

EMTDC를 이용한 전기철도에서의 차량부하 패턴에 따른 전력공급 특성 해석 및 최적운전방안 제안

이한상* 이장무** 이한민** 장길수*
*고려대학교 **한국철도기술연구원

Analysis of Power Supplying Characteristic Following Load Pattern Using EMTDC and Proposal for Optimal Operation

Hansang Lee* Changmu Lee** Hanmin Lee** Gilsoo Jang*
*Korea University **Korea Railroad Research Institute

Abstract - Following the needs for increment of public transportation system, electric railroad system should be expended. There are several solutions to expend. One of these solutions is to reduce the interval between two railroad vehicles. However, it cannot be reduced too much because reduction of interval means increment of loads and induces supplying voltage decrement. In this paper, voltage variation according to railroad intervals is simulated and optimal operation in railroad system is proposed.

1. 서 론

세계 전기 철도의 48%를 차지하고 있는 직류급전 방식의 직류전기철도는 일반 전력 계통으로부터 수전하는 특별고압의 교류 전기를 철도용 변전소 변압기에서 적절한 전압으로 강압하여 정류기에 의한 장치에서 직류로 변환, 전차 선로에 직류 전력을 공급하여 운전을 하는 방식을 취하고 있다. 사용 전압으로는 600 [V], 750 [V], 1,500 [V], 3,000 [V] 등이 있으며 현재 우리나라에서는 1,500 [V] 전압을 사용하고 있다. 또한 전압강하 등을 고려하여 전철 직류 변전소는 4 ~ 10 [km]의 간격마다 설치하여 운용하고 있으며 변전소 및 급전 구분소 간을 하나의 구간으로 하는 직류 급전 구간을 설정하여 상, 하행선 별로 급전하는 것을 표준으로 하고 있다.

국내 전기철도의 경우, 1,500 [V]의 직류 공급전압을 채택하고 있고, 일반적으로 4 [km]의 변전소간 거리를 가지도록 설치, 운용되고 있다. 하나의 구간을 구성하는 두 변전소 사이에서 철도 차량부하의 시격과 속도에 따라 차량의 수가 다르게 된다. 차량 수의 변화는 각 철도 직류 변전소에서 공급하는 부하의 양이 다름을 의미하고, 부하량의 변화는 구간 내의 전류의 크기를 변화시킴으로서, 변전소 출력단에서의 공급전압, 철도 차량에 공급되는 전압 등의 변화가 야기된다.

본 논문에서는 철도 계통 내의 부하량 변화에 따른 철도 직류변전소 공급전압과 철도 차량 전압을 모의하여, 제한치 내에 두 전압이 존재하는 지의 여부를 파악하여 부하량의 제한치를 정하고, 철도계통을 운용하는 최적의 운전 조건을 제안한다.

2. 철도변전소

2.1 12-pulse diode 직류변전소

전기철도 계통에 적용되는 직류 변전소는 두 가지의 정류방식을 가지고 있다. 초기에 설치되어 운용되는 전기 철도 계통에는 12-pulse diode 변전소가 설치되어 있고, 최근에 설치되고 있는 철도 계통에는 12-pulse thyristor를 설치하여 운용하고 있다. 본 논문에서는 현재 지하철 3호선에 적용되어 있는 diode 변전소를 모델링하여 모의하였다.

