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]I804:24011-200000266136

2017년2월 碩士學位論文 전기철도 리액턴스 방식의 고장점표정장치 신뢰성 향상에 관한 연구 안 종 삼

2017年 2月
碩士學位論文

# 전기철도 리액턴스 방식의 고장점 표정장치 신뢰성 향상에 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

安 種 三

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 전기철도 리액턴스 방식의 고장점 표정장치 신뢰성 향상에 관한 연구

# A Study on the Reliability Improvement of Fault Locator using Reactance Method for Electric Railway

2017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

安 種 三

Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 전기철도 리액턴스 방식의 고장점 표정장치 신뢰성 향상에 관한 연구

指導敎授 金 南 勳

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2016年 11月

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

安 種 三

dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 安種三의 碩士學位論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 敎授 崔 孝 祥 印

委 員 朝鮮大學校 敎授 朴 彩 玉 印

委 員 朝鮮大學校 敎授 金 南 勳 印

2016年 11月

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

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. AT 급전방식 ---------- 5
3. BT 급전방식 ---------- 6
B. 고장점 표정장치 ---------- 7
1. 리액턴스 방식 ---------- 9
2. 흡상전류비 방식 ---------- 12
3. 고장점 표정장치 운영 ---------- 18
4. 고장점 표정장치 성능향상 대책 ---------- 20
Ⅲ. 실 험 ---------- 21
A. 지락사고에 의한 고장점 시뮬레이션 ---------- 21
B. 리액턴스 방식의 고장점 표정 시뮬레이션 ---------- 22
Ⅳ. 결과 및 검토 ---------- 23
A. 지락사고에 의한 고장점 표정 ---------- 23
B. 리액턴스 방식의 고장점 표정 ---------- 27
Ⅴ. 결 론 ---------- 29
【참 고 문 헌】 ---------- 30



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 표목차

표 1. 고장점 표정방식의 비교 ---------- 18
표 2. 변전소 표방식별 설치현황
표 3. M상 상행 1.0km 지점의 전차선 지락고장 시뮬레이션 결과 ---------- 23
표 4. 고장리액턴스 변화에 의한 고장전류 및 보호선용접속선 전류 변화 ---------- 27



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 도목차

그림 1. KTX 전력급전시스템의 구성 ---- 3
그림 2. 직접 급전회로 원형 ---- 4
그림 3. 귀선이 있는 직접 급전회로 ---- 4
그림 4. AT 급전방식의 구성도 ---- 5
그림 5. BT 급전방식의 구성도 ---- 6
그림 6. 급전제어시스템 구성도 ---- 7
그림 7. 리액턴스 방식의 고장점 등가회로 ---- 9
그림 8. BT 급전방식의 거리-리액턴스 관계 ---- 9
그림 9. AT 급전방식의 거리-리액턴스 관계 ---- 11
그림 10. AT 급전계통의 구성회로 ---- 12
그림 11. AT급전회로의 등가회로 ---- 13
그림 12. AT 급전선로의 거리-흡상전류비 관계 ---- 14
그림 13. 지락사고시 AT2와 AT3 사이의 전류 분포 ---- 15
그림 14. 전차선로 말단의 AT가 없는 구간 ---- 16
그림 15. 삼각선이 있는 구간의 계통도 ---- 16
그림 16. 지락사고에 의한 시뮬레이션 설계 ---- 21
그림 17. 리액턴스 방식을 위한 시뮬레이션 설계 ---- 22
그림 18. M상 상하행 SS-SSP 시뮬레이션 파형 ---- 24
그림 19. M상 상하행 SP-SSP 시뮬레이션 파형 ---- 25
그림 20. 4.6km 지점의 고장리액턴스에 의한 시뮬레이션 파형 ---- 28



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# ABSTRACT

## A Study on the Reliability Improvement of Fault Locator using Reactance Method for Electric Railway

Ahn Jong-Sam
Advisor : Prof. Nam-Hoon Kim, Ph.D.
Electrical Engineering Technology Convergence
Industrial Technology Convergence
Graduate School of Chosun University

The world considers electric railways as a way to overcome environmental pollution problems and road traffic limitations in road traffic. Korea has implemented a system to invest 2% of GDP in low carbon green growth every year for the adoption of the carbon trading system specified in the Kyoto Protocol in 2010.

If a fault such as a short circuit or a ground fault occurs on an electric railway, the power supply can not be completed until the completion of the recovery, and it is inconvenient for customers because it is difficult to use the train. In addition, it is essential to maintain and maintain stability and reliability to minimize failure times, because of the wide distribution of electric railways.

In the high-speed railway feed system, a new reactance method is developed and utilized so that nonlinear reactance can be inputted. The reactance value of the tram line is measured and input separately. If a fault occurs, the reactance value is calculated only up to the fault point. The



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

reactance value is firstly compared with the input reactance value, and the distance is converted.

In this paper, to improve the reliability of the fault locator using the reactance method, a simulation using the fault locator and the reactance method based on the ground fault was performed. The result proves that even if the reactance changes, the current ratio of the contact protection wire enables a high strength representation. It is considered that the reliability of the electric railway can be improved through the reactance type fault locator.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# Ⅰ. 서 론

세계 각국은 도로 교통에서 발생하는 환경 공해 문제 및 도로 교통의 한계를 극복하기 위한 방안으로 전기철도를 꼽고 있으며 우리나라는 2010년대에 들어 교토 의정서에 명시된 탄소 배출권 거래 제도의 수용에 관하여 매년 GDP의 2%를 저탄소 녹색성장에 투자하는 제도를 시행하고 있다. 2014년에는 국가 온실가스 감축 목표를 위한 방안을 제시하고 온실가스를 줄이기 위한 제도적 기반을 확충하고 있는 상황이다. 현재 철도분야는 각 노선별 최고 속도를 적용한 고속화 방안 및 광역철도, 도시철도 등의 확대를 통해 저탄소 녹색성장의 인프라를 확장하고 있다[1,2].

전기철도의 경우 안전성, 신속성, 수송력이 높은 운송 수단으로 환경 친화적이면서 이용 효율특성이 뛰어나 국가 경제의 한 축을 담당하고 있다. 전기 철도의 영업거리가 증가하면서 고장 조치 및 운행지연에 따른 요구가 상승하여 철도 시스템의 신속한 고장 복구 및 사전 유지보수에 대한 민첩성 향상이 필요한 실정이다[3]. 전기철도의 시스템에 의한 고장은 광범위한 영역에 영향을 미치며, 인적 또는 물적 요인에 의한 고장을 완전히 배제할 수 없다는 치명적인 단점을 지니고 있어 고장 예방 및 조치에 대한 연구가 점진적으로 진행되어야 한다.

전기철도에서 단락이나 지락 등의 고장이 발생하면 급전이 복구 완료 시점까지 불가능하고, 열차이용이 어려워 고객들에게 불편함을 초래하게 된다. 뿐만 아니라 전기철도는 분포가 광범위하기 때문에 고장시간을 최소화할 수 있도록 안정성과 신뢰성을 확보하고 유지하도록 관리하는 것이 필수적이다[4].

고장점 표정장치는 전기철도에서 고장이 발생하게 되면 고장점 표정지점과 실제 발생한 사고지점을 정확하고 확인할 수 있는 시스템이다. 그러므로 고장점 표정장치에서 표정한 지점과 실제로 발생한 현장의 사고지점과의 오차를 줄여주는 것은 사고 복구시간과 유지보수 시간을 단축하는데 매우 중요한 요소이다. 현재 국내의 전기철도는 리액턴스 방식과 흡상전류비 방식의 고장점 표정장치를 사용하고 있으며 AT 급전방식인 일반철도에는 대부분 흡상전류비 방식이 사용되고 있다. 리액턴스 방식은 변전소에서 급전회로의 전류, 전압, 위상을 측정하여 고장지점까지의 임피던스를 계산에 의해 고



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

장거리를 환산하는 방식이다. 흡상전류비 방식의 경우는 단권변압기가 설치된 변전소, 급전구분소, 보조급전구분소 사이의 급전회로에서 고장 발생시, 단권변압기의 중성점을 통해 흡상한 고장전류를 측정하고 이를 비교하여 고장전류와의 거리를 반비례하게 계산하여 거리는 환산하는 방식이다[5-7].

고속철도 급전시스템에서는 현재 비선형적인 리액턴스도 입력이 가능하도록 새로운 리액턴스 방식을 개발하여 활용하고 있으며, 전차 선로의 리액턴스 값을 측정하여 개별적으로 입력하고 고장이 발생한 경우에는 고장지점까지만 리액턴스 값을 계산하고 사전의 입력된 리액턴스 값과 비교하여 거리를 환산하는 방식으로 사용되고 있다.

