

전기철도 급전계통 임피던스 분석장치 개발

이 장 무\*      창 상 훈\*      한 문 섭\*      오 광 해\*  
 \* 한국철도기술연구원

Development of Power System Impedance Analyzer on the Electric Railway

ChangMu Lee\*, SangHoon Chang\*, MoonSeob Han\*, KwangHae Oh\*  
 \* Korea Railroad Research Institute

Abstract

For the continuous and exact measurement of load impedance of AC power system on the electric railway, this paper presents a method to show the load area to resistance(R)-reactance(X) plane of impedance plane. The load area is presented in terms of impedance which is in the ratio of voltage and current continuously measured and impedance plane indicates the protection area of fault locator.

The proposed method is verified its reasonability by computer simulation, and using this method we will develop the power system impedance analyser which is available actual application.

1. 서    론

교류급전 변전소에서는 전력회사의 3상전력을 스코트 트결선 변압기로 2상의 전력으로 변환하여 방면별로 급전하고 있다. 급전회로는 흡상변압기를 사용한 BT급전회로와 단상변압기를 사용한 AT급전회로가 있다. BT급전방식은 25kV로 급전하며, AT급전방식에서는 50kV로 급전하여 약 10km간격으로 설치된 AT에서 25kV로 강압하여 전기차량에 급전하고 있다.

이러한 교류 급전회로에 고장이 발생한 경우 사람, 전기차량 및 지상설비 등의 안전을 확보하기 위해서 급전회로에서 발생하는 단락 또는 지락사고를 신속하게 검출하여 고장점에 전력공급을 차단할 필요가 있다. 변전소에서는 급전회로의 전압, 전류, 임피던스(전압과 전류의 비)의 크기 또는 변화량 등으로 부하와 고장을 판별하고 있다. 보호계전기로는 급전회로의 부하임피던스와 고장임피던스의 상이점을 검출원리로 하여 동작하는 거리계전기와 전류증가 변화분을 검출하는 ΔI형 고장선택장치 등으로 급전회로를 보호하고 있으나 전기차의 증가에 따라 부하임피던스가 거리계전기의 보호영역에 가까워 오동작 할 우려가 있다.

따라서 본 연구에서는 거리계전기의 보호영역을 나타내는 임피던스 평면, 저항(R)-리액턴스(X) 평면에 전기차의 부하 임피던스를 정확하게 나타내기 위하여, 급전회로에서 연속하여 측정된 전압치와 전류치를 이용하여 임피던스를 구하는 방법을 제안하고, 이를 시뮬레이션을 통하여 타당성을 검증하였고, 교류급전 변전소에서 용이하게 부하 임피던스를 계속하여 거리계전기의 보호영역과의 관련성을 파악할 수 있도록 임피던스 분석기를 개발한다.

2. 본    론

2.1 임피던스 분석기의 동작원리

급전변전소의 계기용 변압기(PT)와 계기용 변류기(CT)에서 전압과 전류를 입력받아 PT비와 CT비를 적용하여 실제 전압과 전류를 구한 다음 이를 이용하여 기본주파수에 대한 임피던스, 저항(R) 성분과 리액턴스(X) 성분을 구한다. 이렇게 구한 임피던스 성

분은 임피던스 평면의 R-X축에 나타나게 되어 임피던스 평면에서 부하임피던스의 범위를 구할 수 있다.

또한 거리계전기에서는 기본파에 대한 제 2조파 함유율이 12% 또는 15% 이상의 전류파형은 변압기의 무부하 여자 돌입전류로부터 계전기의 출력을 억제하고 있다. 따라서 전류파형의 2조파 함유율이 일정치 이상의 경우에 대한 임피던스를 구별하여 기억하고 그 값을 기본파 값으로 증첩하여 임피던스 평면에 나타낼 수도 있다.

부하임피던스가 거리계전기의 설정된 보호영역 내에 존재하게 되면 그 값을 출력하고 계전기를 동작시켜 외부 접점으로 출력한다.

