

판토크래프와 전차선 사이에서 발생하는 아크 특성에 관한 연구

(A Study on an arc according to loss of contact between pantograph and catenary)

이 봉 이* · 김 재 철 · 한 성 호 · 이 수 길
 (Bong-Yi Lee* · Jae-Chul Kim · Sung-Ho Han · Su-Gil Lee)

Abstract

Electric train is currently used widely, and much development is expected. But, in case of electric train, as comparison with diesel rolling stock, many electrical problem such as harmonic, voltage sag, EMI, EMC usually occur. Accordingly, in order to popularize an electric train, first, a study on electrical problem at an electric train must be accomplished.

In this paper, one of electrical problems, arc characteristics according to loss of contact between pantograph and catenary was analyzed.

1. 서 론

전기철도의 집전 시스템은 크게 전기를 공급하는 전차선(catenary)과 전력을 공급받는 장치인 판토크래프(pantograph)로 구성된다. 판토크래프는 전류를 전차선으로부터 차량에 전달하는 장치로서 전동차 지붕 위에 설치되어 있으며, 설계 목표는 고속 및 다양한 환경 조건하에서 연속적이고 일정한 양의 전류를 차량에 전달하도록 하는 것에 있다. 전기철도 운행시 전차선과 판토크래프 사이가 이선될 때 이는 동력 전달을 중단시킬 뿐 아니라, 이선시 아크를 발생시켜 아크의 높은 전류와 매우 큰 dv/dt로 인해 전기철도 차량 주회로 및 제어회로에 손상을 줄 수 있다[1,2].

따라서 본 논문에서는 전기철도의 전차선과 판토크래프가 이선될 때의 아크 특성을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 아크 발생 원인

전기철도 급전 시스템의 전차선과 판토크래프 사이에 아크가 발생하는 원인은 크게 판토크래프와 전차선 사이가 이선되는 경우와 타행운전 상태가 아닌 역행운전 상태에서 열차가 절연구간을 통과하는 경우의 두 가지로 나눌 수 있다.

2.1.1 판토크래프와 전차선 사이의 이선

판토크래프와 전차선 사이의 이선은 소이선, 중이선, 대이선으로 나눌 수 있다. 소이선은 판토크래프 습동판의 미세 진동에 의해 발생하는 것으로 이선시간은 수십 분의 1초 정도이다. 중이선은 판토크래프가 전차선의 경점에 의해 충격을 받을 때 발생하는 것으로 이선시간은 수 분의 1초 정도이다. 대이선은 전차선의 지지점 통과 직후 판토크래프 전체가 도약하여 발생하는 것으로 이선시간은 1~2초에 이른다. 열차 진행시 이선이 발생되면 이선 개소의 시점부 및 종단부는 아크 및 충격에 의해 국부적으로 전차선의 마모가 촉진되며, 결과적으로는 단선 가능성이 높아진다. 또한 이선 시간 동안 운전용 전력의 집전이 중지되고, 무선 잡음 장애가 발생하며, 심할 때는 전기차량의 주전동기나 보호기기류가 섬락에 의해 파괴되기 쉽다[3].

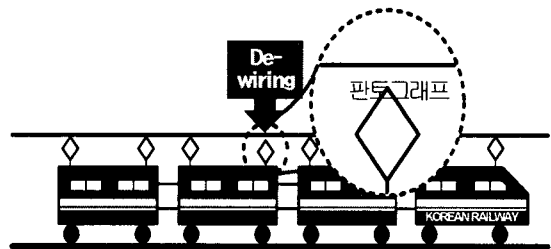


그림 1. 전기철도 시스템에서의 이선 예
 fig. 1. the example of de-wiring at the electric train system

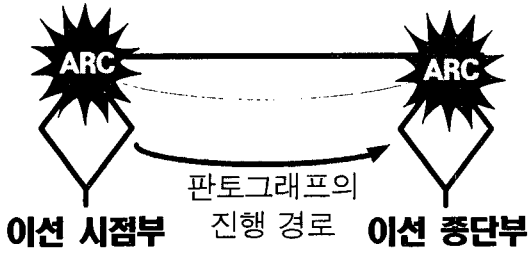


그림 2. 판토히래프와 전차선 사이의 아크 발생
 fig. 2. generated arc between pantograph and catenary

2.1.2 절연구간 통과

절연구간은 사구간 또는 dead section 이라고도 하며, 교류 급전계통에서 이상 전원의 접속개소 또는 교류 급전계통과 직류 급전계통의 접속개소에 설치되어 두 구간을 전기적으로 절연시키는 역할을 한다. 따라서 절연구간은 크게 교류/교류 절연구간과 교류/직류 절연구간으로 나뉜다.

