

# 절연구간에서의 전력품질 문제가 전기철도에 미치는 영향에 관한 연구

(A Study on an influence of power quality problem on the electric train at dead section)

이 봉 이\* · 김 재 철 · 문 종 필  
(Bong-Yi Lee\* · Jae-Chul Kim · Jong-Fil Moon)

## Abstract

In this paper, when electric train is in dead-section the effect on electric train system was dealt. The feeding system of electrical railway is AC or DC. When the electric train is passed AC feeding system to DC, vice versa, or phase is changed in between AC feeding systems, there is a dead section. A dead section usually makes the electrical system complex and may have an adverse effect on the electrical system inside the train. Accordingly, it is important to analyze the effect on trains in dead-section.

Modeling an electric train and simulation using PSCAD/EMTDC was accomplished to analyze how power quality problem such as inverter switching surge is propagated to electric train through the feeding line, railway, pantograph.

## 1. 서 론

철도 차량은 운행시 기동 과도전류, 고속 스위칭 켜지, 운전 중 진동 등 여러 가지 원인에 의해 열화가 가속되며, 본 논문에서는 열화를 가속시키는 요인 중 하나인 절연구간 통과시 발생하는 문제점에 대해 연구하였다[1].

철도 차량이 위상이 서로 다른 교류 급전 구간을 지나거나, 교류에서 직류, 직류에서 교류 구간을 지날 때 철도차량은 절연구간을 지나게 된다. 차량이 절연구간을 통과시 주회로 차단기가 차단되지 않은 상태에서 열차가 진입하게 될 때 발생하는 아크, 변압기 동작에 의해 유입되는 돌입 전류 등 나쁜 품질의 전압이 계통으로 유입되어 계통 및 철도 기기 내부에 악영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 절연구간 통과시 주회로 차단기의 동작에 따른 현상을 모의하기 위하여 전기철도 회로를 주 변압기 부분과 인버터 부분의 두 부분으로 나누어 PSCAD/EMTDC를 이용해 시뮬레이션 하였으며, MATLAB을 이용한 FFT 및 THD 계산과 썬지 전압 측정을 통해 결과를 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 절연구간

우리나라의 전기철도 급전계통은 DC 1,500[V]와 AC 25,000[V]를 병행하여 사용한다. 따라서 DC 급전 구간과 AC 급전 구간 사이에 전기적 구분

장치가 필요한데, 이를 절연구간 또는 사구간(Dead section)이라 한다. 절연구간은 AC 급전구간과 DC 급전구간 사이의 이중 전기 구분 장치와 AC 급전 구간 사이의 위상차를 구분하기 위한 교류 이상 구분 장치가 있다. 그림 1은 AC/AC 절연구간의 개략도 이다[2].

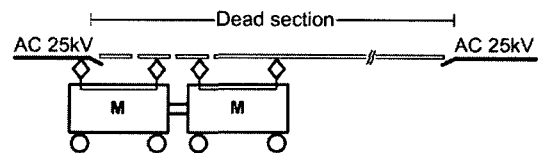


그림 1. 절연구간  
fig. 1. Dead section

### 2.2 전기철도 계통 회로도

전기철도는 그림 2에서 보는 바와 같이 판토틀래프에서 급전 받아 주회로 차단기, 케이블, 컨버터, 인버터를 통해 차량내부로 전력을 공급한다. 전기철도가 절연구간을 통과할 때는 우선 구간제어기를 OFF하여 전동차를 타행운전 상태로 전환시키고 주회로 차단기를 개방한다. 차단기가 개방된 상태에서 위상 변환기를 이용하여 위상을 바꾸어 준 후 절연구간을 지나 역행표를 통과한 후 구간제어기를 ON 하면 절연구간을 완전하게 통과하게 된다.[3]. 열차가 절연구간을 통과할 때 다음과 같은 이유로 인하여 열차에는 좋지 않은 품질의 전압이 유입될 가능성이 발생한다. 우선, 주회로 차단기가 선로를 완전하게 차단하지 않은 상황에서 차량이

