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

공학전문석사 학위 연구보고서

가공 송전선로 크레인 접촉사고 자동재폐로 방지 알고리즘 연구

A Study on the Algorithm for Automatic Reclosure Prevention of Overhead Transmission Line in case of Machine Contact Accidents

2022년 2월

서울대학교 공학전문대학원

응용공학과 응용공학전공

박 지 환

가공 송전선로 크레인 접촉사고 자동재폐로 방지 알고리즘 연구

A Study on the Algorithm for Automatic Reclosure Prevention of Overhead Transmission Line in case of Machine Contact Accidents

지도교수 윤 용 태

이 프로젝트 리포트를 공학전문석사 학위
연구보고서로 제출함
2022년 2월

서울대학교 공학전문대학원
응용공학과 응용공학전공
박 지 환

박지환의 공학전문석사 학위 연구보고서를 인준함
2022년 2월

위 원 장 _____ 문 승 일 _____ (인)

위 원 _____ 윤 용 태 _____ (인)

위 원 _____ 김 국 현 _____ (인)

국문초록

가공 송전선로에서 발생하는 고장의 종류는 낙뢰, 폭설, 강풍, 산불, 농무 등의 자연재해와 은박지, 조류배설물, 크레인 접촉과 같은 이물접촉 이외에 설비고장 및 작업과실 등이 있다.

이와 같은 고장 발생 시 송전선로 보호계전기는 고장을 검출하여 차단기에 개방신호를 보내 고장구간을 분리하고, 공기절연 자연회복 시간이 지나면 차단기를 자동투입하여 인근 송전선로의 과부하 및 국지적인 전압불안정 방지, 발전기의 과도안정도 향상 등을 도모하고 있다.

하지만, 크레인 접촉(고저항 지락사고)과 같은 영구고장에 차단기 자동투입을 시행하게 되면 아주 짧은 시간에 고장이 재발생하는 것으로 차단기 등 계통설비에 충격이 가해질 우려가 있으며, 고장지점에 위치한 주변 작업자의 안전사고와 화재 등의 2차 사고 유발 가능성이 높다.

크레인 접촉사고는 대체적으로 고장저항이 낙뢰고장과 같은 순간고장보다는 크지만, 고장지점 및 형태 등에 따라 그 크기가 일정하지 않다. 또한, 고장전류 및 전압강하도 크지 않아 검출하기 매우 힘든 고장으로 한전은 고저항 지락사고시 차단기 자동투입을 방지하도록 송전선로 자동재폐로 동작로직을 구성하고 있지만, 일반적인 고장과의 차이점을 사전에 판별하도록 기술적으로 구현되지 않아 현재는 크레인 접촉사고시 자동재폐로를 방지하지 못하고 있다.

이에 본 연구보고서에서는 크레인 접촉사고시 자동재폐로를 최소화하

기 위한 방안을 연구하였다. 2016년부터 2020년까지 5년간 154㎸ 송전선로 보호계전기 동작사례를 조사하였고, 그 중 설비부서 고장보고서와 양단 실계통 고장데이터(고장파형) 등을 확보할 수 있는 고장 50건을 선별하였다. 선별된 고장을 사례별로 정리한 후 고장파형뷰어 프로그램(K_Com Viewer, Sigra)을 활용해 실계통 고장데이터를 샘플링 단위로 분석하였고, 백분율법, 대칭좌표법 등을 활용하여, 전압 & 전류 위상차, 임피던스, 고장저항 등을 연산하였다. 분석결과 크레인 접촉사고시 전압 & 전류 위상차 특성이 타 고장과 차이점이 있음을 알게 되었고, 차이점을 바탕으로 크레인 검출 알고리즘과 설정값을 제안하였다. 사례연구보고서에서는 알고리즘 설정값에서 고장위치에 따라 크레인 접촉사고를 검출할 수 있는 고장저항이 어떠한 값을 갖는지 확인하기 위해 EMTP-ATP Draw를 활용하여 154㎸ 송전선로 계통을 모델링하였고, 고장위치에 따라 고장저항을 변경하여 다양하게 모의 한 후 고장파형를 생성해 검출 알고리즘이 적용된 보호계전기에 재생하였고, 그 결과를 확인하였다.

최종적으로 제안한 알고리즘과 설정값을 선별한 50건에 대해서도 검증하였고, 전류차동계전기 자동재폐로 로직에 적용, 크레인 접촉사고시 자동재폐로를 방지하여 차단기 자동투입을 최소화 하였다.

주요어 : 고저항지락, 전류차동계전기, 자동재폐로

학 번 : 2020-22444

목 차

제 1 장 서 론 ····· 1

제 1 절 연구 배경 및 목적 ····· 1

제 2 절 연구보고서의 구성 및 개요 ····· 5

제 2 장 154kV 송전선로 보호시스템 ····· 7

제 1 절 2016~2020년 송전선로 고장통계 ····· 7

제 2 절 송전선로 보호시스템 개요 ····· 11

1. 154kV 송전선로 보호방식 및 선정기준 ····· 13

2. 154kV 송전선로 보호시스템 ····· 15

3. 송전계통 자동재폐로 운영방안 ····· 26

제 3 절 고저항 지락사고 검출 ····· 29

1. 고저항 지락사고 검출방식 ····· 29

2. 고저항 지락사고시 자동재폐로 ····· 30

3. 고저항 지락사고 동작사례 및 문제점 ····· 33

제 3 장 가공 송전선로 크레인 접촉사고 자동재폐로 방지를 위한 알고리즘 제안 ····· 40

제 1 절 송전선로 고장데이터 분석방법 ····· 40

1. 송전선로 고장해석 방법 ····· 41

2. 고장유형별 페이저 특징 ····· 45

3. 양단 고장데이터를 활용한 고장저항 연산 ····· 49
제 2 절 가공 송전선로 주요고장 분석 ····· 52
1. 고장분석 사례선정 및 방법 ····· 52
2. 크레인 고장데이터 분석 ····· 54
3. 낙뢰 고장데이터 분석 ····· 59
4. 조류 고장데이터 분석 ····· 64
5. 강풍 고장데이터 분석 ····· 70
6. 주요 송전선로 고장 종합분석 ····· 73
제 3 절 크레인 접촉사고 검출 및 자동재폐로 방지 알고리즘 제안 ····· 82

제 4 장 사례 연구 ····· 90
제 1 절 EMTP 계통모델링 및 고장모의 ····· 90
1. EMTP 계통모델링 ····· 90
2. 고장모의 결과분석 ····· 93
제 2 절 송전선로 주요 고장 알고리즘 적용결과 ····· 102

제 5 장 결 론 ····· 104

참고문헌 ····· 106

Abstract ····· 108

표 목 차

표 1.1.1 호주 22㎸ 및 SWER 선로에 대한 자동재폐로 권고 ·· 2
표 2.1.1 '16년~'20년 154㎸ 송전선로 보호계전기 동작 건수 ···· 7
표 2.1.2 전압별 송전설비 현황 [2021년 1월 기준] ····· 8
표 2.1.3 고장사례별 단·지락고장 건 수 ····· 8
표 2.1.4 154㎸ 송전선로 자동재폐로 동작 건수 ····· 9
표 2.1.5 154㎸ 송전선로 자동재폐로 성공률 ····· 10
표 2.2.1 계통구성별 송전선로 보호배전반 적용기준 ····· 13
표 2.2.2 154㎸ 단거리 송전선로 보호배전반 적용기준 ···· 14
표 2.2.3 전류차동계전기 동작연산식 ····· 18
표 2.2.4 단락고장시(AB상) 거리계전기 임피던스 연산 ··· 23
표 2.2.5 지락고장시(A상) 거리계전기 임피던스 연산식 ·· 24
표 2.2.6 전압별 재폐로 무전압시간 운영기준 ····· 27
표 2.2.7 자동재폐로 동기검정시간 및 위상각 운영기준 ·· 27
표 2.2.8 전압별 자동재폐로 방식 ····· 28
표 2.3.1 154㎸ AB #2T/L 고장이벤트 ····· 33
표 2.3.2 보호계전기 제작사별 87G, 87요소 설정값 ····· 38
표 3.2.1 154㎸ 송전선로 주요고장 분석 대상 ····· 53
표 3.2.2 고장 전·후 상전류 & 상전압 분석결과 ····· 73
표 3.2.3 위상차 및 고장저항 분석결과 ····· 75
표 3.2.4 보호계전기 연산 임피던스 분석결과 ····· 79
표 3.2.5 자동재폐로 분석결과 ····· 81
표 4.1.1 가공 송전선로 모델링을 위한 전원 및 선로 임피던스 90
표 4.1.2 송전선로 선종별 기본데이터 ····· 92
표 4.1.3 EMTP 송전선로 모델링 검증결과 ····· 93
표 4.1.4 보호계전기 검출요소 및 D/O 설정 ····· 94

표 4.1.5 송전선로 고장모의 시험결과 ····· 98
표 4.1.6 송전선로 긍장에 따른 고장모의 시험결과 ····· 100
표 4.2.1 송전선로 주요 고장사례 알고리즘 적용결과 ····· 102

그 림 목 차

그림 1.1.1 상정고장 발생시 계통안정도 영향 ····· 3
그림 2.2.1 전위·후위 보호계전기 ····· 11
그림 2.2.2 154㎸ 송전선로 보호시스템 ····· 12
그림 2.2.3 송전선로보호용 전류차동계전방식 ····· 16
그림 2.2.4 고장구간별 전류차동계전기 동작(A상 지락) ···· 17
그림 2.2.5 전류차동계전기 동작영역 표시 ····· 18
그림 2.2.6 세니온(국산) 전류차동계전요소 동작영역 ····· 19
그림 2.2.7 송전선로 거리계전기 동작영역 ····· 20
그림 2.2.8 거리계전기 오버리치와 언더리치 ····· 22
그림 2.2.9 송전선로 지락고장시 고장전류 흐름 ····· 23
그림 2.2.10 양단전원 계통에서의 고장점 저항의 영향 ····· 25
그림 2.2.11 송전선로 전압별 소이온시간 ····· 26
그림 2.3.1 영상전류 차동계전요소(87G) ····· 30
그림 2.3.2 송전선로 자동재폐로 로직 ····· 31
그림 2.3.3 ㈜세니온 송전선로 자동재폐로 로직 ····· 32
그림 2.3.4 154㎸ AB #2T/L 고장개요 ····· 34
그림 2.3.5 154㎸ AB #2T/L 전류차동계전기 동작파형 ····· 35
그림 2.3.6 154㎸ AB #2T/L 전압과 전류 위상차 분석 ····· 36
그림 2.3.7 전류차동계전기 87, 87G 동작분석 ····· 37
그림 3.1.1 발전기 3상 회로 ····· 42
그림 3.1.2 발전기 기본식 유도 및 개념 ····· 43
그림 3.1.3 정상상태 페이저 특징 ····· 45
그림 3.1.4 3상 단락고장 페이저 특징 ····· 46

