

전철급전회로 보호시스템에 관한 연구

창상훈* 이장무* 한문섭* 오광해* 신한순* 김정훈**
* 한국철도기술연구원 **홍익대학교

A Study on the Protection System on the Electric Railways

SangHoon Chang*, ChangMoo Lee*, MoonSeob Han*, KwangHae Oh*, HanSoon Shin*, JungH
* Korea Railroad Research Institute **Hong Ik University

Abstract - The Load characteristic of electric railway requires the power demand of the high capacity which amplitude is spacial-temporally fluctuated due to frequent starting and stopping with large tractive force.

The conventional electric railway mainly consists of the resistance controlled and the thyristor controlled locomotives, are compensated for their bad characteristics of the power factor(70~80%) with installation of another capacitor improving power factor at the substation. Since 1994, VVVF train car with good characteristics of power factor(100%) have been introduced and operated in Kwa-Chon Line.

From the present technical tendency, it is judged that introduction of the locomotive with various controlled methods is necessary. The protective equipments installed at the substation are complicated and various aspects to detect faults and reduce their extension, so the universal countermeasures are required.

Specially in the case of the fault occurrence it is difficult to calculate the fault location because of the change in the contactline constant accroding to modifying the characteristics of the contactline (the dualized catenary wire and extension, etc), so much time is required for the detection of fault location. In BT-fed method distance-relays and fault-locators are not installed, we have so many difficulties in the quick accident recovery.

1. 서 론

최근 수송량의 증대로 전차선로의 이중화 및 중설 등 선로의 계통성이 변경되어 선로정수의 변동으로 인해 고장발생시 변전소에서 거리계전기에 의한 고장지점의 예측이 곤란하여 장애지점을 찾는 데 많은 시간이 소요되고 있어 신속한 장애복구에 어려움이 있는 실정이다.

전력의 안정적인 공급을 위해서는 장애발생시

정확한 고장지점의 파악 및 신속한차단이 필수적이므로 이를 위해서는 전차선로 각 구간별 선로정수의 측정관리 및 변전설비 보호설비에 대한 종합 검토로 과학적인 설비유지 방안을 확립하여 열차안전운행과 급전회로 보호방식의 불필요한 동작을 방지하고 전기차의 보호방식과의 협조를 고려하여 신뢰성 향상을 도모할 필요가 있다.

여기서는 급전회로의 부하특성과 각종 급전방식의 기술적 특징과 현재 적용되고 있는 거리계전기 고장점 표정방식에 대해 외국의 적용사례와 사고사례를 분석하여 우리의 여건에 맞는 고장점표정 방식의 채용을 검토하였으며 BT방식에서의 거리계전기 고장점표정 방식과 AT급전회로의 보호방식을 위한 전차선로 구성방식에 대하여 검토하였다.

2. 전차선로 회로정수 특성 분석

2-1 선로 임피던스

가공전선의 자기 및 상호임피던스는 전선의 크기, 재질 및 지표로부터의 평균높이, 전선상호간의 수평·수직거리 등에 의존하는데 이러한 회로정수는 급전회로가 정확히 구성되어 있는가를 확인하고 거리계전기의 정정치 결정, 리액턴스방식 고장점 표정장치의 표정곡선작성 및 전압강하 등의 계산에 적용된다.

교류급전회로에서 변전소로부터 급전측을 본 선로임피던스는 정확하게 계산하는 것이 중요하다. 여기서는 간이 계산식을 이용하여 AT 및 BT급전방식의 임피던스 산출기법에 대하여 기술한다.

2.1.1 BT급전방식

BT급전회로의 임피던스는 Fig. 1과 같이 전차선T-레일R과 전차선T-부급전선NF의 단락방식이 있으며 전차선T-레일R 단락시에는 계단형태, 전차선T-부급전선NF의 단락시에는 직선형태로 된다. 이 때문에 일반적으로 전차선T-부급전선NF 단락 임피던스를 사용한다. Fig. 1에서 등가자기임피던스를 사용하면

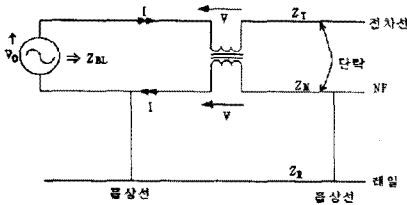


Fig. 1 BT 급전회로 구성

$$\begin{aligned} Z_T &= Z_{TT} + Z_{NR} - Z_{TN} - Z_{TR} \\ Z_N &= Z_{NN} + Z_{TR} - Z_{TN} - Z_{NR} \\ Z_R &= Z_{RR} + Z_{TN} - Z_{TR} - Z_{NR} \end{aligned} \quad (1)$$

흡상변압기의 누설임피던스를 무시하면

$$V_0 - V + V = Z_T I + Z_N I \quad (2)$$

전압 V_0 를 전류 I 로 나누면 급전회로 임피던스는 단위 길이당 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Z_{BL} = Z_T + Z_N = Z_{TT} + Z_{NN} - 2Z_{TN} (\Omega/\text{km}) \quad (3)$$

2.1.2 AT 급전방식

AT급전방식은 전차선T, 급전선F, 레일R 및 보호선PW로 구성되어 전류분포가 복잡하므로 선로 임피던스는 용이하게 구하기 어렵다.

