creative commons

COMMONS DEED

저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:

저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.

변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

**저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.**

이것은 이용허락규약(Legal Code)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

Disclaimer

dCollection

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[UCI]I804:24011-200000266734

2018年 2月
碩士學位論文

# 전기철도 안정도 향상을 위한 고장점 표정에 관한 연구

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

金 德 炫

2018년2월 碩士學位論文
전기철도 안정도 향상을 위한 고장점 표정에 관한 연구
金 德 炫

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 전기철도 안정도 향상을 위한 고장점 표정에 관한 연구

A Study on the Fault Locator for Stability Improvement of Electric Railway

2018年 2月 24 日

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

金 德 炫

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 전기철도 안정도 향상을 위한 고장점 표정에 관한 연구

指導敎授 曺 錦 培

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2017年 10月

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

金 德 炫

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 金德炫의 碩士學位論文을 認准함

委 員 長 朝鮮大學校 敎授 최 효 상 印

委 員 朝鮮大學校 敎授 김 재 홍 印

委 員 朝鮮大學校 敎授 조 금 배 印

2017年 11月

朝鮮大學校 產業技術融合大學院

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 목 차

ABSTRACT ---------- iv
Ⅰ. 서 론 ---------- 1
Ⅱ. 이론적 고찰 ---------- 3
A. 전기철도 급전시스템 ---------- 3
1. 직접 급전방식 ---------- 4
2. BT 급전방식 ---------- 5
3. AT 급전방식 ---------- 6
4. 단권변압기 ---------- 7
5. 전차선로 ---------- 8
B. 고장점 표정장치 ---------- 9
1. 흡상전류비 방식 ---------- 10
2. 리액턴스 방식 ---------- 14
3. 고장점 표정장치 현황 ---------- 16
Ⅲ. 고장점 표정 알고리즘 설계 및 시뮬레이션 ---------- 19
A. 고장점 표정 알고리즘 설계 ---------- 19
B. 지락사고에 의한 고장점 표정 시뮬레이션 ---------- 21
Ⅳ. 결과 및 검토 ---------- 23
A. 급전선 지락사고에 의한 고장점 표정 ---------- 23
B. 전차선 지락사고에 의한 고장점 표정 ---------- 26
Ⅴ. 결 론 ---------- 30
【참 고 문 헌】 ---------- 31



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 표목차

표 1. 고장점 표정방식의 비교 ---------- 16
표 2. 고장점 표정 알고리즘의 특성 ---------- 18
표 3. 2.5km 지점의 급전선 지락고장 시뮬레이션 결과 ---------- 23
표 4. 0.8km 지점의 전차선 지락고장 시뮬레이션 결과 ---------- 26



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 도목차

그림 1. 직류 급전방식 회로의 개요 ---- 3
그림 2. 교류 급전방식 회로의 개요 ---- 4
그림 3. 귀선이 존재하는 직접 급전회로 ---- 5
그림 4. BT 급전방식의 구성도 ---- 5
그림 5. AT 급전방식의 구성도 ---- 6
그림 6. 단권변압기의 구조 ---- 7
그림 7. 전차선로의 도체군 ---- 8
그림 8. 급전제어시스템의 구성도 ---- 9
그림 9. 흡상전류비 방식의 고장점 표정 원리 ---- 10
그림 10. AT급전회로의 등가회로 ---- 11
그림 11. 지락사고 발생시 AT2와 AT3 사이의 전류 분포 ---- 13
그림 12. BT 급전방식의 거리-리액턴스 관계 ---- 14
그림 13. AT 급전방식의 거리-리액턴스 관계 ---- 15
그림 14. 고장점 표정을 위해 설계한 알고리즘 ---- 19
그림 15. 지락사고에 의한 시뮬레이션 설계 ---- 21
그림 16. 시뮬레이션을 위한 선로정수, 임피던스, 고장시간 설계 ---- 22
그림 17. SS-SSP 급전선 지락고장 시뮬레이션 파형 ---- 24
그림 18. 상하행 SS-SSP 시뮬레이션 파형 ---- 27
그림 19. 상하행 SP-SSP 시뮬레이션 파형 ---- 28



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# ABSTRACT

## A Study on the Fault Locator for Stability Improvement of Electric Railway

Kim Deok Hyeon
Advisor : Prof. Cho Guem Bae, Ph.D.
Electrical Engineering Technology Convergence
Industrial Technology Convergence
Graduate School of Chosun University

The industrial revolution leads to the development of industry and the increase of industry. The railway is a new way of promoting the transportation industry in the future and is empirical. In order to develop the living environment of the family, it is necessary to improve the human living environment.

Problems such as failure measures and operation delays caused by the increase of the operating distance and utilization rate of electric railway are occurring, and the demand therefor is also rising, and it is urgent to improve the stability for the quick repair and maintenance of the railway. Failures due to electric railways have a wide range of impacts and failures due to human or physical factors can not be totally excluded. In other words, a system is needed to secure the stability and reliability of electric railway. The high-strength facial expression system is a system that can accurately identify high-grade facial expressions and actual incident points when a fault occurs in



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

an electric railway. Electric railways are widely distributed, and it is important to accurately identify and deal with faults in these environments. For this purpose, it is necessary to study the improvement of the stability and the error between the point of view in the high - strength facial expression system and the actual point of accident in the field.

In this paper, we focused on improving the stability using the high - esteem facial expressions, and presented the algorithm for accurate high - esthetic facial expressions. In this way, it is possible to shorten the time of accident restoration and maintenance by minimizing the expression error of the high-strength facial expression system, and to improve the stability of the electric railway through the technique of accurately grasping the fault point of various accidents of the electric railway.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# Ⅰ. 서 론

산업혁명으로 산업의 발전으로 인해 인구와 산업이 특정 도시로 편중되고 있는 실정이며 유통되는 물류의 급속히 증가하여 현재의 도로 교통 중심의 교통체계는 한계를 드러내고 있다. 우리나라 뿐 만 아니라 세계 각국에서도 도로 교통의 한계를 직시하고 교통의 공간적인 제약과 소음을 비롯한 각종 공해를 포함하는 문제의 대안으로 전기철도를 제안하고 있다[1,2]. 철도는 현재 산업사회의 형성에 큰 축을 담당하고 있으며 물류의 한 영역을 맡고 있음으로 인하여 원활한 경제활동이 이루어 질 수 있도록 이바지 하고 있다. 철도는 타 운동 수단에 비해 안전성, 신속성, 정시성, 수송력이 높은 운송 수단으로 환경 친화적이라는 새로운 인식을 통해 미래의 교통산업으로 새로운 부흥을 예정하고 있는 실정이다. 차세대 교통수단으로써 전기철도는 산업 발전에 원동력이 되는 에너지를 불어넣고, 인간의 생활환경을 개선시키는 결정적인 요소가 될 것으로 기대되고 있다[3].

우리나라의 전기철도는 약 107km의 태백선을 1972년 시험으로 건설하면서 시작되었고 그 이후 일반철도, 고속철도의 건설을 추진하였다. 현재는 전기철도의 영업거리가 2.7만km를 넘어섰고 약 70%의 전철화 되었다. 저탄소 녹색 성장이라는 기반을 바탕으로 도시철도 및 광역철도는 2012년 대비 39%가 증가된 1,406km의 간선 철도망을 추가 건설할 계획이며, 대도시권에서는 60%에 달하는 비율의 대중교통 수송 전담율을 담당할 예정이다[4]. 이와 같이 전기 철도의 영업거리 및 이용율의 증가로 인한 고장 조치 및 운행지연과 같은 문제점이 발생을 하고 있으며 이에 따른 요구 역시 상승하여 신속한 복구 및 철도의 사전 유지보수에 대한 안정도 향상이 절실히 필요하다.

전기철도에 의한 고장은 영향을 미치는 범위가 광범위하고, 인적 또는 물적 요인에 의한 고장을 완전히 배제할 수 없기 때문에 고장 예방 및 조치에 대한 연구가 점진적으로 진행되어야 한다. 전기철도에서 단락이나 지락 등의 고장이 발생하게 되면 열차 운행의 중단은 물론 이용 고객들의 안전이 위협받고 불편함을 초래하게 된다. 즉, 전기철도의 안정성과 신뢰성을 확보하기 위한 시스템이 필요하다. 고장점 표정장치는 전기철도에서 고장이 발생하게 되면 고장점 표정지점과 실제 발생한 사고지점을 정확하



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

고 확인할 수 있는 시스템이다[5,6]. 전기철도는 광범위하게 분포되어 있으며 이러한 환경에서 일어나는 고장을 정확하게 파악하고 신속하게 처리하는 것이 중요한 요소가 된다. 이를 위해 고장점 표정장치에서 표정한 지점과 실제로 발생한 현장의 사고지점과의 오차를 줄이고 안정도를 향상시키는 것에 대한 연구가 필요하다.

고속철도 급전시스템에서는 현재 다양한 방식을 개발하여 고장점 표정을 위해 활용하고 있으며, 운영 여건에 따른 정확한 고장지점을 표정하기 위해 오차를 줄이는데 노력을 하고 있다. 본 논문에서는 고장점 표정을 활용한 안정도 향상에 초점을 두고 연구하였으며, 정확한 고장점 표정을 위한 알고리즘을 제시하고 이에 따른 시뮬레이션을 통해 개선효과를 검증하고자 한다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# Ⅱ. 이론적 고찰

## A. 전기철도 급전시스템

열차를 구동하는 방식에는 전차선로에 공급되는 전력에 따라 교류 급전방식과 직류 급전방식으로 구분된다. 교류 급전방식의 경우에는 직류 급전방식과 비교했을 때, 전압이 높아 대용량의 중장거리 수송에 유리하며 전류가 낮아지는 방식이므로 전압강하가 함께 낮아지는 장점이 있다. 하지만 통신 유도장해로 인한 문제가 있어 대책을 강구해야 한다는 단점을 지닌다[7]. 직류 급전방식은 현재 대부분의 지하철 구간에서 활용이 되고 있으며 1,500[V]의 직류 전압을 활용한다. 교류 급전방식에 비해 통신 유도장해가 없으며 사용 전압이 낮기 때문에 전차선로의 절연계 등급을 줄일 수 있다는 장점이 존재한다. 하지만 교류 급전방식보다 전압이 낮음으로 인해 전차선로의 전류가 높아지므로 선로의 전압강하가 높아지는 단점을 갖는다[8,9].

