

350km/h급 고속전차선로 보호선의 선종결정 기법에 관한 연구

A Study on the Protection Wire Type Decision of Catenary System in the 350km/h High Speed Line

이 학 표* · 서 기 범* · 박 재 영*
(Hack-Pyo Lee · Ki-Bum Seo · Jae-Young Park)

Abstract - In this paper, we analyzed the optimal configuration of protection wire that have been installed in the electric railway power supply system. Protection wires are to suppress the ground potential rise when the short circuit fault between contact wire-rail(C-F), and protect the electronics equipments(signalling and communication) that are facility the wayside. The role of protection wires must be feed back quickly the fault current to the substation when a short circuit fault occurs. In this paper, we proposed that only one line to install the protection wire. Comparing how to newly proposed and existing system, most of the performance is similar. The reason is that most of the current flowing in the protection wire near the location where the fault occurred. There is no problem even if in one line for human safe and the low impedance of the return circuit in dimension to ensure the safety of the facility during the fault. To ensure safety during an fault occurs, it is sufficient even by one line. But, In the protection wire of facilities planning it is necessary to design taking into account the potential utility.

Key Words : High speed catenary system, Overhead contact lines, Fault protection wire, Current capacity, Mechanical strength

1. 서 론

철도의 전철화는 전류의 흐름에 따라 전자계 현상이 발생하기 때문에 위험에 대처하고 사람과 장비보호를 위한 대책을 정하여 설계하도록 요구하고 있다.

가선(도체, 인접한 금속체와 접지)의 전위는 전원과 차량운행 거리에 따라 변한다. 이 전위는 유도 또는 도체에서 전류 교변에 비례하는 전기결합에 의해 발생한다. 이 전기적 결합의 원인으로 발생하는 현상을 막기 위한 보호방법의 결정은 모든 금속구조물과 설비 배열의 선정방법과 관계되어 도출할 수 있다. 설비에 간섭의 영향을 받는 현상 또는 교류전류의 환경에서 사람을 위태롭게 하는 원인은 전기적 간섭, 전자유도, 도체의 단락으로 구분할 수 있다[1].

AT(Auto Transformer)급전방식에서의 보호선은 전차선로 각 전주의 가동 브래킷트 주파이프와 상부파이프 지지애자 중간 부분 지지물에 설치되며, 이 보호선의 필요성은 만일 어떠한 원인에 의하여 급전선 및 전차선 지지애자의 섬락이 발생한 경우 사고전류 통로인 금속회로를 섬락에 의해 직접 구성하는 것으로 지지물 등의 접지전위상승을 억제하고 지지물에 첨가되어 있거나

인접한 곳에 설치되어 있는 전등, 동력, 신호, 통신 등의 저압악 전회선 및 기기의 절연파괴를 방지함과 동시에 변전소에서 사고 검출을 용이하게 하여 신속, 확실한 회로 차단 보호동작에 기여한다.

또한, 레일에 분기접속된 비절연보호선은 레일회로와 함께 급전선 및 전차선에 대하여 차폐선 회로를 구성하므로 사용선종 및 장주위치(급전선, 전차선과의 상대위치)를 적절히 조정하면 전자 유도차폐효과가 있다.

특히 통신유도경감효과는 통신선로 보수비의 경감에 크게 영향을 주며, 유도노 차폐효과는 전차선로 및 인접한 저압설비(통신, 신호설비)의 사고를 미연에 방지할 수 있다.

비절연보호선은 사고시 보호에 기여함은 물론 보호선 자체에 사고시 발생하는 대전류가 흐르게 되므로 충분한 전류용량과 특히 가공전선이므로 적당한 기계적 강도가 필요하다[2].

본 논문에서는 고장전류가 가장 큰 전차선-레일간 단락사고시 발생하는 대전류가 보호선에 흐르게 되므로 단락시 허용전류를 고려한 보호선에 대한 선종결정 기법과 선로조건에 따른 최적 구성방안을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 비절연보호선의 선종결정 요인

일반 교류전기공급 장치와는 달리 전기철도에서는 선로를 통

* Corresponding Author : Woomin Electric Corporation, Korea

E-mail : hl4gzn@hanmail.net

* Division of Railroad System Engineering, Woosong University, Daejeon, Korea

Received : October 7, 2015; Accepted : November 25, 2015

하여 수 [kA]의 운전전류가 흐르기 때문에 인체의 접근과 직접적인 접촉을 피해야 한다.