이 때문에 Fig. 2와 같이 보호선을 무시한 단선 등가회로를 이용하여 등가자기 임피던스에 의해 구하는 방법을 나타냈다. AT등가회로의 자기임피던스는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z_T &= Z_{TT} + Z_{FR} - Z_{TF} - Z_{TR} \\ Z_F &= Z_{FF} + Z_{TR} - Z_{TF} - Z_{FR} \\ Z_R &= Z_{RR} + Z_{TF} - Z_{TR} - Z_{FR} \end{aligned} \quad (4)$$

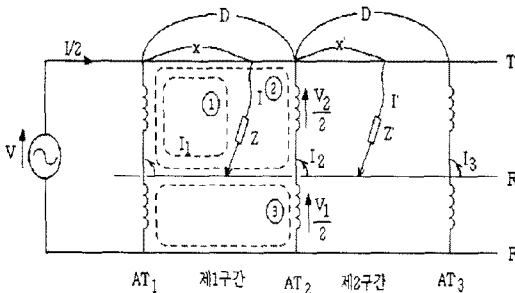


Fig. 2 단선등가회로에 의한 해석

Fig. 2의 등가회로 loop ①~③에서 키르히호프의 법칙을 적용하면 다음식이 성립한다.

$$\frac{V}{2} = Z(I_1 + I_2) + Z_T x \left(\frac{I_1 + I_2}{2} \right) + Z_R x I_1 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{V}{2} - \frac{V_2}{2} &= \\ Z_T x \left(\frac{I_1 + I_2}{2} \right) - Z_T (D-x) I_2 / 2 &+ \\ + Z_R x I_1 - Z_R (D-x) I_2 & \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{V}{2} - \frac{V_2}{2} = \frac{Z_F D I_2}{2} - \frac{Z_R x I_1 + Z_R (D-x) I_2}{2} \quad (7)$$

이 식에서 I_1, I_2 를 구해 전압을 분류하여 거리 x 점에서 T-R이 단락한 경우 선로임피던스는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{AL} &= \frac{2V}{(I_1 + I_2)} \\ &= 4Z + 4D \left(\frac{Bd - A^2 d^2}{G} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A &= Z_T + 2Z_R, \quad B = Z_T + Z_R, \\ G &= Z_T + Z_F + 4Z_R \end{aligned}$$

$$H = Z_T Z_F + Z_T Z_R + Z_F Z_R, \quad d = \frac{x}{D}$$

각 구간에서 Z_{AL} 은 공동으로 1구간 경과할 때마다 $4DH/G$ 씩 증가한다. 이러한 식은 AT누설임피던스 Z_{AT} 는 $j1.6\Omega$ 정도를 가산할 필요가 있다.

또 T-F단락시의 선로임피던스는 왕복회로 이므로 다음 식으로 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} Z_{T-F} &= Z_T + Z_F \\ &= Z_{TT} + Z_{FF} - 2Z_{TF} \quad (\Omega/\text{km}) \end{aligned} \quad (9)$$

이 결과 T-R단락임피던스는凸모양으로 되므로 계산의 간소화를 위해 임피던스의 평균적인 값을 사용한다.

$$Z_{T-R}' = 2Z_{AT} + Z_{T-F} (\Omega) \quad (10)$$

이 Z_{T-R}' 의 최대값은 Z_{T-R} 의 최대값과 거의 동일한 값이 된다.

이상의 방법으로 구한 임피던스는 50kV계통의 값으로 이 값의 1/4이 전기차량 전압기준이 되는 25kV계통의 값이 된다.

2-2 회로정수 측정 및 분석

2.2.1 회로정수 측정기법

회로정수의 측정방법은 전원측의 \ominus 단자가 보통 접지되어 있기 때문에 절연변압기로 절연을 하고 전압선과 전류선을 분리시키며 전압강하를 방지하기 위해 전류회로에는 CV 22mm, 전압회로에는 5.5mm를 사용한다.

단락시키는 방법은 BT방식인 경우 전차선T-레

일R, 전차선T-부급전선NF, AT급전방식인 경우 전차선T-레일R, 전차선T-급전선F, 급전선F-보호선PW, 전차선T- 보호선PW의 방법이 있으며 측정 지점에서 전압을 인가(저압)하며 전류는 일반적으로 5~10A정도 통전시킨다.

