

직류 급전시스템 성능검증을 위한 시험방안 분석

An analysis of tests process for verification of DC Traction system performance

정호성* 한문섭** 장동욱*** 이기원****
Hosung Jung Moonseob Han Donguk Jang Kiwon Lee

ABSTRACT

DC substation of urban transit supplies a suitable DC power on electricity vehicles by being supplied from KEPCO. DC substation is verified electrical safety of system through pre-operation inspection on electrical installations to be supplied power from KEPCO. However, because test items and method for DC traction system are unprepared on pre-operation inspection, the general safety and performance verification of DC traction system are very insufficient.

Therefore this paper analyze the overseas test examples such as factory equipment tests, factory combined tests and railway tests for the safety and performance verification of DC traction system and present a suitable test items and test standard in domestic.

1. 서 론

국내의 도시철도 직류 변전소는 한국전력공사에서 전력을 공급받아 전기차량에 적합한 직류전압으로 변환하여 전력을 공급하는 설비로 구성되어 있다. 한국전력공사로부터 전력을 공급받기 위해서는 시공 후 사용전 검사를 통해 시스템의 안전성을 검증받는다. 하지만 사용전 검사에서도 실질적으로 전기차량에 전력을 공급하고 있는 직류 급전시스템에 대한 시험항목 및 방법이 미비하여 직류 급전시스템의 전반적인 안전성 및 성능 검증이 부족한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 직류 급전설비에 대한 안전성 및 성능 검증을 위해 해외에서 수행되고 있는 공장시험, 공장연계시험 및 현장시험에 대한 사례를 분석하고 국내에 적합한 성능시험항목 및 시험기준 방안을 제시한다.

2. 성능요구사항

2.1 변전소 성능요구사항

직류 변전소의 전력기기는 공칭, 과도 및 서지전압에 대한 견딜 수 있어야 하며 정격부하 및 단시간 과부하에 대해서도 전류를 공급할 수 있는 성능 및 이에 따른 요구사항을 갖춰야 한다.

가공 전차선의 공칭 공급전압이 직류 1,500V 인 시스템의 경우 공급전압은 차량 부하에 따라 변화하며 차량 전압은 직류 1000V ~ 1800V 범위에 있어야 한다. 또한 차량부하의 일시적인 증가로 인한 전압강하와 회생제동 등으로 인한 전압상승이 발생할 수 있으므로 설계전압은 일반적인 공급전압범위보다

* 한국철도기술연구원 전기신호연구본부 선임연구원, 정회원

E-mail : hsjung@krri.re.kr

TEL : (031)460-5116 FAX : (031)460-5459

** 한국철도기술연구원 전기신호연구본부 책임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 전기신호연구본부 선임연구원, 정회원

**** 한국철도기술연구원 전기신호연구본부 선임연구원, 정회원

크게 설계되어야 하며 900V ~ 1950V 범위를 유지해야 하며, 공급전압에 대한 범위는 IEC 60850 에 제시되어 있다. 그리고 차량의 노치 변경, 직류 고속도차단기의 동작 및 낙뢰 등으로부터 유입되는 서지전압에 대해서도 견딜 수 있도록 설계되어야 하며 일반적으로 서지 정격전압은 $\pm 5kV$ 정도이다.

표 1. 직류 1,500V 공급전압

| 전압 | Vmin2 | Vmin1 | Vn | Vmax1 | Vmax2 |
|--|-------|-------|------|-------|-------|
| DC (평균값) | - | 1000 | 1500 | 1800 | 1950 |
| ※ Vn (공칭 전압) : 시스템의 설계값 Vmax1 (지속성 최고 전압) : 무한정 지속될 것으로 예상되는 전압의 최고값 Vmax2 (비지속성 최고 전압) : 지속시간이 5min 이하로 예상되는 전압의 최고값 Vmin1 (지속성 최저 전압) : 무한정 지속될 것으로 예상되는 전압의 최저값 Vmin2 (비지속성 최저 전압) : 지속시간이 10min 이하로 예상되는 전압의 최저값 | | | | | |