표.1 Diode 직류 변전소

수전 전압	22.9 [kV]
단락 용량	200 [MVA] 이상
변동 범위	1.1 ~ 1.65 [kV]

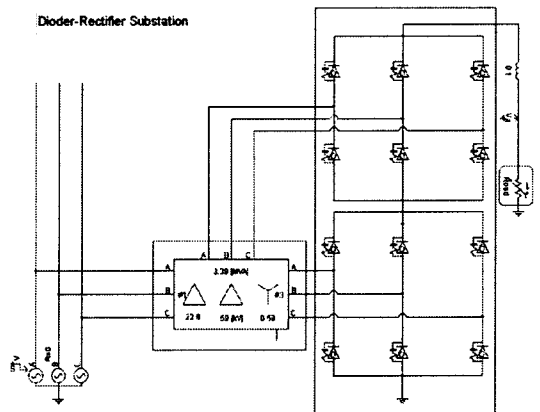
표.1에서 볼 수 있듯이 전기철도 계통의 직류 변전소에는 배전 전압인 22.9 [kV]의 교류전압으로 전력을 공급한다. 직류 변전소의 출력 전압이 직류 1,500 [V]이어야 하고, 또한 diode 정류방식은 직류 전압의 크기를 제어할 수 없기 때문에 22.9 [kV]의 전압을 강하시키는 변압기가 설치된다. 기 설치되어 운용되고 있는 변압기의 사양은 표.2와 같다.

표.2 직류 변전소 내부 변압기 사양

변압기 용량	1.695 [MVA]
1차 측 전압	22.9 [kV]
2차 측 전압	0.59 [kV]

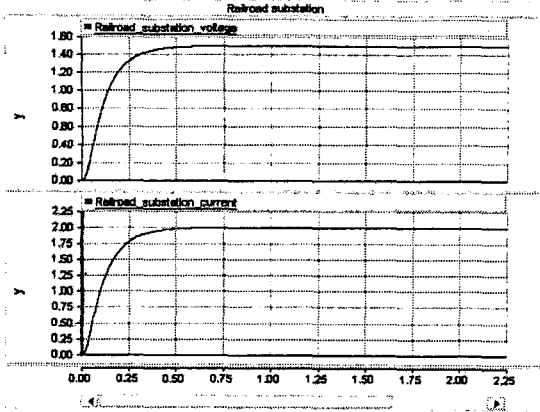
2.2 철도변전소의 EMTDC 모델링

22.9 [kV]의 한계계통, 22.9/0.59 강압변압기, 12-pulse diode 정류기로 구성된 철도변전소는 그림 1.에서와 같이 EMTDC로 모델링하였다. 이 모델에서는, 철도차량이 기동을 시작하고 정상운전속도에 도달한 상태에서의 차량의 저항인 0.75 [Ohm]의 부하에서 1,500 [V]의 공급전압을 나타내도록 설계되었다.



<그림 1> 철도변전소의 EMTDC 모델

정상상태의 차량부하를 적용하여 철도변전소 공급전압 및 전류의 모의 결과는 그림 2.에 나타내었다.



〈그림 2〉 철도변전소 공급전압 및 전류 모의

12-pulse diode 정류회로를 적용하였기 때문에 정류회로 이전단의 교류전압에 의하여 직류전압이 결정된다. 위의 모델은 590 [V]로 강압된 교류전압을 정류하여 1,500 [V]의 직류전압을 얻도록 설계한 철도 직류변전소이다.