본 논문에서는 리액턴스 방식의 고장점 표정장치를 활용한 신뢰성 향상에 초점을 두고 연구하였으며, 고장점 표정에 있어 사각지대를 및 표정 오차를 줄여 성능을 개선할 수 있도록 다양한 고장에 대한 시뮬레이션을 진행 및 분석하였다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# Ⅱ. 이론적 고찰

## A. 전기철도 급전시스템

전기철도의 급전방식은 공급되는 전력에 따라 직류와 교류로 나뉘며 대부분의 지하철 구간에서는 직류급전방식을 사용하고 있다. 전압은 1,500[V]로 낮기 때문에 전차선로의 절연계급을 낮추고 통신 유도장해로부터 자유롭다는 장점을 가진다. 하지만 교류 급전방식에 비해 전차선로의 전류가 크고 선로의 전압강하가 커질 수 있다는 단점을 가지고 있어 전철을 위한 변전소는 4~10Km 간격을 두고 설치된다.

그림 1. KTX 전력급전시스템의 구성

교류 급전방식은 직접 급전방식, AT(Auto Transformer) 급전방식, BT(Booster Transformer) 급전방식으로 분류되며, 상용주파수 3상 전원을 변전소로부터 수전하여 스콧결선 변압기에 의해 단상으로 변환하여 전차선로에 공급한다. 교류 급전방식은 전압이 직류 급전방식에 비해 높기 때문에 중장거리 수송에 장점이 있고, 전철용 변전소의 간격이 직류 급전방식에 비해 길게 책정이 가능하다[6].



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 1. 직접 급전방식

직접 급전방식은 그림 2와 같이 레일과 전차선으로만 구성이 되며 세계적으로 가장 실용화된 방식이다. 하지만 현재 우리나라에서는 짧은 측선이나 차량기지에서만 활용이 되고 있다. 구조가 간단하고 설치가 쉽기 때문에 설치비용이 적고, 다른 방식들에 비해 임피던스가 작아 전철용 변전소의 간격을 길게 잡을 수 있다는 장점을 지니는 방식이다. 열차를 통해서 변전소로 귀로하는 전류가 레일에 흐르기 때문에 통신선의 유도장해가 존재하며 다른 방식들에 비해 레일 위의 전위가 크다는 단점이 있다.

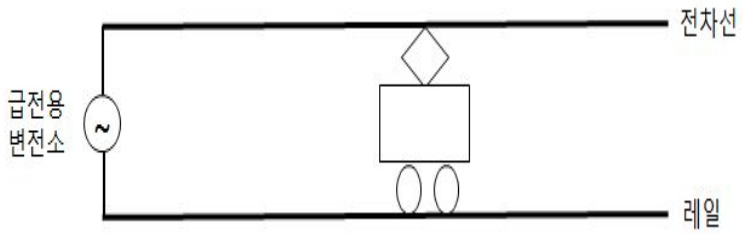


그림 2. 직접 급전회로 원형

그림 3과 같이 레일과 귀선을 병렬로 설치하여 사용하기도 하는데, 그 목적은 대지와 레일로 누설되는 전류의 일부를 귀선으로 분류하여 통신 유도장해를 줄이고, 급전회로의 임피던스를 20~30% 정도 경감을 할 수 있기 때문이다.

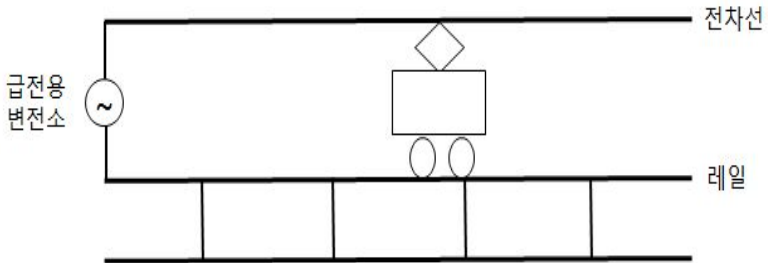


그림 3. 귀선이 있는 직접 급전회로



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 2. AT 급전방식

AT 급전방식은 전차선과 급전선 사이에 권수비가 1:1이거나 1:2인 단권변압기를 사용하여 권선의 중앙에 레일을 접속시키는 방식이다. 권수비가 1:1인 경우 전차선과 레일 사이의 전압은 레일과 급전선 사이의 전압과 같게 되고, 전차선과 레일 사이에 열차가 위치를 하게 되어 열차가 운행 시 흐르는 부하전류가 절반으로 감소하게 된다. 즉, AT 급전방식을 활용할 경우 변전소에서 공급하는 전압은 열차에 급전하는 전압의 2배가 되는 것이다. 그러므로 변전소간의 거리를 길게 하여야 BT 급전방식에 비해 급전전압이 커지며, 전차선로의 전압강하도 작아지게 한다[6].

국내의 일반 철도 및 고속철도, 수도권의 전철 등을 포함한 대부분이 AT 급전방식을 활용하고 있으며 전압 불균형이 적고, 안정된 전력 공급 및 통신선에 의한 유도 장애도 작다는 장점이 있다. 뿐만 아니라, 전철용 변전소의 수전전압이 한국전력에서 변전한 154kV이므로 전철용 변전소의 위치를 한전의 변전소 근처로 선정이 가능하게 되어 송전선로 설치비 및 유지보수 비용을 절감할 수 있다.

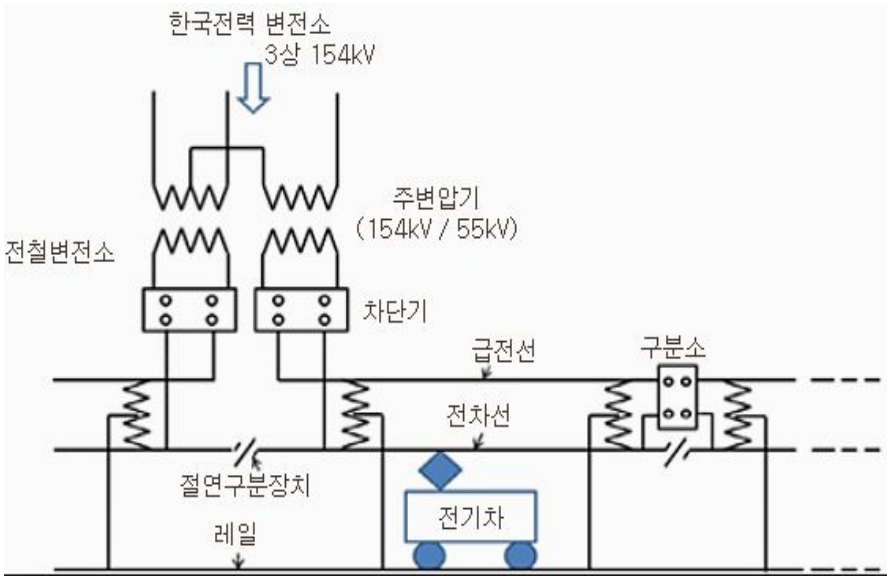


그림 4. AT 급전방식의 구성도



dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 3. BT 급전방식

BT 급전방식은 권선비 1 : 1인 특수변압기를 약 4㎞마다 설치한 다음 전차선에 부스트 섹션을 설치하고, BT의 1차측과 2차측을 전차선, 부급전선(NF : Negative Feeder)에 각각 직렬로 접속한다. 대지에 누설되는 전기차의 귀전류는 BT작용에 의해 강제적으로 부급전선에 흡상시켜 통신선로의 유도장해를 경감시킨다. BT의 2차측을 부급전선에 연결하므로 통신 유도장해의 경감이 큰 장점에 반해 부스터 섹션에서 차량의 팬터그래프에 의한 부하전류 개폐로 인한 아크 발생이 있고 열차가 고속화 될 경우 운전 및 유지보수가 어렵다는 문제점이 있다. 현재 우리나라에서 BT 급전방식으로 운영되었던 시설물들은 주로 AT 급전방식으로 교체 및 개량되고 있는 실정이다.