고장전류의 최대값은 변전소의 직류 모선에 설비 구성에 따라 결정되고, 각 직류급전회로의 차단기는 근거리 고장과 원거리 고장으로 인한 전류를 차단할 수 있어야 하며, 고장전류의 차단을 위해서 순시 과전류 계전기와 한시 과전류 계전기가 쓰이고 있다. 직류 1,500V 철도에서 차단기의 설정 예로 순시 과전류의 차단은 10kA, 시간 지연 과전류 차단은 3kA로 설정되며 이러한 차단기가 보호 성능은 차단시험에 포함되어야 한다. 또한 직류 변전소에서는 운행 중인 모든 차량이 요구하는 부하전류를 공급할 수 있어야 하는데, 차량 부하량의 최대값은 공급전원의 용량보다 적어야 하고, 부하전류의 최대크기와 변전소 차단기의 차단 설정은 변전소로부터의 부하전류 시뮬레이션 등을 통하여 적절히 조정함으로써 차단기의 오동작이 없도록 해야 한다.

직류 급전회로에서는 교류를 다이오드 정류기를 이용하여 직류를 얻을 수 있는데 이때 전압 리플이 발생한다. 이러한 고조파 주파수는 정류기 펄스 수에 따라 결정되며, 60Hz, 12 펄스 정류기는 720Hz의 리플을 만들어내고, 24펄스 정류기는 1440Hz의 리플을 만들어낸다. 전압 리플의 진폭은 부하 전류에 따라 다르며 전압 리플의 측정은 리플 주파수와 신호장치의 주파수에서 진폭을 결정하기 위해 수행된다.

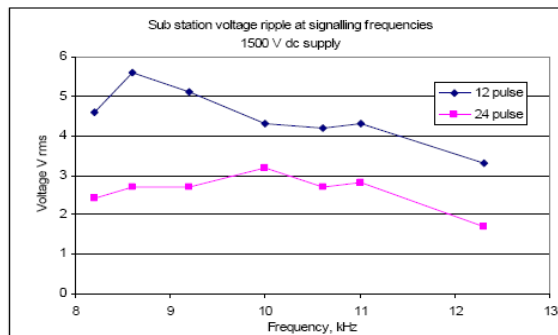


그림 1. 직류 변전소에서의 전압리플 측정사례

차단기의 차단 동작으로 대규모의 교류와 직류가 흐르게 되며, 이로 인해 전자기를 방출하게 된다. 이러한 전자기 방출에 대해서 국제표준인 EN50121-5에서 방사되는 RFI의 측정 방법을 기술하고, 9kHz ~ 1GHz의 주파수 범위에서 전자기장에 한계를 설정하고 있다. 또한, 인체에 대하여 허용되는 직류 자기장에 대한 한계가 있는데, 이 모든 측정은 변전소에 전기가 공급되고 차량이 운행되는 경계로부터 3m의 거리에서 이루어져야 한다.

2.2 전차선로 성능요구사항

전차선의 전기적 특성은 전압강하를 최소화하여야 하며, 대기온도 이상에서 설정된 최대 허용온도에서 견딜 수 있어야 한다. 또한 전차선과 팬터그래프간의 이선으로 인한 방전은 운행 중에 각 방전된 부

분과 각 방전의 누적 시간을 종합적으로 측정해야 한다. 이는 전차선의 위치와 인장 등에 대한 허용오차, 팬터그래프의 동적인 움직임 및 대기조건 등과 같은 방전을 생성할 수 있는 악조건을 고려하는 것이다.

또한 전차선과 팬터그래프간에 접촉 불량은 방전을 유발하고 그에 따라 복사되는 RFI를 생성한다. 이에 대한 국제표준으로 EN50121-2에 정의되어 있으며, 방사되는 RFI의 측정방법과 9kHz ~ 1GHz의 주파수 범위에서 전자기장에 대한 한계를 설정하고 있다.

2.3 귀선 성능요구사항

귀선레일은 대지로 흐르는 표류전류를 최소화하기 위해 대지로부터 절연되어야 하며, 일부 철도는 접지와 직류변전소의 음극 사이에 다이오드 등을 설치하여 전류의 누설을 막는 시스템을 도입하고 있다.

