



## 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](#)

2016年

2月 碩士學位論文

전기철도용 전력변압기 보호용 계전기의  
효용성 실증연구

2016 年 2月  
工學碩士學位論文

# 전기철도용 전력변압기 보호용 계전기의 효용성 실증연구

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

朴 熙 恩

전기철도용 전력변압기 보호용 계전기의  
효용성 실증연구

An Empirical Study on the Utility of Relay  
for Transformer Protection for Electric Railway

2016 年 2月 25日

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

電氣技術融合工學科

朴 熙 恩

# 전기철도용 전력변압기 보호용 계전기의 효용성 실증연구

指導教授 曹 錦 培

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.




2015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

朴 熙 恩

朴熙恩의 碩士學位 論文을 認准함

委員長	朝鮮大學校	教授	李 愚 宣	
委 員	朝鮮大學校	教授	朴 彩 玉	
委 員	朝鮮大學校	教授	曹 錦 浩	

2015年 11月

朝鮮大學校 産業技術融合大學院

## 목 차

### ABSTRACT

I. 서 론 .....	1
II. 이론적 고찰 .....	2
1. 고조파의 발생원인 .....	2
2. 스코트결선 변압기 .....	7
3. 비율차동계전기 .....	11
III. 실증실험 결과 및 고찰 .....	21
1. 노안 변전소 구간 실증실험 .....	21
2. 익산 변전소 구간 실증실험 .....	26
IV. 결 론 .....	32

### 【참고문헌】

## List of Tables

표 1 사이리스터 응용기기와 대분류 .....	3
표 2 고조파 발생원 .....	4
표 3 고조파의 영향 .....	5
표 4 전력계통 측면에서의 대책 .....	6
표 5 수용가측 측면에서의 고조파 대책 .....	6
표 6 스코트결선 변압기의 권선수 .....	8
표 7 각 사고별 전류크기 및 차전류 .....	28

## List of Figures

그림 1 합성 왜곡된 전류파형 .....	2
그림 2 사이리스터 구조와 표시 .....	3
그림 3 기본적인 왜형과 .....	4
그림 4 스코트결선 변압기의 등가회로 및 전압벡터도 .....	7
그림 5 단권변압기의 원리와 권선구조 .....	10
그림 6 비율차동계전기의 등가 회로 .....	12
그림 7 차동계전기의 동작 .....	12
그림 8 비율 차동 계전기의 정상상태 동작 .....	13
그림 9 비율차동 계전기의 내부고장 발생 시 동작 .....	14
그림 10 이상적인 CT회로 .....	15
그림 11 CT의 등가회로 .....	15
그림 12 CT 등가회로 .....	16
그림 13 등가회로 벡터도 .....	17
그림 14 CT의 특성을 고려한 87의 회로도 .....	18
그림 15 변압기 부싱과 권선 및 변류기 .....	18
그림 16 점검회로 구성도 .....	19
그림 17 각 제작사 표기 및 인출 방법 .....	19
그림 18 고장점의 CT결선도 .....	21
그림 19 계전기 전류치 분석 결과 .....	22
그림 20 계전기측 전류분석1 .....	23
그림 21 계전기측 전류분석2 .....	23
그림 22 고장점 급전선 .....	24
그림 23 고장 해소 방안을 적용한 급전선 .....	24
그림 24 노안변전소 기존결선도 .....	25
그림 25 노안변전선의 개선한 CT결선도 .....	25



그림 26 익산변전선 CT결선도 .....	27
그림 27 익산변전선 벡터도 .....	27
그림 28 익산변전선 전류파형도 .....	28
그림 29 익산변전소 TS측 CT결선도 .....	30
그림 30 익산변전선 과전류계전기 결선도 .....	30
그림 31 익산변전선 과전류계전기 변경 결선도 .....	31

# ABSTRACT

## An Empirical Study on the Utility of Relay for Transformer Protection for Electric Railway

Hee-eun Park

Advisor : Prof. Geum-Bae Cho, Ph.D.

Electrical Engineering Technology Convergence

Industrial Technology Convergence

Graduate School of Chosun University

The biggest advantage of high-speed railway accessibility is good for fast moving trains with local mass transit between medium-sized cities can be said that the ease of use. However, more of the signal security device and modifications, and natural disasters, a failure signal is generated due to a blackout of the electrical interlock due to external impact. The signal over the security of the device and causing huge delays on trains also these accidents are frequent. Recent electric railway has greatly increased the dependence on electricity and telecommunications is also a trend that the use of power conversion devices due to economic growth and industrial development increased rapidly. The transformers used in widely in the power system for rank of the other system of voltage hierarchy. However, the inrush current is generated when the input to the transformer. This occurs when, due to the primary current differential relays that can be operated. In this paper, AC 25,000V in operation in railway construction electric railways of Scott connection transformer power supply (154,000V / 55,000V) is protected by installing the Buchholz Relay (B-H relay) and percentage differential relay to the inside of the transformer fault detection device.

Harmonic analysis of the effects of commonly used ratio of primary current differential relays with catenary power transformer protection and to seek to establish measures need to manage the harmonic currents into harmonic event of a predetermined value or less.

## Collection @ chosun

## II. 이론적 고찰

### 1. 고조파의 발생원인

고조파의 발생원인은 부하설비와 전기기기 중 정현파의 상용주파전압을 인가하여 그림 1과 같이 변형된 전류 파형을 흘리는 것은 모두 고조파의 발생 원인이 된다. 표 1에서와 같이 대표적인 고조파 발생원은 그림 2에서 보여주는 사이리스터를 응용한 전력 변환장치 및 교류 아크로와 같은 전기로, 사무용 기기와 일반가전과 같은 전기기기로 나눌 수 있으며, 회전기기, 형광등 등에서 발생한 고조파는 순간적으로 발생하고 크기가 매우 작게 발생하는 것이 대부분이어서 크게 문제가 되지 않는다. 하지만 전력 변환장치와 아크로 및 전기로와 같이 큰 부하에서 발생하는 고조파는 고조파 성분의 크기도 크고, 지속적이기 때문에 다른 부하나 전력선로에 미치는 영향이 매우 크다.[4]

고조파는 기본파의 정수배를 가지는 전압이나 전류를 말하며 일반적으로 50차수정도 까지를 그림 3에서와 같이 왜곡된 파형이 나오게 되는데 이것들을 고조파라 말하며, 50차수 이상은 고주파(High Frequency) 또는 노이즈로 구분되게 되며 표 2는 고조파 발생원을 나타내고 있다.

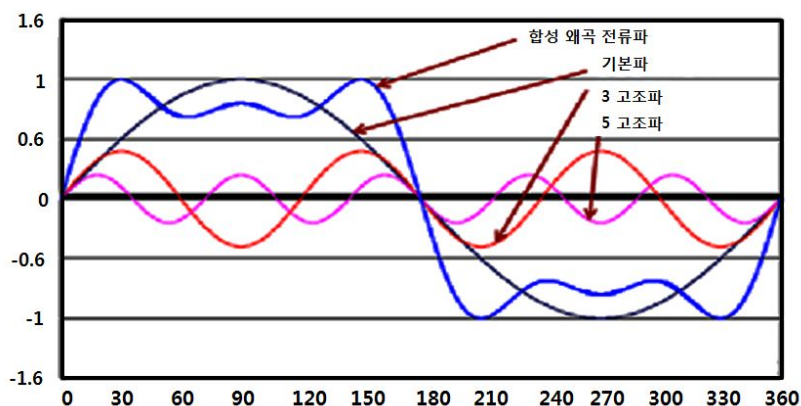


그림 2 합성 왜곡된 전류파형

표 1 사이리스터 응용기기와 대분류

입력→출력	명칭과 기능
교류→교류	교류전력조정기(전압변환) 사이크로컨버터(주파수변환)
교류→직류	정류기(순변환기)
직류→교류	인버터(역변환기)
직류→직류	초퍼(전압변환)

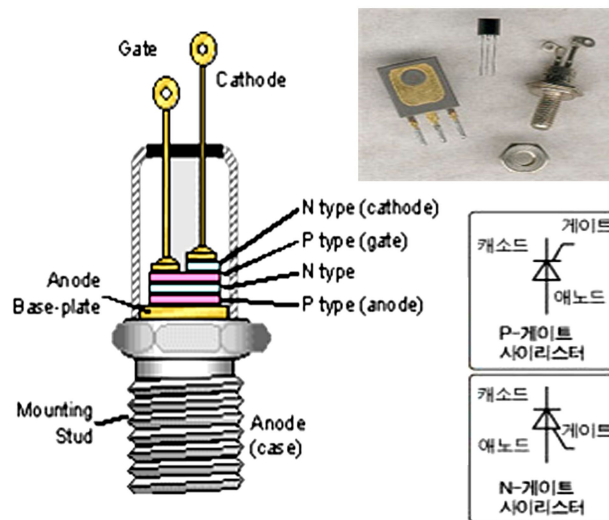


그림 3 사이리스터 구조와 표시

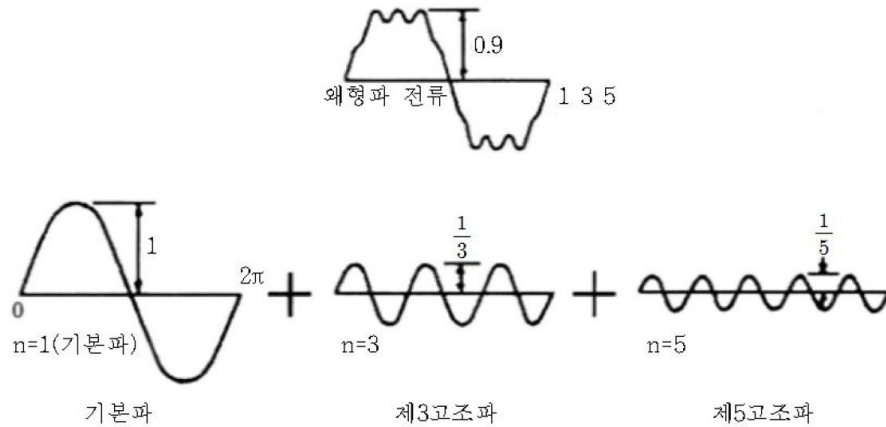


그림 4 기본적인 왜형파

표 2 고조파 발생원

발생원	주된 회로방식	품명
전력용 변환장치	6상 전류	Inverter(VVVF)
	12상 전류	무정전전원장치
	24상 전류	사이리스터 모터
	교류전력 조정	히터 제어
전기로	위상 제어	교류아크로
	전파정류 콘덴서 평활	무정전전원장치(UPS) OA기기(PC, 프린터)
	전파배전압 정류 평활	룸 에어컨(Inverter형)
	전파위상제어	백열전구용 조광기
기타	유도기기의 여자전류	변압기