절연 구간에 진입할 경우 판토틀라프에서 아크가 발생하여, 기기로 유입되어 기기에 손상을 입힐 수 있다. 또한, 주회로 차단기에 의하여, 변압기가 ON/OFF 동작을 하게 되는데, 이 때 변압기의 돌입전류에 의해 고조파가 많이 발생하게 되고, 순간적이기는 하지만 매우 큰 크기의 전압이 발생한다. 차단기 ON시 생기는 인버터의 스위칭 써지 또한 케이블을 통해 전차 내부에 전파되면서 기기에 손상을 입힐 수 있다.

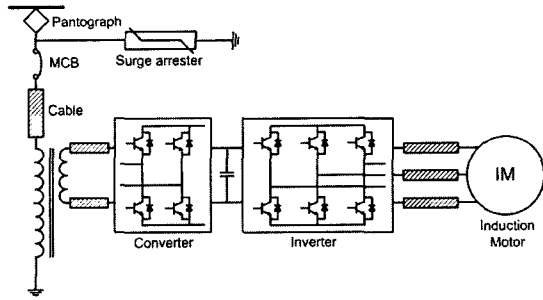


그림 2. 전기철도 급전 계통 모델  
fig. 2. electric railway feeding system model

본 논문에서는 절연구간 통과에 따른 전력 품질 현상을 구간별로 각각 살펴보기 위해 전기철도 급전 계통을 두 부분으로 나누어 모의, 분석 하였다. 첫 째로 주회로 차단기의 ON/OFF 동작에 따른 변압기 돌입전류의 영향을 분석하였고, 다음으로 차단기 동작시 인버터의 스위칭 동작에 따른 스위칭 써지의 영향을 살펴보았다.

### 2.3 변압기 돌입전류 문제

변압기에 전원이 투입되어 동작을 시작 할 때 회로에는 전원과 무관한 성분과 정상상태 성분이라 불리는 강제응답 성분을 가지게 되는데 이를 돌입전류라 한다. 변압기의 돌입전류는 매우 빠른 속도로 감소하므로 회로에 주는 영향이 크지 않지만, 그 크기가 매우 크고, 고조파를 많이 함유하고 있기 때문에 회로 설계시 이에 대한 문제를 반드시 고려해야 한다. 특히 철도의 경우 절연 구간을 지날 때 차단기의 ON/OFF 동작이 반복적으로 일어나게 되므로 이에 대한 영향을 평가하는 것이 매우 중요하다[4].

따라서 변압기 돌입전류에 따른 전압 변동과 고조파 분석을 위해 전압원, 케이블을 통해 변압기, 부하에 이르는 구간을 모델링 하였으며 개략적인 회로도도 그림 3과 같다. 모델링에 사용된 전원은 AC 25,000[kV] 이며, 주파수는 60Hz를 이용하였고, 변압기 용량은 2.5[MVA]이다.

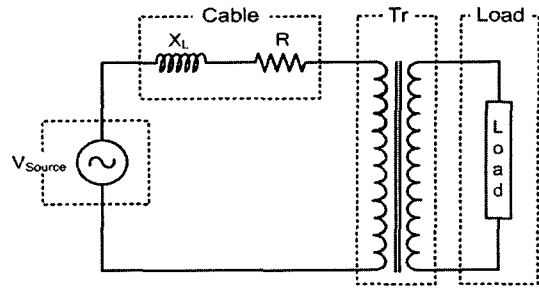


그림 3. 변압기 돌입전류 모의 회로도  
fig. 3. transformer circuit for inrush current simulation

