

변전소와 차량간의 동기화를 통한 실시간 전차선로 임피던스 예측 기법 연구

A Study on Real Time Catenary Impedance Estimation Technique using the Synchronized Measuring Data between Substation and Train

정 호 성*
(Hosung Jung)

Abstract - This paper proposed a new real time catenary impedance estimation technique using synchronized power data from the measured data of operating vehicle and substation for catenary protective relay and fault locator setting. This paper presented estimation equation of catenary impedance using synchronized power data between substation and vehicle of AT feeding system for the performance verification of the proposed technique. Also AC feeding system is modeled through power analysis program and performance was verified through simulation according to various load changes. We verified that average 2.38%(distance equivalent 23.8 m) error appeared between the proposed estimation equation of catenary impedance and power analysis program simulation output in no connection double track system between up track and down track. Furthermore, We confirmed that estimation error is bigger depending on the increasing the distance from substation and vehicle impedance using only using vehicle current when calculating vehicle impedance in connection double track system between up track and down track. But, We confirmed that the proposed technique estimated accurately catenary impedance regardless of vehicle impedance and distance from substation.

Key Words : AT feeding system, AT power simulation, Real time catenary impedance estimation, Synchronized measuring power data

1. 서 론

국내 교류전기철도의 급전계통은 전압강하 및 선로손실을 최소화하고 유도장에 감소에 장점이 있는 AT (Autotransformer) 급전방식을 표준으로 채택하고 있다. 하지만 AT급전방식의 경우 AT의 전류흡상(電流吸上)특성으로 인해 변전소에서 보는 전차선로의 임피던스 크기가 거리에 비례하지 않는 특성이 나타난다. 이로 인해 교류급전계통의 주보호 시스템인 임피던스 계전기 및 리액턴스 방식의 고장점 표정장치의 설정값 정정에 어려움이 있다. 따라서 교류 급전계통의 보호의 신뢰성을 높이기 위해서는 거리에 따른 전차선로 임피던스를 정확히 예측하는 것이 매우 중요하다[1,2].

일반적으로 보호계전기 정정을 위한 전차선로 임피던스는 전차선, 조가선, 레일, 급전선 등 각종 전선의 기본적인 전기적 사양데이터와 전차선로의 높이, 장력 등 시공 정보(표준장주도)를 바탕으로 하여 Carson-Pollazek 계산식을 통해 예측하고 있다. 이러한 방식은 전차선로를 구성하는 정보를 바탕으로 해당 구간의 전차선로 임피던스의 단위 길이당(km) 전차선로 임피던스의 대푯값을 예측할 수 있으나 토공 구간, 교량구간, 터널구간 등 다양한 전차선로의 설치 조건을 모두 만족할 없는 단점이 있다[3-6]. 이를 개선하기 위해

실제 운영노선의 전차선로 임피던스를 예측하기 위해서 인공지락 시험장치 등과 같이 전차선로 임피던스를 측정하기 위한 별도의 장치를 제작하고 전차선로를 인위적으로 단락(지락)시켜 임피던스를 예측하는 기법이 일부 적용되고 있다. 이러한 예측 기법은 실제 운영 노선의 전차선로에서 현장 측정을 통해 값을 예측하기 때문에 기존의 Carson-Pollazek 계산식에 비해 보다 실질적인 값을 예측할 수 있을 뿐만 아니라 변전소로부터 특정 위치까지의 임피던스 크기도 예측할 수 있다. 하지만 인공지락 시험장치 등과 같이 전차선로 임피던스 측정장치를 이용하는 방식은 전차선로를 인위적으로 단락(지락)시키므로 큰 단락(지락)전류로부터 설비 피해를 최소화하기 위하여 전류제한장치를 추가하여 적절한 크기로 전류를 제한해야 한다. 또한 열차 운행시간대에는 전차선로 임피던스 측정시험을 수행할 수 없으며, 보다 정밀한 거리별 임피던스 예측을 위해서는 많은 개소에서 단락(지락)시험을 수행해야 하는 문제점이 있다[7,8].

따라서 본 논문에서는 교류 급전계통에서 운행하고 있는 차량의 전력(전압, 전류) 계측값과 변전소의 전력(전압, 전류) 계측값을 실시간으로 취득하여 동기화하고, 동기화된 전력데이터를 기반으로 거리별 전차선로 임피던스를 예측하는 기법을 제안하고자 한다. 제안한 기법은 운행되는 열차를 이용하여 실시간으로 거리별 전차선로 임피던스 크기를 예측할 수 있는 기법으로 열차 운행 중단 없이 전차선로 임피던스를 측정할 수 있어 급전계통의 변경 및 전차선로 마모 등으로 인한 전차선로 임피던스 크기 변화를 수시로 점검할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서 제안한 기법의 성능을

* Corresponding Author : Korea Railroad Research Institute, Korea

E-mail : hsjung@krii.re.kr

Received : August 1, 2013; Accepted : September 6, 2013

검증하기 위해 AT 교류급전계통에 대해 변전소와 차량간의 동기화된 전력데이터를 이용한 전차선로 임피던스 예측식을 제시하였으며, 전력해석 프로그램을 통해 AT 교류급전계통을 모델링하고 다양한 부하 변화에 따른 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제시한 기법과의 결과를 비교하였다.

