



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](#)

2023年 8月

碩士學位論文

일반철도 6.6kV 비접지 고압
배전계통의 방향성 지락계전기에
관한 연구

朝鮮大學校 産業技術創業大學院

電氣技術融合工學科

崔 喆 雄

일반철도 6.6kV 비접지 고압
배전계통의 방향성 지락계전기에
관한 연구

A Study on the Directional Ground Relay in
the 6.6 kV Ungrounded High-Voltage
Distribution System for General Railway

2023年 8月 25日

朝鮮大學校 産業技術創業大學院

電氣技術融合工學科

崔 喆 雄

일반철도 6.6kV 비접지 고압
배전계통의 방향성 지락계전기에
관한 연구

指導教授 金 南 勳

이 論文을 工學 碩士學位 申請論文으로 提出함.

2023年 04月

朝鮮大學校 産業技術創業大學院

電氣技術融合工學科

崔 喆 雄

崔喆雄의 工學碩士學位論文을 認准함

審査委員長 朝鮮大學校 教授 조 금 배 印

審査委員 朝鮮大學校 教授 김 남 훈 印

審査委員 朝鮮大學校 教授 최 연 옥 印

2023年 5月

朝鮮大學校 産業技術創業大學院

목 차

ABSTRACT

I. 서론	1
II. 이론	3
A. 보호 계전 방식	3
B. 중성점 접지 방식과 지락고장 계산	14
C. 철도 전기공급 계통의 구성	19
III. 고장사례 분석	21
A. 일반철도 배전선로 지락과전류계전기 오동작 사례	21
B. 오동작 원인 분석 및 검토	24
C. 고장파형 분석에 의한 지락과전류계전기 동작 해석	26
IV. 결과 및 고찰	39
A. 지락보호 계전방식 개선 방법 및 대상개소 선정	39
B. 방향성 지락계전기 동작시험 측정 결과	41
V. 결론	51
【참고문헌】	52

그림 목 차

그림 1. 보호 계전 시스템의 구성 개요도	4
그림 2. 보호 계전 시스템의 역할과 기능	5
그림 3. 보호 계전 시스템의 전기 회로 구성 예	5
그림 4. 전력 계통의 보호단계	6
그림 5. 계전기의 한시 특성	9
그림 6. 반한시 동작특성(IEC 특성식 적용)	9
그림 7. 잔류회로 결선 및 지락과전류계전기 동작원리	10
그림 8. 방향성 지락계전기(DGR) 동작특성 곡선	11
그림 9. 1선 지락 시 건전상 전위 상승	18
그림 10. 정상적일 때와 1선 지락 시 벡터도	18
그림 11. 한국철도공사 광주지역관리단 관내 고압 배전선로 계통도(예시)	20
그림 12. 광주송정DS 6.6kV 고압 배전선로 단선결선도	21
그림 13. HV3-8반 고장파형(Fault-wave)	26
그림 14. HV3-8반 고장기록(Fault Log)	27
그림 15. HV3-8반 고장파형 분석 영상전류($3I_0$) 및 영상전압($3V_0$) 벡터도	28
그림 16. HV3-2반 고장파형(Fault-wave)	29
그림 17. HV3-2반 고장기록(Fault Log)	30
그림 18. HV3-2반 고장파형 분석 영상전류($3I_0$) 및 영상전압($3V_0$) 벡터도	31
그림 19. HV3-3반 고장파형(Fault-wave)	32
그림 20. HV3-3반 고장기록(Fault Log)	33
그림 21. HV3-3반 고장파형 분석 영상전류($3I_0$) 및 영상전압($3V_0$) 벡터도	34
그림 22. HV3-7반 고장파형(Fault-wave)	35
그림 23. HV3-7반 고장기록(Fault Log)	36
그림 24. HV3-7반 고장파형 분석 영상전류($3I_0$) 및 영상전압($3V_0$) 벡터도	37

그림 25. PT 결선 변경 도면 및 시공 사진 40

그림 26. 8개 배전반 DGR 동작 범위 벡터도 41

표 목 차

표 1. 방향성 지락계전기(DGR) 동작 조건 1,2,3	11
표 2. 중성점 접지 방식의 비교	14
표 3. HV3-8반 S상 지락 시 HV3-2반(51G) 동시 트립('13.12.25. 10:23)	22
표 4. HV3-2반 R상 지락 시 HV3-3·HV3-7반(51G) 동시 트립('14.02.15. 09:00)	22
표 5. HV3-2반 S상 지락 시 HV3-3·HV3-7반(51G) 동시 트립('14.09.11. 11:35)	22
표 6. HV3-8반 T상 지락 시 HV3-2·HV3-3·HV3-7반(51G) 동시 트립('20.08.17. 09:38)	23
표 7. HV3-8반 T상 지락 시 HV3-2·HV3-3·HV3-7반(51G) 동시 트립('21.08.05. 11:10~12)	23
표 8. 고장선로 및 非고장선로 배전반 차단기 동작여부 및 동시 트립 전류값	24
표 9. 非고장선로 중 부동작 배전반 차단기 동작여부 및 전류값	25
표 10. 1선 지락 고장 전과 후의 지락과전류계전기(OCGR) 동작 전류값 비교	25
표 11. HV3-8반 OCGR 정정값	27
표 12. HV3-8반 고장파형 분석 수치(상전류, 상전압, 영상분)	28
표 13. HV3-2반 OCGR 정정값	30
표 14. HV3-2반 고장파형 분석 수치(상전류, 상전압, 영상분)	31
표 15. HV3-3반 OCGR 정정값	33
표 16. HV3-3반 고장파형 분석 수치(상전류, 상전압, 영상분)	34
표 17. HV3-7반 OCGR 정정값	36
표 18. HV3-7반 고장파형 분석 수치(상전류, 상전압, 영상분)	37
표 19. 방향성 지락계전기(DGR) 동작각도 및 동작범위	41
표 20. HV3-1반 보호계전기 측정기록부	42
표 21. HV3-2반 보호계전기 측정기록부	43

표 22. HV3-3반 보호계전기 측정기록부 44

표 23. HV3-4반 보호계전기 측정기록부 45

표 24. HV3-5반 보호계전기 측정기록부 46

표 25. HV3-6반 보호계전기 측정기록부 47

표 26. HV3-7반 보호계전기 측정기록부 48

표 27. HV3-8반 보호계전기 측정기록부 49

ABSTRACT

A Study on the Directional Ground Relay in the 6.6 kV Ungrounded High-Voltage Distribution System for General Railway

Choi, Cheol-Woong

Advisor: Prof. Kim, Nam-Hoon, Ph.D.

Department of Electrical Technology Convergence Engineering,
Graduate School of Industrial Technology and Entrepreneurship,
Chosun University

The power substation facilities and distribution line power systems of Korea Railroad Corporation (KORAIL) is a system in which power is supplied from the Korea Electric Power Corporation (KEPCO) to two lines (main and reserve) of extra-high voltage (22.9 kV), transforms it, and sends it back to each intermediate station as two lines (main and reserve) of high voltage (6.6 kV).

When short-circuit and ground fault accidents occur in these power substation facilities and distribution line power systems, overcurrent damages electrical equipment and causes facility malfunctions in the power system. These accidents can threaten the safety of customers and the safe operation of trains, so it is necessary to quickly eliminate the accidents (faults) and strive for proper protection of the substation facilities and distribution line systems.

This thesis analyzes the causes of malfunction of the ground fault protection relay in the 6.6kV ungrounded high-voltage distribution system of the general railway operated by the Gwangju Regional Management Team of the KORAIL. It also identifies the problems of the existing over current ground relay (OCGR), proposes a method to compensate it, and improves it

to a directional ground relay (DGR) system that is most suitable for the electric railway environment. As a result of the improvement, there have been no longer accidents (faults) that simultaneously trip to adjacent normal lines in the ground fault accident, and the ground protection relay system has been further improved. Based on this thesis, it is expected that it will greatly contribute to improving the stability of electric railway power facilities, customer safety, and train safety in the future.

I. 서론

고도의 산업발전은 도시인구의 집중을 초래하여 이로 인한 수송수요가 급격히 증가함에 따라 교통문제가 중요하게 부각되고 있으며, 환경 친화적이면서 에너지 이용 효율이 높고 대량 수송이 가능한 전기철도에 관심이 집중되고 있다[1].

최근 국내에서 고속전철의 건설, 기존 철도의 전철화 및 신설 철도의 전철화, 대도시의 도시철도와 경량철도의 건설 등이 지속적으로 진행되고 있어 전기철도에 대한 업무가 급격히 늘어나고 있다.[1] 철도에서 전기설비 비중이 커진 만큼 전력 공급의 안정성과 신뢰성이 중요해졌으며, 전기설비 없이 열차 운영을 할 수 없는 정도이다. 이에 따라 철도신호 및 통신, 역사 내 조명, 전열, 동력설비(E/V, E/S) 등의 전원 공급설비인 수·변전설비 및 고압 배전선로의 중요성도 같이 높아지고 있다.

현재 철도노선은 복선 이상의 구간에서는 고압 배전선로가 대부분 2회선 이상으로 구성되어 있지만, 단선 구간의 경우 1회선으로 구성되어 있다. 1회선으로 구성된 개소의 고압 배전선로 고장이 발생하면 안전한 열차 운영을 못하거나 열차정비 등 유지보수 업무에 차질이 발생한다[2].

수·변전설비 및 고압 배전선로의 안정적인 전력 공급을 위해서는 보호 계전 방식의 시스템을 적용하여 사고 발생 시 사고를 신속히 검출하고, 원인을 신속히 제거해야 한다. 일반적으로 전기설비의 사고에는 단락사고 및 지락사고, 단선사고, 과부하, 기계적 소손 등이 있으며, 이 중에서도 단락 및 지락사고가 가장 높은 전기설비 사고의 원인이다[3].

고압 배전선로에 단락 및 지락사고가 발생할 경우, 이를 방치하면 전기설비의 절연 파괴 및 주변의 설비까지 영향을 주어, 역사 내 전기설비의 고장 및 작업원과 철도 이용 고객의 감전, 화재 등이 발생한다. 이는 고객의 안전과 열차의 안전 운영을 위협할 수 있으므로 신속히 사고를 제거하여야 하며, 고압 배전선로 계통의 적절한 보호를 위해 노력하여야 한다[3].

철도 6.6kV 배전선로 비접지 공급계통에서 사용하는 지락사고 검출방법은 지락 과전류계전기(Over Current Ground Relay, OCGR)이며, 이는 1선 지락고장 발생 시 사고가 발생한 배전반만 신속하게 계통에서 분리시킬 뿐만 아니라, 건전상 다른 배전반도 동시 트립시켜 공급계통 일부가 단전되는 문제점이 여러번 발생하였다. 이는 현재 고압 배전선로 보호계통의 한계를 보여준다. 이 문제점을 해결하기

위해서는 지락사고 검출시스템을 지락과전류계전기에서 영상전류의 크기로만 동작하지 않고, 영상전류가 어느 방향으로 흐르고 있는가를 판정하여 보호계전기 오동작을 방지할 수 있는 방향성 지락계전기(Directional Ground Relay, DGR)를 적용하면 가능할 것으로 판단하였다.

본 논문에서는 일반철도 6.6kV 비접지 고압 배전계통의 지락사고 검출시스템을 보완하기 위해 지락과전류계전기 운용 시 발생할 수 있는 고질적인 문제점과 한계를 확인하고, 방향성 지락계전기 채용에 대한 실험과 분석을 통하여 한층 더 보호계통의 신뢰성을 높이고, 철도현장에 가장 적합한 보호계통 방법을 제안하고자 한다.

II. 이 론

A. 보호 계전 방식

1. 계통 보호의 목적

전력 계통에는 수·변전설비 및 배전선로가 서로 복잡하게 연계되어 있기 때문에 전력 계통의 어느 지점에서 고장이 발생했을 경우, 빠르게 이 고장 구간을 계통으로부터 분리키지 않으면 과도한 고장 전류가 흐르게 되고, 이상전압이 발생하거나 위상이 변동되어 전력설비는 크게 손상될 뿐만 아니라, 인접 구간으로 과급되어 고장 사고의 범위가 확대되어 나간다[4]. 따라서 수·배전선 및 변압기, 부하 설비 등 모든 전력 설비에는 그 설비의 이상상태를 항상 감지하고 고장이 발생될 때에는 고장을 검출하여 그 설비를 전력 계통으로부터 빠르게 분리시키는 보호 계전 설비를 갖추어서 고장이 발생한 선로 구간 또는 기기는 가능한 한 빠르게 계통으로부터 분리해서 고장을 제거해 주도록 하고 있다[4].

이 경우 자동적으로 동작하는 차단기에 의해 고장이 제거되는 것은 물론이지만 고장의 종류와 고장 전류, 고장 전압, 고장점의 위치 등을 확실하게 검출해서 고장 구간을 고속도로 선택 차단하도록 지령을 내리는 등의 계통 보호를 위한 기능을 목적으로 설치된 것이 보호계전기이다. 또한, 이들 계전기를 계통 보호라는 목적을 위해서 어떻게 조합 운용할 것인가 하는 것이 보호 계전 방식이다[5].

사고 제거(보안의 유지)는 과전류나 지락으로 설비가 손상되거나 인명·재산에 위험이 가해지는 것을 방지하는 것으로서 이것은 무엇보다도 신속하게 사고점을 제거함으로써 달성된다[6]. 한편 사고 확대 방지(신뢰도의 유지)는 전력 공급의 안정 확보를 위해 전력 계통이나 전기설비의 사고를 최소한의 과급 범위에 억제해서 정전 범위를 국한시키는 것으로서 신속성은 물론 선택성을 지니게 함으로써 달성된다[6]. 이밖에 계통 사고가 제거된 후에도 계통 상태를 정상 상태로 되돌아갈 수 있도록 자동 재폐로, 자동 동기 투입 등을 실시해서 사고 복구를 신속하게 달성한다는 것도 요구되는 중요한 역할이다[6].

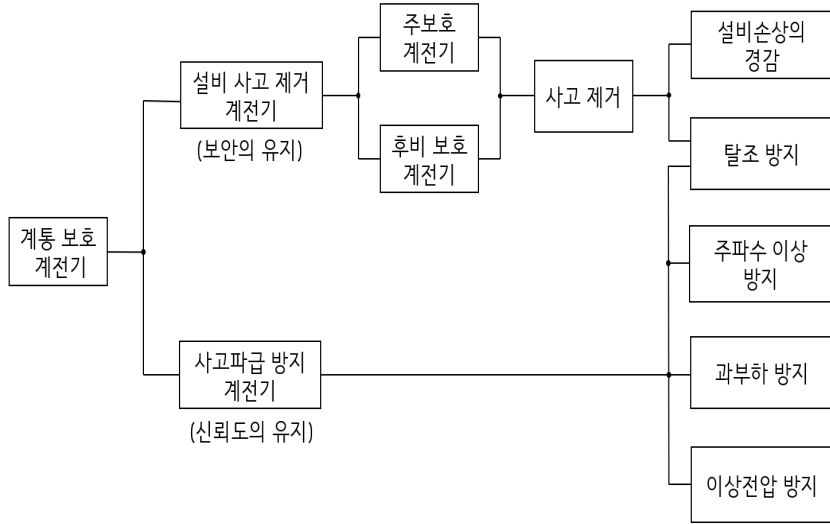


그림 1. 보호 계전 시스템의 구성 개요도

2. 보호 계전 시스템의 역할과 기능

전력 계통은 발전소와 변전소, 송·배전선, 부하가 유기적으로 밀접하게 연관되어 있어서 전력의 생산에서 소비까지 수행하고 있다. 이와 같이 전력 계통의 주요 구성요소는 발전기와 변압기, 모선, 송·배전선, 정지부하, 전동기 등이지만 이들 기기만으로는 안전한 계통운전이 어려우며, 인체의 신경계통과 비슷한 제어장치 및 보호장치, 측정장치 등이 필요하다.