고조파의 영향은 표 3과 같이 나타내고 고조파 저감 대책은 크게 전력계통선에서의 저감대책과 수용가 측에서의 저감대책으로 분류 할 수 있으며 표 4와 표 5로 나타내었다. 기타고조파 저감 대책으로는 기기자체의 고조파 내량을 증가하는 방법으로 통신선들을 케이블화 하고 케이블 외장도체의 접지를 철저히 실시한다. 또한 장애 발생 건수가 많은 리액터의 경우 리액터의 전류용량을 증가 시키고 리액터의 용량을 (6%~8%) 변경한다. 그리고 리액터공진 주파수를 낮춘다. 또한, PWM방식 채용을 채택하여 파워 트랜지스터나 GTO등의 소자를 사용하여 컨버터 인버터의 입·출력 파형을 다수의 펄스로 변환하여 사용한다.

표 3 고조파의 영향

	고조파의 영향
기기 영향	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전력용 콘덴서의 고장 및 과열</li> <li>- 변압기의 절연 열화 및 과열</li> <li>- 보호 계전기의 여유각 감소</li> <li>- 발전기의 국부적인 과열</li> <li>- 피 전기기기의 과열</li> <li>- 전력 케이블의 절연 열화 또는 고장</li> <li>- PLC 및 마이크로프로세스 이용하는 기기의 자동화 및 제어기기의 오동작 발생</li> <li>- 개폐장치의 고장</li> </ul>
유도장해	정성점 직접접지방식에서는 부근의 통신선에 유도 장해를 발생하고, 코로나에 의한 고조파 전류 중 제3고조파 성분은 중성점 전류로써 나타난다.
계통공진	케이블의 절연파괴와 변압기 및 콘덴서의 절연파괴 등이 전력계통의 고조파로 유도성 리액턴스와 용량성 리액턴스의 직·병렬 공진발생시 발생한다.



표 4 전력계통 측면에서의 대책

전력계통	고조파 저감대책
계통의 단락 용량을 증대	배전선의 저항과 리액턴스를 낮추어 공급점의 단락 용량을 크게 한다.
공급되어지는 배전선의 전용화선 사용	배전선의 단락 용량을 증대시키는 것에는 한계가 있으므로 용량이 큰 고조파 발생기의 전원 공급용 배전선을 전용화 한다.
배전선의 선간 전압 평형화	반도체 정류기에 공급 전원이 불평형 하면 제3고조파의 발생이 특히나 크므로 각 상들의 부하평형을 유지한다.
계통 절체	고조파의 발생과 원인을 정확히 파악할 수 있을 때는 고압 배전계통의 수용가 공급분의 계통을 절체 하거나 변전소의 뱅크를 변경해서 선로정수를 변경함으로 공진 상태를 회피시킨다.

표 5 수용가측 측면에서의 고조파 대책

필터	수용가측 고조파 대책
교류필터	리액터와 콘덴서로 고조파 전류를 흡수하는 장치로서 구성이 간단하고 취급이 수비고 보수가 용이하다. 특정 주파수에는 큰 효과가 있는 반면에 분로를 만들기 않은 주파수의 개선효과는 낮고 역률 개선 효과가 있어 경제적이다.
액티브 필터	전압 변동 및 전압 플리커의 저감에도 효과 적이며 변동하는 고조파에 대응할 수 있고 인버터 기술을 응용하여 부하와 역위상의 고조파를 발생시켜 구 고조파를 제거하는 장치로써 모든 고조파에 대해 효과가 있지만 대부분 고차 고조파의 개선 효과는 낮은편이다.
하이브리드 파워필터	액티브 필터와 교류필터의 각각의 장점을 모두 가진 장치로써 교류필터가 흡수하는 고조파전류를 인버터로 제어해 높은 필터 효과들을 얻을 수 있으며, 설비비 또한 위의 두 필터에 중간정도를 차지한다.

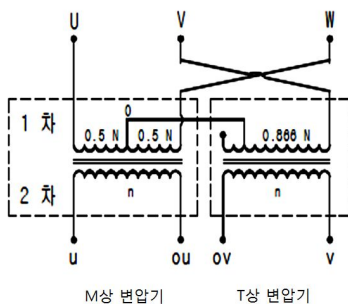
## 2. 스코트결선 변압기

전력회사의 3상 교류전력으로부터 철도 운전용 전원인 단상전원을 얻기 위하여 단상 2권선 변압기를 채용한 유럽국가와는 다르게 국내의 철도에서는 일본 영향을 받아 수전용 주변압기를 스코트 결선하여 2차측에 M상/T상 변압기를 사용하고 있다.

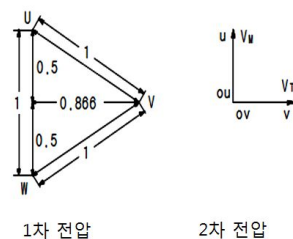
교류급전 방식의 대표적인 단점인 통신선의 유도장해를 저감시키기 위한 방법으로 BT급전방식을 채택했으나 최근에는 BT급전에서의 전압강하, 대용량 열차운전, 부스터 섹션 아크문제를 개선한 무섹션화, 변전소 간격의 확대와 안정한 전력공급이 가능한 AT급전 방식으로 바꾸고 있다.

한국전력공사에서 공급하는 154kV (138.6~170kV)을 수전하여 스코트결선 변압기 AT 계통의 2차측 최고전압은 단상 55kV이고, BT급전 계통에서는 정격전압은 AT계통의 절반인 단상 27.5kV이다.

스코트 결선 변압기의 2차측 권선에는 무부하 전압 탭(No Load Tap Changer : NL TC) 이 장착되 있는데 이유는 스코트결선 변압기 1차권선 결선의 경우 T(Teaser)결선으로 T권선이 M상 권선 중앙점에 연결되어 있다. T권선 1차 권선수는 M상 권선수의 0.866배로 권선수가 적기 때문에 탭수를 같게 하면 탭간 권선수가 서로 달라 불평형이 되고 T상에 1개와 M상에 2개 등 총 3개의 전압 절환기를 필요로 하는 반면에 스코트결선 변압기 2차 권선은 M상과 T상의 권선수가 같기 때문에 전압 절환기는 2개로도 충족되어 절연강도 LIWL(Lighting Impulse With stand Level)은 650kV에서 325kV로 감소됨으로 우리나라에서는 탭 절환기를 스코트결선 주변압기의 2차측에 설치하는 것을 표준으로 하고 있다.



(a) 결선도



(b) 전압벡터도

그림 5 스코트결선 변압기의 등가회로 및 전압벡터도

표 6 스코트결선 변압기의 권선수

구 분	1차 권선수	2차 권선수
M상 변압기	N	n
T상 변압기	$0.866 \times N$	n

스코트 결선 변압기의 결선과 전압의 크기와 벡터관계는 그림 4에서 나타낸 것과 같고 스코트결선 변압기의 권선수는 표 6과 같다. 1차, 2차 권선비가  $N : n$ 인 단상변압기(M상 변압기) 1대와 권선수의 비가  $0.866 \times N (= \frac{\sqrt{3}}{2} \times N) : n$ 인 단상변압기(T상 변압기) 1대를 M상 변압기 1차측 권선 중앙점 0에 T형으로 결선한 변압기를 말한다. 이와 같은 결선 특성에 의하여 스코트결선 변압기의 2차측에서는 M상과 T상의 위상각이  $90^\circ$ 차이가나는 두 종류의 단상을 얻을 수 있다. 따라서 전원용 스코트결선 변압기의 2차 무부하 전압 탭은 최대 수전전압 170kV일 때에도 국제전기표준회의 IEC(International Electrotechnical Committee)의 최고 연속운전 전압으로 규정된 27.5kV를 초과해서는 안 된다. 또한 최저 수전전압인 138.6kV인 경우에서도 IEC 최저 연속운전 전압인 19kV보다 낮지 않은 전압탭이 정격으로 선정되어야 한다. 또한 스코트결선 변압기에서 현행 우리나라 표준 급전방식인 AT급전계통의 전차선에 전력을 공급하는 지점에 설치되어 있는 중성구분장치(NS; Neutral section)에는 무부하시 주변압기 M-T상의 최대전압은  $29 \times \sqrt{2} = 41\text{kV}$ 가 걸리게 되고 급전구분소 SP(Sectioning Post)에는 양측 변전소의 변압기 위상차에 의한 전압만이 걸리게 되어 그 전압은 그리 크지 않을 것이지만 한쪽 변전소에만 열차 부하가 걸리는 경우 부하가 걸린 선로의 전압강하로 인해 다소 높은 전압차가 발생할 수 있다.

