

틸팅 차량용 보조전원장치의 개발

이창희*, 김형철*, 송영신*, 이은규*, 최재호**

*(주)우진산전, **충북대학교

Development of Static Inverter for the Tilting Train eXpress TTX

Chang-Hee Lee*, Hyung-Cheol Kim*, Young-Shin Song*, Eun-Kyu Lee*, Jae-Ho Choi**

*Woojin Industrial Systems co. Ltd., Chungbuk National University

Abstract - This paper proposes 210[kVA] rated SIV(Static Inverter) system for the TTX(Tilting Train eXpress). The SIV provides 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 simulation and experimental results.

1. 서 론

SIV는 차량의 승객 서비스에 주안을 둔 장치로, 에어컨과 히터 등의 냉난방장치 부하, 형광등의 조명장치부하, 제어장치 등에 안정적인 전원을 공급하는 장치이다. 다시 말해서, 광범위하게 변동하는 가선으로부터 직류 또는 교류 전력을 공급받아 일정한 주파수와 일정한 전압(CVCF : Constant Voltage Constant Frequency)을 만들어 부하에 교류전력을 공급하는 변환장치이다.

종전에는 이러한 직·교류 변환 장치로 전동발전기(Motor-Generator) 방식이나 브러시리스 직류 전동기를 사용하였으나, 소음, 중량이 큰 단점을 가지고 있었다.

따라서 최근에는 반도체 소자를 이용한 저보수화, 저소음화, 소형·경량화 그리고 고효율화가 기대되는 SIV방식이 주류가 되고 있다.^{[1][2]}

본 논문에서는 고속 스위칭 소자인 IGBT를 사용하였고, 순시 전류·전압 제어를 위하여 동기 회전 좌표계상에서 PI제어를 행함으로써 출력 전압을 정상변차 없이 고용답, 고정밀로 제어가 가능하고 부하의 변동에 대해서도 높은 추종 특성을 가질 수 있도록 하였다.^[3]

또한, 제안된 제어알고리즘을 시뮬레이션 및 틸팅 차량용 210[kVA]급 SIV에 적용하여 그 유용성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 틸팅 차량용 SIV의 구성

그림 1은 AC 1580V의 전원을 입력받아 3상 AC 380V로 변환시켜주는 SIV의 주회로이다. SIV부는 입력전원으로부터 보호를 위한 퓨즈를 통한 다음 다이오드 브릿지 정류회로를 이용해 DC 전압으로 변환된다. 이 전압은 충전회로를 거쳐 FC(Filter Capacitor)에 충전되며 이 중 췌퍼로서 원하는 DC 전압으로 제어한다. 그리고 이 DC 전압을 3상 인버터로 스위칭하여 3상 630V로 변환하며 이 전압은 L-C필터를 거쳐 사인파의 모양으로 정류된다. 정류된 사인파의 3상 전압은 트랜스포머에서 380V로 변환하여 부하 층에 전달된다.

그림 2는 제작된 210[kVA]급 틸팅 차량용 SIV의 외형을 보여준다.

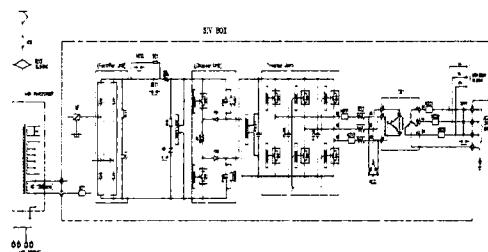


그림 1. 틸팅 차량용 SIV의 주회로도

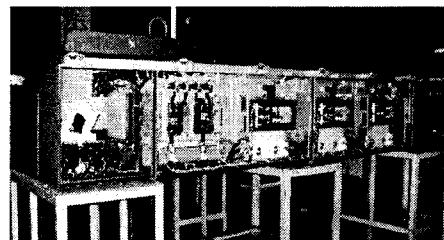


그림 2. SIV의 외형도

표 1은 SIV 시스템의 사양을 나타낸다.