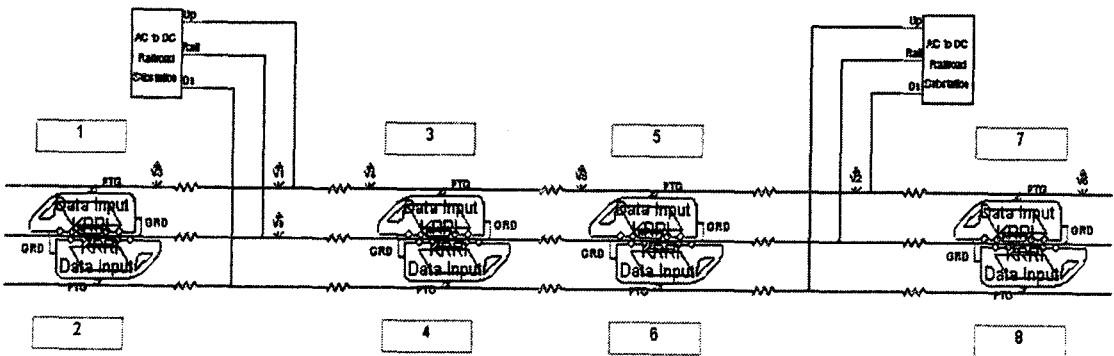
3. 철도 변전소 공급 전압

3.1 부하량과 변전소 공급전압

철도변전소 공급전압의 변화는 부하량의 변화에 기인한다. 철도계통에서 부하량의 변화는 철도부하의 수에 의존한다. 철도부하의 경우, 하나로 간주되는 철도부하를 구성하는 차량의 수(6량, 8량, 10량)에 따라 소비전력의 크기가 다르게 되지만, 본 논문에서는 10량의 차량만을 고려하였다.

변전소에서 철도부하에 전력을 공급함에 있어서, 철도부하는 변전소에 병렬로 연결되어있는 부하로 볼 수 있다. 병렬 연결되어 있는 저항부하라는 관점에서 볼 때, 부하 수의 증가에 따라 전체저항값은 감소하고, 이로 인하여 변전소에서 철도계통으로 흐르는 전류가 증가한다. 전류의 증가로 인하여 철도변전소 공급전압이 낮아진다. 철도변전소 공급전압은 항상 1,500 [V]를 유지할 필요는 없지만, 1,100 ~ 1,650 [V]의 전압제한범위 안에 있어야 하는 제약이 있다.

철도부하의 경우, 다른 부하와는 다르게 시간에 따라 이동하는 성질을 가지고 있다. 시간에 따른 위치 변화는 시간에 따라 전력을 공급하는 변전소가 다르게 되기 때문에 각 변전소의 부하량이 연속적으로 변하게 됨을 의미한다.



〈그림 3〉 EMTDC 시험계통

3.2 차량의 전압과 선로 임피던스

부하량 변화에 따른 철도계통 선로 전류의 증가는 선로임피던스에 의한 전압강하의 증가를 의미한다. 현재 설치, 운용되고 있는 철도계통의 공급선로와 증성선로의 단위 km당 임피던스는 0.0205, 0.00765 [Ohm]이고, 그림 2의 모의 결과에서 얻은 2 [kA]의 전류와의 작용으로 단위 km당 41, 15.3 [V]의 전압강하가 발생한다.

철도 차량은 유도전동기로 구성되어 있다. 철도차량은 직류로 전력을 공급받기 때문에 각 유도전동기에 전력을 공급하기 위하여 인버터를 포함하고 있다. 철도차량에 사용되는 인버터는 900 [V] 이상의 전압이 필요하기 때문에 차량전압은 900 [V] 이상이 되어야 한다. 또한 차량전압은 1,800 [V]이하로 유지되어야 한다.

4. 철도계통 모의

4.1 철도차량 모델

철도부하의 기동과 제동 등에 따른 과도현상을 고찰하기 위해서는 유도전동기 모델을 이용하여 모의하여야 하지만, 본 논문에서는 정상 운전 시 변전소 및 차량에서의 전압을 모의함에 목적을 두기 때문에, 차량을 저항으로 단순화하여 모델링하였다. 차량은 0.75 [Ohm]의 저항으로 모델링되었다.

4.2 공급전압 및 차량전압의 모의

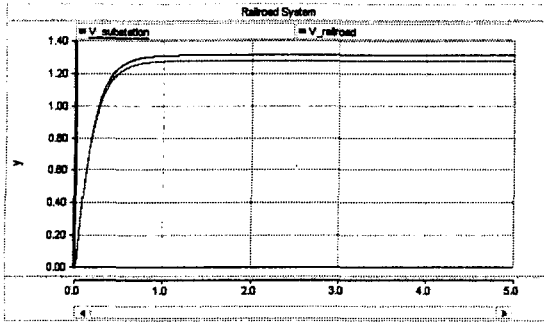
철도 변전소 공급전압과 차량전압의 모의를 위하여, 〈그림 3〉의 철도계통을 구성하였다. 모의 시에 차량의 속도를 40 [km/h]로 간주하였고, 5초의 모의시간을 설정하였다. 40 [km/h]의 속도를 가지는 차량이 5초 동안 움직이게 되는 거리는 55.5 [m]이므로 선로의 임피던스 변화는 고려하지 않았다.