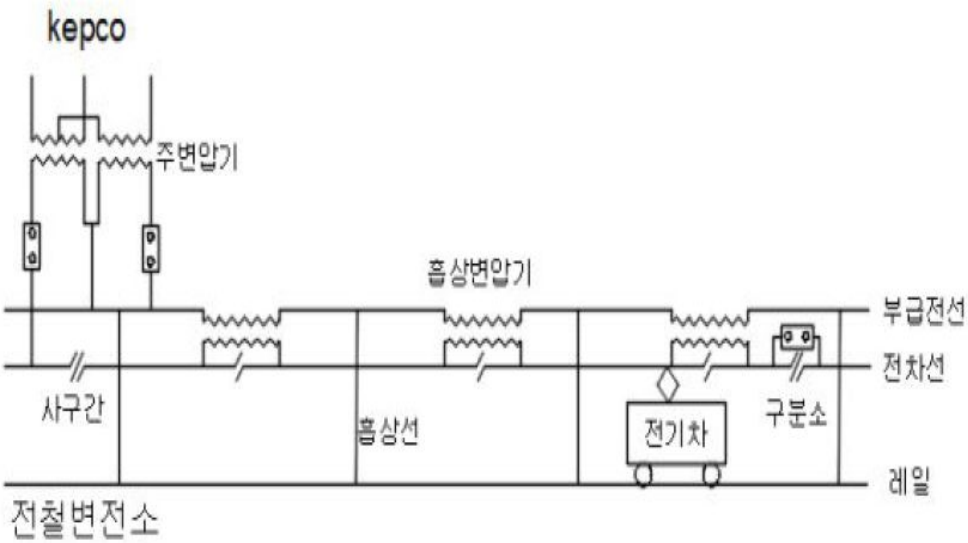


그림 5. BT 급전방식의 구성도



dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## B. 고장점 표정장치

고장점 표정장치는 전기철도의 고장지점을 고장전류 및 전압 등의 데이터를 연산하여 표정해주는 장치로서 전기철도의 급전회로에서 고장이 발생하였을 경우 정확한 고장지점을 표정하여 신속한 복구 및 사고해소를 목적으로 설치된다. 전기철도의 외선장애의 주요 발생요인은 이물질의 접촉이나 차량진입, 감전사고등 다양하게 존재한다. 이러한 외선 설비에 의한 단락 및 지락 사고가 발생하였을 경우 고장점 표정장치는 계전기를 포함한 보호 장치가 사고를 검출하고 차단기가 동작하기 이전의 고장전류 및 전류의 데이터를 연산하여 고장점을 표정하는 시스템으로 고장 위치를 찾기 위한 시간과 노력을 단축하여 열차 운행의 지연시간을 단축시킬 수 있다[8-10].

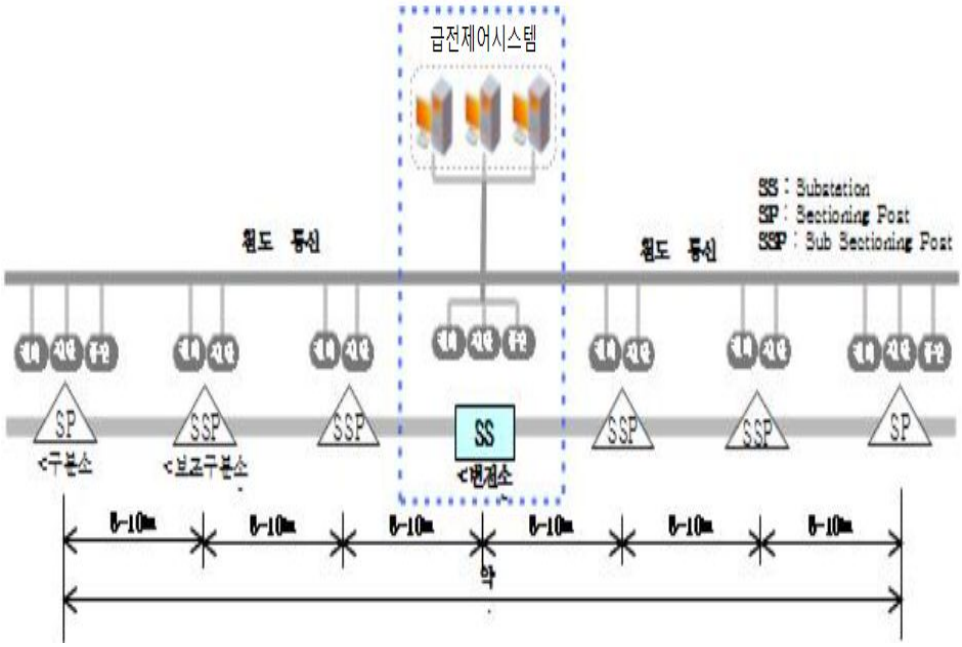


그림 6. 급전제어시스템 구성도



dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

고장점 표정장치는 전기 차량 및 전기 철도설비에 전력을 공급하기 위한 구외로부터 전송된 전기를 구내의 시설에 의해 변성하는 장소인 전철변전소(SS)에 주장치가 설치되고 급전구분소(SP), 보조급전구분소(SSP), 단말보조급전구분소(ATP)에 각각의 보조장치(SU)들이 설치되어 구성된다. 이때 급전구분소는 각 전철변전소간 전기를 구분하거나 연장급전을 위한 개폐장치 등을 설치한 장소이다[10]. 보조급전구분소는 작업 또는 고장이나 사고시에 정전구간을 한정하거나 연장급전을 위한 개폐기를 설치한 장소이다. 마지막으로 단말보조급전구분소를 전차선로의 말단에 가공전차선의 전압강하 보상과 유도장해의 경감을 위한 단권변압기를 설치한 장소이다. 그림 6은 급전제어시스템의 구성도이다[9-10].

고장점 표정장치의 종류는 운용되는 외선설비에 따라서 고압 배전선로용과 교류 급전회로용으로 구분된다. 교류 급전회로용 고장점 표정장치 방식 중 현재 국내에서 적용중인 리액턴스 방식과 흡상전류비 방식에 대하여 비교하였다.



dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 1. 리액턴스 방식

리액턴스 방식은 급전회로에서 리액턴스가 거리에 비례한 표정원리를 활용한 것으로 급전회로의 전류 및 전압을 취하여 사고시 먼저 입력한 보호구간의 임피던스 값과 비교하여 고장점을 표시하는 방식이며 등가회로는 그림 7과 같다.

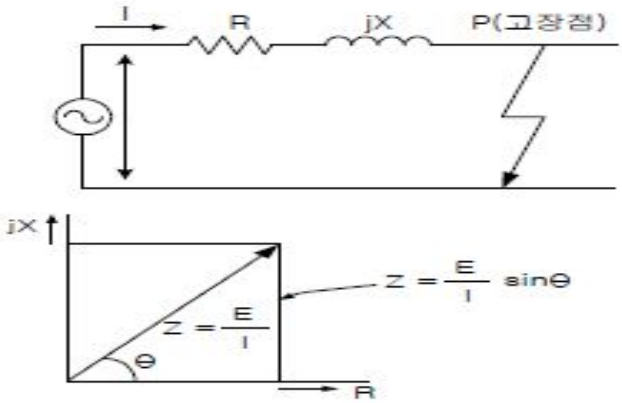


그림 7. 리액턴스 방식의 고장점 등가회로

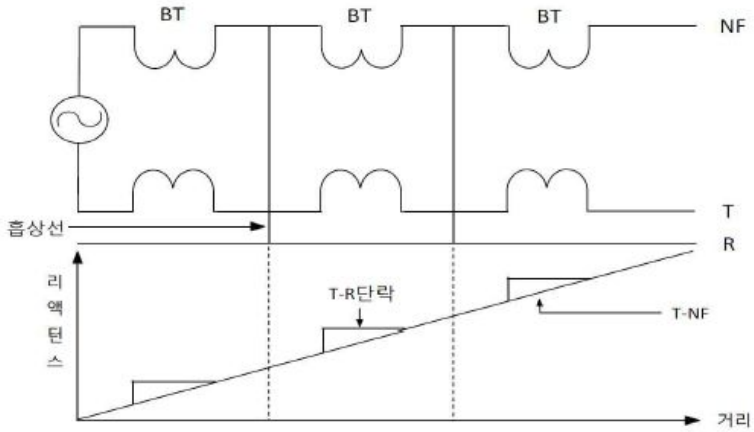


그림 8. BT 급전방식의 거리-리액턴스 관계



dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

이 고장점 표정방식은 주로 BT 급전선로에서 적용되는데 이는 그림 8과 같이 약 4km마다 전차선에 구분 장치를 만들고, 이와 병렬로 흡상변압기를 설치하여 레일에 흐르는 전류를 부급전선으로 흡상하는 구조로 되어 있다. BT 급전회로의 리액턴스는 T-NF 단락과 T-R단락으로 구분되며 이들의 단락 리액턴스는 각각 계단 모양과 직선으로 나타난다. BT 급전방식의 특징은 그림 8과 같이 흡상선과의 상대 위치 그리고 전기차와 BT 섹션에 따라 NF와 레일에 흐르는 전류의 방향이 변하는 것이다. 이로 인해 회로 임피던스는 계단 모양으로 되지만 BT 임피던스의 길이가 길면 T-NF 단락 리액턴스는 직선으로 간주된다[11-12].

