

전기철도 전차선과 판토틀래프 이선에 대한 연구

신승철*, 김재철*, 한성호**, 이수길**
 *숭실대학교, **한국철도기술연구원

A Study on De-wiring at Electric Railway Trolley wire and Pantograph

Seung-Chul Shin*, Jae-Chul Kim*, Seong-Ho Han**, Su-Gil Lee**
 *Soongsil university, **Korea Railroad Research Institute

Abstract - At this study, one of the electrical problems, arc characteristics according to loss of contact between a pantograph and a catenary, was analyzed. A characteristic of arc current is disappeared in a short period of time. Nevertheless, it has large current same as a surge, so that it has EMI/EMC problems. In the case of the electrical railway system, there is oscillation and de-wiring. The arc current is generated by these problems. The result of this study can be used as a facility design to prevent a surge and needs to prove through actual field data in the main circuit of an electric train for a precise analysis about effect of arc.

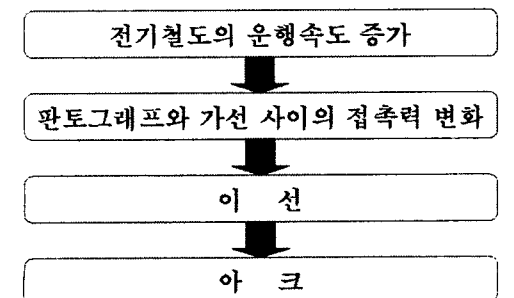
1. 서 론

철도의 구동 방법이 디젤 기관에서 전기로 바뀌면서 기존에는 문제되지 않았던 여러 가지 전기적인 문제들이 발생하고 있다. 전차 내부의 전력 품질 문제가 이 중 하나이다. 저 품질의 전력이 전차 내부로 들어오면 고조파·전파파를 발생시키게 되고, 또한 시스템의 전력변환장치에 손상을 줄 수 있다. 본 논문에서는 전력 품질을 저하시키는 요인 중 하나인 판토틀래프와 전차선 사이가 이선될 때 발생하는 아크에 대하여 분석하고, 이선의 원인에 대하여 조사하고 그 영향을 분석하였다.

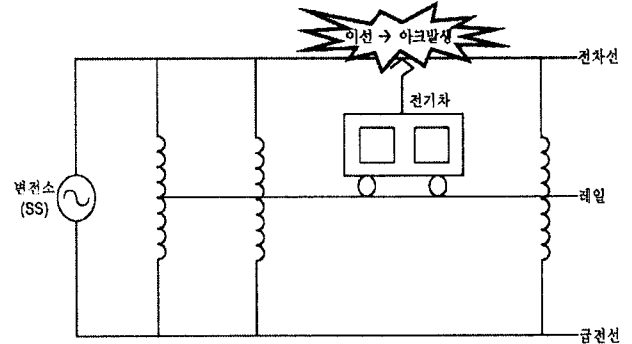
2. 본 론

2.1 판토틀래프에서의 아크 발생원인

전기철도 집전 시스템은 전기를 공급하는 가선(catenary)과 전력을 공급받는 장치인 판토틀래프(pantograph)로 구성된다. 전기철도의 고속화에 따라 수반되는 문제 중의 하나는 안정된 집전능력의 확보에 있다. 판토틀래프는 차량 주행 중 급전선과 미끄럼 운동을 하면서 차량에 안정적인 전기에너지를 공급해야 한다. 차량의 주행 중 주행륜과 주행면, 안내륜과 안내레일 사이에는 갖가지 진동이 발생하여 집전장치와 급전선은 초기의 정적인 접촉조건을 유지할 수 없게 된다. 가선과 판토틀래프가 순간적으로 접촉을 상실하는 이선현상이 증가하면, 집전슈의 마모를 촉진시켜 유지보수 비용이 증대되고 차량의 고장 및 이상발생의 원인으로 작용할 수 있다. 이선현상을 감소시키기 위해 집전장치와 급전선 사이의 접촉력을 과대하게 증대하면, 이선현상을 감소시킬 수는 있지만 집전슈의 마찰마모가 증대하게 된다. 즉, 전기철도의 속도 성능향상은 판토틀래프 시스템이 고속에서도 안정된 집전능력을 갖추어야 하는 문제 해결이 선행되어야 가능해진다. 전기철도의 운행 속도가 증가함에 따라 판토틀래프와 가선에서의 진동도 증가하게 된다. 그 결과 판토틀래프와 가선 사이의 접촉력 변화가 커지고, 결국 이선과 그에 따른 아크, 가선과 판토틀래프 집전편의 손상이 발생한다. 이런 현상은 결국 전기철도의 고속화에 어려움을 발생시킨다.