그림 3.1.5 2상 단락고장 페이저 특징 ····· 47
그림 3.1.6 1선 지락고장 페이저 특징 ····· 48
그림 3.1.7 2선 단지락고장 페이저 특징 ····· 49
그림 3.1.8 양단 전원이 있는 송전선로 1선지락시 등가회로 ··· 50
그림 3.1.9 양단계통 고장저항 연산식 정확도 ····· 51
그림 3.2.1 크레인 Case3 고장데이터 분석결과 ····· 54
그림 3.2.2 크레인 Case12 고장데이터 분석결과 ····· 55
그림 3.2.3 크레인 Case12 고장데이터 분석결과 ····· 56
그림 3.2.4 크레인 Case12 자동재폐로 시간분석 ····· 57
그림 3.2.5 크레인 Case12 고장현장 ····· 58
그림 3.2.6 낙뢰 Case6 고장데이터 분석결과 ····· 59
그림 3.2.7 낙뢰 Case6 자동재폐로 시간분석 ····· 60
그림 3.2.8 낙뢰 Case6 고장현장 ····· 61
그림 3.2.9 낙뢰 Case24 고장데이터 분석결과 ····· 62
그림 3.2.10 낙뢰 Case24 자동재폐로 시간분석 ····· 63
그림 3.2.11 조류 Case2 고장데이터 분석결과 ····· 65
그림 3.2.12 조류 Case2 자동재폐로 시간분석 ····· 66
그림 3.2.13 조류 Case4 고장데이터 분석결과 ····· 67
그림 3.2.14 조류 Case4 자동재폐로 시간분석 ····· 68
그림 3.2.15 조류 Case4 고장현장 ····· 69
그림 3.2.16 강풍 Case3 고장데이터 분석결과 ····· 70
그림 3.2.17 강풍 Case3 자동재폐로 시간분석 ····· 71
그림 3.2.18 강풍 Case3 고장현장 ····· 72
그림 3.2.19 고장 후 상전압 & 상전류 분포도 ····· 74
그림 3.2.20 고장저항 분포도 ····· 76
그림 3.2.21 위상차 분포도 ····· 76
그림 3.3.1 크레인 접촉사고 검출 알고리즘 ····· 83

그림 3.3.2 위상차 동작영역 연산식 ····· 84
그림 3.3.3 보호계전기 위상차 연산 및 동작로직 ····· 84
그림 3.3.4 보호계전기 일정전압 연산 및 동작로직 ····· 85
그림 3.3.5 지락고장시 일정저항 동작영역 및 연산식 ····· 86
그림 3.3.6 보호계전기 일정저항 연산 및 동작로직 ····· 87
그림 3.3.7 보호계전기 전류변동율 연산 및 동작로직 ····· 88
그림 3.3.8 크레인 접촉사고 검출 알고리즘이 적용된 자동재폐로 동작로직 ····· 89
그림 4.1.1 EMTP-ATP draw 가공 송전선로 모델링 ····· 91
그림 4.1.2 EMTP 송전선로 모델링 데이터 입력값 ····· 92
그림 4.1.3 보호계전기 크레인 접촉사고 검출 알고리즘 ···· 94
그림 4.1.4 Case2 (FA10_고장위치 10%, 시험저항 1.1Ω) 분석결과 ····· 96
그림 4.1.5 Case13 (FA40_고장위치 40%, 시험저항 2.0Ω) 분석결과 ····· 97
그림 4.1.6 Case16 (FA40_고장위치 40%, 시험저항 3.6Ω) 분석결과 ····· 98

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경 및 목적

한전은 송전선로를 보호하기 위해 전류차동계전방식과 거리계전방식을 병행하여 적용하고 있으며, 송전선로에 고장이 발생하여 큰 전류가 흐르면 보호계전기가 이를 감지하여 차단기를 개방함으로써 다른 전력설비로의 고장파급 및 광역정전을 예방한다. 그리고 자동재폐로를 적용하여 낙뢰 등과 같은 순간고장에는 차단기를 자동으로 재투입하여 인근 선로의 과부하 및 전압 불안정 방지, 발전기의 과도안정도 향상 등 도모한다.

자동재폐로는 고장의 원인과는 무관하게 차단기를 우선 개방하고 공기절연 자연회복 시간이 지나면, 154㎸ 송전선로의 경우 최대 1회 자동투입을 하게 되는데, 순간 고장은 대부분 정상상태로 돌아오게 되지만, 영구 고장은 재폐로 과정에서 흐르는 과도한 전류가 선로 및 기기에 전기적 충격을 주게 되어 전력설비 고장 또는 수명 저하의 원인이 되고, 고장지점에 과도한 고장전류가 반복적으로 흐르게 되어 추가 아크 발생에 의한 화재 또는 작업자의 안전사고를 유발할 수 있다.

실제로 2009년 2월 호주 빅토리아주에서 발생한 11건의 대형 산불 중 일부가 선로 자동재폐로시 발생한 아크와 관련이 있는 것으로 밝혀졌으며, 아래의 표 1.1.1은 호주 22㎸ 및 SWER(Single wire earth return) 선로에 대한 자동재폐로 권고를 나타낸 것으로 자동재폐로에 의한 화재예방대책으로 산불취약지역 중 시골지역에 위치한 전력선의 비율과 화재예방기간 등을 고려하려 자동재폐로 횟수를 변경운전 하도록 하였다.

산불취약지역 중 시골지역에 위치한 전력선	전체 화재예방기간	Code Red 기간
시골지역의 약 20%	고속재폐로 2회	고속재폐로 1회
시골지역의 약 80%	1회 고속 + 1회 저속	1회 고속 + 1회 저속

표 1.1.1 호주 22㎸ 및 SWER 선로 자동재폐로 권고

국내에서도 2019년에 4월에 발생한 고성 산불의 간접적인 원인이 재폐로에 의한 것으로 조사되어 국내 자동재폐로 운영정책이 정전감소에서 안전우선으로 전환되는 계기가 되었고, 대책으로 송전계통은 산불 또는 화재 등이 발생하면 자동재폐로에 의한 더 큰 피해를 예방하기 위해 계통운영여건 등을 고려하여 자동재폐로를 off 운전하거나 선로를 수동으로 개방시키며, 배전계통은 지리적 특성, 선로부하 등을 고려하여 자동재폐로에 의해 화재가 발생할 가능성이 있는 선로의 자동재폐로를 축소운전하도록 하였다.

하지만, 자동재폐로 축소운전은 재폐로를 off 운전하거나 동작 횟수를 줄이는 것으로 2차 사고 예방에는 도움이 될 수 있으나, 정전시간 증가와 전력계통 안정도 유지 측면에서는 비효율적이다.

현 전력시장 운영규칙은 전력계통 상태를 정상상태, 경계상태, 비상상태 3가지로 구분하고 있다. 정상상태는 현 운전상태에서 상정고장이 발생하더라도 계통의 안정성을 유지할 수 있는 상태를 말하며, 경계상태는 안정유지기준을 만족하고 있으나 상정고장이 발생하면 정전이나 저전압이 발생하는 상태, 비상상태는 안정유지기준 범위를 위반하여 운영하고 있거나, 추가 고장이 발생하면 광역고장으로 파급될 우려가 있는 상태를 말한다.

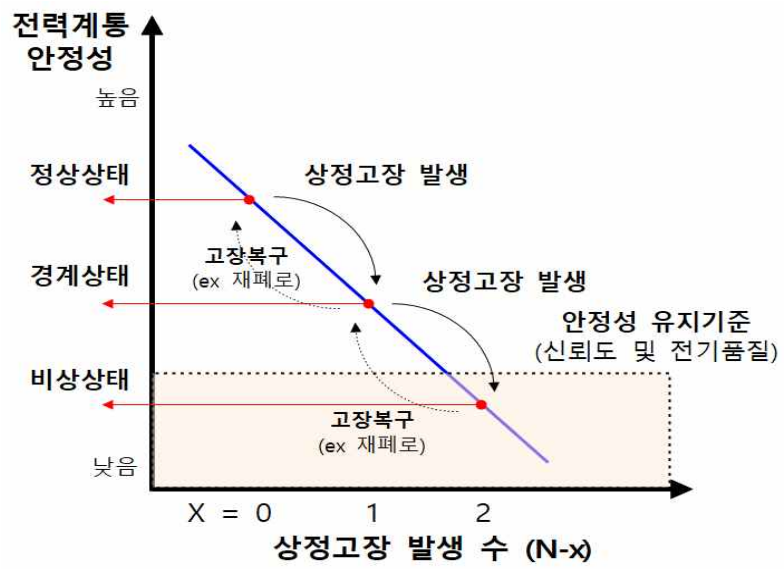


그림 1.1.1 상정고장 발생 시 계통안정도 영향

그림 1.1.1은 상정고장 발생의 계통안정도 영향을 보여주며, 현재 전력계통 상태가 안정유지기준을 만족하고 있어도 N-1, N-2 등 상정고장이 연속해서 발생하면 계통안정도는 저하되므로, 고장이 발생하면 가능한 한 신속하게 고장을 복구하여 계통안정도를 최대한으로 유지하여야 한다. 그러므로 송전선로 고장시 시행하는 자동재폐로는 순간고장에 신속한 고장복구가 가능하므로 안정도 유지에 매우 효과적이다. 만약 자동재폐로를 하지 않고 사람이 선로를 순시하여 고장원인 확인 후 수동으로 차단기를 재투입한다면 고장복구에 걸리는 시간이 증가하게 되고, 고장복구 이전에 타 선로에 또 다른 상정고장이 발생하면 정전이나 저전압 현상 등이 발생 할 가능성이 매우 커지게 된다.