교류 급전회로에 단락이나 지락에 의해 고장이 발생하게 되면 보호기계류가 동작을 하게 되며 회로가 차단된다. 차단기가 개방되기 전까지 변전소와 고장지점까지의 리액턴스는 다음 식 (1)과 같이 고장시의 전류와 전압을 이용하여 구한다[13].

$$X = \frac{E}{I} sin\theta \tag{1}$$

이때, X : 변전소로부터 고장지점까지의 리액턴스 거리

E : 고장 발생 시의 전압

I : 고장 발생 시의 전류

sinΘ : 전압과 전류의 위상각

계산에 의해 구해진 리액턴스 값은 거리와 리액턴스의 관계에 의해 고장지점을 찾아내며 실제 리액턴스 값과 계측에 의한 값의 관계는 식 2와 같이 나타낸다.

$$X = \frac{E}{I} sin\theta = \frac{PT비}{CT비} \cdot \frac{E_2}{I_2} sin\theta \tag{2}$$



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

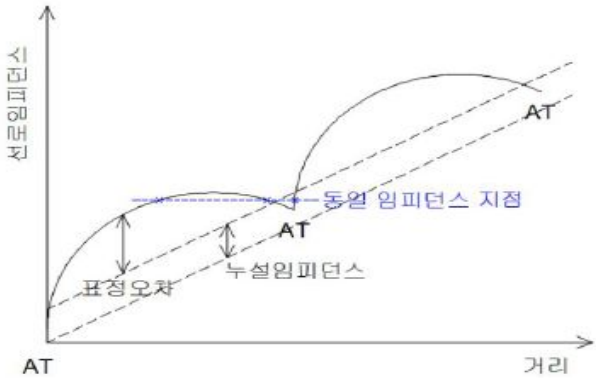


그림 9. AT 급전방식의 거리-리액턴스 관계

이와 같은 리액턴스 표정방식을 AT 급전회로에 적용하면 AT 급전방식의 전차선로는 거리에 비례하지 않으며 포물선을 그리게 된다. 따라서 정확한 고장지점을 표정할 수 없어 부하의 변동에 의한 영향을 받게 된다. 우리나라의 AT 급전방식 도입 초기에는 철도가 단선이거나 단순한 복선이라고 판단을 하였고 BT 급전회로와 같은 직선형태의 리액턴스라고 판단을 하였다. 하지만 복선, 2복선, 3복선 전철화 등 계속된 시설의 개발 및 확충에 의해 급전계통 구성이 복잡해지면서 고장지점과 임피던스의 거리에 비례하지 않고 고장지점에 대한 오차가 커지면서 현재는 극소수의 경우만 활용이 되고 있는 실정이다[8,13].



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 2. 흡상전류비 방식

흡상전류비 방식은 AT급전회로에서 전철변전소와 보조급전구분소 또는 보조급전구분소와 보조급전구분소, 보조급전구분소와 급전구분소 등의 상호 급전구간에서의 사고 발생시 사고지점의 전력을 공급하는 양쪽의 AT에 흘러 들어가는 흡상전류를 비율로 환산하여 표정하는 방식이다. 국내의 경우 일본과 유사하게 스콧결선 변압기를 주 변압기로 활용하기 때문에 전철변전소 구내에 단권변압기를 설치하여 사용하고 있다. 그림 10과 같이 AT의 1차측과 2차측의 권선비를 2:1로 제어하면 변전소의 급전전압은 전차선에 비해 2배 높은 전압이 된다. 이때 부하 용량이 일정하다면 급전전류의 경우 부하전류의 1/2이 되기 때문에 급전선로의 전압강하율은 전차선 전압 강하율의 1/4가 된다. 즉 급전선로의 전압강하율이 작기 때문에 변전소 간의 간격을 길게 가져갈 수 있으며 대전력 공급에 용이하게 된다[14-16].

부하전류가 부하의 좌우 AT 중성점에 흡상되면 레일에 흐르는 전류는 레일의 양쪽 방향으로 분산되어 반대 방향으로 흐른다. 이로 인해 병행 통신선로에 대한 유도를 상쇄하므로 레일에 흐르는 전류 역시 감소하게 된다. 이는 대지로 누설되는 전류가 작게 만들어 통신 유도장해의 경감 효과를 크게 한다.

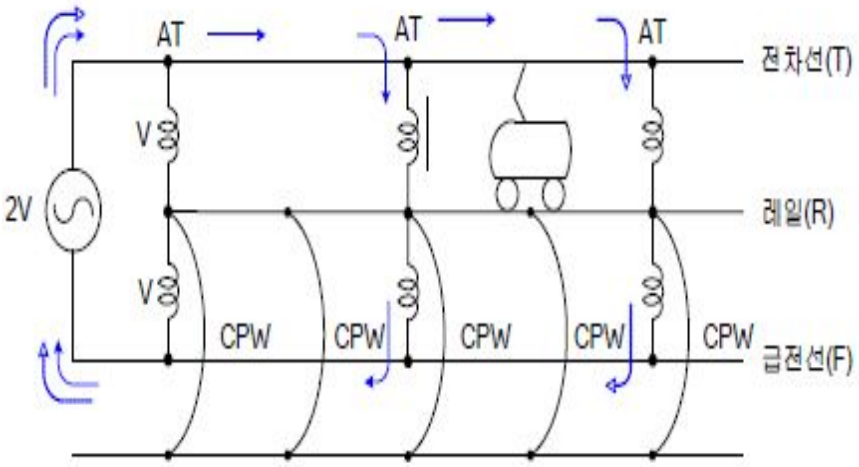


그림 10. AT 급전계통의 구성회로



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

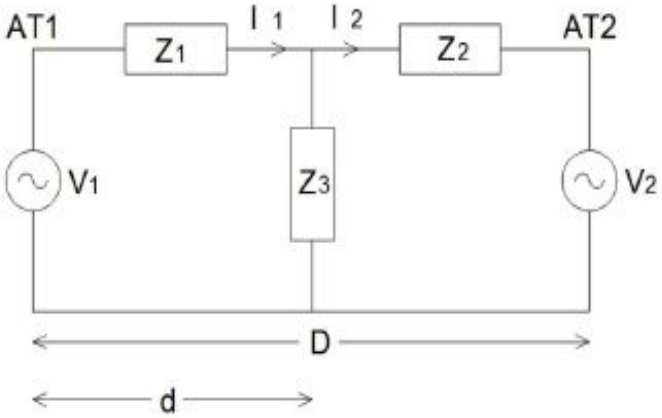


그림 11. AT급전회로의 등가회로

AT 급전선로의 고장 발생시 전류분포는 변전소에서 양측의 AT에 급전전압기준의 고장전류가 공급된다. 이때, AT에 의하여 전기자 전압기준의 전압으로 변환된 고장전류가 고정점에 흐르게 하며 등가회로는 그림 11과 같다. 이 등가회로를 간략히 하여 식으로 정리하면 아래 식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다[16].

$$H = \frac{I_{n+1}}{I_n + I_{n+1}} \times 100 = Q_1 + (100 - Q_1 - Q_2) \times \frac{d}{D} \qquad (3)$$

$$d = \frac{D}{(100 - Q_1 - Q_2)} \times \left(\frac{100 I_{n+1}}{I_n + I_{n+1}} - Q_1\right) + L_n \qquad (4)$$

이때, Q1 : ATn측의 보정계수, Q2 : ATn+1측의 보정계수

In : n 지점의 AT중성점 전류의 합

In+1 : n+1 지점의 AT 중성점 전류의 합

d : 기점에서 고장점의 거리, D : ATn과 ATn+1간의 거리

Ln : 기점에서 ATn 까지의 거리[Km]



dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

식 (3)과 (4)에 의한 거리와 흡상전류비의 관계는 그림 12와 같고 연장급전 시에는 변전소의 방향이 변하게 되더라도 표정식을 변경하지 않아도 된다. 이때 표정 오차는 ±1Km 이내가 된다.

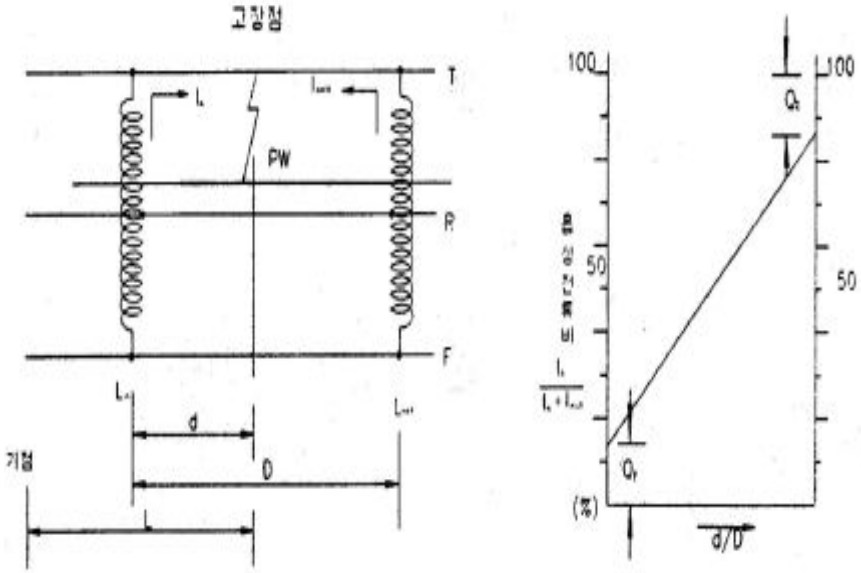


그림 12. AT 급전선로의 거리-흡상전류비 관계

흡상전류비 방식의 표정 알고리즘은 AT 급전 계통해서 각 AT 사이에 지락이 발생하게 되면 고장에 의해 형성된 페루프를 기준으로 키르히호프의 전압법칙을 활용한 루프 방정식을 세운다. 그리고 1:1의 변압비를 갖는 단권변압기의 경우 1차측과 2차측의 전압이 같으므로 고장거리 m에 대하여 식을 정리하면 식 5와 같다.

