전철용 보호계전기 시스템에 관한 연구

A Study on Railway Electric Traction Protection System

이희용[1] 김왕곤[2] 이종우[3]
LEE Heeyong KIM Wanggon LEE Jongwoo

ABSTRACT

Recently, the load increasement and new regenerative systems of electrified railway system make it a difficult to distinguish between the load current and fault current. The failure of traction system perhaps causes over-current to flow. The high current can collapse other railway systems. If failures of the traction system takes place, the failures are detected and protected lest it should provoke high current flow. The over current from such a traction system failure permit to charge high tension voltage and produces high temperature arc, voltage instability, current cutting, and break down railway systems. The traction system failures detect and the system has to immediately cut off from over-current flow. To isolate the failure, the system can distinguish failure current from current flows. It forces us to adapt such as a new intelligent protection system. The protective system in traction system play a role of detecting and isolating 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

전기철도에서 많이 사용하는 교류급전방식은 직류에 비해서 고압이다. 교류회로에 발생하는 고장은 커다란 고장전류를 흐르게 되어 다른 시스템에 고장을 발생시킬 수 있다. 고장전류를 발생시키는 고장으로는 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. 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 알고리즘과 그 구현하는 시스템을 제안하였다.

1 서울산업대학교 철도전문대학원
2 서울산업대학교 철도전문대학원
3 한국철도기술연구원 전기신호연구본부 책임연구원

2. 교류전기철도의 보호방식

2.1 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 · 회생에 의한 과전압	· 층간권선단락 · 절연파괴	· 용량감소 · 전력공급불능
급전모선	· 이상단락 · 지락	· 과전류 도통	· 사고발생
급전회로	· 단락 · 지락	· 과전류도통 · 과전압도통	· 사고발생
	· 부족전압		· 운전불능
	· 전차선 과부하	· 온도상승	· 전차선파괴

2.2 *급전회로의 고장*

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

보호설비는 급전회로의 특성에 따라서 각각 적용되며, 환경 조건에 대해서 발생하는 회의 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 급속단락으로 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.

2.3 고장임피던스

급전회로의 고장전류는 3상전원 임피던스, 급전용 변압기의 임피던스, 회로임피던스 및 고장점의 저항에서 다음과 같이 구한다.

- 전원임피던스 : $Z_0 = V^2/P_s = (\%Z_0/100)V^2/P_s$
- 급전용 변압기의 임피던스
  - 단상의 경우 : $Z_{TR} = (\%Z_{TR}/100)V^2/P_{TR}$
  - 3상의 경우 : $Z_{TR} = (\%Z_{TR}/100)V^2/(P_{TR}/2)$
- 급전회로의 고장임피던스 : 변전소에서 고장점까지의 선로임피던스

단 : V : 급전전압 (kV), P_s : 수전점의 3상 단락용량(MVA) %Z_0 : 수전점의 %임피던스(%), Z_{TR} : 변압기의 련화마다 %Z(%), P_{TR_1} : 변압기 상당 용량, P_{TR_n} : 변압기의 3상 용량

2.4 고장전류

급전회로의 고장전류는 단락·지락 시의 고장전류와 이상단락 고장 다음과 같이 간단하게 구할 수 있다. 회로의 단락, 지락 시의 고장전류는 다음과 같다.

$I_s = V/(2Z_0 + Z_{TR} + Z_L + r_g)$, Z_L : 선로 임피던스, r_g : 고장점 저항

이상단락 고장전류 계산에서는 급전용 변전소에서 2조의 단상교류가 레일을 공통으로 한 방면으로 급전하고 있기 때문에 변전소의 인출부와 section 부분에서 위상이 다른 전차선이 단락하는 이상단락 고장이 발생한다.

$I_{MT} = V_{MT}/(\Delta Z_0 + Z_M + Z_T)$,

V_{1M} : M상, T상 간의 전압(kV),

Z_M : 급전변압기를 포함한 M상 회로의 임피던스(Ω),

Z_T : 급전변압기를 포함한 T상 회로의 임피던스(Ω)

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. 그림 1에서와 같이 과전류, 과전압, 전류변화량 및 저전압을 검지하여 각각 해당되는 계전기를 동작시킨다.

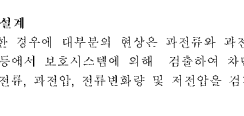

그림 1. 교류회로보호시스템
동작구조

3.1 급전회로의 보호시스템 설계

보호계전기의 주요 구성요소는 그림 2에서 나타난 것과 같이 입력부분, 입력데이터를 처리하여 고장이 발생여부를 판정하는 처리부, 그리고 차단이 필요할 때 회로를 신속히 분리하는 차단부로 구성되어져 있다. 교류회로에 고장이 발생한 경우에 대부분의 현상은 과전류와 과전압이 흐르게된다. 이러한 이상전류 및 전압을 변전소 등에서 보호시스템에 의해 검출하여 차단기에 의해 고장전류를 차단한다.

