

# 축소형 부하불평형 보상장치의 개발 및 시험

## Development and Operation of Small-Scaled Equipment for Improving Unbalanced Load in Railway

김주락\*    한문섭\*\*    강문호\*\*\*    김정훈\*\*\*\*  
Kim, Joorak    Han, Moonseob    Kang, Moonho Kim,    Kim, Jung-Hoon

---

### ABSTRACT

This paper proposes the analysis on new equipment for power quality in electrified railway. The proposed equipment consists of series and parallel inverter. Each inverter is connected by capacitor as dc link. This structure can be compensated for active and reactive power in catenary through transformer.

---

### 1. 서론

국가 교통 물류의 혁신적인 변화를 가져온 경부고속철도를 위시하여, 여러 간선철도의 전철화 사업으로 인하여 국내의 전철노선의 연장을 확장 일로에 있다. 이 같은 국내 전기철도의 확충은 한국전력의 일반전력계통과 전기철도 시스템과의 잦은 연계를 의미하기도 한다. 이에 따라 일반전력계통에서는 단상시스템이며, 이동하는 집중부하 특성을 갖는 전기철도 급전시스템으로 인한 전력품질 저하에 관심을 갖기 시작하였고, 전기철도 입장에서는 전력품질 문제에 대하여 수용가로서 규제사항의 충실한 의무수행이 필요하다.

현재 한국전력에서는 전력품질 문제중 불평형과 고조파 전압왜형율을 전기철도와 한국전력시스템이 접속되는 PCC에서 일정 제한치로서 규제하고 있다. 이에 따라 현재 경부선에는 고속신선의 경우 능동필터가 대구 이남의 기존선 구간에서는 수동필터가 설치되어 고속철도 개통과 함께 운영되고 있다[1,2]. 그러나 이는 선로의 고조파 전류를 저감시킬 목적으로 설치되었으며, 국내 기술이 아닌 외국기술에 의존하여 설치되었다. 그러나 전기철도에서는 고조파 문제뿐 아니라 3상전력의 2개 단상 변환과 M상과 T상의 부하의 불균형으로 인하여 전압불평형도 종종 문제시 되고 있는 현실이다.

본 논문에서는 직렬 및 병렬 인버터로 부하불평형 및 전압강하 보상 문제도 해결할 수 있는 새로운 설비를 제안하고자 한다. 기 완료된 알고리즘을 바탕으로 축소형 모델을 설계 및 제작 하였으며, 구축된 설비를 통하여 여러 시험을 수행하였다.

---

\* 김주락, 정회원, 한국철도기술연구원, 전기신호연구본부  
E-mail : jrkim@krri.re.kr  
TEL : (031)460-5411 FAX : (031)460-5459

\*\* 한국철도기술연구원

\*\*\* 선문대학교

\*\*\*\* 홍익대학교

## 2. 축소형 불평형 보상설비

### 2.1 축소형 시험설비의 H/W 제작

그림 4는 본 연구에서 제안한 전력품질 보상설비의 축소형 모델의 개념도이다. 제작한 설비는 교류 철도 급전시스템의 개략 모델과 보상설비의 용량 축소형 모델로 구분할 수 있다. 급전시스템의 개략 모델은 구축한 축소형 보상설비의 성능시험을 위하여 제작하는 것으로 급전시스템과 동일한 구조를 가지지는 않지만 그 특징은 모두 나타낼 수 있도록 설계하였다. 즉, 국내 교류 급전시스템의 가장 큰 특징인 3상 전력의 2개 단상 변환은 실제 급전시스템의 스코트 변압기를 용량을 축소하여 설계하였다. 따라서 T상과 M상의 부하불평형 모의가 가능하다. 또한 부하단의 소용량의 인버터와 전동기를 이용하여 다양한 상황의 철도부하를 모의할 수 있도록 설계하였다.

