

누설전류 예측을 위한 동적 시뮬레이션에 관한 연구

정호성* 한문섭* 박 영* 정상기* 권삼영* 이재봉**
 *한국철도기술연구원 **서울메트로

A study on dynamic simulation for estimation of leakage current

Hosung Jung* Moonseob Han* Young Park* Sanggi Chung* Samyong Kwon* Jeabong Lee**
 *Korea Railroad Research Institute **Seoul Metro

Abstract - DC traction system generates leakage current because running rails are used in return circuit. And it is very important to estimate the leakage current to the train operation situation. Therefore this paper presents dynamic simulation technique that is very similar to the real operation situation using TPS and PSCAD/EMTDC. For this we model DC traction system included in DC substation, variable feeding circuit model and variable train model. And we extract train location and power using TPS program and use these data for dynamic simulation. Finally we can estimate leakage current to the various operation condition using dynamic simulation.

부터 대지를 향하여 유출되고 변전소 측에서는 대지로부터 유입된다. 누설전류 I_l 은 식 (1)과 같다[1].

$$I_l = K \cdot I \cdot \frac{r}{W} \cdot L^2 \quad (1)$$

여기서 K : 비례상수
 I : 레일전류 [A]
 r : 단위길이의 귀선저항 [Ω/km]
 W : 레일의 누설저항
 L : 변전소 간격 [km]

따라서 누설전류를 줄이기 위해서는 변전소간 간격을 줄이고 레일저항이 작은 귀환레일을 사용하며 레일과 노반사이의 절연자재를 사용하여 누설저항을 증가시켜야 한다.

1. 서 론

직류 전기철도 시스템에서는 레일을 귀환회로로 사용하기 때문에 귀환전류 중의 일부가 레일로부터 누설되게 된다. 이러한 누설전류는 철도 및 지하 금속매설물에도 영향을 있으므로 이를 최소화하기 위해 레일을 대지로부터 절연시키는 비접지 방식을 채택하여 운영하고 있다.

이러한 누설전류를 저감하기 위해서는 레일의 귀선저항의 저감, 누설저항의 증대 및 변전소 간격의 단축 및 부하전류의 감소 등의 대책이 있으나 이러한 조건 등은 시스템 도입 전에 시스템 조건에 따른 누설전류의 크기의 예측이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 전동차 운행에 따른 누설전류의 크기 변화를 예측하기 위해서 차량의 위치에 따라 실제 통과 유사하도록 동적 시뮬레이션 기법을 제안하였다. 이를 위해 전력해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 직류 급전계통을 모델링하였다. 차량 위치 변화에 따른 차량의 전류 소비를 모델링하기 위해 차량, 선로, 전력 및 열차 운행조건에 따라 전력량을 계산하는 TPS를 이용하여 차량에서의 열차위치에 따른 전류크기를 계산하였다. 이와 같이 차량의 위치 및 전력소비량 및 열차 운전조건 및 선로조건 등을 변화시키면서 누설전류 크기를 예측 할 수 있었다.

2.2 동적 시뮬레이션 기법

직류 급전시스템에서의 누설전류를 예측하는 방법은 귀환회로 모델링에 따라 다양한 방법이 활용되고 있다. 전파방정식을 이용한 수학적인 접근뿐만 아니라 귀환회로를 직류 임피던스와 레일과 대지사이의 병렬 임피던스로 모델링한 방법, CDEGS 프로그램을 이용한 대지저항을 포함한 해석 그리고 전력해석 프로그램을 이용한 방법 등이 있다[2,3]. 하지만 대부분의 기법에서는 실제 통에서와 같이 차량의 위치 변화 및 차량의 역행, 타행, 정지모드에 따른 역행전류 및 회생전류에 따른 누설전류의 변화를 예측하고 않고 단지 최대부하전류에서 누설되는 누설전류의 최대량을 예측하고 있고 있다. 따라서 본 논문에서는 그림 1과 같이 누설전류 예측을 차량의 위치에 따라 실제통과 유사하도록 동적 시뮬레이션을 수행할 수 있는 기법을 제안하였다.

