

9도체 전기철도 모델링을 이용한 고장점 표정 방안 연구

이한상*, 이장무**, 이한민**, 장길수*, 창상훈**

*고려대학교, **한국철도기술연구원

A Study for Fault Location Scheme Using the 9-Conductor Modeling of Korean Electric Railway System

Hansang Lee*, Changmu Lee**, Hanmin Lee**, Gilsoo Jang*, Sanghoon Chang**

*Korea University, **Korea Railroad Research Institute

Abstract - This paper presents a novel fault location scheme on Korean AC electric railway systems. On AC railway system, because there is a long distance, 40 km or longer, between two railway substations, a fault location technique is very important. Since the fault current flows through the catenary system, the catenary system must be modeled exactly to analyze fault current magnitude and fault location. In this paper, before suggestion for the novel scheme of fault location, a 9-conductor modeling technique that includes boost wires and impedance bonds is introduced, based on the characteristics of Korean AC electric railway. After obtaining a 9-conductor modeling, the railway system is constructed for computer simulation by using PSCAD/EMTDC. By case studies, we can verify superiority of a new fault location scheme and suggest a powerful model for fault analysis on electric railway systems.

1. 서 론

1972년 태백선을 시작으로 우리나라 전기철도가 도입된 이래 많은 철도 구간이 전철화됨으로서 최근에는 수도권 광역 전철망, 충북선 전철화, 경부 고속철도 1단계 개통 운행 및 동대구-부산 간 2단계 고속전철 공사 등 철도의 전철화 작업이 지속적으로 추진되고 있다. 그러나 에너지원으로서 전기를 사용하고, 다른 전력계통과 달리 시공간적으로 변화하는 부하 특성에 의하여 지락 및 단락사고가 발생할 확률이 매우 높은 것이 전기철도 시스템의 특징 중 하나이다. 또한, 전기철도 시스템에서의 전기적 사고는 사고 구간에서 운행하는 차량의 운전을 불가능하게 할 뿐 만 아니라, 전체적인 운행에 차질을 빚게 한다는 점에서 무엇보다 심각하다고 할 수 있다. 따라서 전기철도 시스템에서의 전기적 사고는 예방뿐만 아니라 대처가 무엇보다 중요하고, 이에 빠른 대처를 위하여 사고의 위치 파악이 우선되어야 한다.

기존의 교류 전기철도 시스템은 전철 변전소, 급전구분소, 보조급전구분소의 단권변압기마다 고장점 표정 장치를 설치하여, 고장전류를 측정함으로써 사고의 위치를 파악하는 방식을 채택하였다. 기존 고장점 표정 방법의 표정오차는 약 2%로서 변전소와 보조급전구분소, 보조급전구분소와 급전구분소 사이의 거리가 10[km]라는 것을 감안할 때에, 약 200[m]의 표정오차를 가지게 된다. 그러나 계속적인 기술의 발달과 함께 변전소 무인운전화가 지속되고 있는 시점에서 200[m]의 표정오차는 상당히 큰 오차이다.

따라서 본 논문에서 제안하는 새로운 고장점 표정 알고리즘은 전기철도 급전시스템에서 약 1.2[km]마다 설치되어 있는 흡상선에서의 전류를 센서를 이용하여 측정하고, 측정값의 전송과 이를 바탕으로 최종 사고위치를 계

산하는 파악하는 것을 기본 방식으로 한다. 이 알고리즘을 이용하였을 경우, 기존과 같은 표정오차율(2%)을 보인다는 가정 하에, 약 24[m]의 표정오차가 발생할 것으로 예상되며, 이것은 전기철도 시스템에서의 고장점 표정오차를 혁신적으로 개선하게 되고, 사고에 대한 보다 신속한 대처가 가능하게 된다.

이에 본 논문에서는 교류전기철도 모델로서 9도체 모델링을 사용하여 전기철도 급전시스템에 흡상선을 표현하였으며, 구성된 전기철도 모델에서의 여러 사고에 대한 흡상선 전류 분포를 모의하고 해석함으로써 논문에서 제안하는 새로운 고장점 표정방안의 성능을 검증하였다.