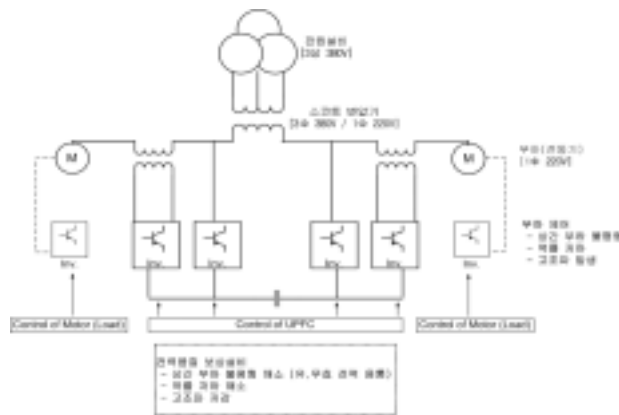


그림 1. 개발한 축소형 보상설비의 개념도



그림 2. 개발한 축소형 보상설비

## 2.2 축소형 시험설비의 제어구조

제작한 축소형 설비는 M상과 T상이 동일한 구조를 가지므로 각각의 제어를 위한 시스템 구조와 제어 파라미터들도 동일한 형태와 값들을 가진다. 본 연구에서는 그림 3에 보이는 것과 같이 각상의 병렬 인버터에 인가되는 모션전압에 d-축이 동기되어 회전하는 d-q 좌표계를 근거로 제어기를 구성하였다.

일차적으로 모션전압의 위상( $\theta$ )을 검출하기 위하여 이산 단상 PLL(Phase Locked Loop)이 구성된다. 따라서 기본적인 제어시스템 구성은 각상의 직병렬인버터를 포함하는 4개의 단상 인버터 제어기, 각상의 모션전압에 대한 2개의 PLL부로 이루어지고, 제어에 필요한 각종 전압, 전류들을 제어기로 인터페이스하기 위한 신호 인터페이스부들이 포함된다. PLL 알고리즘은 제어기와는 별도의 DSP1, DSP2에 구현되어 모션전압의 위상정보( $\sin\theta$ ,  $\cos\theta$ )가 계산되고, 계산결과는 DA변환기를 통해 제어기 알고리즘이 구현되는 제어용 DSP3로 인가되어 제어기 설계에 사용된다.

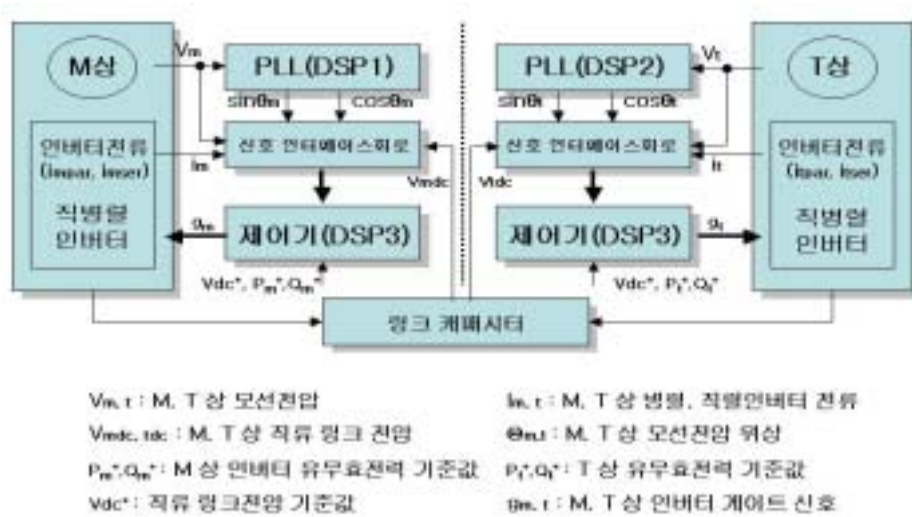


그림 3. 제어시스템 구성

그림 4는 인버터 제어부의 구조로서 먼저 병렬인버터에 대해서, 회전 d-q축을 인버터 모션전압에 동기시킨 경우 d-q좌표계상에서 각 상의 병렬 인버터와 모션사이에 수수되는 순시 무효전력량,  $Q$  을 나타내면 (1)과 같고, 요구되는 무효전력량,  $Q^*$  가 주어지면 병렬 인버터의 q축 기준전류 성분,  $i_{qpar}^*$  는 식(2)와 같이 구해진다.