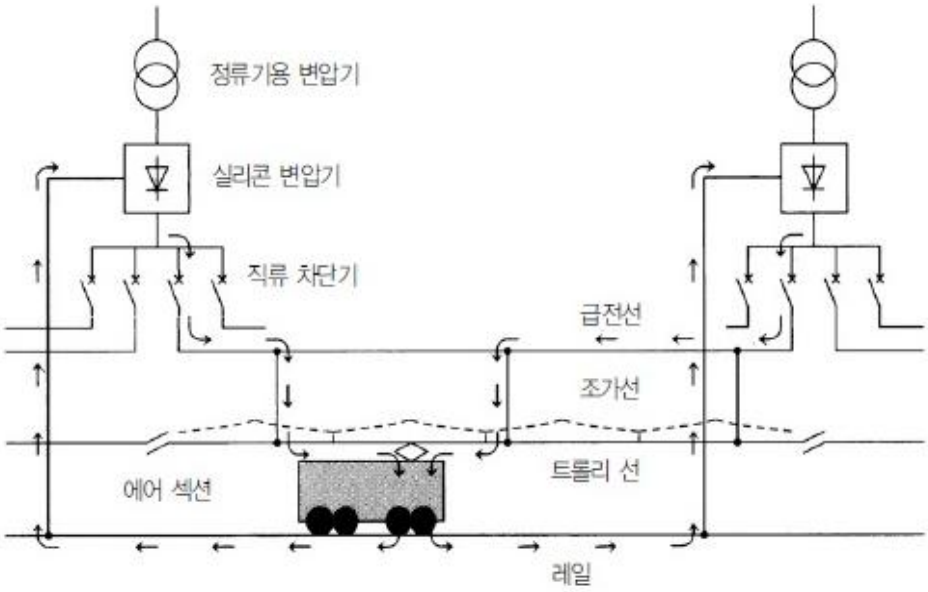


그림 1. 직류 급전방식 회로의 개요



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

일반적으로 교류 급전방식은 상용주파수 3상 전원을 변전소로부터 수전하여 Scott결선 변압기를 통해 단상으로 변환하고 이를 전차선로에 공급하는 방식을 통해 운전을 한다. 교류 급전방식은 직접 급전방식, BT(Booster Transformer) 급전방식, AT(Auto Transformer) 급전방식 등으로 급전하는 형태에 따라 구분되어진다.

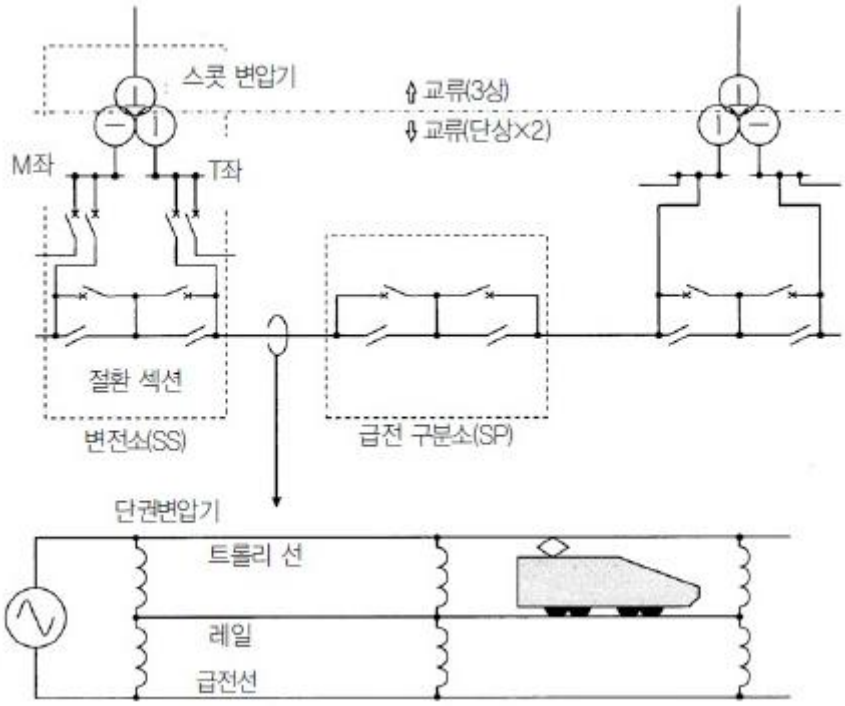


그림 2. 교류 급전방식 회로의 개요

## 1. 직접 급전방식

직접 급전방식은 전차선과 레일로만 구성이 되며 그 회로는 그림 3과 같은 형태이다. 우리나라에서는 차량기지에서 주로 활용되고 짧은 측선 등과 같이 일부에만 활용이 되고 있지만 세계적으로는 가장 많이 사용되어지는 있는 급전방식이다. 설치비용이 낮아 경제적이며 구조가 간단하고 타 방식들과 비교했을 때 임피던스가 작으므로 전철용 변전소의 간격을 보다 길게 잡을 수 있다는 장점을 갖는다. 하지만 열차에 의해 레



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

일에 변전소로 귀로하는 전류가 흐르기 때문에 통신선의 유도장해가 존재하며 다른 방식들에 비해 레일 위의 전위가 크다. 일부 국가에서는 통신 유도장해를 경감시키기 위해 레일과 대지로 누설되는 전류의 일부를 귀선으로 분류하여 레일에 대한 귀선을 병렬로 연결하여 사용하고 있다[10].

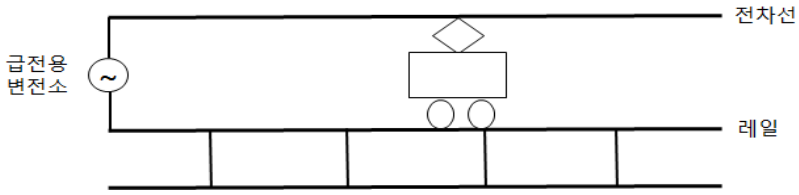


그림 3. 귀선이 존재하는 직접 급전회로

## 2. BT(Booster Transformer) 급전방식

BT(Booster Transformer) 급전방식은 약 4km의 간격마다 권선비가 1 : 1인 특수변압기를 설치한 다음 전차선에 부스트 섹션을 설치하도록 한다. 대지에 누설되는 전기차의 귀전류를 BT 작용을 통해 강제적으로 부급전선에 흡상을 시키기 위해 BT의 1차측과 2차측을 전차선과 부급전선(NF : Negative Feeder)에 각각 직렬로 접속한다. 이로 인해 통신선로의 유도장해가 경감되는 급전방식이다[11,12].

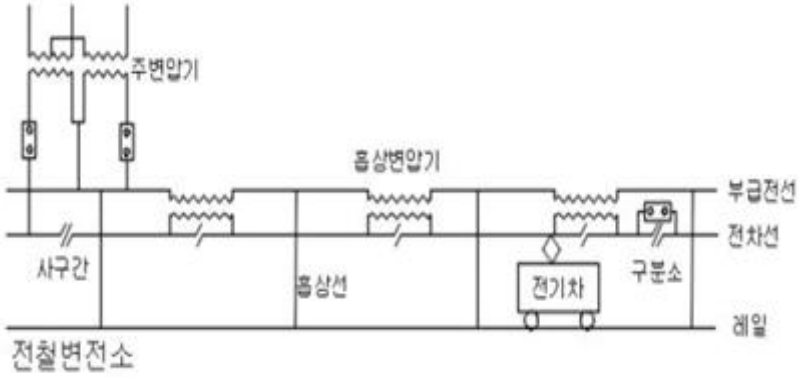


그림 4. BT 급전방식의 구성도



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

통신선로의 유도장해를 경감한다는 큰 장점에 반해 부하전류 개폐로 인한 아크 발생이 있고 열차가 고속화 될 경우 운전 및 유지보수가 어렵다는 단점이 존재한다. 현재 우리나라에서 BT 급전방식으로 운영되는 구간은 원주-제천 구간이 유일하나 이 역시도 시설물의 노후 문제로 인해 AT 급전방식으로 교체될 예정이다.

## 3. AT(Auto Transformer) 급전방식

AT 급전방식은 급전선과 전차선 사이에 권수비가 다른 단권변압기를 삽입하고 권선의 중앙에 레일을 접속시키는 방식이다[13]. AT 급전방식의 구성도는 아래 그림 5와 같으며, 우리나라의 기존선과 수도권의 전철이 AT 급전방식을 활용하고 있고 대부분의 경우 AT의 직렬권선과 분로권선의 권수비를 1:1로 설정된다. 권수비가 1:1인 경우에 레일과 급전선 사이의 전압과 전차선과 레일 사이의 전압은 동일하며, 열차는 전차선과 레일 사이에 위치하게 되면서 열차가 운행할 때 부하전류는 50% 감소하게 된다. 다음과 같이 AT 급전방식을 활용할 경우에는 변전소에서 공급하는 전압이 열차에 급전하는 전압의 2배가 된다. 이는 급전전압이 BT 급전방식에 비해 크고 동일한 출력의 열차에 공급하는 전류가 작아지게 되므로 전차선로의 전압강하가 동시에 감소하게 된다[14,15].