2. 기존 전차선로 임피던스 측정기법

기존의 전차선로 임피던스 예측은 전차선로를 구성하는 전차선로 가선방식(국내 표준은 심플 커티너리 방식임)과 전차선로를 구성하는 전차선, 조가선, 레일, 급전선 등 각종 전선의 기본적인 전기적 사양데이터와 전차선로의 높이, 장력 등 시공 정보(표준 장주도)를 바탕으로 해당 구간의 전차선로 임피던스 값을 Carson-Pollazek 계산식을 통해 예측하였다. 이러한 계산방식은 전차선로를 구성하는 정보를 바탕으로 해당 구간의 전차선로 임피던스의 단위 길이당(km) 임피던스의 대푯값을 예측할 수 있으며, 예측된 전차선로 임피던스는 교류급전용 보호에 사용되는 임피던스 계전기의 정정에 활용된다[3-6].

기존의 Carson-Pollazek 계산식을 통해 예측한 임피던스는 단위 길이당(km) 전차선로 임피던스 대푯값으로 토공구간, 교량구간, 터널구간 등 다양한 전차선로의 설치 조건을 모두 만족할 수 없기 때문에 실제 전차선로의 임피던스 예측하기 위해서 인공지락 시험장치 등과 같이 전차선로 임피던스를 측정하기 위한 별도의 장치를 제작하고 전차선로를 인위적으로 단락(지락)시켜 전차선로의 임피던스를 예측하는 기법이 제안되었다. 이러한 예측 기법은 실제 운영노선의 전차선로에서 현장 측정을 통해 예측하기 때문에 기존의 Carson-Pollazek 계산식에 비해 보다 실질적인 값을 예측할 수 있으며, 변전소로부터 거리에 따른 임피던스 크기도 예측할 수 있다. 하지만 인공지락 시험장치 등과 같은 전차선로 임피던스 측정장치는 그림 1에서와 같이 전차선로를 인위적으로 단락(지락)시키므로 큰 단락전류가 흐를 수 있어 이러한 큰 단락전류로부터 설비 피해를 최소화하기 위해 적절한 크기의 전류로 제한하기 위한 전류제한장치(current limiting device)를 추가해야 한다.

이러한 방식은 원하는 위치마다 단락(지락)시험을 통해 변전소로부터 거리별 임피던스를 예측할 수 있지만 인위적인 단락(지락)시험에서 발생하는 대전류를 제한하기 위해 전류제한장치로 인한 임피던스 크기에 오차가 발생할 수 있

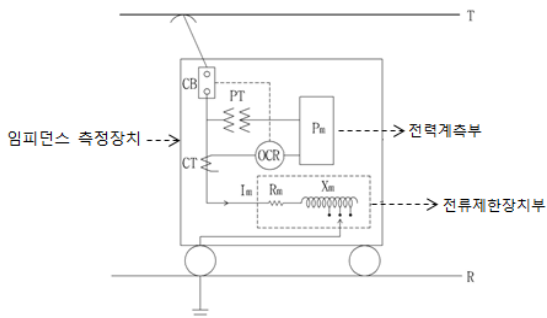


그림 1 기존 전차선로 임피던스 측정장치 구성도
Fig. 1 Configuration of the catenary impedance measurement system

으며, 전차선로의 계통의 구성 및 전차선 마모 등 전차선로 임피던스에 영향을 주는 요소가 변화할 때마다 수시로 단락(지락)시험을 수행해야 하는 단점이 있다. 특히 실제 운행 노선에서의 시험을 수행해야 하므로 열차 운행시간대에는 전차선로 임피던스 측정시험을 수행할 수 없으며, 보다 정밀한 거리별 임피던스 예측을 위해서는 많은 개소에서 단락(지락)시험을 수행해야 하는 문제점이 있다[7,8].

3. 변전소와 운행차량간의 동기화를 통한 실시간 전차선로 임피던스 예측 기법

본 논문에서 제시한 전차선로 임피던스 예측 기법은 교류 급전계통에서 운행하고 있는 차량의 전력(전압, 전류) 계측값과 변전소의 전력(전압, 전류) 계측값을 실시간으로 취득하여 동기화하고, 동기화된 전력데이터를 기반으로 실시간으로 전차선로 임피던스를 예측하는 기법이다. 변전소와 운행 차량의 전력데이터를 확보하기 위해서는 그림 2에서와 같이 변전소의 전력데이터와 운행차량의 전력데이터(위치정보 포함)를 계측, 송신하기 위한 계측부와 계측된 데이터로부터 전차선로 임피던스를 예측하기 위한 연산부로 시스템이 구성되어야 한다.