2. 본 론

2.1 누설전류

직류 전기철도에서는 주행레일을 귀선으로 활용하고 있어 주행레일을 별도로 접지시키지 않아도 주행레일이 대지위에 설치되므로 귀선전류의 일부는 대지로 누설된다. 누설전류의 크기는 레일의 전위, 차량 부하전류, 레일의 저항 및 변전소 간격의 자승에 비례하고 누설저항에 반비례 한다. 그리고 레일전위가 정극성(+)인 경우에는 전류가 레일로부터 대지로 유출되고 부극성(-)의 경우에는 대지로부터 레일로 유입된다. 즉 누설전류는 전위 영(0)의 중성점을 기준으로 부하측에서는 레일로

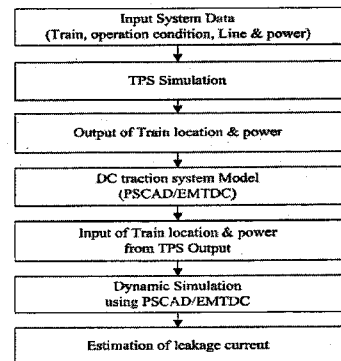


그림 1. 동적 시뮬레이션 순서도

이를 위해 전력해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 직류변전소, 급전회로, 및 차량을 모델링하였다. 또한 차량 위치 변화에 따른 차량의 전류 소비를 모델링하기 위해 차량, 선로, 전력 및 열차 운행조건에 따라 전력량을 계산하는 TPS를 이용하여 차량에서의 열차 위치에 따른 전류크기를 계산하였다. 그림 1은 차량위치에 따른 누설전류 예측을 위한 동적 시뮬레이션 기법에 대한 순서도를 나타낸 것이다[4,5].

2.3 동적 시뮬레이션을 위한 직류 급전모델

누설전류의 크기 변화를 시뮬레이션하기 위해서 전력해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 직류변전소, 차량, 그리고 전차선과 레일 및 레일과 대지간의 컨덕턴스로 구성된 회로를 모델링하였다. 직류 변전소는 교류 전원을 직류 1500V가 출력되도록 하였으며, 특히 동적 시뮬레이션을 하기 위해서 그림 2와 그림 3과 같이 급전회로 및 차량부하를 모델링하였다[6].

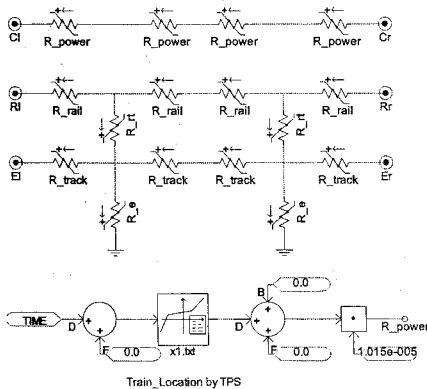


그림 2. 급전회로 모델링

표 1. 모델 사양 및 대표값

모델	사양 및 대표값
R_power(T-bar)	0.0203 Ω/km
R_rail(레일)	0.0148Ω/km, 60kg 병렬 2본
R_track(궤도)	100Ω/km

그림 2의 급전회로 모델링은 전차선, 레일, 궤도의 직렬 임피던스와 레일과 궤도 및 대지간의 상호 임피던스로 구성하였다. 열차 위치에 따른 각 구성요소의 임피던스를 구하기 위해서 TPS로부터 계산된 시간에 따른 위치정보와 각 구성요소의 단위 임피던스의 계산을 통해 임피던스를 산출하였다.

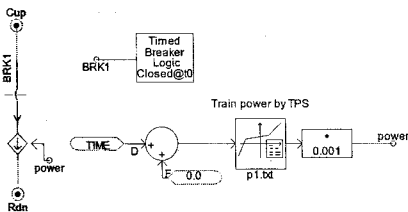


그림 3. 차량 모델링

그림 3의 차량 모델링에서는 차량모델을 전류원으로 표현하였으며, 열차 운행패턴에 따른 소비전류는 TPS를 통해 계산된 열차 위치에 따른 전류 크기로 나타냈다.