<그림 1> 전기철도 전차선에서 아크가 발생하기까지의 과정



<그림 2> 전기철도 전차선에서 발생하는 이선

2.2 판토틀래프의 이선 특성

전차선은 판토틀래프의 진행에 따라 압상하게 되는데 지지점 부근은 조가선이 고정되어 있고, 각종 굽구류들로 인하여 경점이 되므로 압상력이 작은 반면, 지지점간의 중앙 부근은 압상력이 크다. 이 때문에 판토틀래프는 진행하면서 상하 운동을 파상적으로 반복하게 된다. 속도가 높아짐에 따라 공기역학적으로 전차선의 압상력은 증대하지만 일정한 한계속도에 도달하면 압상력은 포화되고 그 이상의 속도에서는 판토틀래프가 전차선과 슬립하는 것이 곤란하게 되며, 이어서 이선이 발생한다.

이선의 종류에는 소이선, 중이선, 대이선이 있다. 소이선은 이선 시간이 수심 분의 1초 정도인 것으로 판토틀래프 슬립편의 미세 진동에 의한 것이다. 중이선은 이선 시간이 수분의 1초 정도인 것으로 판토틀래프가 전차선의 경점 등에 의한 충격으로 발생된다. 대이선은 전차선의 경점 또는 연결에 의해 일어나는 것으로 보통 1~2초 정도이다. 전차선이 지지점을 통과한 직후에 판토틀래프 전체가 도약되어 생기는 현상이다.

이선 개소의 시점부 및 종단부는 아크 및 충격에 의해 국부적으로 전차선의 마모가 촉진되고 결과적으로 단선 발생 가능성이 높아진다. 또한 이선이 크게 되면 운전용 전력을 집전할 수 없게 된다. 이선이 격심하면 전기차량의 주전동기나 보폭기류 설비에 의해 파괴되기 쉬우며, 무선 잡음 장애를 발생한다.

2.3 이선을 및 이선 특성

가선-집전장치 간 이선특성을 평가하는 방법은 유럽 EN규격/UIC의 경우에 2가지 평가방법을 선택적 기준으로 규정하고 있다. 그 첫째는 열차의 속도대역별로 측정된 가선과 집전장치 간 평균접촉력(Fmean)과 접촉력 표준편차의 3배 즉, 3σ의 차이가 각 속도대역 기준 값보다 작아진 시간의 총합(Σloss_contact)을 열차의 총주행시간(Σt_Run)으로 나눈 값이 1% 이하이면 양호한 것으로 평가하는 방법이며, 두 번째는 첫 번째 방법처럼 집전장치와 가선 간 접촉력 측정이 기술적으로 어려울 경우 열차주행 중 발생한 전기적 아크(Arc)를 측정하되, 집전전류 값이 정격전류의 30% 이상인 구간에서 10ms 이상 지속된 아크만을 카운트하여 아크 지속시간의 총합(Σt_Arc)을 열차의 총주행시간(Σt_Run)으로 나눈 백분율이 1% 이하일 경우 허용 가능한 이선율로 평가하는 방법을 규정하고 있다. <표 1>에서와 같이, 한국형 고속열차의 이선특성 평가는 EN규격의 첫 번째 방법을 적용하였고 350km/h 속도에서 측정된 접촉력을 통해 분석하여 Fmean(평균접촉력)과 σ(즉, 3x표준편차)의 차이는 154.7N인 것으로 분석되었다. 또한, 고속열차 집전성능 관련 유럽 기준인 ENUIC Code794에서 집전품질 평가기준을 볼 때, EN 규격의 집전품질 평가기준은 Fmean-3σ>0(Positive)이나, SNCF와 스페인 고속열차(RENFE)가 230kph<V≤300kph 범위에 적용하는 더 엄

격한 기준인 (Fmean- 3*σ>40N)을 적용하더라도 한국형 고속열차는 352km/h최고속도까지 주행 시에도 집전품질 또는 이선훈성에 있어서 유럽의 EN 및 UIC 기준에 적합한 양호한 집전 특성을 갖춘 것으로 평가되었다.