2.2 부하임피던스 연산

2.2.1 연산원리

임의의 주기(T)를 갖는 주기함수  $f(t)$ 를 Fourier 급수로 표현하면

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos n\omega_0 t + \sum_{n=0}^{\infty} b_n \sin n\omega_0 t$$

이고, 이때 계수  $a_0, a_n$ 과  $b_n$ 은 다음과 같다.

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt, \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T \cos \frac{2\pi n t}{T} f(t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T \sin \frac{2\pi n t}{T} f(t) dt$$

한 주기 T에서 N개의 샘플을 취하여 n차 고조파 성분을 구하면 다음과 같다.

$$a_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ f \left( \frac{kT}{N} \right) \cdot \cos \frac{2\pi n k}{N} \right\}$$

$$b_n = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ f \left( \frac{kT}{N} \right) \cdot \sin \frac{2\pi n k}{N} \right\}$$

2.2.2 부하임피던스 연산

급전용 변전소의 PT 및 CT 출력으로부터 전압과 전류를 입력받아 전압 값과 전류 값을 구한 후, 이로부터 전압과 전류에 대한 임피던스를 구한다.

1주기를 N 분할하여 n번째 전압값  $v_n$ 과 전류값  $i_n$ 은 함수의 값으로 하여 Fourier 급수의 계수를 구한다.

전압 V에 대한 기본주파수 성분만을 살펴보면,

$$V_1(t) = V_{a1} \cos \omega_0 t + V_{b1} \sin \omega_0 t$$

$$V_{a1} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ v_n \cdot \cos \frac{2\pi n}{N} \right\}$$

$$V_{b1} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ v_n \cdot \sin \frac{2\pi n}{N} \right\}$$

전류 I에 대한 기본주파수 성분을 살펴보면

$$I_1(t) = I_{a1} \cos \omega_0 t + I_{b1} \sin \omega_0 t$$

$$I_{a1} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^N \left\{ i_n \cdot \cos \frac{2\pi n}{N} \right\}$$

$$I_{b1} = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^N \left\{ i_n \cdot \sin \frac{2\pi n}{N} \right\}$$

전압 기본주파수를 Phasor로 표시하면 다음과 같다.

$$V_1 = |V_1| \angle \theta_v, \quad I_1 = |I_1| \angle \theta_I$$

여기서

$$|V_1| = \sqrt{V_{a1}^2 + V_{b1}^2}, \quad |I_1| = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{b1}^2}$$

이고, 전압  $V_1$ 의 위상  $\theta_v$ 와 전류  $I_1$ 의 위상  $\theta_I$ 는 다음과 같다.

$$\theta_v = \tan^{-1} \left\{ \frac{V_{b1}}{V_{a1}} \right\}, \quad \theta_I = \tan^{-1} \left\{ \frac{I_{b1}}{I_{a1}} \right\}$$

전압과 전류의 위상차, 즉 임피던스의 위상  $\theta_2$ 는 다음과 같다.

$$\theta_2 = \theta_v - \theta_I = \tan^{-1} \left\{ \frac{V_{b1}I_{a1} - V_{a1}I_{b1}}{V_{a1}I_{a1} + V_{b1}I_{b1}} \right\}$$

계기용 변성기의 2차측에서 본 기본주파수에 대한 임피던스 성분 ( $Z$ ), 저항 성분  $R$ 과 리액턴스 성분  $X$ 는 다음과 같다.

$$R = Z \cos \theta = \frac{V_a I_a + V_b I_b}{I_a^2 + I_b^2}$$

$$X = Z \sin \theta = \frac{V_b I_a - V_a I_b}{I_a^2 + I_b^2}$$

여기서 구한  $R, X$ 에 PT비/CT비를 곱하면 변전소에서 본 기본주파수에 대한 실제 저항 성분 ( $R$ )과 리액턴스 성분 ( $X$ )를 구할 수 있다.