$$Q = \frac{1}{2} |V| i_{qpar} \quad (1)$$

$$i_{qpar}^* = 2 \frac{Q^*}{|V|} \quad (2)$$

한편, 축소형 보상설비의 직렬 인버터는 선로의 유효전력과 무효전력을 제어하기 위하여 선로와 직렬로 전압을 주입한다. 이 경우, 인가된 전압과 선로에 흐르는 전류에 의해 직렬 인버터와 선로간에는 유효전력의 수수가 발생되고 이로 인해 직렬 인버터 DC 링크 전압이 변동하게 된다. DC 링크 전압을 일정하게 유지하기 위한 제어기를 설치하여 직렬 인버터에서 수수하는 유효전력만큼을 병렬 인버터측에서

수수하도록 하고 직병렬 인버터와 DC 캐패시터에서 손실되는 유효전력분을 보상한다. 병렬 인버터에서 수수되는 순시 유효전력량,  $P$  를 나타내면 식(3)과 같이 되어 유효전력은 d-q 전류 성분중  $i_{dpar}$  에 의해서 결정됨을 쉽게 알 수 있다. 따라서 DC 링크 전압 기준값과 DC 링크 전압 케환값을 이용하여 PI 제어기를 구성하고 이로부터의 출력을 병렬 인버터의 d축 기준전류 성분,  $i_{dpar}^*$  , 으로 설정한다.

$$P = \frac{1}{2} |V_{sh}| i_{dpar} \quad (3)$$

직렬 인버터 전류제어를 위한 전류 기준값은 선로에 흐르는 유효전력과 무효전력 요구량으로부터 결정한다. 각 상에서 직렬 인버터에 의해 수수되는 모선으로부터의 무효전력과 유효전력을 각각 Q와 P라고 하면, d-q축을 모선 전압에 동기를 시켰으므로, 식 (4)가 되고, 이로부터 요구되는 무효전력량과 유효전력량,  $Q^*$ ,  $P^*$  가 주어지면 직렬 인버터의 q축과 d축의 기준전류 성분들은 (5)와 같이 구해진다.

$$Q = \frac{1}{2} |V| i_{qser}, \quad P = \frac{1}{2} |V| i_{dser} \quad (4)$$

$$i_{qser}^* = 2 \frac{Q^*}{|V|}, \quad i_{dser}^* = 2 \frac{P^*}{|V|} \quad (5)$$

기준에 일반적으로 사용되어 온 전류제어 방식에서는 d축과 q축의 기준 전류들에 대해서 독립적으로 비간섭 제어를 구성하여 제어를 행하고 있지만 이를 위해서는 인버터 선로의 파라미터들을 알아야 하고, 제어기가 복잡해지므로 본 연구에서는 파라미터에 대한 정보가 필요 없고 제어성능이 우수한 히스테리시스 전류제어방식을 사용하였다. 이를 위해서는 인버터 상전류 제어 기준값이 요구되는데, 이상의 과정을 통해서 계산된 d-q축 좌표계에서 표현된 직류 전류 기준값들을 다음 식을 통해 단상교류 전류 기준값,  $i_{par}^*$ ,  $i_{ser}^*$  으로 변환한다.

$$i_{par}^* = i_{dpar} \sin\theta + i_{qpar} \cos\theta \quad (6)$$

$$i_{ser}^* = i_{dser} \sin\theta + i_{qser} \cos\theta \quad (7)$$

식(6), (7)에서 얻어지는 상전류 기준값들은 실제 인버터에 흐르는 상전류값들과 함께 히스테리시스 제어기[3-5]로 인가되고 이로부터 인버터들을 구동하기 위한 PWM 펄스들이 생성된다.