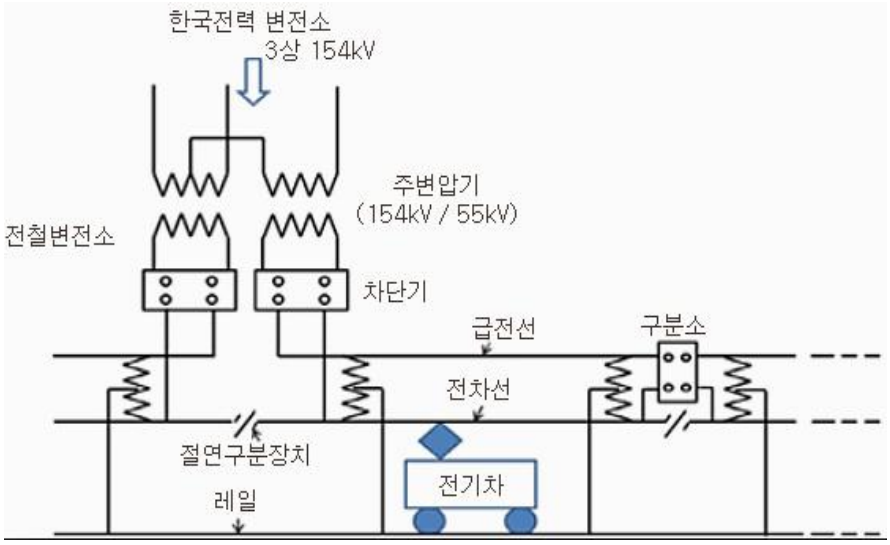


그림 5. AT 급전방식의 구성도



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

전압 불균형이 적고, 안정된 전력 공급 및 통신선에 의한 유도 장애도 작다는 장점으로 인해 국내의 일반 철도 및 고속철도, 수도권의 전철 등 다방면에서 AT 급전방식을 활용하고 있다. 뿐만 아니라, 전철용 변전소의 수전전압이 154kV로 한국전력에서 변전한 전압을 사용하고 있으므로 전철용 변전소의 위치를 한국전력의 변전소 근처로 선정이 가능하다. 이는 송전선로 설치비 및 유지보수 비용을 절감할 수 있다.

## 4. 단권변압기

단권변압기의 구조는 그림 6과 같이 공통 철심을 활용하여 변압기의 1차와 2차 권선을 분리하지 않고 권선의 일부를 공통권선으로 하게 된다. 이때, 공통 권선에 흐르는 전류는 1차와 2차 권선의 차 전류와 같다. 전차선로에서 활용되는 단권변압기의 권선비는 주로 2:1로 되어 있으며 급전전압이 전차선로의 전압의 2배이다. 따라서 전압 강하율은 전차선에 전압 강하의 1/4가 되며 전철용 변전소의 간격이 길어진다 [16,17]. 단권변압기의 경우 레일에 흐르는 전류 범위의 제한으로 인해 대지 누설전류가 감소되며 통신선에 대한 유도장해가 상쇄되는 장점을 지니기 때문에 전차선로에서 매우 중요한 역할을 한다.

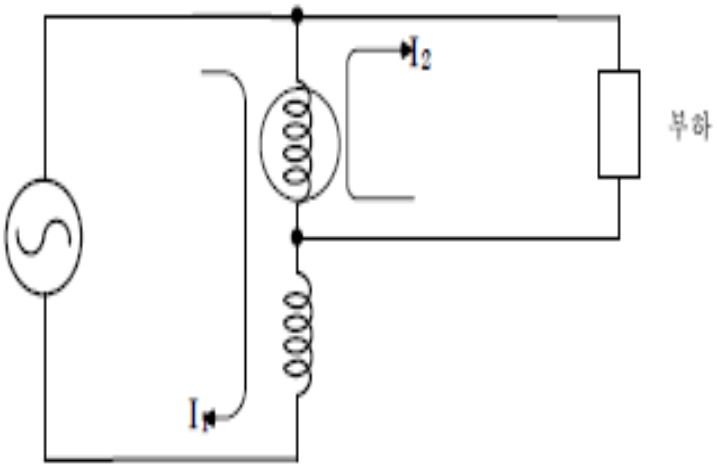


그림 6. 단권변압기의 구조



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 5. 전차선로

AT 급전방식의 전차선로는 일반적으로 급전선, 전차선, 조가선, 레일, 가공보호선으로 구성되어 있다. 전차선로의 경우 상행선과 하행선 각각의 전차선과 조가선이 수 미터마다 드로퍼로 연결되어 있으며 레일과 가공보호선이 상호 연결되어 있다. 최근 교류 전기철도의 실제적인 해석을 위해 상행 급전선, 하행 급전선, 상행과 하행 각각의 전차선 도체군, 레일 도체군을 포함하는 5개의 도체군으로 모델링하여 활용하고 있다. 실제적인 전차선로의 시스템은 14개의 도체로 구성되어 있지만 서로 연결되어 있거나 두 개의 동일한 도체의 경우 등가를 통해 도체수를 줄여 9개로 나타낸다. 다음 그림 7은 현실적으로 나타낸 전차선로의 도체군이다[18].

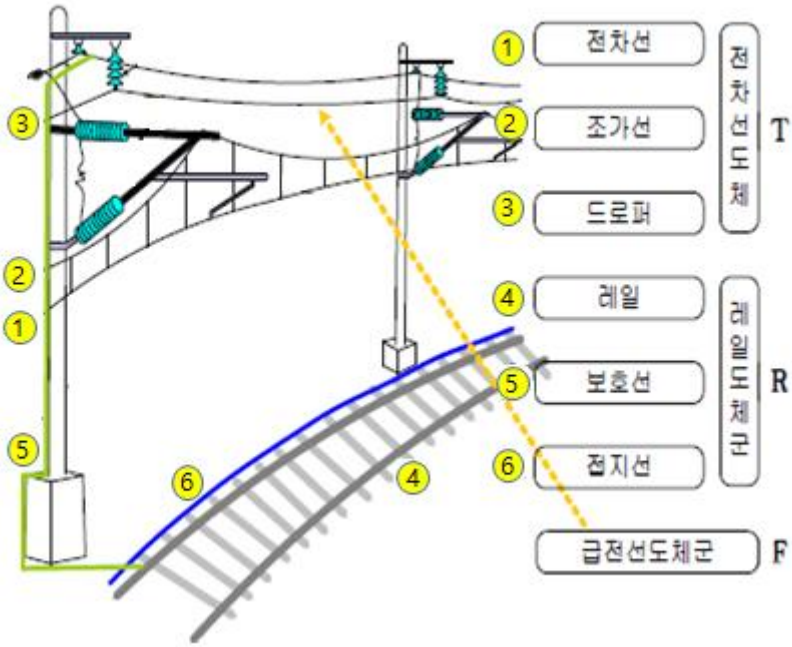


그림 7. 전차선로의 도체군



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## B. 고장점 표정장치

고장점 표정장치는 전기철도의 고장이 발생했을 경우 고장복구를 신속하게 할 수 있도록 정확한 고장지점을 계산하여 운영자에게 알려주는 시스템이다. 전차선로의 외선장애의 주요 발생요인으로는 지락이나 단락, 폐비닐이나 조류의 둥지, 동물을 포함한 이물질 등의 접촉, 차량 진입, 감전사고등 다양하게 나타난다. 외선설비에 다음과 같은 사고들이 발생하였을 경우 계전기 등의 보호 장치가 사고를 검출하고 차단기의 동작으로 사고 구간이 차단될 때, 고장전류나 전압등을 계측하여 고장점을 표정하고 이를 통한 신속한 사고해소를 목적으로 설치된다[19]. 고장점 표정장치는 전기 철도 설비나 전기 차량에 전력을 공급하기 위해 구외로부터 전송된 전기를 구내의 시설에 의해 변성시키는 장소인 전철변전소(SS)에 주장치가 설치되고 급전구분소(SP), 보조급전구분소(SSP), 단말보조급전구분소(ATP)에 각각 보조 장치들이 설치되어 구성된다. 급전구분소는 전철변전소간의 전기를 구분하거나 연장 급전을 위한 개폐장치 등을 설치한 장소이며, 보조급전구분소는 작업 또는 사고가 발생했을 때 정전구간을 한정하고, 연장급전을 위한 개폐기를 설치하는 장소이다. 마지막으로 단말보조급전구분소를 전차선로의 말단에 가공전차선의 전압강하 보상과 유도장해의 경감을 위한 단권변압기를 설치하는 장소이다[20].

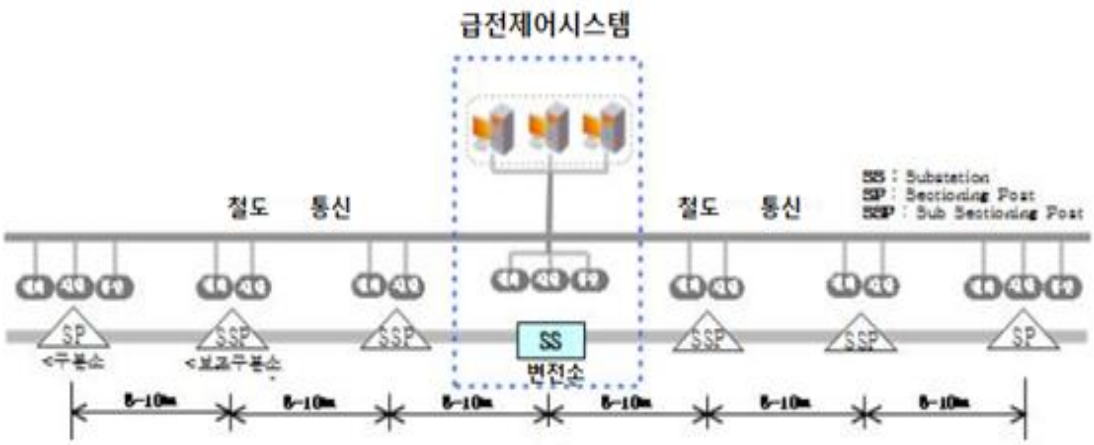


그림 8. 급전제어시스템의 구성도



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

교류 전기철도의 경우 전철변전소, 급전구분소, 보조급전구분소, 단말보조급전구분소 등에 설치되어 있는 단권변압기의 중성점으로 흡상되는 고장전류를 측정하여 거리로 환산을 하는 흡상전류비 방식과 해당 선로의 전류, 전압, 위상등을 전철변전소에서 측정하고 고장점까지의 리액턴스를 계산하여 거리로 환산하는 리액턴스 방식을 주로 사용하고 있다.