〈그림 3〉의 시험계통에서 차량의 시격은 단위 km 당 선로임피던스와 차량 속도 및 시격을 고려한 차량 간의 거리를 곱하여 모의의 변수로 반영하였다. 부하량의 변화는 차량의 임피던스를 조절하여 반영하였다.

4.2.1 시격 : 3분

현재 운용되고 있는 차량의 시격은 3분이다. 차량의 속도가 40 [km/h]라는 가정 하에, 시격 3분의 철도부하는 2 [km]의 간격으로 운행한다.

차량 간 거리가 2 [km]이고 up line과 down line에서의 단위 km당 임피던스는 0.0205 [Ohm]이며 neutral line에서의 단위 km당 임피던스는 0.00765 [Ohm]이므로 차량 사이의 임피던스는 0.042 [Ohm], 0.0153 [Ohm]으로 설정하였다.

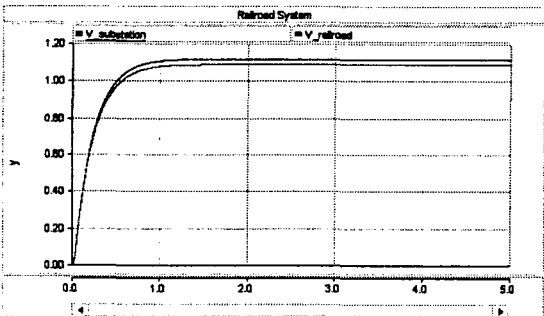


<그림 4> 시격이 3분일 때, 공급전압 및 차량전압

차량이 3분의 시격을 가지고 운행할 때에 철도변전소의 공급전압과 차량전압의 모의 결과, 그림 4에서 보는 것처럼 공급전압은 1,315 [V]이고, 차량전압은 1,278 [V]이다. 모의 결과로서 3분 시격으로의 운행은 두 전압의 제한 범위를 벗어나지 않음을 알 수 있다.

4.2.2 시격 : 2분

차량의 시격을 2분으로 하여 모의하였다. 4.2.1 절에서와 같은 과정으로 차량 간 거리를 계산하면 1.34 [km]이다. 1.34 [km]의 차량 간 거리를 모의에 반영하기 위한, 임피던스의 값은 up line, down line에서 0.0273 [Ohm], neutral line에서 0.0102 [Ohm]로 임피던스를 설정하였다.



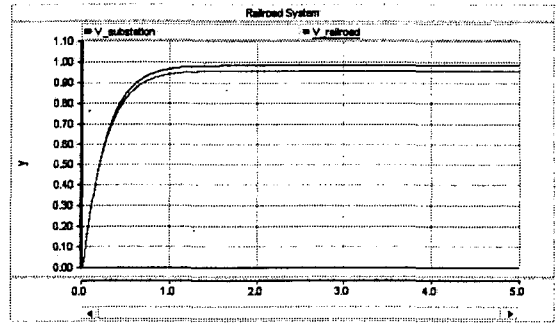
<그림 5> 시격이 2분일 때, 공급전압 및 차량전압

2분의 시격으로 운행하는 철도계통에 대한 공급전압과 차량전압의 모의 결과로서, 공급전압 1,117 [V]과 차량전압 1,090 [V]의 결과를 얻었다.