영구고장에 대한 자동재폐로 최소화 방안은 선행연구로 2014년 계절별 송전선로 자동재폐로 성공률 통계분석을 통해 1년 중 영구고장에 대한 자동재폐로 확률, 즉 자동재폐로 실패율이 가장 높은 기간이나 선로에 한정해 자동재폐로를 선별적으로 off 운전하는 방안을 제안하였다.

하지만 이 방안은 단기적으로 즉시 시행할 수 있다는 장점은 있으나, 적용할 수 있는 개소가 한정적이고, 공급지장비용이 큰 중요계통에 적용하기에는 바람직하지 않아, 최종 연구결론으로 복합(지중+가공 혼재)송전선로에 지중구간 고장식별장치 사용이나 적응형 재폐로기법 등 영구고장 여부를 사전에 식별하여 선택적으로 자동재폐로를 시행하는 방안을 추가로 제시하였다.

이에 본 연구보고서에서는 획일적인 자동재폐로 off 없이 송전선로 보호계전기 자동재폐로 알고리즘 개선을 통해 영구고장을 사전에 식별하여 낙뢰와 같은 순간고장은 자동재폐로를 수행, 전력계통 안정도를 유지하고, 크레인 접촉사고와 같은 영구고장에는 자동재폐로를 최소화하여 2차 사고를 예방할 수 있는 방안을 마련하고자 한다.

제 2 절 연구보고서의 구성 및 개요

본 연구보고서에서는 현재 한전에서 적용하고 있는 고저항 지락사고 검출 방식의 적정성을 검토하여 크레인 접촉사고와 같은 영구고장에 자동재폐로를 방지할 수 있도록 좀 더 합리적인 방법을 제안하였다.

제 1장에서는 연구 배경 및 목적으로, 가공 송전선로 고저항 지락사고 발생시 자동재폐로 시행에 대한 위험성을 확인하였고, 자동재폐로 방지를 위한 합리적인 검출방식의 필요성을 설명하였다.

제 2장 1절은 고장통계로 최근 5년간 154㎸ 송전선로에서 발생한 고장의 종류와 발생 건수, 보호계전기 자동재폐로 동작 건수 및 성공률을 조사하였고, 크레인 접촉사고 발생비율 등을 알아보았다.

2절은 송전선로 보호시스템 개요로 계통구성에 따라 달라지는 154㎸ 송전선로 보호방식을 선정기준에 대해 기술하였고, 전압별, 선로구성 조건 등에 의해 결정되는 자동재폐로 운영방안에 대해 설명하였다.

3절은 고저항 지락사고 동작원리를 알아보기 위해 송전선로 PCM 전류차동계전기의 고저항 지락사고 검출방식과 보호계전기 제작사별 검출방식의 차이점을 조사하였으며, 고저항 지락사고시 자동재폐로 적용여부와 실제 크레인 접촉사고가 발생한 고장을 분석하여, 문제점에 대해 알아보았다.

제 3장 1절은 송전선로 고장해석 방법과 정상상태, 3상 단락, 2상 단락, 1선 지락, 2선 단지락 고장이 발생했을 때의 현상을 수치와 벡터적으로 기술하였고, 양단 고장데이터를 활용한 고장저항 연산방법을 소개하였다.

2절은 크레인 접촉사고와 타 고장사례와의 전기적인 차이점을 알아보

기 위해 가공 송전선로에서 발생한 주요고장을 분석하였으며, 정밀한 분석을 위해 설비부서 고장분석보고서와 양단 고장데이터가 확보된 사례를 대상으로 선정하여 고장전압 & 전류크기, 위상차, 고장저항, 고장임피던스를 분석하였다.

3절은 2절에서 분석한 데이터를 활용하여 가공 송전선로 크레인 접촉사고 검출과 자동재폐로 방지 알고리즘을 제안하였다.

제 4장은 사례연구로 제안한 크레인 접촉사고 검출 알고리즘 및 설정값에서 송전선로 고장위치에 따라 크레인 접촉사고를 검출할 수 있는 고장저항이 어떠한 값을 갖는지 알아보기 위해 EMTP-ATP Draw를 활용하여 154㎸ 송전선로 계통을 모델링 하였고, 고장위치에 따라 고장저항을 변경하여 다양하게 고장을 모의한 후 고장파형을 생성, 알고리즘이 적용된 보호계전기에 생성된 고장파형을 재생하여 그 결과를 확인하였다.

제 5장 결론에서는 본 연구보고서의 결과를 종합 정리하였다.

제 2 장 154kV 송전선로 보호시스템

제 1 절 2016~2020년 송전선로 고장통계

표 2.1.1은 지난 5년간('16년~'20년) 국내에서 발생한 154kV 송전선로 보호계전기 동작건수로 고장은 총 2,227건이며, 연평균 약 445건이 발생하였다. 고장원인 별로는 자연재해(낙뢰, 강풍 등)가 1,791건(80.5%), 이물접촉(크레인, 수목 등)이 313건(14%), 설비불량 및 작업실수 123건(5.5%)으로 자연재해 특히 낙뢰에 의한 고장이 전체고장의 62.2%로 가장 많이 발생하였다. 표 2.1.2에서 보듯이 국내 송전선로의 대부분이 가공 송전선로(87.5%)로 구성되어 있고, 또한 옥외에 설치되어, 고장에 노출이 많이 되어 있기 때문이다.

구분	154kV 송전선로 보호계전기 동작 건수								
	자연재해(80.5%)			이물접촉(14.0%)				설비 불량 (5.5%)	합계 (건)
	낙뢰	강풍	폭설, 화재	크레인	조류 배설물	비산물	기타		
2020년	213	107	1	21	26	4	-	22	394
2019년	120	42	36	17	35	6	11	33	300
2018년	282	74	83	7	36	3	4	24	513
2017년	474	-	4	11	37	4	10	15	555
2016년	297	28	30	21	44	4	12	29	465
합계 [건]	1,386	251	154	77	178	21	37	123	2,227
점유율 [%]	62.2	11.3	7.0	3.4	8.0	1.0	1.6	5.5	100

표 2.1.1 '16년~'20년 154kV 송전선로 보호계전기 동작 건수

2021년 기준	회선길이[C-㎞]			지지물[기]		
전압	가공	지중,수중	합계	철탑	기타	합계
765kV	1,025 (100%)	0	1,025	1,075	0	1,075
345kV	9,382 (95.6%)	430 (4.3%)	9,812	12,207	98	12,305
154kV	19,652 (83.6%)	3,837 (16.4%)	23,489	27,374	882	28,256
합계	30,059 (87.5%)	4,267	34,326	40,656	980	41,636

표 2.1.2 전압별 송전설비 현황 [2021년 1월 기준]

표 2.1.3에서 보듯이 낙뢰고장 1,386건 중 단상 지락고장은 1,008건으로 73%를 점유하였으며, 강풍(251건)으로 인한 갤러핑 현상으로 나타나는 단락고장은 112건으로 45%, 점퍼선 횡진으로 의한 암주재 혼촉 등 지락고장은 139건으로 55%를 점유하고 있다. 폭설로 인한 슬립현상은 전력선간의 단락고장을 유발하며 149건으로 97%를 점유하고 있으며, 크레인과 조류배설물은 각각 77건과 178건으로 모두 지락고장을 유발하였다.

구분		지락고장(건)	단락고장(건)	합계(건)
자연 재해	낙뢰	1,008(73%)	378(27%)	1,386
	강풍	139(55%)	112(45%)	251
	폭설,화재	5(3%)_화재	149(97%)	154
이물 접촉	크레인	77(100%)	-	77
	조류배설물	178(100%)	-	178
	비산물	14(67%)	7(33%)	21
	기타	29(78%)	8(22%)	37
설비불량		109(89%)	14(11%)	123
합계		1,559(70%)	668(30%)	2,227
※ 단락고장은 2선단지락, 3상 단락고장 포함				

표 2.1.3 고장사례별 단·지락고장 건수

표 2.1.4는 154㎸ 송전선로 자동재폐로 동작건수를 조사한 것으로 74.8%(1,664건)가 자동재폐로에 성공하였고, 12.5%(228건)가 실패, 가공 & 지중 혼재선로와 같이 차단기 재투입시 화재의 위험성이 있는 선로는 자동재폐로를 off 운전하는데, 이러한 자동재폐로 정부동작은 12.4%(271건)으로 조사되었다.

구 분	154㎸ 송전선로 자동재폐로 동작 건수				
	성 공	실 패	정부동작	오부동작	합 계
2020년	280	71	43	-	394
2019년	176	53	71	-	300
2018년	384	76	49	4	513
2017년	482	30	43	-	555
2016년	342	58	65	-	465
합계[건]	1,664	288	271	4	2,227
점유율[%]	74.8	12.5	12.4	0.3	100

표 2.1.4 154㎸ 송전선로 자동재폐로 동작 건수

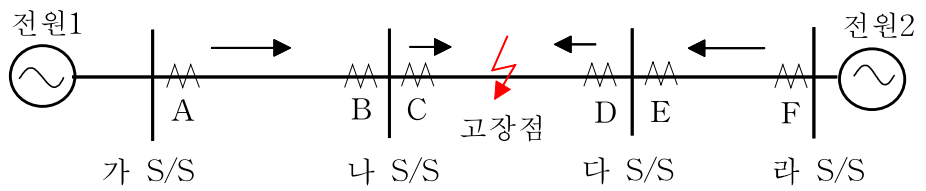
고장사례별로 자동재폐로 성공률을 조사한 결과, 자동재폐로 off 선로를 제외하면, 표 2.1.5와 같이 성공률은 85.2%로 조사되었고, 자연재해 중 낙뢰의 성공률이 97.3%, 이물접촉 중 조류배설물에 의한 성공률이 97.7%로 가장 높았다. 강풍, 폭설, 화재는 약 50%로 비교적 낮은 성공률을 보였는데, 전선 출렁임에 의해 발생한 고장현상이 지속적으로 유지하고 있기 때문이고, 크레인 접촉에 의한 보호계전기 동작은 총 77건으로 그 중 19건은 자동재폐로 기능을 off 중으로 정부동작 하였으며, 남은 58건은 모두 자동재폐로가 실패하였다.