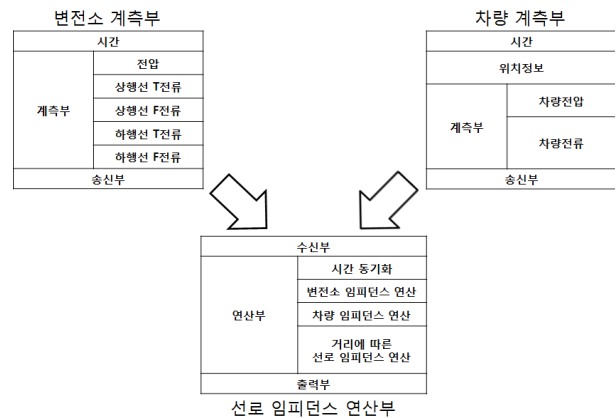


그림 2 제안한 전차선로 임피던스 예측 시스템
Fig. 2 The proposed catenary impedance estimation system

3.1 상하타이 미결선 교류 급전계통에서의 전차선로 임피던스 예측

그림 3은 AT 교류급전방식 복선계통을 나타낸 것으로 급전구분소에서 상행선과 하행선의 전차선과 급전선을 연결하지 않은 상하타이 미결선 복선 급전계통을 나타낸 것이다. 차량이 상행선에서 운행되는 경우에 변전소 설치된 상행선 AT와 하행선 AT에 모두 전류가 흐르는 타선흡상(他線吸上)현상이 나타나며, 이로 인해 귀환 전류의 일부가 하행선으로 흐르는 특성이 있다. 따라서 상하타이 결선을 하지 않은 복선계통의 전체적인 전류 흐름은 그림 3과 같이 나타나며, 차량을 중심으로 크게 4개의 전류 루프를 구성할 수 있다.

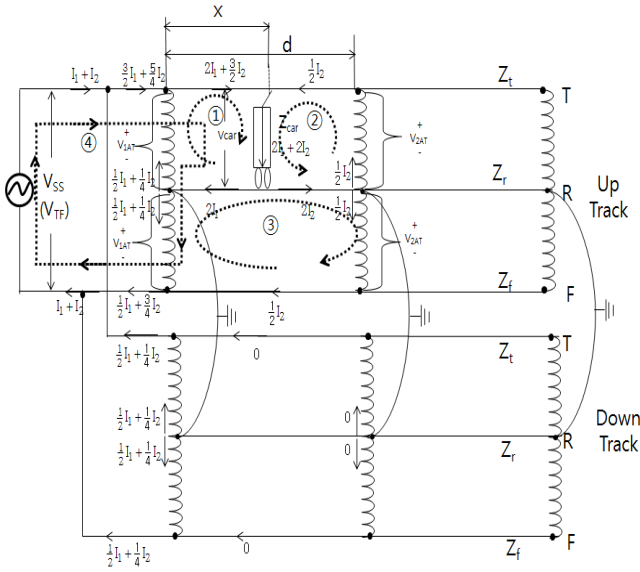


그림 3 상하타이 미결선 복선계통에서의 전류 흐름
Fig. 3 Current flow of double track power system - no connection between up track and down track

그림 3에서 키르히호프 전압법칙을 이용하면 크게 식 (1) ~ 식 (4)와 같이 4개의 회로를 구성할 수 있다.

$$\text{loop①} : V_1 = x Z_t (2I_1 + \frac{3}{2} I_2) + V_{car} + x Z_r (2I_1) \quad (1)$$

$$\text{loop②} : V_2 = (d-x) Z_t \frac{1}{2} I_2 + V_{car} + (d-x) Z_r (2I_2) \quad (2)$$

$$\text{loop③} : V_1 - V_2 = -x Z_r 2I_1 + (d-x) Z_r 2I_2 + d Z_f \frac{1}{2} I_2 \quad (3)$$

$$\text{loop④} : V_{ss} = x Z_t (2I_1 + \frac{3}{2} I_2) + V_{car} + x Z_r (2I_1) + V_1 \quad (4)$$

여기서, $V_{car} = Z_{car} (2I_1 + 2I_2)$

식 (1)에서 식 (2)을 빼면 식 (5)와 같으며, 식 (5)와 식 (3)에서 $V_1 - V_2$ 을 같다고 하면 식 (6)과 같다.

식 (1) - 식 (2)

$$V_1 - V_2 = x Z_t (2I_1 + 2I_2) + x Z_r (2I_1 + 2I_2) - d Z_t \frac{1}{2} I_2 - d Z_r (2I_2) \quad (5)$$

식 (5) = 식 (3)

$$\begin{aligned} &x Z_t (2I_1 + 2I_2) + x Z_r (2I_1 + 2I_2) + x Z_r (2I_1 + 2I_2) \\ &= d Z_r 2I_2 + d Z_f \frac{1}{2} I_2 + Z_t \frac{1}{2} I_2 + d Z_r 2I_2 \\ &\frac{x}{d} = \frac{Z_t \frac{1}{2} I_2 + Z_r 4I_2 + Z_f \frac{1}{2} I_2}{Z_t (2I_1 + 2I_2) + Z_r 2(2I_1 + I_2)} \quad (6) \end{aligned}$$

식 (6)에서 $I_2 = I_1 + I_2$ 로 치환하여 나타내면 식 (7)과 같다.

$$I_2 = \frac{x}{d} \frac{2Z_t + 4Z_r}{\frac{1}{2} Z_t + 4Z_r + \frac{1}{2} Z_f} I_1 = \frac{x}{d} k I_1 \quad (7)$$

$$\text{여기서, } k = \frac{2Z_t + 4Z_r}{\frac{1}{2} Z_t + 4Z_r + \frac{1}{2} Z_f}$$

식 (4)에서 전류 I_1, I_2 을 I_t 로 변환하기 위해 식 (8)과 식 (9)으로 변환하고, 식(7)을 대입하면 식 (10)과 같다.