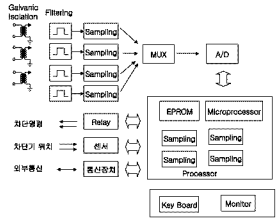

그림 2. 디지털 보호계전기 구조

3.2 보호영역

보호방식은 그림3와 같이 임피던스 영역을 설정하여 임피던스가 보호영역에 진입할 때 작동하는 보호장치, 급전전류 변화분 ΔI를 감시하여 ΔI가 일정이상 될 때에 동작하는 보호장치가 있다. 통상 2가지 보호방식을 조합하여 사용한다. 보호범위는 변전소에서는 급전 구분소(그림 4)까지 담당을 하며, 연장급전 시에는 SP에서 인접변전소까지 보호한다.

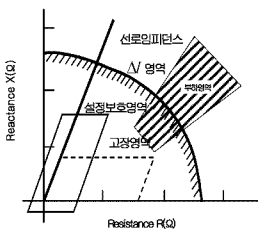

그림 3. 전류허용영역

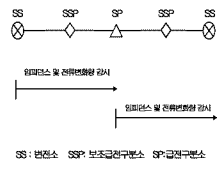

그림 4. 전류허용영역

3.3 디지털 보호계전기 알고리즘

- 부하임피던스의 계산

급전용 변전소의 PT 및 CT의 출력에서 전압·전류를 입력시켜, 저항분 및 리액턴스를 구한다. 그림과형은 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.

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

수 있다.

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

$$\cos\theta = \frac{V_1^2 + I_1^2 - (V_1 - I_1)^2}{2V_1I_1}, \quad (V_1 - I_1)^2 = (I_{1R} - V_{1R})^2 + (V_{1L} - I_{1L})_2 \quad \text{---------- (3)}$$

$$V_1 = \sqrt{V_{1R}^2 + V_{1L}^2}, I_1 = \sqrt{I_{1R}^2 + I_{1L}^2}$$

으로, $\cos\theta$와 $\sin\theta$를 구한다.

$$\cos\theta = \frac{V_{1R}I_{1R} + V_{1L}I_{1L}}{\sqrt{V_{1R}^2 + V_{1L}^2} \cdot \sqrt{I_{1R}^2 + I_{1L}^2}}, \quad \sin\theta = \frac{V_{1R}I_{1L} - V_{1L}I_{1L}}{\sqrt{V_{1R}^2 + V_{1L}^2} \cdot \sqrt{I_{1R}^2 + I_{1L}^2}} \quad \text{---------- (4)}$$

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

$$r = \frac{V_1}{I_1}\cos\theta = \frac{V_{1R}I_{1R} + V_{1L}I_{1L}}{I_{1R}^2 + I_{1L}^2}, \quad x = \frac{V_1}{I_1}\sin\theta = \frac{V_{1R}I_{1R} - V_{1L}I_{1L}}{I_{1R}^2 + I_{1L}^2} \quad \text{---------- (5)}$$

- *k조파 함유율 연산*

전류파형의 k조파의 성분은 다음과 같이 구할 수 있다.

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

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.

- *전류변화분 Δi계산 알고리즘*

고장전류의 변화분은 기저부하전류와 고장전류를 분별하기 위해서, 부하전류에 함유된 제3조파를 이용한 기본파 전류를 억제되는 것이 작게되는 것으로 본다. 변압기의 부부하 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(8)의 J_{n-1}은 영이 되기 때문에, I_n에 중첩되어 산출된 ΔI을 산출한다. 다음에 식(9)의 J_n을 산출하기 때문에, J_{n-1}은 초기 치 값이 0이기 때문에, 식(8)로 산출한 ΔI_n에 중첩을 하여 가산하여, 산출한다. 다음에 1개의 sampling 후에 ΔI_n은 식(9)에서 계산한 J_n의 값에 식(9)의 J_{n-1}이 되고, ΔI_n의 계산을 행한다. 이와 같이, 각각에 계산을 행하여서, ΔI_n기 보정값 이상 시에 동작을 한다.

$$\Delta I_n = (I_n - J_{n-1})(1 - \Delta t/Td) \quad \text{---------- (8)}$$

$$J_n = J_{n-1} + \Delta I_n \cdot \Delta t/Td \quad \text{---------- (9)}$$

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 직착선 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.

- 보호기 동작알고리즘

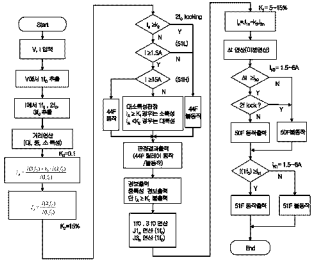

그림 5. 보호 계전기 동작 flow chart

4. 결론

기존의 단순기능형 보호계전기를 통합하여 보호기의 구성과 보호시스템을 작동시키기 알고리즘을 개발하였다. 각 보호계전기의 기능을 모델링하여 방식으로, 거리계전기는 CT와 PT에서 얻어진 값을 가지고 계산을 하였으며, ΔI전류 변화분과 파찬가지로 전기에 포함된 고조파들 이용하여 지능화된 보호기를 설계하였다. 향후 실분이나 시뮬레이션을 통하여 알고리즘을 증명할 필요가 있으며, CT나 PT에서 왜곡되는 전류와 전압을 모델링하여 보다 세밀한 보호를 할 수 있도록 하는 알고리즘의 개발이 필요하다.

참고문헌

1. 持永万文 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., "전철용 보호계전기 시스템에 대한 연구", 2004 춘계철도학회 학술대회
5. 이희용 et al., "Digital 보호계전기의 설계", 2004 하계전기학회 학술대회