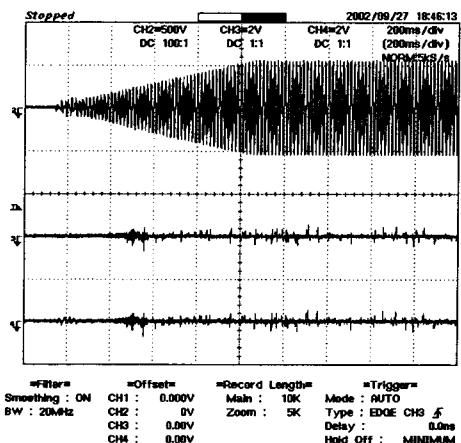
(b) 정상상태 파형(Steady state)

Fig. 6 SIV 초기 기동시와 정상상태시의 선간전압

Fig. 7은 기동시 d,q축 전압 지령치와 d,q축 전압을 나타낸다. 이것은 제어기내에서 제어되는 제어량이며, d,q축 전압이 그 지령치를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.



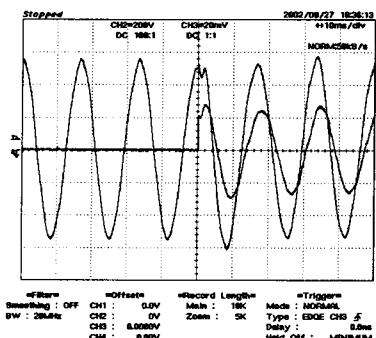
(a) 선간 전압, q축 전압지령치, q축 전압



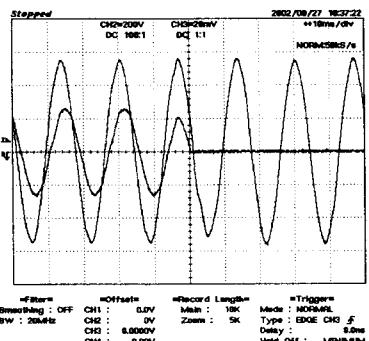
(b) 선간 전압, d축 전압지령치, d축 전압

Fig. 7 기동시 선간전압과 d,q축 전압지령치 및 d,q축 전압

Fig. 8(a), (b)은 부하 급변시의 선간 전압 과형을 보여준다. 투입시나 차단시 1주기 내에서 큰 충격 없이 지령치를 추종하고 있음을 알 수 있다.



(a) 부하 투입시



(b) 부하 차단시

Fig. 8 부하 금번시 선간 전압과 상전류

인버터의 출력 필터의 구성 및 스위칭 소음을 측정하였고, 그 결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 나타내었다. 스위칭 주파수는 3.5khz로 하였으며, 부하는 정격 용량으로 하였다. Fig. 9는 필터 회로를 인버터와 트랜스포머 사이에 설치한 것이고, Fig. 10은 트랜스포머의 후단에 필터를 설치한 경우를 나타내었다. 스위칭 주파수의 범위를 변경하여 측정한 결과, 스위칭 주파수의 대역에 소음치가 높지만, 이는 가정 주파수의 대역을 훨씬 넘어서는 영역으로 큰 문제를 일으키지는 않는다. 실제로, 1khz 미만의 주파수 대역별 소음치를 비교해 보면, 트랜스포머 전단에서 필터링하는 것이 장치의 크기는 증가시키지만, 출력 및 소음의 레벨을 저감시키는 것을 알 수 있다.

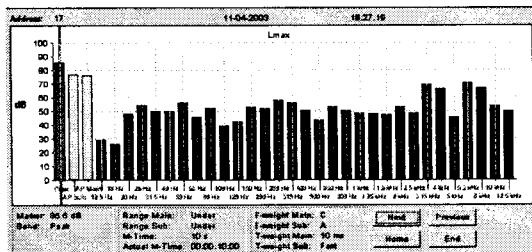


Fig. 9 필터 회로 - 인버터와 트랜스포머 사이

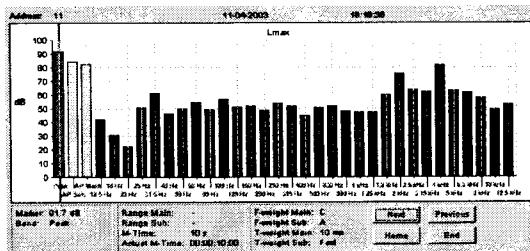


Fig. 10 필터 회로 - 트랜스포머 후단

5. 결론

본 논문은 도시형 대량 교통 시스템인 지하철의 안정적인 운행을 위한 것으로서, 철도 차량용 보조 전원 장치인 3상 전압형 PWM 인버터에 관한 연구이다.

3상 시스템인 보조 전원 장치를 회전 좌표계상으로 모델링하였으며, 이를 바탕으로 제어기를 설계하고 시작 품을 제작하여 부하 변동에 대한 시스템의 동적 응답 특

성을 구함으로써 제어기의 우수성을 입증하였다. 향후 보다 안정적인 운영을 위하여 좀더 많은 시험이 필요할 것으로 보이며, 현차에 취부하여 성능의 안정성을 입증하는 과정이 필요하다.

[참 고 문 현]

- [1] S. Mine, Y. Yonehata, M. Shigenobu and M. Yano, "The Auxiliary Power Supply for Rolling Stock", IPEC-Tokyo, pp1309-1320, 1983
- [2] Olle I. Elgerd, " Electric Energy Systems Theory " McGRAW-HILL, Inc., 1971
- [3] S. Inarida, K. Nakamura and Y. Iwaji, "Study on Instantaneous Voltage Control Method for Auxiliary Power Supply Systems Used in Rolling Stocks", IEE Japan, pp1132-1139, 1996