

보호선 통합에 따른 선로정수 측면의 고장점 표정장치 동작에 관한 해석

이한민*
한국철도기술연구원

Analysis of the operation of Fault Locator in aspect of Line Constants by unifying Protect Wires

H.M. Lee S.H. Chang M.S. Han
Korea Railroad Research Institute

Abstract - when a fault occurs, we need the fault locator to find out the location of the fault quickly. The fault locator can find out the exact location of the fault through the line constants of the catenary system. If the configuration of the catenary system is modified, the line constants is also changed. Therefore, this paper analyzes the error of the operation of the fault locator by the simulation.

1. 서론

AT급전방식은 일반적으로 변전소(SS)에서 급전구 분소(SP)까지 30km~50km 정도의 급전거리를 변전소에서 단독으로 급전하고 있으며, SP에서 연장급전 하는 경우는 급전구간의 길이가 길어지게 된다.

이와 같이 광범위한 급전회로의 전차선 설비에 지락 또는 단락 등의 사고가 발생하면 사고지점에는 고장복구가 종료될 때까지 급전불능이 되어 열차의 정상적인 운행에 지장을 초래하게 되므로 사고지점을 신속하게 탐지하는 것은 상당히 중요하다. 광범위한 급전구간을 인력에 의존하여 고장점 탐색을 할 경우 많은 시간과 인원이 필요하게 되며 고장복구시간의 지연으로 이어지게 된다. 고장점 탐색은 전차선로의 선로정수를 통해 정확한 위치를 얻어낼 수 있다. 이러한 선로정수는 전차선로를 구성하는 도체들의 특성과 구조가 바뀌면 변경된다. 즉, 고장점표정장치의 동작에 의한 고장지점이 오차가 발생할 것으로 예측할 수 있다.

교류 전철급전시스템은 여러 도체들로 구성되어 있는 복잡한 시스템이다. 이 중에서 보호선은 어떠한 원인에 의해 급전선 및 전차선 지지배자의 섬락이 발생한 경우 사고전류 통로를 급속회로로 직접 구성되도록 함으로써 지지물 등의 접지전위 상승을 억제하고 지지물에 첨가 또는 근방에 부설되어 있는 전등, 동력, 신호, 통신 등의 저압 약전류 회선과 기기의 절연 파괴를 방지하고, 변전소에서 사고검출을 용이하게 하여 신속, 정확한 회로 차단의 보호동작에 기여한다.

따라서 본 연구에서는 전철 2복선, 3복선 구간에서의 비절연보호선(Cu75mm²)을 각 선별로 시설할 경우와 급전구별 통합1선(상선군1, 하선군1)으로 시설했을 때, 고장점표정장치의 동작에 관한 기술적 검토를 하고자 한다.

비절연보호선을 통합하거나 통합하지 않을 때는 선로정수 값들이 변경될 것이다. 그러므로 고장점 표정장치의 동작에 오차가 발생할 것이다. 따라서 본 시스템에 대해서 비절연 보호선의 통합 전·후의 전차선로 선로정수 값들을 예측하여 그 오차율이 얼마나 발생할 것인가를 분석하였다.

2. 전차선로 시스템 구조

그림 1은 전차선로 시스템의 기하학적 구조를 나타낸다. 전차선로 시스템은 다수의 도체로 구성되어

있으나 전차선과 조가선은 드로퍼로 연결되어있고 상·하행 레일과 가공보호선, 접지선이 공통으로 연결되어 있으므로 결국, 도체들을 5개의 도체군으로 나타내게 된다. 첫 번째 도체군은 상행 급전선(1), 두 번째 도체군은 하행 급전선(2), 셋째 도체군은 상행 전차선(4)과 하행 조가선(3), 넷째 도체군은 하행 전차선(6)과 하행 조가선(5)으로 구성되고 다섯째 도체군은 레일(7,8,9,10), 가공보호선(11,12), 접지선(13,14)으로 공동접지 되어있다.

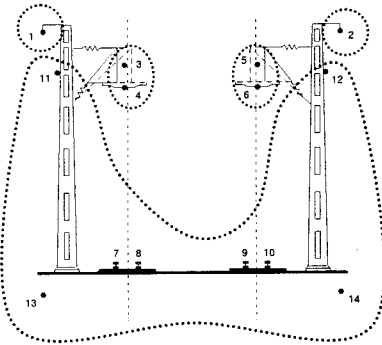


그림 1. 전차선로의 기하학적 구조

쉽게 이해를 돕기 위해 복선보다는 간단한 단선으로 현실감 있도록 도체군으로 구성된 전차선로를 나타내었다.