## 1. AT 급전방식

흡상전류비 방식은 고장이 발생 하였을 경우, 양쪽의 AT급전회로에 유입되는 전류를 계측하고 전류의 양을 벡터가 아닌 스칼라로 적용하여 합산한 비를 통해 고장점 거리를 구하는 방식이다[21]. 그림 9와 같은 원리로 흡상전류비 고장점 표정원리를 나타낼 수 있으며 흡상전류비 방식에서 $H_i$는 흡상전류비로 표현되며 $H_i$는 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_i = \frac{I_{n+1}}{I_n + I_{n+1}} \tag{1}$$

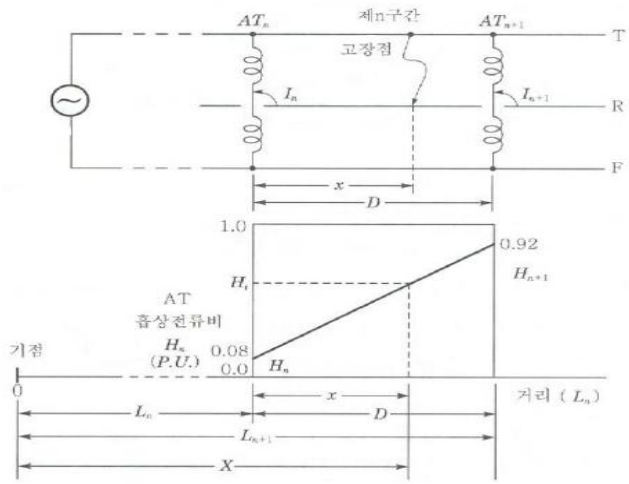


그림 9. 흡상전류비 방식의 고장점 표정 원리



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

현재 국내의 경우 일본과 유사한 방식을 채택하여 활용하고 있으며, 주변압기를 스콧결선 변압기로 하고 전철변전소 구내에 단권변압기를 설치하여 활용한다. AT 교류급전계통에서 발생하는 사고에 대하여 변전소에서 고장점을 특정 AT 사이로 좁히고 양측의 AT에 대한 회로를 간략히 설계한 후 고장거리를 구하는 방식이다. 이 때 양단의 AT는 동일한 전압과 위상의 전원으로 취급을 하며 각각의 인접한 AT의 흡상전류를 동시에 계측하여 스칼라 양을 구하고 비를 계산하여 고장점을 표정한다. 이를 등가회로로 나타내면 그림 10과 같다.

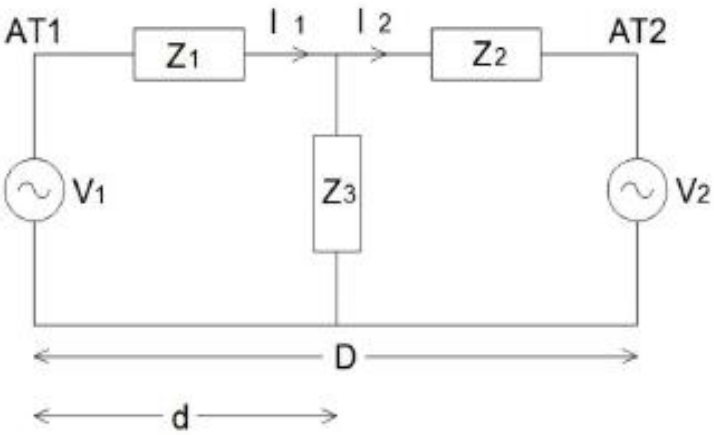


그림 10. AT급전회로의 등가회로

다음의 등가회로를 간략히 하여 식으로 정리하면 아래 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며

$$V_{AT} = Z_1 I_1 + Z_s (I_1 + I_2) \tag{2}$$

$$V_{AT} = Z_2 I_2 + Z_s (I_1 + I_2)$$

이때, $V_{AT}$ : 급전전압 $Z_s$ : 고장점 임피던스

$Z_1$ : $AT_1$과 고장점 간의 임피던스

$Z_2$ : $AT_2$와 고장점 간의 임피던스



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

고장전류에 대한 $AT_2$의 전류비를 식 (2)를 활용하여 정리하면 식 (3)과 같다.

$$H = \frac{I_2}{I_1 + I_2} = \frac{I_2}{\frac{Z_2}{Z_1} I_2 + I_2} = \frac{Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{d}{D} \tag{3}$$

$$\therefore H_1 = \frac{d}{D} = \frac{I_2}{I_1 + I_2}$$

이때, D : $AT_1$과 $AT_2$의 설치간격

d : $AT_1$에서 고장점까지의 거리

식 (2)와 (3)에서 고장전류에 관한 $AT_2$의 중성선 전류비는 고장점 거리에 대하여 비례함을 나타내며, 실제거리에 대하여 관계가 있음을 알 수 있으므로 실측된 사고 데이터의 곡선과 전류비의 곡선을 비교하여 고장점을 표정할 수 있다. 하지만 실제 사고에서는 급전 구간의 양쪽 AT에 인가되는 전압은 위상이 같지 않고, 고장전류 역시 다른 구간의 AT에서 흡상되어 측정된다[22]. 따라서 흡상전류비 방식의 표정 알고리즘은 AT 급전 계통에서 각 AT사이의 고장전류의 분포를 고려한 페루프를 기준으로 하며 키르히호프의 전압법칙 따른 방정식이 성립한다. 이상적인 단권변압기를 사용하여 변압기의 권수비가 같다는 가정 아래 두 전압이 같다면 고장거리 m에 대한 식은 다음과 같다.

$$m = \frac{(\frac{1}{2} Z_c + 2Z_R + \frac{1}{2} Z_F - 2Z_{CR} + Z_{CF} - 2Z_{RF})(I_b) - Z_{AT}(2I_2 - 2I_3)}{(Z_c + 2Z_R - 3Z_{CR} + Z_{CF})(I_a + I_b)} \tag{4}$$

이때, m : AT2에서 고장점까지의 거리 / AT2와 AT3 사이의 거리

ZC : Catenary 자기 임피던스



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

$Z_R$ : Rail 자기 임피던스 $Z_F$ : Feeder 자기 임피던스

$Z_{CR}$ : Catenary - Rail 간 상호 임피던스

$Z_{CF}$ : Catenary - Feeder 간 상호 임피던스

$Z_{RF}$ : Rail - Feeder 간 상호 임피던스

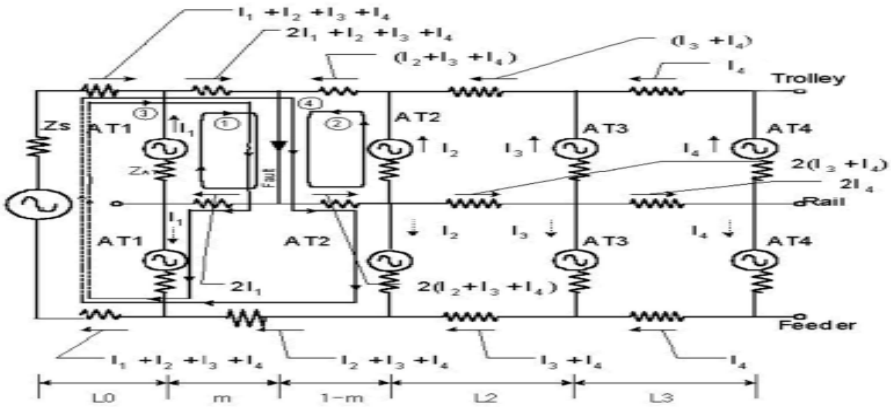


그림 11. 지락사고 발생시 AT2와 AT3 사이의 전류 분포

그림 11은 AT2와 AT3 구간 사이에서 지락사고가 발생하였을 경우의 전류의 분포이며 각각의 AT는 독립된 전압으로 나타냈다. 각 AT 구간 사이의 발생한 고장점에 대한 표정은 식 (4)에 의한 계산을 통해 구하였으며 이를 표정 알고리즘을 적용하기 위해서는 다음과 같은 사항들을 고려해야한다. 먼저, 상호 임피던스의 값들을 정확하게 알고 있어야 하며 선로 리액턴스는 전철변전소에서 급전구분소에 이르는 모든 구간에 대하여 일정한 값으로 표현을 해야한다. 만약 구간별 선로 리액턴스가 일정하지 않을 경우 오차가 발생하게 되므로 정확한 고장점을 표정하는데 어려움이 있다.

흡상전류비 방식은 단점이 존재하는데, AT의 중성점으로 흡상되는 고장 전류를 비교하여 거리를 표정하는 방식이므로 AT가 존재하지 않는 구간의 경우에는 전혀 다른 지점을 표정하게 된다. 뿐만 아니라, 국내의 용산이나 조치원 등과 같이 삼각선이 존재하는 구간에서는 전차선로가 연결이 되어 있어 서로 구분이 되지 않기 때문에 정확한 고장지점에 대한 표정이 어렵다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 2. 리액턴스 방식

급전회로의 리액턴스는 거리에 비례하다는 원리를 활용한 방식으로 사고가 발생하였을 때 급전회로의 전류와 전압을 취하여 미리 입력해 놓은 보호구간의 임피던스값을 비교하여 고장점을 표정한다. 리액턴스 표정방식은 주로 BT 급전선로에서 적용되며 일정한 간격을 두고 전차선에 구분 장치를 만들고 이와 병렬로 흡상변압기를 설치하여 레일에 흐르는 전류를 부급전선으로 흡상하는 구조로 되어 있다.

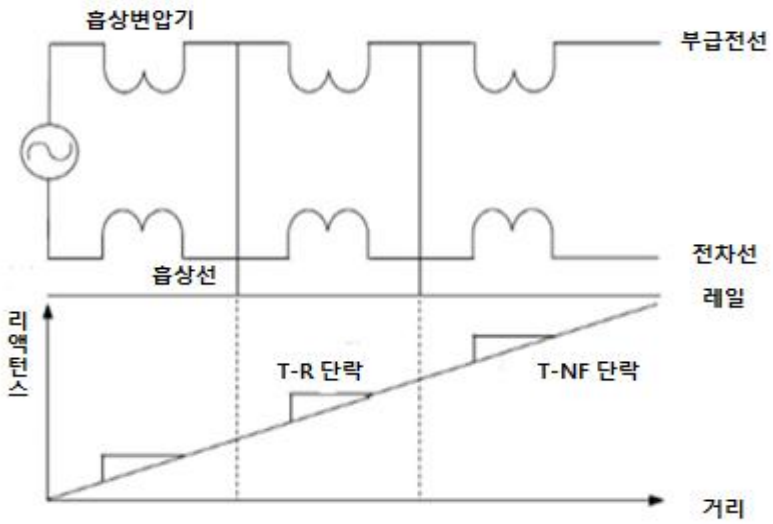


그림 12. BT 급전방식의 거리-리액턴스 관계

BT 급전회로의 임피던스는 그림 12와 같이 T-NF 단락과 T-R단락으로 구분되며 T-NF단락의 경우에는 단락 임피던스가 직선이고 T-R단락은 임피던스가 계단 형태로 나타난다. 그림 12와 같이 흡상선과의 상대 위치에 따라 레일과 NF에 흐르는 전류의 방향이 변한다. 회로 임피던스는 T-R 단락과 같이 계단 모양으로 되지만 BT 임피던스의 길이가 길면 T-NF 단락 임피던스는 직선으로 간주를 해도 무방하다[22].