이 중 보호장치인 보호계전기(Protective Relay)는 정확성과 신속성, 선택성의 3요소를 갖춰야하며, 발전기와 변압기, 선로, 모선, 기타 전력계통의 구성요소를 항상 감시하여 이들의 고장이 발생하였거나 계통의 운전이 이상을 감지하면, 즉시 이를 검출 동작하여 고장부분을 분리시킴으로써 전력 공급 지장을 해소하고, 고장기기나 설비의 손상을 최소한으로 축소하는 기능을 갖는다[7].

위와 같은 기능을 발휘하기 위해서는 사고의 검출 및 차단개소를 종합판단하여야 하므로 사고검출에 필요한 계기용 변압기(Potential Transformer, PT) 및 계기용 변류기(Current Transformer, CT) 등의 변성기와 고장을 차단하기 위한 차단장치 등과의 조합이 부득이하며, 이들의 특성과의 협조 검토가 필요하다[7].

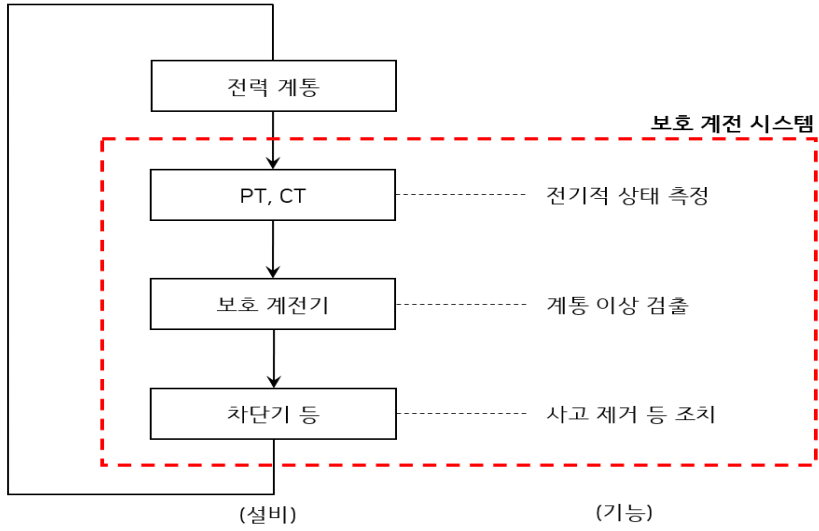


그림 2. 보호 계전 시스템의 역할과 기능

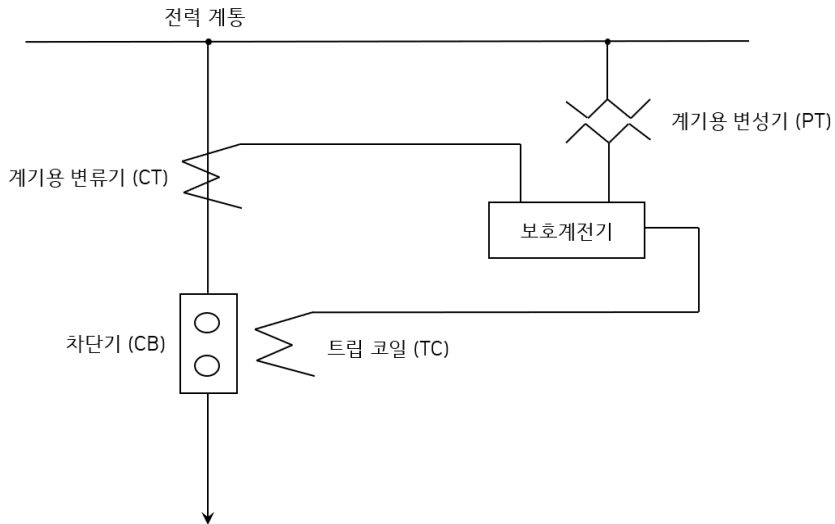


그림 3. 보호 계전 시스템의 전기 회로 구성 예

3. 주보호와 후비 보호

전력 계통에 발생한 사고를 제거하기 위한 보호 계전 방식은 주보호 계전 방식과 후비 보호 계전 방식으로 나눌 수 있다[4]. 주보호는 신속하게 고장 구간을 최소 범위로 한정해서 제거한다는 것을 책무로 하며, 후비 보호는 주보호가 실패하였을 경우나 보호할 수 없을 경우에 적당한 시간을 두고 동작하는 백업(back up) 계전 방식이다[4].

보호의 단계는 사고제거, 설비손상 방지와 사고 범위 축소가 목적인 설비 보호와 사고확대 방지, 이상운전의 해소가 목적인 계통보호로 분류해서 생각할 수 있으며, 사고가 발생하면 주보호가 동작하고 재폐로 동작이 성공하면 안전운행 상태에 자동으로 복구된다[7].

어떤 원인에 의하여 주보호 동작이 실패할 경우 후비보호의 단계로 되어 그 동작에 따라 사고가 제거되며, 후비보호에도 실패할 때에는 사고 제거가 불가능하여 장시간 사고가 지속하게 된다.

주보호가 제대로 동작한 때에도 계통조건에 따라서는 계통분리 혹은 부하의 탈락을 초래하게 된다. 또한 후비보호는 동작시간이 길어, 그 동작에 성공하여도 계통의 불안정으로 이어질 수도 있다.

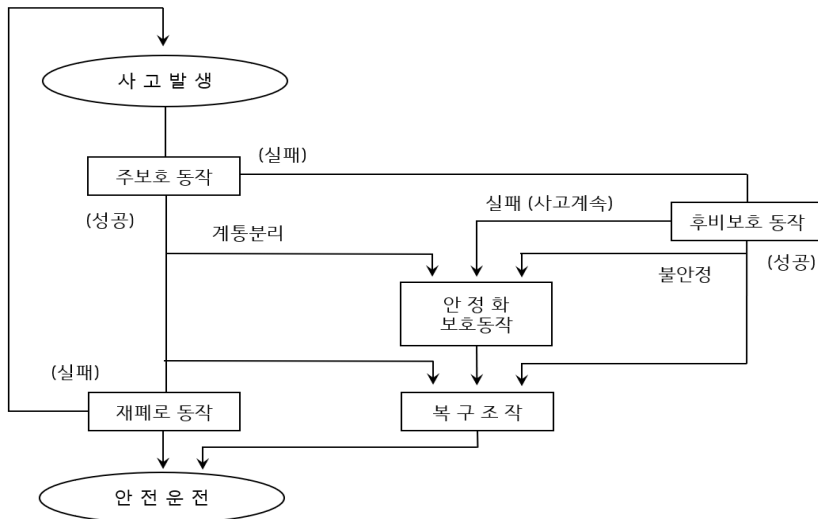


그림 4. 전력 계통의 보호단계

4. 보호 계전 방식의 구비 조건

보호계전기의 임무를 다하기 위하여 적용하는 보호 계전 방식의 구비조건은 다음을 만족하여야 한다[7].

a. 사고범위 한계와 공급의 확보

- 사고가 일어나면 설비의 손상을 적게하고 계통의 안정도를 방해하지 않도록 그 영향을 최소한으로 하기 위해 사고구간을 빠르게 선택 차단하고 다른 건전한 부분의 운전유지를 확고할 수 있어야 한다.

b. 보호의 중첩과 협조

- 인접구간의 보호방식과 협조되며 무보호 구간이 없도록 하며, 보호구간의 사고에 대해서는 오동작이 발생하지 않도록 충분한 신뢰성을 가져야 한다.

c. 후비 보호 기능의 구비

- 주보호 기능과 후비 보호 기능을 갖추고 사고구간의 차단기 및 계전기 등이 불량하여 만일 부동작 할 경우에는 다른 보호장치의 계전기로 사고를 제거할 수 있어야 한다.

d. 재폐로에 의한 계통 및 공급의 안정화

- 주요 송전선은 전력 계통의 안정도 향상을 도모하기 위하여 고속도 재폐로를 행하고 일반 부하선은 정전시간을 줄이고, 자동 복구를 위해 필요에 따라 저속도 재폐로를 실시할 수 있어야 한다.

5. 보호계전기 동작 기구상의 분류

a. 유도형 계전기

- 유도형 계전기는 이동 자계 또는 회전 자계에 의한 유도 작용에 의해서 원판 또는 원통에 생기는 토크(torque)를 사용해서 접점을 개폐하는 구조로써 현재 송전 계통에 사용되는 계전기로써는 이 유도형이 제일 많다[4].

b. 전류력계형 계전기

- 고정 코일과 가동 코일에 전류를 흘려서 양자 사이에 작용하는 토크를 이용하는 구조로써 고속도 동작이 가능하므로 교류 계전기 전반에 사용되고 있다[4].

c. 가동 철심형 계전기

- 가동 철심형 계전기는 전류 코일의 전자력만으로 철심을 운동시키는 전자형과 전자 코일에 흘리는 전류의 극성에 따라서 철판의 흡인력의 방향을 변화시키는 유극형의 두 가지가 있다. 구조는 간단하지만 정밀성이 약간 떨어지기 때문에 보조 계전기로써 사용되고 있다[4].

d. 가동 코일형 계전기

- 가동 코일형 계전기는 가동 코일형 계기와 같은 원리로서 영구 자석의 자계 중에 가동 코일을 회전하도록 한 것이다. 소비 전력은 작지만 토크도 작아서 주로 직류 계전기로써 많이 쓰이고 있다[4].

e. 전자형(정지형) 계전기

- 일찍부터 진공관, 트랜지스터를 사용한 여러 가지 종류의 계전기가 개발 이용되어 왔었다. 그러나 최근에는 마이크로일렉트로닉스의 진보로 소형 경량이면서 성능이 좋은 IC 등의 회로소자가 개발됨에 따라 앞으로는 각종 논리 회로 및 전자 부품을 이용한 고성능의 전자형 계전기가 더욱 더 많이 실용화되어 나갈 것으로 예상되고 있다. 전자형 계전기에는 정류형, 위상 비교형 등이 있다[4].

6. 보호계전기 동작 시간에 따른 분류

보호계전기는 송배전 계통에 고장이 일어났을 경우 신속하게 이것을 검출하는 것이 그 임무이다. 계전기에 정해진 최소 동작값 이상의 전압 또는 전류가 인가 되었을 경우, 그 접점을 닫을 때까지에 요하는 시간, 즉 동작 시간을 한시 또는 시한(time limit)이라고 한다. 여기서 계전기를 동작시키는 최소 전류를 최소 동작 전류라고 한다. 계전기를 한시 특성으로 분류하면 다음과 같다[4].

a. 순한시 계전기

- 정정(set)된 값 이상의 전류가 흐르면 즉시 동작하는 계전기이다. 보통 0.3초 이내에 동작하도록 하고 있다[5].

b. 정한시 계전기

- 정정된 값 이상의 전류가 흘렀을 때 동작 전류의 크기와 관계 없이 항상 정해진 시간이 경과한 후에 동작하는 계전기이다[5].

c. 반한시 계전기

- 동작 시간이 고장 전류의 크기에 반비례하여 동작하는 방식의 계전기이다[5].

d. 반한시성 정한시 계전기

- 고장 전류의 값이 일정한 값 범위까지는 반한시성 특성을 가지며, 그 이상이 되면 정한시 특성을 가지는 계전기이다[5].

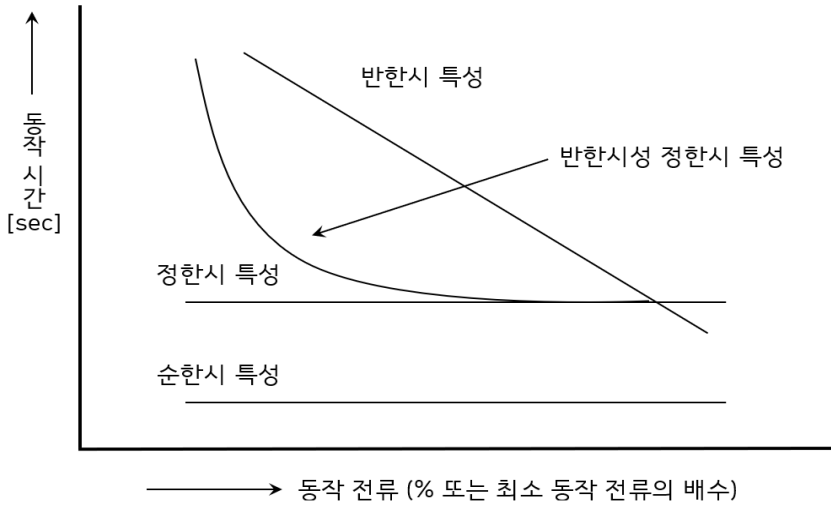


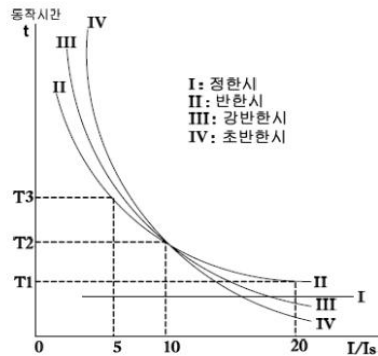
그림 5. 계전기의 한시 특성

$$t = \frac{0.14}{(I/I_s)^{0.02} - 1} \times TD + C \quad \text{: (정)반한시 [SI]}$$

$$t = \frac{13.5}{(I/I_s) - 1} \times TD + C \quad \text{: 강반한시 [VI]}$$

$$t = \frac{80}{(I/I_s)^2 - 1} \times TD + C \quad \text{: 초반한시 [EI]}$$

$$t = \frac{120}{(I/I_s) - 1} \times TD + C \quad \text{: 장반한시 [LI]}$$



t = 동작시간 (Operating Time)
 I = 계전기 입력값 (Operating Value)
 I_s = 계전기 정정값 (Setting Value)
 TD = 동작시간 설정1 (Time Delay)
 C = 동작시간 설정2 (Time Constant)

그림 6. 반한시 동작특성(IEC 특성식 적용)

7. 보호계전기 종류별 분류

계전기를 보호 목적, 즉 용도면에서 간추려서 분류하였으며, 주로 전기철도 수·변전설비 및 배전선로에서 사용하는 계전기의 기능 위주로 다음과 같이 분류하였다.

a. 과전류 계전기(Over Current Relay, OCR, 50/51)

- 동작치(정정치) 보다 높은 전류가 흘렀을 때 이를 검출하여 동작하는 계전기로, 가장 널리 사용되며 설비의 단락보호 및 과부하 보호용으로 사용된다[8].

b. 지락 과전류 계전기(Over Current Ground Relay, OCGR, 50/51G)

- 계통에 지락고장이 발생하여 정정치 보다 큰 지락 전류(영상 전류 성분, $3I_0=I_a+I_b+I_c$)가 흘렀을 때 이를 검출하여 동작하는 계전기다. 이 방식은 고장전류의 크기로만 동작하며, 과전류 계전기보다 동작전류가 작고, 배전선이나 기기의 지락보호에 사용된다[8].