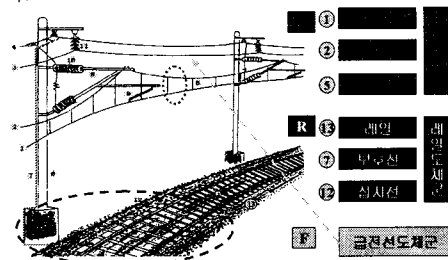


그림 2. 전차선로 시스템(단선)

3. 모든 도체 선로정수 계산

단위 길이 당 자기 임피던스는 내부 자기임피던스와 외부 자기임피던스의 합이다.

$$Z_{ii}' = Z_{Aii} + Z_{Eii} \quad (1)$$

여기서

Z_{Aii} 도체의 단위 길이 당 내부 임피던스

Z_{Eii} 대지 귀환(earth return)을 고려한 도체의 단위길
이 당 외부임피던스

직렬 임피던스 행렬의 대각 성분인 자기 임피던스는
식(2)와 같다.

$$Z'_{ii} = (R'_{i-IN} + \Delta R'_{ii}) + j\left(\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{2h_i}{r_i} + X'_{i-IN} + \Delta X'_{ii}\right) \quad (2)$$

비대각 성분인 상호 임피던스는 식 (3)과 같다.

$$Z'_{ik} = Z'_{ki} = \Delta R'_{ik} + j\left(\omega \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ik}}{d_{ik}} + \Delta X'_{ik}\right) \quad (3)$$

또한 식에 포함된 $\Delta R'$ 과 $\Delta X'$ 은 대지 귀환효과를 고
려한 항으로 각도 ϕ 와 정수 a 의 함수이다. 각 4개의
연속된 항들이 반복되는 형태이고, 전력 주파수에 대해
서는 몇 개의 항만 필요하지만, 고주파수와 선간 공간이
넓어질수록 더 많은 항을 필요로 하게 된다.

각도 ϕ 는 자기 임피던스 경우 $\phi=0$ 이 되고 상호 임피던
스인 경우에는 $\phi=\phi_{ik}$ 가 된다. 정수 a 는 다음과 같다.

$$a = 4\pi\sqrt{5} \cdot 10^{-4} D \sqrt{\frac{f}{\rho}}$$

여기서, D = 두 도체사이의 거리(m)
 ρ = 대지 저항 (Ωm)

4. 전차선로 등가 축약 모델

여러 도체들 중에서 등전위 도체로 분류되어 그
그룹된 도체들을 하나의 도체로 등가화한다. 그림
3은 n 개의 도체들 중에서 그중 n 도체와 $n-1$ 도체가
전기적으로 등전위 도체로 분류되어 하나의 도체로
등가화되는 그림이다.

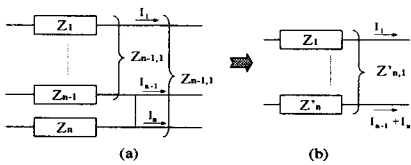


그림 3. 전차선로 임피던스의 등가화

그림 3의 (a)그림을 일반적인 행렬 관계로 나타내
면 식(4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_{n-1} \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & \cdots & Z_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n-1,1} & \cdots & \cdots & Z_{n-1,n} \\ Z_{n,1} & \cdots & \cdots & Z_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_{n-1} \\ I_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

$(n-1)$ 도체와 n 도체가 서로 단락되어 있다면 전기
적으로 하나의 도체군으로 볼 수 있다. 그리고 등전
위가되므로 $V_{n-1} = V_n$ 이 된다. 따라서 두도체를

하나의 도체군으로 만들기위해 V_{n-1} 에 해당하는 임
피던스 행요소들에서 V_n 에 해당하는 임피던스 행
요소들을 뺀다. 즉 식(5)와 같이 계산된다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_{n-1} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & \cdots & Z_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n-1,1} & \cdots & \cdots & Z_{n-1,n} \\ Z_{n-1,1} - Z_{n,1} & \cdots & \cdots & Z_{n-1,n} - Z_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_{n-1} \\ I_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