철도의 전철화는 전차선 전압에 의해 전자계 현상이 발생하기 때문에 위험에 대처하고 사람과 장비보호를 위한 대책을 세워 설계하도록 요구하고 있다. 전차선에 공급되는 25[kV] 전위는 전원과 이동하는 차량운행 조건에 따라 변한다.

이 전위는 유도 또는 도체에서 전류 교번에 비례하는 전기결합에 의해 발생하며 이 전기적 결합의 원인으로 발생하는 현상을 막기 위한 보호방법의 결정이 필요하다.

사람의 안전 및 기기의 보호 대책으로서 계통 접지를 규정하고 있으며, 레일과 계통 접지 및 전차선 한계 내에 존재하는 노출 충전부와의 분당 등에 대하여 KS C IEC 62128-1(2006)규정하고 있다[3].

이 규격에서는 교류 및 직류 견인 장치와 관련된 고정 설비의 전기 안전 관련 보호 조치 및 견인 전원 공급 장치로 인해 위험에 처할 수 있는 설비에 관련된 보호 조치에 대한 요구 사항을 규정한다.

교류전기철도에서 사고전류의 통전시간은 0.2~0.3초 정도이며 재폐로 등을 고려하면 전선의 단시간전류용량을 예측하는 사고전류통전시간은 약간의 여유를 두어 0.5초 정도를 고려하고 있다. 그림 1은 전선의 단시간 허용전류를 나타낸 것으로 사고시의 비절연보호선 통전전류는 4,000~10,000[A] 정도이므로 전류용량면에서 적당한 선종이 선정되어야 한다.

비절연보호선에 유도차폐효과를 기대하는 경우에는 선종 외에 보호선 장주위치가 큰 영향을 주게 되는데 실제 장주는 공사의 시행이 용이하고 특히 보수상 위험 및 번잡성이 없는 위치의 범위내에서 차폐효과가 큰 위치를 선정한다. 일반적으로 전차선에 가깝게 설치하면 차폐효과가 크다.

비절연보호선의 차폐효과는 위에서 서술한 바와 같이 비절연 보호선, 전차선의 선종, 가선구조 등에 따라 다르지만 사고전류가 비교적 크므로 비절연보호선 선종은 상당한 전류용량을 필요로 하기때문에 전기저항이 작은 Cu75[mm²](또는 ACSR 95[mm²])를 일반적으로 사용하고 있는데 St55[mm²]에 비해 유도차폐효과가 상당히 큰 것으로 분석되고 있다[2].

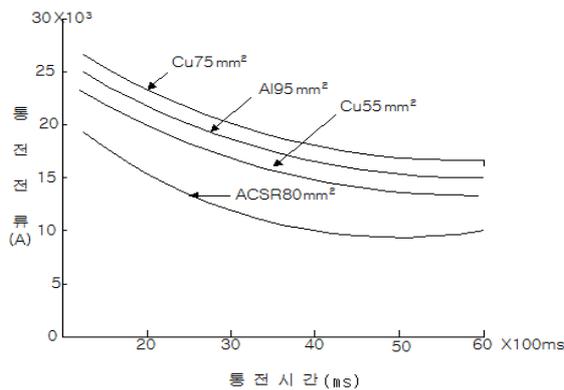


그림 1 보호선의 순시전류 용량
Fig. 1 Instantaneous current capacity of the protection wires

2.2 교류급전시스템 모델링

전기철도에서는 전원계통으로부터 전력을 수전 받아 전철급전 계통을 통하여 차량의 구동을 위해 필요한 전력을 공급한다. 전철급전계통에는 변압기, 전차선, 급전선, 레일 및 보호선등 일련의 수송설비와 이들을 유기적으로 결합시키고 효율적으로 운용, 관리하기 위한 운용설비가 포함된다. 이러한 전철급전계통은 일반 전력계통에 비해 부하의 특성이나 계통구성 형태 및 제반 현상측면에서 상이한 특징을 가진다.