이때 전압, 전류, 위상을 측정하여 이 값을 횡축에 거리, 종축에 임피던스를 그리면 거리별 회로정수를 구할 수 있다.

2.2.2 회로정수 측정결과

선로임피던스에는 전차선 T - 레일R 단락과 전차선T-부급전선NF 단락이 있는데 전자는 계단모양이고 후자는 직선모양이다.

AT급전방식은 약 10km간격으로 AT를 배치하고 권선의 한쪽을 전차선에, 다른 쪽은 급전선에 그리고 중앙을 레일에 접속한다. AT급전방식은 전차선의 색손구성을 간단하게 하고 변전소 급전전압을 전차선 전압의 2배로 하므로써 변전소 간격을 길게 할 수 있고 대전력의 공급에 적합하다.

선로 임피던스는 AT점 및 CPW점을 절점으로 하여 확대되며 복잡해 진다. 선로 임피던스를 거리계 전기의 보호영역을 나타내는 저항(R)-리액턴스(X)도를 그림으로 나타내면 Fig. 3-3과 같다. 즉 임피던스각은 예를들면 AT 및 BT방식의 경우 약 75°이다.

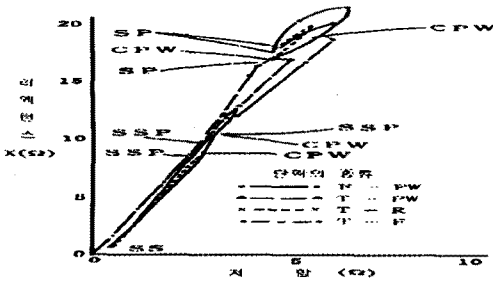


Fig. 3 AT급전회로의 R-X특성

3. Digital Relay 방식

디지털릴레이의 기본이론과 동작원리는 종래의 아날로그 릴레이와 동일하다.

다만, 릴레이의 입력을 양자화하고 이에대한 연산을 수치계산함으로써 동작특성을 보다 다양하게 부여할 수 있다는 점이 차이로 할 수 있으며 입력부와 연산처리부로 구성된다.

3.1 Sampling

계통의 변성기로부터 들어온 입력정보는 아날로그 양이며 이 정보를 디지털화 하기 위해서는 일정 간격으로 샘플링되어야 한다.

샘플링 정리에 의해, 주파수가 f 인 파형을 2배의

주파수로 샘플링하면 그 샘플링 데이터로부터 원래의 파형을 구현할 수 있다. 이 논리에 의하면 60Hz를 사용하고 있는 우리나라 전력시스템에서는 샘플링주파수를 120 Hz로 잡아도 된다. 그러나 실제 디지털 릴레이의 적용에서는, 사고시 고조파 및 직류 성분이 포함되고, 릴레이의 응답속도를 증대해야 하며, 컴퓨터의 처리속도가 문제가 될 수 있으며, 연산처리에 적합한 샘플링간격(예를 들면, 360°)의 약수가되는 전기각)을 선정할 필요가 있다. 이런 이유로 샘플링 주파수로는 300Hz~1200Hz 정도가 사용되며 일반적으로 720Hz 즉, 샘플링간격 30°를 주로 채용하고 있다.

3.2. 기본 연산 알고리즘

종래의 아날로그 릴레이 성능을 포함하고 더욱 다양한 특성을 구현하기 위해서, 디지털 릴레이는 기본적으로 몇 가지 연산을 행하여야한다. 다음은 디지털릴레이에서 사용되고 있는 기본연산 알고리즘이다.

- 디지털 필터링
- 이상(Phase Shift) 연산
- 진폭치(amplitude) 연산
- 위상차 연산
- 페이저(Phasor) 연산
- 반한시성 연산

샘플링을 통하여 디지털화된 계통 정보(전압, 전류)에 대하여 위의 기본연산 알고리즘을 적절히 조합함으로써 디지털 보호계전을 행하게 된다.

3.3 디지털 거리계전알고리즘

벡터형 알고리즘은 트랜지스터형 계전원리를 그대로 디지털 처리한 것으로 적연산형과 가산연산형의 두가지가 있다.

선로(회로)방정식형 알고리즘은 전류, 전압 데이터를 선로방정식에 대입해서 Relay가 보는 $(R+jX)$ 를 직접산출하여 임피던스 평면상에서 설정된 위상특성과 비교하여 거리계전기를 실현하는 것이다.

이러한 거리계전기의 대표적 요소에는 Offset Mho요소, Mho요소 및 Reactance 요소가 있다. 이를 실현하기 위한 계전알고리즘은 앞서 설명한 기본 적산연산들을 이용하여 구현될 수 있다.

