

AT 철도 급전계통에서의 고장점 표정 알고리즘

서재범* 강상희* 이승재* 정병태**
*영지대학교 전기공학과 **피앤씨 테크(주)

Algorithm for Fault Location in AT Feeding Railway System

Jae-Beom Seo* Sang-Hee Kang* Seung-Jae Lee* Byung-Tae Jung**
*Dept. of Electrical Eng. Myongji University **P&C Technologies Co.,Ltd

Abstract In this paper, an algorithm for fault location in *Auto Transformer(AT)* Feeding Railway system is presented. If a fault occurs at the AT feeding circuits of electrical railway system, it is very important to find fault location and to remove it immediately for the purpose of ensuring safety for transportation. Because the characteristics of reactance - distance are not linear, only using one terminal signals to give fault distance is difficult. In this paper, first, using the KVL, 4 voltage equations are obtained. Secondly, eliminating voltage a distance equation which consists of currents at rail and line parameters including mutual effects.

1. 서 론

우리나라 전기철도는 1972년 시험선 건설을 시작하여 그 동안 산업선 및 수도권 전철화로 화물수송과 승객수송에 중추적인 역할을 담당하고 있으며, 교통수요의 급증과 환경 친화적인 특성, 에너지 절감 등의 측면에서 그 중요성이 더욱 부각되고 있다. 전기철도 급전방식은 직류급전과 교류급전 방식이 있으며, 교류급전 방식으로는 흡상변압기를 사용한 BT 급전방식, 단권변압기를 사용한 AT 급전방식, 직접 급전방식으로 구분된다. 최근 부하전류의 급증으로 대전력, 장거리 급전 및 유도장해 측면에서 유리한 AT 급전방식이 가장 많이 시설되어 있으며, 경부고속철도의 경우도 AT 급전방식이 도입되었다.

전기철도는 그 특성상 고장이 발생하였을 때 신속하게 차단하고 고장시간을 최소화하는 것이 가장 중요하다. 고장시간을 최소화하기 위해서는 고장발생 지점을 정확히 예측하여야 하므로 전기철도 급전시스템에서는 고장점 표정장치를 설치하여 운용하고 있다. 지금까지는 AT 급전방식에 리액턴스 방식의 고장점 표정장치가 사용되어 왔으나, AT 급전회로의 임피던스 특이성으로 정확한 고장지점을 예측하는데 한계가 있어, 최근 AT 흡상전류비 방식의 고장점 표정 알고리즘이 새롭게 제안되고 있다. [1] 본 논문에서는 키르히호프의 전압법칙에 근거해 얻은 4개의 전압방정식으로부터 각 임피던스와 레일의 전류만으로 구성되는 거리방정식을 얻어 고장점을 찾을 수 있는 방법을 제시하였다. 시험 계통으로는 임의로 10 [km] 마다 4개의 AT가 존재하는 모의구간을 설정하여 1[km] 마다의 단락 사고에 대한 시뮬레이션 결과를 통하여 그 유용성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 AT 급전계통 구성

AT 철도 급전계통을 이해하는데 AT의 위치와 변전소의 공급구간, 열차의 위치 등의 계통의 구성을 확인하는

것은 중요하다. 본 논문에서는 공급 구역 내 AT가 4개 설치되어 있는 일반적인 교류 철도 급전 계통에 대해 모의를 하였으며, (그림 1) 전원 변전소의 변압기 내부임피던스와 (Zs), AT의 내부임피던스(ZAT) 등을 고려한 등가회로를 사용하였다. AT 급전계통에서 열차전류는 공급되는 구역 내 어떤 구간에 열차가 존재하여도 모든 AT를 통하여 임피던스의 크기에 반비례하여 분배된다. (2)(3)