급전계통의 부하인 차량은 그 특성상 시동 정지가 빈번하게 반복되고 큰 견인력으로 주행해야 하므로 대용량의 부하전력이 요구되고 그 크기는 시공간적으로 급변한다. 또한 전철급전계통은 주로 3상 전력계통으로부터 단상의 전력으로 변환하여 급전받고 있으므로, 3상 전원계통의 각 상전류는 더 이상 평형을 유지하지 않고 3상 전압의 불평형을 초래할 수 있다.

이러한 전압불평형은 결과적으로 계통의 전력품질을 저해하여 관련된 다른 설비의 운전에 영향을 끼친다.

철도 송·변전설비는 전기차에 전력을 공급하기 위한 설비로 크게 송전선로, 변전소, 급전구분소 및 병렬급전소로 나눌 수 있고, 변전소는 한국전력공사로부터 수전한 3상 154[kV]를 단상 55[kV]의 전력으로 변환하여 전기차에 전기를 공급하는 장소이며, 급전구분소는 변전소와 변전소간 동상의 전기를 구분하며, 병렬급전소는 전압강화 보상 및 회생제동을 최대한 사용하기 위하여 상하선을 연결하여 주는 장소로 모든 장소에 단권 변압기를 설치하고 있다. 이 구성성비별로 다단계방 이론을 적용하여 모델링 하고, 이를 그림 2와 같이 PSCAD/EMTDC에 적용하여 정밀한 모델링을 하였다[4-7].

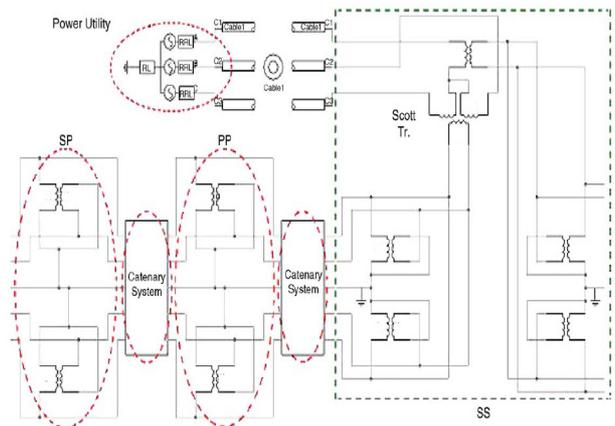


그림 2 교류급전시스템 모델링(AT급전방식)
Fig. 2 Model of AC electric railway system made by PSCAD/EMTDC

2.2.1 전원 측 모델링

전기철도용 전력은 전력회사의 전력공급 품질에 의존되며, 반

대로 대용량의 철도부하 특성이 전력회사의 계통에 영향을 주기도 한다. 단위법을 사용하는 경우, 전력 인출점에서의 단락용량은 단락임피던스에 직접 반비례하며, 단락임피던스는 전력 인출점에서 본 테브난 등가임피던스에 해당한다. 따라서 일정한 부하에 대하여 단락임피던스가 큰 지점은 전압강하와 전압불평형의 정도가 크고, 단락임피던스가 작은 지점은 전압강하와 전압불평형의 정도가 작다. 따라서 정밀한 전철 급전시스템 해석을 위해서는 3상 전원계통, 전철 주변압기의 특성을 반영하여 종합적이고 합리적인 모델을 모색하여야 한다.

전원측은 전력회사 변전소와 전철변전소의 스코트 변압기 및 전력회사 변전소와 전철변전소를 연결시켜주는 송전선로로 정의할 수 있다.

3상전원은 전력회사 변전소에서 전철변전소로 지중 또는 가공으로 송전하며 전철변전소의 수용용량을 고려하여 선종이 결정된다. 전력공급의 신뢰성을 확보하기 위하여 최소한 2회선의 송전선로가 변전소내 2중 모선에 루프로 연결되어 있다. 전철 주변압기는 변압기 결선방식에 따라 상결선, V결선, 스코트결선방식이 사용되고 있으나, 3상으로부터 큰 단상전력의 부하를 가질 필요가 있을 때 3상전원의 1상으로부터 부하를 가지면 3상전원에 불평형이 유발되므로 단상 변압기 2대를 사용하여 3상→2상 변환을 하여 3상회로의 전원에 평형부하가 걸리도록 스코트 결선방식이 주로 사용되고 있다. 그림 3은 전력회사 변전소 및 전철변전소를 모델링 한 결과를 나타낸 것이다.