〈표 1〉 집전특성 항목별 측정분석 결과

| 항목 열차속도 | 평균 접촉력 (Fc_mean) | 순간 최대접촉력 (Fc_max) | 순간 최소접촉력 (Fc_min) | 이선 특성 (Fmean3*σ) | 평가 결과 |
|-------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|----------|
| 349-352 (km/h) | 198.9 N | 275.6 N | 165.7 N | 154.7 N | 양 호 |

가선(Catenary)으로부터 전기에너지를 공급받아 열차의 추진 동력 원으로 이용하는 전기철도 시스템은 집전장치(Pantograph)가 전차선과 접촉, 주행할 때 이선(Loss of Contact)을 최소화하며 안정적으로 가선을 추종 접촉하면서, 얼마나 양호한 집전품질(Current Collection Criterion)을 유지하는가에 따라 전기철도시스템의 건인·제동력 등 주행성능을 절대적으로 좌우하게 된다. 최고 운행속도가 80~120km/h인 전통차나 다른 저속의 전기철도시스템에 비해 200km/h 이상 350km/h까지 빠른 속도로 주행하는 고속철도시스템의 경우, 집전품질은 열차 주행성능을 훨씬 더 크게 좌우하게 된다. 따라서 한국형 고속전철을 개발하는 데 있어 이선 현상을 통해 발생하는 아크를 파악하고, 아크가 지나는 전압·전류 데이터를 계속하여 이를 사전에 방지하는 일이 매우 중요하다.

2.4 이선 방지 대책

이선은 다음의 식으로 표시되는데, 고속운전을 위해서는 이선율이 1% 이하여야 한다. 이선율을 최대한 낮추기 위해서는 다음의 세 가지 요소를 고려하여 전차선로를 시공하여야 한다.

$$\text{이선율} = \frac{\text{이선시간}}{\text{질운전시간}} \times 100[\%]$$

① 전차선의 높이가 일정하여야 한다.

전차선에 고저차가 있거나 전차선의 구배 변환점에서는 판토틀라프가 관성 때문에 도약 현상을 일으켜 이선이 생기기 쉽다. 따라서 전차선은 가급적 수평으로 가설할 필요가 있다.

② 전차선에 부분적인 동요가 없어야 한다.

전차선의 접속개소나 곡선당김장치, 진동방지장치 등의 가선 철물류를 붙인 개소는 다른 부분에 비하여 전차선의 부분적 하중이 증가하여 차량이 이 곳을 통과할 때 판토틀라프가 전차선으로부터 받은 충격으로 약간 하강하였다가 다시 복귀될 때까지 이선 현상이 일어난다. 전차선의 탄성이 전구간에 걸쳐 균일해야 이선이 적게 일어난다는 것이다.

③ 전차선의 장력이 항상 일정해야 한다.

전차선은 온도 변화에 따라 신축하여 결과적으로 전차선 높이에 고저차가 발생할 수 있다. 전차선에 장력을 주지 않으면 전차선의 강성은 대단히 약해지고 장력을 크게 하면 전차선이 끊어질 위험이 있으므로 이러한 점을 고려하여 전차선의 장력을 결정하고 자동장력조정장치로 항상 일정한 장력을 유지할 필요가 있다.

2.5 아크가 전기철도 주회로 시스템에 미치는 영향

전기철도 선로에서 발생하는 아크가 시스템에 미치는 영향으로 차량 내부 기기의 수명 저하, 고조파 및 전자파 발생 등이 있다.

① 주회로 시스템 내부 기기의 수명 저하

아크전압은 dv/dt가 매우 큰 썬지성 형태를 띤다. 또한, 전기철도 차량의 주변변환 장치는 컨버터, 인버터와 같은 전력전자 소자로 구성되어 있으며, 이는 전력 품질에 민감하다. 따라서 아크 발생으로 인한 썬지성 전압이 차량 내부로 유입될 경우, 주변변환 장치 소자의 절연 내력에 영향을 미칠 수 있으며, 특히 전차선과 이선에 따라 발생하는 아크의 경우 반복적으로 발생할 수 있는 소지가 많기 때문에 그 영향이 심각한 것이 예상된다.

② 고조파 발생

고조파는 기본 주파수의 정수배 차수의 주파수를 갖는 정현파 성분을 말한다. 고조파가 전기철도 시스템에 미치는 영향은 다음과 같다. 첫째, 고조파가 포함된 부하 손실이 증가한다. 따라서 변압기의 용량 검토시 고조파 전류의 유무 및 크기 등이 사전에 충분히 검토되어야 한다. 둘째, 고조파 전류에 의해 전선의 허용전류가 변화한다. 이는 배선방식에 의한 고조파 전류의 분포 및 포설방법에 의한 유도장해 문제를 일으키며, 허용전류의 보정이 필요하다. 셋째, 고조파 전류가 흐르고 있는 선로에 근접하여 통신선이 포설되어 있는

경우 통신선에 의해 노이즈가 발생하게 되고, 이는 전기철도 신호 시스템에 영향을 미칠 수 있다. 넷째, 전기철도 차량에서 발생된 고조파 전류는 급전계통의 임피던스 특성에 의해 특정 조파에서 공진되어 고조파 전류 확대현상을 일으킨다. 이와 같은 문제들로 인하여 최근 고조파에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으며, 인버터와 컨버터를 이용하는 전력 변환 장치와 전차선로에서 발생된 아크가 고조파를 발생시키는 주된 원인으로 추정된다.