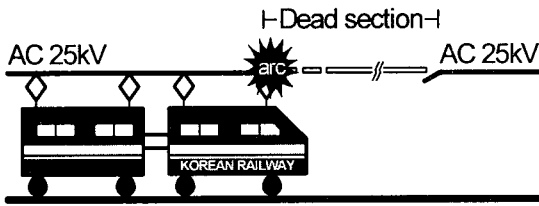


그림 3. 절연구간 통과시의 아크 발생 예
 fig. 3. example of arc at the dead-section

원칙적으로 열차가 절연구간을 통과할 때, 열차는 전압을 off시킨 상태에서 절연구간을 통과하여야 한다. 하지만, 예기치 않은 상황에 의해서 전압이 완전히 차단되지 않은 상태에서 절연구간을 통과하게 되면 열차의 판토히래프는 가압구간에서 무가압 구간으로 아무런 보호절차 없이 진입하게 되며, 이 때 전기철도 차량의 판토히래프와 전차선 사이에 아크 발생 소지가 높다. 또한 절연구간을 통과할 때에도 무가압 구간에서 바로 가압구간으로 진입하게 되므로 아크가 발생할 확률이 높다.

2.2 아크의 전기적인 특성

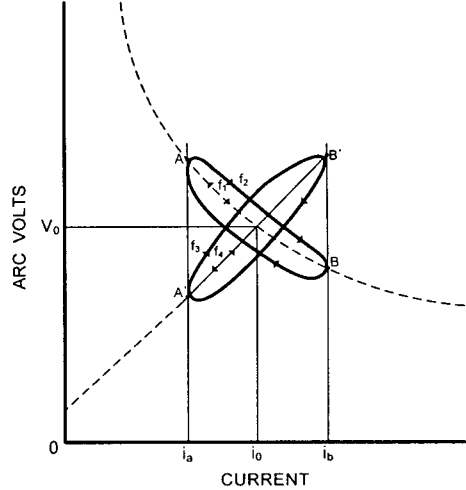


그림 4. 연속 고주파에서의 아크의 동적 특성
 fig. 4. dynamic characteristics of an arc at successively higher frequencies

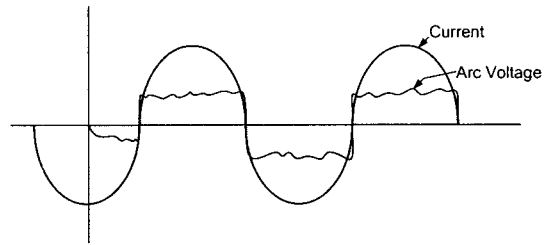


그림 5. 아크 전압 특성
 fig. 5. arc voltage characteristics

2.3 아크의 수학적 모델

전기적인 아크는 전류의 변화에 대해 일정한 저항값을 지니지 않는다. 따라서, 아크 전압-전류의 관계를 계산하기 위해 미분방식 형태의 되어 있는 수학적 모델 이용해야 한다.

수학적인 모델로 많이 사용되는 것이 Mayr의 모델이다. Mayr는 아크의 간략화된 물리학에 기초한다. 방사상의 열 전도에 의한 에너지 손실은 Saha 열의 이온화를 위한 Saha관계에 의해 주어지며, 이는 온도와 함께 거의 지수적으로 가스의 전도성을 위한 영역에 포함된다.

이러한 분석을 통해 Mayr는 다음의 식을 만들어 내었다.

$$F(Q) = K \cdot \exp\left(-\frac{Q}{Q_0}\right) \quad (1)$$

$$N = N_0 \quad (2)$$

여기서, Q : 아크 컨덕턴스에 저장된 아크 에너지[kWs]
 Q_0 : Mayr의 아크 수식에서 저장된 에너지[kWs]
 N : 아크 전력 손실[kW]
 N_0 : Mayr의 아크 모델의 상수 전력 손실[kW]

N_0 와 Q_0 가 상수이기 때문에 시간의 양이 다음과 같이 정의된다.

$$\theta = \frac{Q_0}{N_0} \quad (3)$$

이는 Mayr의 미분방정식을 이끌어낸다.

$$\frac{dG}{dt} = \frac{G}{\theta} \left(\frac{W}{N_0} - 1 \right) \quad (4)$$

θ 와 N_0 는 모두 상수이다. θ 의 의미는 $W=0$ 에서의 수식 (4)의 적분에 의해 수식 (5)와 같이 나타내어질 수 있다.

$$G = G_0 \exp\left(\frac{-t}{\theta}\right) \quad (5)$$

2.4 전자선로에서 아크의 전파 경로

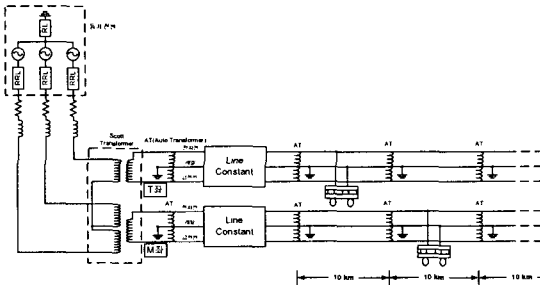


그림 6. 전기철도 계통도
 fig. 6. electric railway system

일반적으로 전기철도에서 이용되는 주변압기의 권선은 판토틀로부터 전원을 공급받는 일차권선, 견인전동기에 전원을 공급해주는 견인권선, 각종 보조기에 전원을 공급하는 보조권선으로 구성된다. 견인권선, 보조권선 및 내장된 리액터의 개수와 정격용량, 정격전압은 추진시스템의 구성 방식에 따라 결정되므로 변압기의 형태는 전력변환 방식, 견인전동기의 종류 등에 따라 상당한 차이가 있을 수 있다.