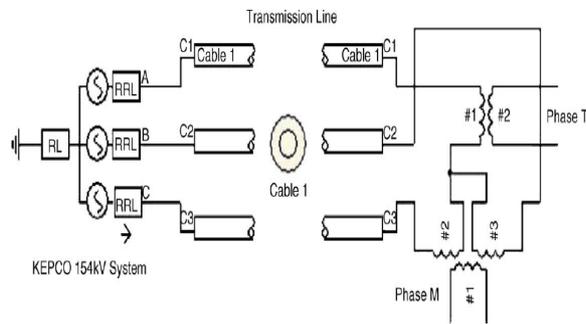


그림 3 송전선 및 스코트 변압기 모델
Fig. 3 Model of transmission lines and scott transformer

2.2.2 단권변압기 모델링

단권변압기는 레일에서 유입되는 전류를 전차선과 급전선으로 1/2씩 나누어주는 역할을 하며 전차선-레일 간의 전압과 레일-급전선 간의 전압은 같은 크기를 나타낸다. 이러한 단권변압기의 특성을 전차선로 해석에 적용하기 위해서는 단권변압기를 전압원 또는 전류원과 같은 회로소자로 모델링할 수 있다.

AT급전방식에 사용하는 단권변압기는 변전소용, 급전구분소용, 보조급전구분소용(또는 병렬급전소)이 있다.

단권변압기는 2권선 변압기와는 달리 1차권선과 2차권선으로 되어 있지 않고, 공통 철심을 이용하여 코일 2개를 감고 이를 직렬로 접속해서 1차와 2차의 단자를 인출함으로써 2권선 변압기

와 동일한 변성 비를 얻을 수 있다.

전차선로에서 사용되는 단권 변압기는 1차 측의 권수가 2차 측의 2배가 되며, 직렬권선과 분로권선이 1:1의 권수 비를 가지고 있다. 1차 측의 전압은 55[kV]이고 2차측의 전압은 27.5[kV]가 되며 두 권선을 접속하는 지점에 전차선로의 레일과 연결한다. 그림 4에 단권변압기 모델링결과를 나타내었다.

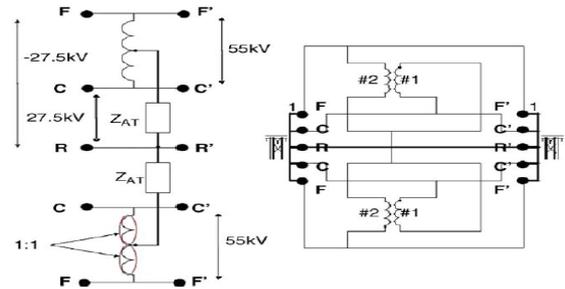


그림 4 단권변압기 모델
Fig. 4 Model of auto transformer

2.2.3 전차선로 모델링

AT급전방식의 전차선로는 차량에 전력을 직접 공급하는 전차선과 레일 그리고 귀환전류를 변전소로 유인하는 급전선 등 3가지 도체군으로 구성되어 있다.

이들 전차선로는 상·하행선 별로 전차선과 조가선이 수 미터마다 드로퍼로 연결되어 있고 상·하행선 레일, 가공보호선이 서로 연결되어 있다. 이런 시스템을 실제적으로 해석하기 위해서는 이들 도체들을 서로 연결되지 않은 도체로 가정하는 것 보다 등가 도체군으로 모델링하는 것이 현실적이다.

이들 각 도체들은 자체의 임피던스뿐만 아니라 도체간에 작용하는 상호 임피던스도 포함하고 있어 전차선로에 대한 등가모델은 그림 5와 같이 표현된다.

표 1에 선로가 2복선인 경우 각 선별로 보호선을 시설했을 경우와 선별로 대표하여 통합 1선을 시설하였을 때의 레일도체군 임피던스를 나타내었다.