V_{n-1} 과 V_n 의 두 도체가 하나의 등가 도체가 되면 각각
에 흐르는 전류는 하나의 전류로 합쳐져야 한다. 따라서
이러한 물리적 개념을 행렬 관계로 나타내면 식 (6)이
된다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_{n-1} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1,1} & Z_{1,2} & \cdots & Z_{1,n-1} - Z_{1,n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n-1,1} & \cdots & \cdots & Z_{n-1,n-1} - Z_{n-1,n} \\ Z_{n-1,1} + Z_{n,n} - 2 \times Z_{n-1,n} & \cdots & \cdots & -I_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_{n-1} + I_n \\ I_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기서 n 행 n 열의 요소들을 소거하기 위해 kron의 행
렬 축약 공식을 적용한다. 그리고 등가 도체의 자기 임
피던스와 등가 도체와 다른 도체들과의 상호임피던스에
소거된 도체의 정보가 들어가게 된다. 결국 등가 도체의
자기 임피던스와 상호 임피던스는 식 (7)과 같이 표현된
다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \vdots \\ V_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{1,1}' & \cdots & Z_{1,n-1}' \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n-1,1}' & \cdots & Z_{n-1,n-1}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_{n-1} + I_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서,

$$Z_{1,1}' = Z_{1,1} - \frac{(Z_{n-1,1} - Z_{n,1})(Z_{1,n-1} - Z_{1,n})}{Z_{n-1,n} + Z_{n,n} - 2 \times Z_{n-1,n}}$$

$$Z_{n-1,n-1}' = Z_{n-1,n-1} - \frac{(Z_{n-1,n-1} - Z_{n,n-1})(Z_{n-1,n-1} - Z_{n,n-1})}{Z_{n-1,n} + Z_{n,n} - 2 \times Z_{n-1,n}}$$

$$Z_{1,n-1}' = Z_{1,n-1} - \frac{(Z_{n-1,n-1} - Z_{n,n-1})(Z_{1,n-1} - Z_{1,n})}{Z_{n-1,n} + Z_{n,n} - 2 \times Z_{n-1,n}}$$

$$Z_{n-1,1}' = Z_{n-1,1}'$$

5. 선로정수에 의한 고장점 표정장치 동작해석

본 연구에서는 전철 2복선, 3복선 구간에서의 비절연
보호선을 각 선별로 시설할 경우와 급전군별 통합1선(상
선군1, 하선군1)으로 시설했을 때, 고장점 표정장치의 동
작에 관한 연구이다. 따라서 레일을 하나의 도체군으
로 등가화 하였을 때 임피던스의 차이를 연구하였다.

2복선, 3복선의 전차선로의 단면도는 다음과 같이
가정하였다.

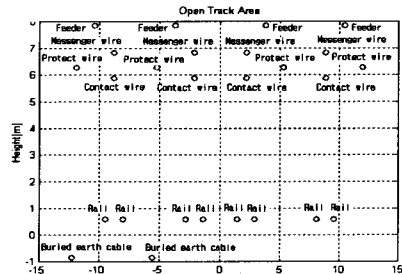


그림 4. 2복선 전차선로 단면도

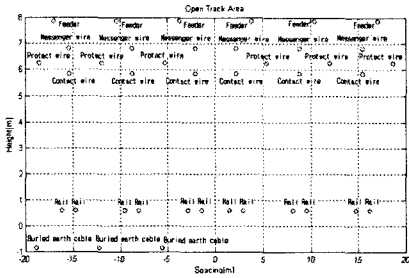


그림 5. 3복선 전차선로 단면도

도체 특성은 다음과 같다.

표 1. 도체 특성

파라미터	직류저항 [Ω/km]	계절	단면적 [mm ²]	지름 [cm]	투과율 (Permeability)
Feeder	0.118	Cu150mm ²	152.8	1.60	1
Contact wire	0.1173	Cu150mm ²	150.0	Hight:1.36 Dia:15.1	1
Messenger wire	0.4474	Bz65mm ²	65.49	1.05	1
Rail	0.0126	60kg/m	76.9	7.7	100
Protective wire	0.239	Cu75mm ²	75.25	1.11	1
	0.354	ACSR93mm ²	93	1.088	1
Buried ground wire	0.484	Cu38mm ²	37.16	0.78	1
ground wire	0.229	GV80mm ²	80	1.01	1

다음은 2복선 및 3복선에 대해서 각 선별로 비절연 보호선을 시설할 경우와 급전군별 통합 1선을 시설하였을 때, 등가 도체군으로 축약된 전차선로의 레일 도체군 임피던스를 나타내면 다음과 같다.