2. 교류전기철도 급전시스템

2.1 전차선로

AT 급전방식의 전차선로는 일반적으로 상·하행선 별로 급전선, 전차선, 조가선, 레일, 가공보호선으로 구성되어 있다. 그림 1과 같이, 이들 전차선로는 상·하행선 별로 전차선과 조가선이 수 미터마다 드로퍼로 연결되어 있고, 상·하행선 레일, 가공보호선이 서로 연결되어 있다. 이런 시스템을 해석하기 위하여 기존에는 상행 급전선, 하행 급전선, 상행 전차선도체군(전차선+조가선), 하행 전차선 도체군, 그리고 레일 도체군(상·하행 레일, 상·하행 가공보호선)의 5개 도체군으로 모델링하는 것이 일반적이었다. 그러나 본 논문에서 제안하는 고장점 표정방식은 레일에서 전차선으로 흡상되는 사고전류의 해석에 초점을 맞추고 있기 때문에, 레일 도체군을 제외한 4개의 도체군에 대한 등가화 과정은 그대로 적용하지만, 레일 도체군을 상·하행 레일과 상·하행 보호선, 그리고 매설접지선으로 분리하여 전차선로를 구성하였다.

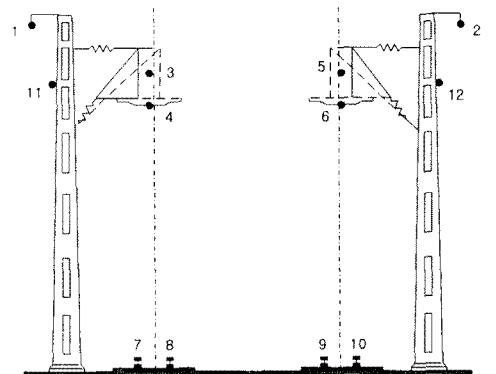


그림 1. 전차선로의 기하학적 구조

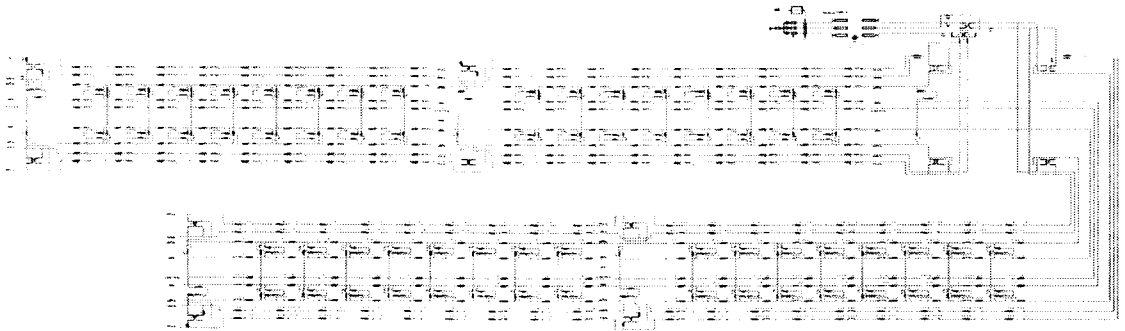


그림 3. 9도체 교류전기철도 모델링

2.2 토공공간 전차선로

논문에 제시하는 교류철도 모델링은 그림 2와 같은 기하학적 구조를 가진 토공공간에 대한 모델링만을 수행하였다. 교량구간과 터널구간의 경우, 전체 구간에 대하여 작은 비율을 차지하기 때문이다. 표 1은 토공구간에서 전차선로를 구성하는 도체들의 특성을 나타낸 것이다. 그림 2의 기하학적 배치도와 표 1의 파라미터를 이용하여 등전위 도체 등가화를 수행함으로써 9도체 전기철도 모델링을 제안한다.