구분	고장사례별 154㎸ 송전선로 자동재폐로 성공률								
	자연재해			이물접촉					
고장 사례 (총동작) (재폐로 off)	낙뢰 (1,386) (65)	강풍 (251) (31)	폭설, 화재 (154) (47)	크레인 (77) (19)	조류 (178) (5)	비산물 (21) (0)	기타 (37) (15)	설비불량 (123) (89)	합계 (2,227) (271)
2020년	8	32	-	19	3	2	-	7	71
2019년	4	14	11	12	-	4	6	2	53
2018년	4	32	31	4	-	-	2	3	76
2017년	12	-	-	10	-	2	4	2	30
2016년	8	14	10	13	1	-	4	8	58
실패합계 [건]	36	92	52	58	4	8	16	22	288
성공률 [%]	97.3	58.1	51.4	0.0	97.7	61.9	27.2	35.3	85.2
※ 자동재폐로 성공률[%] = [(총 동작 - 재폐로off) - 재폐로실패] / (총동작 - 재폐로off)×100									

표 2.1.5 154㎸ 송전선로 자동재폐로 성공률

제 2 절 송전선로 보호시스템 개요

송전선로는 전력용 변압기, 모선 등 다른 전력설비에 비해 넓은 지역에 설치되어 있어 위치적으로 낙뢰나 강풍 등 자연조건의 영향에 의한 고장발생 가능성이 크다. 이 때문에 보호계전기의 동작빈도가 높아 전, 후위에 있는 다른 보호계전기들과도 협조하여 오·부동작을 예방해야 하므로 전력계통에 설치된 여러 보호장치 중에서 송전선로 보호계전기가 가장 중심적 역할을 수행한다.



구분	전위 계전기	후위 계전기
각 계전기 방향성	C, D	A, F
각 계전기 무방향성	C, D	A, B, E, F

※ 계통의 고장점과 고장전류 공급전원 사이에 설치되어 서로 시간협조 되어야 할 인접한 2개의 보호계전기 중 전기적으로 고장점 쪽으로 더 근접되어 있는 것을 전위, 상대적으로 멀리 있는 것을 후위 보호계전기라 한다.

그림 2.2.1 전위·후위 보호계전기

송전선로는 고장발생시 신속하고 정확하게 고장이 제거되어야 하고, 외부고장이나 다른 설비의 고장에는 타 보호계전장치들과 충분히 협조되

어, 오·부동작 하는 사례가 발생하지 않도록 높은 신뢰도를 갖춘 보호계전장치를 설치·운용해야 한다.

현재 한전에서 적용 중인 송전선로 보호계전방식은 과전류 계전방식, 방향성 과전류계전방식, 전기적 임피던스를 이용한 거리계전방식, 통신설비를 이용한 PCM 전류차동계전방식(Pulse Code Modulation) 등이 있으며, 계통구성의 중요도, 보호상의 문제점, 신뢰도, 경제성 등에 따라 적절한 보호방식을 채택·적용하고 있다.

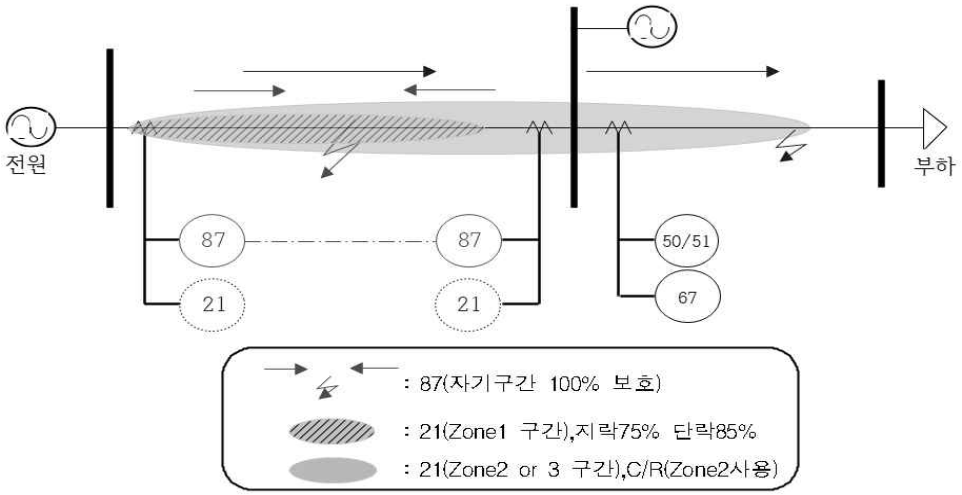


그림 2.2.2 154kV 송전선로 보호시스템

그림 2.2.2는 154kV 송전선로 보호시스템을 나타낸 것으로, 송전선로 보호를 위해 적용되는 전류차동계전기의 기구번호는 87, 거리계전기 21, 과전류계전기 50(순시) / 51(한시), 방향성과전류 계전기는 67번이다. 전류차동계전기는 송전선로 양단의 CT 내부구간 100%를 순시로 보호할 수 있으므로 주보호계전기(Main Protective Relay)라고 하며, 거리계전기의 경우 변전소 편단의 전압, 전류만을 입력 받아 고장여부를 판단하여, 송전선로정수 오차, CT & PT 계측오차, 계전기 오차 등을

고려 시 동작범위를 100%로 설정하지 못하므로 후비보호계전기(Backup Protective Relay)라고 한다.

1. 154kV 송전선로 보호방식 및 선정기준

송전선로 보호방식을 선정하기 위해 한전 계통보호담당자는 송변전 설비 중장기 계획 및 송전선로 건설, 운영 자료를 기초로 송전선로의 전압, 긍장, 선종 및 관련 계통상황을 파악한 후 송전선로의 전압, 중요도 및 통신방식을 고려하여 적합한 주보호 및 후비보호방식, 자동재폐로 방식 등을 선정한다.

154kV Loop 계통 송전선로 보호배전반		
피보호 설비	주보호	후비보호
가공 송전선로 (지중, 일부지중 포함)	전류차동방식	거리계전방식(3단계)
단거리 송전선로	전류차동방식(2계열)	거리계전방식(3단계)
※ 자동재폐로 : 가공선로 → 적용, 지중선로 → 적용 않음 복합선로 → 지중구간 30% 미만시 기능구비		

154kV T분기 송전선로(3단자) 보호배전반		
피보호 설비	주보호	후비보호
"T"분기 양단 전원 측	전류차동방식	거리계전방식(3단계)
"T"분기 비전원단 측	전류차동방식	적용안함
※ 필요시 "T" 분기의 비전원단 측 보호계전방식은 별도검토 가능		

154kV 방사상 송전선로 보호배전반	
피보호 설비	적용보호계전 방식(단락, 지락)
154kV 송전선로(방사상)	방향성과전류 또는 과전류계전방식
※ 계전기 3대로 2 out of 3 방식의 Trip 회로 구성	

표 2.2.1 계통구성별 송전선로 보호배전반 적용기준

표 2.2.1은 계통구성별 송전선로 보호배전반 적용기준으로 154㎸ 송전선로는 계통구성에 따라 보호방식이 결정되며, 양전원 계통 및 병행회선이 있는 방사상 송전선로의 주보호는 전류차동방식을 적용한다. 다만, 계통보호용 통신설비 여건상 전류차동방식 적용이 곤란 할 경우 별도의 적합한 보호방식을 검토하여 결정한다. 그리고 병행회선이 없는 1회선 방사상 송전선로의 주보호는 과전류계전방식을 적용하고 고객 구내에 설치된 발전기 등에 의해 고장전류 흐름이 바뀔 수 있는 경우는 방향성 과전류계전방식 등 별도의 적합한 보호방식이 적용되고, 계통보호 신뢰성 확보가 특별히 필요한 경우 전류차동방식을 적용할 수 있다. 과전류계전방식 또는 방향성과전류계전방식을 적용한 고객선로는 보호계전기 오동작 방지 및 동작의 신뢰성 향상을 위해 서로 다른 제작사 보호계전기 3대로 “2 out of 3” 방식을 적용하여 보호계전기 3대 중 2대 이상이 동작할 때 차단기가 Trip 되도록 회로를 구성한다.

아래의 표 2.2.2는 단거리 송전선로 보호배전반 적용기준으로, 송전선로 긍장이 매우 짧으면 거리계전기 설정탭 성능에 따라 임피던스 연산에 오차가 발생하게 되고, 지중 2도체로 건설되어 선로 전체 임피던스의 30%를 초과하거나, 지중 100% 선로는 지락고장시 거리계전기의 오동작이 우려되어, 주보호방식을 2계열화(전류차동계전기 2대)하고 거리계전기 Zone1은 동작지연시간을 주거나 off로 설정하여 보호한다.

① 송전선로의 정상분 리액턴스(X1) 값이 0.2[%Z] 미만인 선로
② 송전선로의 SIR(Source Impedance Ratio) 값이 10을 초과한 선로
③ 지중 2도체로 건설된 선로 중 지중구간의 임피던스가 선로 전체 임피던스의 30%를 초과하는 선로 또는 지중송전선로 100% 구간

표 2.2.2 154㎸ 단거리 송전선로 보호배전반 적용기준

후비보호 거리계전방식은 양전원 계통 및 병행회선이 있는 방사상 송전선로에 적용하며, 병행회선이 없는 1회선 방사상 송전선로의 후비보호 방식은 적용하지 않는 것을 원칙으로 하되, 주보호방식으로 전류차동방식을 적용한 곳은 Remote Back-up 보호기능 수행을 위해 전원단측에 후비보호 방식을 적용한다.