$$2I_1 + \frac{3}{2} I_2 = 2I_t - \frac{1}{2} I_2 = 2I_t - \frac{1}{2} \frac{x}{d} k I_t = (2 - \frac{1}{2} \frac{x}{d} k) I_t \quad (8)$$

$$2I_1 = 2(I_t - I_2) = 2(I_t - \frac{x}{d} k I_t) = 2(1 - \frac{x}{d} k) I_t \quad (9)$$

$$\begin{aligned} V_{ss} = 2V_1 &= 2 \left\{ x Z_t (2 - \frac{1}{2} \frac{x}{d} k) I_t + Z_{car} 2I_t + x Z_r 2(1 - \frac{x}{d} k) I_t \right\} \\ &= 4(x Z_t - \frac{1}{4} \frac{x^2}{d} k Z_t + Z_{car} + x Z_r - \frac{x^2}{d} k Z_r) I_t \quad (10) \end{aligned}$$

위 식 (10)에서 변전소에서 본 전체 임피던스를 구하면 식 (11)과 같으며, 식 (11)에서 차량 임피던스 Z_{car} 을 빼면 식 (12)와 같이 변전소에서 본 선로 임피던스를 예측할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{ss} (25 \text{ kV 기준}) &= \frac{V_{ss}}{4I_t} \\ &= x(Z_t + Z_r) - \frac{x^2}{d} k (\frac{1}{4} Z_t + Z_r) + Z_{car} \quad (11) \end{aligned}$$

여기서, $Z_{car} = V_{car} / 2I_t$ (25 kV 기준)

$$\begin{aligned} Z_{line} &= Z_{ss} - Z_{car} \\ &= x(Z_t + Z_r) - \frac{x^2}{d} \frac{2Z_t + 4Z_r}{\frac{1}{2} Z_t + 4Z_r + \frac{1}{2} Z_f} (\frac{1}{4} Z_t + Z_r) \\ &= x(Z_t + Z_r) - \frac{(Z_t + 2Z_r)(Z_t + 4Z_r)}{Z_t + 8Z_r + Z_f} \frac{x^2}{d} \quad (12) \end{aligned}$$

3.2 상하타이 결선 복선계통에서의 전차선로 임피던스 예측

복선 계통에서는 급전계통의 전압강하를 줄이기 위해 급전구분소에서 상행선과 하행선의 급전선, 전차선을 상호 연결하여 운영하고 있다. 이로 인해 상행선에 차량이 운행하는 경우에 타행흡상현상으로 인해 상행선뿐만 아니라 하행선에서도 일부 부하전류가 흐르게 된다. 이로 인해 상하타이를 하지 않은 복선 계통과는 달리 차량에서 계측된 임피던스의 크기와 변전소의 상행선 구간에서 계측된 임피던스의 크기가 비례하지 않는다. 그림 4는 상하타이 결선 복선계통에서 상행선에 차량이 운행하는 경우에 급전회로 구간별 흐르는 전류의 흐름을 나타낸 것이다.

그림 4에서 복선계통의 상행선과 하행선에서 계측되는 임피던스는 식 (13)과 식 (14)와 같으며, 차량에서 계측되는 차량 임피던스는 식 (15)과 같다.

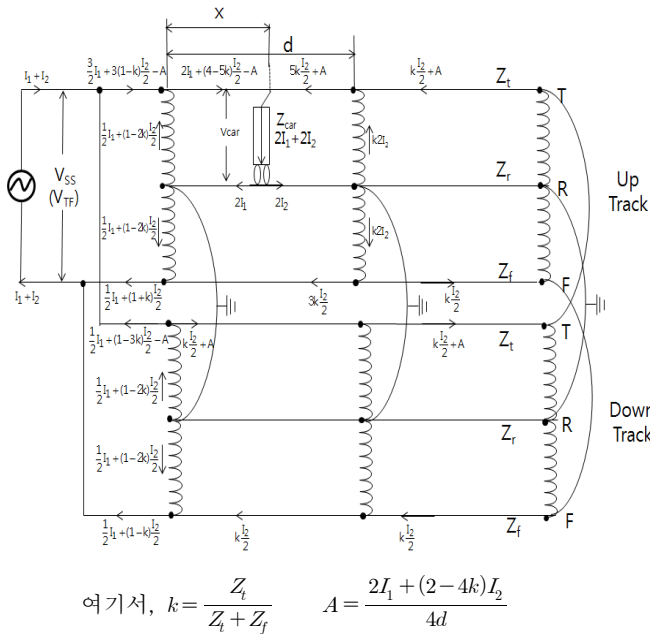


그림 4 상하타이 결선 복선계통에서의 전류 흐름
 Fig. 4 Current flow of double track power system - connection between up track and down track

- 변전소 상행선 구간 계측 임피던스 (50 kV 기준)

$$Z_{SSUP} = \frac{V_{TF}}{\left\{ \frac{3}{2} I_1 + (3-3k) \frac{I_2}{2} - A + \frac{1}{2} I_1 + (1+k) \frac{I_2}{2} \right\} / 2} = \frac{V_{TF}}{(I_1 + I_2) - (k \frac{I_2}{2} + \frac{A}{2})} \quad (13)$$

- 변전소 하행선 구간 계측 임피던스 (50 kV 기준)

$$Z_{SSDN} = \frac{V_{TF}}{\left\{ \frac{1}{2} I_1 + (1-3k) \frac{I_2}{2} - A - \left(\frac{1}{2} I_1 + (1-k) \frac{I_2}{2} \right) \right\} / 2} = \frac{V_{TF}}{(k \frac{I_2}{2} + \frac{A}{2})} \quad (14)$$