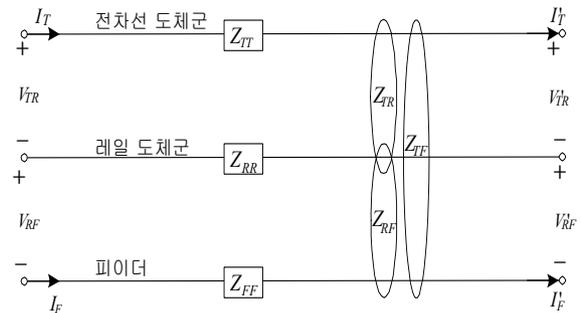


그림 5 전차선로의 등가모델
Fig. 5 Equivalent circuit model of catenary

표 1 레일 도체군의 임피던스

Table 1 Impedance of rail conductor group

구분	레일 도체군 임피던스
각 선별로 설치	0.098 + j 0.411
급전군별 통합1선 설치 (상선군1, 하선군1)	0.107 + j 0.439

3. 사례 연구

3.1 전차선-레일간 단락사고 해석

급전시스템에서 발생할 수 있는 사고의 유형으로는 크게 지락사고, 단락사고 등으로 나눌 수 있지만 단락사고가 지락사고보다 고장전류가 크고, 사고의 파급효과가 크기 때문에 단락사고를 가정하여 모의하였다.

특히, 교류전기철도 급전시스템의 전차선로는 여러 가지 선들로 구성되어 있기 때문에 단락사고의 종류 또한 다양하다. 단락사고가 발생할 수 있는 가능성이 높은 3가지 유형의 사고들은 전차선과 레일, 전차선과 급전선, 급전선과 레일 등이다. 이 3가지 사고의 고장전류 특성을 그림 6에 나타내었다. 각 단락 사고별로 고장의 위치를 변전소로부터의 거리를 변화시키며 그때 발생하는 고장전류를 계산한 것이다. 이때 교류 전철급전시스템의 한 쪽 방향을 20km로 가정하였으며, 2km 간격으로 고장을 상정하여 전류를 계산하였다.

사고 모의 해석결과 고장전류는 단권변압기가 설치된 지점에서 상승하였다. 이것은 전철급전시스템의 특성으로서 전철변전소에서 전체 계통을 바라볼 때 두 단권변압기의 중간 지점에서 계통 임피던스가 가장 크게 되고, 단권변압기 근처일수록 계통 임피던스가 가장 작아지기 때문에 10km마다 설치된 단권변압기 위치에서 사고전류가 상승하였다.

그리고 전차선-급전선 사고의 경우 전차선-레일(또는 급전선-레일) 사고보다 전압레벨이 높기 때문에 사고전류는 상대적으로 작게 나타났다. 그리고 전차선-레일 사고인 경우 사고전류가 가장 크

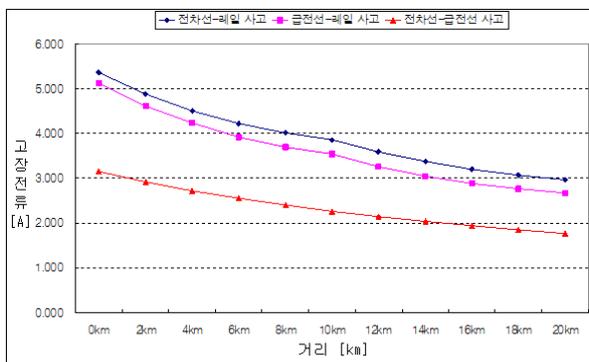


그림 6 고장전류 해석결과

Fig. 6 Analysis results of fault current

게 흘렀다.

이와 같이 단락사고 중 전차선과 레일 사이의 단락사고가 고장전류의 크기가 가장 크기 때문에, 고장전류를 흡수하게 되는 보호선의 구성에 가장 큰 영향을 미치게 된다.

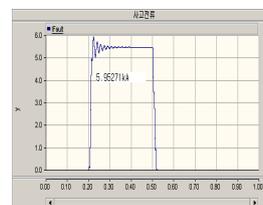
3.2 보호선 구성별 사고전류 분석

AT 급전구간에 전차선의 지락사고가 발생한 경우를 상정하여 사고전류를 분석하였다. 사고지점은 각각 2km를 간격으로 하였으며, 이때 변전소의 위치는 10.5km에 위치하는 것으로 설정하였다. 철도 선로가 2복선으로 구성된 경우, 일반적으로 전철변전소에는

