전철시스템에서의 보호시스템에 관한 연구
A study on the protection system in electrified railways system

이희용[1)] 이종우[2)]
LEE Heeyong LEE Jongwoo

ABSTRACT

Recently, the load increasement and regenerative system of electrified railway system make a difficult to distinguish between the load current and fault current and it need a new intelligent protection system. The failure of traction system cause collapse of the other systems from high tension current. The over current from abnormal situation produces high tension current flow, high temperature arc, voltage instability and current cutting, and break down railway systems. Protective system of traction system play a role of which detect and isolate failure points. In this paper, we proposed intelligent algorithm for discriminating normal and abnormal situation instead of the system being operated abnormally.

1. 서 론

전기철도에는, 직류급전 방식 및 교류급전방식이 있다. 교류회로에 발생하는 고장에는 변전소 내 및 급전회로에의 단락 및 지락이 있다. 특고압이기 때문에 고장전류가 크므로, 순시에 검출하여 고장을 제거할 필요가 있다. 변전소 내 보호 계전기에 의해 고장을 검출함과 동시에, 전차선로에도 보호가 용이하도록 회로를 구성하도록 하여야 한다.

최근에는 전기차의 고속화에 더불어 부하전력의 증가와 전력회생을 하는 전기차를 사용하고 있기 때문에 고장전류와 부하전류 간의 커다란 차이가 없어, 고도한 보호시스템이 필요하게 된다.

급전시스템의 고장은 여러 가지 방향으로 시스템을 무력화시킬 수 있다. 대표적인 예로서는 급전시스템에 비정상적인 과대 전류의 도통, 고온의 아크의 동반, 전압의 불안정, 전원 불평형 상태, 전력흐름의 차단하거나, 시스템의 불안정과 다운을 발생시킨다.

보호시스템의 역할은 시스템에서 고장점의 검지와 분리, 연결된 시스템으로의 확대방지, 정상적으로 작동이 되어야 하며, 대부분 고장은 자가치료 돼서 시스템이 원래 상태로 되돌아 가야하며, 보호시스템이 비정상적으로 작동되지 않도록 정상과 비정상 상태를 분명하게 구분할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 각각의 특성에 개발된 교류회로 보호시스템을 컴퓨터를 이용하여 Digital 보호시스템을 개발하기 위한 알고리즘을 개발하였다.

2. 교류전기철도의 보호방식

2.1 교류회로의 고장현상 및 보호방법

교류전기철도에서 발생하는 고장에는 변전소에서 변압기 및 차단기 등의 기기고장 및 주회로의 단락·지락고장, 급전회로에서의 지락·단락의 고장이 있다.

1) 서울산업대학교 철도전문대학원
2) 한국철도기술연구원 전기신호연구본부 책임연구원

- ***변전소내의 이상현상***

급전용 변압기의 내부의 고장은 온도, 압력, 냉각유의 흐름, 유량 및 과전류 등에 의해서 층간 권선단락, 절연파괴 등이 발생하며, 보호 시스템은 변압기 용량 및 형식에 따라서 보호형태가 결정된다.

-***다른 전압원의 급전구분***

절체 개폐기는 진공개폐기를 사용하여 고신뢰성 설비이긴 하지만, 진공을 유지 못하여 극간 내전압이 저하되어 극간 섬락(flashover) 고장이 있다. 진공개폐기는 섬락될 때도 순간적으로 절연이 회복되는 경우가 있기 때문에, 변전소에는 거리계전기 또는 ΔI형 고장선택계전기가 동작하는 것을 조건에 출력하여, 급전구분소에는 작은 전류의 횡류가 흐로도록 검출할 수 있도록 보정값을 작게하는 것과 더불어, 100 ms정도의 시간을 필요로 한다.

-***급전회로의 고장***

급전회로의 사고원인은 차량고장, 가선고장, 과부하, 동물, 외부 침입물, 수목전도, 뇌해 등이 있다. 급전시스템 사고는 뇌해, 혼촉, 지락 및 단락에 의해서 과전류 도통 및 고압 도통 등이 발생한다.

보호설비는 급전회로의 특성에 따라서 각각 적용되며, 환경 조건에 대해서 발생하는 뢰의 전기적 이상현상에 대해서 급전회로를 보호하여 항상 정상적인 급전을 확보하는 것과 지락 등 급전시스템에 이상이 발생 시에 그것을 검지하고, 신속하게 차단하여 downtime을 적게한다. 교류급전회로에는, 애자섬락과 지락사고를 금속단락으로 행해져, 검출이 용이하도록 하고 있다.

