

교류전기철도 보호특성 해석 및 고장점표정 시뮬레이션

The Analysis of Protection-Characteristics and Fault-Locator Simulation on the Electrical Railway

창상훈* 이장무**

Chang, Sang-Hoon Lee, Chang-Mu

ABSTRACT

In case the fault occurs in AC power supply network, protective relaying system must selectively detect line-to-line/ground fault and immediately cut off the power flow into the fault location for guaranteeing the safety of people, electric vehicle and ground installation etc.

It is the most important point in power system operation to minimize the fault duration by rapid trip scheme and accurate estimation of the fault location.

In this paper, we analyze the load characteristics of each vehicle, perform the fault analysis of AC power supply network using AT current-ratio method. The result shows its usefulness.

1. 서론

우리 나라 전기철도는 1972년 태백선 증산~고한간 시험선을 시작으로 건설되어 그 동안 수도권 전철 및 지하철, 최근에는 경부고속철도의 건설이 시작되어 2000년대 초반 완공을 목표로하고 있으며 기존선의 전철화 및 고속화가 지속적으로 추진 중에 있다.

급전방식은 흡상변압기를 사용한 BT급전방식과 단권변압기를 사용한 AT급전방식이 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 ΔI 형 고장선택장치 등으로 급전회로를 보호하고 있으며, 고장지점을 신속·정확히 예측하여 고장복구시간을 최소화하기 위한 고장점표정장치로 대별할 수 있다.[1]

본 논문에서는 각 차량별 부하특성을 분석하고 교류전철 급전회로의 고장해석을 실시하고 기존에 사용중인 리액턴스 방식 고장점표정장치의 문제점을 보완한 AT전류비 방식 고장점표정장치에 대해 시뮬레이션을 실시하여 유용성을 검증하고자 한다.

2. 전기철도 부하전류 특성

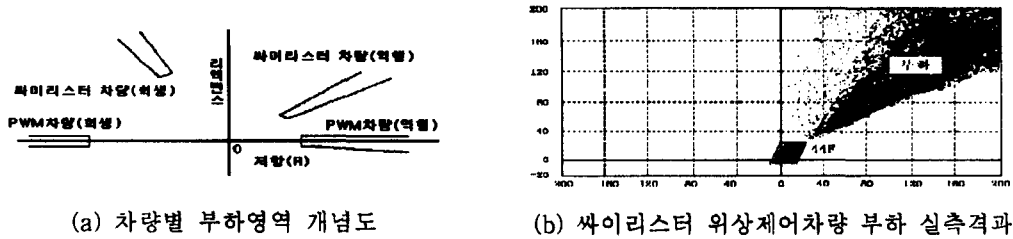
2.1 부하임피던스 특성

* 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

AT급전방식에서는 거리계전기를 주보호로 사용하고 ΔI 형 고장선택장치를 후비보호로 사용하고 있기 때문에 부하 임피던스 특성을 알기 위해서는 횡축에 저항(R), 종축에 리액턴스(X)로 정하여 표현된다.

교류전기차는 전력변환방식에 따라 싸이리스터 위상제어 차량과 저항제어, PWM제어 차량으로 구분할 수 있으며 전철변전소에서 본 역할은 싸이리스터 위상제어 차량이 0.7~0.8이며 PWM제어 차량은 역행시에 1.0, 회생시에 -1.0이 되도록 제어되고 있다. 그림2.1은 교류전기차의 부하영역 개념도를 나타낸 것이다.[1]



(a) 차량별 부하영역 개념도

(b) 싸이리스터 위상제어차량 부하 실측결과

그림2.1 교류전기차의 부하영역 개념도

(1) BT급전회로의 부하특성

BT구간에 운행되고 있는 차량은 싸이리스터 제어방식으로 주로 화물수송을 담당하고 있으며 출력은 3900kW로 직류직전동기(820V, 850A)를 사용하고 있다. 이 차량의 주회로 구성도를 그림 2.2에 나타낸다. 주변압기는 2개의 2차권선이 있으며 각 2차출력은 싸이리스터 주정류기를 통해 직류로 변환되어 3대씩의 견인전동기를 구동한다. 싸이리스터 주정류기는 싸이리스터 2개와 다이오드 2개를 브리지형태로 조합한 전파정류회로이며 다이오드의 환류작용으로 인해 항상 양(+)의 전압만 공급하며 회생능력은 지니고 있지 않다.