교류급전은 직류급전에 비하여 전압 조정이 용이하여 고전압 급전이 가능하고 장거리·대용량 전력공급에 적합하다. 이러한 이유 때문에 간선철도나 고속철도의 급전방식으로 이용되고 있으나 직류급전은 1500V로 급전전압이 비교적 낮고 급전전류가 크기 때문에 급전거리는 4km~5km 전후가 된다. 교류 BT급전방식은 급전전압이 27.5kV로 직류급전에 비하여 높은 전압이기는 하지만 부하전류가 직류방식의 1/10정도로 낮으므로 전압강하가 적어 같은 굵기의 전차선으로도 급전변전소 간격을 20~30km로 할 수 있다. 또한 교류 AT급전방식은 BT급전전압의 2배인 55kV의 급전전압이므로 변전소 간격을 40~50km 정도의 장거리급전을 아주 경제적으로 할 수 있다.

직류철도에서는 귀환전류 일부가 대지로 누설되어 지하에 매설되어 있는 지장물인 금속관로나 금속으로 되어 있는 수도파이프 같은 철제 구조물을 전기적으로 부식시키는 전식작용을 일으키는 문제가 있는데 반해 교류철도에서는 귀환전류의 일부가 레일에서 대지로 누설되어 통신선에 유도장해를 발생시키는 문제점 등이 있다.

이러한 통신유도장해를 일으키는 레일의 누설전류를 감소시키기 위하여 고안한 방법이 흡상변압기 급전방식(BT방식)이다. 귀로에 흐르는 귀환전류를 별도로 가선했던 흡상변압기와 흡상선을 이용하여 부급전선(NF-Negative Feeder)에 귀환전류를 흡상함으로 레일에 흐르게 되는 전류를 감소시키는 방법을 채택하고 있다.

흡상변압기 급전방식은 통신선의 유도장해를 없애는데 탁월한 효과가 있는 반면에 전기차를 운행할 때에 흡상변압기의 임피던스가 전차선로의 임피던스에 더해짐으로 전차선로의 임피던스는 증가되어 전압강하가 더 커지게 되고 흡상변압기의 양단 사이에 설치되어 있는 부스터 에어 섹션과 흡상변압기의 1차 단자의 전압차 때문에 섹션 단락시 아크(arc)가 발생하는 등의 문제점을 개선하고자 단권변압기 급전방식을 국내 철도의 AT급전방식 표준으로 채택하고 있다.

위에 언급하였던 흡상변압기 BT급전 방식의 문제가 되었던 흡상변압기의 임피던스에 의한 전차선로의 전압강하와 BT섹션에서 아크가 발생하는 등의 문제점을 해결하기 위하여 개발된 급전방식이 바로 AT급전 방식으로 BT급전방식이 27.5kV 급전인데 비하여 AT급전방식에서는 55kV로 공급함으로써 전압 강하율은 BT급전방식의 1/4배로 감소된다.

흡상변압기 BT방식은 BT가 전차선에 직렬로 접속되어 전차선임피던스의 증가에 의한 전압강하를 증대시키고 팬터그래프가 BT섹션을 통과시 아크 발생으로 전차선 및 조가선 그리고 팬터그래프의 스프링을 손상시키거나 마모 등을 일으키기 때문에 BT급전방식을 AT급전방식으로 개량해 급전의 신뢰성을 향상시키고 유지보수 간소화를 하고 있다. 흡상변압기의 급전전압은 최고 27.5kV이지만 단권변압기 AT의 급전전압은 55kV, 급전전류는 BT급전 방식의 절반이고 전압 강하율은 BT급전방식의 1/4로 적어 지므로 급전거리를 장거리로 할 수 있어 경제적이며 시설투자비를 절감시킬 수 있다.

일반적인 변압기는 1, 2차 권선을 별개로 하지 않지만 단권변압기는 그림 5와 같이 하나의 권선으로 1, 2차의 작용을 겸용하여 필요한 전압을 얻게 한 변압기를 단권변압기라 한다. 권선에서의 누설임피던스를 무시하고 이상적인 변압기로서 AT의 특성을 고려하면 무부하시의 경우 a-c 전원단자에  $V_1$ 인 전압을 인가하여  $i_m$ 인 여자전류가 흐

르면  $i_m \times (n_1 + n_2)$ 에 비례하는 자속이 철심 내에 발생하며 a-b, b-c간에는 권수비  $n_2$ ,  $n_1$ 에 비례하여 권수비는 식(1)과 같다.

$$\frac{n_1 + n_2}{n_2} = \frac{E_1 + E_2}{E_2} = \frac{2 \times E_2}{E_2} = 2 \quad (1)$$

식(1)의 권수비에 의해 전압  $E_1$ ,  $E_2$ 가 유기된다. 따라서  $n_1 = b - c$ 간 권선수,  $n_2 = a - b$ 간 권선수이며 단권변압기의 1차 권선 및 2차 권선은  $n_1 = n_2$  즉  $E_1 = E_2$ 로 된다.

단권변압기 a와 b단자 간에  $I_2$ 인 전기차 부하를 접속하면 이것에 대응하여  $I_1 \times (n_1 + n_2) = I_1 \times 2n_2 = I_2 \times n_2$ 의 암페어 턴 관계를 만족하게 되는 전류  $I_1$ 이 전원에 흐른다. 즉  $2 \times I_1 = I_2$ 가 됨으로 여자전류  $i_m$ 을 무시하게 되면 전류는  $n_1 = n_2$ 임으로  $I_1 = I_2 - I_1$ 인 관계에 의해 그림 5에서 처럼 a와 b 부분의 변압기 권선에는 전원과 부하측의 전류차  $I_1 = I_2 - I_1$ 가 흐른다. 공통권선인 2차 권선  $n_2$ 에 흐르는 전류는 1차 권선  $n_1$ 에 흐르는 전류는 그 크기가 같고 방향만 서로 반대가 되어 흐르는 것을 알 수 있다.

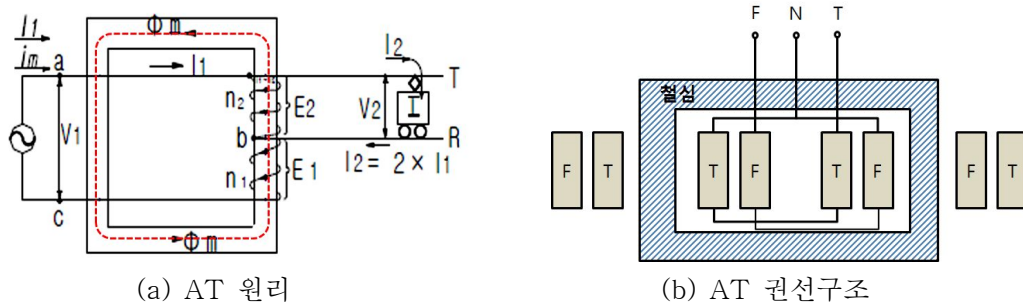


그림 6 단권변압기의 원리와 권선구조

권선의 구조는 그림 5(b) 처럼 T상과 F상의 코일을 동심원상으로 감고 다시 직렬로 접속해 T상과 F상의 결합을 치밀하게 하고 있다. AT 단권변압기는 전원과 부하측의 권선은 서로 절연되어 있지 않아 고압측에서 발생한 서지(surge)는 거의 저압 측에 옮겨 감으로 절연협조 측에서 볼 때 주의하여야 한다.



“87”에는 차동계전기와 비율차동계전기 두 가지 종류가 있다. 이해를 쉽게 하기 위하여 먼저 변압기의 1, 2차 전류를 동일하게 하여 차동 계전기를 설명 하였다.

차동계전기의 동작원리는 그림 7에서와 같이 외부 고장 및 정상상태의 경우에는 동작코일에 전류가 흐르지 않으므로 동작용 릴레이는 동작하지 않는다.

이러한 동작이 이론적으로는 이상적이지만 변압기의 1차와 2차에 사용된 CT의 특성에 따라서 1, 2차 전류의 비에 대한 오차에 따라 차 전류가 동작코일로 유입되어 예상치 못했던 오동작이 발생할 가능성이 높아진다.

특히나, 보호범위의 외부에서 발생한 단락사고와 같은 대전류가 흐르는 고장이 발생

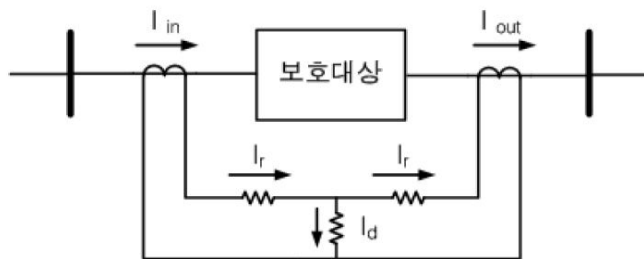


그림 7 비율차동계전기의 등가 회로

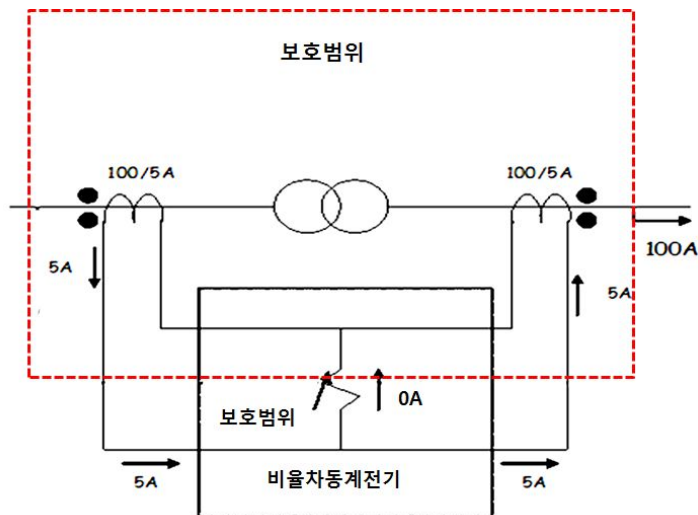


그림 8 차동계전기의 동작

하게 되면 약간의 CT 특성차에 의해서도 매우 큰 오차전류가 동작코일에 흘러 릴레이를 동작시키게 될 수 있다.