- 차량 계측 임피던스 (50 kV 기준)

$$Z_{car} = V_{car} / (2I_1 + 2I_2) \times 4 \quad (15)$$

따라서 식 (13)과 식 (14)에서 보는 바와 같이 변전소 상행선 구간에서 계측된 임피던스는 차량에 흐르는 전류의 일부가 하행선으로 흘러 들어가 차량에서 계측된 차량전류로부터 예측한 임피던스와 비례하지 않는다. 따라서 차량의 임피던스 크기에 무관하게 상행선의 선로 임피던스를 정확하게 예측하기 위해서는 차량 임피던스 예측시 차량에서 계측된 전류가 아닌 변전소에서 계측된 전류를 이용하여 차량의 임피던스를 예측해야 한다. 식 (16)은 변전소에 흐르는 전류를 이용한 차량 임피던스를 예측한 식이며, 이를 이용한 전차선로 임피던스는 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_{SS} = Z_{line} + Z'_{car} \quad (16)$$

여기서, $Z'_{car} = \frac{2V_{car}}{(I_1 + I_2) - (k \frac{I_2}{2} + \frac{A}{2})}$

$$Z_{line} = Z_{SS} - Z'_{car} = \frac{V_{TF}}{(I_1 + I_2) - (k \frac{I_2}{2} + \frac{A}{2})} - \frac{2V_{car}}{(I_1 + I_2) - (k \frac{I_2}{2} + \frac{A}{2})} \quad (17)$$

(50 kV 기준)

4. 시뮬레이션을 통한 실시간 전차선로 임피던스 예측기법 검증

4.1 모델 계통

변전소와 운행 차량의 동기화된 전력데이터를 이용하여 실시간 전차선로 임피던스 예측기법의 성능을 검증하기 위해서 그림 5와 같이 전력해석 프로그램인 PSCAD/EMTDC를 이용한 교류 급전계통 및 차량을 모델링하였다. 교류급전계통은 전력공급사업자로부터 3상 154 kV 수전 받아 철도변전소에서 스코트변압기와 AT를 통해 단상 25 kV를 공급하며, 전차선로의 구성은 변전소와 보조급전구분소 및 보조급전구분소와 급전구분소 사이는 10 km 간격으로 선정하였으며, 차량부하는 역률이 1인 저항부하로 모델링하였다. 표 1은 교류급전 모델계통의 파라미터를 제시하였으며, 변전소와 차량간의 데이터는 초당 1000샘플링 간격으로 데이터를 동기화하여 시뮬레이션을 수행하였다[9,10].

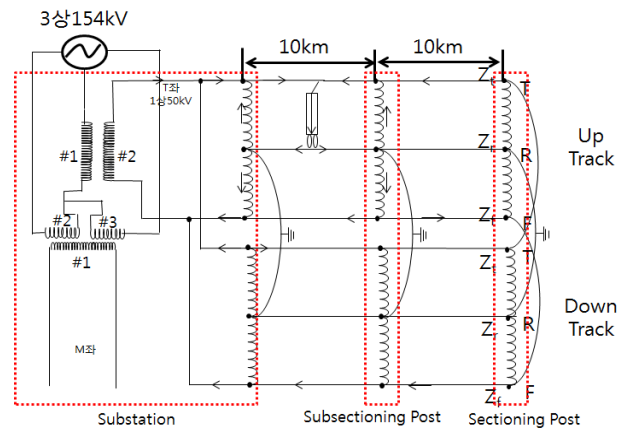


그림 5 모델 계통
 Fig. 5 Model system

표 1 모델계통 파라미터
 Table 1 Parameter of model system

설비	값
AT	10 MVA, j0.4 Ω
전차선	0.1076 + j0.2614 Ω/km
레일	0.1052 + j0.4736 Ω/km
급전선	0.1180 + j0.4519 Ω/km
차량	60 Ω ~ 240 Ω (부하전류 : 417 A ~ 104 A, 역률 : 1.0)
단락저항	0.01 Ω

4.2 수계산과 시뮬레이션 결과 비교(상하타이 미결선 교류 급전계통)

상하타이를 하지 않은 교류급전계통에서 식 (12)와 같이 제시한 변전소 본 전체 임피던스에서 차량 임피던스를 뺀 전차선로 임피던스 예측식의 정확도를 평가하기 위해서 실제 운영 노선의 보호계전기에서 임피던스를 예측하는 식 (18)을 이용한 시뮬레이션 값을 비교하였다. 선로 임피던스만을 예측하기 위해 전차선-레일간의 단락 저항은 0.01 Ω으로 하였으며 변전소에서 1 km 간격마다 전차선과 레일의 단락 시뮬레이션을 수행하였다.

$$Z_{ss} = \{V_{TF}/(I_T - I_F)\}/4 \quad (18)$$

그림 6과 표 2는 상하타이 미결선 교류 급전계통에서 예측한 거리별 전차선로 임피던스 크기를 나타낸 것이다(25 kV 기준). 그림 6에서와 같이 변전소에서 본 전차선로 임피던스의 크기는 전형적인 비선형이며, AT가 설치된 보조급전구분소 및 급전구분소에서 임피던스가 작아짐을 확인할 수 있다. 또한 표 2에서 볼 수 있듯이 변전소 전체 임피던스에서 차량 임피던스를 뺀 식 (12)을 이용한 수계산과 시뮬레이션 결과와는 평균 2.38%(거리 환산시 23.8 m)의 매우 작은 차이가 나타남을 확인하였다.