인접선로의 귀선레일을 연결하여 공용으로 사용하는 경우에는 차량으로부터 귀로되는 전류가 모든 병렬 선로로 흐르게 되어 있어 귀선 임피던스를 감소하여 전압 강하를 감소시킬 수 있다. 하지만 고장전류가 모든 인접선로로 분산되는 문제와 귀선 레일의 회로가 단선되는 경우 선로 신호회로 영향을 미칠 수 있어 차량 및 신호시스템과의 영향을 고려해야만 한다.

귀선레일의 공유는 IEC 62128-1에서 제시한 전압크기에 대한 인체에 허용되는 전류의 노출을 기준으로 접근 및 접촉 전위의 한계값 이내로 설계 되어야 한다. 이 기준에서는 차량 자체의 전위가 레일 전위보다 높을 수 있다는 것을 의미하며 이는 인체가 차량이나 인접한 접지 물체에 접촉하는 지를 반드시 고려해야 한다. 이 기준에서는 짧은 과도현상 및 일시적인 상황에 따라 시간에 따라 전압 크기를 제시하고 있으며, 또한 영구적인 조건에서는 신체접촉전압의 한계가 60V이어야 하는 작업장 또는 이와 유사한 장소를 제외하고는 120V를 초과해서는 안 되도록 되어 있다.

3. 시험

3.1 공장 시험

직류 급전시스템에 사용되는 각 기기들은 설치되기 전에 각 기기별 요구되는 정격전압, 공칭전류, 과전압 전류, 파형, EMC 시험 등을 하게 된다. 정류기용 변압기, 다이오드 정류기 등의 공장시험은 IEC 76과 IEC 146의 규격에 따라 전압 및 전류 요건과 관련된 공장시험을 수행한다. 정류기용 변압기의 경우 1차 및 2차의 권선에 1분간 95kV, 10kV, 1kV의 내전압을 가하여 해당용도에 적합한지 시험 하는 것이고 다이오드 정류기의 경우는 다이오드에 흐르는 전류와 전류의 흐름에 따라 상승하는 온도를 측정하기 위한 순방향 전류시험, 역전압의 용량을 확인하기 위한 역전압시험, 도전부와 프레임 간에 절연저항 측정, 공칭전류의 150% 부하에서 다이오드 전류 균형시험, 보호회로를 위한 서지 시험 등을 하게 된다. 그 외에도 부하 상태에서의 소실 및 권선의 온도상승, 소음 정도 등의 시험을 할 수 있다.

EMC 시험을 필요로 하는 기기로는 보조 전원공급장치의 제어반, 직류개폐기의 제어반, 다이오드 정류기의 계전기의 감시 및 보호와 배터리 등이 있다. 이들 각 장치의 특성은 개별적으로 시험할 수 있는데 변전소와 서브시스템에 적용할 수 있는 표준서에 기술된 EMI 시험내용은 노출 포트, 신호 및 제어 포트, 배터리 및 전원 포트 별로 다르게 규정 하고 있다. 특히 이 면역력 시험은 변전소 내에서 이동통신 장비의 사용여부를 고려해야 하고 통신장비의 사용주파수와 자계 강도를 반드시 확인하고 해당 값에 따라 시험이 수행 되도록 해야 한다.

3.2 공장 연계 시험

공장연계시험은 시험장소에서 사용 가능한 전원에 따라 장치가 조립되는 공장이나 실험실에서 수행될 수 있는데 이 시험은 개방회로시험, 부하시험, 손실측정 및 단락시험 등을 수행해야 한다. 개방회로시험은 회로 내 중요 지점의 전압 파형과 정격 여부를 확인하는 시험으로 변압기와 정류기가 직렬로 연결되고 공칭 전압 상태에서 무부하로 수행되고 이후 전원이 없는 상태에서 시험한다. 이는 변압기 권선 전압, 직류 출력 전압 및 다이오드의 역전압 등의 측정할 수 있으며 전압이 꺼지거나 켜질 때, 임펄스 전압을 측정하여 보호회로에 의한 전압 보호를 비교할 수 있다.

부하시험은 중요 지점의 온도를 기록하고 공기흐름을 감시하는 것으로 부하가 변압기와 정류기에 직렬로 연결된 상태에서 수행되며 권선 온도, 외함 온도 및 다이오드 열 싱크 온도 등을 측정할 수 있다.

