

회생용 인버터의 동작개시 전압 선정을 위한 현장시험 방안

김주락\*    장동욱\*    한문섭\*    김정훈\*  
 한국철도기술연구원    홍익대학교\*

A Scheme to Set up Starting Voltage of Regenerative Inverter

Joorak Kim    Dong-Uk Jang    Moonseob Han    Jung-Hoon Kim  
 Korea Railroad Research Institute    Hongik University

**Abstract** - DC transit system has been adopted in the metropolitan area, Korea since 1974. EMU in this system always reiterates that acceleration and retardation. When EMU decelerates using electric breaking, regenerative power occurs. Regenerative power can be consumed in vicinity EMU on the same line or in resistor. If DC transit system has inverter for reusing regenerative power, Energy efficiency in DC transit system will be increased. This paper present a scheme to set up the starting voltage for the developed inverter and its field test result.

1. 서 론

도시철도 직류 급전시스템에서 발생하는 회생전력은 전동차 운행중 전기제동의 사용시 발생한다. 발생한 회생전력은 동일선로의 인근 타 전동차에 공급되어 소모된다. 그러나 인근 전동차에서 소모되지 못한 에너지는 전차선 전압의 상승으로 이어져 계통 운영에 어려움을 줄 수 있다. 따라서 잉여 회생전력은 회수하여 사용하면, 에너지 사용의 효율성을 높일 수 있고 계통의 안정화에도 기여할 수 있다. 이러한 회생전력의 사용방법은 직류로 발생한 에너지를 저장하거나, 교류로 바꾸어 일반 전력계통으로 역송전 하거나 고압배전 계통에서 사용하는 것이다.

이러한 회생 전력 재활용을 위한 에너지 회생장치를 2003년부터 연구 개발에 착수하여 2007년 시작품 개발이 완료되었으며, 완료된 시작품의 성능 검증을 위하여 정상 상태 특성시험을 공장시험을 통하여 수행하였다 [1]. 공장 시험을 통하여 인버터의 입력인 직류 전압값에 따라 정상적으로 동작한다는 것을 확인하였다. 그러나 공장시험 단계에서 직류급전 모션을 모의할 수는 있었지만 전동차를 모의할 수 없어 전차선 전압의 변동에 따른 인버터 제어에 대해 모의할 수 없었다. 이를 위하여 회생용 인버터의 동작개시 전압을 변경시키며 그 효과를 살펴 볼 수 있는 시험을 수행하였다.

실계통 현장 시험은 부산교통공사의 노포기지에서 수행하였다. 시험은 사이리스터 정류시스템에서 전동차 1편성으로 수행하였으며, 정류시스템의 정전압 유지 기능 및 회생 전력의 흡수량을 고려한 동작개시 전압 선정 방안을 제시하였다.

2. 회생용 인버터 실계통 연계

최근 직류 지하철 급전시스템에 회생인버터가 적용되어진 사례가 증가하고 있다. 초퍼 제어 방식이 감소하고 대도시의 고밀도 운송구간에 회생제동을 얻기 위한 활용이 증가하고 있다. 회생인버터가 적용되어진 급전시스템의 경우 가선전압의 전압제어가 필수적이다. 전압제어의 목적은 ①에너지 제사용 및 에너지 사용량 저감, ② 브레

이크 슈 마모량 감소, ③ 변전소 전력 피크 감소 등이다. 일반적으로 회생용 인버터가 적용된 직류 전철변전소의 전압 제어 패턴은 그림 1과 같다. 그림에서 영역 1은 실리콘 정류기가 동작하는 순변환 영역(역행)이고, 영역 2는 실리콘 정류기와 회생인버터가 동시에 동작하는 영역이다. 영역 3은 회생인버터가 동작하는 역변환 영역(회생)이다. 영역 4는 회생인버터가 정전압 동작하는 영역(회생)이다. 이러한 동작 영역은 회생용 인버터의 제어 기준을 전차선 전압으로 하여 제어 한다.