교류 급전회로에 단락이나 지락에 의한 사고로 고장이 발생하게 되면 보호계전기가 동작을 하며 회로가 차단된다. 회로가 차단된 이후부터 차단기가 개방되기 전까지 변



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

전소와 고장지점까지의 리액턴스는 다음 식(5)와 같이 전류와 전압, 위상각을 활용하여 구할 수 있다.

$$X = \frac{E}{I} sin\theta \tag{5}$$

이때, X : 변전소로부터 고장지점까지의 리액턴스

I : 고장 발생 시의 전류

E : 고장 발생 시의 전압

sinΘ : 전류과 전압의 위상각

리액턴스 값은 계산에 의해서 구해지며 거리와 리액턴스의 표정곡선에 의해 고장지점을 찾아낸다. 하지만 이러한 방식은 AT 급전회로에는 적용하였을 경우 부하의 변동에 대한 영향이 크고 고장지점을 정확히 표정하는데 어려움이 있다. 실제로 계속된 시설의 개발 및 확충에 의해 급전계통의 구성이 복잡해지면서 오차가 크게 발생하는 현상이 발생하였고 현재는 극소수의 경우만 활용이 되고 있는 실정이다.

그림 13은 AT 급전방식에서 거리와 임피던스의 관계를 나타내며, 선로 임피던스는 거리에 비례하나 AT 설치지점에서 리액턴스가 줄어드는 특성으로 곡선 형태의 포물선을 그리게 되어 실제로는 직선과 포물선의 차이만큼 오차가 발생하게 된다.

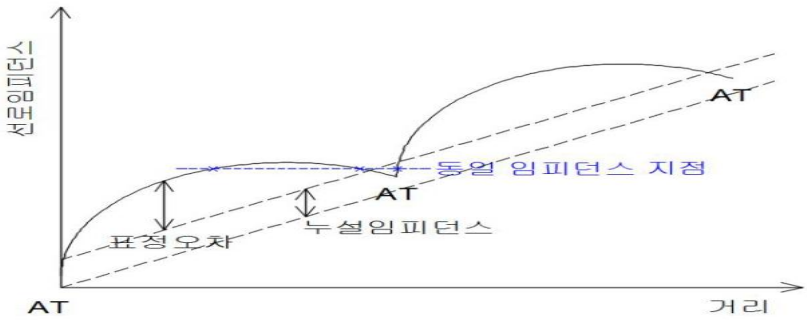


그림 13. AT 급전방식의 거리-리액턴스 관계



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 3. 고장점 표정장치 현황

표 1은 전철 변전소의 고장점 표정장치를 기준으로 하여 한국철도공사에서 작성된 표정방식 설치 현황이다[4].

표 1. 고장점 표정방식의 비교

| 구분 | 흡상전류비방식 | 리액턴스방식 | 고장점위치추적 |
|---|---|---|---|
| 고속선 | 대구, 부산진 | 회덕, 상촌, 신동, 소하, 향남, 용정, 옥천, 김천, 대구, 안산, 평택, 울산, 신청주, 부산, 당리, 보은 | |
| 수도권 | 고양기지(2), 원주, 주안, 군포, 구리, 모란, 구로, 평택, 마석, 매곡, 남춘천 | | 의정부 |
| 충청권 | 조치원, 옥천, 충주 단양, 석항, 계룡, | 봉양 | |
| 전라권 | 순천, 덕양, 백양사, 익산, 전주, 남원 노안, 일로 | | |
| 강원권 | 동해, 동백산 | | |
| 경상권 | 춘양, 직지사, 사곡, 경산, 밀양, 가야, 진례, 군복, 밀양 | | |
| 계 | 40 | 17 | 1 |

AT 급전방식은 현재 일반 철도에는 적용이 되지 않고 있는 실정이다. 그 이유는 앞장에서도 언급했던 것과 같이 전차선로에서 리액턴스가 거리에 비례하지 않으며 특성 곡선이 포물선으로의 형태로 나타나기 때문이다. 뿐만 아니라 BT 급전방식에 접합한 리액턴스를 설치했을 경우 고장 표정에 대한 오차가 크게 발생한다. 이와 반대로 BT 급전방식의 경우에는 전차선로의 리액턴스가 거리에 비례하므로 특성 곡선이 선형이



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다. 따라서 리액턴스 방식의 고장점 표정장치를 적용하는 것이 안정적이지만 현재 BT 급전방식이 적용되는 구간이 많지 않고 그 구간들도 곧 AT 급전 방식으로 개량이 될 것으로 예상되는 상황이다.

고장점의 표정장치 성능을 향상시키기 위해 다양한 방식을 통한 연구 및 접근이 진행되고 있다. 그중 통상적으로 사용되고 있는 방식은 크게 시뮬레이션에 의한 방식과 실제 고장데이터를 이용하는 방식이다. 시뮬레이션을 사용하는 방식의 경우에는 동적해석 소프트웨어를 활용하고 있으며 고장 발생 이후에 어느 정도 주기가 지나 안정된 파형을 모의하여 그 결과를 토대로 표정장치에 입력하는 방식이다. 현재 국내에서는 Matlab, EMTP, EMTDC 등의 소프트웨어를 주로 활용하고 있으며, 철도계통의 고장현상 모의를 위해 필요한 설비의 모델링 가능성 여부를 파악하고 모델의 개발에 대한 연구도 활발하게 이루어지고 있다. 시뮬레이션을 사용하는 방식에서는 결과를 표정장치에 재입력하기 위하여 보호계전기의 시험 등에 사용되는 전력발생장치가 필요하다. 이 방식은 원하는 경우 시험을 언제든지 반복적으로 수행할 수 있으며 고장점 표정을 위한 모델의 수정이 용이다는 장점을 지니지만, 설계한 모델의 정확도에 따라 그 결과값이 달라질 수 있다는 단점을 갖는다[23].

현재 활용되고 있는 대부분의 표정장치에는 고장기록이 포함될 수 있도록 구성이 되어 있으며, 고장 데이터를 수집하고 페이백하여 장치를 재생할 수 있도록 되어 있다. 이를 토대로 표정장치에 입력할 수 있는 방식이 실제 고장데이터를 활용하는 방식이다. 실제 고장데이터를 활용하여 다음과 같이 고장점과 표정을 할 경우, 표정결과를 보정할 수 있지만 표정장치의 제작사에 따라 데이터를 기록하는 방식과 형태가 다르고, 계측 요소에 차이가 있어 실제 고장데이터를 각각의 다른 제작사의 제품에 적용하는데 어려움이 있다[24]. 제작사에 따른 고장데이터 활용이 불가는 한 것은 아니지만 할 수 있도록 조정하거나 기록을 관리하는 작업이 필요하다. 이 방식의 경우 별도의 모델링이 불필요하고 여러 가지 형태의 고장으로 반복적인 수행을 할 수 있어 편의성을 가지고 있지만 고장데이터를 취득하고 관리하는데 많은 시간과 협조가 필요하다는 단점이 존재한다.

기존의 고장점 표정을 위한 알고리즘 기법에는 주로 대칭좌표변환을 이용한 고장거리 계산 기법, 3상회로 직접해석에 의한 고장거리 계산 기법, 임피던스 계산에 의한



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

고장거리 계산 기법 활용되고 있다. 다음 표2를 통해 각각의 고장거리 계산 기법에 대한 알고리즘의 특징을 간략히 정리하였다[18].

표 2. 고장점 표정 알고리즘의 특성

| 알고리즘 | 특징 |
|---|---|
| 대칭좌표변환을 이용한 고장거리 계산 기법 | - 3상 평형 계통에서 상용<br>- 단상부하로 인한 계통의 불평형시 독립적 영상, 정상, 역상회로 방정식을 이용한 대칭좌표법 적용의 한계 |
| 3상회로 직접해석에 의한 고장거리 계산 기법 | - 3상 불평형 계통 적용 가능<br>- 다양한 분기점이 존재하며 고장 발생 구간을 찾아내야 적용 가능 |
| 임피던스 계산에 의한 고장거리 계산 기법 | - 단순 임피던스 계산으로 고장점 표정<br>- 고장저항의 영향으로 인해 고장점 표정시 표정 오차 발생 |

고압배전계통의 고장점 표정을 위한 방법으로 대칭좌표변환을 이용한 고장거리 계산 알고리즘, 3상회로 직접해석에 의한 고장거리 계산 알고리즘, 임피던스 계산에 의한 고장거리 계산 알고리즘이 주로 활용되어 왔었지만 배전계통의 경우 단상부하로 인한 부하의 불평형 및 부하의 급격한 변동 등과 같은 문제로 인해 고장점 표정시 오차가 발생하게 된다. 이를 개선하기 위한 알고리즘을 본 논문을 통해 제안하고, 이를 시뮬레이션을 통해 검증하였다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# Ⅲ. 고장점 표정 알고리즘 설계 및 시뮬레이션

## A. 고장점 표정 알고리즘 설계

변전소에서 측정된 전압 전류를 토대로 고장점을 표정할 경우 변전소에서 실제 고장점까지의 임피던스 및 각 경로가 나타난다. 이를 부하전류의 영향을 최소화하기 위해 계산식을 통해 전압과 전류를 구하고 이를 아래 그림 14와 같이 설계된 알고리즘에 적용하여 정확한 고장거리를 추정하였다.