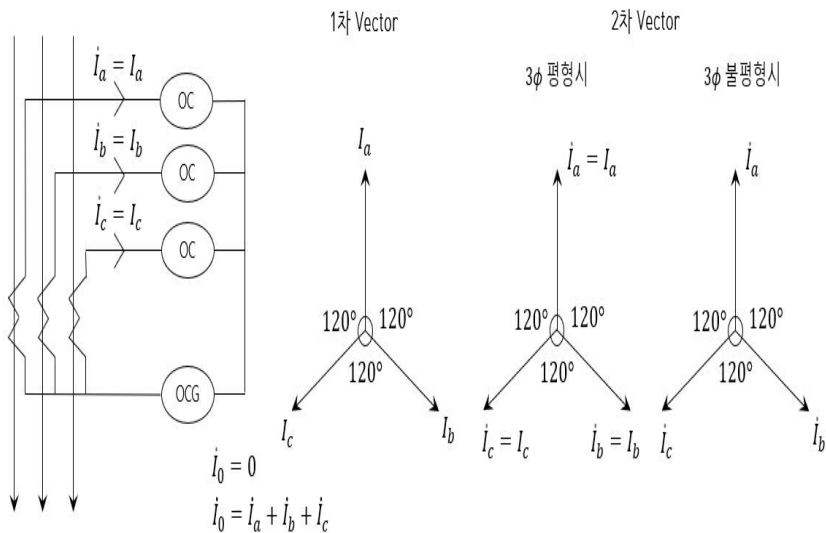


그림 7. 잔류회로 결선 및 지락과전류계전기 동작원리

c. 방향성 지락계전기(Directional Ground Relay, DGR, 67N)

- 접지 계통에서 지락사고 발생 시 영상전압과 영상전류, 위상각으로 동작 여부를 결정하여 사고회선을 선택 차단하는 전력형 계전기로 지락전압은 접지형 계기용 변압기(Ground Potential Transformer, GPT)로 검출하고,

지락전류는 비접지 계통의 지락고장에 비해 크기 때문에 2차측이 5A인 일반 계기용 변류기로 검출한다. (SGR과 차이점) 동작 판별 조건은 첫 번째로 전압 정정치 이상의 전압이 인가 될 때 동작 조건을 만족하고, 두 번째로 전류 정정치 이상의 전류가 인가 될 때 동작 조건을 만족하여야 하며, 마지막으로 전압과 전류조건을 동시에 만족한 상태에서 전압 위상을 0도로 보았을 때 전류의 위상이 기준감도각을 기준으로 좌, 우 90도 안에 들어오면 동작 조건을 만족한다. 즉 전압, 전류, 위상각을 모두 만족해야 동작한다[8].

표 1. 방향성 지락계전기(DGR) 동작 조건 1,2,3

조건1	$V_o > V_{opu}$ (V_o : 영상전압, V_{opu} : Pickup 전압)
조건2	$I_o > I_{opu}$ (I_o : 지락전류, I_{opu} : Pickup 전류)
조건3	정방향 동작 - $\text{Min.Fwd Angle} \geq \text{RCA} \geq \text{Max.Fwd Angle}$ (아래 그림에서 빗금친 영역) 역방향 동작 - $\text{Min.Rvs Angle} \geq \text{Rev RCA} \geq \text{Max.Rvs Angle}$ (Rev RCA는 RCA의 역방향을 의미)

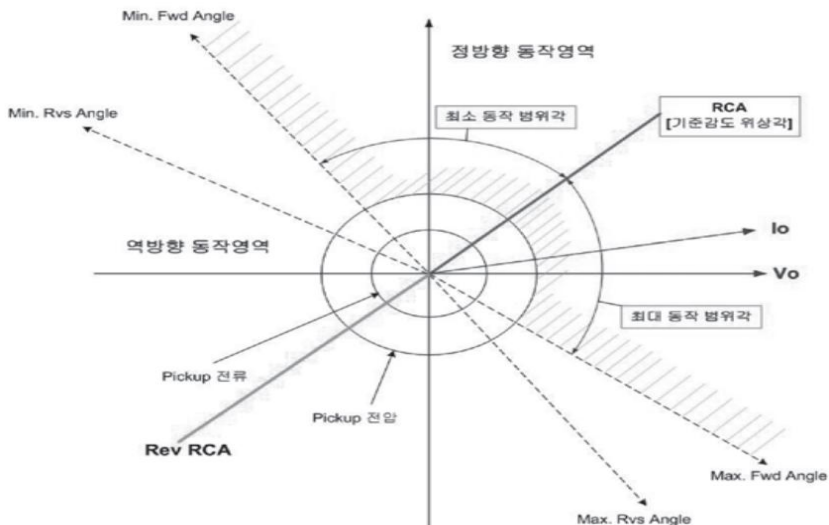


그림 8. 방향성 지락계전기(DGR) 동작특성 곡선

d. 부족 전압 계전기(Under Voltage Relay, UVR, 27)

- 전압의 크기가 정정치 이하로 되었을 때 동작하는 계전기로, 모선 정전 검출과 전압에 민감한 부하를 위한 저전압 보호, 부하 절환시 무전압 검출 등에 사용된다. 상단 차단기가 차단되면 저전압 요소로 하단 전동기 등을 계통에서 분리하며, 복귀 되었을 때 모든 전동기가 자동으로 재기동하는 등의 과도한 돌입전류를 방지한다. 5~15주기의 단시간 저전압에는 동작하지 않도록 하고, 장시간 저전압은 과전류에 의한 기기손손이 발생할 수 있으므로 저전압 보호를 해야 한다[8].

e. 과전압 계전기(Over Voltage Relay, OVR, 59)

- 전압의 크기가 정정치 이상으로 되었을 때 동작하는 계전기로, 과전압은 주로 계통에서 불평형 고장이 발생하거나, 발전기에서 최대부하가 탈락 되었을 때, 저부하 계통 등에서 발생한다[8].

f. 지락 과전압 계전기(Over Voltage Ground Relay, OVGR, 64(59N))

- 비접지 계통에서 지락 발생 시 영상전압($E_g(3V0) = E_a + E_b + E_c$)을 검출하기 위해 사용되는 계전 요소로, 접지형 계기용 변압기의 3차 회로 또는 계기용 변압기 2차 회로를 Open-Delta 접속하여 지락 고장 시 나타나는 영상전압을 검출한다. 방향성이 없어 선택적인 고장 분리가 어려워 경보용으로 주로 사용된다. 3차 권선의 2단자 사이에 한류저항(CLR, Current Limit Resistor)을 삽입하여 영상전압을 얻는다[8].

g. 선택 지락 계전기(Selective Ground Relay, SGR, 67G)

- 비접지 계통에서 지락사고 발생 시 영상전압, 영상전류 및 그 위상각으로 동작여부를 결정하여 사고회선을 선택 차단하는 전력형 계전기로, 지락전압은 접지형 계기용 변압기, 지락전류는 영상 변류기(Zero Current Transformer, ZCT)로 검출한다. 동작 판별 조건은 검출된 지락전압 및 지락전류가 정정된 영상전압 및 영상전류보다 커야 되고, 그 사이 위상각이 정정된 기준 감도 위상각 상하로 보통 $-90^\circ \sim +90^\circ$ 사이일 때 동작한다[8].

h. 결상 계전기(Phase Open Relay, POR, 47P)

- 결상은 결상 계전요소로써 계통에서 3상 전압의 불평형 및 임의 상의 결상 상태를 검출하여 불평형 성분이 정정값 이상이면 차단기를 동작시키는

계전기다. 전력계통에서 1상이 결상되면 불평형 전류가 흐르거나 단상전력이 공급되므로 전력계통에 막대한 피해를 줄 수 있다. 결상의 원인으로는 전선의 단선, 차단기 고장, 전력퓨즈(Power Fuse, PF) 고장 등이 있다[8].

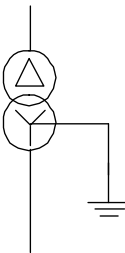
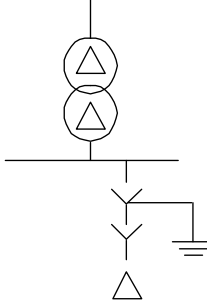
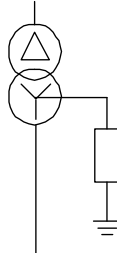
- i. 역상 과전압 계전기(Negative Sequence Over Voltage Relay, NSOVR, 47N)
 - 역상 과전압은 계통의 역상성분을 검출하여 역상성분이 정정값 이상이면 차단기를 동작시키는 계전기로, 역상 과전압 계전요소는 계통의 불평형, 역상, 결상까지도 검출하여 보호할 수 있다[8].

B. 중성점 접지 방식과 지락전류 계산

1. 수배전설비 접지 목적

보통 수배전설비를 접지하는 목적은 크게 3가지 주요한 기능이 있다. 첫째는 인체의 감전 방지다. 둘째는 기기의 손상 방지이며, 셋째는 보호계전기의 확실한 동작에 있다.

표 2. 중성점 접지 방식의 비교

구 분	직접 접지	비접지	고저항 접지
결선도			
지락사고 시 건전상의 전압 상승	작다. 평상 시와 거의 차이 없음	크다. 장거리 송전선의 경우 이상 전압을 발생함	약간 크다. 비접지의 경우보다 약간 작은 편임
절연 레벨, 애자 개수, 변압기	감소시킬 수 있음 최저 단절연 가능	감소 불능 최고 전절연	감소불능 비접지 보다 낮은 편임 전절연
지락 전류	최대	적다, 송전 거리가 길어지면 상당히 큼	중간 정도 중성점 접지 저항으로 달라짐(100~300[A])
보호계전기 동작	가장 확실 (신뢰도 최대)	지락계전기 적용 곤란	확실
1선 지락 시 통신선에 유도장해	최대. 단, 고속 차단으로 고장 계속 시간의 최소화 가능(0.1초 차단)	작다	중간 정도
과도안정도	최소. 단, 고속도 차단 및 고속도 재폐로 방식으로 향상 가능	크다	크다
다중고장에 의 확대 가능성	최소	최대	보통

2. 중성점 접지 방식

계통의 접지방식은 직접접지(다중접지) 및 비접지(GPT접지)방식, 저항접지 방식으로 분류할 수 있으며, 각 방식에 따라 지락전류의 크기와 계산방식이 서로 다르므로 지락전류 계산은 각 방식별로 구분 하는 것이 좋다. 우리나라에서 적용되는 접지방식은 다음과 같다[9].

a. 직접접지 방식

- 이 방식은 대지에 변압기의 중성점을 직접접지 하므로 1선 지락 사고 시 건전상 전압상승이 가장 적어 전력기기의 절연을 확실히 줄일 수 있으며, 지락전류 검출 또한 용이하여 지락사고 시 보호계전기가 빠르게 동작한다[9]. 한편 지락전류가 크므로 지락사고 시 설비사고가 발생하는 경우가 많으며, 통신선에의 유도전압이 높아 유도장해를 일으킬 수 있다[9]. 이러한 이유로 계통은 충분한 절연설계를 실시하여 사고를 과하게 발생시키지 않도록 함과 동시에 혹여나 사고가 발생하면 선로에 유입되는 지락사고 전류의 지속 시간을 최단시간으로 유지하기 위해 확실하고 고속도 선택차단이 가능한 기능을 가진 보호계전기 및 차단기를 채용하는 등의 대책이 필요하다. 주로 765(kV), 345(kV), 154(kV) 송전선로 및 22.9(kV) 배전선로, 저압 계통에 사용한다.

b. 비접지 방식

- 계통을 접지하지 않는 비접지 상태로 운전하는 방식으로 지락사고 시 지락 전류는 충전전류와 접지형 계기용 변압기를 통한 유효전류이며, 수 (A) 정도에 지나지 않는다. 반면 1선 지락 시 건전상의 전위는 $\sqrt{3}$ 배 까지 상승된다.[11] 만약에 이 지락사고 전류가 간헐적으로 발생하거나 계속 흐르도록 방치하면 심각한 과도 이상전압이 대지 간에 발생할 수 있으며, 그 크기는 상전압의 6~8배에 이른다[11]. 이것이 절연을 파괴시키며 동시 다발의 전동기 소손 사고를 발생하는 원인이 된다. 이 과도 이상전압은 계통 Capacitance의 반복 충전 또는 계통 Capacitance와 기기의 Inductance 간의 공진에 의하여 발생된다. 1선 지락 사고가 난 상태로 방치 하면, 두 번째 지락사고 시 Phase - to - Ground - to - Phase Fault가 되어 대전류가 흐르면서 상 과전류 계전기에 의하여 트립 된다[11]. 주로

3.3(kV), 6.6(kV) 계통에서 비접지 방식을 적용하고 있으며, 접지형 계기용 변압기 및 영상변류기를 조합하여 선택 지락 계전기로 지락보호를 하고 있다. 이 방식은 지락사고 시 수 (A) 정도의 작은 전류가 흐르므로 계통에 미치는 영향이 적으며 중요한 부하는 지락사고 시 트립시키지 않고도 운영할 수 있다[9]. 그러나 이 방식은 결선과 극성이 안 맞으면 오동작 또는 부동작하게 되며 접지형 계기용 변압기, 제한(한류)저항 등의 용량이 작아 소손되는 사례가 있기 때문에 이에 대한 충분한 검토가 필요하다. 주로 공장(빌딩) 구내, 전기 철도 역사 전기실 등 6.6, 3.3, 22(kV)에서 사용된다.

c. 저항접지 방식

- 이 방식은 1선 지락전류를 줄이기 위해 저항기를 계통의 중성점에 연결하여 접지하는 방식으로 저항기의 크기를 조절하여 지락사고 시 계통에 흐르는 지락전류의 크기를 조절할 수 있다[9]. 일반적으로 지락전류가 100A 정도까지 흐르도록 조절하는 계통을 고저항 접지 방식이라 하고, 그 이상의 지락전류가 흐르는 계통을 저저항 접지 방식이라 한다[9].

3. 비접지 방식의 지락고장 계산

변압기 결선 방식은 $\Delta-\Delta$ 결선 방식이며, 1선 지락 고장 시 고장점에 흐르는 전류는 다음과 같다.

1선 지락고장 시 지락점에 흐르는 전류는 진상전류(고장상 전압보다 90° 앞선 전류)다. 1선 지락사고가 발생하면 지락전류는 각 상의 정전용량을 통하여 변압기를 거쳐 지락점으로 흐르게 되어 지락전류는 충전전류의 3배가 된다[10].

1선 지락고장 시 고장전류 계산에 사용되는 정전용량(대지정전용량, 자기정전용량)은 다음과 같다.