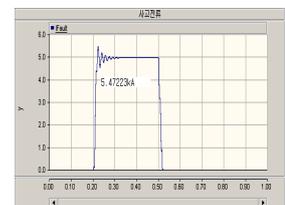
표 2 사고위치별 고장전류

Table 2 Comparison of fault current

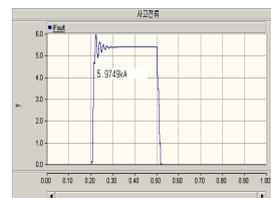
사고 위치(km)	고장전류[kA]
0.5	5.95
2.5	5.47
4.5	5.97
6.5	5.82
8.5	6.83
10.5	10.65



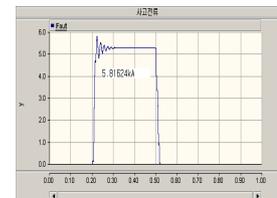
(a) 사고 위치 0.5km



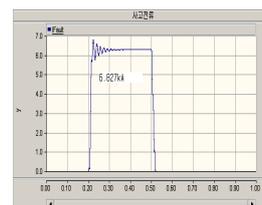
(b) 사고 위치 2.5km



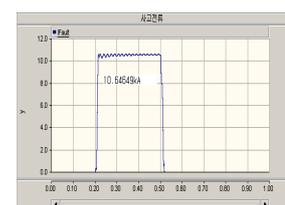
(c) 사고 위치 4.5km



(d) 사고 위치 6.5km



(e) 사고 위치 8.5km



(f) 사고 위치 10.5km

그림 7 사고 위치별 고장전류 해석결과

Fig. 7 Simulation results of fault current

총 10개의 급전반이 설치되고, 이중 2개의 공통반을 제외한 8개가 실제 사용하는 급전반이 된다. 즉, 각 선로별로 방면별로 상·하행선이 급전반 1개에 해당되는 것이다. 따라서 기존 보호선의 구성은 총 4조로서, 제 1선로의 상행선, 하행선 그리고 제 2선로의 상행선, 하행선에 각각 보호선을 시설하여 계통을 보호하고 있다.

표 2와 그림 7은 사고위치별 고장전류 해석결과를 나타낸 것이다.

3.3 결과고찰

2복선에서 보호선의 구성 방안에 따른 전자선-레일간 단락사고에 대한 고장 전류에 대한 해석을 실시하였다. 두 가지 시뮬레이션의 계통 구성의 차이는 보호선을 모든 선로에 시설한 경우와 선로별로 대표하는 보호선으로 구성한 경우이다. 두 계통 구성에서 동일한 위치에서 단락사고가 발생하였을 때 고장전류를 전철변전소로 빠르게 귀환 시켜야 하는 보호선의 성능을 비교하면 기존 보호선의 구성인 총 4조 즉, 제 1선로의 상행선, 하행선 그리고 제 2선로의 상행선, 하행선에 각각 보호선을 시설하여 계통을 보호하는 경우와 각 선별에 대표로 1조의 보호선을 구성한 경우의 보호선 전류의 합은 유사하다.

특히 사고가 발생한 지점과 가까운 선로의 보호선에서 대부분의 전류가 유입되고 나머지 보호선에서는 작은 전류만이 흐르고 있다.

따라서 보호선을 1조로 편성하여도 단락사고가 발생되어도 귀선회로 상에는 문제가 없을 것으로 보인다. 특히, Cu75[mm²]보호선의 허용전류는 고장지속이 0.2초 정도라 가정하면 보호선 Cu75[mm²] x 1조인 경우에 단락시 허용전류가 14.5[kA], 보호선 Cu75[mm²] x 2조인 경우 29[kA]이므로 어느 방식을 선정하여도 급전계통의 보호에는 문제가 없는 것으로 분석되었다.

보호선 ACSR93.3[mm²] x 1조인 경우에도 단락시 허용전류가 13.3[kA], 보호선 ACSR93.3[mm²] x 2조인 경우 26.6[kV]이므로 사고발생시 보호선 1조만 구성하여도 급전계통의 보호에는 문제가 없는 것으로 분석되었다.

4. 결 론

교류전기철도에서의 전자선로 보호선은 사고시 지지물 등의 접지전위 상승을 억제하고, 선로연변에 설치되어 있는 전등, 동력, 신호, 통신 등의 저압 약전류 회선과 기기의 절연과파 방지, 통신유도 경감 및 변전소에서 사고검출을 용이하게 하여 신속·정확한 사고회로 차단의 보호동작에 기여하는 설비이다.