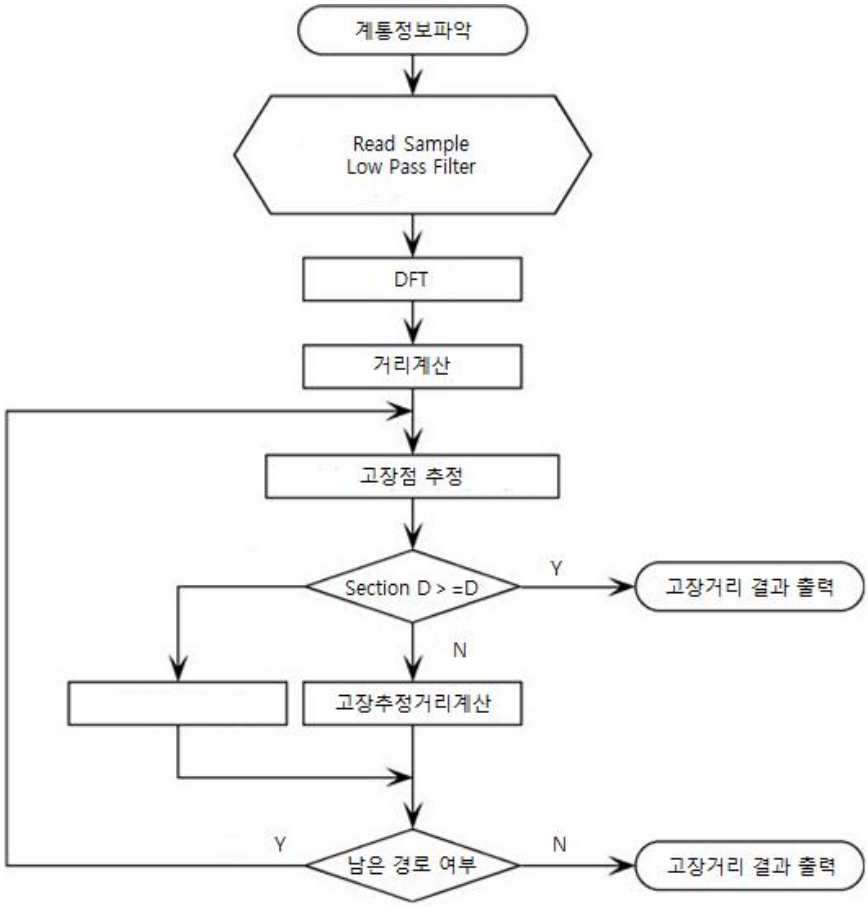


그림 14. 고장점 표정을 위해 설계한 알고리즘



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

고장 여부 판단 및 고장거리 계산을 위해 먼저 고장여부를 판단한 후 고장이 인지되었을 경우 DFT를 통해 전압, 전류의 페이저를 구하여 고장점 표정에 사용하였다. 거리 계산을 통해 고장점을 추정하였고 계산된 고장거리와 첫 번째 구간의 비교를 통해 계산된 거리가 클 경우에는 고장거리의 결과를 출력할 수 있도록 설계하였고, 이와 반대일 경우에는 다시 한 번의 고장추정거리를 계산하여 남은 경로 여부를 파악하도록 하였다. 남은 경로 여부의 유무에 따라 다시 고장점 추정을 위한 피드백을 진행하거나 고장거리 결과가 출력되도록 설계를 하였다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## B. 지락사고에 의한 고장점 표정 시뮬레이션

일반적인 경우 교류 급전 시스템에서 발생하는 지락사고는 전차선의 지락고장인 경우가 많다. 이때 고장임피던스의 값은 전차선이 닿는 장소에 따라 달라진다. 이를 반영하기 위하여 아래 그림 15와 같이 급전시스템에서의 고장을 설계하여 시뮬레이션을 진행하였다. 전차선의 지락고장을 가정하였으며, 고장 전류가 흐르는 단권변압기의 중성점, 중성선, 보호선 등의 접속을 한 것으로 설계하였다. 마지막으로 변전소를 중심으로 보조급전구분소와 급전구분소가 양방향으로 상호간격 9.5km로 설정하였다. 시뮬레이션을 위해 CPW는 0.8km 간격, 보호선용접속선 센서에 전류계가 포함되는 것으로 설정하였다. 단권변압기는 상·하선에 각각 6개씩 설치하고 교류 급전시스템의 고장을 해것하기 위해 모의급전 계통도 설계를 진행하였다.

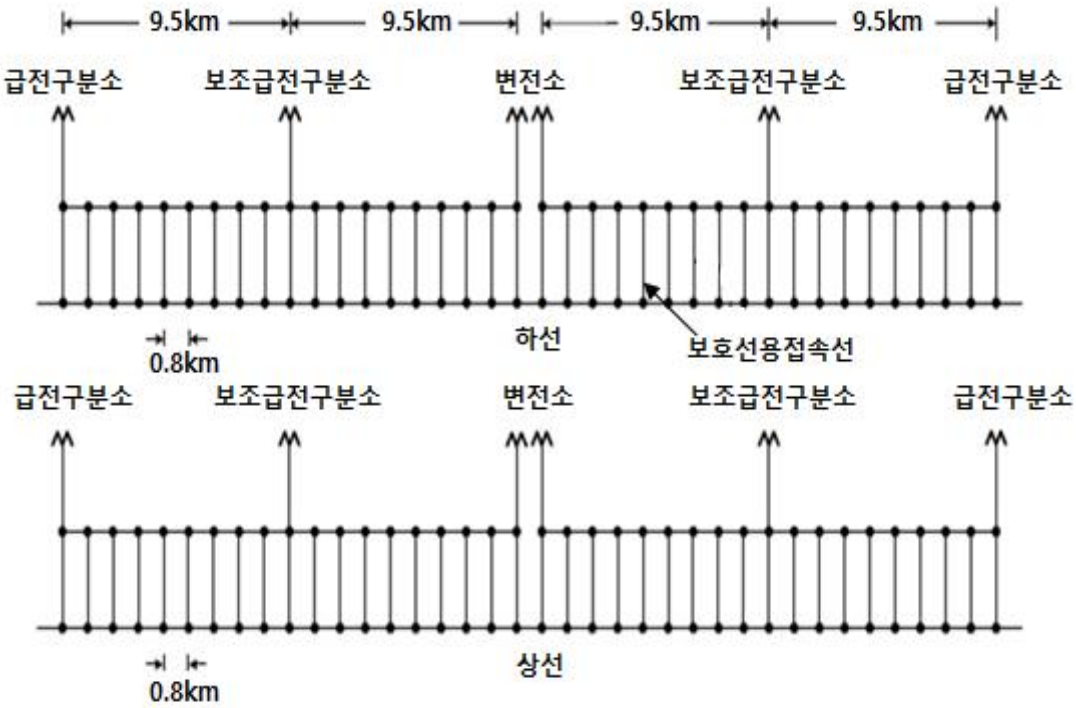


그림 15. 지락사고에 의한 시뮬레이션 설계



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

교류 급전시스템에서의 시험계통을 구성하고 선로정수와 임피던스 역시 모델링을 진행하였고, 고장시간은 Fault 소자를 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 본 연구에서는 고장점 표정장치의 신뢰성을 향상시키기 위한 시뮬레이션을 설계하였다. 이를 위한 고장 리액턴스는 0.01로 설정하였고, 4.6km 지점에서의 지락고장이 발생하도록 하였다. 지락고장이 발생하는 순간에 리액턴스 값을 각각 0.05, 0.1로 입력하여 고장 전류값과 파형을 분석하였다.

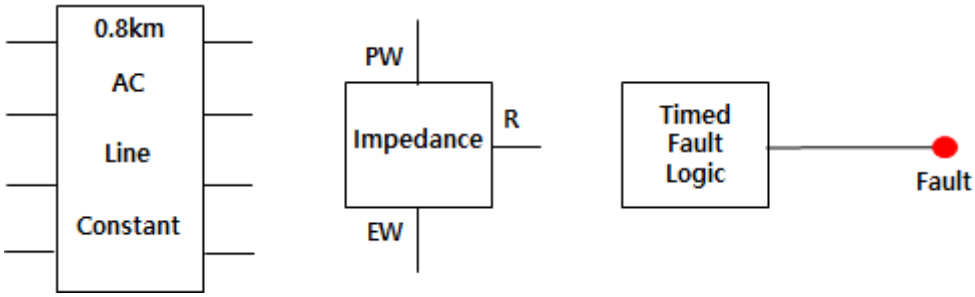


그림 16. 시뮬레이션을 위한 선로정수, 임피던스, 고장시간 설계

고장전류는 지락고장 시간을 설계하여 시작된 0.2초 만에 발생하고 0.1초간 지속되는 것으로 설정을 하였고 이는 급전회로에서 보호계전기가 동작 한 이후 해당 차단기가 개방되는 시간을 고려하였다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# Ⅳ. 결과 및 검토

## A. 급전선 지락사고에 의한 고장점 표정

급전시스템 전원의 보조급전변전소와 전철변전소 사이에 급전선 지락사고에 의한 고장을 변전소의 2.5km 구간으로 설정하고 사고지점 표정에 대한 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션을 통해 구현된 그래프를 분석한 결과 각 구간에서 발생한 최대 전류값을 얻을 수 있었고 이를 정리한 결과는 다음 표 3과 같다. 시뮬레이션을 진행한 결과 지락사고에 의한 고장이 3번과 4번 보호선용접속선 사이에서 발생했다는 것을 증명할 수 있었다.