※ 전제조건 : 선간 전압은 6,600(V), $C_s=0.005(\mu F/km)$, $L=10(km)$, $f=60(Hz)$

$$\begin{aligned}
 \text{※ 1선 지락전류 } I_g &= 3 \times I_c = 3 \times wCE \left(E: \text{상전압} = \frac{V}{\sqrt{3}} \right) \\
 &= 3 \times wC \left(\frac{V}{\sqrt{3}} \right) \times \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} = 3 \times \frac{\sqrt{3}wCV}{3} \\
 &= j\sqrt{3}wCV \times l
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

아래 식에서 선간전압이 나오면 “ $\sqrt{3}$ ”, 상전압이 나오면 “3”이 된다. 비접지 방식인 Δ 결선 방식에서 전압을 높이면 지락전류가 커지고, 거리가 길어도 지락전류가 커지므로 위험하게 된다. 비접지 방식은 20~30(kV) 이하의 단거리, 저전압 송전선로에 사용된다. 우리나라에서는 3.3, 6.6, 22(kV)에서 즉, 대부분 단거리, 저전압에서 사용되므로 일반적으로 1선 지락전류는 0.215(A) 정도로 1(A) 이하이다. 비접지 방식에서는 지락전류 검출이 힘들어서 지락계전기 적용이 어려우며, 통신선에 대한 유도장해가 적다[10].

$$\begin{aligned}
 \text{※ 1선 지락전류 } I_g &= j\sqrt{3}wCV \times l \\
 I_g &= \sqrt{3} \times 2\pi \times 60 [\text{Hz}] \times 0.005 \times 10^{-6} \times 6600 \times 10 [\text{km}] \\
 &= 0.215 [\text{A}] \\
 \text{if: } V &= 6,600 [\text{V}] \Rightarrow 66,000 [\text{V}] : I_g = 2.15 [\text{A}] \\
 l &= 10 [\text{km}] \Rightarrow 100 [\text{km}] : I_g = 21.5 [\text{A}]
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

그림 9에서 볼 수 있듯이 1선 지락고장 시 건전상의 대지전위 상승은 $\sqrt{3}$ 배로 크다. Δ 결선 방식에서는 1선 지락사고가 발생해도 2상의 변압기로 V결선을 하여 3상 전력을 공급할 수 있다[10]. 지락이 발생하지 않았을 때에는 대지와 선간에 전류가 흐르지 않으므로 전위가 잡히지 않다가 1선 지락사고가 발생하면 대지로 전류가 흘러 각 상의 정전용량을 통하여 전류가 흐르게 되고 각 상의 충전전류는 고장점에 모이게 된다. 이 때 각 상의 전압은 대지를 중성점으로 하여 연결되게 된다. 그림 10에서 확인 하듯이 a상은 a-a', b상은 b-b', c상은 c-c'에 전압이 걸리게 된다[10].

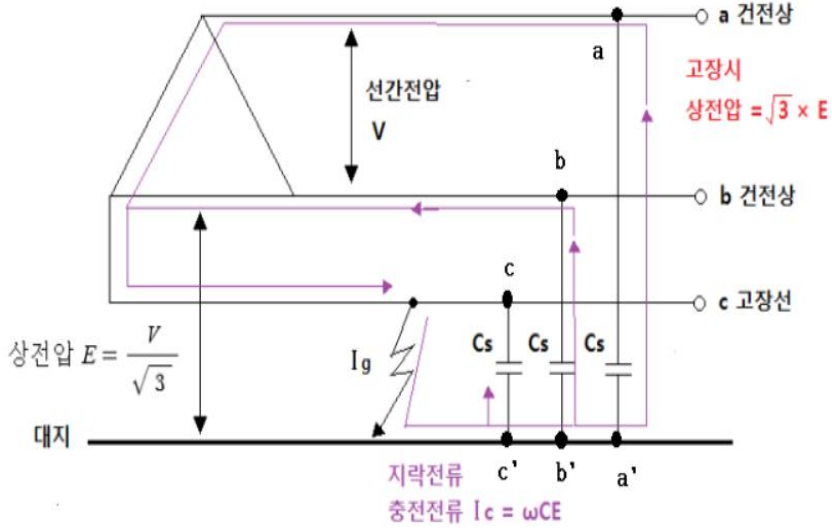


그림 9. 1선 지락 시 건전상 전위 상승

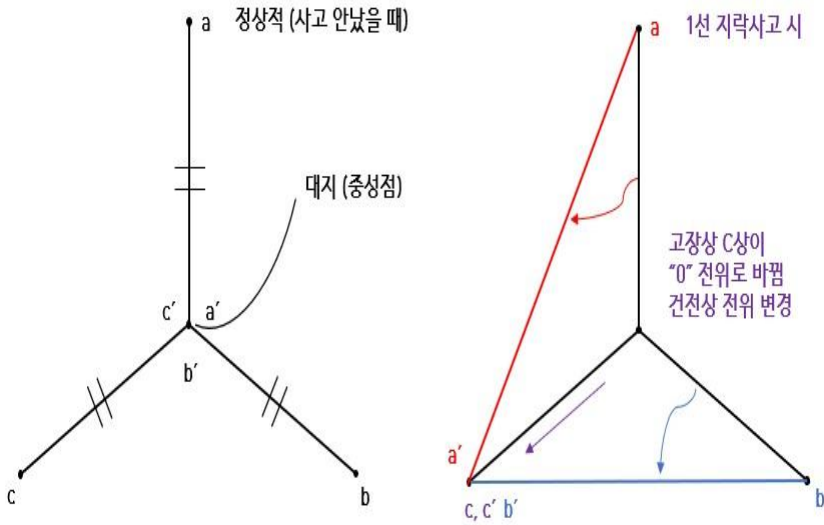


그림 10. 정상적일 때와 1선 지락 시 벡터도

C. 한국철도공사 광주지역관리단 철도 전기공급 계통의 구성

한국철도공사의 철도 전기공급 구성은 크게 송·변전설비, 전차선로, 배전선로의 3가지로 분류할 수 있다. 첫째, 송·변전설비는 한전변전소로부터 특고압(154kV) 전기를 송전선로를 통해 공급 받아 전철변전소에서 전기차량에 필요한 특고압(25kV) 전기로 변성하여 전차선로에 공급하는 설비로, 전압강하 보상 및 장애구분을 위하여 일정 간격에 개폐설비와 변압기를 설치 운용한다[12]. 둘째, 전차선로는 전기차량에 전기에너지를 공급하는 설비로 대부분 교류방식(AC 25kV)으로 운용되고 있으며, 도심 지하철은 통신선로 유도장해 경감을 고려하여 직류방식(DC 1,500V)를 적용하고 있다[12]. 광주지역관리단 관내에는 교류방식을 채용하여 운용되고 있다. 셋째, 배전선로는 각종 통신 및 신호기기, 각 역사 등에 전등, 전열, 동력으로 사용할 수 있게 고압(6.6kV) 또는 특고압(22.9kV)으로 공급하는 선로로 철도 내에서는 열차의 동력원으로 사용하는 전차선로 전원과 별도로 구분하여 운용하고 있다[12].

철도 현장의 송·변전설비 및 전차선로, 배전선로 모두 지중선로와 가공선로를 장소의 특성에 따라 사용하고 있으며, 송·변전설비 및 전차선로는 선로 특성상 가공전선의 비율이 높지만, 배전선로는 지중전선의 비율이 높다[2].

한국철도공사 광주지역관리단 내 고압 배전선로는 고속구간인 호남고속선을 제외한, 호남선 및 광주선, 경전선, 대불선은 공칭전압이 6.6(kV)이다. 선로가 단선인 경전선, 광주선, 대불선은 배전선로가 1회선으로 구성되어 있으며, 복선인 호남고속선 및 호남선은 2회선(주·예비)으로 구성되어 있다. 그림 11은 한국철도공사 광주지역관리단의 일부 고압배전선로 계통 예시이다. 일정 거리 간격마다 수전점을 두고 한전에서 3상 22.9(kV)를 수전 받아 6.6(kV)로 변압한 뒤 고압 배전선로를 통해 각 중간역사에 전원을 공급하는 시스템으로 구축되어 있다. 해당 구간마다 특성에 따라 다소 차이는 있지만, 기본적으로 2회선 중 1회선은 가공, 다른 1회선은 지중으로 구성되어 있다[2].

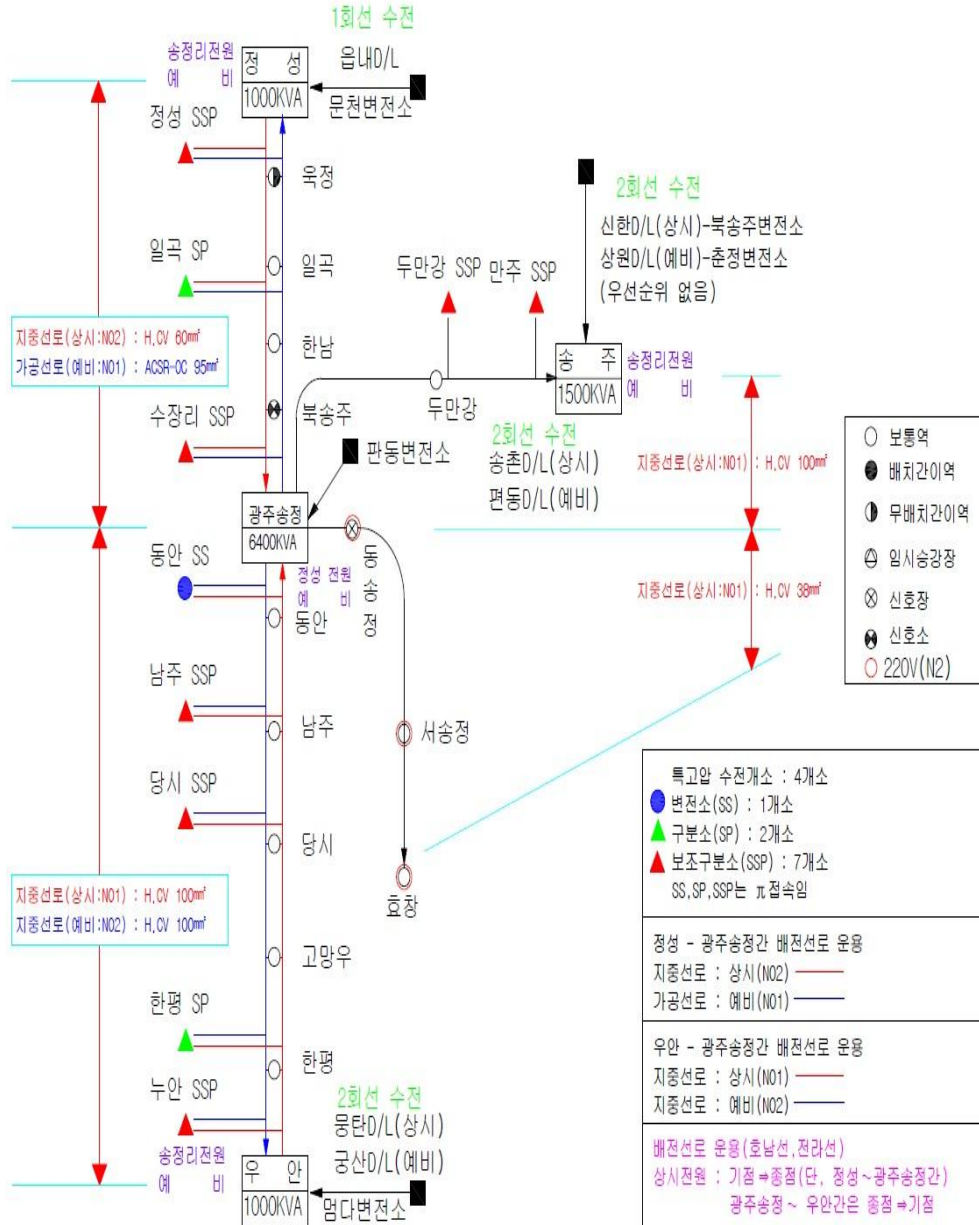


그림 11. 한국철도공사 광주지역관리단 관내 고압 배전선로 계통도(예시)

Ⅲ. 고장사례 분석

A. 일반철도 배전선로 지락과전류계전기 오동작 사례

‘13년~’21년도 호남선 광주송정DS 6.6kV 배전선로 비접지 공급계통에서 지락 고장 발생 시 건전상에서 동시 트립으로 인한 공급계통 일부가 단전되었던 사례가 총 5건 발생하였으며, 이로 인해 철도신호 및 통신, 역사 내 조명, 전열, 동력 설비(E/V, E/S) 등의 전원 공급설비에 지장을 주는 문제가 발생하였다[3].

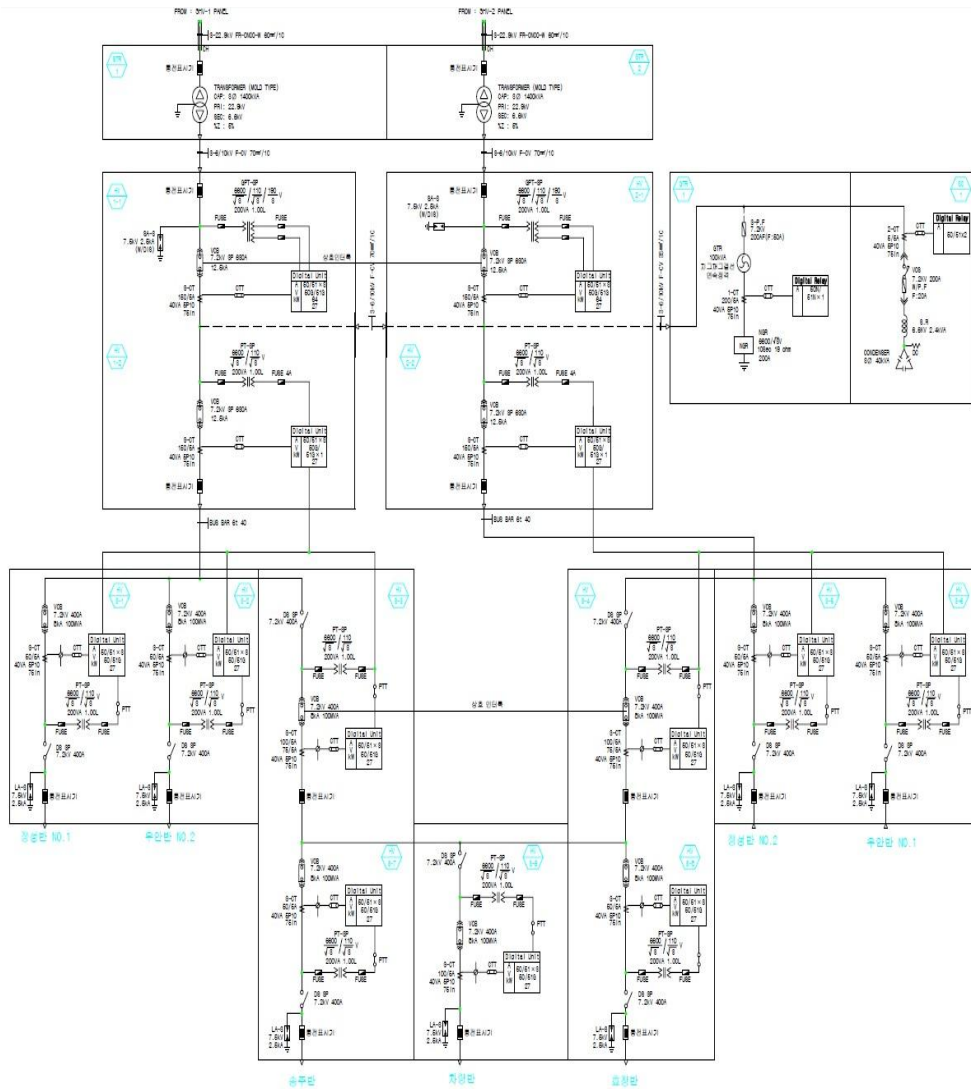


그림 12. 광주송정DS 6.6kV 고압배전선로 단선결선도

다음 표를 통해서 지락과전류계전기 오동작 사례, 선로별 지락과전류계전기 동작시간 및 동작전류 측정값 현황을 알 수 있다.