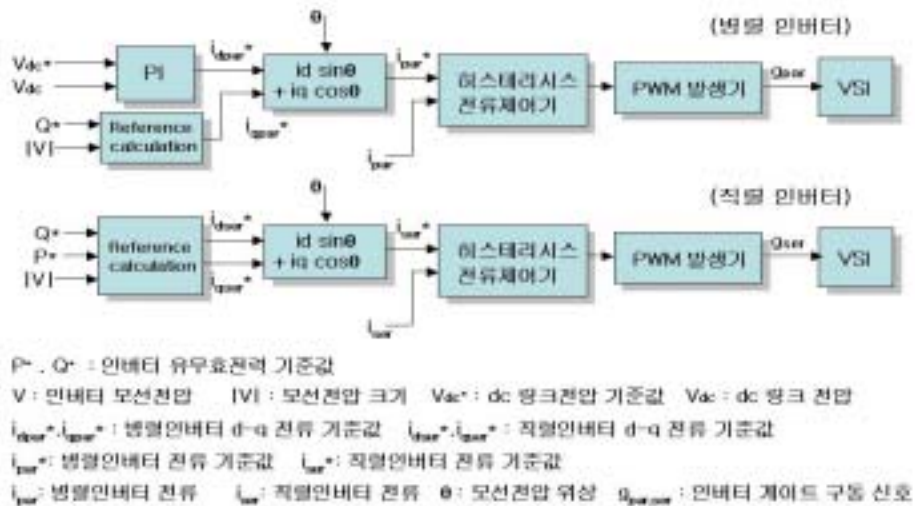


그림 4. 인버터 제어부 구조

### 3. 보상설비 시험

위에서와 같이 보상설비의 H/W와 제어기를 구성하여 전기철도시스템에서 발생하는 부하 불평형을 보상하는 시험을 수행하였으며, 시험 조건 및 결과는 다음과 같다.

#### 3.1 시험 조건

본 연구에서 수행한 시험은 M상과 T상의 부하가 평형을 이루지 않은 상태에서 인버터제어를 통하여 목표로 하는 유효전력과 무효전력을 각 상에 보상하는 시험이며, 모든 시험은 M상과 T상 말단에 부하 1kVA(역률 1; 순수저항부하)를 연결한 상태에서 수행하였다.

부하 불평형의 보상을 위한 제어 목표값은 표 1과 같이 2가지의 경우로 설정하였다.

표 1. 각종 제어 목표값

구분	유효전력 [W]	무효전력 [var]	DC-link 전압 [ $V_{dc}$ ]
시험 ①	500	-1500	310
시험 ②	1000	-1500	310

#### 3.2 시험 결과 및 검토

M상과 T상의 인버터에 제어명령을 주어 시험을 수행한 결과는 다음과 같다. 먼저, 직렬 및 병렬 인버터 투입에 따른 인버터를 연결하고 있는 DC-link의 성능을 살펴보면 그림 5와 같다. 두 시험 조건 모두에서 310V를 유지하기 위한 명령을 주었으며, 제어 시작 후 약간의 과도 기간이 지나면 기준전압을 잘 추종하고 있음을 그림에서 볼 수 있다.

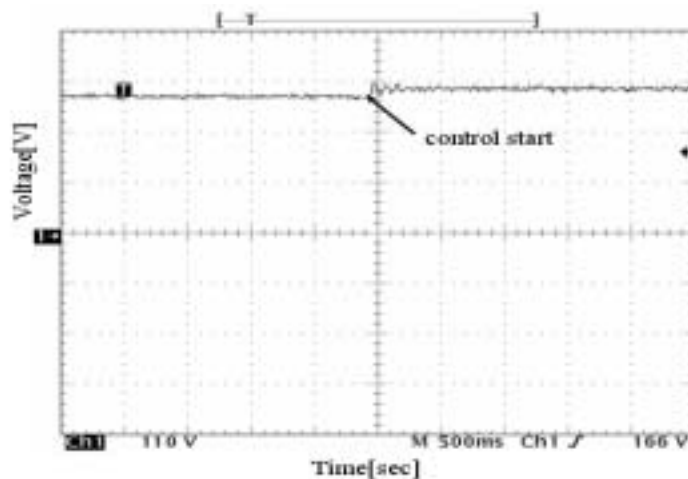


그림 5. 병렬/직렬인버터 사이의 DC-link 캐패시터 전압

그림 6은 M상 T상 모션전압과 각 모션전압에 대한 위상 동기 신호들을 보인다. M상과 T상 변압기의 입력 임피던스에 의해 기인하는 모션전압 파형에서의 전압 왜곡에도 불구하고, PLL부의 필터링 특성에 의하여 각 전압에 대한 동기신호들이 왜곡이 없이 전압에 정확하게 동기되어 발생되고 있음을 알 수 있