표 3. 2.5km 지점의 급전선 지락고장 시뮬레이션 결과

| 구간 | 보호선용접속선 전류 [kA] | 구간 | 보호선용접속선 전류 [kA] |
|---|---|---|---|
| 보호선용접속선 1 (SS-SSP) | 0.198 | 보호선용접속선 2 (SS-SSP) | 2.001 |
| 보호선용접속선 3 (SS-SSP) | 2.042 | 보호선용접속선 4 (SS-SSP) | 0.0399 |
| 보호선용접속선 5 (SS-SSP) | 0.398e-3 | 보호선용접속선 6 (SS-SSP) | 0.799e-3 |
| 보호선용접속선 7 (SS-SSP) | 0.0402e-3 | 보호선용접속선 8 (SS-SSP) | 0.114e-4 |
| 고장전류 | | 4.261[kA] | |



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

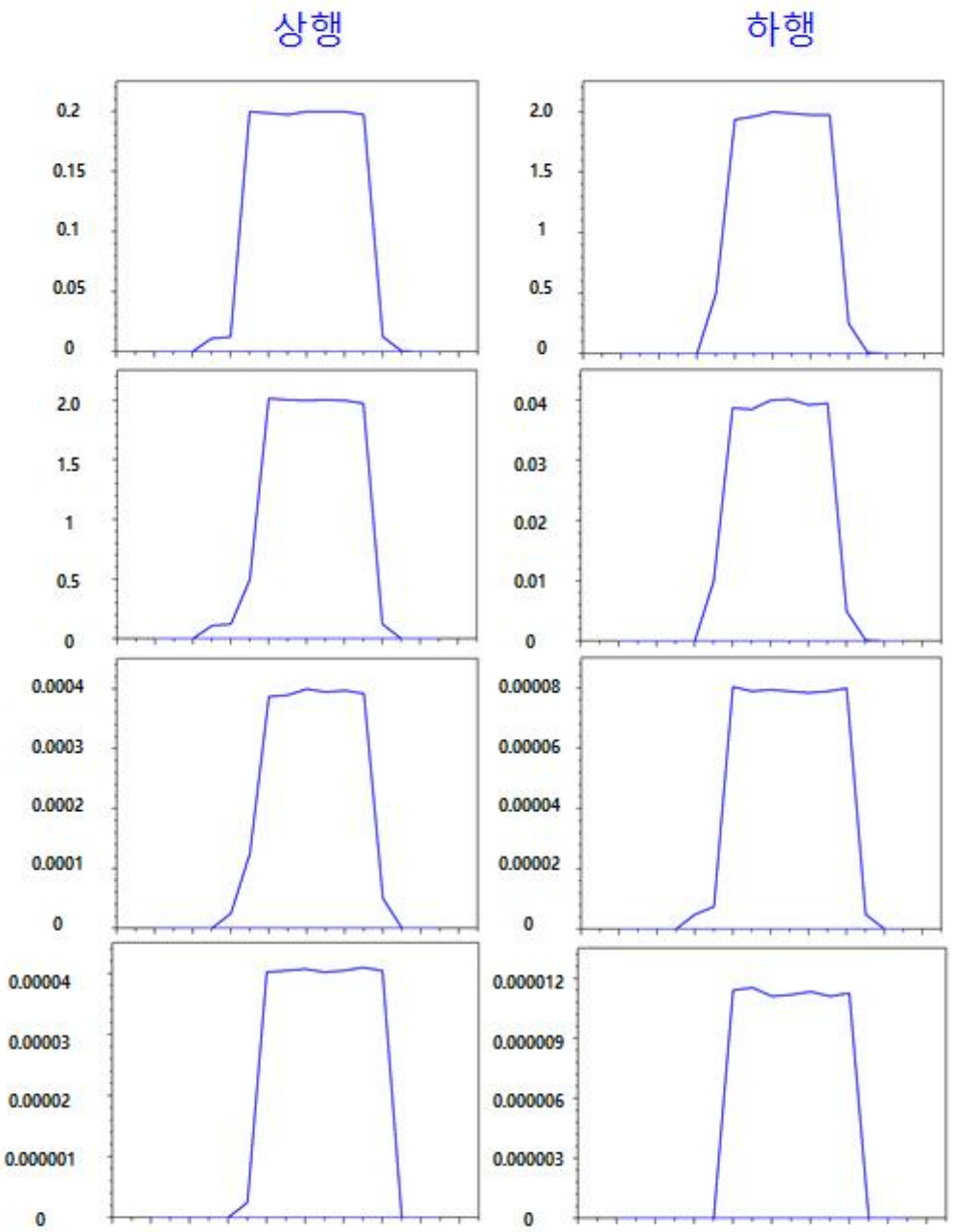


그림 17. SS-SSP 급전선 지락고장 시뮬레이션 파형



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표3을 통해 확인한 결과 고장전류가 최대값을 나타낸 구간은 SS-SSP 3번째 구간이었으며 이를 근거로 고장지점에 따른 식을 계산에 의하여 산출하였다.

$$0.8[km] \times \frac{2.001}{2.001 + 2.042} = 0.396\,[km] \tag{6}$$

$$0.8 + 0.396 = 1.196\,[km]$$

지락사고에 의한 고장은 2번과 3번 보호선용접속선 사이에서 발생한 것을 확인할 수 있었으며 계산에 의해 고장점을 추정한 결과 세 번째 보호선용접속선에서 396m 떨어진 지점에서의 고장이 이었음을 알 수 있었다. 그리고 변전소와는 1.190km 떨어진 지점이라는 것을 증명하였다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## B. 전차선 지락사고에 의한 고장점 표정

급전시스템 전원의 상행과 0.8km 에 위치한 영역에 지락사고를 설정하였고 이때 보호선용접속선의 전류값을 정리한 결과 표 4와 같았으며 시뮬레이션을 통해 얻은 그래프를 분석한 결과 변전소와 보조급전구분소 사이의 첫 번째 구간에서 고장전류가 가장 큰 것을 확인할 수 있었다. 이것은 지락고장이 1번과 2번 보호선용접속선 사이에서 발생했다는 것을 알 수 있다.

표 4. 0.8km 지점의 전차선 지락고장 시뮬레이션 결과

| 구간 | 보호선용접속선 전류 [kA] | | 구간 | 보호선용접속선 전류 [kA] | |
|---|---|---|---|---|---|
| 보호선용접속선 1 (SP-SSP) | 상행 | 2.891 | 보호선용접속선 1 (SP-SSP) | 상행 | 0.4012e-3 |
| | 하행 | 0.631 | | 하행 | 0.4925e-3 |
| 보호선용접속선 2 (SS-SSP) | 상행 | 0.198 | 보호선용접속선 2 (SP-SSP) | 상행 | 0.0032e-3 |
| | 하행 | 0.041 | | 하행 | 0.0031e-3 |
| 보호선용접속선 3 (SS-SSP) | 상행 | 0.0002 | 보호선용접속선 3 (SP-SSP) | 상행 | 0.0062e-7 |
| | 하행 | 0.0397e-3 | | 하행 | 0.0012e-6 |
| 보호선용접속선 4 (SS-SSP) | 상행 | 0.0973e-3 | 보호선용접속선 4 (SP-SSP) | 상행 | 0.6250e-8 |
| | 하행 | 0.0019e-3 | | 하행 | 0.1857e-8 |
| 고장전류 | | | 4.134[kA] | | |