(2) AT급전회로의 부하특성

AT급전회로의 임피던스는 전기차량 기준전압으로 환산하면 BT급전회로의 약 1/4이 되므로 거리계전기(44)의 보호영역에 부하접근정도는 BT급전방식보다 여유가 있다.

우리 나라 AT급전구간에 운행되고 있는 전기차량은 수도권 전철구간은 저항제어차와 PWM제어차량이 운행되고 있으며 산업선 전철구간에는 위에서 언급한 싸이리스터 위상제어 전기기관차가 운행되고 있다. 또한 개통예정인 경부고속철도의 급전방식도 AT급전방식이며 차량제어방식은 PWM제어방식 이다.

그림2.3에 PWM제어차량의 구성도를 나타낸다. 이 방식의 차량은 전압과 주파수를 제어(VVVF)하여 속도를 제어하고 있으며 C/I장치에 역도동 다이오드를 설치하여 회생제어를 가능하도록 하여 에너지 절감에 크게 기여하고 있다. 또한 견인전동기로는 유도전동기를 사용하여 maintenance free를 실현시키고 있다.

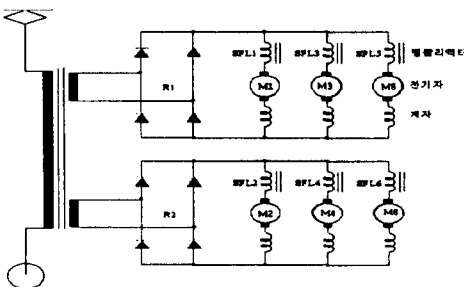


그림2.2 싸이리스터 제어차량 구성도

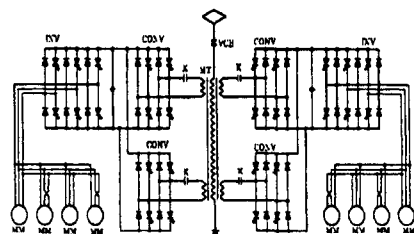


그림2.3 PWM제어차량 구성도

2.2 고조파 특성

고조파란 기본 주파수의 정수배 차수의 주파수를 갖는 정현파 성분을 말한다.

비정현파(왜형파) $f(t)$ 는 식 (2-1)과 같이 주파수와 진폭을 달리하는 무수히 많은 여현항(余弦項)과 정현항(正弦項)의 합으로 표시될 수 있으며 이를 푸리에 (Fourier) 급수에 의한 전개라고 한다.

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + a_n \cos n\omega t + \dots + b_0 + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots + b_n \sin n\omega t + \dots \quad (2-1)$$

$$= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t$$

식 (2-1)에서 주파수가 영(零)일 때, 상수항 a_0 는 여현항 $a_0 \cos 0t = a_0$ 와 상수항 b_0 는 정현항 $b_0 \sin 0t = 0$ 이 될 수 있다. 모든 동일주파수 ($\omega, 2\omega, \dots, n\omega, \dots$)에 대해 여현항과 정현항을 합성하면,

$$f(t) = a_0 + A_1 \sin(\omega t + \phi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \phi_2) + \dots + A_n \sin(n\omega t + \phi_n) + \dots \quad (2-2)$$

$$= a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad \text{단, } A_n = \sqrt{(a_n^2 + b_n^2)}, \quad \phi_n = \tan^{-1} \frac{a_n}{b_n}$$

이 된다.

식 (2-2)에서 a_0 는 시간과 주파수에 무관한 직류성분이고 그 외의 항은 각종 주파수를 갖는 정현파 성분이 된다.