주변압기는 전자선로부터 AC 25kV의 특고압 전력을 받아 이것을 단상 1,040V로 변화시켜, 2차측에서는 네 대의 Converter/Inverter에 각각 두

대씩의 유도전동기를 구동한다. 따라서 판토틀 하나를 사용하여 여덟 대의 유도전동기가 구동된다. 3차측은 보조 전원 장치로 실제 열차를 구동시키는 것 이외의 냉난방 장치, 또는 조명장치 부하를 위한 전원으로 사용된다.

소내용으로 사용되는 보조전원 장치는 실제 열차를 구동하는 데 사용되는 것과는 다르므로 주변압기 과도 특성 해석에는 실제 전동기를 구동하는데 이용되는 main converter/inverter부를 이용하며, 2차측이 동일한 소자를 사용하는 네 대의 C/I부로 나뉘어져 있으므로 이 중 하나를 해석한다. 따라서 본 연구에서 이용되는 전기철도 모델은 그림 7과 같다[5,6].

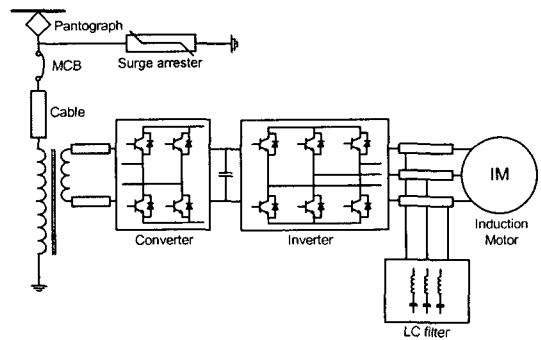


그림 7. 전기철도 주회로 시스템 모델
 fig. 7. a model of railway main circuit system

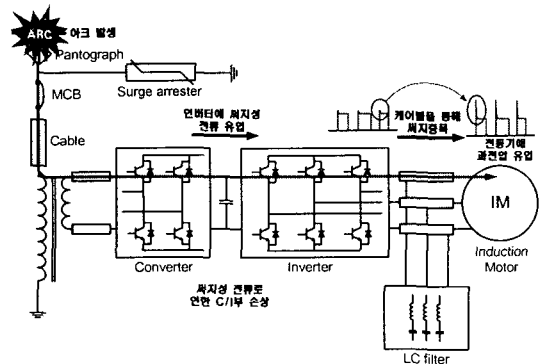


그림 8. 전기철도 차량내부의 아크 전파경로
 fig. 8. arc proceeding in the electric train system

2.5 결론

전기철도의 운행시 이선이 발생되거나 절연구간을 가압 상태에서 통과하게 될 경우, 판토틀과 전자선 사이에 아크가 발생한다. 이 때 발생한 아크는 전기철도 주회로 시스템 및 제어회로에 치명적인 영향을 미칠 수 있으며, 이는 기존에 설계되

어 있는 썬지 읍저버로는 해결이 불가능하다. 따라서 아크의 영향에 대한 파악이 명확하게 이루어져야 할 것이다. 따라서 본 논문에서는 전기철도의 아크 발생 원인에 대해 조사하고, 아크 특성을 소개하였다. 또한 전기철도 차량 내부의 아크 진행 경로에 대하여 연구하였다.

본 논문의 결과를 토대로 하여, 향후 아크 발생에 따른 전기철도 차량 주회로 시스템 내부에 미치는 영향에 대한 정량적인 분석이 필요할 것이며, 이는 철도차량 주회로 및 제어회로 시스템의 절연 내력 설계에 도움을 줄 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 내용은 건설교통부에서 시행한 기존선 속도 향상 실용기술개발의 연구결과임을 밝힌다.

참 고 문 헌

- (1) 김진우 외 4명, "고속 전철용 가선-팬터그래프 시스템의 모델링 및 접촉력 해석", 한국소음진동공학회논문집, 제 13권 6호, pp. 474-483, 2003. 6.
- (2) 한형석 외 2명, "고속용 판토타그래프의 기술현황", 기계와 재료, 제 10권 3호, 1998. 秋.
- (3) 김백, "전철전력공학", 도서출판 지다리, 2005. 1.
- (4) T. E. Browne., "Circuit Interruption", Marcel Dekker, Inc., 1984
- (5) 김상용 외 10명, "추진제어장치 실용기술개발", 철도청 연구보고서, 2004. 7.
- (6) 김재철 외 4명, "사구간 통과에 따른 차량주회로 과도특성에 관한 연구", 한국 철도기술연구원 연구보고서, 2005. 7.