4.3 차량 임피던스를 고려한 시뮬레이션(상하타이 결선 교류 급전계통)

일반적으로 복선 교류급전계통은 급전구분소에서 상행선, 하행선의 전차선 및 급전선을 연결하는 상하 타이방식을 채택하고 있다. 이러한 상하타이 결선 교류 급전계통에서는 타선흡상현상으로 인해 차량에 흐르는 전류의 일부가 차량이 운행하지 않는 노선으로 흐르게 되어 있어 실시간으로 전차선로 임피던스를 예측하기 위해 단순히 차량에서 계측된 임피던스를 변전소에서 본 전체 임피던스에서 빼면 큰 오차가 발생할 수 있다. 그림 7은 본 논문에서 제시한 식 (17)과 단순히 차량 임피던스만을 뺀 식 (19)와의 전차선로 임피던스 예측값을 비교한 것이다.

$$\dot{Z}_{UPline} = Z_{UPSS} - Z_{car} = \frac{V_{TF}}{(I_1 + I_2) - (k \frac{I_2}{2} + \frac{A}{2})} - \frac{2V_{car}}{(I_1 + I_2)} \quad (19)$$

(50 kV 기준)

그림 7에서 알 수 있듯이 단락(지락) 고장과 같이 전차선과 레일간의 저항이 작은 경우(0.01 Ω)에는 식 (17)과 식 (19)을 이용한 방식에서의 전차선로 임피던스의 차이가 거의 발생하지 않는다. 하지만 실제 차량 운행으로 인해 차량 저항이 60 Ω, 240 Ω인 경우에는 변전소로부터 거리가 멀어질수록, 그리고 차량저항이 커질수록 식 (19)을 이용한 방식에서의 예측 오차가 증가함을 확인하였다. 하지만 본 논문에서 제시한 식 (17)의 경우에는 차량저항의 크기나 변전소로부터의 거리에 무관하게 정확히 거리별 전차선로 임피던스를 예측함을 확인하였다.

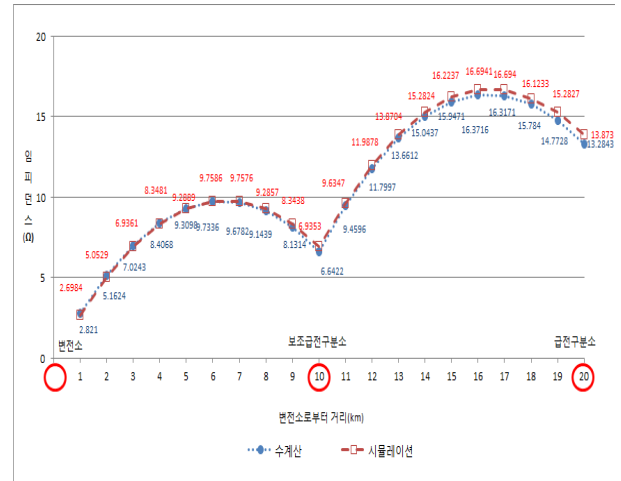
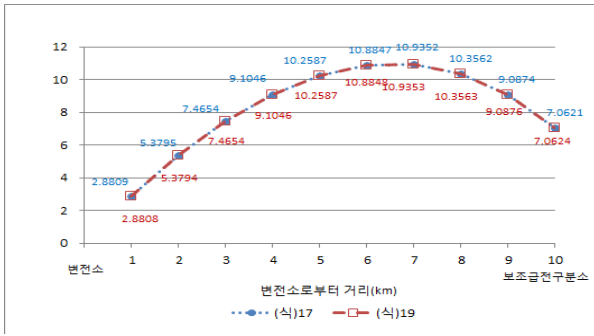


그림 6 수계산과 시뮬레이션 결과 값 비교
Fig. 6 Comparison of the manual calculation and simulation output

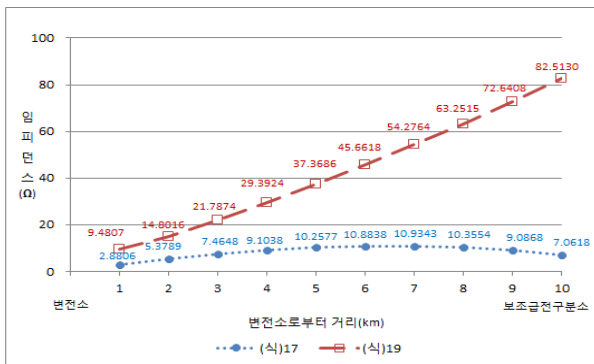
표 2 수계산과 시뮬레이션 결과 값 비교
Table 2 Comparison of the manual calculation and simulation output
 단위 : [Ω]