$$m = \frac{(\frac{1}{2}Z_c + 2Z_R + \frac{1}{2}Z_F - 2Z_{CR} + Z_{CF} - 2Z_{RF})(I_b) - Z_{AT}(2I_2 - 2I_3)}{(Z_c + 2Z_R - 3Z_{CR} + Z_{CF})(I_a + I_b)} \quad (5)$$



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

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

ZC : Catenary 자기 임피던스

$Z_R$ : 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

Ia : AT2 유입전류 , Ib : AT3 유입전류

실제 고장 상황에서 급전구간의 AT 양쪽에 인가되는 전압은 위상이 동일하지 않고, 고장전류는 타 구간의 AT에 흡상되어 계산 및 측정된다. 따라서 고장전류의 분포를 고려한 폐회로 방정식이 성립하게 된다[17]. 그림 13은 AT2와 AT3 구간 사이에서 지락사고가 발생하였을 경우의 전류 분포를 나타내며 각각의 AT는 독립된 전압으로 표현하였다. 각각의 AT 구간 사이의 발생한 고장점에 대한 표정 역시도 식 5와 같은 계산에 의하여 찾을 수 있으며 표정 알고리즘을 적용할 경우에는 다음과 같은 사항들을 고려하여야 한다.

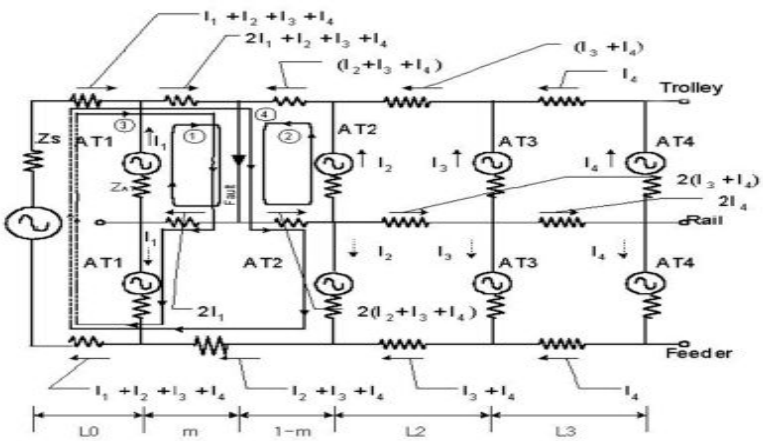


그림 13. 지락사고시 AT2와 AT3 사이의 전류 분포



dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

먼저, 정확한 상호 임피던스 값을 알고 있어야 하며 선로 리액턴스의 경우 전철변전소에서 급전구분소에 이르는 모든 구간에 대하여 일정한 값으로 표현해야 한다. 만약 구간별 선로 리액턴스가 일정하지 않을 경우 오차가 발생하게 된다. 마지막으로 전류값은 모두 벡터값이어야 하며 전류값은 고장으로 인한 유입전류만 표현하여야 한다 [18-20].

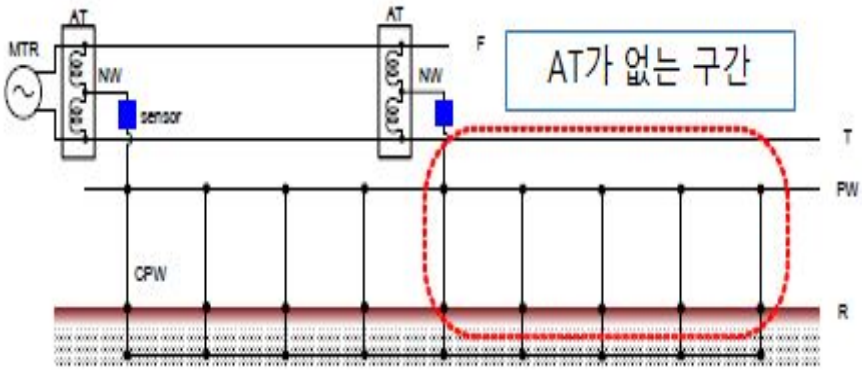


그림 14. 전차선로 말단의 AT가 없는 구간

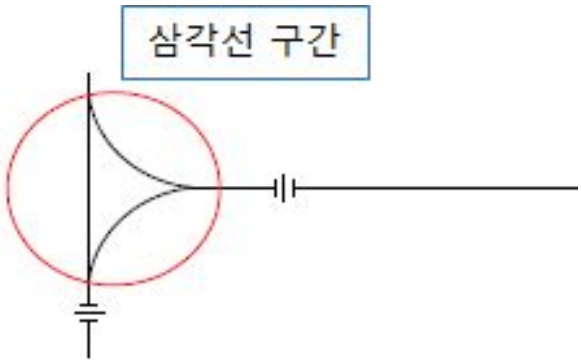


그림 15. 삼각선이 있는 구간의 계통도



dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

흡상전류비 방식의 가장 큰 문제점은 AT의 중성점으로 흡상되는 고장 전류를 비교하여 거리를 표정하기 때문에 AT가 없는 구간에서는 전혀 다른 지점을 표정하게 된다. 예를 들면 경부선을 비롯한 경인선, 경춘선 등의 전차선로 말단 혹은 구로, 문산 등과 같은 차량 기지에서는 그림 14와 같이 AT가 없기 때문에 고장지점이 아닌 전혀 다른 곳을 표정하게 된다. 뿐만 아니라, 용산이나 조치원 등과 같이 삼각선이 있는 구간에서는 전차선로가 연결이 되어 있어 서로 구분이 되지 않기 때문에 정확한 고장지점에 대한 표정이 어렵다[21].



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 3. 고장점 표정장치 운영

AT 급전방식의 전차선로는 리액턴스가 거리에 비례하지 않고 특성 곡선 또한 포물선으로 나타나기 때문에 BT 급전방식에 접합한 리액턴스를 설치했을 경우 고장 표정에 대한 오차가 큰 폭으로 발생하여 현재 일반철도에 적용이 되지 않고 있다. BT 급전방식은 전차선로의 리액턴스가 거리에 비례하며 특성 곡선이 직선과 같은 선형을 나타내므로 리액턴스 방식의 고장점 표정장치를 적용하는 것이 바람직하다[18-20]. 하지만 현재는 BT 급전방식이 적용되는 구간이 극소수 이며 이 역시도 곧 AT 급전 방식으로 개량이 될 것으로 예상된다. 앞 절에서 다루었던 리액턴스 방식과 흡상전류비 방식을 비교하여 정리하면 다음 표 1과 같다[19].

표 1. 고장점 표정방식의 비교

| 구분 | 리액턴스 방식 | 흡상전류비 방식 |
|---|---|---|
| 표정요소 | - 리액턴스 계산 | - AT 중성점 흡상전류 측정 |
| 표정원리 | - 전철변전소에서 고장시점의 전차선로 전압, 전류, 위상을 측정하여 리액턴스를 계산하고 고장점 표정 | - 급전계통에 설치된 AT의 중성점으로 흡상되는 고장전류를 측정 비교하여 고장점 표정 |
| 표정특징 | - BT 방식에 매우 적합하며 AT 방식의 일반철도에는 리액턴스가 비선형적이므로 오차로 인해 부적함<br><br>- 고장시 AT가 자동 분리되는 고속철도에 적합함 | - AT 방식의 일반철도 구간에 적합하지만 전차선로의 말단에 AT가 없을 경우 고장점 표정하지 못함<br><br>- 고장시 AT가 자동 분리되는 고속철도에 부적합 |
| 설치장소 | - 전철변전소 | - 전철변전소, 급전구분소, 급전보조구분소 등 AT 설치장소 |
| 설치운영 | - BT급전방식구간<br>- 고속철도구간 | -일반철도구간 |



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

다음 표 2는 한국철도공사의 전철변전소별 고장점 표정장치를 기준으로 한 표정방식별 설치현황을 나타낸 것이다.