다. 그림 7은 M상 모션전압과 병렬 인버터 전류를 보이는 것으로, 기본과 성분들만을 고려할 때 모션전압과 전류의 위상이  $90^\circ$  만큼 차이가 가져 병렬 인버터에서 무효전력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그림 8은 T상 모션전압과 직렬 인버터 전류를 보이는 것으로, 모션전압과 전류의 위상이 동상으로서 유효전력만이 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 9에서 보듯이 순시전력의 파형이 양의 값을 가져 파형의 평균값이 유효전력이 되며, 그 값은 500W 정도로 출력되고 있음을 알 수 있다. 그림 10과 11은 시험 ②의 상 모션전압과 직렬 인버터 전류 파형과 그때의 순시전력을 보여주며, 그 결과는 시험 ①과 같이 목표값을 잘 추종함을 알 수 있다.

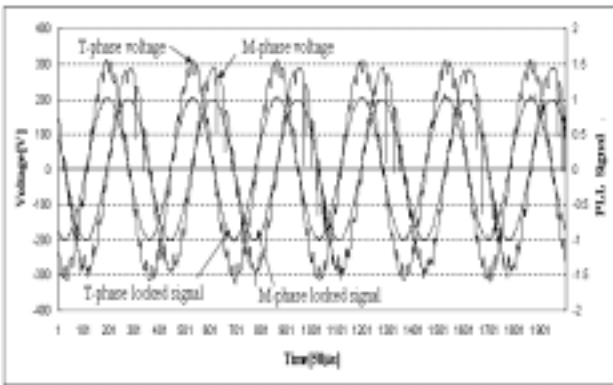


그림 6. M상 T상 모션전압과 PLL 신호

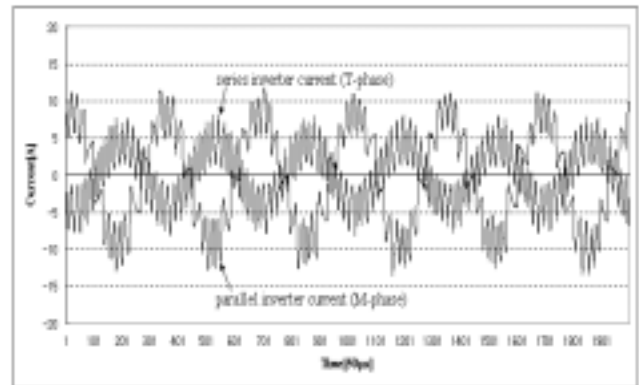


그림 7. 인버터 전류 파형 (시험 ①)

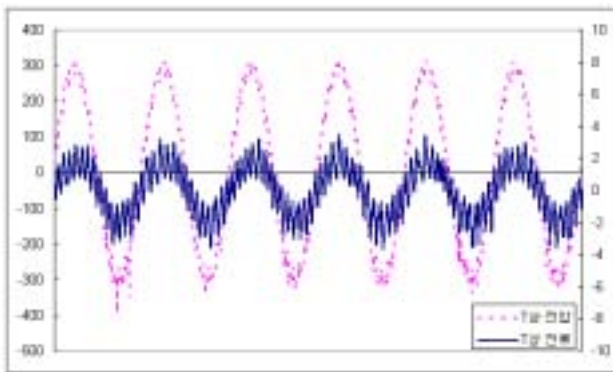


그림 8. 직렬 인버터측 전압 및 전류파형(시험 ①)

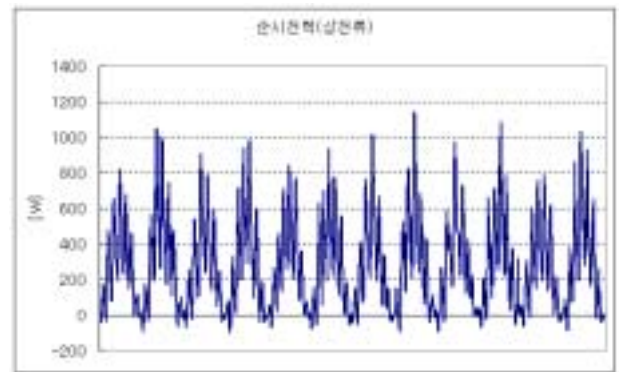


그림 9. 직렬 인버터측 순시전력 (시험 ①)