표 3는 HV3-8반(고장선로)보다 HV3-2반의 영상전류가 크게 형성되고 HV3-2반의 경우 건전상의 전류가 크게 발생하였다.

표 3. HV3-8반 S상 지락 시 HV3-2반(51G) 동시 트립('13.12.25. 10:23)

반 명	전류(A)			
	R	S	T	N
HV3-2	37	10	30	73
HV3-8	8.1	117	11	64

표 4는 HV3-2반(고장선로)보다 HV3-3, HV3-7반의 영상전류가 크게 형성되고 HV3-3, HV3-7반의 경우 건전상의 전류가 크게 발생하였다.

표 4. HV3-2반 R상 지락 시 HV3-3·HV3-7반(51G) 동시 트립('14.02.15. 09:00)

반 명	전류(A)			
	R	S	T	N
HV3-2	71.6	34.6	31.9	18
HV3-3	5.7	18.7	14.7	32
HV3-7	3.5	11.9	9.6	21

표 5는 HV3-2반(고장선로)보다 HV3-3, HV3-7반의 영상전류가 크게 형성되고 HV3-3, HV3-7반의 경우 건전상의 전류가 크게 발생하였다.

표 5. HV3-2반 S상 지락 시 HV3-3·HV3-7반(51G) 동시 트립('14.09.11. 11:35)

반 명	전류(A)			
	R	S	T	N
HV3-2	4.51	36.5	25	21.6
HV3-3	15	2.49	19.77	33.8
HV3-7	10.42	2.073	12.575	23.3

표 6은 HV3-8반(고장선로)보다 HV3-2, HV3-3, HV3-7반의 영상전류가 크게 형성되진 않았지만, 대체로 높게 형성되었고, HV3-2, HV3-3, HV3-7반의 건전상 전류가 크게 발생하였다.

표 6. HV3-8반 T상 지락 시 HV3-2·HV3-3·HV3-7반(51G) 동시 트립
(*20.08.17. 09:38)

반 명	전류(A)			
	R	S	T	N
HV3-2	38.05	46.98	11.84	88.66
HV3-3	25.19	21.7	91.95	59.33
HV3-7	14.66	15.45	2.3	30.81
HV3-8	9.36	5.12	102.52	90.41

표 7은 HV3-8반(고장선로)보다 HV3-2, HV3-3, HV3-7반의 영상전류가 크게 형성되진 않았지만, 대체로 높게 형성되었고, HV3-2, HV3-3, HV3-7반의 건전상 전류가 크게 발생하였다.

표 7. HV3-8반 T상 지락 시 HV3-2·HV3-3·HV3-7반(51G) 동시 트립
(*21.08.05. 11:10~12)

반 명	전류(A)			
	R	S	T	N
HV3-2	33.51	32.07	2.80	58.48
HV3-3	15.12	15.70	64.91	40.26
HV3-7	11.65	11.77	1.82	23.25
HV3-8	8.99	5.61	92.91	80.26

위의 표 3,4,5,6,7을 보면 알 수 있듯이, 고장선로의 지락사고 발생 시 해당 배전반뿐만 아니라 인접 정상선로 배전반까지 지락과전류계전기의 오동작을 유발하여 배전선로 전력 공급계통에 막대한 지장을 초래하는 급전장애를 발생시키는 것을 확인 할 수 있었다. 위 배전선로 전력 공급계통의 급전장애 사례를 바탕으로 광주송정DS 배전선로 시스템을 개선하여 전력 공급계통의 안정성과 유지보수의 신뢰성을 향상시켜야 한다고 판단된다.

B. 오동작 원인 분석 및 검토

1. 영상전류 형성과 건전상 전류 증가

아래 표 8은 총 5건의 고장(장애) 발생 중 ‘21.08.05. 가장 최근에 발생한 보호계전기 동작내역으로 건전상 전류 증가분과 영상전류에 대한 분석 결과이다. 지락고장이 발생한 HV3-8반은 정상적인 영상전류(고장전류)에 의해 보호계전기가 동작하였으나, HV3-3, HV3-2, HV3-7반은 영상전류(불평형전류)에 의한 보호계전기 오동작한 것으로 분석할 수 있다.

더 자세히 살펴보면 HV3-8반은 T상 전원이 지락되면서 T상전류, 영상전류(고장전류+충전전류)가 증가하였으며, HV3-7반은 T상 전류가 지락으로 급감하며, 영상전류(불평형전류+충전전류)가 증가하였다. HV3-3반 T상 전류는 HV3-8반에 의해 증가하였으며, 영상전류(고장전류+불평형전류)가 증가하였다. HV3-2반은 T상 전류가 지락으로 급감하며 영상전류(불평형전류+충전전류)가 증가하였다.

표 8. 고장선로 및 비고장선로 배전반 차단기 동작여부 및 동시 트립 전류값

반 명	차단기 동작여부	전류 증가분		비고
		선(線)	전류(A)	
HV3-8	○	T상 / N(영상)	92.91 / 80.26	고장선로
HV3-7		N(영상)	23.25	
HV3-3		T상 / N(영상)	64.91 / 40.26	비고장선로
HV3-2		N(영상)	58.48	

2. 후비 보호계전기 부동작

아래 표 9는 ‘21.08.05. 발생한 보호계전기 동작내역으로 고장구간 내 보호계전기 부동작한 2개소의 분석 결과이다. 부동작한 이유로 HV3-9반은 구내지중선로 거리가 짧고, HV3-1반은 가공선로이므로 후비보호가 정상적으로 된 것으로 분석할 수 있다.

HV3-9반의 경우 평시 경부하가 3(A) 내외이며, 광주송정역 구내 지중선로로 거리가 짧아 지락과전류계전기가 동작하기 충분한 영상전류(불평형전류+충전전류)의 형성이 어려웠을 것으로 판단할 수 있다. HV3-1반의 경우 가공전선로로 ‘13년~현재

까지 건전상으로써 동시 트립 되지 않았으며, 지중 케이블(H-CV 60SQ)에 비해 가공 배전선(ACSR-OC 95SQ)이 대지충전전류가 적고, 평상 시 예비전원으로 경부하 2(A) 내외로 지락과전류계전기가 동작하기 충분한 영상전류(불평형전류+충전전류) 형성이 어려웠을 것으로 판단할 수 있다.

표 9. 비고장선로 중 부동작 배전반 차단기 동작여부 및 전류값

반 명	차단기 동작여부	전류 증가분		비고
		선(線)	전류(A)	
HV3-1	X	동작전류 이내		가공전선
HV3-9				지중전선 거리 짧음

3. 고장 전 부하현황과 지락과전류계전기의 한계

아래 표 10은 ‘21.08.05. 발생한 보호계전기 동작내역으로 트렌드 분석을 통해 고장 직전 부하현황과 지락과전류계전기(N선 불평형전류)의 한계에 대하여 알아보았다. 분석 결과 고장 전 부하전류는 평형상태로 존재하나, 비접지 계통(Δ) 1선 지락 고장 시 고장선로 기준으로 순간 V결선이 되어 불평형 전류에 의해 지락과전류계전기가 오동작 할 수 있을 것으로 사료됩니다.

표 10. 1선 지락 고장 전과 후의 지락과전류계전기(OCGR) 동작 전류값 비교

반 명	차단기 동작여부	전류(A)								
		설정치(51G)한시	1선 지락 고장 전				1선 지락 고장 시			
			R	S	T	불평형전류(계산식)	R	S	T	G(영상전류)
HV1-2	X	0.8	36.35	33.81	41.90	4.81	31.00	33.23	34.50	설정치 미만
HV3-1		1.6	2.94	3.19	3.09	0.21	3.1	3.02	3.09	설정치 미만
HV3-2	O	0.7	22.2	21.8	22.3	0.45	33.51	32.07	2.80	58.48
HV3-3		0.85	14.4	14.9	17.9	3.27	15.12	15.70	64.91	40.26
HV3-7		1.6	5.1	6.6	7.5	2.09	11.65	11.77	1.82	23.25
HV3-8	O	2.0	4.8	4.1	5.4	1.12	8.99	5.61	92.91	80.26
HV3-9	X	2.0	5.31	4.59	5.9	1.13	5.31	4.59	5.9	설정치 미만

* CT비 : HV1-2반 200/5A, HV3-1반 50/5A, HV3-2반 120/5A, HV3-3반 100/5A, HV3-7반 50/5A, HV3-8반 50/5A, HV3-9반 50/5A

C. 고장파형 분석에 의한 지락과전류계전기 동작 해석

다음은 총 5건의 고장(장애) 발생 중 '21.08.05. 가장 최근 발생한 광주송정DS 보호계전기 4대 지락과전류계전기 동작에 대한 고장이력 및 고장파형을 분석한 내용으로, 모두 유사한 시간에 지락과전류계전기가 동작하였으며, 그 고장파형을 분석하였다.

1. 판넬별 이력(HV3-8반)

HV3-8반 보호계전기상의 고장 발생 시간은 2021.08.05. 11:10:17 374 이며, Fault-wave 저장 확인 및 고장 시 고장 전류가 지락과전류계전기 정정치 이상임을 확인하였다.

아래의 그림 15와 표 12는 그림 13의 HV3-8반 고장파형 일부분을 분석한 수치이다. 표 11의 HV3-8반 지락과전류계전기 정정값을 보면 보호계전기 지락과전류계전기 한시 정정값은 2.00(A)로 셋팅 운용 중이며, 2차측 기준 중성선(N)의 전류가 2.00(A) 이상인 경우 지락과전류계전기가 동작하는 것을 알 수 있다. 표 12의 $3I_0$ (영상전류) 크기는 약 6.55(A)로 정정값 2.00(A) 이상의 고장전류가 흘렀기 때문에 지락과전류계전기가 정동작 함을 알 수 있다. 그림 14는 트립 당시 HV3-8반 보호계전기에 기록된 지락과전류계전기 동작 이벤트이다.

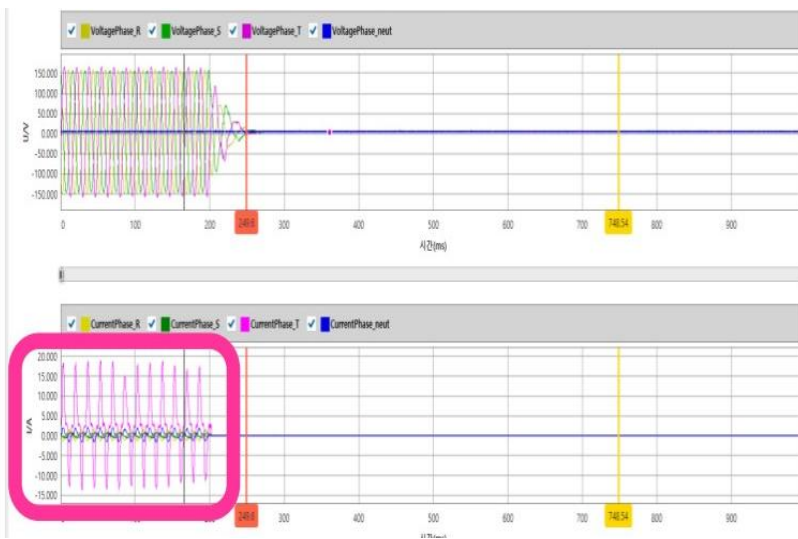


그림 13. HV3-8반 고장파형(Fault-wave)

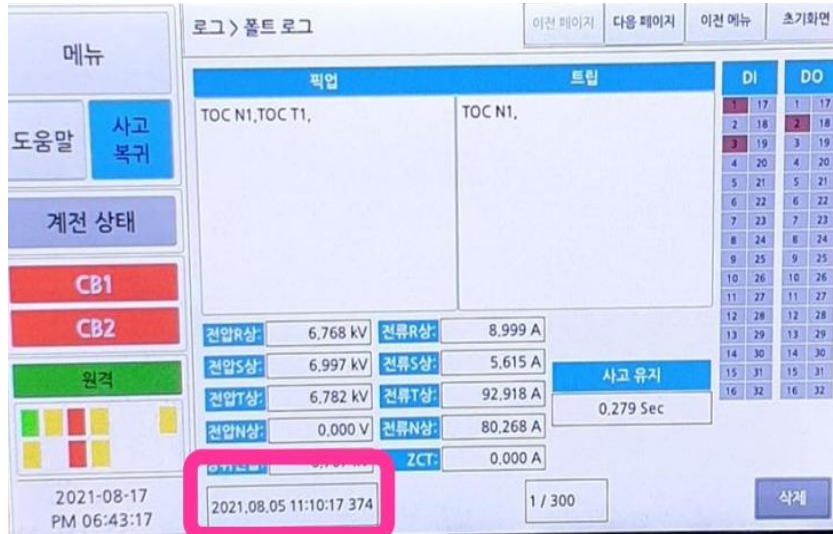


그림 14. HV3-8반 고장기록(Fault Log)

표 11. HV3-8반 OCGR 정정값

	1st 순시	2nd 순시	1st 한시	2nd 한시
모드	사용	미사용	사용	미사용
커브	-	-	정한시	정한시
정정치 (x G_{in}) $G_{in}=5A$	2.40	5.00	0.40	1.00
레버	-	-	0.50	0.05
시지연(초)	0.05	0.04	0.30	0.10

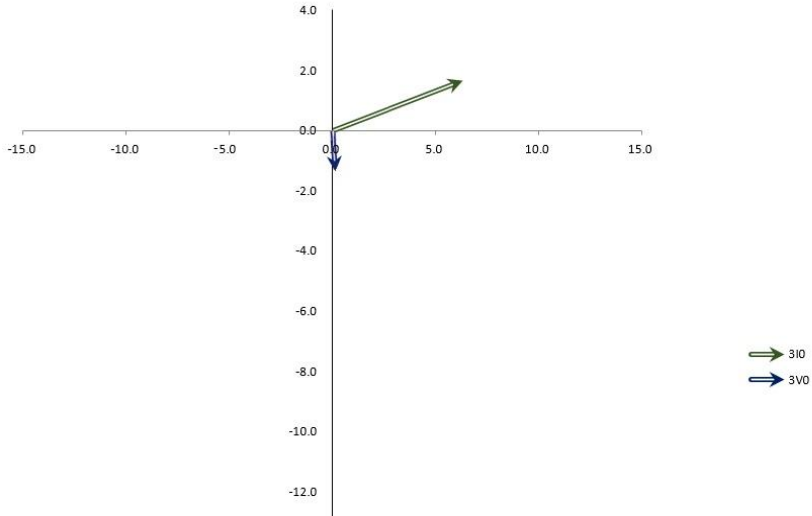


그림 15. HV3-8반 고장파형 분석 영상전류($3I_0$) 및 영상전압($3V_0$) 벡터도

표 12. HV3-8반 고장파형 분석 수치(상전류, 상전압, 영상분)

	상전류		상전압	
	크기	위상	크기	위상
R상	0.8534	-150.1	109.81	-137.8
S상	0.45558	143.5	112.54	101.8
T상	7.6657	13.6	110.92	-19.6
	영상분			
	크기		위상	
3I0 (영상전류)	6.555293258		14.56134863	
3V0 (영상전압)	1.357981589		275.5473695	

2. 판넬별 이력(HV3-2반)

HV3-2반 보호계전기상의 고장 발생 시간은 2021.08.05. 11:12:59 579 이며, Fault-wave 저장 확인 및 고장 시 고장 전류가 지락과전류계전기의 정정치 이상임을 확인하였다.