2.4 사례연구

차량 운행에 따른 누설전류의 크기를 시뮬레이션하기 위해 그림 4와 같이 3개의 변전소로 구성된 직류 급전계통을 모델로 선정하였다. 변전소간 거리는 5.8[km]이며, 변전소간에 1개의 정차역으로 구성되어 있으며, 변전소간에는 최대 3대의 차량이 운행할 수 있도록 하였다.

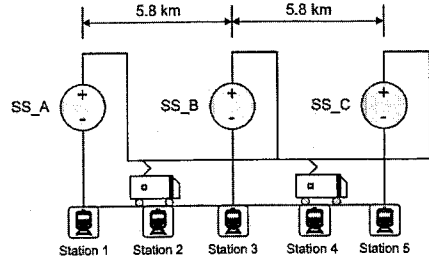


그림 4. 모델 계통

그림 5는 차량운행에 따른 부하전압, 부하전류 및 누설전류의 크기를 나타낸 것이다. 변전소간에 1대의 차량이 기동하여 타행, 재역행, 회생, 정지하는 동안의 변전소 부극에 귀환되는 누설전류의 크기를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 기동시에 최대 전류를 사용하고 있어 급전전압이 강하하고 회생시에는 회생전류로 인해 급전전압이 상승함을 알 수 있다. 누설전류는 양인 경우에는 대지로부터 부극으로 전류가 흘러 들어오는 것을 의미하고 반대로 음인 경우에는 부극으로부터 대지로 전류가 흘러 나감을 의미한다. 그림 5에서도 기동 및 재역행시에는 누설전류와 귀환하여 부극으로 들어오는데 반해 회생시에는 회생전류로 인해 부극을 통해 대지로 누설됨을 알 수 있다.

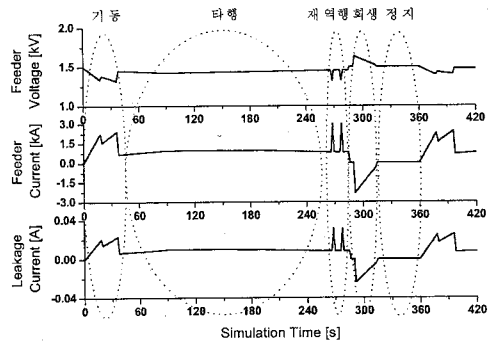


그림 5. 차량운행에 따른 부하전압, 부하전류 및 누설전류(차량 1대 운행)

그림 6은 차량 운행 조건에 따른 누설전류의 크기를 나타낸 것이다. 차량운행 조건은 변전소간에 1대 차량 운행조건, 2대 차량이 동일한 운전패턴으로 운행하는 조건, 2대 차량이 다른 운전패턴으로 운행하는 조건, 그리고 3대 차량이 다른 운전패턴으로 운행하는 조건으로 시뮬레이션을 수행하였다. 1대 차량 운전 조건시에는 최대 28.7mA 누설전류가 발생하고 회생시에는 -24.1mA가 누설됨을 확인할 수 있었다. 이에 반해 2대 이상의 차량이 운전하는 경우에는 부하전류의 증가로 인해 대략 58mA의 누설전류가 발생하였다. 하지만 회생시에는 다른 차량의 역행 등으로 인해 부극을 통한 누설전류의 크기가 줄어들었으며 특히 역행과 회생이 동시에 발생하는 경우에는 감소량이 증가함을 알 수 있다.

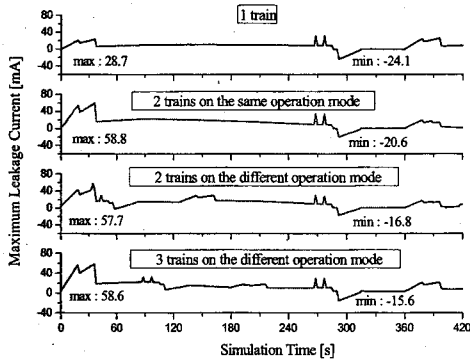


그림 6. 차량운행 조건에 따른 누설전류

그림 7은 누설전류에 영향을 미치는 레일저항과 누설 저항의 크기가 표 1에 제시한 값에 비해 0.1배, 1배, 그리고 10배로 변하는 경우의 누설전류의 크기를 비교하였다. 레일저항의 크기가 0.1배로 감소하는 경우에는 대지누설저항의 크기에 상관없이 10mA 이내로 감소함을 알 수 있다. 반면에 누설저항 크기가 커지는 경우에 누설전류가 감소하는 것을 알 수 있다. 일반적으로 레일 저항은 변전소간의 거리, 레일 종류 등에 따라 결정되기 때문에 그 크기를 쉽게 조절할 수 없기 때문에 레일과 대지간의 절연 확보를 통해 일정 크기 이상의 누설저항을 확보하는 것이 효율적이다.