2분 시격 모의에서 차량전압은 제한범위인 900 [V]보다 충분히 높은 전압을 유지함을 알 수 있다. 공급전압은 제한 범위인 1,100 [V]를 벗어나는 것은 아니지만, 제한 전압과 거의 비슷함을 알 수 있다. 그러나 그림 3의 시험계통은 두 개의 변전소에 의한 전력공급만을 모의하였고, 그로 인하여 1, 2, 7, 8번의 차량이 계통에 포함되지 않은 변전소로부터 공급받는 전력을 고려하지 못하였기 때문에, 1,117 [V]의 공급전압은 더 높아지게 된다. 따라서 2분 시격으로의 철도부하 운행은 모의보다 안정적인 전력공급이 가능하다.

4.2.3 시격 : 1분 30초

차량의 시격을 1분 30초로 하여 모의를 수행하였다. 차량 간 거리는 1.34 [km]이고, 이에 따른 차량 간 선로 임피던스는 up line, down line에서 각각 0.0205 [Ohm], neutral line에서 0.00765 [Ohm]으로 설정, 모의하였다.



<그림 6> 시격이 1분 30초일 때, 공급전압 및 차량전압

시격이 1분 30초로 운행되는 철도계통에서의 공급전압은 985 [V]이고, 차량전압은 957 [V]이다. 4.2.2절의 모의 결과에서 예상할 수 있듯이, 4.2.2절 모의의 공급전압이 제한 범위에 가깝기 때문에, 시격 1분 30초 모의에서의 공급전압은 1,100 [V]보다 낮게 된다. 그러나 4.3.3절 모의는 차량전압이 900 [V]보다 낮아지는 지의 여부 확인을 위하여 모의되었다. 위의 모의에서는 차량전압이 957 [V]로서 900 [V]이하로 떨어지지는 않았지만, 시격을 더 작게 하여 운전을 할 경우, 차량전압이 제한전압보다 낮아지게 될 것이다.

5. 결 론

철도계통에서 변전소 공급전압과 차량전압은 각각 1,100 ~ 1,650 [V], 900 ~ 1,800 [V]의 전압변동 제한 범위를 가지고 있다. 따라서 본 논문은 EMTDC를 이용하여 직류 전기철도 시험계통을 구성하여, 시격에 따른 차량 수 변화를 고려하여 부하량의 변화를 주 변수로 한 철도변전소의 공급전압과 차량전압의 모의를 수행하였다.

현재 운행 중인 3분 시격에 대한 모의를 통하여, 제한 전압에 충분한 마진을 가지고 운행되고 있음을 확인할 수 있다. 2분의 시격에 대한 모의를 통하여, 전압제한범위 내에서 계통이 운영될 수 있음을 확인하고, 마지막으로 1분 30초의 시격에 대한 모의를 통하여, 두 전압이 전압제한범위를 벗어나며, 특히 차량전압에 대하여는 더 작은 시격의 운행이 허용되지 않음을 알 수 있다.

본 논문에서는 여러 변전소를 고려하지 않았고, 또한 차량의 모델을 단순화하여 모의하였으며 실제 모의시간이 짧았기 때문에, 실제 결과보다는 더 적은 여유전압을 가지는 결과를 얻었다. 따라서 현재 운행되고 있는 3분 시격보다 더 작은 시격으로의 운행이 필요한 경우, 2분의 시격으로의 계통 운영이 적당하다.

[참 고 문 헌]

- [1] 고려대학교, "PSCAD/EMTDC를 이용한 도시철도 교류 및 직류 급전시스템 해석 모델 개발 및 적용" 과제보고서, 도시철도 표준화 연구개발사업, p206, 2002.11
- [2] 한국철도기술연구원, "급전계통 최적설계 및 운용기술 개발", 1999.12
- [3] 이한상, 이한민, 장길수, "철도시스템 불평형 해석을 위한 EMTDC 모델링", 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회, 2003.11.13-14
- [4] PSCAD/EMTDC user's manual