아래의 그림 18과 표 14는 그림 16의 HV3-2반 고장파형 일부분을 분석한 수치이다. 표 13의 HV3-2반 지락과전류계전기 정정값을 보면 보호계전기 지락과전류계전기 한시 정정값은 0.70(A)로 셋팅 운용 중이며, 2차측 기준 중성선(N)의 전류가 0.70(A) 이상인 경우 지락과전류계전기가 동작하는 것을 알 수 있다. 표 14의 $3I_0$ (영상전류) 크기는 약 2.78(A)로 정정값 0.70(A) 이상의 고장전류가 흘렀기 때문에 지락과전류계전기가 정동작 함을 알 수 있다. 그림 17는 트립 당시 HV3-2반 보호계전기에 기록된 지락과전류계전기 동작 이벤트이다.



그림 16. HV3-2반 고장파형(Fault-wave)

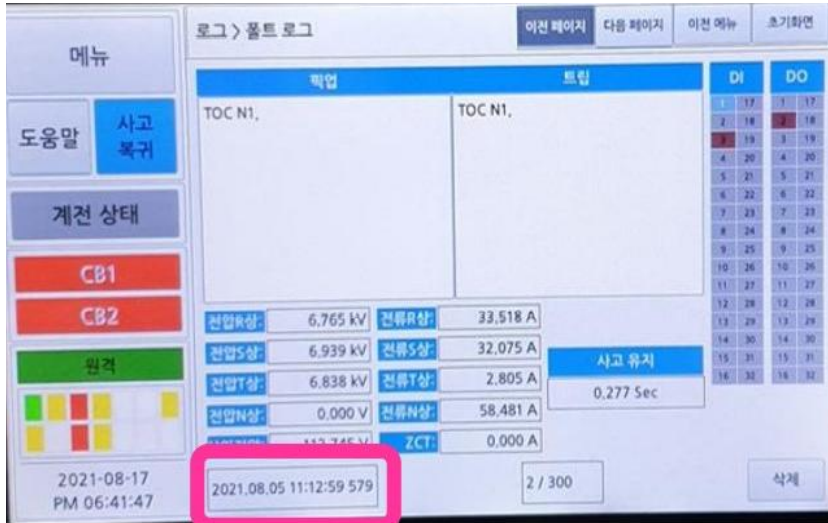


그림 17. HV3-2반 고장기록(Fault Log)

표 13. HV3-2반 OCGR 정정값

	1st 순시	2nd 순시	1st 한시	2nd 한시
모드	사용	미사용	사용	미사용
커브	-	-	정한시	정한시
정정치 (x Gin) Gin=5A	0.82	5.00	0.14	1.00
레버	-	-	0.30	0.05
시지연(초)	0.04	0.04	0.30	0.10

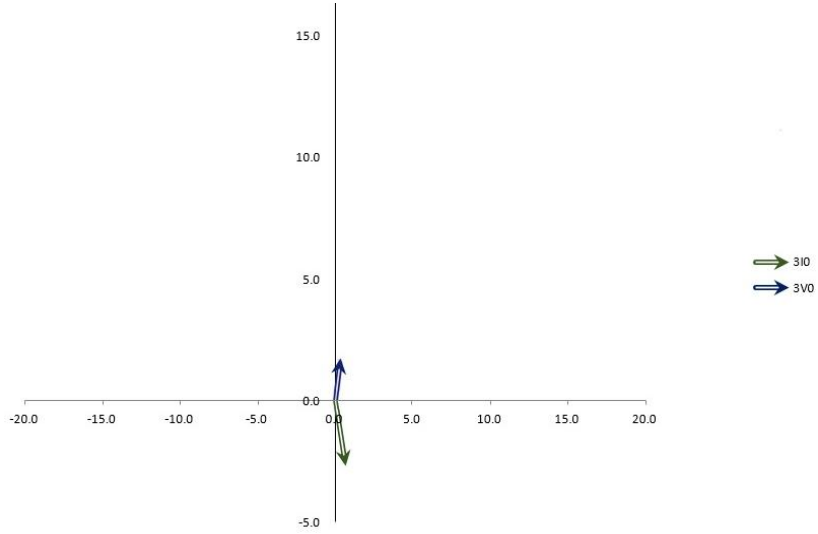


그림 18. HV3-2반 고장파형 분석 영상전류($3I_0$) 및 영상전압($3V_0$) 벡터도

표 14. HV3-2반 고장파형 분석 수치(상전류, 상전압, 영상분)

	상전류		상전압	
	크기	위상	크기	위상
R상	1.5165	-48	110.2	-60.8
S상	1.576	-103.9	112.95	178.8
T상	0.065368	-47.1	111.58	57.8
	영상분			
	크기		위상	
3I0 (영상전류)	2.789038666		284.1250556	
3V0 (영상전압)	1.771724287		80.40744895	

3. 판넬별 이력(HV3-3반)

HV3-3반 보호계전기상의 고장 발생 시간은 2021.08.05. 11:12:59 234 이며, Fault-wave 저장 확인 및 고장 시 고장 전류가 지락과전류계전기의 정정치 이상임을 확인하였다.

아래의 그림 21과 표 16은 그림 19의 HV3-3반 고장파형 일부분을 분석한 수치이다. 표 15의 HV3-3반 지락과전류계전기 정정값을 보면 보호계전기 지락과전류계전기 한시 정정값은 0.85(A)로 셋팅 운용 중이며, 2차측 기준 중성선(N)의 전류가 0.85(A) 이상인 경우 지락과전류계전기가 동작하는 것을 알 수 있다. 표 16의 $3I_0$ (영상전류) 크기는 약 2,49(A)로 정정값 0.85(A) 이상의 고장전류가 흘렀기 때문에 지락과전류계전기가 정동작 함을 알 수 있다. 그림 20은 트립 당시 HV3-3반 보호계전기에 기록된 지락과전류계전기 동작 이벤트이다.



그림 19. HV3-3반 고장파형(Fault-wave)



그림 20. HV3-3반 고장기록(Fault Log)

표 15. HV3-3반 OCGR 정정값

	1st 순시	2nd 순시	1st 한시	2nd 한시
모드	사용	미사용	사용	미사용
커브	-	-	정한시	정한시
정정치 (x Gin) Gin=5A	0.98	5.00	0.17	1.00
레버	-	-	0.40	0.05
시지연(초)	0.14	0.04	0.30	0.10

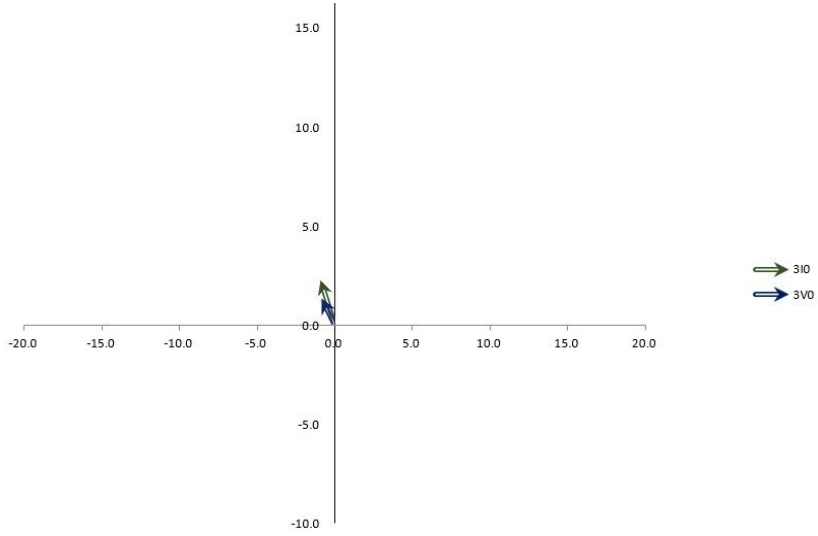


그림 21. HV3-3반 고장파형 분석 영상전류($3I_0$) 및 영상전압($3V_0$) 벡터도

표 16. HV3-3반 고장파형 분석 수치(상전류, 상전압, 영상분)

	상전류		상전압	
	크기	위상	크기	위상
R상	0.7998	-28.2	110.47	-39
S상	0.7544	-82.7	113	-159
T상	3.8437	116.1	111.6	80.3
	영상분			
	크기		위상	
3I0 (영상전류)	2.49010276		110.9481807	
3V0 (영상전압)	1.605143798		121.5491507	

4. 판넬별 이력(HV3-7반)

HV3-7반 보호계전기상의 고장 발생 시간은 2021.08.05. 11:12:59 327 이며, Fault-wave 저장 확인 및 고장 시 고장 전류가 지락과전류계전기의 정정치 이상임을 확인하였다.

아래의 그림 24와 표 18은 그림 22의 HV3-7반 고장파형 일부분을 분석한 수치이다. 표 17의 HV3-7반 지락과전류계전기 정정값을 보면 보호계전기 지락과전류계전기 한시 정정값은 1.60(A)로 셋팅 운용 중이며, 2차측 기준 중성선(N)의 전류가 1.60(A) 이상인 경우 지락과전류계전기가 동작하는 것을 알 수 있다. 표 18의 $3I_0$ (영상전류) 크기는 약 2.29(A)로 정정값 1.60(A) 이상의 고장전류가 흘렀기 때문에 지락과전류계전기가 정동작 함을 알 수 있다. 그림 23은 트립 당시 HV3-7반 보호계전기에 기록된 지락과전류계전기 동작 이벤트이다.

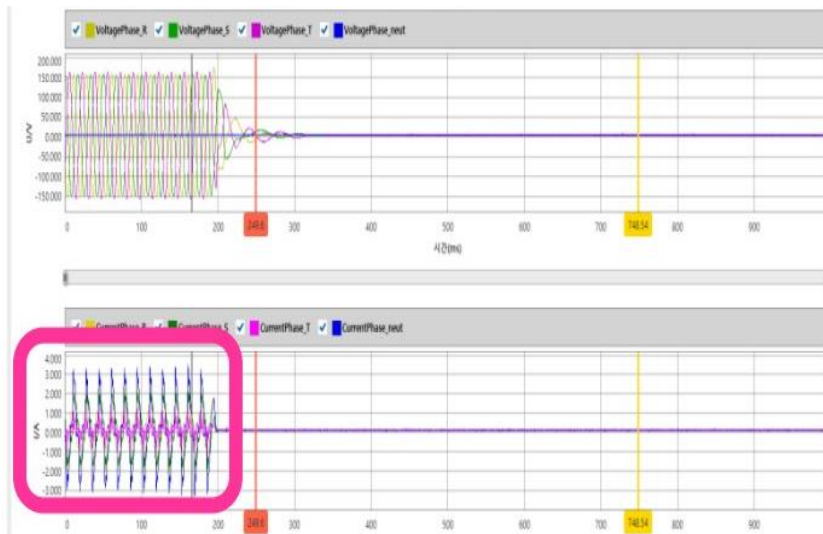


그림 22. HV3-7반 고장파형(Fault-wave)

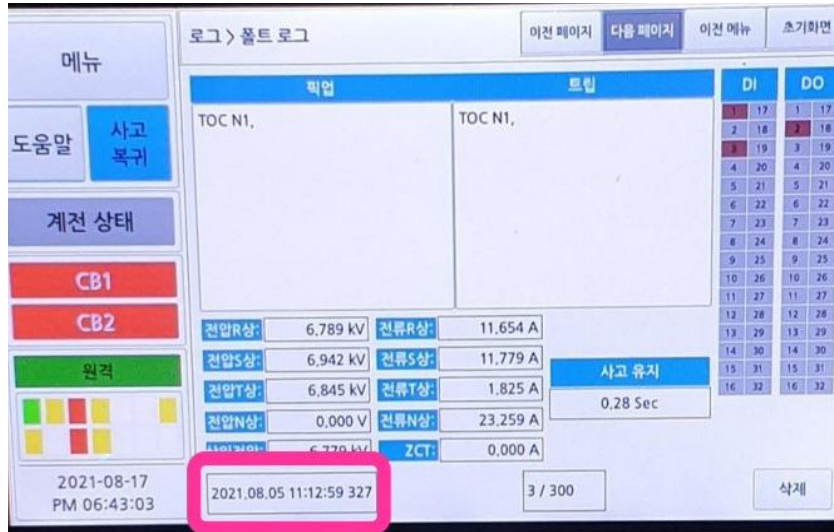


그림 23. HV3-7반 고장기록(Fault Log)

표 17. HV3-7반 OCGR 정정값

	1st 순시	2nd 순시	1st 한시	2nd 한시
모드	사용	미사용	사용	미사용
커브	-	-	정한시	정한시
정정치 (x Gin) Gin=5A	1.90	5.00	0.32	1.00
레버	-	-	0.30	0.05
시지연(초)	0.04	0.04	0.30	0.10

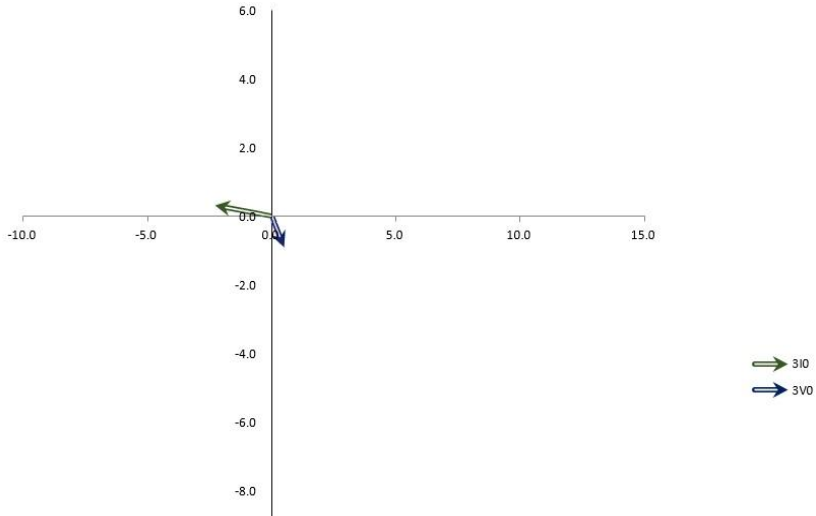


그림 24. HV3-7반 고장파형 분석 영상전류($3I_0$) 및 영상전압($3V_0$) 벡터도

표 18. HV3-7반 고장파형 분석 수치(상전류, 상전압, 영상분)

	상전류		상전압	
	크기	위상	크기	위상
R상	1.1378	-168.3	110.75	-176.1
S상	1.1597	147.4	113.38	63.8
T상	0.1971	-158.9	111.85	-57
	영상분			
	크기		위상	
3I0 (영상전류)	2.297869259		171.9162919	
3V0 (영상전압)	1.012277146		298.4522776	

트립 당시 4개 배전반(HV3-8, HV3-2, HV3-3, HV3-7)의 보호계전기 고장파형과 고장기록을 분석한 결과, 중성선(N)에 흐르는 불평형 전류 또는 지락전류가 설정치를 초과하면 보호계전기가 차단기를 즉시 개방시키는 것을 볼 수 있었다. 여기서 확인할 수 있었던 것은 HV3-8반에서 1선 지락이 발생하면 해당되는 고장 배전반(HV3-8) 차단기만 개방 하여야하나, 건전상의 인접 3개 배전반(HV3-2, HV3-3, HV3-7)에 영향을 주어 오동작한 이유를 재차 확인할 수 있었다. 이로 인해 철도신호 및 통신, 역사 내 조명, 전열, 동력설비(E/V, E/S) 등의 전원 공급설비에 주기적으로 지장을 주었으며, 장기적인 전력 공급 계통에 큰 지장을 줄 수 있다고 생각하여, 보호 계전 설비의 개선이 필요하다고 판단하였다.