T분기 송전선로의 경우, T분기측이 전원단일 경우는 후비보호를 적용하며, T분기측이 비전원단일 경우는 후비보호를 적용하지 않는다. 다만, 계통보호의 신뢰성 향상을 위해 필요시 별도로 검토하여 적용할 수 있다. 계통의 여건 및 기타 조건 등에 따라 후비보호방식 적용이 곤란하거나 후비보호방식 동작의 신뢰성 확보가 곤란 할 경우는 주보호방식을 2계열화 할 수 있다.

2. 154㎸ 송전선로 보호시스템

가. PCM 전류차동계전기

PCM이란 Pulse Code Modulation(보호화변조)의 약어이며, 데이터 전송의 한 방법으로, 양전원 계통의 송전선로 보호를 위해 광통신을 이용해 전류치를 주고 받으며 보호구간 각 단자의 전류치를 샘플링하여 부호화한 후 상대단으로 전송하고 전류크기와 방향을 비교, 고장구간을 판정하는 방식이다.

PCM 전류차동계전방식의 기본원리는 정상상태에서 송전선로 양단의 전류차는 없으며, 고장발생시 양단 간 전류차가 발생하고 설정값 이상이

되면 고장으로 판단하여 양단 차단기에 개방신호를 보낸다. 전류차동계전방식을 구성하기 위해서는 아래의 그림 2.2.3과 같이 송전선로 양단에 보호계전기를 설치하고 통신을 연결하여 Master 측과 Slave 측을 설정하면 양단간에 전류 데이터를 송수신하게 된다.

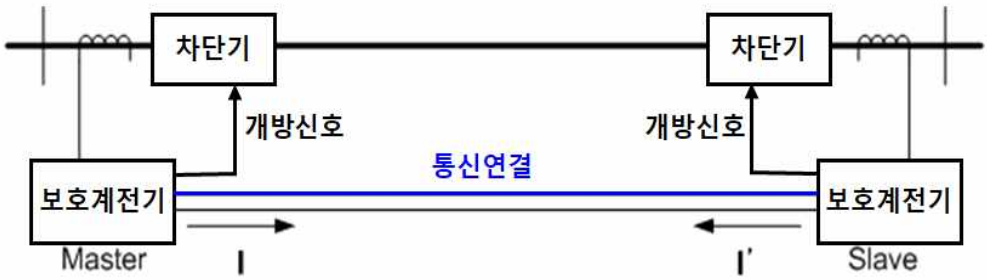


그림 2.2.3 송전선로보호용 전류차동계전방식

통신장치를 사용하는 전류차동계전방식은 양단의 동일한 시점의 전류값을 비교하는 것이 가장 중요하므로 통신회선의 신뢰도가 높게 요구되며, 외란에 거의 영향을 받지 않고 전송속도가 고속(64kbps)인 광섬유가 주로 사용된다. 또한, 통신선로 상태를 상시 감시하여 전송로 이상시에는 Trip이 저지되며, Data 전송에 따른 시간지연은 계전기 동기확인회로에서 자동으로 보상되며 계전기에서 요구하는 최대 지연시간은 1cycle 정도로 가급적 전송지연이 없도록 한다.

전류차동방식의 보호구간은 양단변전소 CT 내부구간으로, 송전선로에 고장이 발생하면 선로 양단의 전류값을 비교하여 차전류가 있으면 내부고장, 차전류가 없으면 외부고장으로 판단하여 송전선로 100% 구간에 대해 고장검출이 가능하다. 전류차동계전기는 각 상별로 차전류를 계산하며 A상, B상, C상 각각 전류차동계전요소가 있어, A상 지락고장시에는 A상 전류차동계전요소만 동작하며, BC상 단락고장시에는 B상과 C상

전류차동계전요소가 동작한다. N상 전류차동계전요소는 계전기 제작사마다 다르나 일반적으로 별도로 설치되어 있지 않고, 지락고장에 대한 구분을 위해 동작표시만 N상을 표시한다.

아래 그림 2.2.4는 고장구간별 전류차동계전기 동작(A상 지락)으로 AA, BB 변전소간 송전선로 정상운전시 AA변전소의 A상 전류가 87계전기 방향으로 인가되고, BB변전소의 A상 전류가 접지방향으로 인가되어 두 전류를 합하면 차전류가 “0” 이 되어 전류차동계전요소는 동작하지 않으며 B,C상도 같은 원리로 동작하지 않는다.

외부고장 시에는 큰 고장전류가 양단변전소를 통해 흐르지만, AA변전소의 A상 전류가 87계전기 방향으로 인가되고, BB변전소의 A상 전류가 접지방향으로 인가되어 두 전류를 합하면 역시 차전류가 “0” 이 되어 전류차동계전기가 동작하지 않는다.

단, 내부고장시에는 양단변전소에 각각 고장전류가 유입되며 A상 전류가 모두 87계전기 방향으로 인가되어, 두 고장전류를 합하면 큰 차전류가 발생하여 전류차동계전요소에 의해 양단 차단기가 모두 개방된다.

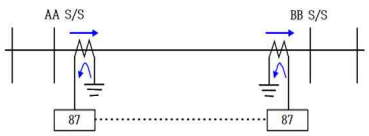
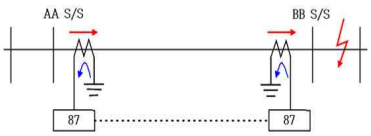
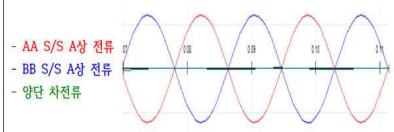
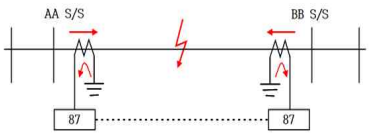
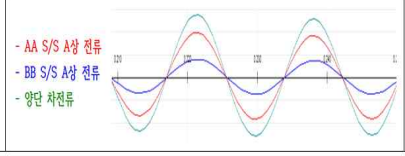
구분	고장 전류 흐름	파형	보호계전기 동작
정상 상태			정부동작
외부 고장			정부동작
내부 고장			동작

그림 2.2.4 고장구간별 전류차동계전기 동작(A상 지락)

표 2.2.3과 그림 2.2.5는 전류차동계전기 동작연산식과 동작영역을 나타낸 것으로 전류차동계전기는 각 상별로 전류를 계산하도록 되어 있고, 동작특성은 계전기 제작사마다 다를 수 있으나 일반적으로 x축의 경우 억제전류로 양단의 스칼라 합전류를 이용하고, y축은 동작전류로 벡터합 전류를 이용한다. 즉, x축의 전류치의 경우에는 부하의 증가나 고장전류가 증가하면 그 방향에 관계없이 크기가 커지며, y축의 전류치는 부하의 증가나 외부고장시에는 커지지 않고, 내부고장으로 그 방향이 일치할 경우에만 증가하도록 되어 있다.

구분	연산식
동작전류	Id = | I + I' | = | (Ir + Ir') + j(Ii + Ii') | : 자단전류와 상대단 전류의 "벡터합"
억제전류	Ir = | I | + | I' | ; 자단전류와 상대단 전류의 "스칼라합"
※ Id(동작전류), Ir(억제전류), I(자단전류), I' (상대단전류)	

표 2.2.3 전류차동계전기 동작연산식

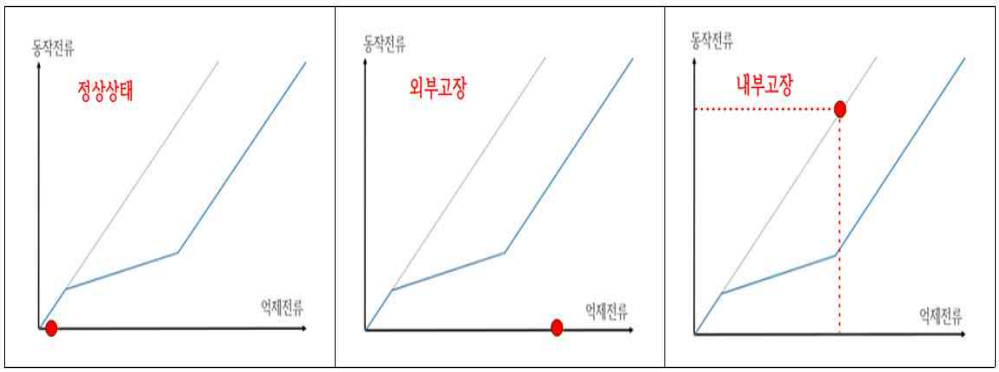


그림 2.2.5 전류차동계전기 동작영역 표시

전류차동계전요소는 동작전류와 억제전류로 이루어지는 평면에서 설정할 수 있다. 이론적으로 정상상태의 양단 벡터합은 0 이므로 동작전류가 없지만, 실제로는 정상상태에서의 오차를 고려하여 전류차동요소 최소동작전류를 설정하여야 한다. 오차발생 요소로는 고정오차와 비례오차가 있으며, 고정오차는 계통전류의 크기와 관계 없이 일정하게 발생하는 오차로 계전기 Analog 회로 오차, Digital 변환 오차가 있고, 비례오차는 계통전류의 크기에 비례하여 발생하는 오차로 계측 CT 및 계통주파수 변동으로 인한 오차, Analog 회로의 필터보정 오차, 양단 데이터 송수신에 의한 전송지연시간차 오차 등이 있다. 그러므로 최소동작전류가 고정오차와 비례오차의 합에 의해 오동작하지 않도록 동작영역을 설정해야 한다.