손실 측정은 변압기 정류기의 효율성과 역률을 결정하는 것이며, 단락시험은 공장 또는 변압기, 다이오드 정류기 및 직류 회로차단기 등이 설치된 지역에서 수행할 수 있다. 이 시험의 목적은 다이오드 정류기가 다이오드 접점 온도가 급상승하도록 하는 단락 전류 등에 영향을 주어 다이오드 정류기의 만족스러운 성능을 확인하는 것으로 직류 회로 차단기에 의해 장애가 제거될 때까지 단락 전류를 견디는 장비의 용량과 동작치 설정 및 중요 접점을 확인해야 한다.

3.3 현장 시험

직류 변전소에서의 현장시험으로는 단락시험, EMI 시험, 접촉전위시험, 표류전류시험 등이 있다. 단락 시험은 단락고장이 발생했을 경우에 고장을 신속히 검출하고 고장확대를 방지하여 전력설비를 보호하기 위한 시험으로 근거리 단락회로나 원거리 단락회로에 대한 보호시스템의 동작을 확인하는 시험이다. 또한 이 시험을 수행하는 동안에 직류자기장, RFI 방출, 접촉전위 및 표류전류 등을 측정할 수 있다. 직류 급전방식의 경우 급전전압의 크기가 작고 고저항 지락고장이나 고장위치가 변전소의 위치보다 멀리 떨어져 있는 경우 고장전류의 크기가 작으므로 부하전류와 고장전류의 구별이 어렵기 때문에 이 시험을 통해 근거리고장이나 원거리 고장에 대하여 전류 증가율 및 동작값에 대한 세부 정보를 제공한다. 이 값은 설계값과 비교되어야 하고 최대 부하전류에 의해 조정되어야 하며 차량부하로 급증으로 인해 오동작을 없도록 해야 한다.

변전소에서 수행되는 EMI 시험은 철도 구역이나 외부에서 들어올 수 있는 자기장과 RFI 방출을 고려하여야 하는 시험으로 전자파로 영향을 받기 쉬운 장치와의 적합성을 입증해야 하고 인체에 대한 노출 정도를 최소화해야 한다. 이 방사 수준은 철도용 설비 및 외부 소유장비에 대해 구분해야 하는데 경계 펜스로부터 3m 거리에서 노출정도는 인체에 대하여 권고하는 노출수준을 초과하지 않아야 한다. 표준규격 EN50121-2에서는 변전소 펜스 3m 거리에서 자기장은 정격하중의 50A/m을 초과하지 않고 과부하나 단락에서 500A/m을 초과하지 않도록 규정하고 있지만 이 표준은 직류장치로부터 1m 거리에서 1000A/m의 값을 언급하고 있으며 또 단락조건에서 10배의 증가도 가능하다고 말하고 있다. 이와 같이 직류설비와 근접한 측정을 수행할 때에는 설비 위치와 모선 및 선로에 연결된 급전케이블의 경로들을 결정해야 하고, 자기장을 왜곡할 수 있는 캐비닛 같은 강자성체를 고려해야 한다.

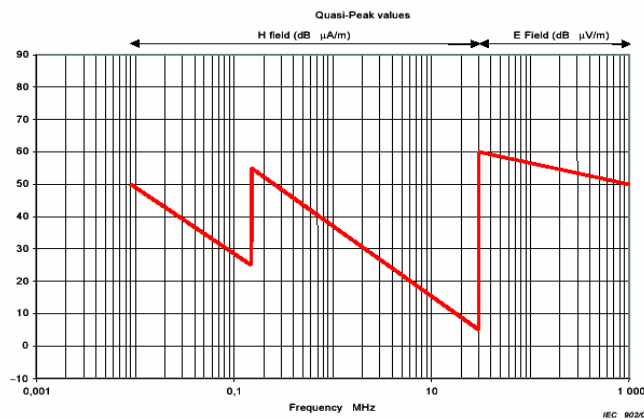


그림 2. 방사성 잡음 제한값

접촉전위시험은 단락 중에 접촉전위가 표준 IEC 62128-1에서 규정하는 수치를 초과하지 않는다는 것을 측정하는 시험이다. 이 측정은 레일 간에서 수행되며 고장전류의 흐름은 접지된 장치로 인해 접지 전위보다 높은 전위에 있게 된다. 이는 설비의 등전위 접지모선 이거나 금속 접지 물체일 수 있는데 전압은 시간 변화에 따른 파형을 최대값과 함께 기록하게 된다.