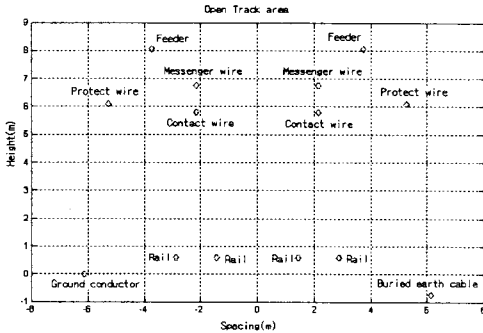


그림 2. 토공구간의 전차선로 기하학적 배치도

표 1. 토공구간 전차선로 도체 특성

선로	직류저항 [Ω/km]	재질	단면적 [mm^2]	지름 [cm]	투자율
급전선	0.1173	Cu150 mm^2	150.0	1.36	1.0
조가선	0.4474	Bz65 mm^2	65.49	1.05	1.0
전차선	0.1173	Cu150 mm^2	150.0	1.36	1.0
레일	0.0126	60 kg/m	76.9	7.7	100
가공보호선	0.239	Cu75 mm^2	75.25	1.11	1.0
접지선	0.484	Cu38 mm^2	37.16	0.78	1.0

3. 교류 전기철도 시스템 시험계통

교류 전기철도 중 고속전철 시스템은 단상 25kV/50kV 급전방식에 기반하고 있으며, 단상의 대용량 전력을 공급받기 위하여 스코트 변압기를 통하여 3상 전력계통과 연계되어 있다. 두 개의 단상으로 변환된 전력은 급전선, 전차선, 레일을 통하여 철도차량과 연결된다. 단권변압기는 약 10[km] 정도의 간격으로 설치되며 이곳에 상·하행 선을 연결하는 개폐기가 함께 설치된다. 변전소와 변전소 거리는 약 50[km]이고 중간지점은 양 변전소의 전압위상이 다르기 때문에 개폐설비로서 전기적으로 구분하여 운전하고 있는데 이것은 변전소 고장 시 인근 변전소에서 병렬급전을 하는 역할을 하기도 한다.

3.1 교류전기철도 시스템 전차선로 모델링

EMTDC를 이용하여 그림 3과 같은 교류전기철도 시스템을 모델링하였다. 그림 3은 하나의 변전소에 대한 한 구간의 전기철도 시스템을 모델링한 것이다. 그림 4에 전차선로 시스템을 자세히 나타내었다. 기존의 전차선로 모델과는 달리, 레일과 보호선 사이의 흡상선과 매설접지선과 보호선 사이의 임피던스 본드가 표현되어 있음을 알 수 있다. 전차선로를 구성하기 위한 각 도체의 파라미터는 그림 표 2와 같다.

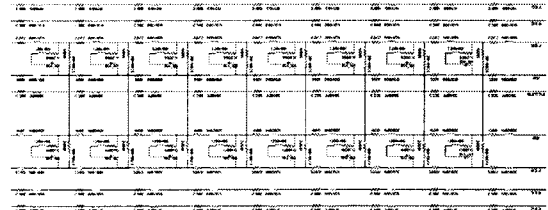


그림 4. 9도체 교류급전시스템 전차선로 모델링

표 2. 도체별 단위 km당 임피던스

도체	저항 [Ω/km]	인덕턴스 [H/km]	비고
급전선	0.0905	0.000973	
전차선도체군	0.0880	0.001345	
보호선	0.2060	0.001223	
레일	0.3250	0.002069	
매설접지선	0.2715	0.001255	
흡상선	0.2715	0.001255	10[m]
임피던스본드	0.2715	0.001255	7[m]

4. 사례연구

그림 3의 모델을 바탕으로 전기철도 시스템에서의 사고를 상정하고 흡상선에 설치한 전류계에서 측정되는 결과를 바탕으로 사고위치를 계산하도록 하였다. 상정하는 사고는 전차선 지락사고, 급전선 지락사고, 그리고 철도차량이 구간 내에 있는 경우의 사고를 모의함으로써 본 논문에서 제안하는 고장점 포팅 방안을 검증한다.