표 2. AT 변전소 표정방식별 설치현황

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



dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## 4. 고장점 표정장치 성능향상 대책

고장점의 표정장치 성능을 향상시키기 위한 방식은 크게 시뮬레이션에 의한 방식과 실제 고장데이터를 이용하는 방식으로 분류된다. 시뮬레이션을 활용한 방법은 소프트웨어를 활용하는 방법으로 고장 발생 후 주기가 지난 안정된 파형을 모의하여 그 결과를 표정장치에 입력하는 방식이다. 현재 국내에서는 Matlab, EMTP, EMTDC 등의 소프트웨어를 사용 중이며, 이 중에서 철도계통의 고장 현상 모의를 위해 필요한 설비의 모델링이 가능한지 여부를 살피고 필요한 경우에는 모델개발도 함께 이루어지고 있다. 다음과 같은 방법에서 결과를 다시 표정장치에 입력하기 위해서는 보호계전기의 시험 등에 사용되는 전력발생장치가 필요하다. 이 방법은 모델의 수정이 용이하고, 시험을 반복적으로 수행할 수 있다는 장점이 있으며 모델의 정확도에 따라 결과가 달라 질수 있다는 단점을 갖는다[22].

다음은 실제 고장데이터를 이용하는 방법이다. 현재 활용되고 있는 대부분의 표정장치에는 고장기록이 포함되어 있고, 고장 데이터를 수집하여 playback 장치를 재생하여 표정장치에 입력할 수 있다. 이를 통해 표정장치의 표정결과를 보정하는 방식이다. 하지만 제작사에 따라 데이터를 기록하는 방식이나 형태가 다르고, 계측 요소도 다르기 때문에 실제 고장데이터 중에서 다른 제작사의 제품에 적용할 수 있도록 조정하거나 기록을 관리하는 작업이 필요하다[8,19]. 이 방식의 경우 별도의 모델링이 필요 없으며 실제 고장데이터를 여러 가지 형태의 고장으로 반복적 수행이 가능하다는 것이다. 하지만 고장데이터를 취득 및 관리하는데 많은 시간과 협조가 필요하다는 단점이 있다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# Ⅲ. 실 험

## A. 지락사고에 의한 고장점 표정 시뮬레이션

급전계통에서의 고장 형태는 일반적으로 전차선 지락고장의 경우가 많으며 전차선이 닿는 곳에 따라 고장 임피던스의 값이 달라진다. 본 논문에서는 전차선로의 고장해석을 시뮬레이션을 위해 급전시스템에서 발생하는 전차선 지락고장을 가정하여 진행하였다. 그림은 급전시스템에서 고장을 시뮬레이션 및 분석하기 위해 고장 전류가 흐르는 단권변압기의 중성점, 중성선, 보호선 등의 접속을 나타내고 있으며, 변전소를 중심으로 보조급전구분소와 급전구분소가 양방향으로 상호간격 10.5km로 설정하였다. 본 시뮬레이션을 위해 보호선용접속선은 1.0km 간격으로 나열하였으며 총 76개의 보호선용접속선 센서에 전류계가 포함되는 것으로 설정하였다.

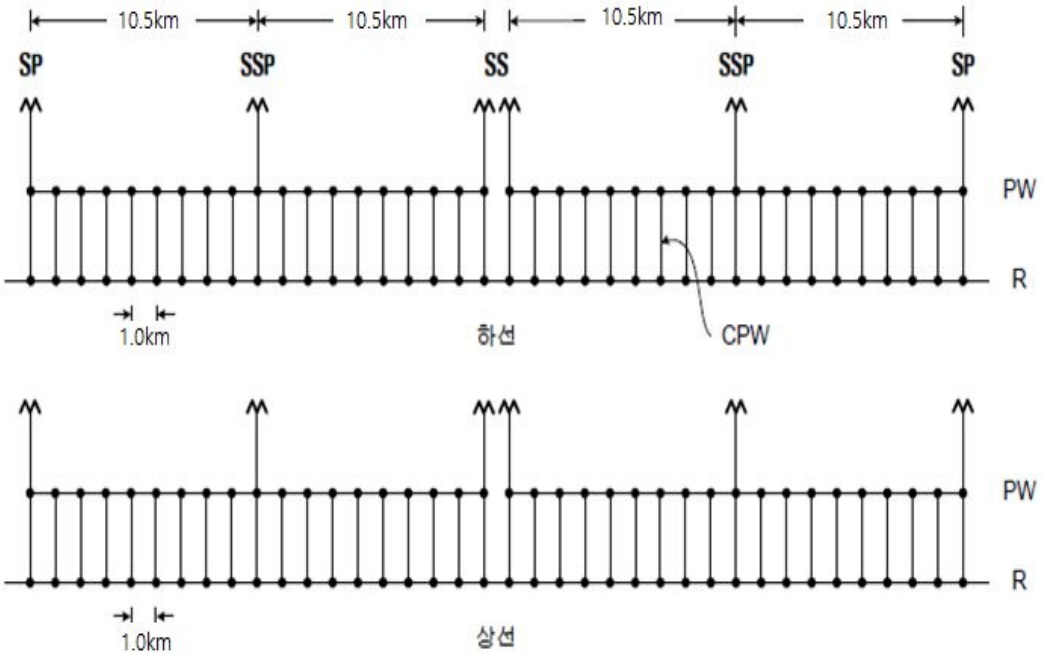


그림 16. 지락사고에 의한 시뮬레이션 설계



dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## B. 리액턴스 방식의 고장점 표정 시뮬레이션

본 연구에서는 리액턴스 방식에 따른 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.

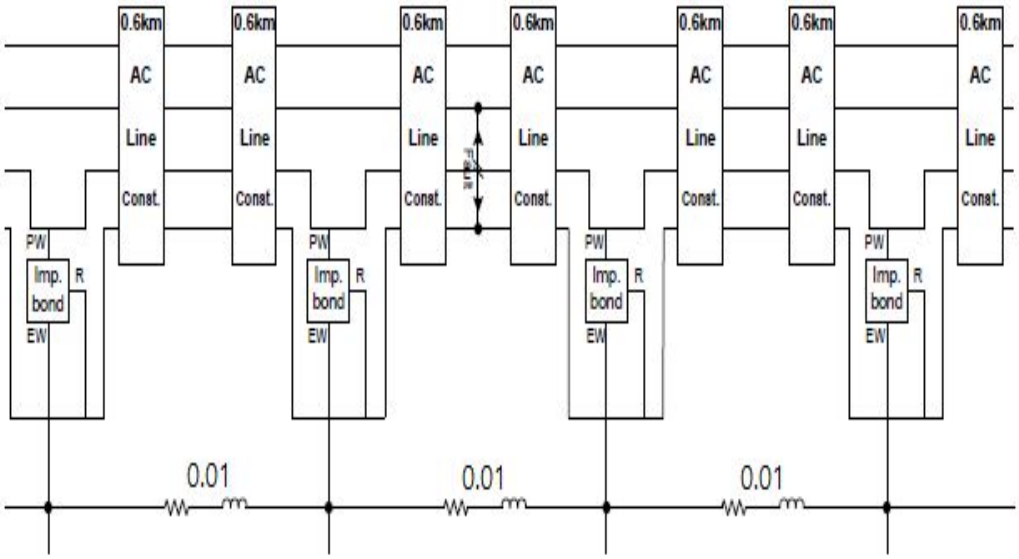


그림 17. 리액턴스 방식을 위한 시뮬레이션 설계



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# Ⅳ. 결과 및 검토

## A. 지락사고에 의한 고장점 표정

급전시스템에서 고장을 시뮬레이션 및 분석을 위해 M상 전원의 상행 1.0km 지점에서의 지락사고를 시뮬레이션 하였고 보호선용접속선의 전류값을 표 3에 나타내었다. 본 연구의 시뮬레이션 결과값을 통해 분석한 결과 고장구간 이외의 보호선용접속선의 전류에 대해서는 고려하지 않아도 된다는 것을 알 수 있었다.

표 3. M상 상행 1.0km 지점의 전차선 지락고장 시뮬레이션 결과

| M상 | 보호선용접속선 전류 [kA] | | M상 | 보호선용접속선 전류 [kA] | |
|---|---|---|---|---|---|
| 보호선용접속선 1 (SS-SSP) | 상행 | 3.242 | 보호선용접속선 1 (SP-SSP) | 상행 | 0.4813e-3 |
| | 하행 | 0.521 | | 하행 | 0.7125e-3 |
| 보호선용접속선 2 (SS-SSP) | 상행 | 0.322 | 보호선용접속선 2 (SP-SSP) | 상행 | 0.0038e-3 |
| | 하행 | 0.058 | | 하행 | 0.0071e-3 |
| 보호선용접속선 3 (SS-SSP) | 상행 | 0.001 | 보호선용접속선 3 (SP-SSP) | 상행 | 0.0652e-6 |
| | 하행 | 0.0534e-3 | | 하행 | 0.0810e-6 |
| 보호선용접속선 4 (SS-SSP) | 상행 | 0.0228e-3 | 보호선용접속선 4 (SP-SSP) | 상행 | 0.8710e-8 |
| | 하행 | 0.0182e-3 | | 하행 | 0.9427e-8 |
| 보호선용접속선 5 (SS-SSP) | 상행 | 0.2454e-5 | 보호선용접속선 5 (SP-SSP) | 상행 | 0.5871e-9 |
| | 하행 | 0.2046e-5 | | 하행 | 0.6128e-9 |
| 고장전류 | | | 4.134[kA] | | |