표 2. 레일 도체군 임피던스

	레일 도체군 임피던스	
2복선	각 선별로 설치	0.098 + j 0.411
	급전군별 통합1선 설치 (상선군1, 하선군1)	0.107 + j 0.439
3복선	각 선별로 설치	0.085 + j 0.367
	급전군별 통합1선 설치 (상선군1, 하선군1)	0.093 + j 0.395

거리에 따른 레일 도체군 임피던스의 변화를 살펴보면 다음과 같다.

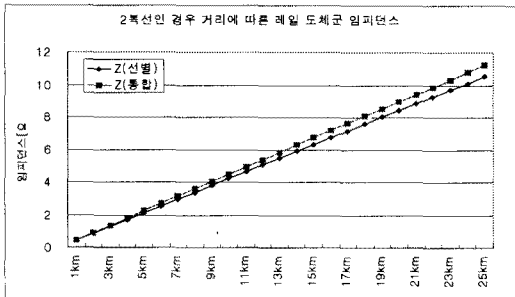


그림 6. 보호선 선별·통합 시설에 의한 레일도체군 임피던스 비교 (2복선)

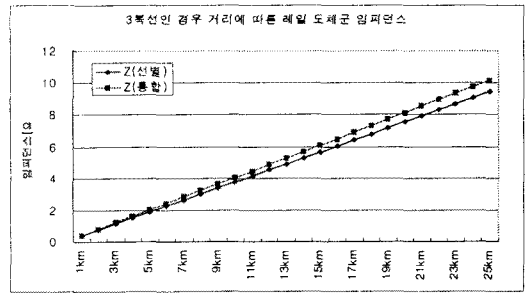


그림 7. 보호선 선별·통합 시설에 의한 레일도체군 임피던스 비교 (3복선)

6. 결론

2복선과 3복선의 경우 거리가 증가하면서 각 선별 설치와 급전군별 통합 1선 설치에 대한 레일 도체군 임피던스의 차이가 발생을 하였다. 그것은 위에 있는 표와 그림으로 확인 할수 있었으며 그 오차율을 살펴보면 다음과 같다.

2복선인 경우 각 선별로 설치와 급전군별 통합1선 설치에 대한 레일 도체군 임피던스 오차율은 6.07%이며 3복선인 경우는 7.17%이다. 이것은 고장점 표정 장치가 동작할 때 이 오차를 만큼 오차가 발생한다는 것을 의미한다. 따라서 급전군별 통합 1선으로 시설을 하게 된다면 고장점 표정 장치의 파라미터 정정이 있어야 할 것이다.

[참고 문헌]

- [1] 이한민, 오광해, 이장무, 창상훈, 장길수, 권세혁 “전차선로 시스템의 5 도체 등가 축약 모델링”, 대한전기학회 논문지 52A권 12호, pp.684~690, 2003
- [1] 이한민, 오광해, 장길수, 권세혁 “EMTDC에 의한 교류 전철급전시스템 사고 해석”, 대한전기학회 논문지 52A권 9호, pp.521~527, 2003
- [3] 이한민, 오광해, 김길상, 창상훈 “선로정수 예측을 위한 전차선로 등가 회로 모델에 대한 연구”, 2000년 한국철도학회 추계학술대회 발표논문, pp. 613-619
- [4] 이한민, 오광해, 이장무, 창상훈, “5도체군 등가모델을 이용한 선로정수 예측에 관한 연구”, 2001년 대한전기학회 춘계학술대회 발표논문, pp. 443-445
- [5] 오광해, 이한민, 장동욱, 김주락 “공동접지방식 급전시스템의 고조파 해석”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.668~695, 2000
- [6] 오광해, 이한민, 창상훈 “경부고속철도 시험선로의 고조파 해석을 위한 10단자 회로망 모델”, 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.429~432, 2001