4.1 M상 16.6km 지점 전차선지락사고 모의

M상 16.6km 지점에 전차선 지락사고를 모의하였다. 지락사고는 모의 시작 후 0.2[sec]에 발생하여 0.1[sec] 동안 지속된다. 사고의 발생에 따른 흡상선 전류계에서 측정하는 전류의 크기 파형과 수치는 그림 5와 표 3과 같다. 최대 전류값을 나타내는 두 흡상선을 결정하고, 두 흡상선에 측정된 전류비를 이용하여 두 흡상선 사이의 사고지점을 결정한다. 모의 결과 표정오차는 5.5[m]이다.

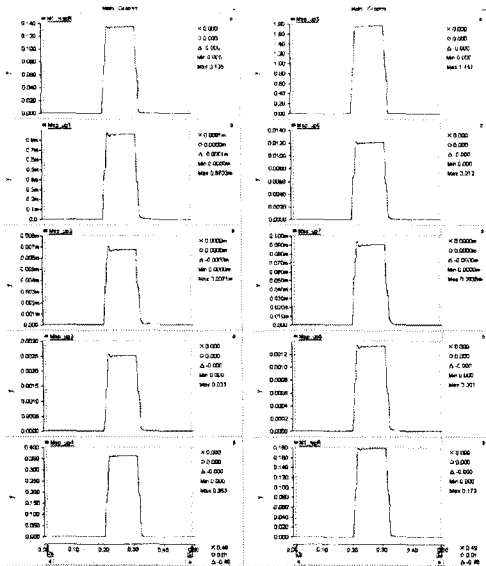


그림 5. SP-SSP 구간 전차선 지락사고에 의한 고장전류 분포

표 3. M상 16.6[km] 전차선 지락사고 모의 결과

흡상선	흡상선 전류(kA)	흡상선	흡상선 전류(kA)
sp-ssp #1	0.8703e-3	sp-ssp #2	0.0071e-3
sp-ssp #3	0.003	sp-ssp #4	0.363
sp-ssp #5	1.757	sp-ssp #6	0.012
sp-ssp #7	0.936e-3	sp-ssp #8	0.001
사 고 전 류		2.497	

$$1.2(km) \times \frac{1.757}{1.757 + 0.363} = 0.9945(km) \quad (1)$$

$$15.6 + 0.9945 = 16.5945(km)$$

4.2 M상 16.6km 지점 급전선 지락사고 모의

M상 16.6km 지점에 급전선 지락사고를 모의하였다. 지락사고는 4.1절에 상정한 사고와 같은 사고를 상정하였다. 모의 결과 표정오차는 5.5[m]이다.

표 4. M상 16.6[km] 급전선 지락사고 모의 결과

흡상선	흡상선 전류(kA)	흡상선	흡상선 전류(kA)
sp-ssp #1	0.6151e-3	sp-ssp #2	0.0135e-3
sp-ssp #3	0.003	sp-ssp #4	0.395
sp-ssp #5	1.912	sp-ssp #6	0.013
sp-ssp #7	0.110e-3	sp-ssp #8	0.001
사 고 전 류		2.718	

$$1.2(km) \times \frac{1.912}{1.912 + 0.395} = 0.9945(km) \quad (2)$$

$$15.6 + 0.9945 = 16.5945(km)$$

4.3 철도부하에 의한 고장점 표정 영역

본 절에서는 차량부하의 유무에 따른 고장점 표정 영역을 위한 모의를 수행하였다. 본 절의 모의는 철도차량이 없는 경우와, 사고의 오른쪽에 차량이 존재하는 경우(Case1), 사고의 왼쪽에 차량이 존재하는 경우(Case2)를 비교하였다. 차량부하는 41[Ω]의 등가저항으로 모의에 반영하였고, 사고는 6.6[km]지점에 상정하였다. 전체 모의시간이 5초 이므로 차량의 공간적 이동은 무시하였다.