특히 직류성분의 외 성분중 $A_1 \sin(\omega t + \phi_1)$ 은 비정현파 $f(t)$ 와 동일주파수 성분을 갖는 기본파가 되고, 그 외의 $\sum_{n=2}^{\infty} A_n \sin(n\omega t + \phi_n)$ 는 기본파의 2, 3, ..., n, ...배의 주파수성분을 갖게 되는데 각각 2차 고조파, 3차 고조파, ..., n차 고조파, ...로 부르며 이를 합쳐 "고조파"라 한다.

그러므로 비정현파는 직류성분, 기본파와 고조파를 포함한다.

2.3 고조파 발생 원인[2]

교류급전방식에서의 고조파의 발생원으로는 Scott변압기, AT 또는 BT변압기 등의 전철변전소측 기기와 전차선로 및 전기차의 주변압기, 견인장치 및 추진장치외에 차량용 전원을 사용하기 위한 보조전원장치 등 모든 전기기기로 볼 수 있다.

(1) 저항제어 전동차

수도권 제1호선(경인/경부선)에서 운행하는 전동차는 전차선으로부터 인가된 교류전압을 단상 정류기에 의해 직류로 정류시키고 직류전동기를 약제자제어하여 견인력을 변화시키면서 저항제어에 의해 운행 속도를 변화시킨다.

저항제어전동차의 추진제어장치의 개략도는 그림 2-4와 같고 가선측으로 발생하는 조파별 고조파 전류함유율은 그림 2-5와 같다. 이 그림에서 알 수 있듯이 고조파는 3, 5 및 7조파에서 집중적으로 발생한다.

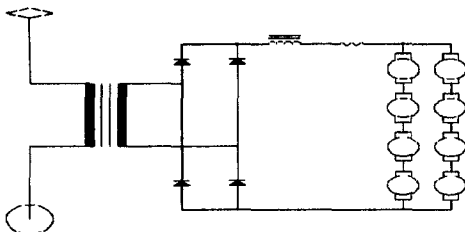


그림 2.4 저항제어 전동차 구성도

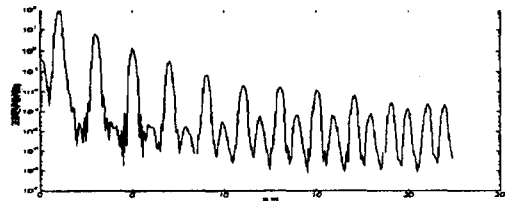


그림 2.5 저항제어 전동차에서 발생하는 고조파전류 함유율

(2) 8000대 전기기관차

산업선에서 운행하는 전기기관차는 전차선으로부터 인가된 교류전압을 세미-브릿지 (Semi Bridge)형으로 싸이리스터와 다이오드가 복합된 정류기를 이용하여 싸이리스터의 위상을 제어하여 속도를 변화시키면서 약제자제어에 의해 견인력을 변화시킨다.

싸이리스터 위상제어방식을 사용하면 정류기방식에 비해 역률이 저하하며 고조파도 증가한다는 결점이 있다.

싸이리스터 위상제어 전기기관차의 추진제어장치의 개략도는 그림 2-2와 같고 가선측으로 발생하는 싸이리스터 점호 위상각의 변화에 따른 조파별 고조파 전류함유율은 그림 2-6과 같다. 그림 2-6에서 보는바와 같이 싸이리스터 제어방식에서는 위상각이 클수록 고조파 전류함유율이 커짐을 알 수 있고 낮은 조파 영역에서 주로 고조파가 발생한다.

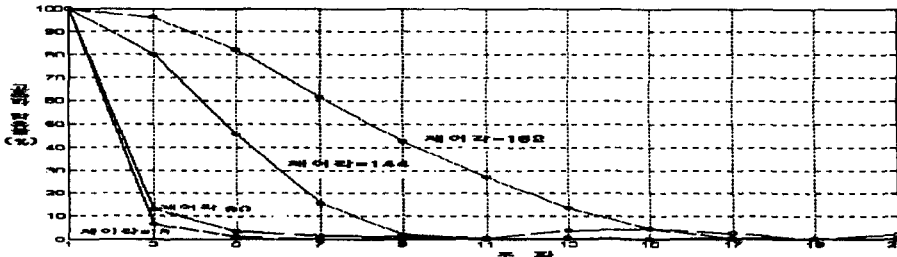


그림 2.6 싸이리스터 위상제어 전동차에서 발생하는 고조파전류함유율

3) VVVF 전동차

과천/안산선에서 운행하는 VVVF 전동차는 전차선으로부터 인가된 교류전압을 PWM 컨버터에 의해 정류시키고 VVVF 인버터에서 가변전압/가변주파수 제어방식에 의해 3상 교류로 변환하여 유도전동기의 속도제어를 수행한다.