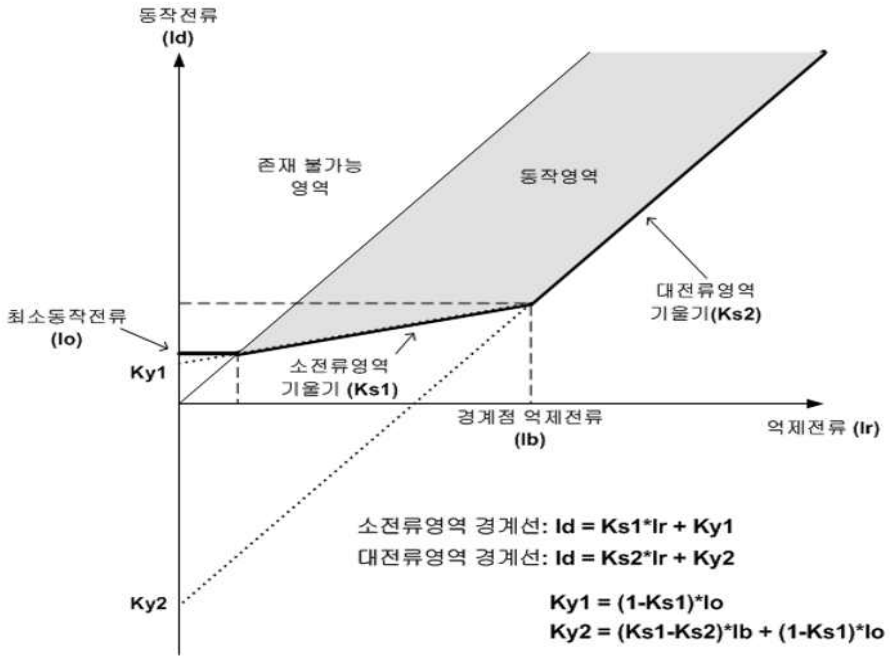


그림 2.2.6 세니온(국산) 전류차동계전요소 동작영역

나. 송전선로 거리계전기

거리계전기는 PT와 CT에서 입력되는 전압과 전류의 크기 및 위상차를 이용해 전기적 임피던스를 계산하여 고장점까지의 거리를 측정하는 계전기로 154kV 계통 이상의 송전선로 후비보호, 345kV 변압기 후비보호, 발전기 후비보호 등에 다양하게 사용되고 있다. 거리계전기 설정을 위해서는 송전선로의 임피던스 데이터가 필요하며 전선의 굵기, 복도체 수, 회선수, 선간거리, 지상고, 가공지선, 연가 등을 고려하여 수식으로 계산하거나 현장에서 장비를 이용해 직접 실측하여 구할 수 있다.

송전선로 임피던스는 선로가 건설된 이후에는 거의 변하지 않으며 거리계전기는 보호구간의 임피던스를 미리 설정하여 고장시 계산된 임피던스가 설정된 임피던스보다 작으면 내부고장, 크면 외부고장으로 판단한다.

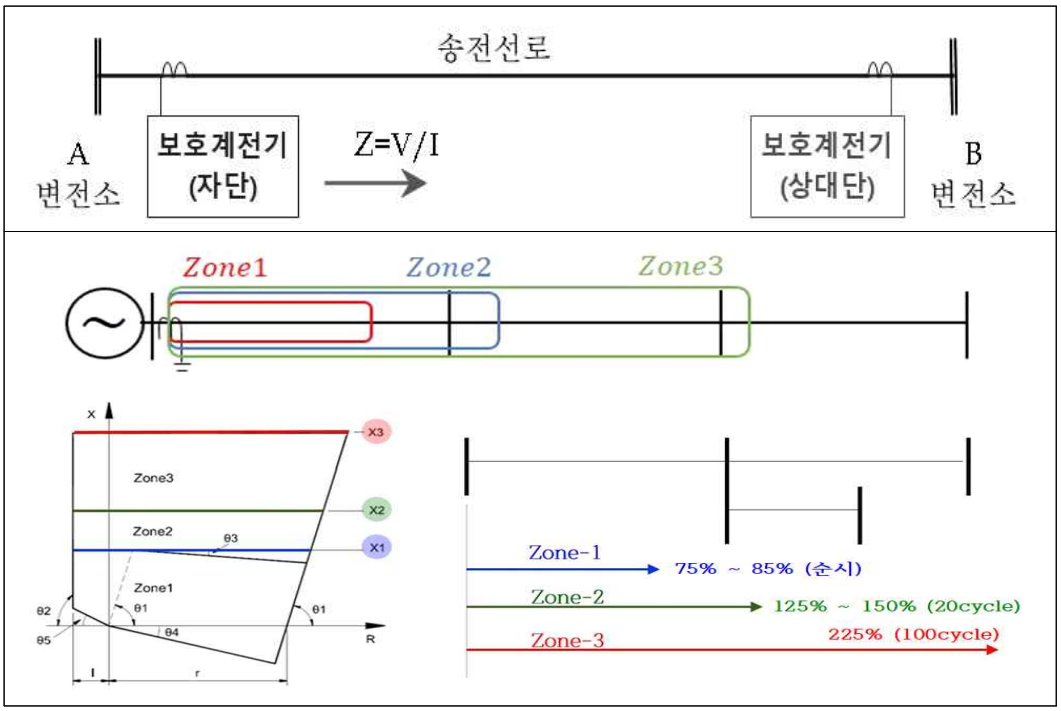


그림 2.2.7 송전선로 거리계전기 동작영역

위 그림 2.2.7은 송전선로 거리계전기 동작영역으로 한전은 Zone1, Zone2, Zone3로 구성되는 3단계 한시거리계전방식을 적용하고 있으며, Zone1은 보호하려는 송전선로 자기구간 고장 발생시 동작을 목적으로 하며 변류기(5%), 변성기(5%), 계전기(5%), 선로 임피던스(3%) 등의 오차가 커지더라도 자기구간(보호하려는 송전선로 임피던스)을 넘지 않도록 자기구간 선로 임피던스의 75 ~ 85%에 동작치를 설정하고, 오차를 여유있게 고려하여 자기구간이 확실한 고장을 빨리 제거하기 위해 동작시간을 순시(30㎳, 약 2Cycle이내)로 한다.

Zone2는 Zone1과 같이 보호하려는 송전선로 자기구간 고장 발생시 동작을 목적으로 하며, 자기구간 선로 임피던스의 125% ~ 150%에 동작치를 설정하고 동작시간은 순시로 할 경우 자기구간 다음 구간 고장시 보호협조가 불가능하므로, 동작시간을 20Cycle로 한다.

Zone3는 다음 구간 보호를 위한 것으로 다음 구간에 설치된 PCM 전류차동계전기나 거리계전기가 부동작 또는 차단기 지연동작 등의 이유로 정해진 시간내에 고장이 제거되지 않으면 동작하도록 되어 있으며, 동작범위를 다음 구간 중 가장 긴 선로를 포함하는 구간까지 동작범위(자기구간 임피던스 100% + 다음 최장구간 임피던스 125%)를 두고, 동작시간은 100Cycle이상 고장이 지속 되면 동작하도록 한다.

거리계전기 Zone1, Zone2, Zone3 동작치(임피던스)를 설정하고, 고장발생시 전압, 전류를 입력하여 연산하면 측정임피던스가 산출된다. 측정임피던스가 Zone1, Zone2, Zone3 동작치보다 작으면 거리계전기가 동작하게 된다. 거리계전기 정상운전 중 자기구간이 아닌 곳에서 거리계전기가 동작할 경우 오동작이 발생하였다고 하며, 동작범위(Reach)를 오버(Over)하였으므로 이를 거리계전기 오버리치(Overreach)라고 한다. 그리고 거리계전기 정상운전 중 자기구간 고장에 동작하지 않을 경

우 부동작이라고 하며, 동작범위를 언더(Under)하였으므로 거리계전기 언더리치(Underreach)라고 한다.

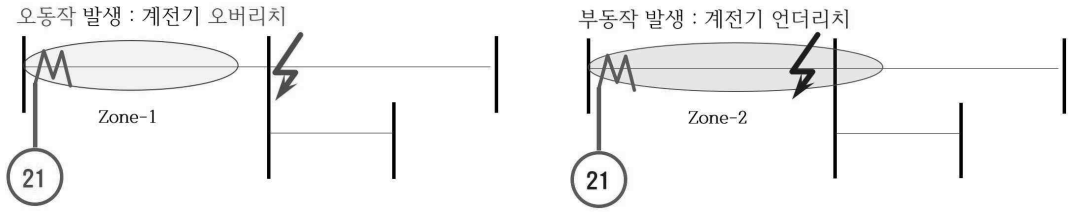


그림 2.2.8 거리계전기 오버리치와 언더리치

거리계전기는 크게 단락과 지락거리계전기로 나눌 수 있으며, 단락거리계전기에는 AB, BC, CA상 계전기가 있으며, 지락거리계전기에는 A, B, C상 계전기가 있어 총 6개의 계전기로 이루어져있다. 예전 전자기계형이나 정지형계전기는 물리적으로 각 6대의 거리계전기를 설치하였으나, 현재 사용하고 있는 디지털 거리계전기는 1대의 계전기에 6개의 거리계전요소가 내부에서 운전되고 있으며, 각 6개의 거리계전요소 운전이 하드웨어적으로 분리된 것처럼 각 요소간 순차 운전이 아닌 동시 운전되도록 Full Scheme Operation을 원칙으로 한다. 6개의 거리계전요소는 Zone1, Zone2, Zone3의 동작치 및 동작시간이 각각 설정되어 고장이 발생 할 경우 6개 Loop안에 3개 Zone의 동작치 보다 측정치가 작아지면, 먼저 동작하는 요소에 의해 거리계전기가 동작된다.

표 2.2.4는 단락고장시(AB상) 거리계전기 임피던스 계산식으로 송전선로 단락고장시 고장전류는 송전선로 상도체에서 상도체로 귀로하여 폐로를 구성하므로, 단락거리계전기 동작치 설정은 정상임피던스를 기준으로 동작치를 설정하면 된다. 이를 대칭좌표법을 이용하여 수식적으로 해석하면 고장시에 계전기가 측정하는 임피던스와 정상임피던스가 같음을 알 수 있다.

$$V_{AB} = V_A - V_B = (1-a^2)V_1 + (1-a)V_2$$

여기서, $V_1 = I_1 \cdot Z_1 V_2 = I_2 \cdot Z_2 = I_2 \cdot Z_1, (Z_1 \fallingdotseq Z_2)$

$$V_{AB} = Z_1[(1-a^2)I_1 + (1-a)I_2]$$

$$= Z_1[(I_0 + I_1 + I_2) - (I_0 + a^2 I_1 + aI_2)] = Z_1(I_A - I_B)$$

$$Z_1 = \frac{V_{AB}}{I_A - I_B} = \frac{V_{AB}}{I_{AB}} = Z_{AB}$$

표 2.2.4 단락고장시(AB상) 거리계전기 임피던스 연산

송전선로에 A상 지락고장이 발생하면 고장전류 폐로는 그림 2.2.9와 같이 가공지선으로 약 2/3, 대지로 약 1/3정도가 병렬회로로 만들어져 변전소로 귀로하게 된다.