차동계전기의 사용은 이러한 CT의 동작특성 때문이며 실제로는 사용되지 않고 비율차동 계전기가 일반적으로 사용되어 지고 있다. CT에 대한 사항은 다음에 기술하도록 하며 비율차동계전기는 앞에서 언급한 차동계전기의 단점들을 보완한 것으로서 다음과 같이 억제코일과 함께 동작코일로 구성되어진다.

그림 8에서 알 수 있듯이 변류기의 특성차에 따르는 오차전류가 동작코일에 흘러도 억제코일이 존재하고 있으므로 이 억제코일로 흐르는 전류가 훨씬 클 것이므로 비율차동계전기는 잘못된 동작을 일으킬 정도의 동작코일에 흐르는 전류의 발생은 없다고 본다.[9]

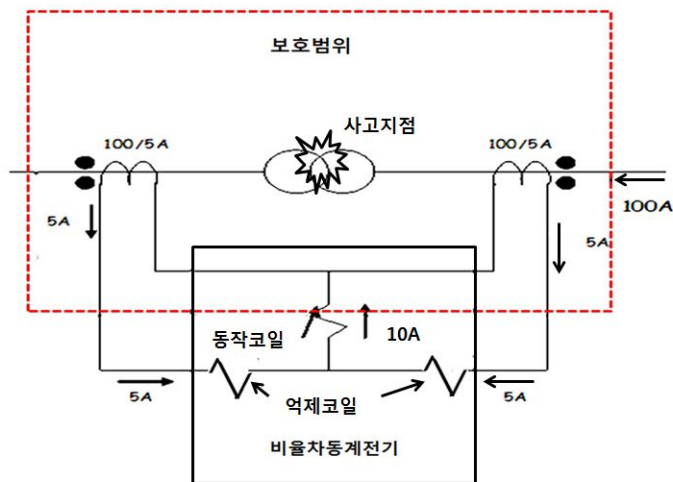


그림 9 비율 차동 계전기의 정상상태 동작

비율차동 계전기의 특징이자 장점인 변류기 2차측 대전류의 고장전류가 유입이 우려되어지는 보호범위 밖에서 발생한 외부고장에도 오동작의 우려가 없다.

송전선의 장거리 구간 보호용으로 사용되는 표시선 계전기(Pilot Wire Relay)의 동작도 앞에서 언급한 차동계전기의 원리와 비슷한 것이라고 이해하면 된다.

변류기 2차 전류를 장거리로 인출 할 수 없는 장거리를 보호구간에서는 전류신호를 장거리 전송에 적합한 설비인 표시선 계전기를 사용한다.

보호범위 내부에서 고장이 발생하면 어떤 동작이 일어나는지 알아보기 위해서 내부



고장전류를 100[A]로 가정하여 그림 9와 같이 나타내었다.

내부 고장이 일어났을 경우는 억제코일에 흐르는 전류들은 서로 반대가 되어 억제토크가 서로 상쇄 돼 양단에서 유입되는 고장전류는 모두 동작코일로 흐르게 되므로 릴레이는 즉시 동작하게 되어 내부 고장부분을 전력 계통에서 신속히 분리하게 된다.

변류기는 변압기와 마찬가지로 내부에 철심을 가지고 있으며 1차에 전류가 많이 흘러 2차에 권선 비에 비례하여 유도전류가 흐르게 된다. 철심의 포화특성에 의해 당연히 오차도 발생된다.

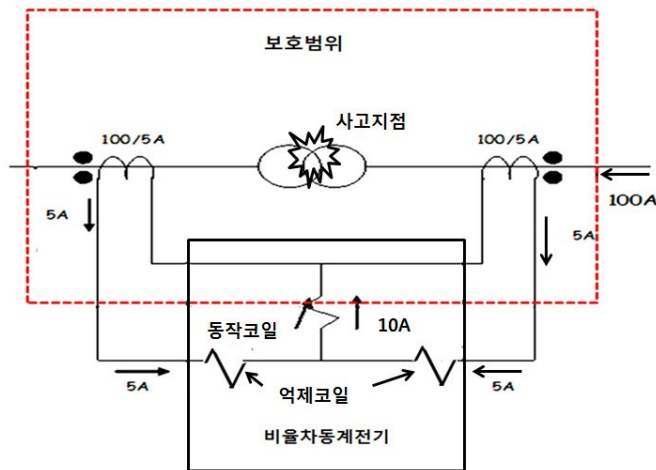


그림 10 비율차동 계전기의 내부고장 발생 시 동작

이 오차는 동일한 부하라면 2차 전류가 클수록 커지게 되고, 동일한 전류라면 2차에 접속된 부하가 클수록 커진다.

올바른 보호 계전 시스템을 구성하기 위해서는 포화특성과 오차전류의 개념을 정확하게 이해하고 있어야만 오동작을 방지할 수 있게 되며 비율 차동 계전기와 모든 계전기의 동작에 중요한 영향을 미치게 된다.

변류기는 앞에서 기술한 것과 같이 내부에 철심이 있으므로 변압기와 같은 당연한 등가회로를 작성할 수 있고, 2차에 전류를 유기하기 위해서는 여자전류가 필요한 것은 당연하다.[10]

그림 10 같은 이상적인 변류기 회로를 가지고 설명하고자 한다. 극성기호는 변류기 방향으로 유입되는 1차 전류  $I_p$ 에 대하여 2차 전류  $I_s$ 가 변류기에서 유출되는 방향을

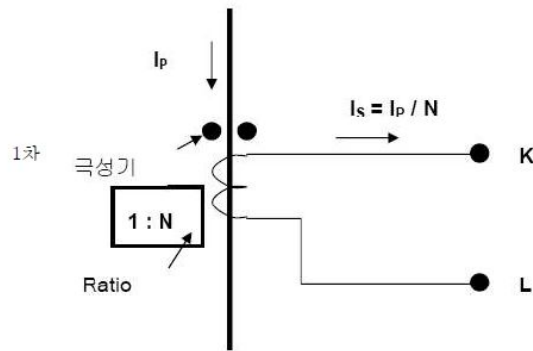


그림 11 이상적인 CT회로

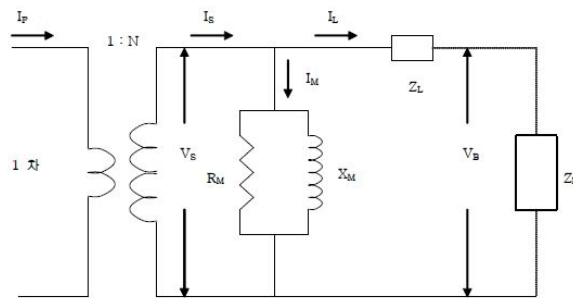


그림 12 CT의 등가회로

표준으로 하며 이를 우리는 감극성 이라고 한다. 즉, 아래 그림 10의 화살표 방향대로 전류가 흐르게 되며 2차 단자기호를 표기한 것이 변류기의 표준이다.

위의 감극성은 모든 변압기에 있어서 표준으로 사용되기 때문에 극성에 대한 부호규약을 잘 이해하고 있어야 만이 방향성 계전기를 이해하고자 할 때 손쉽게 접근할 수 있게 된다. 그림 10은 1차 전류가 오차 없이 그대로 권수비(Turn Ratio)에 비례하여 2차에 유기되는 이상적인 경우를 나타내고 있다. 하지만 실제의 변류기(Current transformer)는 철심의 특성으로 인하여 이렇게 될 수 없으나 다음에서 설명되는 등가회로를 보면 쉽게 이유를 이해할 수 있다. 위 그림 11은 1차 임피던스전류를 2차로 환산한 부분을 생략한 실제의 등가회로이다. 약간 복잡하게 느껴 질 수 있으나 일반적인 변압기를 해석할 때와 마찬가지로 더 간략화된 그림 12와 같은 간이등가회로를 사용하여 변류기(Current transformer)의 동작특성을 해석한다.

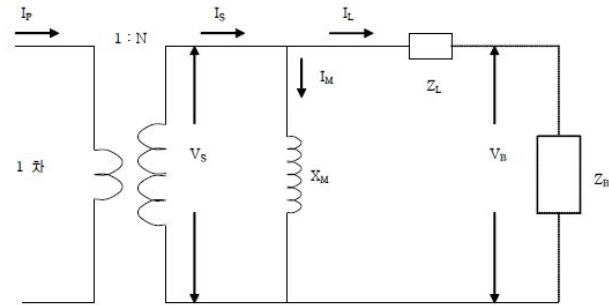


그림 13 CT 등가회로

각각의 물리량에 대한 관계를 나타내는 수식은 다음 식(2)~식(5)와 같다.

$$I_S = \frac{I_P}{N} = I_M + I_L \quad (2)$$

$$I_P = N \cdot (I_M + I_L) \quad (3)$$

$$I_M = \frac{V_S}{X_M} \quad (4)$$

$$V_S = V + I_L \cdot Z_L \quad (5)$$

위 식의 의미는 여자전류를 무시하고 1차 측의 전류가 2차 측에 권수비(Turn Ratio)에 의해 오차가 없이 유도되지만 철심의 포화특성이 존재하므로 반드시 오차가 존재하여야만 함을 보여주고 있다.