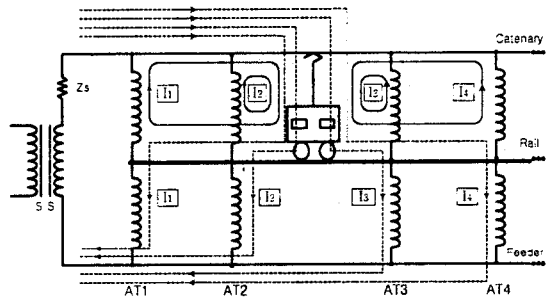


그림 1 일반적인 AT 급전계통 구성

그림 1에서 열차가 운행되는 한 시점에서 AT는 열차에 전류를 공급하는 역할을 하기 때문에, AT 코일들은 독립적인 전압 전원으로의 표현이 가능하다.

2.2 AT 흡상전류비 고장점 표정 방식

AT 급전회로에서는 리액턴스-거리 특성이 비선형 특성을 가지고 있으며, 고장종류에 따라 복잡하고 특성이 달라 리액턴스 계측방식에서 오차가 커 실용적이지 못하다. 현재 제안되고 있는 흡상전류비 방식은 고장 발생 시에 고장점을 사이에 두고 양쪽 AT에 유입되는 전류를 동시에 계측하여 양측 전류의 스칼라량의 합에 대한 비로 고장점 거리를 구하는 방식이다.

이 방식의 고장점 표정 원리는 AT 급전회로에 적용되며, 그림 2와 같이 AT 교류 급전계통에서의 사고에 대해 변전소에서 고장점을 특정 AT 사이로 좁혀 양측의 AT에 대한 회로로 간략화 하여 고장거리를 구한다. 이 방식에는 양단의 AT는 동일 전압, 동일 위상의 전원으로 취급한다. 이 2개의 인접한 AT의 흡상전류를 동시에 계측하여 스칼라 양에 대한 비를 구하고 이 비율에서 고장점을 표정하는 것이다.

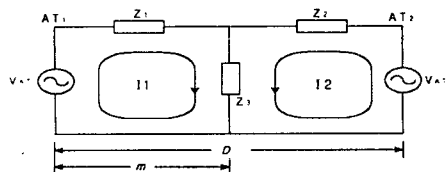


그림 2 AT 고장점 표정 간략 회로

위 회로에 대한 회로방정식을 정리하면 다음과 같으며,

$$V_{AT} = Z_1 I_1 + Z_3 (I_1 + I_2) \quad (1)$$

$$V_{AT} = Z_2 I_2 + Z_3 (I_1 + I_2) \quad (2)$$

여기서,

V_{AT} : 급전 전압,

Z_1 : AT₁과 고장점 간의 임피던스

Z_2 : AT₂와 고장점 간의 임피던스

Z_3 : 고장점 임피던스

위의 두 식을 이용하여 고장전류에 대한 AT₂의 전류비를 구하면 다음과 같다.

$$H = \frac{I_2}{I_1 + I_2} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{m}{D} \quad (3)$$

여기서,

D: AT₁과 AT₂의 설치간격,

m: AT₁에서 고장점까지의 거리

위 식에서 고장전류에 대한 AT₂의 증성선 전류의 비가 고장점 거리에 비례하는 것을 알 수 있으며, 실제 거리에 대하여 직선적인 관계가 있으므로 전류비의 곡선과 실측된 사고 데이터의 곡선과 비교하여 고장점까지의 거리 m을 표정할 수 있다. 그러나 이 방식은 AT 급전계통에 대한 상호 임피던스 성분과 AT 누설임피던스에 대해 고려하지 않기 때문에 실측된 사고 데이터를 바탕으로 각 구간에 대해 경험적인 보상계수를 이용하여 제안된 일반식을 적용하였다.

$$m = L_n + \frac{(H - C_1) \times D}{C_2} \quad (4)$$

여기서,

m: 사고점 거리, D: AT 간의 거리

C₁, C₂: 각 AT에서의 보상계수

특히, 위 식에서 AT 사이에 사고가 발생한 경우 흡상되는 전류는 AT점의 조건 즉, AT 자체의 누설 임피던스, 선로의 종류, 철탑과 레일의 접지저항 등에 따라 변화된다. 따라서, C₁, C₂ 값을 실제 사고가 발생한 경우 실제 사고 거리를 참고로 하여 결정하는 것이 가장 정확하다.