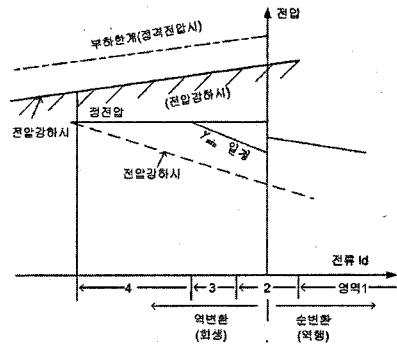


그림 1. 변전소 전압제어

2.1 사이리스터 정류 시스템 계통

국내 도시철도 직류급전시스템에서 유일하게 부산교통공사에서 채택하고 있는 사이리스터 더블컨버터 시스템은 사이리스터 컨버터의 위상제어에 의하여 견인전력을 공급하며, 정전압 제어를 병행하여 전압 강하를 최소화한다. 또 회생전력 유입으로 인한 전차선 전압 상승시에는 회생 전력을 교류로 변환하여 타 계통으로 전달하고 있다. 이때에도 물론 전차선 전압 제어하여 과도한 전차선 전압 상승을 방지하고 있다. 이외에도 전압차에 의해 인버터로 흐르는 순환전류 방지 제어를 추가 하였다.

그림 2는 사이리스터 더블컨버터 방식의 전압 제어를 보여주고 있다.

2.2 다이오드 정류 시스템 계통

부산교통공사를 제외한 국내 도시철도 운영기관은 모두 실리콘 다이오드를 이용한 정류기를 채택하고 있다. 이 공급 방식은 계통에 별도의 회생용 인버터가 적용되지 않는 한 잉여 회생 전력의 이용 및 회생 전력으로 인한 전차선 전압의 제어가 불가능하다. 그림 3은 다이오드 정류기 급전시스템에 회생용 인버터가 적용된 경우의 전압 특성을 보인 것이다. 정류기 부하전류가 감소하고, 직류 출력 전압이 E2에 근접하게 되면 인버터를 동작하

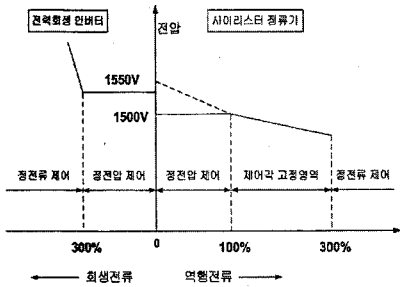


그림 2. 회생인버터의 전압-전류특성 1

게 되고 정류기와 인버터를 병렬 운전 할 수 있다. 정류기에서 회생인버터로 순환 전류가 흐르므로 초기 변환 속응성과 안정성을 향상 시킬 수 있다.

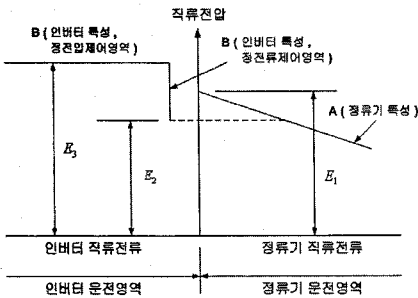


그림 3. 회생인버터의 전압-전류특성 2

### 3. 회생용 인버터의 동작 개시 전압 선정

#### 3.1 동작개시 전압 선정 방안

직류 급전시스템에서 회생 전력이 발생하게 되면 전차선 전압은 상승하게 되어 변전소의 정류기 및 차량에 탑재된 전력변환기의 장애를 일으킬 수 있다. 따라서 회생용 인버터를 적용할 때에는 전차선 전압의 과도한 상승 억제와 에너지 이용 효율을 높이기 위하여 동작개시 전압의 설정이 매우 중요하다. 동작개시 전압이란 회생용 인버터의 인버팅 개시 시점을 결정하는 요소이다. 즉, 그림 3에서 정류기 영역과 인버터 운전영역의 경계를 결정하는 전압 값이다.

특히, 동작개시 전압은 회생용 인버터가 적용될 전철 변전소에 따라 다르게 적용되어야 한다. 각 전철변전소에 따라 선로 조건, 전동차 운행 회수, 전차선 운영 전압 등에 차이가 있어 해당 전철변전소에서 발생하는 잉여 회생전력의 유입량이 다르기 때문이다. 따라서 특정 전철변전소에 회생용 인버터를 도입하기 위해서는 동작개시 전압의 최적 설정이 매우 중요하다. 동작개시 전압이 낮게 설정되면 직류 급전모선에 견인 전류가 흐를 때 인버터가 동작할 수도 있으며, 높게 설정되었다면 발생한 잉여 회생전력을 모두 흡수하지 못하게 될 수 있다. 따라서 가능하면 직류 급전 모선으로 유입되는 (회생)전류가 모두 회생용 인버터로 흡수되도록 설정하는 것이 최적 상태가 된다.

본 논문에서는 동작개시 전압의 최적 설정을 위해서 시험 평가에 의한 방법을 제안한다. 다음과 같은 절차를 통하여 인버터의 동작 개시 전압을 설정한다.