특히나,  $I_M = V_S / X_M$ 식에서 부하가 많이 인가되어  $V_S$ 가 커지면  $I_M$ 이 더욱 커지게 되어 오차는 더욱 커지게 되며 이것들은 철심의 포화에 따른 오차 발생의 근본 원인이 된다. 여기서 부하는 변류기자체의 권선저항을 제외한 지시용 계기류 및 보호계전기류, 리드선을 전부 포함하는 것으로 해석한다.

해석의 편리성을 위해 간이등가회로에 대한 파라미터를 벡터도에 나타내면 그림 13과 같고  $I_S$ 를 결정하는  $I_L$ 과  $I_M$ 은 벡터적으로 합해져야 되지만 일반적인 대수적인 합을 취해도 개략적인 포화특성을 쉽게 알 수 있다. 또 다른 한 가지는 여자전류에 포함되는 고조파의 영향을 일반적으로 무시하게 된다.

결론적으로 말하면 변압기 보호용 비율차동계전기에 사용되는 변기류는 전류 특성차들에 의해 오동작을 유발할 수 있기 때문에 이에 대한 검토가 필요하다.

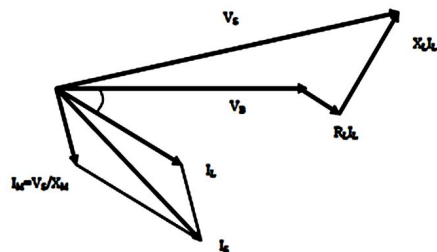


그림 14 등가회로 벡터도

이것을 그림 14와 같이 실제 사용되어지는 회로를 통해서 고찰해보면 다음과 같다. 변류기의 특성차에 의해 내부 유기 전압인  $V_{S1}$ 과  $V_{S2}$  양쪽이 다르면 여자전류도 서로 다르고 이로 인해 양쪽의 전류의 차이만큼 해당되는 오차전류는 동작코일로 흐르게 되어 오동작을 일으킬 가능성이 있게 된다.[11]

이 방법은 변압기를 설치하고 나서 운전 중인 변압기의 개선작업을 했을 때나 초기 점검할 경우 정지한 상태에서 점검하는 것이며 이 점검 작업을 위해서는 약 6[V] 정도의 랜턴용 배터리 1개와 리드선으로 사용하게 될 충분히 긴 전선 및 디지털 전압계가 있으면 충분하다.

점검순서를 위해서는 먼저 그림 15과 같은 변압기 부싱과 권선 및 변류기에 대한 점검회로를 그림 16과 같이 회로를 구성한다.

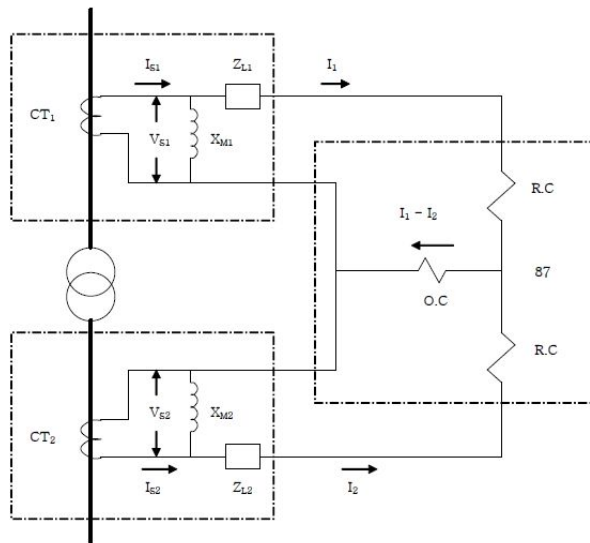


그림 15 CT의 특성을 고려한 87의 회로도

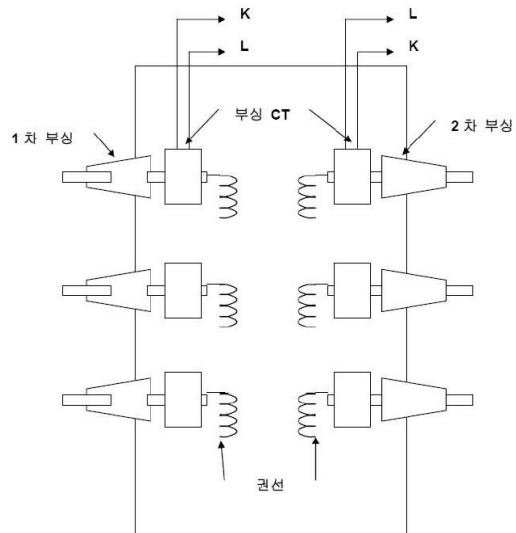


그림 16 변압기 부상과 권선 및 변류기

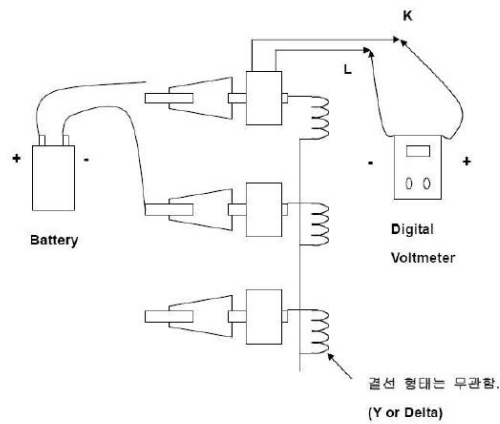


그림 17 점검회로 구성도

다음으로 배터리를 이용하여 폐회로를 구성하는 순간 디지털 전압계가 (+)의 전압 값을 나타내고, 폐회로를 여는 순간 (-)전압 값을 나타낸다면 이 것은 현재의 K와 L단자는 올바르게 인출된다.

이때 디지털전압계는 반드시 DC전압을 측정할 수 있도록 직류측정 모드로 기능이 선택되어 있어야 한다. 그림 17과 같이 제조자에 따라 표기하는 방법 및 인출 방법이 약간씩 상이할 수 있으므로 각 제품의 도면을 기준으로 하여 점검하는 것이 반드시 습관화 되어야 한다.

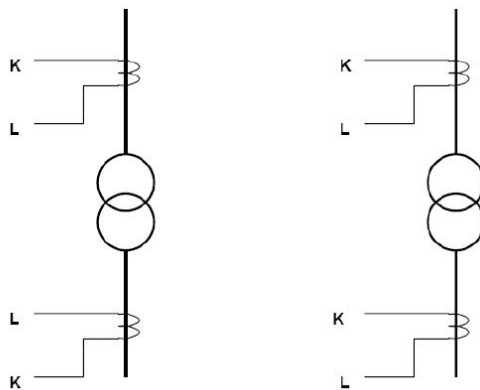


그림 18 각 제작사 표기 및 인출 방법

현재 전기철도에서 적용하는 교류급전 방식은 상용주파 27.5kV를 급전하는 BT급전 방식, 55kV를 급전하는 AT급전방식이 있다.

현재 우리나라에서 신규 사업은 AT급전 방식을 채택하고 있으며, 기존의 BT급전 방식도 모두 AT급전으로 개량 또는 교체하고 있다. 이처럼 단권변압기 급전방식을 주로 사용하고 있으며 이것은 일본의 철도기술의 영향으로 건설되어진 수도권 전철 이후로 일반철도에서는 분리급전시스템을 채택하고 있다. 그 이전에는 유럽에서 60Hz로 운용되는 기술의 도움으로 건설한 산업철도에서는 BT급전방식으로 건설되었으나 이 구간들을 모두 국내기술로 AT급전으로 분리급전방식을 개량해서 기존의선 모두 AT 분리급전방식으로 되었으며 근래 경부고속전철에는 프랑스 국유철도 SNCF(SNCF : Société Nationale des Chemins de fer Français) 에서 도입한 AT병렬급전방식을 채택 현재 운행 중이고 있으며 그 이후 건설한 호남고속철도에서도 AT 병렬급전방식을 적용하고 있다.

### Ⅲ. 실증실험 결과 및 고찰

#### 1. 노안 변전소 구간 실증실험

##### 1.1 비율차동계전기 관련 실험 및 분석

노안변전소 변압기 보호용 비율차동계전기의 오동작에 관한 사례이다. 고속선 F5, F6측을 급전한 상태에서 KTX가 운행하여 부하가 발생 되었을 때 비율차동계전기가 PICK UP되거나 TRIP이 되는 동작이 발생 되었다.

그림 18과 같은 변류기 결선을 가지고 있으며 이 고장점의 변류비는 기존의 비와 신설 설비의 변류비는 800:5로 동일하게 사용하였다. 또한 기존 변류기 결선에 신설분의 변류기를 병렬로 접속하여 결선하였다.