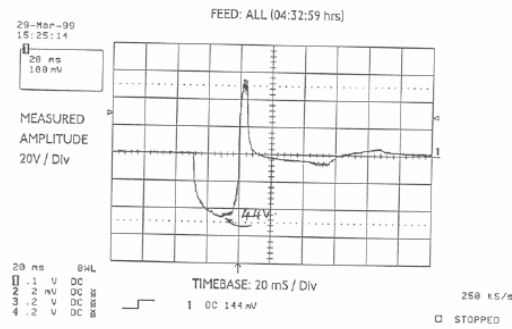


그림 3. 레일전위 측정사례

표류전류시험은 귀선레일로부터 전류가 대지로 누출되는 정도를 시험하는 것으로 귀선 레일에 의한 직류 전류는 레일전위를 접지전류 이상으로 증가시키는데 이는 레일이 접지로부터 절연되어 있다 하더라도 누출 경로는 항상 존재하며 주의 환경에 따라 매우 가변적이다. 표준 IEC 62128-2은 레일-접지의 변화정도를 0.01 ~ 10 Siemens/km로 권고하고 있다. 변전소의 위치와 변전소간의 간격은 레일상의 직류 전압의 크기를 결정하게 되는데 이러한 레일전압의 크기에 따라 표류전류를 결정될 수 있으며 특히 변전소에서 고장이 발생하는 경우에 레일 전압은 표류부하 전류를 증가시키게 되고 이러한 전류의 측정은 접지모선과 접지매트에서 측정할 수 있다. 특히 이 시험의 측정은 변압기와 같은 철도 시설, 접지와 연결된 금속파이프 라인, 인접 레일 등의 직류 전류 제한값과 비교되어야 한다.

4. 국내 적용방안

국내 직류급전시스템의 주요 각 구성품 자체의 성능과 다른 구성품과의 인터페이스 그리고 차량, 신호 등의 타 분야의 설비와의 안정적인 성능을 검증하기 위해 크게 전철전력설비 구성품 설치 전후와 전력가압 전후 및 차량운행 시의 시험으로 구분하여 수행되어야 한다.

해외에서 수행되고 있는 공장시험은 구성품 자체의 성능 및 안전성을 확인하는 시험으로 정류기용 변압기, 정류기, 직류배전반 등의 자체적인 성능을 검증할 수 있다. 국내의 경우에는 각 설비별로 국제 규격에 따른 공인기관 시험을 마친 설비를 요구하고 있으며 이에 따라 제작사는 설비를 제작하고 납품하고 있으며 설비의 설치에 관련된 검증은 발주기관, 시행사 및 감리사에서 확인하고 있다.

공장연계시험은 각 설비간의 인터페이스를 확인하는 시험으로 국내에서는 정류기용 변압기와 정류기간의 인터페이스 시험을 수행하고 있으며, 각 설비의 EMI 성능을 검증하고 있다. 또한 전력을 가압하기 전에 원격제어감시장치와 각 설비별의 연동시험, 전차선로 설비의 설치확인 시험 및 내가압시험 등을 발주기관, 시행사 및 감리사에서 확인하고 있다.

현장시험은 각 설비가 현장에 설치된 후에 성능 및 안정성을 시험이다. 단락시험으로 경우에는 근거리고장 및 원거리고장에 따른 각 정류기 정류소자 양단 전압, 보호계전기 및 차단기의 동작상태 확인, 단락회로가 제거된 상태에서 정상복귀 동작상태, EMI 측정, 레일과 대지간의 접촉전압 및 표류전류 등을 확인할 수 있다. 하지만 현장에서 단락시험을 수행하는 경우에는 일부 전력설비에 전기적인 충격을 미칠 수 있다.

차량 운행에 따른 직류 급전시스템의 전기적인 성능 및 안전성을 확인하기 위해서는 전차선로 집전성능평가 시험, 전철변전소 특성시험, 레일전위측정시험 및 전철변전소 EMI시험을 수행해야 한다.