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

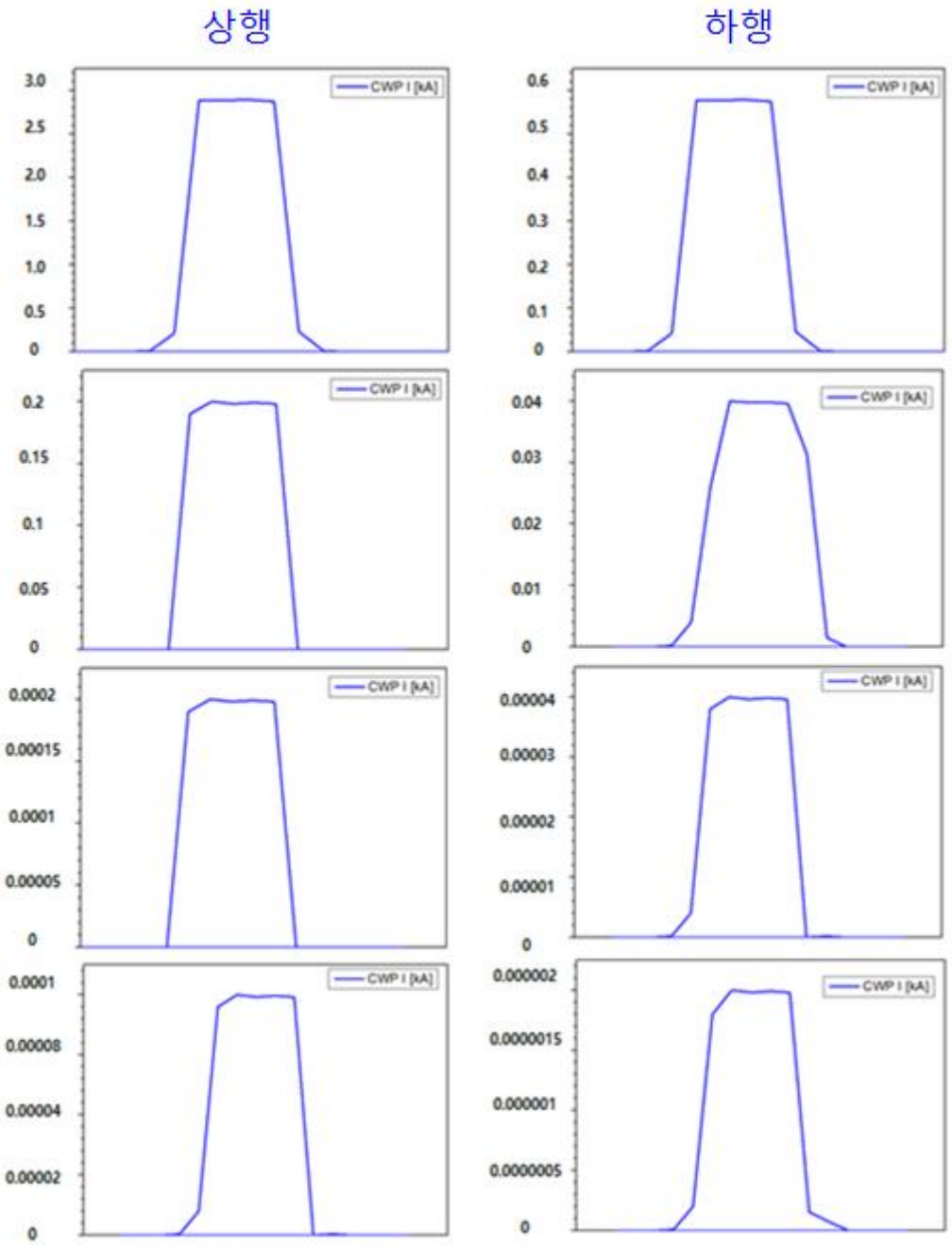


그림 18. 상하행 SS-SSP 시뮬레이션 파형



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

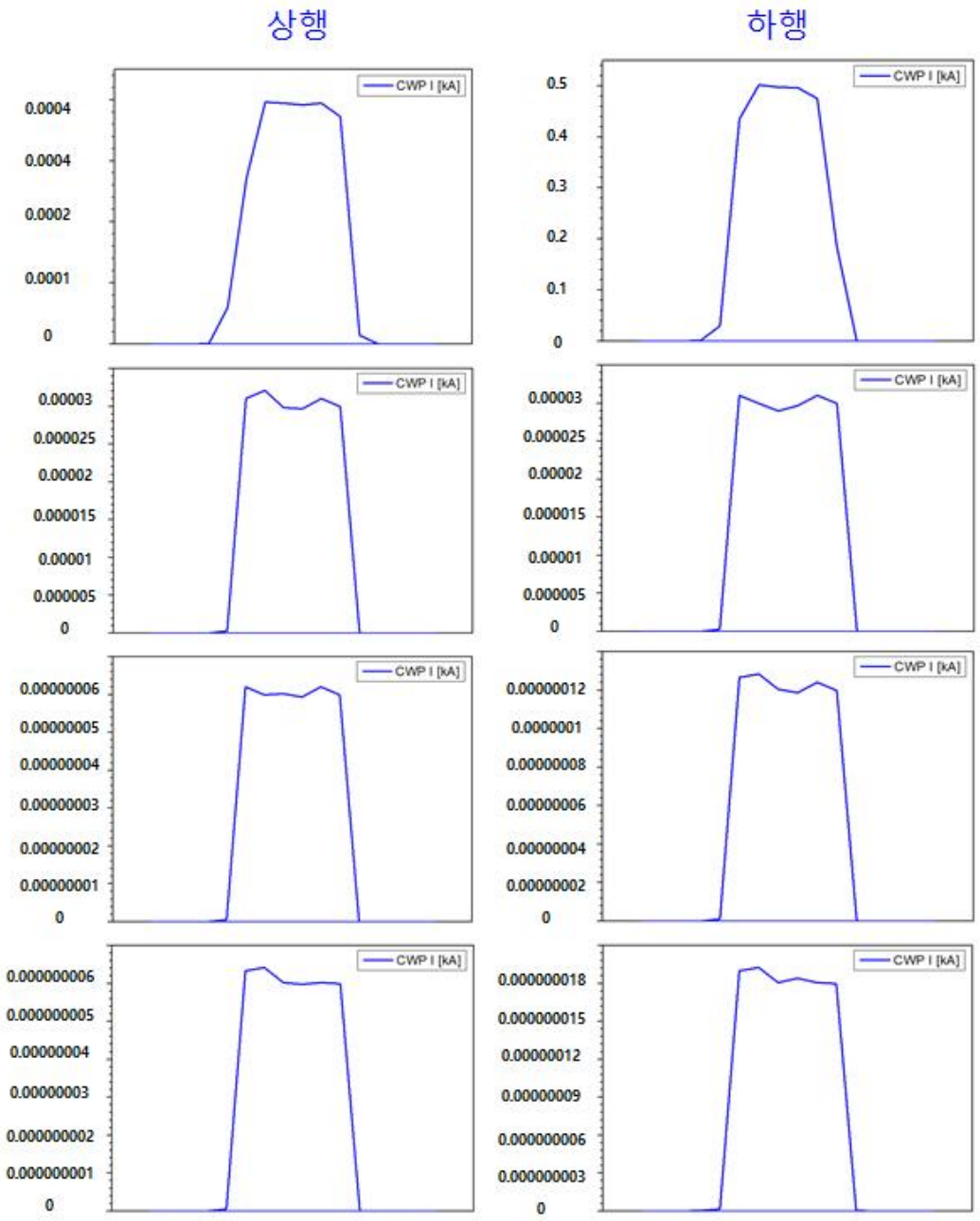


그림 19. 상하행 SP-SSP 시뮬레이션 파형



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

표4를 통해 확인한 결과 고장전류가 최대값을 나타낸 구간은 SS-SSP 1번째 구간이었으며 이를 근거로 고장지점에 따른 식을 계산에 의하여 산출하였다.

$$0.8[km] \times \frac{0.189}{0.189+2.891} = 0.0490\,[km] \tag{7}$$

$$0.8 + 0.0490 = 0.8490\,[km]$$

지락사고에 의한 고장은 1번과 2번 보호선용접속선 사이에서 발생한 것을 확인할 수 있었으며 계산에 의해 고장점을 추정한 결과 첫 번째 보호선용접속선에서 49m 떨어진 지점에서의 고장이 이었음을 알 수 있었다. 그리고 변전소와는 0.8490km 떨어진 지점이라는 것을 증명하였다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# V. 결 론

친환경성을 갖는 교통수단인 전기철도는 단락이나 지락 등의 사고에 의한 전기 공급이 중단되면 급전시스템의 복구가 완료 될 때까지의 이용이 불가하다. 여객과 물류 수송의 차질을 초래하기 때문에 전기철도의 안정성과 신뢰성 확보를 위한 노력을 필수적인 요소이다. 일반 전력계통과는 차별성을 갖는 전기 철도의 경우에는 고장 발생시 고장점 표정지점과 실제 발생한 사고지점의 오차를 줄여 정확하고 신속하게 표정을 하는 것이 매우 중요한 요소이다.

현재 국내의 철도 대부분은 흡상전류비 방식을 채택하여 표정장치를 활용하고 있으나 전차선로 말단에 단권변압기가 설치되지 않은 구간이나 삼각선 구간 등에 대해서는 고장지점을 정상적으로 표정하지 못하는 오차가 발생한다는 문제점이 있는 현실이다. 급전시스템에서 고장이 발생한 경우 오차를 최소화하고 정확한 고장점 표정을 위한 알고리즘과 고장해석에 대한 연구는 지속되어야 한다.

본 연구의 목적은 전기철도의 안정도 향상을 위해 고장점 표정에 관한 성능 개선이다. 이를 위해 전차선로의 고장해석을 위한 알고리즘을 설계하였고 다양한 접근을 통한 시뮬레이션으로 급전시스템에서 발생하는 급전선과 전차선 지락고장에 대한 정확한 고장점 표정을 할 수 있도록 하였다. 고장점 표정에 대한 신뢰성을 향상시키기 위한 수차례의 시뮬레이션 결과 최소의 오차범위를 갖는 고장지점을 표정할 수 있었다. 최종적으로 보호선용접속선의 전류비로 고장점 표정이 가능함을 분석을 통해 증명하였다.

이와 같이 고장점표정장치의 표정오차를 최소화 하여 전기철도의 각종 사고에 대한 고장지점을 정확하게 파악하는 기술을 통해 사고 복구 및 유지보수 시간을 단축하여 전기철도의 안정도 향상에 기여할 것으로 사료된다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# <참 고 문 헌>

[1] 이한민, “선로정수 예측을 위한 전차선로 등가회로 모델에 관한 연구”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.613-619, 2000.

[2] 이춘배, “전차선로 임피던스 계산에 관한 연구”, 한국철도학회 추계학술대회 논문집, pp.105-110, 2004.

[3] 철도청 홍보담당관실, “철도주요연표”, 한국철도, 2002.

[4] 한국철도공사, “코레일 경영통계”, 2015. 8. 31.

[5] 장민주, “교류전기철도에서의 고장점 표정방식 성능개선에 관한 연구”, 우송대학교 대학원 논문, 2016.

[6] 창상훈, “전기철도 교류급전 시스템의 회로 모델링 및 해석기법 연구”, 한국철도학회 논문, 2000.

[7] 이춘배, “전기철도에서 급전회로의 Line Impedance 계산에 관한 연구”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.82-88, 2004.

[8] 김성렬, “전기철도 고장점 표정오차 저감에 관한 연구”, 조선대학교 산업기술융합대학원 논문, 2015.

[9] Yaw-Juen Wang and Shi-Jie LIU, “A Review of Method for Calculation of Frequency-dependant Impedance of Overhead Power Transmission Lines”, Proc. Nal. Conc. ROC(A) Vol.25, No.6, pp.329-338, 2001

[10] Chihju Chou, “Distribution of Earth Leakage Currents in Railway System with Drain Auto-Transformers”, IEEE Trans.on Power Delivery, Vol. 16, pp.271-275, 2001.

[11] 강경표, “전기철도의 선로임피던스 계산법 방법에 관한 연구”, 서울산업대 철도기술대학원 논문, 2006.서재범, “AT 철도 급전계통에서의 고장점 표정 알고리즘”, 명지대학교 대학원 논문, 2000.

[12] 강경표, “전기철도의 선로임피던스 계산법 방법에 관한 연구”, 서울산업대 철도기술대학원 논문, 2006.

[13] 김정철, “급전계통 해석과 한국철도전기의 이해”, 도서출판 기다리, 2008.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

[14] 김정철, “전력계통 구성과 IEC에 의한 해석”, 도서출판 기다리, 2011.

[15] 창상훈, 김주락, 홍재승, “전기철도 교류급전 시스템의 회로 모델링 및 해석기법 연구”, 한국철도학회 논문지, Vol.3, No.4, pp.219-228, 2000.

[16] 창상훈, “철도전력공급 안정화 연구 : 첨단제어 및 전력공급 최적화 연구”, 한국철도기술연구원, 2001.

[17] 김태수, “전기철도 급전계통의 순간전압 강하 보상장치 적용에 관한 연구”, 숭실대 대학원 논문, 2003.

[18] 이장무, “탭 절환 단권변압기를 이용한 교류전기철도 전압강하보상 및 고장점 표정에 관한 연구”, 고려대학교 대학원 논문, 2013.

[19] 서재범, “AT 철도 급전계통에서의 고장점 표정 알고리즘”, 명지대학교 대학원 논문, 2000.장민주, “교류전기철도에서의 고장점 표정방식 성능개선에 관한 연구”, 우송대학교 대학원 논문, 2016.

[20] 안종삼, “전기철도 리액턴스 방식의 고장점 표정장치 신뢰성 향상에 관한 연구”, 조선대학교 대학원 논문, 2017.

[21] 고희동, “전기철도 고장점 표정장치 성능향상을 위한 강제지락 시험에 대한 연구”, 한양대학교 대학원 논문, 2012.

[22] 홍상기, “정방향 임피던스와 역방향 임피던스를 이용한 고장점 표정장치에 관한연구”, 우송대학교 철도대학원 논문, 2014.

[23] J.Allan, C.A. Brebbia, “Railway Technology and Environment”, Computation Mechanics Publications, pp.139-187, 1996.

[24] Daehwan Kim, “A Study on the Impedance Calculation by Using Equivalent Model in Catenary System”, in Proceedings of the Autumn Conference for Railway, The Korean Society for Railway, pp.1190-1200, 2009.

Collection @ chosun