③ 전자파 발생

전자파는 자연 전자계를 비롯하여, 전력설비, 전철시스템, 가정용 생활기기 등 모든 전기기기에서 발생한다. 과거에는 전자파에 대한 영향이 심각하게 대두되지 않았으나, 전력전자 소자의 발달과 함께 전자부품의 사용이 증가하면서 전자기 적합성(EMC) 또는 전자기 방해(EMI) 문제에 대한 관심이 높아지고 있다. 기존 집회로의 동작 전압은 5V가 주를 이루었지만, 최근 소비전력의 감소를 위해 최소 2.5V까지 전자부품의 동작전압이 낮아지고 있는 추세이기 때문에, 외부 노이즈가 전원이나 각종 신호 선에 유입될 때 신호와 노이즈의 차이가 줄어들어 오동작이 발생하기 쉽기 때문이다. 특히 전기철도 차량은 판토틀라프를 이용하여 전차선과 습동하면서 전력을 공급받고, 추진제어장치가 인버터·컨버터와 같은 전력변환장치를 이용하기 때문에 전자파에 대한 오동작 우려가 있다. 전기철도에서 전자파는 전력변환장치의 스위칭 써지, 코로나, 전차선로의 공진현상, 아크 등에 의해 발생되며, 이 중 전자계 간섭을 일으키는 주원인으로 판토틀라프와 전차선 사이의 이선에서 오는 아크를 들 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 판토틀라프가 이선될 때 발생하는 아크가 전기철도 차량 주회로에 미치는 영향에 대하여 분석하는 것을 목적으로 하였다. 아크의 영향 분석을 위해, 전기철도 급전계통에서 발생하는 아크 특성을 추정하였다. 또한 전기철도 주회로 시스템의 등가모델을 구성하였으며, 판토틀라프와 전차선 사이에서 발생된 아크가 전기철도 주회로 시스템 내부에 미치는 영향을 분석하였다.

아크는 di/dt가 매우 큰 썬지성 전류를 띄고 있어, 발생 시 주변 계통 및 제어회로에 과전류 및 고조파, EMI, EMC와 같은 문제를 발생시킨다. 따라서 송전계통에서는 이의 영향에 관한 연구가 선행되어 왔지만, 전기철도에서 판토틀라프와 전차선 사이가 이선될 때 발생하는 아크 특성 및 영향에 관한 연구는 미흡하다.

판토틀라프에서 발생하는 아크는 전기철도의 주회로 시스템 내부에 과도 과전압 및 과전류를 발생시킨다. 또한 아크 발생시 THD가 급격히 높아지며, 이때의 고조파 함유량은 아크의 길이가 길어질수록 더욱 많아진다.

전기철도는 대용량 수송 부하로 작은 결함이 대형사고로 직결되기 때문에 시스템 설계 시 면밀한 검토가 이루어져야 하며, 아크의 영향을 감소시키기 위해 썬지음저버의 성능을 개선시킬 필요가 있다. 또한, 향후 아크의 영향에 관한 더욱 정확한 분석을 위해 전기철도 주회로 시스템에서의 실측 데이터를 통한 입증이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 철도기술연구개발사업에서 지원된 "틸팅 차량 주회로 시스템의 이선 아크 영향연구"에 관한 연구 과제에 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] 박수만, "고속전철 변전소의 고조파 분석과 대책에 관한 연구", 숭실대학교 대학원 석사학위논문, 2003. 12.
- [2] 반기중, 김낙교, "아크 전류 차단을 위한 제어 알고리즘 개발", 대한전기학회 논문지, 제 53권 3호, pp. 166-172, 2004. 4.
- [3] 정중환, 김문환, "선대 선 전극방식의 대기압 아크억제 대책 및 Metal oxide 계겨에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 제 53권 5호, pp. 264-267, 2004. 5.
- [4] 박성혁, 김연수, 윤성철, 전현규, "고무차륜 AGT 경량전철 차량용 제 3 계조 집전장치의 이선훈성", 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp. 556-559, 2004.
- [5] 김진우, 박인기, 장진희, 왕영용, 한창수, "고속전철용 가선-팬터그래프 시스템의 모델링 및 접촉력 해석", 한국소음진동공학회 논문집, 제 13권 6호, pp. 474-483, 2003.