IV. 결과 및 고찰

A. 지락보호 계전방식 개선 방법 및 대상개소 선정

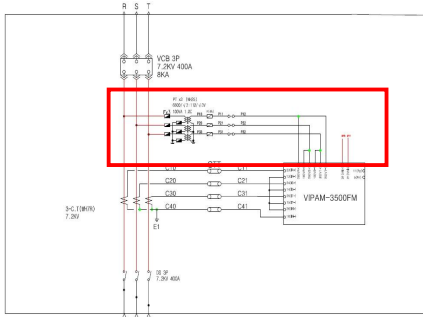
앞에서 본 보호계전기 오동작 원인 분석 자료에서 확인할 수 있었던 것은 고압 배전계통의 급전장애 예방 및 전력설비 안전성 향상을 위해 총 8개반(HV3-1, HV3-2, HV3-3, HV3-4, HV3-5, HV3-6, HV3-7, HV3-8)을 대상으로 지락과전류 계전기 방식에서 방향성 지락계전기 방식으로 개선이 필요하는 것을 알 수 있었다.

‘14년도 호남고속철도2단계 개통 당시부터 ’21.9.27. 까지 광주송정DS 6.6kV 비접지 배전선로 계통에 지락과전류(50G/51G) 계전요소를 채용하여 지락사고 발생 시 영상전류에 의해 지락사고를 검출하는 방식으로 운용하였다. 이 방식은 고장전류의 크기로만 동작하여 고장선로 외 공급계통이 같은 인접반 보호계전기가 오동작 하였다.

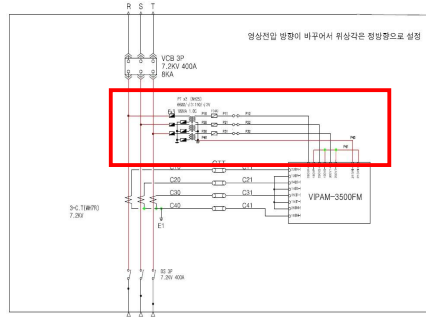
이러한 동종 급전장애 예방 및 설비 안전성 향상을 위해 ‘21.9.28. 광주송정DS 6.6kV 비접지 배전선로 계통에 방향성 지락 계전요소로 변경 적용하였고, 계통에 지락고장 발생 시 중성선(N)에 흐르는 지락전류를 검출하여 방향성을 선택 차단하는 방식으로 변경하였다. 지락 보호요소 동작 방식은 3박자(영상 전압과 영상전류, 위상각)가 모두 부합되어야 동작한다. 기존 지락과전류 계전 요소가 동작하지 않도록 설정을 해제하였으며, 정방향만 동작하도록 설정 (자기선로만 보호)하였고, 역방향은 동작하지 않도록 설정하였다.

방향성 지락계전기 운용을 위해 대상개소(총8개반)에 보호계전기 계전요소 및 원제설비에 포인트 추가, 결선 변경을 하였고, 변경 후 전력설비 보호를 위한 정상동작 여부를 확인하기 위해 지락시험을 시행하였다.

보호계전기에서 PT까지 결선을 3상3선식에서 3상4선식으로 변경하였고, 결선 변경 후 자체 동작 시험은 오미크론(CMC-310) 장비를 사용하여 보호계전기 동작 특성시험을 시행하였다. 관제와 사업소에서 원격제어를 하기 위해 원제설비 (원격소장치 및 중앙장치, 소규모장치)에 방향성 지락(67N_50, 51) 포인트를 추가하고, 데이터베이스 입력 및 그래픽 작업을 시행하였으며, 최종적으로 현장에 있는 보호 계전기와 원격소장치, 관제 중앙장치, 사업소 소규모장치간 종합 연동시험을 시행하였다.



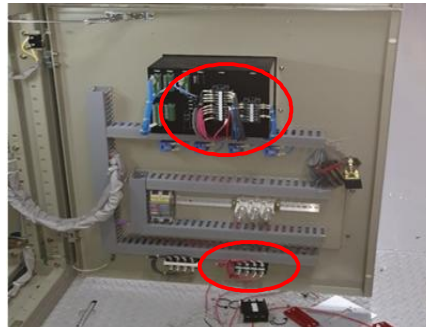
PT~보호계전기 결선 변경(전)



PT~보호계전기 결선 변경(후)



보호계전기 결선 변경(전)



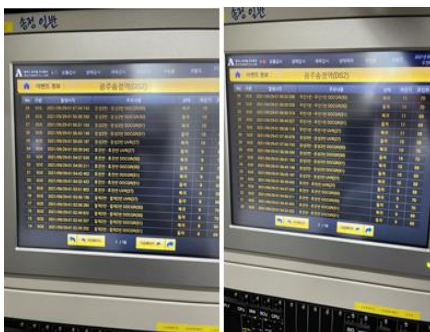
보호계전기 결선 변경(후)



방향성 지락 동작 시험



원격소장치 포인트 및 그래프작업



소규모 종합연동시험

발생시간	경보유리	타고값	경보상태
2021/09/30 02:05:02	정수송전02 무안면 DDCGR 뒤 배극		경보발생
2021/09/30 02:05:08	정수송전02 무안면 DDCGR 뒤 배극		경보발생
2021/09/30 02:15:30	정수송전02 무안면 DDCGR 뒤 배극		경보발생
2021/09/30 02:17:44	정수송전02 무안면 DDCGR 뒤 배극		경보발생
2021/09/30 02:17:25	정수송전02 무안면 REMOTE		경보발생
2021/09/30 02:17:30	정수송전02 무안면 DDCGR 뒤 배극		경보발생
2021/09/30 02:12:06	정수송전02 무안면 배극		경보발생
2021/09/30 02:08:39	정수송전02 무안면 배극		경보발생
2021/09/30 02:08:46	정수송전02 무안면 DDCGR 뒤 배극		경보발생
2021/09/30 02:08:36	정수송전02 무안면 배극		경보발생
2021/09/30 02:08:44	정수송전02 무안면 DDCGR 뒤 배극		경보발생
2021/09/30 02:08:44	정수송전02 무안면 VC 제방		경보발생
2021/09/30 02:08:37	정수송전02 무안면 VC 제방		경보발생
2021/09/30 02:08:15	정수송전02 무안면 배극		경보발생
2021/09/30 02:08:15	정수송전02 무안면 DDCGR 뒤 배극		경보발생
2021/09/30 02:08:12	정수송전02 무안면 DDCGR 뒤 배극		경보발생
2021/09/30 02:08:09	정수송전02 무안면 VC 제방		경보발생
2021/09/30 02:08:09	정수송전02 무안면 배극		경보발생
2021/09/30 02:08:52	정수송전02 무안면 VC 제방		경보발생
2021/09/30 02:07:53	정수송전02 무안면 배극		경보발생
2021/09/30 02:08:15	정수송전02 무안면 DDCGR 뒤 배극		경보발생
2021/09/30 02:07:50	정수송전02 무안면 배극		경보발생
2021/09/30 02:07:50	정수송전02 무안면 VC 제방		경보발생
2021/09/30 02:07:50	정수송전02 무안면 DDCGR 뒤 배극		경보발생

관제 SCADA 종합연동시험

그림 25. PT 결선 변경 도면 및 시공 사진

B. 방향성 지락계전기 동작시험 측정 결과

방향성 지락계전기 채용 후 정상적인 동작여부에 대한 보호계전기 측정 결과 값이며, 변경 적용한 8개 배전반 모두 오동작 없이 정상 동작하였다.

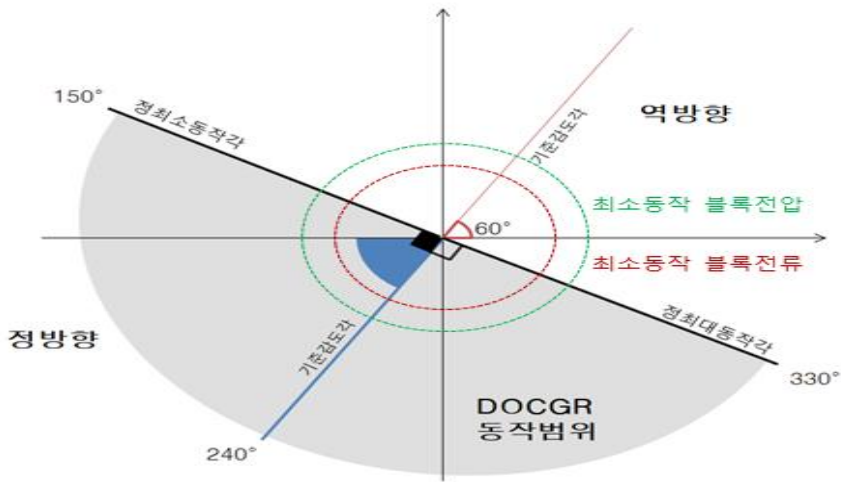


그림 26. 8개 배전반 DGR 동작 범위 벡터도

방향성 지락계전기 적용한 8개 배전반 보호계전기(VIPAM3500-FM)의 경우 180° 치환된 방향이 정방향이므로 설정값에는 기준감도각이 60°로 되어있으나 방향성 지락계전기 동작범위는 240°로 적용한다. 최소동작 블록전압 및 블록전류, 위상각 3가지를 모두 충족해야 동작한다.

표 19. 방향성 지락계전기(DGR) 동작각도 및 동작범위

최소동작각	$\text{기준감도각}(240^\circ) - \text{정최소동작각}(90^\circ) = 150^\circ$
최대동작각	$\text{기준감도각}(240^\circ) + \text{정최대동작각}(90^\circ) = 330^\circ$
동작범위	$150^\circ \leq \text{위상} \leq 330^\circ$

표 20은 HV3-1반 방향성 지락계전기 측정기록부로 동작시험 결과 순시의 경우 최소동작 전류 9.51A, 최소동작 전압 11.1V, 위상은 최소150°, 최대330° 범위에서 0.04초 안에 정상 동작하였다. 또한 한시의 경우 최소동작 전류 1.61A, 최소동작 전압 11.1V, 위상은 최소150°, 최대330° 범위에서 2.025초 안에 정상 동작하였다.

표 20. HV3-1반 보호계전기 측정기록부

		계전기명	DGR(순시)	DGR(한시)		
		설치장소	HV3-1반			
		계전기번호	PAM35 13070103			
		형식	VIPAM3500-FM			
보 호 계 전 기	셋 팅 값	정정탭	1차측	95	16	
			2차측(xGIn)	9.5(1.9xGIn)	1.6(0.32xGIn)	
		정정레바(Time)		0.04s	0.3s	
		Curve		-	강반한시(VI)	
		위상각	기준감도각		60°	60°
			정최대동작각		90°	90°
			정최소동작각			
				방향	정방향	정방향
		블록전압(xGVn)		11(0.1GVn)	11(0.1GVn)	
		CT PT 비율	CT	1차측	50	
				2차측	5	
			PT	1차측	$6600/\sqrt{3}$	
2차측	$110/\sqrt{3}$					
결 합 차 단 기 명			VCB(진공차단기)			
자 체 시 험	최소동작 블록전류(A)		9.51	1.61		
	최소동작 블록전압(V)		11.1	11.1		
	위상특성	lead	330°	330°		
		lag	150°	150°		
	시한특성(%/sec)		300/0.032	300/1.69		
연동시험(%/sec)		300/0.038	300/1.74			
결 과			적합	적합		

표 21은 HV3-2반 방향성 지락계전기 측정기록부로 동작시험 결과 순시의 경우 최소동작 전류 4.11A, 최소동작 전압 11.1V, 위상은 최소150°, 최대330° 범위에서 0.04초 안에 정상 동작하였다. 또한 한시의 경우 최소동작 전류 0.71A, 최소동작 전압 11.1V, 위상은 최소150°, 최대330° 범위에서 2.025초 안에 정상 동작하였다.

표 21. HV3-2반 보호계전기 측정기록부

계전기명		DGR(순시)	DGR(한시)		
설치장소		HV3-2반			
계전기번호		PAM35 13070098			
형식		VIPAM3500-FM			
보호계전기	정정탭	1차측	98.4	16.8	
		2차측(xGIn)	4.10(0.82xGIn)	0.70(0.14xGIn)	
	정정레바(Time)		0.04s	0.3s	
	Curve		-	강반한시(VI)	
	위상각	기준감도각	60°	60°	
		정최대동작각 정최소동작각	90°	90°	
		방향	정방향	정방향	
	블록전압(xGVn)		11(0.1GVn)	11(0.1GVn)	
	CT PT 비율	CT	1차측	120	
			2차측	5	
		PT	1차측	6600/√3	
			2차측	110/√3	
	결 합 차 단 기 명		VCB(진공차단기)		
	자 체 시 험	최소동작 블록전류(A)		4.11	0.71
최소동작 블록전압(V)		11.1	11.1		
위상특성		lead	330°	330°	
		lag	150°	150°	
시한특성(%/sec)		300/0.031	300/1.68		
연동시험(%/sec)		300/0.038	300/1.73		
결 과		적합	적합		

표 22는 HV3-3반 방향성 지락계전기 측정기록부로 동작시험 결과 순시의 경우 최소동작 전류 4.91A, 최소동작 전압 11.1V, 위상은 최소150°, 최대330° 범위에서 0.04초 안에 정상 동작하였다. 또한 한시의 경우 최소동작 전류 0.86A, 최소동작 전압 11.1V, 위상은 최소150°, 최대330° 범위에서 2.025초 안에 정상 동작하였다.

표 22. HV3-3반 보호계전기 측정기록부

계전기명		DGR(순시)	DGR(한시)		
설치장소		HV3-3반			
계전기번호		PAM35 13070107			
형식		VIPAM3500-FM			
보호계전기	정정탭	1차측	98	17	
		2차측(xGIn)	4.90(0.98xGIn)	0.85(0.17xGIn)	
	정정레바(Time)		0.04s	0.3s	
	Curve		-	강반한시(VI)	
	위상각	기준감도각	60°	60°	
		정최대동작각 정최소동작각	90°	90°	
		방향	정방향	정방향	
	블록전압(xGVn)		11(0.1GVn)	11(0.1GVn)	
	CT PT 비율	CT	1차측	100	
			2차측	5	
		PT	1차측	6600/√3	
			2차측	110/√3	
	결 합 차 단 기 명		VCB(진공차단기)		
	자 체 시 험	최소동작 블록전류(A)		4.91	0.86
최소동작 블록전압(V)		11.1	11.1		
위상특성		lead	330°	330°	
		lag	150°	150°	
시한특성(%/sec)		300/0.032	300/1.68		
연동시험(%/sec)		300/0.037	300/1.72		
결 과		적합	적합		

표 23은 HV3-4반 방향성 지락계전기 측정기록부로 동작시험 결과 순시의 경우 최소동작 전류 4.91A, 최소동작 전압 11.1V, 위상은 최소150°, 최대330° 범위에서 0.04초 안에 정상 동작하였다. 또한 한시의 경우 최소동작 전류 0.86A, 최소동작 전압 11.1V, 위상은 최소150°, 최대330° 범위에서 2.025초 안에 정상 동작하였다.