표 1. SIV의 일반 사양

항 목	사 양
회로방식	2중 췌퍼 + 6필스 전압형 인버터
제어방식	PWM 제어 (SVPWM)
냉각방식	자연냉각방식
정 격	210kVA 연속
교류 전압변동범위	AC 1590V(AC 25kV)
직류 전압변동범위	AC 1431V ~ AC 1749V (AC 20kV ~ AC 27.5kV)
정격전압	DC 1500V
전압변동범위	DC 900V ~ DC 1800V
순시변동범위	DC ±400V
정격전압	AC 380V (3상)
정격전류	AC 364A
전압변동범위	정격전압의 ±5%
정격주파수	60Hz ± 2%
왜 율	5% 이하
부하역률	0.85
효 율	90% 이상
통 신	RS485 통신

보조전원장치는 출력전압의 안정성과 소음의 감소 및 빠른 제어성능을 얻기 위하여 스위칭 주파수를 2~6[kHz] 정도로 사용하고 있기 때문에 인버터의 스위칭 출력 파형에는 스위칭에 따른 노이즈와 피크 전압, 전류들이 발생하게 된다. 이러한 노이즈는 차량의 일반 전원을 사용하는 기타 장치에게 오동작 및 발열, 수명을 단축시키는 원인을 제공하므로 적절한 필터회로의 구성이 필요하게 된다.

SIV의 출력필터 회로는 일반적으로 인버터 회로와 트랜스포머 사이에 필터 리액터를 설치하고 트랜스포머 후단에 커패시터를 설치하는 방법과 트랜스포머의 내부에 리액터 성분을 추가하고 트랜스포머 후단에 리액터와 커패시터의 조합에 의한 필터회로를 구성하는 방식으로 구분할 수 있다. 이 경우 각각의 사이즈 저감 및 용량의 증대라는 장점과 단점이 존재하는데 이는 설계시에 고려하여야 하는 항목들이라 할 수 있다.

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

제어장치는 TMS320C32를 적용하여 빠른 연산이 가능하도록 하였으며 입출력의 인터페이스는 FPGA를 사용하여 변경을 편리하게 하였고 차량의 종합제어장치와의 인터페이스는 RS485통신을 사용하였다.

2.2 제어 방식

인버터의 출력전압을 제어하기 위해서 전압제어기와 전류제어기를 가지는 이중제어루프를 사용하였다. 그림3에서와 같이 전압제어기는 출력전압의 기준치(V_c^*)와 피드백된 전압(V_c)을 비교하여 PI제어기를 통하여 제어한다. 이 제어값은 리액터 전류의 기준치(i_{ad}^*)가 되며 전류제어기의 기준치로 입력되어 제어한다.

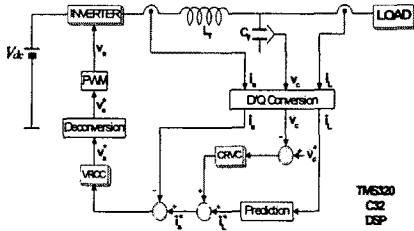


그림 3. SIV의 블록도

2.2.1 전압제어

인버터의 출력전압 V_c^* 가 기준 전압 V_c 를 잘 추종하도록 전압제어기가 전류 제어기로 주는 i_{ad}^* 는 다음의 식으로 표현될 수 있다.

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

$$i_{ad}^* = i_{Ld}^* + K_p(V_c^* - V_c) - \omega C_f v_{cd}^* \quad (k_p : \text{PI 제어기의 Gain})$$

즉, 전압제어기는 출력전압의 지령치와 피드백된 실제 출력 전압 값을 비교하여 PI제어기를 통해 보상하게 된다. 이 값과 부하전류의 예측 값을 더해 전류제어기의 입력을 만들어 내며 커플링 항을 제거하기 위해 $\omega C_f v_{cd}$ 와 $\omega C_f v_{cq}$ 의 피드포워드 항을 추가하였다.

그림 4는 PI 전압제어기를 구조를 보여준다.