### 2.2.2 제2조파 함유율 계산

제2조파 전류 파형은 위의  $n$ 차 고조파 성분에 관한 수식을 이용하면 아래와 같다.

$$I_{a2} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^N \left\{ i_n \cdot \cos \frac{4\pi k}{N} \right\}, \quad I_{b2} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^N \left\{ i_n \cdot \sin \frac{4\pi k}{N} \right\}$$

여기에서 기본파 전류에 대한 제2조파 전류의 함유율은

$$k = \frac{\sqrt{I_{a2}^2 + I_{b2}^2}}{\sqrt{I_{a1}^2 + I_{b1}^2}} \times 100\%$$

이 되고, 설정한 제2조파 함유율보다 실측한 제2조파 함유율이 더 큰지 작은지를 구별한다.

### 2.3 시뮬레이션

전기차량의 제어방법에 따라서 PWM제어차량이 주요 부하로 동작하는 급전변전소와 위상제어차량이 주요 부하로 동작하는 급전변전소에 대하여 계기용 변성기에서 전압과 전류를 측정한다. 이들 전압과 전류에 대한 임피던스를 구하였다. 그림 1은 PWM 제어차량이 주요 부하로 동작하는 급전변전소에서 계기용 변성기 2차측에서 측정된 전압과 전류에 PT비와 CT비를 곱하여 급전변전소에서 급전하는 전압과 전류를 나타내었고, 그림 2는 그림 1의 전압과 전류를 1주기에 대해 샘플링한 수에 따른 임피던스의 위상, 저항 그리고 리액턴스의 변

화를 보인 것이다. 샘플링 수가 증가할수록 실제 값에 가까워짐을 알 수 있다.

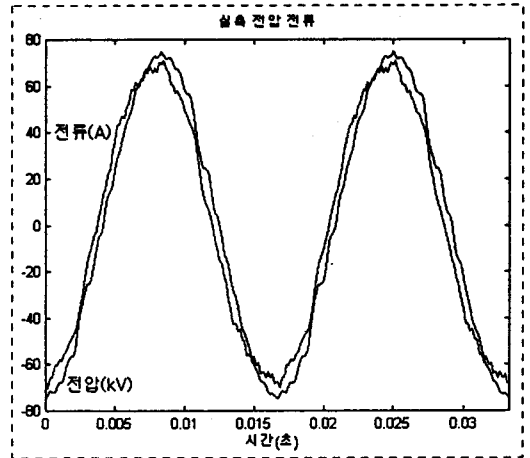


그림 1. 변전소에서의 전압과 전류(PWM 제어차량)

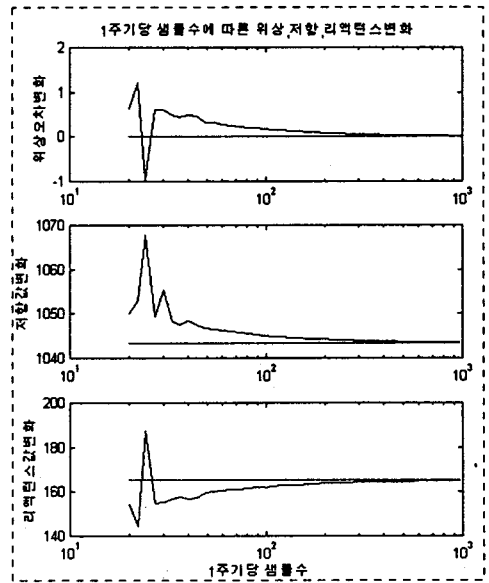


그림 2. 1주기당 샘플수에 따른 위상, 저항 및 리액턴스 변화(PWM제어차량)

그림 3과 그림 4는 위상제어차량이 주요 부하로 동작하는 급전변전소에 대한 전압과 전류, 위상, 저항, 리액턴스의 변화를 보인 것이다.