변전소와 급전구분소에는 릴레이와 변전소 접지봉간에 방전장치가 설치되고, 지락고장이 발생하여 전위가 상승할 때 방전하는 것에 의해 고장검출이 용이하도록 되어있다.

2.2 교류회로의 고장원인, 파급영향 및 대책

표 1에서는 교류회의 사고, 파급영향 및 대책에 대해서 요약하였다. 급전용 변압기의 고장은 변압기 내부 고장과 외부에서 인가되는 과전압이 있다. 변압기의 고장은 층간권선 단락이 발생하여 변압기의 용량이 감소하고, 온도가 상승하고, 또한 궁극적으로는 절연파괴가 발생하여 전력공급상태가 발생한다.

급전모선에서는 고장원인에 의해서 단락 혹은 지락이 발생하여 과전류 혹은 과전압이 도통을 하게 된다. 과전압 혹은 과전류는 연결된 기기를 파손시킬 수 있으며, 인명을 살상할 수도 있다.

급전회로에서는 다양한 고장에 의해서 과전류와 과전압이 시스템에 도통될 수 있으며, 사고발생, 운전불능 및 전차선을 파괴할 수 있다.

표 1 교류회로의 사고, 영향 및 대책

보호대상	고장의 종류	발생현상	파급영향
급전용변압기	· 내부고장	· 층간권선단락 · 절연파괴	· 용량감소 · 전력공급불능
	· 회생에 의한 과전압		
급전모선	· 이상단락	· 과전류 도통	· 사고발생
	· 지락		
급전회로	· 단락 · 지락	· 과전류도통 · 과전압도통	· 사고발생
	· 부족전압		· 운전불능
	· 전차선 과부하	· 온도상승	· 전차선파괴

3. 급전회로의 보호시스템 설계

교류회로에 고장이 발생한 경우에 대부분의 현상은 과전류와 과전압이 흐르게된다. 이러한 이상전류 및 전압을 변전소 등에서 보호시스템에 의해 검출하여 차단기에 의해 고장전류를 차단한다.

3.1 전기차 부하특성

전기차 부하의 특징으로서 기존의 전기차 차량에는 변압기에 설비된 변압기의 탭 제어 혹은 사이리스터를 이용한 위상제어에 의해 직류전동기의 단자전압을 변화시켜 속도제어를 하고 있다. 최근에는 PWM 변환장치를 이용하여 직류의 정전압 변환을 하고, VVVF 변환장치에서는 삼상전력을 변환시켜 유도전동기를 구동하는 전기차를 개발하여 사용하고 있다.

변전소에의 부하특성으로서 전기차의 부하 역율은 사이리스터 위상제어차의 역행 시 0.7~0.8정도이며, 회생 시에는 0.4~0.5 정도이다. PWM 제어차는 역행시 1, 회생 시에 -1을 목표하여 제어를 수행하고 있다. 이 관계는 그림1에서 저항과 리액턴스 그림 상에 나타낸다.

전기차는 교류를 정류하여 사용하기 때문에, 교류측 전류에 고조파가 발생한다. 고조파의 함유율은 구형파와 삼각파의 중간에 있어, n을 고조파의 차수로 하고 기본파에 대해서 함유율을 표시를 하면은 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{I_n}{I_1} = \frac{(1\sim2)}{n^2} \cdot 100 \quad \text{---------- (1)}$$

고조파 함유율은 사이리스터 위상제어차에서 3조파 10~20%, 5조파 4~10%이며, PWM제어차는 사이리스터의 1/3정도이다. 고장전류는 고조파를 거의 포함하지 않는 정현파이다.

무부하 변압기를 투입하면 변압기에서 상하 비대칭 여자돌입전류가 흘러 100ms이내에서 감쇄한다. 급전회로의 무부하 변압기의 투입에는 초기 급전 시 AT의 투입과 전기차가 변전소 전 및 급전구분소 전이 다른 전압원 구분된 섹션을 통과할 때에 차량용 변압기에 돌입전류가 흐른다.