3.4. 디지털계전기의 고장점 표정시물레이션

최근 선로보호에 있어서 마이크로프로세서를 이용한 디지털 계전기가 실용화되면서 종래의 아날로그 보호계전 장치로는 이룰수 없었던 다양하고 복잡한 기술을 구현하고 있다. 최근의 전기철도 급전

4. 결론

시스템의 거리표정방식은 전력회사 송전선로의 경우와는 달리 흡상전류비를 이용한 표정방식으로서의 경향을 보이고 있다. 본 절에서는 흡상전류비 방식에 의한 고장점 표정의 정확성 내지는 유용성을 검증하고자 시뮬레이션 알고리즘을 구현한다.

계산된 두 흡상전류의 진폭치를 AT 흡상전류비 방식의 고장점표정식에 대입함으로써 최종적으로 고장점까지의 거리를 계산한다. 사고점 거리를 L (km), 단권변압기 AT_n 까지의 거리를 L_n (km), AT_{n+1} 까지의 거리를 L_{n+1} (km), AT_n 측과 AT_{n+1} 측의 보정계수를 각각 Q_1, Q_2 라고하면 고장점 거리는 다음과 같이 계산된다.

$$L = L_n + \frac{L_{n+1} - L_n}{100 - Q_1 - Q_2} \times \left(\frac{100I_{n+1}}{I_n + I_{n+1}} Q_1 \right) \quad (11)$$

위 계산식(식12)에 의한 시뮬레이션 결과를 Fig. 4~6에 나타낸다.

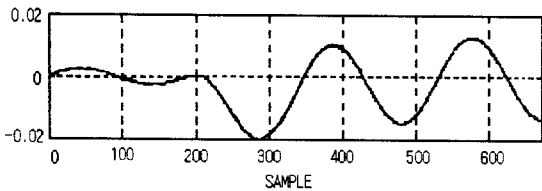


Fig. 4 EMTDC로 계산된 흡상전류 파형

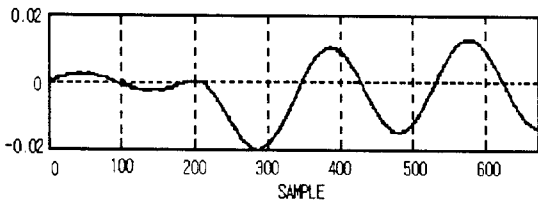


Fig. 5 RC Filter을 통과한 사고전류 파형

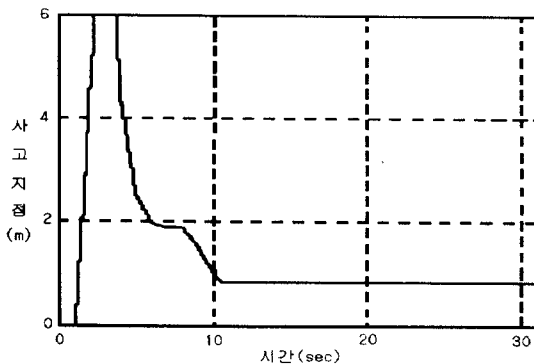


Fig. 6 사고점 표정계산의 수렴특성

앞으로의 기술추세로 보면 제어방식이 다양한 차량의 도입은 필연적이라 판단되어 이를 검지하고 사고의 파급을 줄이기 위한 전철변전설비의 보호설비 또한 복잡하고 다양한 양상을 띠게 되므로 이에 대한 종합적인 대책이 요구되어 기술적인 분석을 통하여 전철급전방식에서의 각 보호방식 유용성을 검증하였는데 현재 AT 급전구간에서 운용중인 리액턴스 방식의 고장점 표정장치는 임피던스 특성이 거리에 직선적으로 비례하지 않기 때문에 사용상에 문제점이 있어 본 연구에서 검토한 AT 흡상전류비 방식 표정장치의 적용이 요구된다.

또한 거리계전기 오동작의 원인이 계전기 셋팅상의 문제인지 부하PATTERN이 다른 차량(저항제어 차량, Thyristor 위상제어차량, PWM 제어차량)의 도입에 의해 부하가 계전기 영역에 침입하여 오동작하는지 여부에 대해 차후 실험을 통해 검증하고자 한다.

(참고 문헌)

- [1] WATANABE HIROSHI, "On Feeding Ci Protection", Electric Railway, VOL. 31, NO.
- [2] 倉相勳 外, "전차선로 회로정수 측정 및 보호회로 최적화 방안 연구 보고서", 한국철도기술연구원 1997.
- [3] TSUDA ELECTRIC METERS CO. "Instru Manual of Fault Locating Relay for AC Feed"
- [4] MITSUBISHI ELECTRIC CORP., "Mitsu KKS-7-D Square Characteristics Distance R Instruction Manual", 1992.
- [5] SCHWEITZER ENGINEERING LABORATOR "Phase and Ground Distance Relay Direc 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.