거리 [km]	수계산(식 12 적용)			시뮬레이션(식 18 적용)		
	R	X	Z	R	X	Z
1	0.7884	2.7086	2.8210	0.7435	2.5940	2.6984
2	1.4513	4.9542	5.1624	1.4099	4.8522	5.0529
3	1.9885	6.7370	7.0243	1.9531	6.6554	6.9361
4	2.4002	8.0569	8.4068	2.3731	8.0037	8.3481
5	2.6864	8.9139	9.3098	2.6699	8.8969	9.2889
6	2.8469	9.3079	9.7336	2.8433	9.3353	9.7586
7	2.8819	9.2392	9.6782	2.8938	9.3186	9.7576
8	2.7913	8.7075	9.1439	2.8208	8.8468	9.2857
9	2.5751	7.7129	8.1314	2.6246	7.9203	8.3438
10	2.2334	6.2554	6.6422	2.3054	6.5388	6.9353
11	3.0218	8.9640	9.4596	3.0449	9.1317	9.6347
12	3.6847	11.2096	11.7997	3.7113	11.390	11.9878
13	4.2219	12.9924	13.6612	4.2546	13.193	13.8704
14	4.6336	14.3123	15.0437	4.6745	14.5412	15.2824
15	4.9198	15.1693	15.9471	4.9713	15.4345	16.2237
16	5.0803	15.5634	16.3716	5.1447	15.8728	16.6941
17	5.1153	15.4946	16.3171	5.1949	15.8562	16.6940
18	5.0247	14.9629	15.7840	5.1223	15.3845	16.1233
19	4.8086	13.9683	14.7728	4.9260	14.4581	15.2827
20	4.4668	12.5108	13.2843	4.6067	13.0766	13.8730

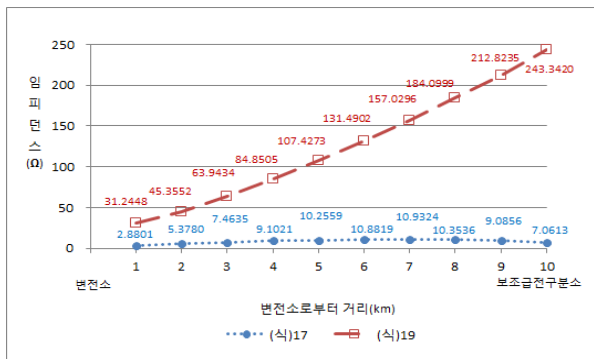
표 3 ~ 표 5는 차량의 임피던스 변화에 따른 전차선로 임피던스의 크기를 확인하기 위해서 변전소에서 본 총 임피던스(Z_{ss})와 본 논문에서 제시한 차량 임피던스(Z_{car})와 이를 이용하여 예측한 전차선로 임피던스(Z_{line})을 나타내었다. 시뮬레이션을 수행한 지점은 변전소에서 3 km(변전소와 보조급전구분소간 거리의 30% 지점), 7 km(변전소와 보조급전구분소간 거리의 70% 지점), 15 km(보조급전구분소와



(a) $Z_c = 0.01 \Omega$



(b) $Z_c = 60 \Omega$



(c) $Z_c = 180 \Omega$

그림 7 차량저항 변화에 따른 전차선로 임피던스 크기 비교
Fig. 7 Comparison of the catenary impedance magnitude to the train impedance variation

급전구분소 거리의 50% 지점을 대상으로 하였다.

표 3 ~ 표 5에서 보듯이 차량 임피던스가 증가할수록 변전소에서 본 총 임피던스도 증가하였으나 본 논문에서 제시한 변전소와 차량의 전력데이터를 이용한 방식으로 전차선로 임피던스를 예측한 결과 차량의 위치 및 차량의 임피던스 크기와 무관하게 정확히 거리별 전차선로 임피던스를 예측함을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 논문은 교류 급전계통의 전차선로 보호 및 고장점 표정을 위한 보호계전기 설정값 정정에 필요한 전차선로 임피

표 3 3 km(변전소와 보조급전구분소간 거리의 30%) 지점
Table 3 3 km(30% of distance from substation and subsectioning post) location
단위 : [Ω]

차량	임피던스	240	180	120	60	0.01
변전소 임피던스	R	1,039.50	780.2308	520.9109	261.5353	2.1083
	X	7.1576	1.1590	7.1602	7.1615	7.1628
	Z	1,039.52	780.2636	520.9601	261.6333	7.4667
차량 임피던스	R	1,037.39	778.1273	518.8071	259.4314	0.0043
	X	-0.0027	-0.0020	-0.0013	-0.0006	-1.1361
	Z	1,039.39	778.1273	518.8071	259.4314	0.0043
전차선로 임피던스	R	2.1033	2.1035	2.1037	2.1039	2.1039
	X	7.1603	7.1610	7.1615	7.1622	7.1628
	Z	7.4628	7.4636	7.4641	7.4648	7.4654

표 4 7 km(변전소와 보조급전구분소간 거리의 70%) 지점
Table 4 7 km(70% of distance from substation and subsectioning post) location
단위 : [Ω]

차량	임피던스	240	180	120	60	0.01
변전소 임피던스	R	1,166.29	875.6248	584.8913	294.0877	3.219
	X	10.4444	10.4464	10.4483	10.4503	10.452
	Z	1,166.34	875.6871	584.9846	294.2733	10.9365
차량 임피던스	R	1,163.08	872.4115	581.6776	290.8738	0.0048
	X	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001	-1.6709
	Z	1,163.08	872.4115	581.6776	290.8738	0.0048
전차선로 임피던스	R	3.2132	3.2133	3.2137	3.2139	3.2142
	X	10.4485	10.4494	10.4503	10.4513	10.452
	Z	10.9314	10.9324	10.9333	10.9343	10.9351