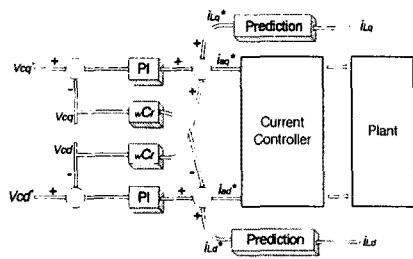


그림 4. 전압 제어기의 블록도

2.2.2 전류제어

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

제어의 대상은 커패시터 전류나 리액터 전류 등 중 어느 것이라도 무방하지만, 부하전류가 포함된 리액터 전류를 제어하는 것이 부하변동에 따른 제어에 있어서는 더욱 효과적이다.

전압제어기로부터 지령치를 받는 전류제어기의 출력은 인버터의 출력 전압(L-C필터의 전단)이 된다. 인버터 출력전압을 V_o 라 하면 전류제어기는 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$v_{ad}^* = v_{cq}^* + K_p(i_{ad}^* - i_{ad}) + \omega L_f i_{ad}^* \quad (2)$$

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

전압제어기와 마찬가지로 상간 간섭 항인 커플링 항을 제거하기 위해 전단에 $\omega L_f i_{ad}$ 와 $-\omega L_f i_{ad}$ 의 피드 포워드 항을 추가하였다. PI제어기를 이용한 전류제어기의 블록도는 그림 5와 같다.

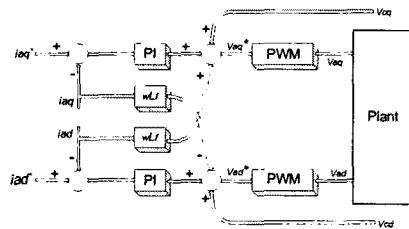


그림 5. 전류 제어기의 블록도

2.3 시뮬레이션

시뮬레이션을 하기 위하여 텔팅 SIV의 사양과 같이 파라미터 값을 설정하였다.

입력즉 가선전압을 DC 1500V로 넣고 전압제어기와 전류제어기를 가진 이중루프를 사용하였다. 초기 기동시는 소프트 스타팅으로 전압이 서서히 증가하도록 d축 전압 지령치를 리니어하게 증가하여 최종적으로 전압피크치에 멈추도록 제어를 하였다. 그림 6에서 보는 바와 같이 d축 전압 지령치에 d축 전압이 추종하는 것을 볼 수 있고, q축에 대해서 잘 추종하는 것을 알 수 있다. 그림 7은 부하 급변시에 선간전압과 전류 과형을 나타낸다. 부하 투입시나 차단시 모두 순간적인 전압의 일그러짐을 볼 수 있으나 전류 제어기와 전압 제어기에 의해 곧바로 다시 원상 복귀하는 것을 알 수 있다.

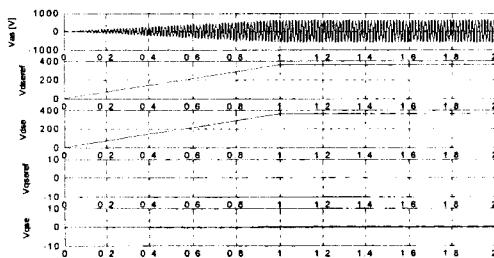
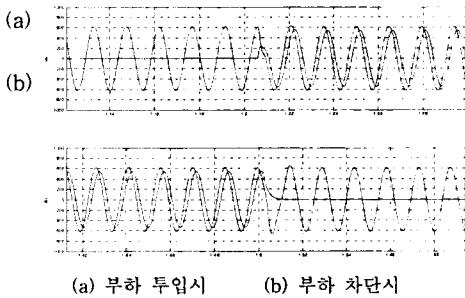