본 논문에서는 보호선의 구성을 2복선인 경우 제 1선로의 상행선, 하행선 그리고 제 2선로의 상행선, 하행선에 각각 보호선을 시설하여 계통을 보호하는 경우와 각 선별에 대표로 1조의 보호선을 구성하는 경우에 대하여 전자선-레일간 단락사고를 모의하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

동일한 위치에서 단락사고가 발생하였을 때 고장전류를 전철변전소로 빠르게 귀환시켜야 하는 보호선로의 성능을 비교하면, 기존 방식으로 모든 선로에 보호선을 구성한 경우와 제안한 방식인 선별로 대표하는 보호선 1회선을 시설하였을 때의 전류의 합은 유사한 것으로 분석되었다.

사고가 발생한 지점과 가까운 선로의 보호선에서 대부분의 전류가 유입되고 나머지 보호선에서는 작은 전류만이 흐르게 되므로 허용전류를 고려했을 때에도 보호선을 1회선으로 편성하여도 문제가 없을 것으로 분석되었다.

그러나 사고시 인명 및 설비의 안전을 확보하는 차원에서 귀선회로의 저임피던스화를 위해 선별(상선, 하선)로 1회선으로 하여도 문제는 없으나, 보호선 계획에 있어서는 잠재효용의 활용 등을 충분히 고려하여 종합적인 관점에 의해 설계할 필요가 있다.

보호선의 잠재적 효용으로서의 레일회로를 급전선 및 전자선에 대하여 차폐선회로를 구성하기 때문에 전자유도 경감에 대한 효과가 크다. 특히 통신유도 경감효과는 통신선 개방보수비의 절감에 크게 영향이 있고, 유도차폐효과는 사고방지로 이어진다.

References

- [1] S.H Chang, "Technical Considerations Relation to the Protection Wire Type Decision of Catenary System in the High Speed Line", Spring Conference Proceeding of the Korean Society for Railway, 2014. 5
- [2] S.H Chang, et al., "A Study on the stability of electric railway power feeding system", KRRI, 2001. 12
- [3] H.B Ryoo, J.O Eim, et al., "Distribution of Fault Current and Potential by Ground Fault Test at the Common Grounding System of the Electric Railway", Spring Conference Proceeding of the Korean Society for Railway, 2012.5
- [4] H.M Lee, G.D Kim, et al., "Unbalance Analysis on Electric Railway System using PSCAD/EMTDC", ICEE 2005
- [5] H.M Lee, G.S Jang, et al., "Fault Analysis of AC Electric Railway System using EMTDC", ICEE 2004
- [6] J. kim, et. al., "Development of Integrated Simulator for AC Traction Power Supply System", Trans. KIEE. Vol 59, No. 1, pp. 76-81, 2010
- [7] Hansang Lee, Changmu Lee, et al., "A Study for Fault Location Scheme Using the 9-Conductor Modeling of Korean Electric Railway System", Autumn Conference Proceeding of the KIEE, 2006. 11

저 자 소 개



이 학 표 (Hack-Pyo Lee)

1971년 4월 19일생, 2012년 우송대학교 철도전기제어공학과 졸업(공학석사), 1998년~현재 우민전기주식회사(대표이사)

Tel : 02-3471-3471

Fax : 02-3471-0905

E-mail : hl4gzn@hanmail.net



서 기 범 (Ki-Bum Seo)

1966년 9월 14일생. 1991년 한양대학교 일반대학원 전자공학과 졸업(공학석사), 2000년 한양대학교 일반대학원 전자공학과 졸업(공학박사), 2002년~현재 우송대학교 교수

Tel : 042-630-9705

E-mail : kbsuh@wsu.ac.kr



박 재 영 (Jae-Young Park)

1996년 8월 고려대학교 산업대학원 전기공학과(공학석사), 2007년 2월 서울산업대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과(공학박사), 1970년 1월~2007년 2월 철도청 및 한국철도공사 오송고속철도 전기사무소장, 2007년 3월~현재 우송대학교 철도전기시스템학과 교수

Tel : 02-629-6733

E-mail : pjy7717@wsu.ac.kr