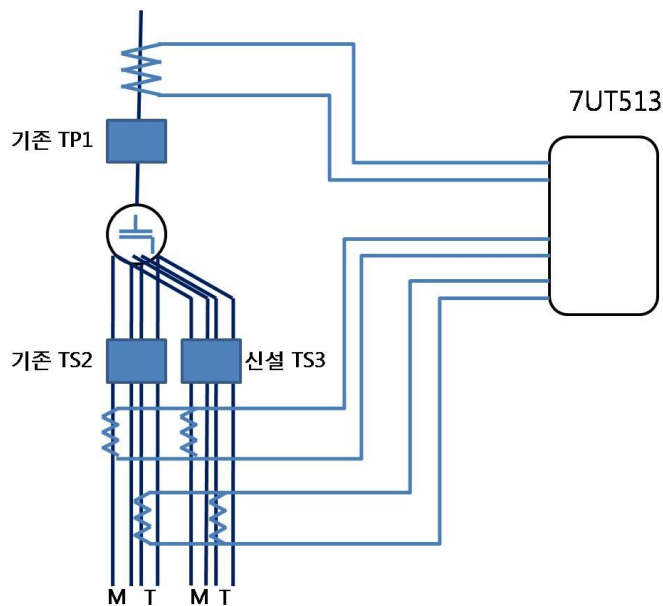


그림 19 고장점의 CT결선도



Par.	Text	Value
5701	Winding 1 PhA current as a % of rated	69.4 %
5702	Winding 1 PhB current as a % of rated	0.0 %
5703	Winding 1 PhC current as a % of rated	2.4 %
5704	Winding 2 PhA current as a % of rated	87.8 %
5705	Winding 2 PhB current as a % of rated	0.0 %
5706	Winding 2 PhC current as a % of rated	0.0 %
5707	Winding 3 PhA current as a % of rated	0.0 %
5708	Winding 3 PhB current as a % of rated	0.0 %
5709	Winding 3 PhC current as a % of rated	0.8 %
5710	Operat. meas. current IA [%] is	
5711	Operat. meas. current IB [%] is	
5721	Winding 1 PhA current in primary amps	104.0 A
5722	Winding 1 PhB current in primary amps	0.0 A

그림 20 계전기 전류치 분석 결과

그림 19는 고장점의 계전기의 전류를 분석한 결과로 Wind 1 a%(T좌 1차)와 Wind 2 a%(T좌 2차)의 값이 거의 일치하여야 하나 2차측 전류가 1차측 전류보다 약 18% 많이 검출되고 있다. 이는 1차측 전류 대비 절대치이며 상대치로 따지면  $18\%/69.4\% \approx 25\%$  많이 전류가 검출되는 것을 알 수 있다. 2차측 전류가 많이 검출되는 원인을 추론해 보면 노안변전소에서 고속선 노령변전소 방면으로 연장급전 시험을 실시하여 노안변전소에서 노령변전소까지 연장급전을 시행한 상황에서 열차를 투입하여 발생되는 부하에 무리 없이 열차가 운행이 가능한지에 대한 타당성 시험이었다. 이때 고속선에 부하가 발생 되지만 기존선 TS2에 고속선 TS에 걸리는 전류정도의 전류치가 검출이 되었다. 하지만 기존선 급전선측에서는 전류가 검출되지 않았다.

이러한 현상은 고속선에서 부하전류가 기존선의 AT로 흡상되어 기존선 FEEDER를 타고 올라오는 것으로 판단된다. 이때 급전반은 AF와 TF의 흡상전류의 방향이 같은 방향이라 CT의 차동결선으로 인해 전류가 검출되지 아니한 것으로 판단된다.

TS측은 TF의 CT만을 이용하여 전류를 검출하기 때문에 기존선 AT로 흡상되는 전류가 검출되는 것으로 판단된다.

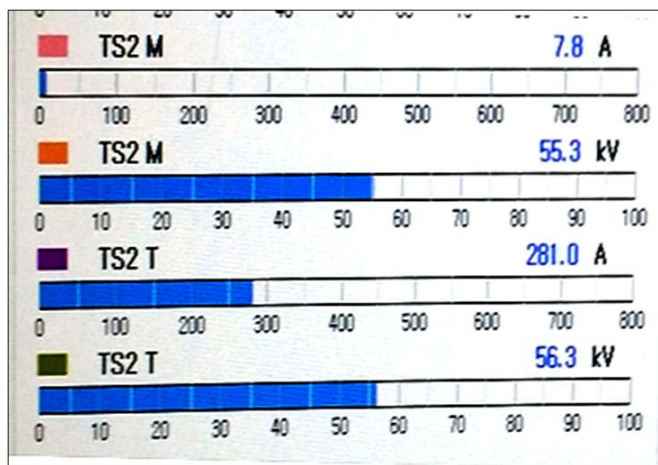


그림 21 계전기측 전류분석1



그림 22 계전기측 전류분석2

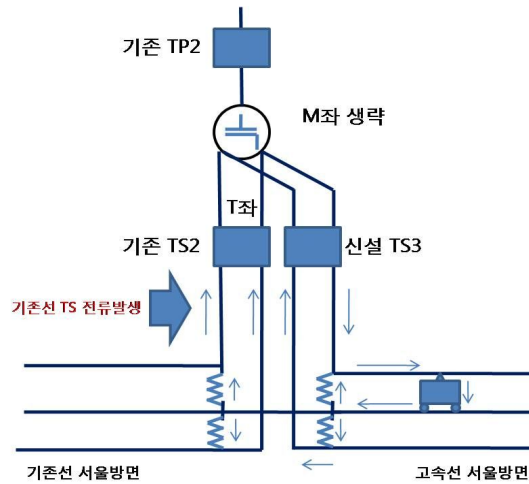


그림 23 고장점 급전선

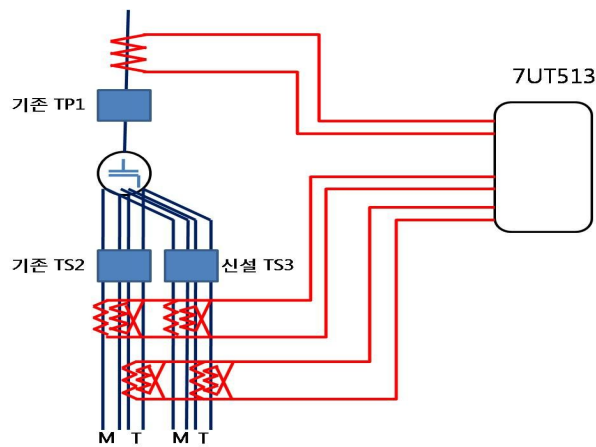


그림 24 고장 해소 방안을 적용한 급전선

고속선에 열차의 운행으로 인한 부하의 발생시 그림 22와 같이 기존선으로 흡상되는 전류로 인하여 변압기 2차측 전류가 많이 검출되는 것으로 판단된다.

이러한 현상을 개선하기 위해서는 기존선에 흡상되는 전류를 없애기 위해서는 급전측과 마찬가지로 기존 AF 또는 TF측의 CT를 사용하는 방법이 아닌 그림 23과 같이 AF와 TF의 차동결선을 해줌으로서 해결이 가능할 것으로 판단된다.

## 1.2 실증실험 결과 고찰

노안 변전소의 변압기 2차측 변류기 결선을 AF와 TF의 차동결선으로 변경하여 결선하였다. 변압기 2차측 과전류 계전기 동작시 TP차단기 트립회로는 생략하였다. 그림 24는 노안변전소 기존 결선도를 그림 25는 개선한 CT결선도를 나타내고 있다.

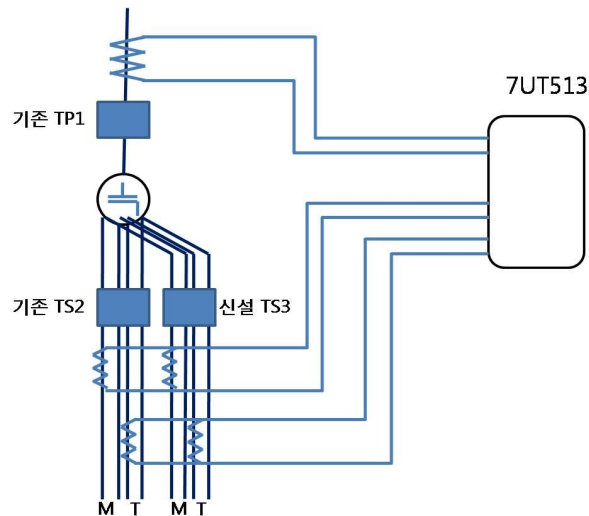


그림 25 노안변전소 기존결선도

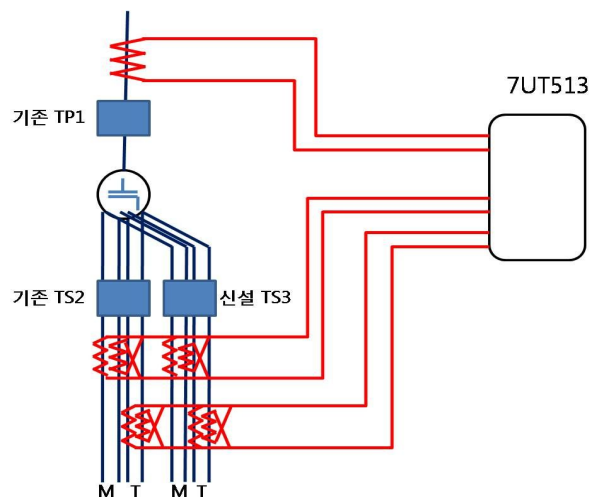


그림 26 노안변전선의 개선한 CT결선도

기존 변압기반 트립 동작방식은 87계전기, TP측 과전류 계전기, TS측 과전류계전기 (M,T) 동작시 TP, TS 차단기 모두 트립 된다.