1주기당 샘플링 수가 적으면 연산속도는 빠르나 임피던스의 오차가 커지고, 샘플링 수가 많으면 정확한 임피던스를 구할 수 있으나 연산하는데 많은 시간이 필요하다. 따라서 연속적으로 변화하는 부하영역을 실시간으로 측정하기 위해서는 적절한 샘플링 수를 선택하여야 한다.

기본주파수에 대한 실제 저항과 리액턴스는 전력분석기를 통하여 얻은 기본주파수 전압, 기본주파수 전류 그리고 위상차를 이용하여 위상, 저항과 리액턴스를 구하였다.

- [1] 持永芳文外, "交流き電回路負荷領域測程器(R-Xアナライザ)の開発", 鐵道總研報告, Vol.11, No.5, 1997.
- [2] 創相勳外, "전차선로 회로정수 측정 및 보호회로 최적화 방안연구 보고서", 한국철도기술연구원, 1997.

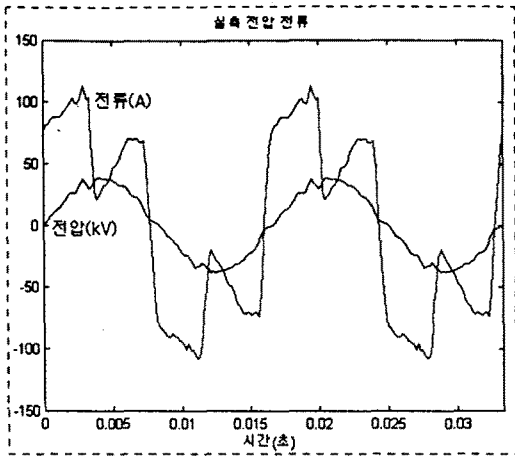


그림 3. 변전소에서의 전압과 전류(위상제어차량)

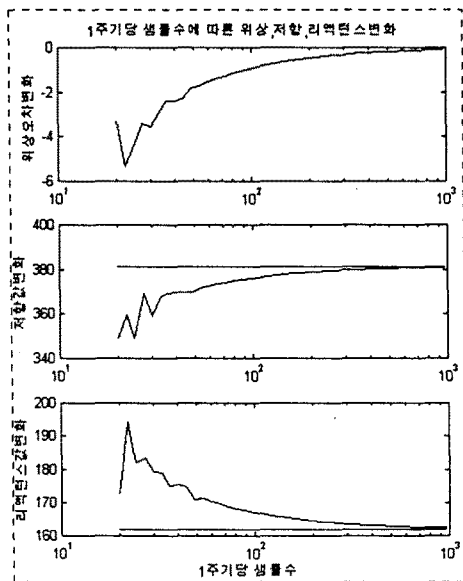


그림 4. 1주기당 샘플수에 따른 위상, 저항 및 리액턴스변화(위상제어차량)

### 3. 결 론

수송량의 증대로 전철선로의 이중화 및 증설 등 선로의 제특성이 변경되고 다양한 제어방식을 이용한 차량이 도입되어 운행 중에 있다. 저항제어차량, 위상제어차량과 PWM제어차량이 부하특성이 제 각기 다르고 선로의 제특성이 건설초기에 비하여 변동되어 부하특성이 거리계전기의 보호영역에 침입함으로써 지락사고가 아닌 경우에도 거리계전기가 동작하는 경우가 많다.

따라서 현재 사용하는 거리계전기의 보호영역과 부하의 상황을 조사할 필요가 있다. 전압, 전류, 역률 기록차트에서 부하임피던스를 구하여 부하상황을 파악하기에는 많은 노력을 필요로 하며 부정확하다. 이에 본 논문에서 제안한 방법을 사용하여 임피던스 분석기를 개발하고자 한다. 임피던스 분석기는 연속적으로 변화하는 부하영역을 실시간으로 측정하고 거리계전기의 보호영역과 부하영역의 특성을 파악할 수 있을것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]