dCollection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

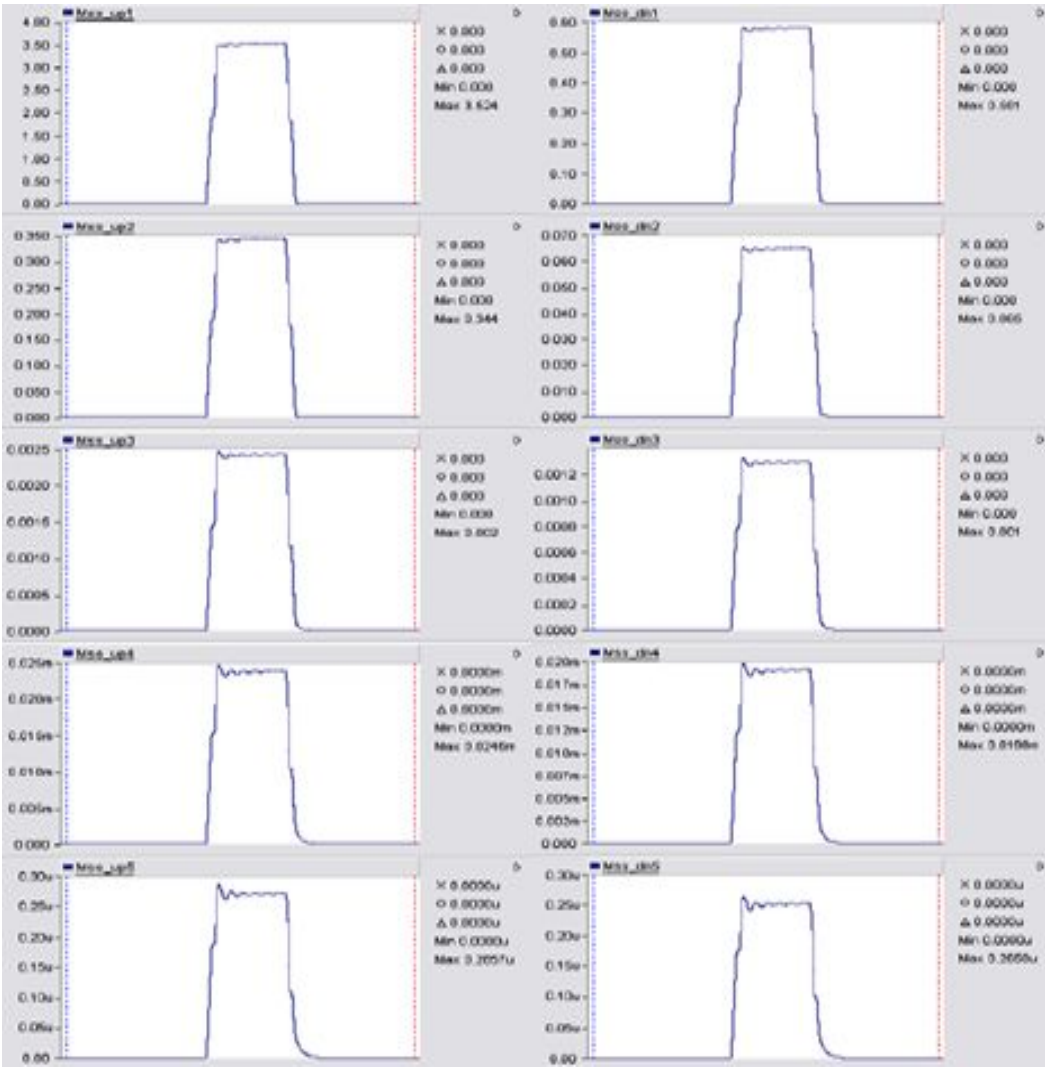

그림 18. M상 상하행 SS-SSP 시뮬레이션 파형



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

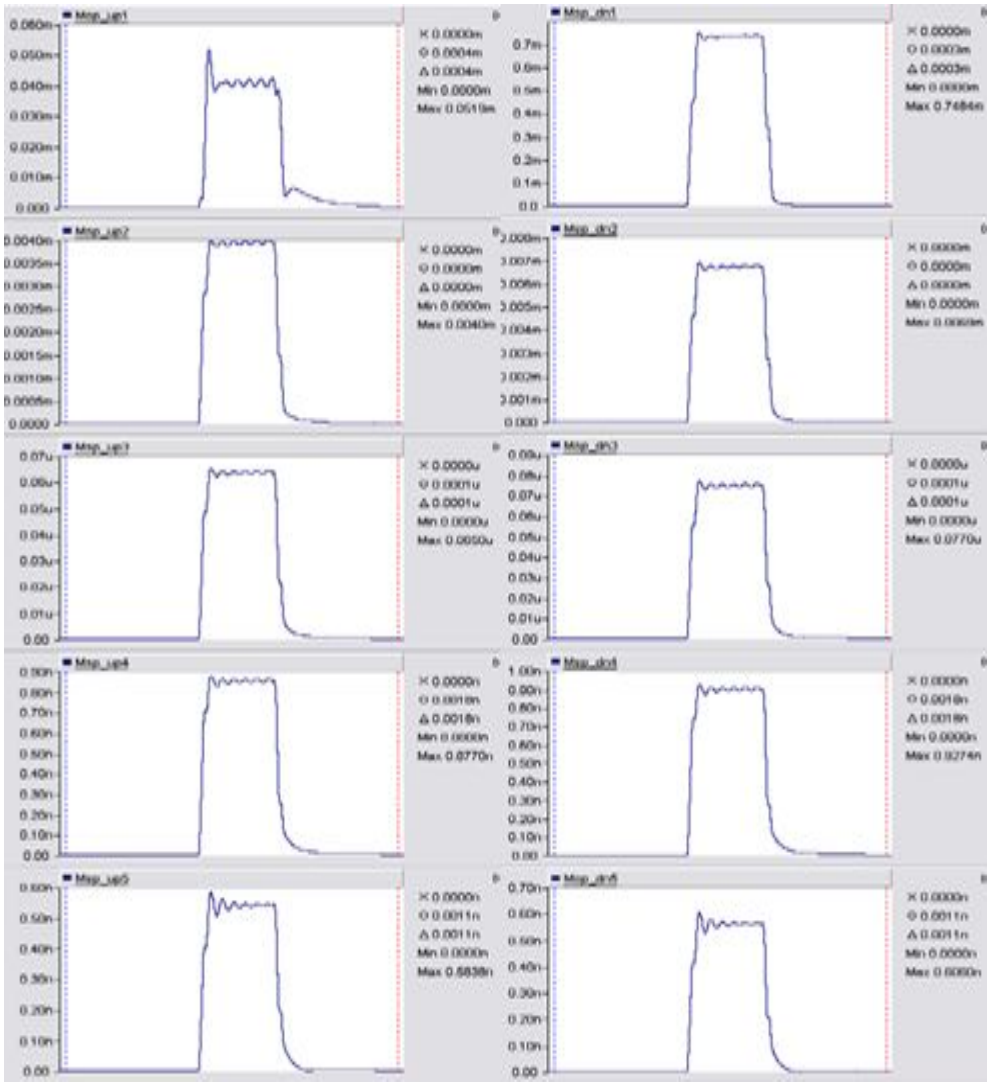

그림 19. M상 상하행 SP-SSP 시뮬레이션 파형



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

시뮬레이션 결과 보호선용접속선 계측 전류의 최대값을 정리하여 나타낸 것이며 표 2에서 확인할 수 있듯이 가장 큰 고장전류를 나타낸 곳은 SS-SSP 1번째 구간이다. 이를 근거로 지락사고에 의한 고장은 1번과 2번 보호선용접속선에서 발생한 것을 확인할 수 있었다. 고장지점은 식 (6)에 의해서 계산하여 산출하였다.

$$1.0[km] \times \frac{0.322}{0.322 + 3.242} = 0.0903\,[km] \tag{6}$$

$$1.0 + 0.0903 = 1.0903\,[km]$$

이를 통해 첫 번째 보호선용접속선에서 903m 떨어진 지점에서의 지락사고에 의한 고장이 발생한 것을 확인할 수 있었고 변전소와는 1.0903km 떨어진 지점에 있는 것을 확인할 수 있었다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

## B. 리액턴스 방식의 고장점 표정

리액턴스 방식을 적용한 고장점 표정장치의 신뢰성을 향상시키기 위한 시뮬레이션의 결과 고장 리액턴스의 값이 증가될수록 고장 전류는 작아지는 것을 확인하였으며 이를 표 4에 의해 나타내었다. 보호선용접속선의 전류도 고장전류와 감소하는 것도 파악하였으며 고장 구간에 존재하는 보호선용접속선의 전류비가 1대1인 것도 증명할 수 있었다. 즉, 고장 리액턴스의 변화되더라도 보호선용접속선의 전류비로 고장점 표정이 가능함을 분석을 통해 알 수 있었다. 이는 리액턴스 방식의 고장점 표정장치를 통해 전기철도의 신뢰성을 향상시킬 수 있다는 것을 의미한다.