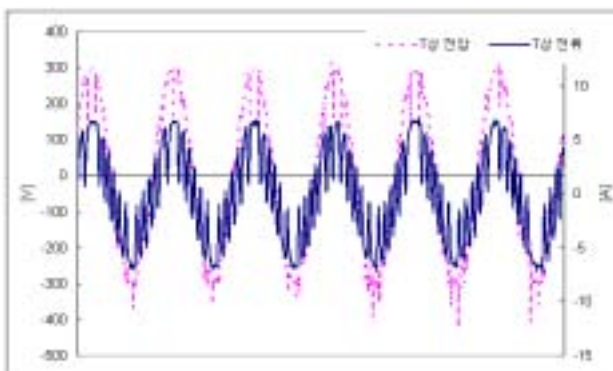


그림 10. 직렬 인버터측 전압 및 전류파형(시험 ②)

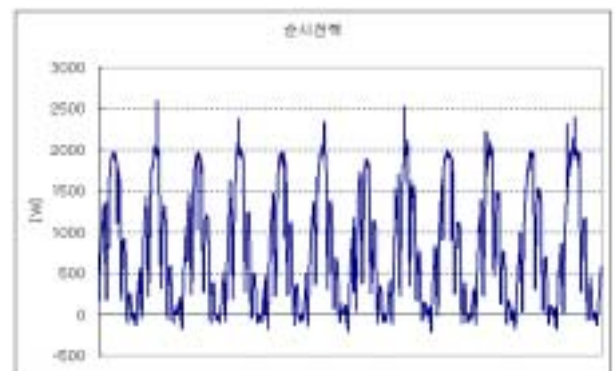


그림 11. 직렬 인버터측 순시전력 (시험 ②)

## 5. 결론

본 연구에서는 제안한 교류 전기철도용 부하불평형 보상설비의 축소형 모델을 개발하였고, 인버터 제어 시스템을 구축하였다. 또한 구축한 설비를 이용하여 각 상간 전력용동에 대한 시험을 수행하였다. 시험을 통하여 제안한 설비가 기존의 병렬형 보상설비와는 달리 DC-Link를 통한 직렬 및 병렬형의 조합으로 선로에 무효전력의 보상뿐만 아니라 유효전력의 보상도 가능함을 입증하였다. 이와 같은 제작과 시험을 통하여 설비의 주요소들의 정격 혹은 동작특성을 파악할 수 있으며, 축소형 설비는 물론 실계통에 적용 가능한 설비에도 적절한 제어시스템의 최적설계를 도출하고 제작하였다.

현재 본 연구는 축소형 설비를 이용하여 전기철도 급전시스템에서 활용 가능성에 대한 연구를 진행하였지만, 향후 지속적인 연구를 통하여 실계통 운영에 도움이 되는 설비로의 확장을 고려하고 있다.

## 참고문헌

1. 이장무외 (2003), “경부고속철도 서울-대구구간 전력품질 안정화대책연구 보고서”, 한국철도기술연구원
2. 이장무외 (2003), “고속철도 기존선 전철화 구간의 고조파 저감대책 용역 보고서”, 한국철도기술연구원
3. K.L.Mok, D.Sutanto, L.A. Snider, "EMTP simulation of a STATCOM using Hysteresis Control", *APSCOM 2000*, HK, Oct. 2000, 522-526
4. Clarissa Gatlan and Leonard Gatlan, "AC TO DC PWM VOLTAGE SOURCE CONVERTER UNDER HYSTERESIS CURRENT CONTROL", *ISIE'97*, Portugal, 469-473
5. D.Sutanto, L.A. Snider, K.L.Mok, "Hysteresis Control over UPFC", *APSCOM 2000*, HK, Oct. 2000, 376-379
6. 김주락외 (2003), “차세대 철도원천 기술개발(Smart-Rail 기술개발 연구보고서)” 한국철도기술연구원
7. R. E. Morrison (2000), "Power quality issues on AC traction systems," *Int. Conf. Harmonics and Quality of Power*, pp. 709-714.
8. 김주락외 (2004), “전기철도 급전시스템 전력품질 향상을 위한 새로운 보상장치 검토”, 한국철도학회 2004년 추계학술대회.
9. 김주락외 (2005), “부하불평형 해소를 위한 축소형 보상설비 개발”, 한국철도학회2005년 추계학술대회.