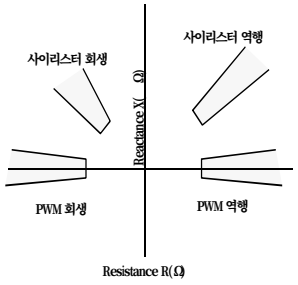

그림 1 전류허용영역

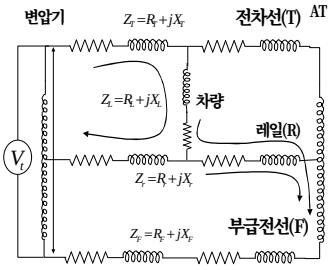

그림 2 등가교류급전회로

3.2 교류급전회로의 보호방식

교류급전회로는 그림2와 같은 등가회로로 표시가 되었을 때에, 변압기에 V_t에 일정전압이 인가 될 때에는 도통하는 전류 I_t는 교류회로 임피던스 $Z_t = Z_T + Z_R + Z_F$ 에 반비례한다. 임피던스 Z_t가 작아질 경우에는 전류 I_t가 커지게 되며, 어느 이상으로 커지게 되면 과전류가 흐르게 된다. 임피던스 Z_t 가 작아지는 경우는 단락·지락이 발생하는 경우나 차량의 부하가 커지는 경우이다. 임피던스 Z_t가 작아져서 평행사변형 영역으로 들어되면 과전류가 흐르게 되는 것으로서 보호시스템이 동작을 하여야 한다. 보호방식은 그림3과 같이 임피던스 영역을 설정하여 임피던스가 보호영역에 진입할 때 작동하는 보호장치, 급전전류 변화분 ΔI를 감시하여 ΔI가 일정이상 일 때에 동작하는 보호장치가 있다. 통상 2가지 보호방식을 조합하여 사용한다. 보호범위는 변전소에서는 급전 구분소까지 담당을 하며, 연장급전 시에는 SP에서 인접변전소까지 보호한다.

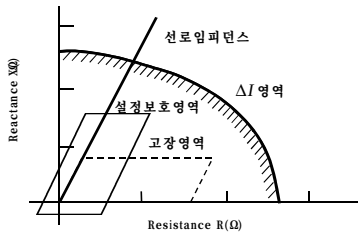

그림 3 전류허용영역

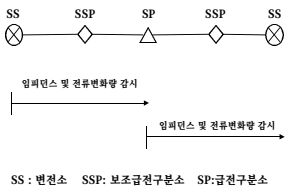

그림 4 전류허용영역

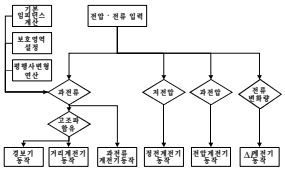

그림 5
교류회로보호시스템
동작구조

현재 교류시스템의 보호시스템으로는 급전회로의 임피던스를 감시 동작하는 거리계전기와 전류의 변화분을 검출하는 ΔI형 고장선택 계전기를 사용한다. 그림 5에서 통합형 교류급전회로 보호시스템 구조를 나타내었다.

3.2 교류급전선보호계전기설계

교류급전선 보호계전기의 기능에는 거리요소는 3종류가 잇고, 급전회로의 보호상 필요한 대역역(X_1, R_1), 부하로 불요동작을 하지 않는 소영역 (X_3, R_3)을 설계하여, 부하영역이 거리계전기의 보호영역(X_2, R_2)에 근접할 경우에 경보기능과 전류상승의 변화율 차이에 의해 고장을 검출하는 교류 ΔI형 고장선택계전기 요소를 포함하여야 한다.

- ***부하임피던스의 계산***

급전용 변전소의 PT 및 CT의 출력에서 전압·전류를 입력시켜, 저항분 및 리액턴스를 구한다. 그림파형은 그림6과 같이되고, 1cycle을 N번 분할하여 $v_n \cdot i_n$을 n번째 샘플링 값으로 하고, 3 cycle의 평균을 취한 후 푸리에 급수의 계수를 구한다. 기본파 성분은 다음과 같이 구한다.

$$V_{a1} = \frac{2}{N}\sum_{n=1}^{N} v_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right), \quad V_{b1} = \frac{2}{N}\sum_{n=1}^{N} v_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right)$$
$$I_{a1} = \frac{2}{N}\sum_{n=1}^{N} i_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi n}{N}\right), \quad I_{b1} = \frac{2}{N}\sum_{n=1}^{N} i_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \qquad \text{---------- (2)}$$

수 있다. 그림 7의 벡터도와 같이 표시된다.