VVVF 전동차의 고조파 분포는 앞서 설명한 저항제어 전동차나 싸이리스터 위상제어를 수행하는 전기기관차와는 달리 주파수가 높은 영역에서 PWM 반송파 주파수에 기인하는 고조파 성분이 발생한다.

일반적으로 PWM 컨버터의 가선측에 발생하는 고조파 전류의 주파수(f_h)는

$$f_h = 2mnf_c \pm kf_s \tag{2-3}$$

$m ; 1, 2, 3, \dots, k ; 1, 3, 5, \dots$

과 같이 표현된다.

과천/안산선에서 운행하는 전동차의 경우 PWM 컨버터의 스위칭 주파수(f_c)는 기본주파수 (f_s)가 60Hz이고 기본주파수 한 주기에 7개의 펄스를 발생시키므로 420Hz를 사용하고 있고, 컨버터의 상수(n)는 2상이므로 고조파가 발생하는 주파수(f_h)는

$$f_h = 1680 m \pm 60 k \tag{2-4}$$

이므로, 고조파는 1680, 3360,.... (Hz)의 측대역에서 발생한다.

3. 교류급전회로 구성별 고장해석

3.1 단독급전방식의 계산

단독급전의 경우는 단위거리 당의 임피던스로 고장점까지의 거리를 나누어 고장점의 선로임피던스로 하고 고장점저항에 대해서는 직접급전, BT급전에서는 고장점 실저항을 (3-2)식의 r_g 로 하여 고장전류를 계산한다.

AT급전회로에서는 고장이 없을때의 급전전압 V_0 와 고장점의 전압 V_F 가 2:1이므로 고장점 실저

항 R_g 는

$$r_g = (V_0/V_F)^2 R_g = 4R_g \quad (3-1)$$

가 된다.

3.2 상하타이 급전방식의 계산[6]

상하타이급전에서 회선별 고장전류는 다음과 같이 구할 수 있다.

그림3.1에서 고장점전류는

$$I_s = V/(2Z_0 + Z_{TR} + Z_L + r_g) \quad (3-2)$$

여기서, Z_L 은 상하선이 병렬로 되어 있기 때문에

$$Z_L = Z_{11}(Z_{12} + Z_2)/(Z_{11} + Z_{12} + Z_2) \quad (3-3)$$

따라서 회로 1 및 회로 2의 전류는

$$\begin{aligned} I_1 &= I_s (Z_{12} + Z_2)/(Z_{11} + Z_{12} + Z_2) \\ I_2 &= I_s Z_{11}/(Z_{11} + Z_{12} + Z_2) \end{aligned} \quad (3-4)$$

로 생각할 수 있다.

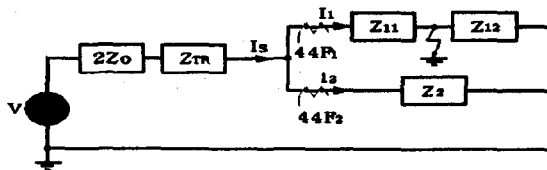


그림 3.1 상하 타이급전 단락고장 등가회로

보호계전기는 회선마다 설치되어 있으므로 보호계전기 설치점에서 본 임피던스를 구한다. 급전점의 전압은

$$V_F = V - I_s(2Z_0 + Z_{TR}) \quad (3-4)$$

이므로 회선 1의 보호계전기에서 본 임피던스는

$$Z_{1F} = V_F/I_1 \quad (3-5)$$

가 된다. 즉 상하타이 급전에서는 계전기에서 본 고장점 저항은 타회로에서의 우회전류에 의해 실 고장점 저항보다 크게 보이게 된다.