그림 3의 회로를 시뮬레이션 했을 때의 변압기 1차측 전류는 그림 4와 같다. 돌입전류의 크기는 변압기에 전원이 투입되는 순간 전압의 크기, 위상각, 철심 내 잔류자속의 크기와 방향에 따라 달라진다. 잔류자속이 전혀 없고, 전압파형이 최대에 달한 순간에 스위치를 닫는다면 전류는 변압기의 무부하 전류를 넘지 않고 돌입전류는 생기지 않는 반면, 전압파형에 0인 순간 스위치를 닫고 전류의 증가로 인해 생성되는 자속이 잔류자속에 더해지는 방향에 되었을 때에는 돌입전류가 최대가 된다. 따라서, 본 논문에서는 변압기 투입 시점의 위상각을 30° 간격으로 바꾸어 가며 시뮬레이션 하였으며, 그림 4는 이 중 가장 고조파량이 많았던 변압기 투입 위상각이 0°일 때의 변압기 1차측 전류이다.

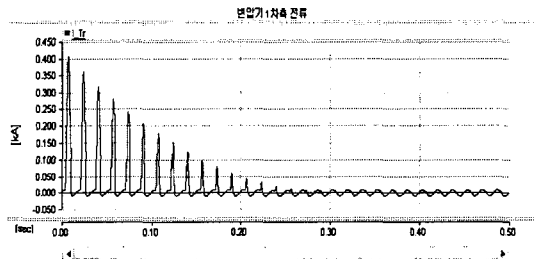


그림 4. 변압기 1차측 전류  
fig. 4. primary current of transformer

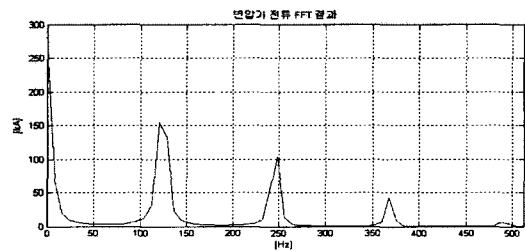


그림 5. 주파수 분석 결과  
fig. 5. the result of frequency analysis

그림 5는 변압기의 1차측 전류를 Matlab을 이용하여 주파수 분석한 결과이다. 그림에서 보는 바와

같이 변압기 돌입전류가 정격 전류의 최대 40배 가까이 이르렀으며, 돌입전류의 영향으로 인해 매우 많은 양의 2, 3, 4 고조파가 전류 파형에 섞여 있는 것을 볼 수 있다. 전류 THD는 8.64%로 나타났다.

## 2.4 인버터 스위칭 동작에 따른 써지 전송

두 번째로 모의한 부분은 컨버터에서 정류된 DC 전압이 인버터와 케이블을 통해 전차 내부로 전파되는지를 분석하기 위해 DC 전원부, 인버터, 케이블 그리고 전기철도를 등가화 시킨 유도전동기를 모델링 한 것으로 그림 6과 같다.

인버터의 출력 전압은 스위칭 서지의 영향을 거의 느낄 수 없을 만큼 매우 미세한 서지가 발생한다. 하지만 써지 전압이 케이블을 통해 차량 내부로 유입되면서 케이블의 특성 임피던스가 고정자 유도전동기의 특성임피던스보다 매우 작아 전반사가 일어나게 되고, 입사파와 반사파가 중첩되어 전동기 단자 부근의 전압은 인버터 출력 전압의 2배가 되어 철도 차량에 심각한 스트레스를 줄 수 있다[5].

따라서 컨버터로부터 출력되는 DC전압을 이상적인 전압원으로 등가화 하고, 인버터를 통해 3-level로 변환된 전압이 케이블을 통과하면서 어떻게 전파되는지 분석하였다. 시뮬레이션에 사용된 데이터는 표 1과 같다.