개선한 변압기반 트립 동작방식은 비율차동계전기의 TP측에 과전류 계전기가 동작 되면 TP, TS측의 차단기가 트립 된다. 그리고 TS측 과전류계전기(M,T) 동작시 TS 차단기가 트립된다.

수전측 무전압 신호라인을 고속선 전철제어반과 연결하였다. 수전1호와 수전2호 라인이 동시에 무전압 동작시 급전측 차단기가 모두 개방되어야 하며, 이에 고속선 FEE DER 또한 이러한 기능을 수행하기 위해서는 기존 전철제어반의 무전압 신호라인을 고속선 전철제어반에 연결 작업을 시행하여야 하여야 한다.

## 2. 익산 변전소 구간 실증실험

### 2.1 비율차동계전기 관련 실험 및 분석

익산 변전소 구간 비율차동계전기 오동작이 빈번히 발생하고 있다. 그 증상은 고속선 F3, F4측을 급전한 상태에서 KTX가 운행하여 부하가 발생되었을 때 비율차동계전기가 PICK UP되거나 TRIP되는 동작이 발생하였다. 익산변전소 현장의 변류기 결선의 개략도는 그림 26에서 나타내었다.

고장 구간의 변류기 권수비는 기존설비와 동일하게 신설설비 또한 800:5를 적용하였다. 기존 변류기 결선에 신설분의 변류기결선을 병렬로 접속하여 결선을 하고 계전기의 이벤트 분석결과와 벡터도를 확인하였다. 그림 27은 익산변전소 구간의 비율차동계전기 오동작 관련한 벡터도를 보여주고 있다.

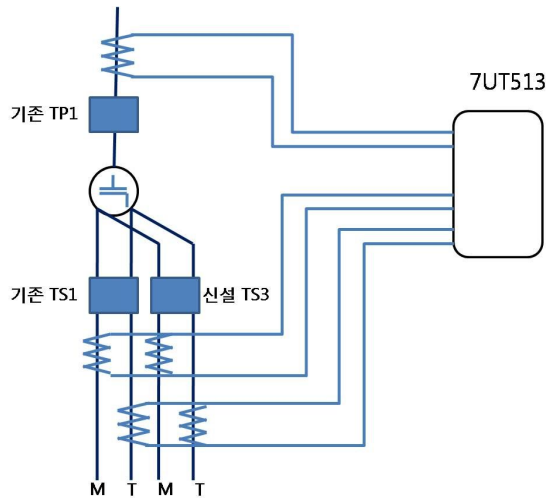


그림 27 익산변전선 CT결선도

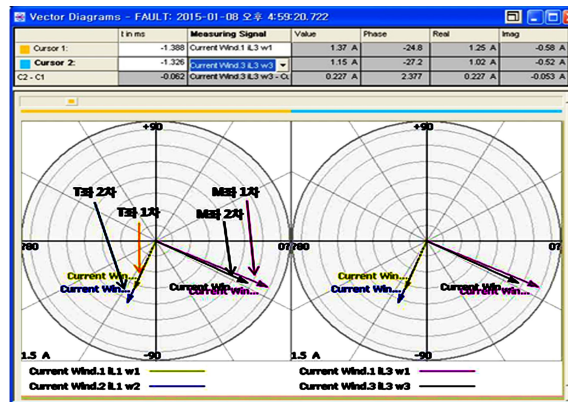


그림 28 익산변전선 벡터도

벡터도에서 M-T상이 바뀌거나  $k, 1$  이 바뀌면 상쇄되어 오히려 2차측 전류가 작아지며 벡터도로 확인한 결과 2차측 M상과 T상이 바뀌거나  $k, 1$ 이 바뀌지는 않는다. Wind 1은 1차권선 (변압기 1차측), Wind 2는 2차권선 (변압기 2차 T좌), Wind 3은 3차권선 (변압기 2차 M좌)이며  $iL1$ 은 A상 전류,  $iL2$ 는 B상 전류,  $iL3$ 는 C상 전류를 나타내고 있다. 또한 Wind1.  $iL1$ 은 T상 1차측, Wind2.  $iL1$ 은 T상 2차측, Wind1.  $iL3$ 는 M상 1차측, Wind3.  $iL3$ 는 M상 2차측을 나타내고 있다. 익산변전소 구간의 전류를 확인한 결과 각각의 전류파형은 정현파를 나타내고 있으며, 각상별 위상은 정상이다. 그림 28은 익산변전소 변전선의 전류파형을 나타내어주고 있다.

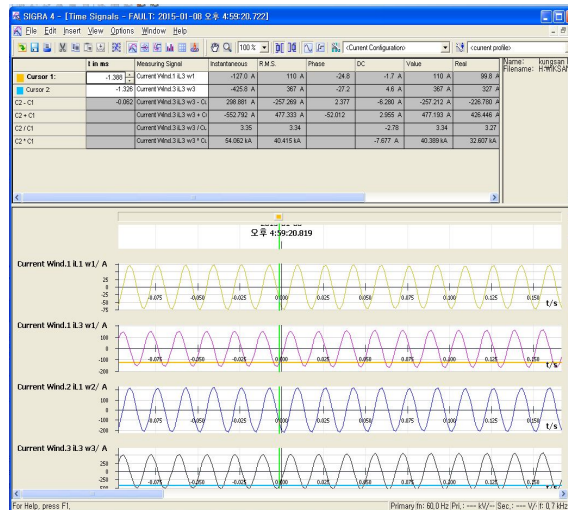


그림 29 익산변전선 전류파형도

표 7 각 사고별 전류크기 및 차전류

일시	M좌					T좌				
	1차 전류	2차 전류	2차 1차환산	위상차	차전류 (%)	1차 전류	2차 전류	2차 1차환산	위상차	차전류 (%)
15.01.08-16:01:04	47.9	195	69.6	거의 동일	8.6	19.9	58.2	20.8	거의 동일	0.4
15.01.08-16:01:04	70.3	288	102.9	거의 동일	12.9	20.0	59.3	21.2	거의 동일	0.5
15.01.08-16:35:15	103.0	354	126.4	거의 동일	9.3	23.1	68.6	24.5	거의 동일	0.6
15.01.08-16:35:20	121.0	399	142.5	거의 동일	8.5	39.6	119	42.5	거의 동일	1.2
15.01.08-16:40:26	125.0	410	146.4	거의 동일	8.5	102.0	302	107.9	거의 동일	2.3
15.01.08-16:59:15	117.0	490	175.0	거의 동일	22.9	50.0	149	53.2	거의 동일	1.3

익산 변전소 구간의 각 비율차동 계전기의 오동작 사고별 전류크기와 차전류를 계산하여 표 7에 나타내었고, 각 오동작 사고별 분석을 통하여 오동작 사고를 개선하고자 한다.

익산 변전소 오동작 사고별 분석내용은 다음과 같다.

첫째, 익산변전소에서 서울방면(T좌)으로는 기존선 F1과 F2가 고속선 F1과 F2가 묶

여있어 기존선 F1, F2를 투입하여 급전하고 있다.

둘째 서울방면(T좌)에 KTX의 부하가 발생시 “87”은 동작하지 않음을 확인할 수 있다.(T좌측 1차 전류와 2차의 1차 환산전류가 거의 동일하게 나타남)

셋째 광주방면(M좌)에 KTX의 부하 발생시 고조파 전류가 발생하여 “87”이 동작함을 확인할 수 있다.

넷째 “87”이 동작하는 이유는 1차측 전류에 비하여 2차의 1차 환산전류가 약 1.2~1.5배 정도 많은 전류가 검출되어 동작한다.

다섯째 2차측 전류가 약 1.2~1.5배 정도 많이 검출되는 이유는 단정지을 순 없지만 GIS CT비의 이상으로 판단된다. (기존 설비(현대)와 신설설비(LS산전)중 어떠한 것인지 알 수 없음)

## 2.2 실증실험 결과 고찰

과전류 계전기 2차측 변류기 결선 변경 전차선에서 전동차 운행에 따른 부하가 발생하였을 때 AT변압기를 통하여 흡상되게 되어있다. 익산변전소의 경우 하나의 메인변압기 2차측에서 고속선과 기존선 각각의 차단기를 두고 있는 특이한 형태의 급전방식으로 그림 29와 같은 CT결선도와 그림 30과 같은 과전류 결선도를 나타내었다. 이로 인해 고속선에 부하가 발생하였을 때 고속선에 있는 AT변압기로만 흡상이 되어야 하나 중성선이 고속선과 기존선이 서로 연결되어 있어 부하가 기존선에 있는 AT변압기로도 흡상이 된다. 이렇게 기존 선에 흡상된 전류는 기존선 TS1을 통하여 다시 고속선 방향으로 흘러가게 되며, 이로 인하여 고속선에는 TS3에서는 기차부하로 발생된 전류와 기존선의 AT변압기로 흡상된 전류까지 합쳐져 흐르게 된다.

즉, TS3에서는 정상적인 전류외에 기존 선에 있는 AT변압기에서 흡상된 전류가 더해져 과전류 계전기가 동작할 수 있는 우려가 있다.

이에 기존 선에 흡상된 전류를 없애주기 위해서는 그림 31과 같이 차동결선하여 기존 TF측 전류만을 감시하여 계전기를 동작시키는 것이 아니라 AT와 TF를 차동 결선해 줌으로서 기존선에서 흡상된 전류를 상쇄시킬 수 있다.