- ① 인버터 설치전 해당 전철변전소의 직류급전모선(인버터설치모선)에서의 전압, 전류 1명업일 계측
- ② 전류/전압 분석을 통한 동작개시 전압 선정
- ③ 선정된 동작개시 전압 및 인근 값으로 변경 세팅을 통한 1명업일 운전 및 계측
- ④ 회생전력량 흡수 및 순환전류 분석, 최종안 선정

#### 3.2 동작개시 전압 선정을 위한 실계통 시험

본 절에서는 본 논문에서 제시한 동작개시 전압을 선정하는 과정 중 동작개시 전압을 세팅 한 후 실계통 시험을 통하여 인버터 동작 결과를 분석하는 과정을 보인다. 실계통 시험은 부산교통공사의 노포기지 시험선로에서 그림 4와 같은 계통에서 수행하였다. 이때, 선로 운행 전동차 대수는 1대, 정류 시스템으로는 사이리스터 정류기가 단독으로 설치된 환경이다. 이때, 회생용 인버터는 450kVA 용량으로서 시험을 위해 설정한 회생용 인버터의 동작 개시 전압은 각각 1,600V, 1650V, 1660V로 설정하였다.

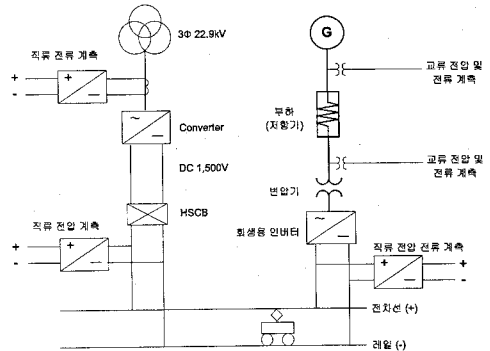


그림 4. 실계통 시험 계통도

먼저, 인버터의 동작개시 전압을 1,600V로 설정한 시험 결과가 그림 5와 6이다. 그림 5에서 보듯이 전차선 전압이 1,600V로 상승하였을 때 회생용 인버터가 1차 동작하고, 정지한 다음 재동작한 것을 알 수 있다. 이런 동작은 그림 6의 인버터 입력 전력에서 확실히 보여준다. 그러나 본 시험은 전동차 1대로 역행 가속 후 회생제동으로 감속하는 형태로 진행하였기 때문에 회생용 인버터의 1차 동작은 전동차 회생 제동 전 가속(혹은 타행)중에 이루어진 것을 알 수 있었다. 또한 부산교통공사는 전압강하를 이유로 사이리스터 위상제어를 통하여 전차선 전압을 1,600V 이하로 유지하고 있어 전차선 전압을 제어하기 때문에 역행시 전차선 전압은 1,600V를 약간 상회하는 형태를 보인다[1]. 따라서, 회생용 인버터의 동작개시 전압 1,600V는 계통상황과 어울리지 않아 잉여 회생 전력이 발생하지 않아도 동작하는 결과를 초래하여 오히려 에너지 이용이 증가할 수도 있음을 보여준다.

그림 7과 8은 동작개시 전압을 1,650V로 설정한 후 진행한 시험 결과를 보여준다. 그림 7에서 보듯이 전차선 전압이 1,650V로 상승하였을 때 회생용 인버터가 한번 동작한 것을 알 수 있다. 이런 동작은 그림 8의 인버터 입력 전력에서 확실히 보여준다. 그림 5의 동작개시 전압 1,600V일 때와 달리 역행시 회생용 인버터의 동작은 없었다. 따라서 동작개시 전압은 1,650V 인근

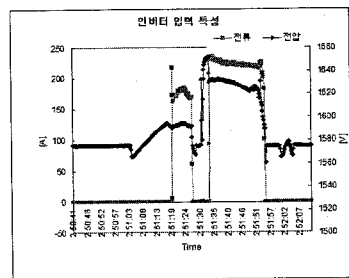


그림 5. 인버터 입력 특성 (1,600V)

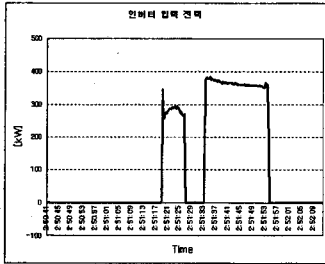


그림 6. 인버터 입력 전력 (1,600V)

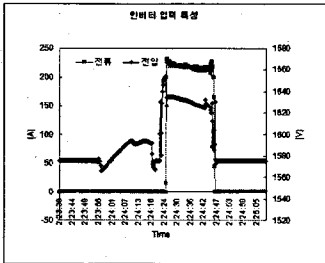


그림 7. 인버터 입력 특성 (1,650V)