표 4. 고장리액턴스 변화에 의한 고장전류 및 보호선용접속선 전류 변화

| 구분 | 0.01 [Ω] | 0.05 [Ω] | 0.1 [Ω] |
|---|---|---|---|
| 보호선용접속선 1 | 0.012 | 0.012 | 0.011 |
| 보호선용접속선 2 | 1.432 | 1.431 | 1.429 |
| 보호선용접속선 3 | 1.432 | 1.431 | 1.429 |
| 보호선용접속선 4 | 0.012 | 0.012 | 0.011 |
| 고장전류 | | 0.01 [Ω] | 3.452 [kA] |
| | | 0.05 [Ω] | 3.447 [kA] |
| | | 0.1 [Ω] | 3.443 [kA] |



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

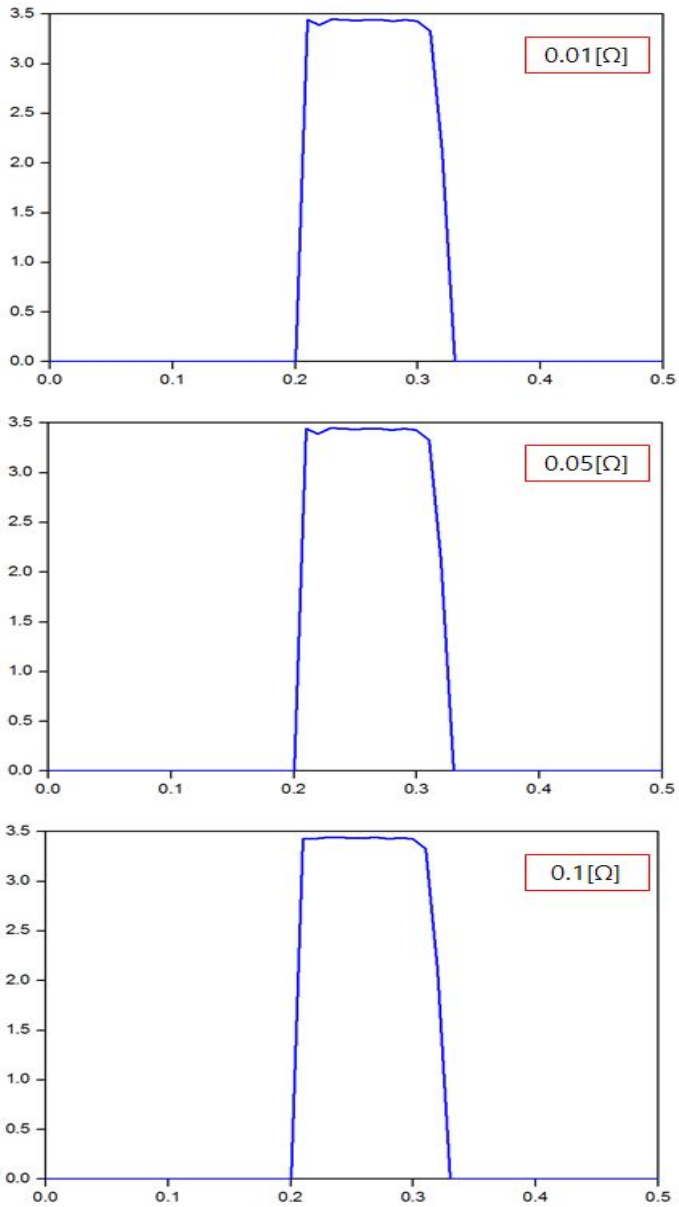


그림 20. 4.6km 지점의 고장리액턴스에 의한 시뮬레이션 파형



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# V. 결 론

전기철도에서 단락이나 지락 등의 고장이 발생하면 급전이 복구 완료 시점까지 불가능하고, 열차이용이 어려워 고객들에게 불편함을 초래하게 된다. 뿐만 아니라 전기철도는 분포가 광범위하기 때문에 고장시간을 최소화할 수 있도록 안정성과 신뢰성을 확보하고 유지하도록 관리하는 것이 필수적이다.

고장점 표정장치는 전기철도에서 고장이 발생하게 되면 고장점 표정지점과 실제 발생한 사고지점을 정확하고 확인할 수 있는 시스템이다. 그러므로 고장점 표정장치에서 표정한 지점과 실제로 발생한 현장의 사고지점과의 오차를 줄여주는 것은 사고 복구시간과 유지보수 시간을 단축하는데 매우 중요한 요소이다.

현재 국내의 고속철도 급전시스템에서는 비선형적인 리액턴스도 입력이 가능하도록 새로운 리액턴스 방식을 개발하여 활용하고 있으며, 전차 선로의 리액턴스 값을 측정하여 개별적으로 입력하고 고장이 발생한 경우에는 고장지점까지만 리액턴스 값을 계산하고 사전의 입력된 리액턴스 값과 비교하여 거리를 환산하는 방식으로 사용되고 있다.

본 연구의 목적은 전기철도의 계통안정화를 위해 리액턴스 방식의 고장점 표정장치를 활용한 신뢰성 향상이었다. 이를 위해 전차선로의 고장해석을 시뮬레이션을 설계하였고 급전시스템에서 발생하는 전차선 지락고장을 가정하여 진행하였고 그 결과 매우 작은 오차범위 내의 고장지점을 표정할 수 있었다. 뿐만 아니라, 리액턴스 방식을 적용한 고장점 표정장치의 신뢰성을 향상시키기 위한 시뮬레이션의 결과 고장 리액턴스의 값이 증가될수록 고장 전류는 작아지는 것을 확인하였으며 고장 리액턴스의 변화되더라도 보호선용접속선의 전류비로 고장점 표정이 가능함을 분석을 통해 알 수 있었다.

본 논문을 통해 리액턴스 방식의 고장점 표정장치를 통해 전기철도의 신뢰성을 향상시킬 수 있다는 것을 증명할 수 있었고, 외와 같은 고장점 표정장치에 대한 연구를 지속적으로 진행하여 보다 낮은 오차 범위내의 고장점 표정을 할 수 있도록 해야 할 것으로 사료된다.



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# <참 고 문 헌>

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

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

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

[4] 철도청 홍보담당관실, “철도주요연표”, 한국철도, 2002.

[5] 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

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

[7] 한국철도공사, “코레일 경영통계”, 2015. 8. 31.

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

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

[10] 서재범, “AT 철도 급전계통에서의 고장점 표정 알고리즘”, 명지대학교 대학원 논문, 2000.

[11] 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.

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

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

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



Collection @ chosun

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

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

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

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

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

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

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

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

[22] 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

조선대학교
CHOSUN UNIVERSITY

# 감사의 글

대학원에 입학한지 어느새 2년이 지났습니다. 그동안 대학원 생활들을 떠올려 보면 즐거운 일도 많았지만 아쉬움도 많이 남습니다. 직장이라는 핑계로 학업을 너무 소홀히 한 것 같아 후회도 됩니다. 이런 가운데 어렵게나마 졸업을 할 수 있게 도와주신 분들에게 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

우선 대학원을 들어갈 수 있게 여러모로 도와주신 박채옥 교수님께 감사를 드립니다. 평소 대학원 문턱을 어렵게 생각해왔지만 박채옥 교수님께서 이끌어 주신 덕분에 제가 발전할 수 있는 계기가 되었다고 생각합니다. 그리고 중요한 시기마다 어머님께서 자식을 챙기는 마음처럼 도와주신 정현숙 선생님도 잊지 못할 것 같습니다. 수강신청을 비롯하여 대학원생들이 놓치기 쉬운 부분을 항상 꼼꼼히 챙겨주신 것은 졸업까지 이끌어주는 큰 원동력이 되었습니다.

논문이 완성되기까지 아낌없이 지도해주신 김남훈 지도교수님 감사드립니다. 또한, 열정적으로 강의를 해주신 조금배, 최효상, 이우선, 김철준 등을 비롯하여 전기기술융합공학과 모든 교수님들께 진심으로 감사드립니다.

직장에서 2년간 수업을 받을 수 있도록 여러모로 도와주신 전 박용범 소장님, 노재형 전철팀장님 감사의 말씀을 전합니다.

마지막으로 안팎으로 지원해주는 든든한 저의 지원군이자 평생의 반려자인 아내 이현미, 아빠를 무지 사랑하는 우리 예쁜 첫째 딸 다연, 애교로 꽉찬 개구쟁이 막내 소민 우리가족 모두와 이 졸업의 기쁨을 같이 하고 싶습니다.

2016년 12월
안종삼 올림

dCollection @ chosun