전차선로 집전성능시험에서는 팬터그래프와 전차선간의 이선상태와 전차선의 편위 및 높이를 확인하는 것으로 열차를 최고운영속도까지 운행하며 비디오 모니터링 방법을 이용하여 원활한 집전성능을 유지하는지 및 이선 상태를 측정하는 시험이다. 전철변전소 특성시험은 차량부하에 운행 상태에서 전철변전소 급전선 전압과 전류, 차량의 수전전압과 전류, 전철변전소 수전단에서의 전압 왜형률 및 역률, 수전계통의 전압강하 그리고 보호계전기의 동작 여부를 확인하는 것으로 변전소 구간내에 1개 부하 및 최대 부하 운행시의 변전소의 특성을 확인하는 시험이다. 레일전위측정시험은 차량운행 중에 레일전위 상승이 최대도로 상승할 것을 예측되는 지점 및 외부에서 접근이 가능하여 레일전압으로부터 위험이 야기되

는 지점에서 상승되는 전압이 IEC 62128-1에서 규정된 조건을 만족하는지를 확인하다. 전철변전소 EMI 시험은 도시철도차량에 전력을 공급하는 전력시스템 운영에 따른 전자유도간섭 수준을 측정하는 시험으로 변전소에 부하가 있는 상황에서 변전소 내부의 전력기기에서 방출되는 전자파가 인체 및 주변 환경에 미치는 영향을 확인하기 위한 방사성 유도장애 시험과 변전소 및 전력기기에 부하가 있는 상황에서 발생하는 자기장의 크기가 인체에 미치는 영향을 확인하는 자기장 강도시험이 있다.

국내의 경우에는 직류변전소의 전력설비의 자체 시험 및 설비간 연계시험은 발주사의 요구사항에 따라 제작사에서 수행되고 있으며 가압을 위해서는 전력설비의 설치검사 등 사용전 검사를 통해 안전성을 확인하고 있다. 하지만 차량부하시험의 경우에 일부 시험항목에 대해서는 수행되고 있지만 전체적인 직류급전변전소의

5. 결 론

본 논문에서는 국내의 도시철도 직류 변전소의 성능 및 안전성을 확인하기 위해 해외 사례를 바탕으로 국내에 시험항목 등을 제시하였다. 해외에서는 변전소, 전차선로, 귀선레일의 성능요구사항을 제시하고 이에 따라 전력 설비의 공장시험과 설비간의 공장연계시험 및 현장시험이 수행하고 있음을 확인할 수 있었다. 국내의 경우에도 발주사의 요구사항에 따라 설비 제작사에서 설비를 제작하고 공인기관 시험을 획득하고 있으며 설비의 현장설치 및 설비간의 연동시험 등은 시공사와 감리사에 의해 확인되고 있다. 또한 전기를 공급받기 위해 사용전 검사를 통해 직류 변전소의 전기적인 안정성을 검사하고 이에 따라 전력을 수전 받고 있다. 이와 같이 차량 운행 전의 전기설비의 안전 측면에서는 다양한 시험 및 검사가 이뤄지고 있으나 해외 사례에서 볼 수 있듯이 차량 운행에 따른 직류 급전시스템의 성능 및 안정성에 대한 검사 및 시험 등은 미비한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 직류 급전시스템의 성능 및 안전성을 검증하기 위해 단락시험, 전차선로 집전 성능평가 시험, 전철변전소 특성시험, 레일전위측정시험 및 전철변전소 EMI시험에 대해 측정항목 및 방법과 관련된 기준 등을 제시하였다. 현장에서는 이러한 시험항목에 따라 구체적인 시험방법 및 절차를 수립하고 시험결과에 따라 직류 급전시스템의 성능 및 안전성을 검증해야만 한다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 도시철도표준화2단계연구개발사업의 연구비지원(07도시철도표준화A01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. 한국철도기술연구원(2007), “도시철도 전력시스템 표준화 연구”, 한국철도기술연구원
2. 한국표준협회(2006), “KS C IEC 62128-1 철도용 고정설비-제1부 : 전기 안전 및 접지에 관련된 보호 조치”
3. Chien-Hsing Lee, Chien-Jung Lu(2006), “Assessment of Grounding Schemes on Rail Potential and Stray Currents in a DC Transit System”, IEEE Transactions on power delivery
4. Keith Griffiths(2006), “Stray Current Control—an application of Ohm's law”, EMC in Railways