이외에도 급전회로 구성방식에는 병렬급전방식과 상하일팔급전방식이 있는데 여기서는 생략하였다.

4. 고장점표정 시물레이션

4.1 고장점표정장치

AT전류비 방식의 고장점표정은 고장발생시에 고장점을 사이에 두고 양쪽 AT에 유입되는 전류를 동시에 계측하여 양측의 스칼라량의 합에 대한 비로 고장점거리를 구하는 방식이다.

이 방식의 고장점표정원리는 AT급전회로에 적용되며 Fig. 4-1과 같이 전차선(T)-레일(R)간, 또는 급전선(F)-레일(R)간에 단락사고가 발생하면 고장전류는 고장점을 인접한 AT의 중성점에서 I_n 과 I_{n+1} 로 분류하여 각각 유입된다.

이 2개의 인접한 AT의 흡상전류를 동시에 계측하여 양자의 스칼라량에 대한 비를 구하고 이 비율에서 고장점을 표정하는 것이다. 즉 AT에 유입되는 전류비는 Fig. 4-1과 같이 거리에 대하여 직선적인 관계가 있으므로 미리 작성된 거리와 AT유입 전류비의 곡선으로 연산하여 구한

계측 데이터를 비교하여 고장점 거리를 표정한다.

이상의 관계를 수식으로 나타내면 다음과 같다.[3][4][5][6]

$$H = \frac{I_{n+1}}{I_n + I_{n+1}} \times 100 = Q_1 + (100 - Q_1 - Q_2) \times \frac{d}{D} (\%) \quad (4-1)$$

따라서

$$d = \frac{D}{100 - Q_1 - Q_2} \times \left(\frac{100 I_{n+1}}{I_n + I_{n+1}} Q_1 \right) \quad (4-2)$$

그러므로

$$L = L_n + \frac{L_{n+1} - L_n}{100 - Q_1 - Q_2} \times \left(\frac{100 I_{n+1}}{I_n + I_{n+1}} Q_1 \right) \quad (4-3)$$

여기서

- L : 사고점 거리 (km)
- L_n : AT_n 의 거리 (km)
- L_{n+1} : AT_{n+1} 의 거리 (km)
- Q_1 : AT_n 측의 보정계수
- Q_2 : AT_{n+1} 측의 보정계수
- d : AT에서 고장점까지의 거리 (km)
- D : AT간의 거리

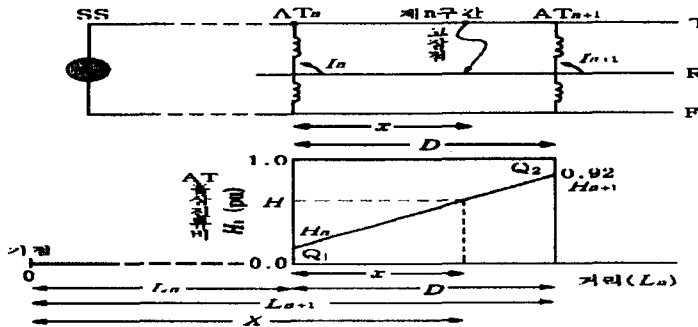
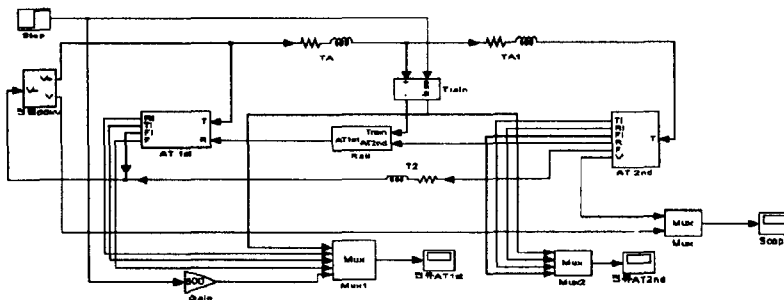


그림4.1 AT전류비 방식 고장점표정장치 원리도

4.2 급전회로 Modeling

AT전류비 방식 고장점표정장치의 유용성을 검증하기 위해 급전회로 Modeling은 현재 적용되고 있는 AT급전방식을 적용하였으며 선로 임피던스는 실제 측정결과를 적용하였다. 시뮬레이션을 실시하기 위한 Modeling 결과는 그림4.2와 같다.