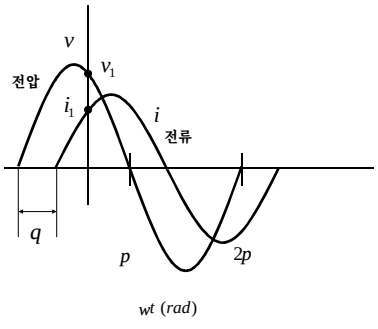

그림 6 급전전압·전파 파형

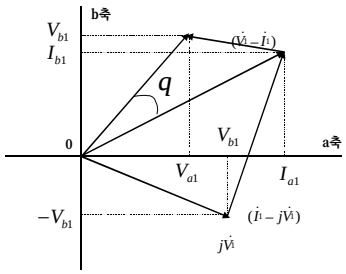

그림 7 프리에급수의 기본파 계수 벡터도

$\Delta(V_1,\ 0,\ I_1)$에 대해 정리를 하면은 다음과 같이된다.

$$\cos\theta = \frac{V_1^a + I_a^2 - (V_1 - I_1)^2}{2V_1 I_1}, \quad (V_1 - I_1)^2 = (I_{a1} - V_{a1})^2 + (V_{b1} - I_{b1})_2$$
$$V_1 = \sqrt{V_{a1}^2 + V_{b1}^2}, I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{b1}^2} \qquad \text{---------- (3)}$$

으로, $\cos\theta$와 $\sin\theta$를 구한다.

$$\cos\theta = \frac{V_{a1}I_{a1} + V_{b1}I_{b1}}{\sqrt{V_{a1}^2 + V_{b1}^2} \cdot \sqrt{I_{a1}^2 + I_{b1}^2}}, \quad \sin\theta = \frac{V_{a1}I_{a1} - V_{b1}I_{b1}}{\sqrt{V_{a1}^2 + V_{b1}^2} \cdot \sqrt{I_{a1}^2 + I_{b1}^2}} \quad \text{---------- (4)}$$

이것에서 변성기의 2차측에서 저항분(r)과 리액턴스(x)를
다음과 같이 구한다.

$$r = \frac{V_1}{I_1}\cos\theta = \frac{V_{a1}I_{a1} + V_{b1}I_{b1}}{I_{a1}^2 + I_{b1}^2}, \quad x = \frac{V_1}{I_1}\sin\theta = \frac{V_{a1}I_{a1} - V_{b1}I_{b1}}{I_{a1}^2 + I_{b1}^2} \quad \text{---------- (5)}$$

- ***k조파 함유율 연산***

전류파형의 k조파의 성분은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_{ak} = \frac{2}{N}\sum_{n=1}^{N} i_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right), \quad I_{b1} = \frac{2}{N}\sum_{n=1}^{N} i_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad \text{---------- (6)}$$

여기에서 기본파 전류에 대한 제 k조파의 성분은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$h_k = \frac{\sqrt{I_{ak}^2 + I_{bk}^2}}{\sqrt{I_{a1}^2 + I_{b1}^2}} \cdot 100\ \% \quad \text{---------- (7)}$$

h_k가 외부에서 설정된 제 k조파 함유율 K가 큰가 작은가를 결정한다.

- ***보호영역 설정***

보호영역의 설정은 SP까지의 임피던스와 접지저항을 고려하면 그림8과 평행사변형이 된다. XD는 SP지점보다 20%이상을 높게 잡으며, 설정된 접지저항을 고려하여 RD를 설정한다. 배후저항과 임피던스는 2~5Ω으로 설정한다.

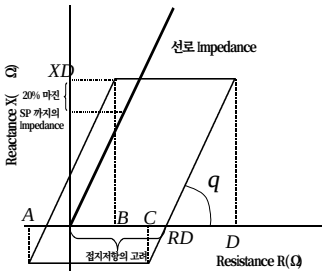

그림 8 평행사변형
보호영역

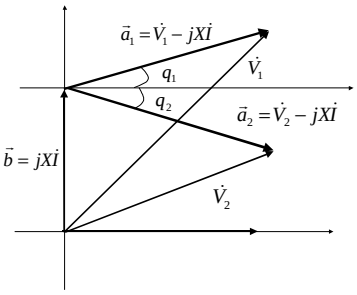

그림 9 거리계전기 작동원리

-***거리계전기 연산 알고리즘***

리액턴스요소의 특성을 그림 9에서 나타내었다. 그림 9에서와 같이 2개의 vector $\vec{a_i}$와 $\vec{b}$를 기준벡터로하여 위상차 θ_i를 갖는다.

$$\vec{a} = V - jXI, \quad \vec{b} = I \quad \text{---------- (8)}$$

X는 보정 값이다. 계전기는 θ_i가 마이너스 값으로 $\sin\theta_i$가 마이너스일 때 동작하며, 플러스일 때는 동작하지 않는다. 그림 7에서 $\sin\theta_1$은 양의 값이고, $\sin\theta_2$는 음의 값이 된다. 리액턴스와 관련된 동작 판별식은 위상차 산출 계산 알고리즘을 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$\vec{a} \times \vec{b} = b_m a_{m-3} - b_{m-3} a_m < 0 \quad \text{---------- (9)}$$

단

$$\vec{a} = a_m \vec{i} + a_{m-3} \vec{j}, \quad \vec{b} = b_m \vec{i} + b_{m-3} \vec{j}$$

동작판정식은 (8)식에 (9)식의 관계를 대입하는 것에 의해 $i_m(V_{m-3} - Xi_m) - i_{m-3}(V_m - Xi_{m+3}) + K < 0$ 이 된다.