2.3 새로운 고장점 표정 방식

AT 흡상전류비 방식은 각 AT로 흡상되는 전류의 비를 이용하여 실제 거리에 대해 매우 근접한 결과를 얻을 수 있으나, AT 계통에 대해 AT 누설임피던스와 상호 임피던스 성분을 고려하지 않으므로 실측된 사고 데이터를 이용하여 보상계수를 적용한 알고리즘이 적용되고 있다. 본 논문에서는 AT 교류급전 계통에 대해 AT 누설 임피던스와 상호임피던스를 고려하여 보상계수를 배제한 보다 일반화된 알고리즘을 구현하였다.[2]

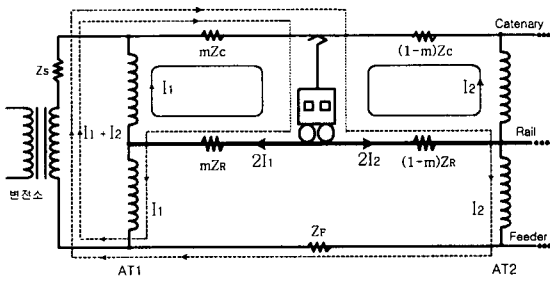


그림 3 AT 급전 계통의 전류 구성

그림 3에서 AT 코일들은 독립적인 전압 전원으로 표현이 가능하다. 그 이유는 열차가 운행되는 한 시점에서 AT는 열차에 전류를 공급하는 역할을 하기 때문이다.

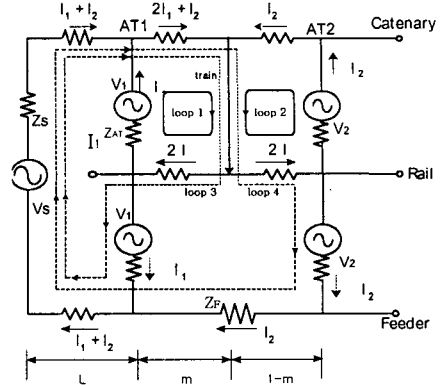


그림 4 AT 급전 계통 등가화

그림 4에서 AT 구간 사이에 단락사고가 발생한 경우, 각 loop에 흐르는 전류에 대해 전압방정식을 정리하면 다음과 같다.

loop 1:

$$V_1 = Z_{AT}(I_1) + mZ_C(2I_1 + I_2) + mZ_R(2I_1) - mZ_{CR}(2I_1) - mZ_{CF}(I_2) - mZ_{CR}(2I_1 + I_2) + mZ_{RF}(I_2) \quad (5)$$

loop 2:

$$V_2 = Z_{AT}(I_2) + (1-m)Z_C(I_2) + (1-m)Z_R(2I_2) - (1-m)Z_{CR}(2I_2) - (1-m)Z_{CF}(I_2) - (1-m)Z_{CR}(I_2) + (1-m)Z_{RF}(I_2) \quad (6)$$

loop 3:

$$V_s = Z_s(I_1 + I_2) + \frac{1}{2}Z_C(I_1 + I_2) + \frac{1}{2}Z_F(I_1 + I_2) + V_1 + Z_{AT}(I_1) + mZ_C(2I_1 + I_2) + mZ_R(2I_1) - mZ_{CR}(2I_1) - mZ_{CF}(I_2) - mZ_{CR}(2I_1 + I_2) + mZ_{RF}(I_2) - Z_{CF}(I_1 + I_2) \quad (7)$$

loop 4:

$$V_s = Z_s(I_1 + I_2) + \frac{1}{2}Z_C(I_1 + I_2) + \frac{1}{2}Z_F(I_1 + I_2) + mZ_C(2I_1 + I_2) + (1-m)Z_R(2I_2) + Z_{AT}(I_2) + V_2 - mZ_{CR}(2I_1) - mZ_{CF}(I_2) - (1-m)Z_{CR}(I_2) + (1-m)Z_{RF}(I_2) + (1-m)Z_{CF}(I_2) - (1-m)Z_{RF}(2I_2) - mZ_{CF}(2I_1 + I_2) + mZ_{RF}(I_1) \quad (8)$$