4.3 시뮬레이션

최근 선로보호에 있어서 마이크로프로세서를 이용한 디지털 계전기가 실용화되면서 종래의 아날로그 보호계전 장치로는 이룰수 없었던 다양하고 복잡한 기술을 구현하고 있다. 최근의 전기철도 급전 시스템의 거리표정방식은 전력회사 송전선로의 경우와는 달리 흡상전류비를 이용

한 표정방식으로의 경향을 보이고 있다. 본 절에서는 AT전류비 방식에 의한 고장점 표정의 정확성 내지는 유용성을 검증하고자 시뮬레이션 알고리즘을 구현한다.

이를 위해서는 우선 철도급전계통의 급전회로 구성과 회로정수에 대한 정확한 회로모델링이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 전력계통 해석 프로그램인 Matlab을 이용하여 철도급전회로를 구성하고 급전회로의 선로정수는 실제계의 현장측정을 토대로 하였다.

Matlab으로 모델링된 급전구간중 임의의 점에서 전차선-레일 또는 급전선-레일간에 단락사고를 내어 사고점 양단의 전철변전소에서 변성기를 통해 들어온 AT전류비를 Matlab으로 계산하여 디지털제전기 입력으로 하였다.

그림4.3에 시뮬레이션 흐름도를 나타냈으며 그림4.4, 4.5에 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

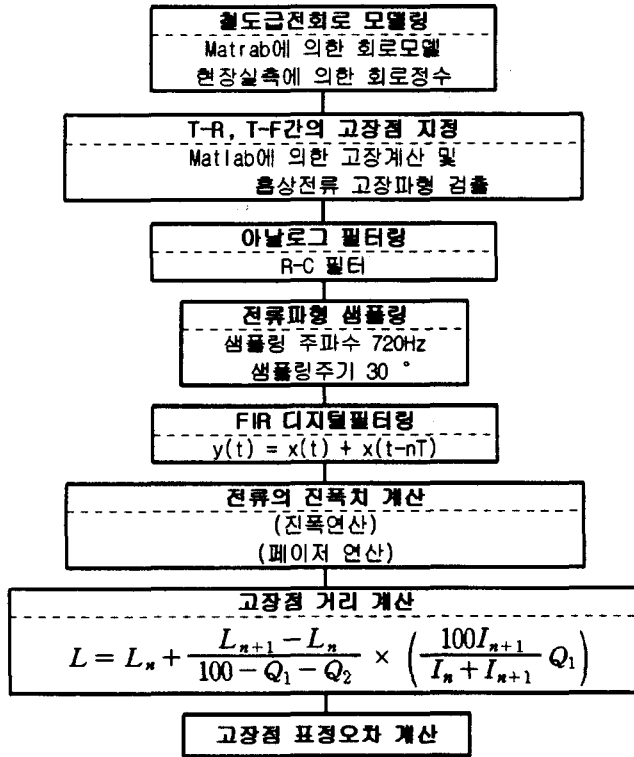


그림4.3 고장점표정 시뮬레이션 흐름도

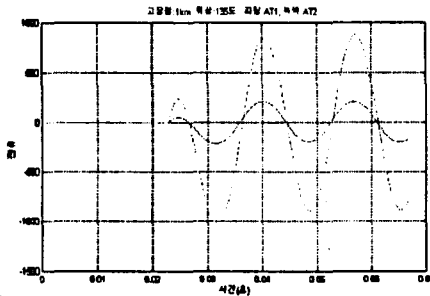


그림4.4 시뮬레이션 결과(1)