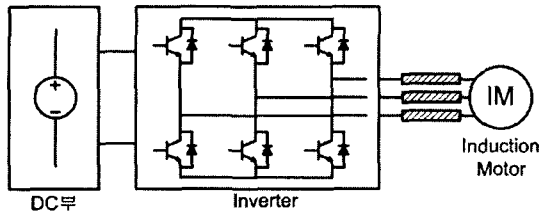


그림 6. 인버터 스위칭 써지 모의 회로도  
fig. 6. inverter circuit for switching surge simulation

표 1. 시뮬레이션 데이터

table 1. simulation data

| 항목      | 데이터                 |
|---------|---------------------|
| DC 전원부  | 0.84[kV]            |
| 유도전동기용량 | 250[kW]             |
| 정격 전압   | 1.35[kV]            |
| 정격 전류   | 0.13[kA]            |
| 인버터     | IGBT 소자 이용 PWM 제어방식 |

그림 7은 인버터에서 출력되는 3-Level 출력 전압과 케이블을 통해 모터로 입력되는 전압을 함께 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과를 통해 볼 수 있듯이 인버터 출력단에서 측정된 전압은 써지의 영향을 느끼기 힘들 정도로 거의 일정한 전압이 나타나지만, 케이블을 통과한 후의 전압 파형을 보면 최대 1.5배 이상의 높은 전압을 가진 써지가 발생

하는 것을 볼 수 있다.

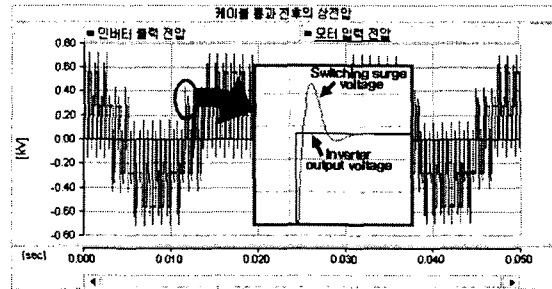


그림 7. 인버터의 케이블 써지 모의 파형  
fig. 7. cable surge simulation result of inverter

## 3. 결론

전차가 DC 급전구간에서 AC 급전구간으로 통과할 때 또는 위상이 서로 다른 AC 급전구간 사이를 통과할 때 열차는 전기적 구분 구간인 절연구간을 통과한다. 절연구간 통과시 주회로 차단기 동작에 의해 전차의 급전 시스템에 나쁜 품질의 전압이 유입될 수 있다. 이 전압은 변압기, 인버터, 케이블 등을 통해 전차에 유입되면서 전차 기기에 악영향을 미칠 수 있으며, 따라서 이 때 발생할 수 있는 전압 품질 문제를 살펴보았다. 시뮬레이션을 위해 본 논문에서는 전기철도 급전계통에서 전차에 이르는 구간을 변압기 돌입전류를 모의하기 위한 모델과, 인버터의 스위칭 써지 전송 모델로 나누었으며, PSCAD/EMTDC를 이용하여 이를 모의하고, 분석하였다. 또한 MATLAB을 이용하여 주파수 분석을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 주회로 차단기의 ON/OFF 동작에 따라 변압기 돌입전류 및 인버터의 스위칭 써지가 얼마나 커지는지를 정성적으로 분석하였으며, 이는 유도전동기로 등가화한 전기철도 내부에 악영향을 줄 수 있음을 보였다. 향후 본 논문에서의 시뮬레이션 결과를 토대로 하여 나쁜 전압 품질 유입에 따른 전차에서의 영향에 대한 분석이 이루어질 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국 철도 기술 연구원의 지원에 의하여 수행된 과제임

### 참고 문헌

- [1] J. B. Wang, H. J. Jeun, "Analysis of fault cause & insulation degradation on the electrical equipments for railway"
- [2] 김양수, 유해출, "전기철도 공학", 동일출판사, pp. 348-354, 1999. 2.
- [3] 백광선, 김명룡, "도시철도차량 교착 사구간 MCB 투입 현상 분석", 2003년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집
- [4] 정승기, 이항범 공역, 전기기기, (주)사이텍 미디어, 2003.2.
- [5] 송승엽, "EMTP를 이용한 인버터 구동 고압 유도전동기의 스위칭 써지 특성 분석", pp. 숭실대학교 석사학위 논문

## 조명분야 포스터발표

제 2-A1분과 : 조명분야

좌장 : 이진우(호서대), 최안섭(세종대)

제 2-A2분과 : 조명분야

좌장 : 정강화(건국대), 안옥희(영남대)