표 5 15 km(보조급전변전소와 급전구분소간 거리의 50%) 지점

Table 5 15 km(50% of distance from subsectioning post and sectioning post) location
단위 : [Ω]

차량	임피던스	240	180	120	60	0.01
변전소 임피던스	R	1,541.01	1,157.44	773.7446	389.929	5.9979
	X	19.0695	19.074	19.0785	19.0829	19.0872
	Z	1,541.13	1,157.60	773.9798	390.3956	20.0074
차량 임피던스	R	1,535.02	1,151.45	767.7547	383.9383	0.0063
	X	-0.0091	-0.0068	-0.0045	-0.0022	-3.8184
	Z	1,535.02	1,151.45	767.7547	383.9383	0.0063
전차선로 임피던스	R	5.9889	5.9895	5.9899	5.9906	5.9915
	X	19.0786	19.0809	19.083	19.0851	19.0872
	Z	19.9965	19.9989	20.001	20.0033	20.0055

턴스를 예측하기 위해 새로운 기법을 제안하였다. 기존의 Carson-Pollazek 계산식을 이용한 방식이나 인공지락 시험 장치 등과 같은 전차선로 임피던스 측정장치를 활용하는 기법에 비해 교류 급전계통에서 운행하고 있는 차량의 전력(전압, 전류) 계측값과 변전소의 전력(전압, 전류) 계측값을 실시간으로 취득하고, 동기화된 전력데이터를 기반으로 거리별 전차선로 임피던스를 예측할 수 있어 열차 운행 중단 없이 실시간으로 전차선로 임피던스를 측정이 가능하며, 급전계통의 변경 및 전차선로 마모 등으로 인한 전차선로 임피던스 크기 변화를 수시로 점검할 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서 제안한 기법의 성능을 검증하기 위해 AT방식의 교류 급전계통에 대해 변전소와 차량간의 동기화된 전력데이터를 이용한 전차선로 임피던스 예측식을 제시하였으며, 전력해석 프로그램을 통해 교류 급전계통을 모델링하고 다양한 부하 변화에 따른 시뮬레이션을 통해 성능을 검증하였다. 상하타이 미결선 복선계통에서 전차선로 임피던스 예측식을 이용한 값과 전력해석 시뮬레이션 값과의 평균 2.38%(거리 환산시 23.8 m)의 매우 작은 차이가 나타남을 확인하였다. 또한 상하타이 결선 복선계통의 경우 차량 임피던스 산정시 차량 전류를 활용하는 경우에는 차량의 임피던스 크기와 변전소로부터 거리가 증가할수록 오차가 매우 커짐을 확인하였으나, 본 논문에서 제시한 변전소 전류를 활용하여 예측할 경우에는 차량 임피던스의 크기 및 변전소에서의 거리와 무관하게 거리별 전차선로 임피던스를 정확히 예측함을 확인하였다. 향후 이러한 예측 기법을 활용하기 위해서는 변전소 및 차량의 데이터 취득 및 임피던스 예측을 위한 시스템 개발이 필요하며, 실 계통에서의 취득한 데이터를 통해 성능 검증이 요구된다.

References

[1] Tefvik Sezi, Frank E. Menter, "Protection Scheme for a New AC Railway Traction Power System", IEEE Transmission and Distribution Conference vol 1, pp388-393, 1999

[2] Hosung Jung, Young Park, Moonseob Han, Hyenjune Park, "High Impedance fault detection Technique for the reliable power feeding in AT railway system", the Second International Conference on Engineering Failure Analysis, 2006

[3] Korea Railroad Research Institute, "A Study on the Overhead Contact-line Constant and Optimal Strategy of Protection Circuit in the Electrical Railway Substation", Korea Railroad Research Institute, 1998

[4] Hanmin Lee, "A Reduced Equivalent Line Constant of the Catenary System", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol.53A, No.8, pp.421-431, 2004.8.

[5] Oh, K.H., "Measurement method for catenary line constant," The Korean Society for Railway, Vol. 9, No. 6, pp.620-627, 2006

[6] Minkyu Kim, "A Study on the Impedance Calculation

by using Equivalent Model in Catenary System", Journal of the Korea Society for Railway, 3(2), pp. 46-53, 2010.6

[7] Myungsoo Jun, "Trolley line impedance detector and Method for locating fault distance", 1020080026712, 2008.03

[8] Hosung Jung, "A Study on Fault Location Estimation Technique Using the distribution Ratio of Catenary Current in AC Feeding System", Journal of the Korea Society for Railway, 14(5), pp. 404-410, 2011.10

[9] Korea High Speed Rail Construction Authority, "Protection Relay Setting of Substation in Korea High Speed line test section.", 1999.10

[10] Hosung Jung, "A study on relay setting for AT feeding system protection using PSCAD/EMTDC", ICEE 2005, pp.A76-A76, 2005

저 자 소 개



정 호 성 (鄭 滯 聖)

1971년 10월생, 1998년 성균관대학교 전기공학과 졸업(공학석사). 2002년 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부 졸업(공학박사). 2002년 ~ 현재 한국철도기술연구원 연계환승시스템연구단 선임연구원

Tel : 031-460-5116

Fax : 031-460-5749

E-mail : hsjung@krri.re.kr