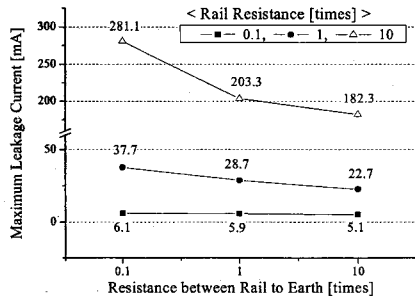


그림 7. 레일저항 및 누설저항 변화에 따른 누설전류

그림 8은 직류 급전시스템에서 단락사고(전차선과 레일 단락)와 지락사고(전차선과 접지 단락) 발생시 사고 전류와 최대 누설전류의 크기를 예측한 것이다. 고장 발생 지점은 변전소 중간지점에서 발생하도록 하였다.

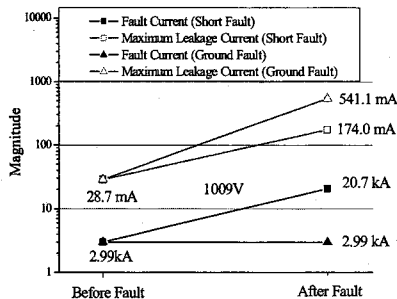


그림 8. 사고(단락, 지락)시 부하전류 및 누설전류

단락 사고시에는 사고전류가 20.7kA까지 상승하는데 반해 최대 누설전류는 28.7mA에서 174.0mA로 대략 6배 정도 증가하였다. 이에 반해 지락 사고시에는 전차선과 대지간의 폐회로가 구성되지 않아 사고전류의 크기는 거의 증가하지 않은데 반해 최대 누설전류는 28.7mA에선 541.1mA로 대략 19배 정도 상승함을 알 수 있다. 따라서 지락 사고시에는 일시적이긴 하나 상당한 크기의 누설전류가 발생하고 이로 인해 인근 금속물 등에 영향이 있을 것이라고 예측할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 열차 운행에 따른 누설전류의 변화를 분석하기 위해 TPS와 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하여 직류 급전시스템을 모델링하고 열차 운행 조건에 따른 동적 시뮬레이션을 수행하였다. 실제통에서의 열차 운행 상황에 유사한 시뮬레이션 수행을 위해 TPS 프로그램에 의해 산출된 차량 위치에 따른 차량 전류소비를 이용하여 가변 급전회로 및 가변 차량부하에 활용하였다.

동적 시뮬레이션을 통해 다양한 차량운행 조건, 레일 저항 및 누설저항의 크기 변화, 그리고 단락사고 및 지락사고시의 누설전류의 크기 변화 및 최대크기를 예측할 수 있었다. 향후에는 직류 급전시스템의 모델을 개선하고 상하행선과 같이 보다 실제통과 유사한 모델계통을 선정하여 누설전류를 예측하여야 한다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

- [1] 정상기, "비절지 급전시스템에서의 레일전위상승과 누설전류 계산", 한국철도학회 추계학술대회, 2006
- [2] 한문섭, "직류급전시스템의 레일전위와 누설전류 관점에서의 설계 파라미터 연구", 한국철도학회 춘계학술대회, 2007
- [3] Ian Cotton, "Stray Current Control in DC Mass Transit Systems", IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005
- [4] 한국철도기술연구원, "도시철도 전력시스템 표준화 연구", 한국철도기술연구원, 2007
- [5] M.T. Soylmez, "Controlling Rail Potential of DC Supplies Rail Traction Systems", Turkey Journal Electrical Engineering, 2006
- [6] 서울특별시지하철공사, "지하철 1-4호선 전력설비 정밀안전진단 보고서", 서울특별시지하철공사, 2005