K는 일정한 억제항이 되어, $K \fallingdotseq 0$으로 된다. 경험식 에 의하면 $i_{m+3} = -i_{m+3}$으로 되어

$$X(i_m^2 + i_{m-3}^2) - (i_m V_{m-3} - i_{m-3} V_m) - K > 0 \quad \text{----------} \quad (10)$$

이 된다. 이 식이 만족이 되면은 계전기가 작동된다. 식(10)이 리액턴스 특성을 갖는 거리계전기의 연산알고리즘으로 한다. 저항특성에 대해서 같이되고, $a = V - RI$로 되어, I_m과 I_{m-1}이 30°가 다르게 되기 때문에, 양쪽이 크게 변하여 가산한 값을 고려한다면, R의 절편의 각도를 선정할 수 있다.

- ***전류변화분 ΔI계산 알고리즘***

고장전류의 변화분은 기저부하전류와 고장전류를 분별하기 위해서, 부하전류에 함유된 제3조파를 이용한 기본파 전류를 억제되는 것이 작게되는 것으로 본다. 변압기의 무부하 돌입전류에서도 제3조파가 함유되고, 기본파 전류를 억제하는 작다. 제3조파 함유율에 의한 기본파 전류의 제어는 제3조파 함유율이 15%로 기본파 함유율이 15%로 기본파 전류가 1/2로 되도록 분할하여 직선적으로 행한다.

전류가 변화될 때 초기 값은 식(9)의 J_{n-1}은 영이 되기 때문에, I_n에 중첩되어 산출된 ΔI을 산출한다. 다음에 식(12)의 J_n을 산출하기 때문에, J_{n-1}은 초기 치 값이 0이기 때문에, 식(9)로 산출한 ΔI_n에 중첩을 하여 가산하여, 산출한다. 다음에 1개의 sampling 후에 ΔI_n은 식(12)에서 계산한 J_n의 값에 식(12)의 J_{n-1}이 되고, ΔI_n의 계산을 행한다. 이와 같이, 각각에 계산을 행하여서, ΔI_n가 보정값 이상 시에 동작을 한다.

$$\Delta I_n = (I_n - J_{n-1})(I - \Delta t / Td) \quad \text{----------} \quad (10)$$

$$J_n = J_{n-1} + \Delta I_n \cdot \Delta / Td \quad \text{----------} \quad (12)$$

여기서

ΔI_n : 전류변화량 Δt : 샘플링 간격 , I_n : 현 시점에서의 전류의 순간 값 Td : 시정 수

J_n : 현시점의 중첩된 전류의 순간 값, J_{n-1} : 1 샘플링 전에 중첩된 전류의 순간 값

- ***과전류계전기 요소***

부하전류의 계통시간 특성을 고려하여, 고저항고장 및 전차선 선의 열적보호 등을 한다. CT에서 얻어진 값을 이용하여 기준보다 클 경우에는 과전류 릴레이를 동작시킨다.

- ***과전압·부족전압계전요소***

PT를 이용하여 설정된 전압보다 높거나 낮은 과전압 및 부족전압 발생을 하면의 과전압계전기나 정전계전기를 작동시키도록 한다.

4. 결론

기존의 단순기능형 보호계전기를 통합한 컴퓨화 하기위한 알고리즘을 개발하였다. 각 보호계전기의 기능을 모델링하여 방식으로, 거리계전기는 CT와 PT에서 얻어진 값을 가지고 계산을 하였

으며, ΔI전류 변화분과 마찬가지로 전기에 포함된 고조파를 이용하여 지능화된 보호기를 설계하였다. 향후 PLC 혹은 controller를 이용하여 실현이 가능하다. 시뮬레이션과 시험의 결과는 논문(4)에서 나타내었다.

참고문헌

1. 持永芳文 et al., “交流電氣鐵道の 保護方式と その動向“, RTRI Report Vol. 13, No.7, '99. 7
2. 久水泰司 et al., 交流給電保護繼電器の 開發, RTRI Report Vol.12, No. 7, '98. 7
3. Charles A. Gross, " Power System Analysis", John Wiley & Sons, New York
4. 이희용 et al., "Digital 보호계전기의 설계“, 2004 하계전기학회 학술대회(근간)