그림6. 기동시 선간전압과 d,q축 전압지령치 및 d,q축 전압

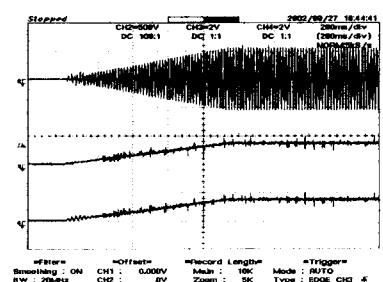


(a) 부하 투입시 (b) 부하 차단시

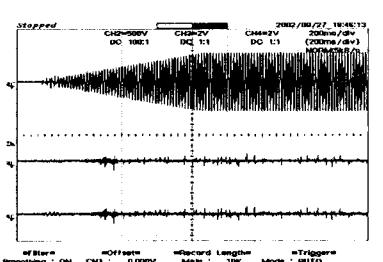
그림7. 부하 급변시 선간 전압과 상전류

2.4 실험결과

다음 그림 8-9는 털팅 차량용 SIV의 실험 파형이다. 시험 시 가선전압은 AC1580V를 입력 받아 이중 초퍼로 DC 1500V로 제어된 전압을 사용하였으며 출력전압 지령치는 선 간 전압 380[Vrms], 60Hz이다.



(a) 선간전압(초기 기동시), d축전압 지령치, d축전압

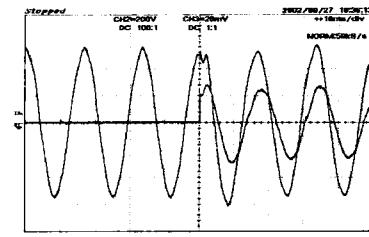


(b) 선간전압(초기 기동시), q축전압 지령치, q축전압

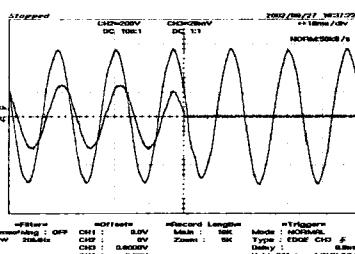
그림 8. 기동시 선간전압과 d,q축 전압지령치 및 d,q축 전압

그림 8은 무부하에서 초기 기동시와 정상상태의 선간 전압 파형을 보여준다. 초기 기동시는 소프트 스타팅으로 전압이

서서히 증가하는 모습을 볼 수 있으며, 정상상태에서 380V, 60Hz의 선간 전압이 출력되는 것을 볼 수 있다. 또한 기동시 d, q축 전압 지령치와 d, q축 전압은 제어기내에서 제어되는 제어량이며, d,q축 전압이 그 지령치를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.



(a) 부하 투입시



(b) 부하 차단시

그림 9. 부하 급변시 선간 전압(200V/div)과 상전류(500A/div)

그림 9는 부하 급변시의 선간 전압 파형을 보여준다. 투입 시나 차단시 1주기 내에서 큰 충격없이 지령치를 추종하고 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 털팅 차량용 3상 전압형 PWM 인버터에 관한 연구이다.

3상 시스템인 보조 전원 장치를 동기 회전 좌표계상으로 모델링하였으며, 이를 바탕으로 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검증하였고 제어기와 시작품을 제작하여 부하변동에 대한 시스템의 동적 응답특성을 구함으로써 제안된 제어기의 우수성을 입증하였다.

향후 보다 안정적인 운영을 위하여 좀더 많은 시험이 필요할 것으로 보이며, 배터리 충전기에 쓰이는 부분과 털팅 제어에 필요한 PWM 컨버터 부의 추가 시험이 필요하다. 또한 현차에 취부하여 성능의 안정성을 입증하는 과정이 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] S. Mine, Y. Yonehata, M. Shigenobu and M. Yano, "The Auxiliary Power Supply for Rolling Stock", IPEC-Tokyo, pp.1309-1320, 1983
- [2] S. Inarida, K. Nakamura and Y. Iwaji, "Study on Instantaneous Voltage Control Method for Auxiliary Power Supply Systems Used in Rolling Stocks", IEE Japan, pp.1132-1139, 1996
- [3] 이은근, 최재호, "경량전철용 보조전원장치의 새로운 제어 기법", 2003년도 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.190-193, 2003