표 5. 차량부하 유무 및 위치에 따른 고장점 표정

흡상선	흡상선 전류(kA)			흡상선	흡상선 전류(kA)		
	무부하	Case 1	Case 2		무부하	Case 1	Case 2
#1	0.00058	0.00058	0.00059	#2	0.00003	0.00019	0.002
#3	0.0001	0.002	0.279	#4	0.010	0.278	0.279
#5	1.430	1.449	1.436	#6	1.430	1.430	1.436
#7	0.010	0.010	0.010	#8	0.00065	0.00066	0.00066
사 고 전 류				무부하			3.369
				Case 1			3.369
				Case 2			3.386

$$\text{무부하} \quad 1.2(km) \times \frac{1.430}{1.430 + 1.430} = 0.600(km) \quad (3)$$

$$6.0 + 0.600 = 6.600(km)$$

$$\text{Case 1} \quad 1.2(km) \times \frac{1.447}{1.447 + 1.430} = 0.604(km) \quad (4)$$

$$6.0 + 0.604 = 6.604(km)$$

$$\text{Case 2} \quad 1.2(km) \times \frac{1.430}{1.430 + 1.430} = 0.600(km) \quad (5)$$

$$6.0 + 0.600 = 6.600(km)$$

5. 결 론

본 연구에서는 교류급전시스템을 분석하고 EMTDC를 통하여 급전시스템의 모델을 구성하였다. 기존의 교류급전시스템은 전차선로를 모델링함에 있어서 다섯 개의 도체로 등가, 축약하여 분석하였다. 그러나 교류급전시스템에서의 사고에 대한 고장점 표정을 흡상선에서의 전류값을 통하여 구현하려는 알고리즘의 제안이 본 논문의 목적이기 때문에, 레일 도체군을 두 개의 보호선, 두 개의 레일, 매설접지선으로 분리하여 교류급전시스템의 모델을 제안하였다.

본 논문에서 제안하는 고장점 표정의 기본 원리는, 사고에 따른 흡상선 전류의 검출을 통한 고장점 표정은 가장 큰 사고 전류가 검출되는 흡상선과 그 흡상선 좌우의 전류값 중 더 큰 값을 가지는 흡상선을 채택하여 그 사이에서 사고가 있음을 확정하고, 두 흡상선에서 검출된 전류값의 역수비에 따라 사고 위치를 결정하는 방식을 취하고 있다.

제 4 장의 사례연구를 통하여 새로운 고장점 표정의 알고리즘의 검증이 수행되었다. 가장 많은 사고가 발생하는 전차선에 대하여, 지락사고를 M상 상행선 16.6[km] 지점에 상정하고 모의함으로써, 새로운 고장점 표정방안의 표정오차가 수 미터 범위로 현저히 저감되었음을 알 수 있다. 또한, 전차선 지락사고와 같이 급전선 지락사고를 상정하여 모의함으로써 급전선지락사고 또한 전차선 지락사고와 같은 방식으로 고장점 표정이 가능함을 검증하였다. 또한, 본 논문에서는 새로운 고장점 표정 알고리즘의 유용성을 검증하였다. 이에 본 연구는 기존의 200m 오차를 가지는 기존의 고장점 표정 방식에 대하여, 본 알고리즘을 제안함으로써 고장점 표정 오차의 현저한 저감의 실현이 가능할 것으로 기대한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이한민, 오광해, 이상무, 창성훈, 장길수, 권세혁, "EMTDC에 의한 교류 전철급전시스템 사고 해석," 대한전기학회논문지 52A권 9호, pp.521-527
- [2] 이한민, 오광해, 이상무, 박현준, 장길수, 권세혁, "전차선로 시스템의 축약 등가 선로정수에 관한 연구," 대한전기학회논문지, 53A권 8호, pp.421-431
- [3] "PSCAD/EMTDC를 이용한 도시철도 교류급전시스템 해석 모델 개발 및 적용," 한국철도기술연구원
- [4] "교류 전기철도 시스템 모델링 및 고장 해석," 한국철도기술연구원