표 23. HV3-4반 보호계전기 측정기록부

계전기명		DGR(순시)	DGR(한시)		
설치장소		HV3-4반			
계전기번호		PAM35 13070108			
형식		VIPAM3500-FM			
보호계전기	정정탭	1차측	98	17	
		2차측(xGIn)	4.90(0.98xGIn)	0.85(0.17xGIn)	
	정정레바(Time)		0.04s	0.3s	
	Curve		-	강반한시(VI)	
	위상각	기준감도각	60°	60°	
		정최대동작각 정최소동작각	90°	90°	
		방향	정방향	정방향	
	블록전압(xGVn)		11(0.1GVn)	11(0.1GVn)	
	CT PT 비율	CT	1차측	100	
			2차측	5	
		PT	1차측	6600/√3	
			2차측	110/√3	
결 합 차 단 기 명		VCB(진공차단기)			
자 체 시 험	최소동작 블록전류(A)		4.91	0.86	
	최소동작 블록전압(V)		11.1	11.1	
	위상특성	lead	330°	330°	
		lag	150°	150°	
시한특성(%/sec)		300/0.031	300/1.66		
연동시험(%/sec)		300/0.036	300/1.74		
결 과		적합	적합		

표 24는 HV3-5반 방향성 지락계전기 측정기록부로 동작시험 결과 순시의 경우 최소동작 전류 9.51A, 최소동작 전압 11.1V, 위상은 최소150°, 최대330° 범위에서 0.04초 안에 정상 동작하였다. 또한 한시의 경우 최소동작 전류 1.61A, 최소동작 전압 11.1V, 위상은 최소150°, 최대330° 범위에서 2.025초 안에 정상 동작하였다.

표 24. HV3-5반 보호계전기 측정기록부

계전기명			DGR(순시)	DGR(한시)	
설치장소			HV3-5반		
계전기번호			PAM35 13070094		
형식			VIPAM3500-FM		
보호계전기	정정탭	1차측	95	16	
		2차측(xGIn)	9.5(1.9xGIn)	1.6(0.32xGIn)	
	정정레바(Time)		0.04s	0.3s	
	Curve		-	강반한시(VI)	
	위상각	기준감도각	60°	60°	
		정최대동작각 정최소동작각	90°	90°	
		방향	정방향	정방향	
	블록전압(xGVn)		11(0.1GVn)	11(0.1GVn)	
	CT	CT	1차측	50	
			2차측	5	
	PT	PT	1차측	6600/√3	
			2차측	110/√3	
	결 합 차 단 기 명			VCB(진공차단기)	
	자 체 시 험	최소동작 블록전류(A)		9.51	1.61
최소동작 블록전압(V)		11.1	11.1		
위상특성		lead	330°	330°	
		lag	150°	150°	
시한특성(%/sec)		300/0.030	300/1.67		
연동시험(%/sec)		300/0.037	300/1.72		
결 과			적합	적합	

표 25는 HV3-6반 방향성 지락계전기 측정기록부로 동작시험 결과 순시의 경우 최소동작 전류 4.11A, 최소동작 전압 11.1V, 위상은 최소150°, 최대330° 범위에서 0.04초 안에 정상 동작하였다. 또한 한시의 경우 최소동작 전류 0.71A, 최소동작 전압 11.1V, 위상은 최소150°, 최대330° 범위에서 2.025초 안에 정상 동작하였다.

표 25. HV3-6반 보호계전기 측정기록부

계전기명		DGR(순시)	DGR(한시)		
설치장소		HV3-6반			
계전기번호		PAM35 13070104			
형식		VIPAM3500-FM			
보호계전기	정정탭	1차측	98.4	16.8	
		2차측(xGIn)	4.10(0.82xGIn)	0.70(0.14xGIn)	
	정정레바(Time)		0.04s	0.3s	
	Curve		-	강반한시(VI)	
	위상각	기준감도각	60°	60°	
		정최대동작각 정최소동작각	90°	90°	
		방향	정방향	정방향	
	블록전압(xGVn)		11(0.1GVn)	11(0.1GVn)	
	CT PT 비율	CT	1차측	120	
			2차측	5	
		PT	1차측	6600/√3	
			2차측	110/√3	
결 합 차 단 기 명		VCB(진공차단기)			
자 체 시 험	최소동작 블록전류(A)		4.11	0.71	
	최소동작 블록전압(V)		11.1	11.1	
	위상특성	lead	330°	330°	
		lag	150°	150°	
시한특성(%/sec)		300/0.031	300/1.65		
연동시험(%/sec)		300/0.037	300/1.72		
결 과		적합	적합		

표 26은 HV3-7반 방향성 지락계전기 측정기록부로 동작시험 결과 순시의 경우 최소동작 전류 9.51A, 최소동작 전압 11.1V, 위상은 최소150°, 최대330° 범위에서 0.04초 안에 정상 동작하였다. 또한 한시의 경우 최소동작 전류 1.61A, 최소동작 전압 11.1V, 위상은 최소150°, 최대330° 범위에서 2.025초 안에 정상 동작하였다.

표 26. HV3-7반 보호계전기 측정기록부

계전기명		DGR(순시)	DGR(한시)		
설치장소		HV3-7반			
계전기번호		PAM35 13070105			
형식		VIPAM3500-FM			
보호계전기	정정탭	1차측	95	16	
		2차측(xGIn)	9.5(1.9xGIn)	1.6(0.32xGIn)	
	정정레바(Time)		0.04s	0.3s	
	Curve		-	강반한시(VI)	
	위상각	기준감도각	60°	60°	
		정최대동작각 정최소동작각	90°	90°	
		방향	정방향	정방향	
	블록전압(xGVn)		11(0.1GVn)	11(0.1GVn)	
	CT PT 비율	CT	1차측	50	
			2차측	5	
		PT	1차측	6600/√3	
			2차측	110/√3	
결 합 차 단 기 명		VCB(진공차단기)			
자 체 시 험	최소동작 블록전류(A)		9.51	1.61	
	최소동작 블록전압(V)		11.1	11.1	
	위상특성	lead	330°	330°	
		lag	150°	150°	
시한특성(%/sec)		300/0.032	300/1.65		
연동시험(%/sec)		300/0.037	300/1.74		
결 과		적합	적합		

표 27은 HV3-8반 방향성 지락계전기 측정기록부로 동작시험 결과 순시의 경우 최소동작 전류 12.01A, 최소동작 전압 11.1V, 위상은 최소150°, 최대330° 범위에서 0.04초 안에 정상 동작하였다. 또한 한시의 경우 최소동작 전류 2.01A, 최소동작 전압 11.1V, 위상은 최소150°, 최대330° 범위에서 3.375초 안에 정상 동작하였다.

표 27. HV3-8반 보호계전기 측정기록부

계전기명		DGR(순시)	DGR(한시)		
설치장소		HV3-8반			
계전기번호		PAM35 13070100			
형식		VIPAM3500-FM			
보호계전기	정정탭	1차측	120	20	
		2차측(xGIn)	12(2.4xGIn)	2(0.4xGIn)	
	정정레바(Time)		0.04s	0.5s	
	Curve		-	강반한시(VI)	
	위상각	기준감도각	60°	60°	
		정최대동작각 정최소동작각	90°	90°	
		방향	정방향	정방향	
	블록전압(xGVn)		11(0.1GVn)	11(0.1GVn)	
	CT	CT	1차측	50	
			2차측	5	
	PT	PT	1차측	$6600/\sqrt{3}$	
			2차측	$110/\sqrt{3}$	
	결합차단기명		VCB(진공차단기)		
	자체시험	최소동작 블록전류(A)		12.01	2.01
최소동작 블록전압(V)		11.1	11.1		
위상특성		lead	330°	330°	
		lag	150°	150°	
시한특성(%/sec)		300/0.030	300/1.67		
연동시험(%/sec)		300/0.036	300/1.73		
결과		적합	적합		

고장사례 분석 자료와 지락보호 계전 방식 개선 방법 및 대상개소 선정, 방향성 지락계전기 동작시험 측정 결과를 통해서 유의미한 결과를 얻을 수 있었다.

지락사고 발생 시 건전상의 배전반까지 전원 공급에 영향을 주었던 지락과전류 계전기 방식에서 방향성 지락계전기 방식으로 변경함으로써 그동안 광주송정DS 6.6kV 고압배전선로 계통에서 고질적으로 발생했던 급전장애를 해소할 수 있었다.

고압배전 계통의 운용 방식을 변경하기 위해 이론적 배경을 바탕으로 계획하여, 설계 및 시공까지 시행하였으며, 운용 중이던 배전설비를 안정적으로 운용할 수 있도록 보완 적용하였다. 개선 후 보호계전기 시험기를 사용하여 자체 보호계전기 동작시험을 하였고, 그 결과 표 20~27과 같이 정상적인 동작범위 안에서 동작하는 데이터를 얻을 수 있었다. 또한, 관제와 사업소 원격제어를 위해 원격설비(원격 소장치 및 중앙장치, 소규모장치) 정상동작 여부 시험을 시행하였고, 결과는 정상적으로 동작하였다.

앞으로 똑같은 동종장애가 발생하지 않는지 지속적인 관찰이 필요하며, 주기적으로 점검하여 많은 데이터를 취득하고 연구 분석하여 적합성이 검증되면 효율적인 유지보수를 위해 매뉴얼에 반영할 필요가 있다.

V. 결 론

본 논문은 호남선 광주송정DS 6.6kV 비접지 고압 배전계통의 지락보호 계전기 오동작 원인 및 문제점을 분석하고 기존 지락 보호 계전 시스템의 문제점을 도출, 보완할 수 있는 방법을 제안하였고, 전기철도 환경에 가장 적합한 지락 보호 시스템으로 개선 및 적용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

‘13년 ~21년도 호남선 광주송정DS 6.6kV 배전선로 비접지 공급계통에서 지락 고장 발생 시 건전상에서 동시 트립 발생한 현황을 통해 지락사고 원인과 문제점을 분석하였고, 그 결과 지락 보호계전기의 오동작임을 알게 되었다. 오동작을 해결하기 위해서는 지락 보호 시스템의 개선이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

지락과전류계전기 방식을 운용하였을 때 동작했던 이벤트 등 데이터 자료를 통하여 이론과 비교하여 분석하였으며, 현재 운용 중인 보호시스템에 적용하였을 때에 이론대로 동작하였음에도 오동작을 일으켜 부적합한 적용 방법이라고 판단하였다.

보호계전기의 오동작을 개선하고자 방향성 지락계전기 방식으로 변경하였으며, 이론적 배경을 토대로 실제 적용하였을 때의 시험 데이터를 분석하였고, 보호 계전기상 셋팅한 범위 안에서 이상없이 동작하였다. 방향성 지락계전기 방식을 분석한 결과 현재 지락 보호 시스템에 적용하기에 가장 적합하다고 판단하였고, 분석 과정에서 2개의 지락 보호 시스템 방식을 비교 실험 하는데 큰 도움이 되었다. 비슷한 철도 고압배전 시스템 뿐만 아니라 비슷한 상황에 있는 배전반을 운용하는 산업체에 적용하여 보호계통을 보다 더 안정적으로 운용하는 데 큰 의미가 있다.

2021년 09월 28일, 해당되는 8개 배전반에 지락전류의 크기로만 동작하는 지락 과전류계전기 방식에서 지락전류 및 전압, 위상각 세 박자가 부합해야 동작하는 방향성 지락계전기 방식으로 개선 적용하였고, 적용 후부터 현재까지 위와 같은 동종 장애는 더 이상 발생하지 않았다.

본 연구를 통해서 고압 배전선로 지락사고 발생 시 인접 정상선로의 동시 트립 장애를 예방하고, 철도 지락 보호 계전 시스템 체계를 보다 더 향상시킬 수 있었다. 방향성 지락계전기 방식의 채용과 연구를 바탕으로 미래의 전기철도 전력설비 안정성 향상 및 고객 안전, 열차 안전운행에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

<참 고 문 헌>

- [1] 이준경·이현화, “21세기 핵심전기철도”, 光明, 2003.
- [2] 김성웅, “지중 전력케이블 고장사례 분석을 통한 효율적 유지보수 연구”, 석사학위, 조선대학교 산업기술창업대학원, 2021.
- [3] 배술, “일반철도 배전선로 지락보호시스템에 관한 연구”, 석사학위, 조선대학교 산업기술융합대학원, 2018.
- [4] 송길영, “최신 송배전공학”, 동일출판사, 2018.
- [5] 박규홍, “전력전송공학”, 동일출판사, 2000.
- [6] 송길영, “신편 전력계통공학”, 동일출판사, 1998.
- [7] 이영철, “수배전설비의 보호계전시스템”, 기다리, 2011.
- [8] 전력 Solution본부 기술 영업팀, “Digital 보호계전 실무 교육자료”, LS산전.
- [9] 협회 기술지원팀, “계통의 접지 방식 비교”, <https://t1.daumcdn.net/cfile/blog/1921B3134BB6008B73?download>, 2023.05.14.
- [10] 정홍영, “지하철 비접지 고압 배전계통의 지락보호 시스템에 관한 연구”, 석사학위, 서울산업대학교, 2008.
- [11] 이성우, “비접지 방식의 특징과 지락보호 협조”, 전력기술인, pp20~25, 2005.10.
- [12] 한국철도공사, “주요사업-유지보수-전기유지보수-전철전력설비”, <https://info.korail.com/info/contents.do?key=900>, 2023.5.20.
- [13] 한국철도공사, “전철전력설비 유지보수 세칙”, 2023.
- [14] 한국철도공사, “전력설비 유지보수 매뉴얼”, 2022.

- [15] 국가철도공단, “철도설계지침 및 편람(KR E-04010, 04020, 배전선로 설계 일반, 지중배전선로편)”, 2021.
- [16] (주)비츠로테크, “VIPAM 3500-FM 사용설명서”, 2015.

감사의 글

처음 한국철도공사에 입사할 때가 엇그제 같은데 벌써 7년이라는 시간이 지났습니다. 대학생 시절에는 학사 졸업하면 끝이라고 생각했는데, 전기 분야 업무를 종사 해보니 졸업하면 끝이 아니라 학생 때 배운 지식을 바탕으로 더 많이 경험하고 배워야 한다는 것을 느꼈습니다.

제 자신의 부족한 부분을 채워 나가기 위해 조선대학교 산업대학원 전기 기술융합공학과에 입학원서를 제출하고 첫걸음을 디을 때가 엇그제 같은데 벌써 석사를 졸업 한다고 생각하니 감회가 새롭습니다.

본 논문을 작성을 하는데 모든 면에서 지도해주신 조금배 교수님, 김남훈 교수님, 최연옥 교수님께 먼저 감사의 글을 올립니다. 처음 쓰는 석사학위 논문이라 어떤 방식으로 접근해야할지 고민이 참 많았는데, 올바른 방향을 제시해 주시고 지도해주심을 진심으로 감사드립니다. 또한 한국철도공사와 인연을 맺어 좋은 여건에서 공부할 수 있게 해주신 전기공학과 모든 교수님 들께 감사드립니다.

대학원 진학을 고민할 때 독려해주시고 직원들의 발전을 위해 항상 내 일처럼 도움을 주신 박채옥 처장님께도 깊은 감사의 마음을 전합니다.

힘들고 어려운 환경 속에서도 불철주야 현장에서 열심히 고생하시는 우리 한국철도공사 전기분야 동료들과 마지막으로 사랑하는 우리 가족에게 고마움을 전합니다. 사랑합니다.

2023년 06월

최철웅 올림