값에서 설정되어야 한다. 동작개시 전압에 따른 인버터에서의 회생 전력의 흡수량을 살펴보기 위하여 동작개시 전압을 1,660V로 설정하여 동일한 시험을 수행하였다. 그림 9와 10은 이때의 인버터 입력 전압/전류 및 입력 전력을 보여준다. 그림 9와 10은 인버터의 동작 시점은 그림 7 및 8의 결과와 다르지만 동작 형태는 매우 유사함을 볼 수 있다. 이때에는 선택한 동작개시 전압에 따른 회생 전력 흡수율을 분석하여 좀 더 많은 회생 전력을 흡수할 수 있는 설정을 선택하게 된다.

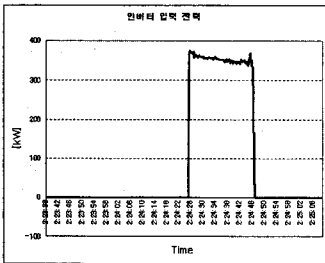


그림 8. 인버터 입력 전력 (1,600V)

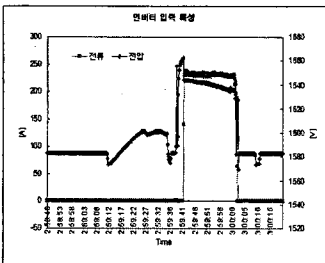


그림 9. 인버터 입력 특성 (1,660V)

표 1은 동작개시 전압 1,650V와 1,660V의 회생 전력 흡수량을 비교한 것이다. 표에서 비교한 바와 같이 최대 입력 전력도 다르고, 인버터에서 흡수한 총 회생 에너지도 차이를 알 수 있다. 따라서 동작개시 전압을

결정할 때에는 선로에서 발생한 회생 전력을 최대한 흡수할 수 있도록 선정한다.

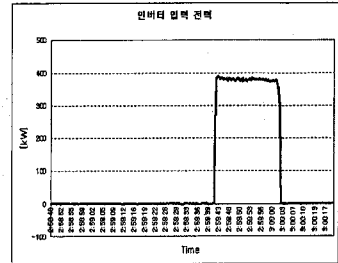


그림 10. 인버터 입력 전력 (1,600V)

표 1. 입력 전력 비교

구분		최대입력 전력	총 흡수에너지
동작개시 전압	1,650[V]	377[kW]	7,574[kWs]
	1,660[V]	391[kW]	7,820[kWs]

#### 4. 결 론

본 논문에서는 개발한 회생용 인버터의 동작개시 전압 선정방안 및 실제통 현장 시험에 대하여 제시하였다. 회생용 인버터의 동작개시 전압은 정류기와 인버터의 운전 교차점을 설정하는 전압으로서 회생용 인버터 계통 적용 시 매우 정확한 설정을 요구한다.

도시철도는 운영기관의 판단에 따라 전차선 운용전압을 상이하게 적용하고 있고 같은 운영기관이라도 각 전철변전소에 따라 회생 전력의 발생량이 다르기 때문에 동작개시 전압의 설정 또한 달라져야 한다. 따라서 회생용 인버터 적용전에 해당 전철변전소 상황에 적절한 동작개시 전압이 설정되어야 한다. 이에 대한 방안으로 본 논문에서는 시험 평가 방법에 의한 방법을 제안하였으며, 부산교통공사의 실제통에서 전동차를 이용한 시험 결과를 제시하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부 국가교통핵심기술개발사업의 연구비지원(O3교통핵심D01)에 의해 수행되었습니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 한국철도기술연구원, '차세대 전철시스템 에너지회생장치 개발' 4차년도 보고서, 2008, 국토해양부.
- [2] 김주락, 한문섭, 김용기, 김정훈, "직류급전시스템 회생용 인버터의 시험설비 구축 및 특성시험", 한국철도학회 춘계 학술대회논문집, 2008
- [3] 김용기, 김주락, 한문섭, 김준구, 양영철, "DC전철구간의 회생인버터시스템 개발", 한국철도학회 춘계 학술대회논문집, 2008
- [4] 조용상, 박기원, 권명기, 박창주, '능동전력필터의 현장 적용 보고', 포스콘, 2002
- [5] 김경원, 서영민, 홍순찬, "회생전력 제어용 인버터 시스템의 구현에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, 제 7권, 제 2호, 2002