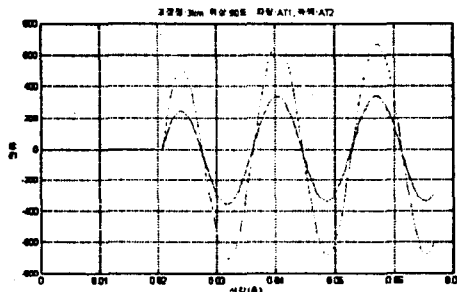
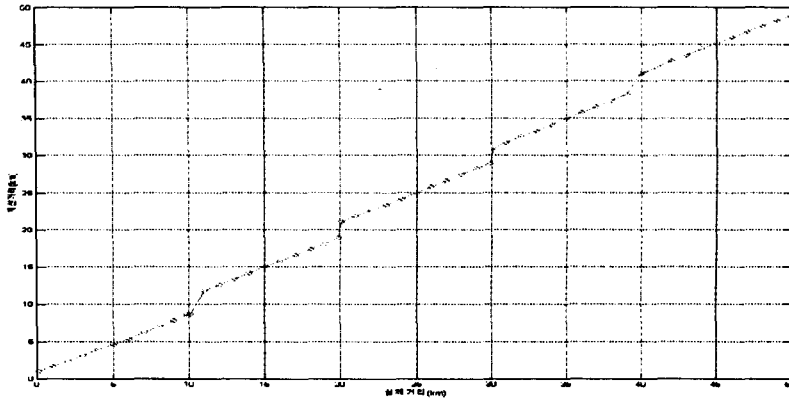


그림 4.5 시뮬레이션 결과(2)



구간내의 고장점	AT구간(10km)				
	AT구간 1	AT구간 2	AT구간 3	AT구간 4	AT구간 5
0.1	1.0278	8.6527	21.0669	31.0516	41.2620
1	1.6720	11.7504	21.7772	31.7578	41.9075
3	3.1296	13.3680	23.3955	33.3747	43.5944
5	4.6396	14.9802	24.9982	35.0023	45.2233
7	6.2071	16.5942	26.6219	36.6227	46.7941
9	7.8223	18.1855	28.2374	38.2411	48.3034

그림4.6 고장점표정 시뮬레이션 결과(종합)

5. 결론

본 논문에서는 전기철도 교류급전 시스템에서 운행되고 있는 전기차의 부하특성과 고조파 발생 메카니즘에 대해 검토 하였으며 급전회로 구성별 고장해석 기법을 제안하였다.

전기철도는 그 특성상 고장이 발생하였을 때 신속하게 차단하고 고장시간을 최소화하는 것이 가장 중요하다. 고장시간을 최소화하기 위해서는 고장발생 지점을 정확하게 예측하여야 하므로 전기철도 급전시스템에서는 고장점표정장치를 설치하여 운용하고 있다.

여기서는 새롭게 제안되고 있는 AT 전류비방식에 대해 유용성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 고장전류에 함유된 과도특성 및 고조파는 filtering을 통해 완전 소거
- 2) 급전회로 고장발생시 진폭 및 페이저 연산으로 정확한 고장전류 계산
- 3) 급전회로 고장발생시 정확한 고장지점 예측(정확도 약 97%)
- 4) 고장지점을 정확히 예측하기 위해서는 식(4-1)의 보정계수의 적절한 선정이 중요한 요인으로 작용하므로 급전계통별 특성을 정확히 반영할 필요가 있다.

참고문헌

- [1] 倉相勲 外, "전차선로 회로정수 측정 및 보호회로 최적화 방안 연구" 한국철도기술연구원 1997.
- [2] 倉相勲 外, "전철구간에서 발생하는 고조파 현황 및 대책연구" 한국철도기술연구원 1997.
- [3] WATANABE HIROSHI, "On Feeding Circuit Protection", Electric Railway, VOL. 31, NO. 2
- [4] TSUDA ELECTRIC METERS CO. "Instruction Manual of Fault Locating Relay for AC Feeder"
- [5] SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, "Phase and Ground Distance Relay Directional Overcurrent Relay Fault Locator", 1993
- [6] 特永芳文, "交流給電回路 保護方式" 鐵道と電氣技術, VOL.5, NO.11, pp73~78, 1994