이상적인 1:1 단권변압기(AT)를 사용한다면 변압기 1차측과 2차측 전압이 같으므로 ⑤-⑥과 ⑦-⑧을 정리하면 고장거리 m에 대한 식으로 정리할 수 있다..

$$\frac{m}{D} = \frac{(\frac{1}{2}Z_C + 2Z_R + \frac{1}{2}Z_F - 2Z_{CR} + Z_{CF} - 2Z_{RF})I_b}{(Z_C + 2Z_R - 3Z_{CR} + Z_{CF} - Z_{RF})(I_a + I_b)}$$

여기서,

m : AT₁에서 고장점까지의 거리

D : AT₁과 AT₂ 사이의 거리

Z_C : Catenary 자기 임피던스

Z_R : Rail 자기 임피던스

Z_F : Feeder 자기 임피던스

Z_{CR}: Catenary - Rail 상호 임피던스
 Z_{CF}: Catenary - Feeder 상호 임피던스
 Z_{RF}: Rail - Feeder 상호 임피던스

2.4 고장점 표정 시뮬레이션

AT 흡상전류비 방식 고장점 표정 알고리즘의 유용성을 검증하기 위해 급전회로 모델링은 현재 적용되고 있는 그림 1의 AT 교류 급전방식을 적용하였으며, 선로 임피던스는 표 1에 나타내었다. AT 교류 급전회로에 대한 구성 및 모델링은 전력계통 해석 프로그램인 EMTP를 이용하였다. 각각의 AT 간의 거리는 10(km)로 설정하였으며, EMTP로 모의된 급전 구간에서 1(km)마다 전차선-레일 또는 급전선-레일간에 단락사고를 내어 사고점 양단의 AT 흡상전류비를 입력으로 하였다.

표 1 계통의 임피던스 값

| 임피던스 종류 | 크기 |
|---------------------------|----------------------|
| 전차선(Z _C) | 0.194 + j0.731(Ω/km) |
| 레일(Z _R) | 0.009 + j0.467(Ω/km) |
| 급전선(Z _F) | 0.122 + j0.587(Ω/km) |
| 전차선-레일(Z _{CR}) | 0.053 + j0.373(Ω/km) |
| 레일-급전선(Z _{RF}) | 0.058 + j0.369(Ω/km) |
| 급전선-전차선(Z _{CF}) | 0.051 + j0.361(Ω/km) |
| 전원(Z _s) | 2.3600 + j19.50 (Ω) |
| AT내부(Z _{AT}) | 0.0287 + j0.449 (Ω) |

EMTP 시뮬레이션을 통한 전류데이터는 샘플링 주파수는 36샘플 10주기의 데이터(2160Hz, 10°간격)를 이용하였다. 또한 아날로그 필터와 FIR 필터를 이용하여 필터링 한 후, DFT를 사용하여 페이서로 연산을 하였다. 전체 급전 계통에 대한 고장점 표정 결과에 대해 표 2에 정리하였다.