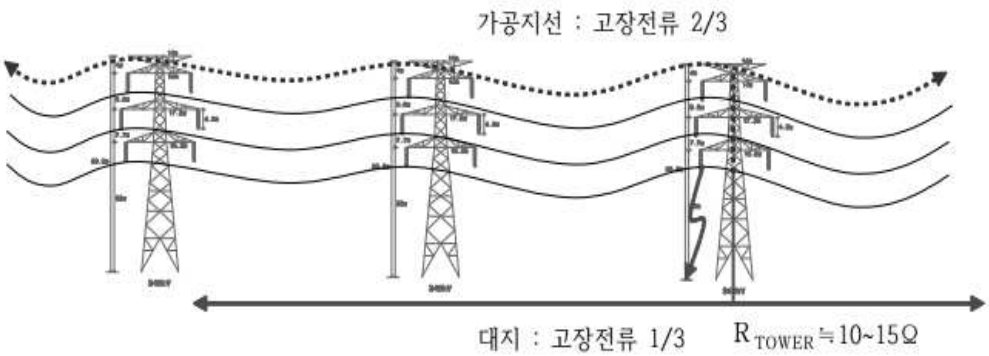


그림 2.2.9 송전선로 지락고장시 고장전류 흐름

상도체와 가공지선, 대지로 만들어진 회로가 지락고장의 폐로가 되며, 이렇게 가공지선과 대지로 귀로하게 되는 것을 영상임피던스를 두어 동작치 설정시 보정하고 있다. A상 지락고장이 발생하면, A변전소 고장전

압과 전류를 이용하여 고장점까지 임피던스를 계산하고, 지락고장의 폐로를 고려하여, 정상 임피던스로 동작치를 설정하고 여기에 영상임피던스를 보상계수(K)로 보정하여 거리계전기의 동작범위 정확성을 높인다. 즉, 지락거리계전기가 고장점까지의 임피던스를 정확하게 측정하려면 표 2.2.5의 수식과 같이 영상임피던스를 보상계수(K_0)로 보정하며, 가공송전선로의 경우 영상임피던스가 정상임피던스보다 약 3~4배 더 크므로 전류를 더 크게 연산하도록 하여 거리계전기가 보호범위를 작게 보는 언더리치 현상을 방지한다. 하지만, 지중송전선로의 경우는 영상임피던스가 정상임피던스 보다 약 1/4~1/3이 되어 전류를 더 작게 연산하도록 하는 것이 거리계전기의 오버리치 현상을 방지할 수 있다.

$$V_A = V_1 + V_2 + V_0 = I_1 Z_1 + I_2 Z_2 + I_0 Z_0$$

$$= I_1 Z_1 + I_2 Z_2 + I_0 Z_1 - I_0 Z_1 + I_0 Z_0$$

$$= Z_1 (I_1 + I_2 + I_0) - I_0 (Z_1 + Z_0)$$

$= Z_1 I_A - I_0 (Z_1 + Z_0)$가되므로, 계전기가보는 임피던스는

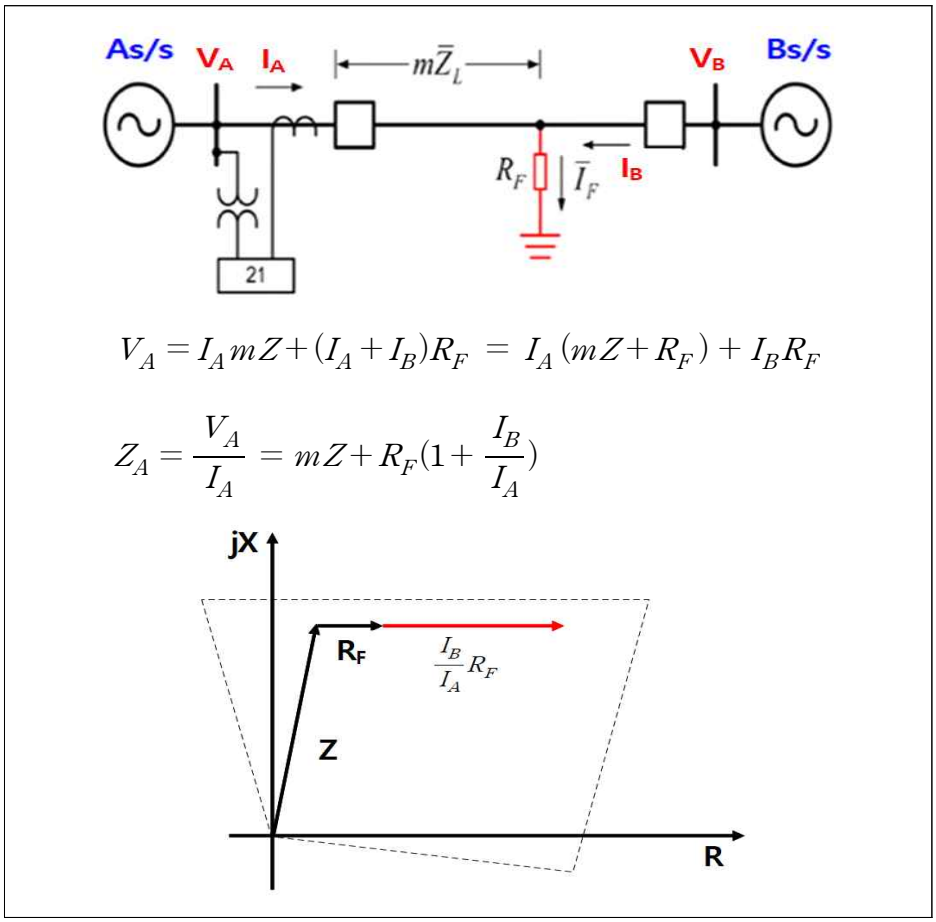
$$Z_1 = \frac{V_A}{I_A + \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \cdot 3I_0}$$ 가되어 $\frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} \cdot 3I_0$ 만큼

*Underreach*하게된다. 즉, K_0(보상계수) $= \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$

표 2.2.5 지락고장시(A상) 거리계전기 임피던스 연산식

그림 2.2.10은 양단전원 계통에서 고장점 저항 R_F가 거리계전기에 미치는 영향을 나타낸 것으로 양단전원 계통에서는 상대단에서 공급하는

전류의 크기에 따라 거리계전기 동작영역에 미치는 영향이 달라진다. 상대단 전류 I_B에 의해 고장점 저항에서 발생하는 전압강하가 자단전류 I_A에 의해서 발생하는 전압강하에 추가되어 자단전압 V_A가 높아지게 되므로 A 변전소측 거리계전기가 측정하는 임피던스는 실제 임피던스 보다 커지게 된다. I_B에 의해서 증가 된 임피던스는 그림 2.2.10과 같이 저항 R측 방향으로 이동하게 된다.



$$V_A = I_A mZ + (I_A + I_B)R_F = I_A(mZ + R_F) + I_B R_F$$

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A} = mZ + R_F(1 + \frac{I_B}{I_A})$$

그림 2.2.10 양단전원 계통에서의 고장점 저항의 영향

3. 송전계통 자동재폐로 운영방안

송전선로 고장의 80~90%는 낙뢰 등에 의해 절연체가 Flashover 되어 발생한 순간고장이며 영구고장은 10% 이하이다. 순간고장은 고장원인이 제거되고, 고장점의 절연이 회복되면 송전선로를 다시 가압할 수 있게 된다. 이때 자동재폐로를 적용하여 송전선로를 빠르게 재가압하면 전력을 자동으로 복구할 수 있으며, 인근 송전선로의 과부하를 방지하고 전력계통안정도를 향상할 수 있다.

자동투입을 안전하게 수행하기 위해서는 고장에 의해 발생하는 공기의 이온화가 소멸하는 시간이 필요하며, 이를 무전압시간(Dead Time)이라고 한다. 무전압시간은 보호계전기가 동작하여 차단기가 개방되고 아크가 소멸된 시점부터 차단기 재투입으로 전류가 통전되기 전까지 시간을 말한다.

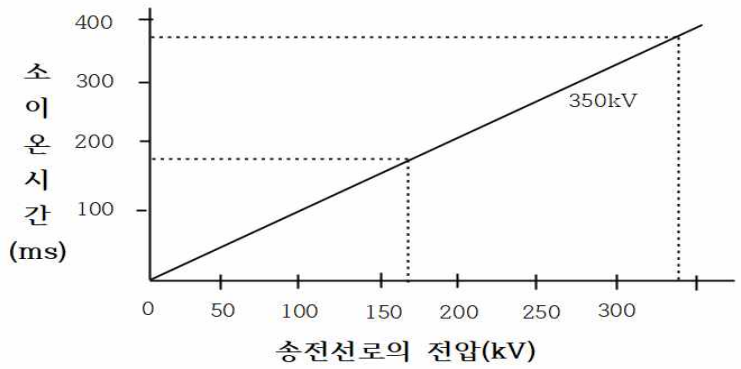


그림 2.2.11 송전선로 전압별 소이온시간

전력계통안정도를 위해서는 무전압시간이 짧을수록 유리하지만, 전력계통의 동기 유지시간, 차단기 동작책무, 고장점의 소이온시간, 보호계전

기 동작복귀시간 등을 고려해야 하며, 무전압시간 결정시 여유(Margin)를 주어 자동투입 시간을 결정한다. 자동투입 시간은 154㎸ 송전선로는 3상 자동투입 18Cycle, 345㎸ 송전선로는 3상 자동투입 24Cycle, 단상자동투입 48Cycle를 적용하고 있다.