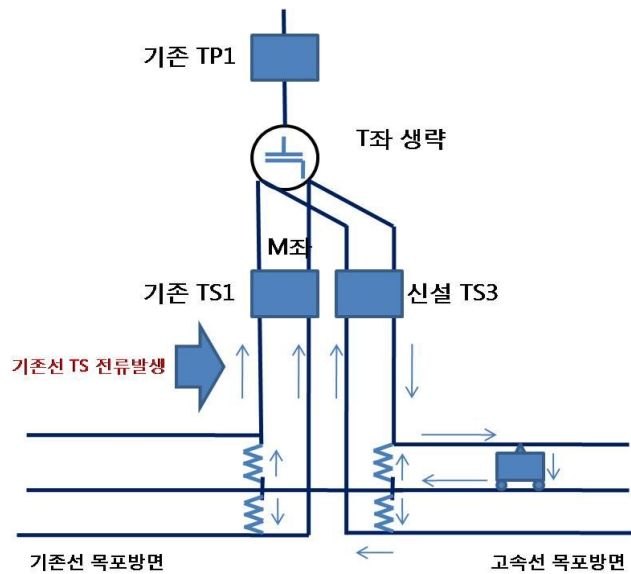


그림 30 익산변전소 TS측 CT결선도

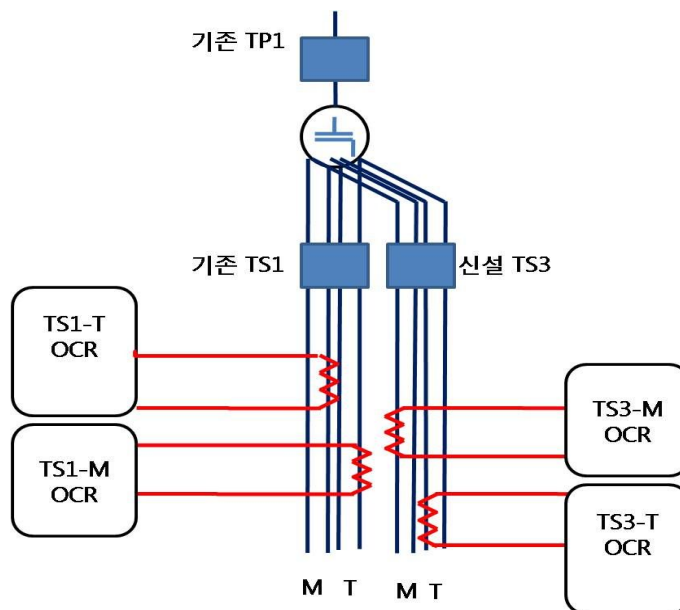


그림 31 익산변전선 과전류계전기 결선도

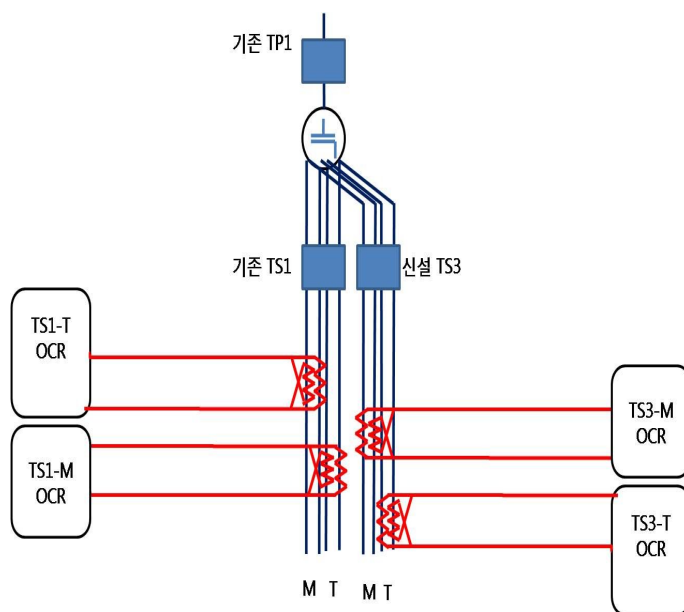


그림 32 익산변전선 과전류계전기 변경 결선도

## IV. 결 론

본 논문에서는 철도공사에서 운용중인 전기철도 수전 전원용 스코트결선 변압기의 내부고장 검출장치로 비율차동계전기의 문제점을 파악하고 비율차동계전기의 차전류의 고조파 영향을 분석하고 개선 방안을 제시하고자 하였다.

따라서, 노안 변전소와 익산 변전소 구간의 변압기 고장 검출용 비율차동계전기의 실증 사례를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 노안 변전소 변압기 보호용 비율차동계전기의 고장점 계전기 전류를 분석한 결과 고속선 2차측 전류가 급전선 1차측 전류보다 약 18%이상 검출되었고 급전측에서는 전류가 검출되지 않음을 확인하였다.

둘째, 고속선 2차측에서 전류가 검출된 이유는 고속선에 열차의 운행으로 인한 부하의 발생으로 기존선으로 부터 흡상되는 전류로 인하여 변압기 2차측 전류가 높게 검출됨을 알 수 있었다.

셋째, 이러한 현상을 개선하기 위하여 급전선과 동일하게 AF와 TF의 CT를 차동결선 함으로써 흡상된 전류를 상쇄할 수 있음을 확인 하였다.

넷째, 익산변전소의 경우 하나의 메인 변압기 2차측에서 고속선과 기존선 각각의 차단기를 두고 있는 특수한 형태의 급전방식으로 고속선에 부하가 발생시 중성선이 고속선과 기존선이 상호 연결되어 있어 기존선에 있는 AT변압기에 흡상된 전류와 TS3에서 기차부하로 발생된 전류와의 합이 흐르게 됨을 확인하였다.

다섯째, 따라서 이러한 현상을 개선하기 위해서 기존 TF측 전류만을 감시하여 계전기를 동작시키는 것이 아니라 AT와 TF를 차동 결선향으로써 기존선에서 흡상된 전류를 상쇄시킬 수 있음을 확인하였다.

## 【참고문헌】

- [1] 이길로, “철도신호설비의 낙뢰방호시스템에 관한 연구” 조선대학교, 2015
- [2] 이동욱, “전력계통의 안정적인 고조파 전압 유지를 위한 수용가 고조파 전류 관리 기법에 관한 연구” 홍익대학교 대학원 2014
- [3] 이재운 “변압기 보호용 비율차동계전기의 고조파 영향에 관한 연구” 홍익대학교 대학원, 2015
- [4] 이경민 외 1 “발전기의 복합형 디지털 보호계전기” 대한전기학회 전력기술부문회 춘계학술대회 논문집, 2014.11, 262-264
- [5] 양승오 “변압기 보호시스템”, 한국열병합발전협회, 열병합발전 Vol.28, 8-16, 2002년 7월
- [6] 원찬희 “SVC를 이용한 AC 전기철도의 전압 불평형에 대한 보상 연구“ 서울과학기술대학교 철도전문대학원, 2014
- [7] 이남호 “Full 디지털변전소 구축을 위한 성능 검증에 관한 연구” 대한전기학회 학술대회 논문집 , 2015.7, 555-556
- [8] 김수환 “변압기 보호용 전류비율차동 계전기의 동작영역 설정방법” 전기학회논문지 60(1), 2011, 8-13
- [9] 정현기외 3, “직류전기철도에서 RESS 적용에 따른 가선전압 측정 및 분석” 한국철도학회 2014 년 춘계학술대회, 2014
- [10] 김경철 외 5 “변압기 보호용 비율차동계전기의 고조파 영향에 관한 연구” 조명·전기설비학회논문지 제28권 제6호, 2014.6, 99-105
- [11] 창상훈 “전기철도차량 주변압기의% 임피던스에 따른 차단기 개폐시 과도특성 분석” 전기학회논문지 제63권 제5호, 2014.5, 719-725

## 감사의 글

어느덧 짧지 않은 2년의 대학원 생활을 마무리하며 지난 시간들을 돌이켜보니 많은 아쉬움과 후회가 남습니다. 학업적 성취에 있어서의 아쉬움만이 아닌, 고마운 많은 분들께 감사의 마음을 제대로 전하지 못했기에 더욱 그러한 것 같습니다.

이 기회에 직·간접적으로 힘이 되고 방향을 잡아주셨던 많은 분들께 감사의 말씀을 전하고자 합니다.

먼저 대학원에 발을 들여놓도록 이끌어 주시고 노력하신 우리 회사에서는 소장님이시고, 학교에서는 교수님이신 “주위사람이 행복해야 내가 행복하다” 시는 박채옥 교수님의 격려와 노고에 심심한 감사를 표하며, 본 논문이 완성되기까지 세심한 지도와 많은 격려로 이끌어 주신 조금배 지도교수님께 진심으로 감사드립니다.

또한 논문 심사 과정에서 아낌없는 지도로 많은 가르침을 주신 이우선 교수님께도 감사드리며 매 학기마다 큰 열정으로 심도 있는 강의를 해주신 최효상 교수님, 김남훈 교수님을 비롯한 전기기술융합공학과 교수님들께도 감사드립니다.

또한 항상 잘할 수 있다 는 응원과 격려로 힘을 주신 전기기술융합공학과 정현숙 선생님께서도 감사의 말씀을 전합니다.

더불어 부족사람을 남편이라고 믿고 따라주며 응원해주는 남향미, 항상 열심히 노력하는 우리아들 승기, 밝고 건강하게 잘 자라고, 귀여운 애교로 생활에 활력을 주는 우리 딸랑이 아름이와 기쁨을 함께 하고자 합니다.

마지막으로 오늘이 있기까지 많은 가르침과 도움을 주신 모든 분들께 진심으로 감사드리며 항상 건강하시고 행복하시기를 기원합니다.

2015년 12월

박희은 올림