표 2 고장점 표정 시뮬레이션 결과

| 사고 위치(Km) | AT ₁ ~AT ₂ | AT ₂ ~AT ₃ | AT ₃ ~AT ₄ |
|-----------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 0.1 | 0.420 | 0.422 | 0.386 |
| 1.0 | 1.335 | 1.344 | 1.311 |
| 2.0 | 2.251 | 2.264 | 2.233 |
| 3.0 | 3.166 | 3.184 | 3.153 |
| 4.0 | 4.081 | 4.103 | 4.071 |
| 5.0 | 4.996 | 5.019 | 4.987 |
| 6.0 | 5.911 | 5.935 | 5.901 |
| 7.0 | 6.825 | 6.849 | 6.811 |
| 8.0 | 7.740 | 7.763 | 7.720 |
| 9.0 | 8.655 | 8.675 | 8.626 |
| 9.9 | 9.569 | 9.586 | 9.530 |

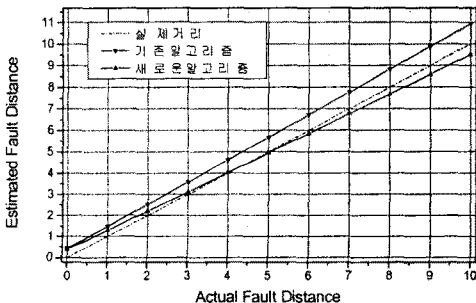


그림 5 고장점 표정 시뮬레이션 결과 비교

그림 5는 기존의 AT 흡상전류비 알고리즘과 새로운 고장점 표정 알고리즘의 결과에 대해 AT₁과 AT₂ 사이의 고장점 표정 결과에 대해 나타난 것이다.

그림 6은 시뮬레이션 결과에 따른 실제고장지점과의 표정오차를 나타낸 것으로 기존의 방식에서 경험적인 보상계수를 사용하지 않으며, 어떠한 경우에도 오차는 1(km) 이내로, 이것은 경험적인 보상식을 적용하고 있는 일본 전기철도의 고장점 표정 알고리즘과 거의 비슷한 결과를 보여주고 있다.

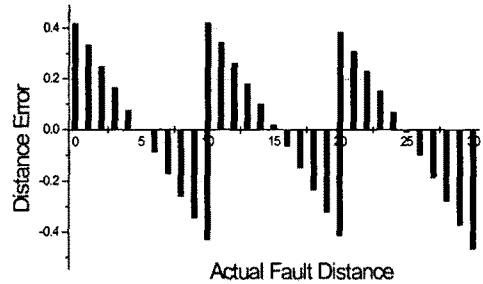


그림 6 고장점 표정 오차

3. 결 론

지금까지는 우리나라의 AT 철도 급전방식에 리액턴스 방식의 고장점 표정장치가 사용되어 왔으나, AT 급전회로의 임피던스 특이성으로 정확한 고장지점을 예측하는데 한계가 있어, 최근 AT 흡상전류비 방식의 고장점 표정 알고리즘이 새롭게 제안되고 있다. AT 흡상전류비 방식은 고장발생시 정확한 고장지점을 예측하지만 AT점의 조건에 따라 변화되는 요소에 대해 경험적인 보상계수를 각 구간 특성에 맞게 적용하여야 하는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 경험적인 보상계수를 배제하는 AT 누설임피던스와 상호 임피던스가 고려된 새로운 흡상전류비 고장점 표정 알고리즘을 제시하고, AT 각 구간에 대해 그 유용성을 검증하였다. 차 후 연구문제로는 AT 철도 급전회로의 모든 선로에 대한 정확성 검증이 필요하다.

(참 고 문 헌)

- [1] 철도청, "전차선로 회로정수 측정 및 보호회로 최적화 방안 연구", 1998.12
- [2] R.j.Hill "Parallel computer simulation of auto transformer-fed ac traction networks" Proc.1990 ASME/IEEE JOINT RAILROAD CONF.,1993
- [3] R.j.Hill "On-Line Simulation of Voltage Regulation in auto Transformer-Fed AC Electric Railroad Traction Networks", Vol.42.No.3, pp.365-372,1993
- [4] 김재철 외, "교류 전기의 AT 급전계통 내 다수열차 운행 모의알고리즘연구", KIEE, Vol.50P-No.2,2001.6