정격전압	재폐로 무전압시간 운영기준
154㎸	▪ 18cycle(0.3초)
345㎸	▪ 단상 재폐로의 경우: 48cycle(0.8초) ▪ 3상 재폐로의 경우: 24cycle(0.4초) ▪ 발전단에서 재폐로 할 경우 : 송전단 36cycle(0.6초)

표 2.2.6 전압별 재폐로 무전압시간 운영기준

송전계통은 배후계통의 크기에 따라 가압단과 수전단을 정하며, 영구고장 상태에서는 배후계통이 작은 변전소에서 가압할 때 계통에 미치는 영향이 적으므로 약전원 측을 가압단으로 하는 것을 추천하고 있지만, 상정고장시 변전소 전면정전 미발생 등 다양한 조건을 고려하여 한전은 배후계통이 큰 변전소를 가압단으로 정하고 있다. 가압단과 수전단이 정해지면 전압은 정격전압의 80%이상, 위상은 25˚~ 30˚ 이내에서 자동투입을 허용하고 있으며 이러한 동기검정은 양전원이 완전히 분리되었다가 병입되는 3상 자동투입에는 반드시 필요하지만 단상 자동투입시에는 건전상 2상이 계통에 병입 되어 있으므로 동기검정이 필요하지 않다.

전압별 재폐로 동기검정시간 및 위상각 운영기준				
정격 전압	동기점정 시간		동기검정 위상각	
	발전기 단자	송전선로	발전기 단자	송전선로
154㎸	2초	0.2초	25도	25도
345㎸	2초	0.2초	30도	30도

표 2.2.7 자동재폐로 동기검정시간 및 위상각 운영기준

자동투입 방식에는 단상, 3상, 다상 자동투입으로 구분할 수 있으며 3상 자동투입은 고장상에 관계없이 3상 개방 후 3상 재투입하는 방식으로 154㎸급 이상 송전선로에 적용하며 단상 자동투입은 1선 지락시 고장상만을 차단시킨 후 재투입하는 방식으로 345㎸ 이상 송전선로에 적용하고 있다. 또한 병행 2회선 중 서로 다른 건전상이 2상 이상일 때 자동투입하는 다상 자동투입 방식은 765㎸ 송전선로에 적용한다. 자동투입은 가공선로에 적용하며 지중선로의 고장은 대부분이 영구고장으로 자동투입을 적용치 않는다. 또한, 송전선로 지중구간이 30% 이상이거나 선로의 일부가 OF케이블인 경우 화재의 위험성이 높아 자동투입을 적용치 않는다.

정격전압	자동재폐로		선로별 자동재폐로 적용여부
	방식	회수	
154㎸	3상	1회	▪ 가공 : 적용
345㎸	1상, 1+3상	1회	▪ 지중 : 적용 않음
765㎸	다상	1회	▪ 복합 : 지중구간 30% 미만시 적용

표 2.2.8 전압별 자동재폐로 방식

또한, 전력계통에는 송전선로 이외에도 여러 전력설비와 그 전력설비를 보호하기 위한 보호장치와 계전기가 있으며 변압기, 모선, 리액터, 커패시터, 차단실패 등의 보호계전기가 동작하면 전력설비가 영구고장일 가능성이 있으므로 재폐로를 방지(Blocking)한다. 이외에도 재폐로 방지 조건을 살펴보면 수동차단, 활선작업, 계통동요 및 동기탈조 등이 있다.

제 3 절 고저항 지락사고 검출

1. 고저항 지락사고 검출방식

송전선로에 발생하는 고저항 지락사고는 고장전류도 미소하고 전압강하도 크지 않아 고장검출이 쉽지 않다. 또한, 지락사고를 유발하는 물체의 재질이 같다 할지라도 고장장소에 따라 고장전류의 크기는 달라지며, 동일한 장소라도 전선의 종류에 따라 고장전류 크기가 달라지므로 특정한 검출 알고리즘을 적용하는데 어려움이 있다. 현재는 통신을 이용한 PCM 전류차동계전기의 양단 영상전류 비교방식에 의해 약 800Ω~1400Ω의 고저항 지락사고 검출이 가능하다.

전류차동계전기는 고저항 지락사고를 검출하기 위해 양단의 영상전류($3I_0$)를 비교하며, 설정값 이상 발생시 영상전류 차동계전요소(87G)가 동작한다. 87G 요소는 고장전류가 크지 않는 고저항 지락사고를 검출하기 위한 것으로, 영상전류의 크기가 큰 경우는 고려할 필요가 없다. 만약 영상전류가 큰 경우라면 87(전류차동) 요소가 동작하기 때문에 87G는 87에서 사용하는 대전류 영역(전류의 크기가 커서 발생하는 오차, CT 포화현상 고려한 오차 등)을 사용하지 않는다. 87G는 K값(최소동작전류)과 Slope(기울기)로 동작영역이 결정되고 그림 2.3.1과 같다.

K값 설정은 지락 고장전류가 크지않아 87요소가 동작할 수 없는 고장을 검출해야 하므로, 설정값을 낮게하여 고감도로 동작하게 한다. 또한, 정상상태에서는 부하 불평형으로 인해 간헐적으로 나타나는 영상전

류에는 부동작해야 하므로 일반적으로 설정값은 CT 정격의 20%에 하도록 하지만, 일부 보호계전기 제작사에서는 87과 87G의 최소동작전류값을 같도록 추천하고 있다. Slope 설정은 87요소의 소전류 영역 이하의 수준으로 하며, 고장전류가 클 때 87요소가 먼저 동작할 수 있도록 87G에는 동작 지연시간을 준다.

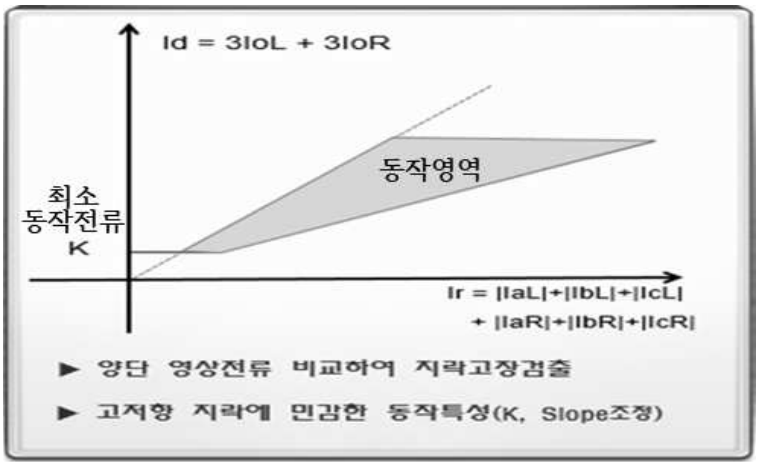


그림 2.3.1 영상전류 차동계전요소(87G)

2. 고저항 지락사고시 자동재폐로

가. 주보호 전류차동계전기 자동재폐로 동작로직

그림 2.3.2는 154kV 송전선로 주보호 전류차동계전기에 내장되어 있는 자동재폐로 동작로직을 나타낸 것으로 43CA(전류차동요소 기능 On), 43RC(자동재폐로 기능 On), CB_CLOSED(차단기 투입)가 동시에 만족한 상태로 60초가 지나면 자동재폐로 준비가 완료된다. 이때 송

전선로에 고장이 발생하면 Trip 신호가 발생하여 양단 차단기를 개방시키고, 가압단은 무전압 시간(0.3sec)이 지나면 차단기를 투입하며, 수전단은 가압단 차단기가 투입된 후 동기조건이 만족하면 0.2sec 후 차단기를 투입하여 자동재폐로 행정을 완료한다.

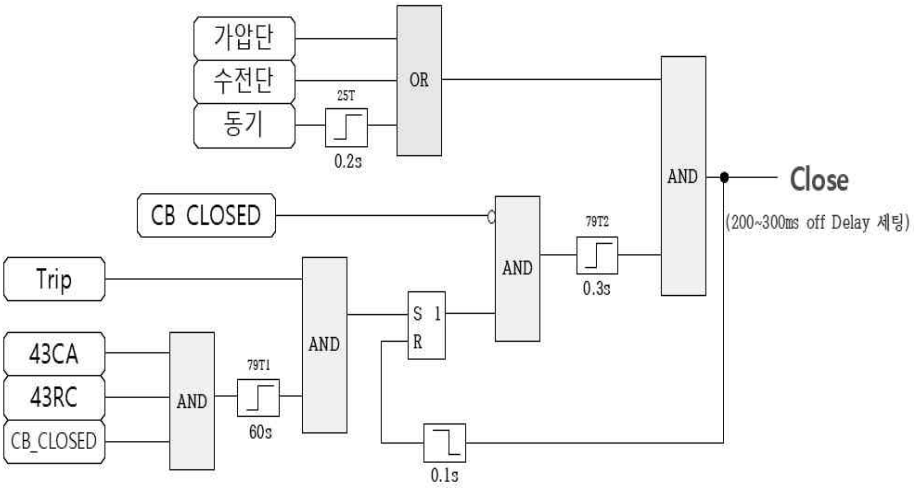


그림 2.3.2 송전선로 자동재폐로 로직

나. 고저항 지락사고시 자동재폐로 동작로직

송전선로에 크레인 또는 수목접촉 등에 의한 고저항 지락사고 발생시, 이는 영구고장일 가능성이 높아 자동재폐로는 수행하지 않도록 로직을 구성한다. 그림 2.3.3은 국산(세니온) 송전선로 보호계전기의 자동재폐로 동작로직을 나타낸 것으로 큰 고장전류를 검출하는 87(전류차동)이 동작하면 신호를 차단기 개방회로과 자동재폐로 동작로직으로 보내 재폐로가 수행되도록 하지만, 87G가 단독으로 동작하면 차단기에 개방신호를 보내 고장을 제거하고 자동재폐로는 수행되지 않도록 한다.

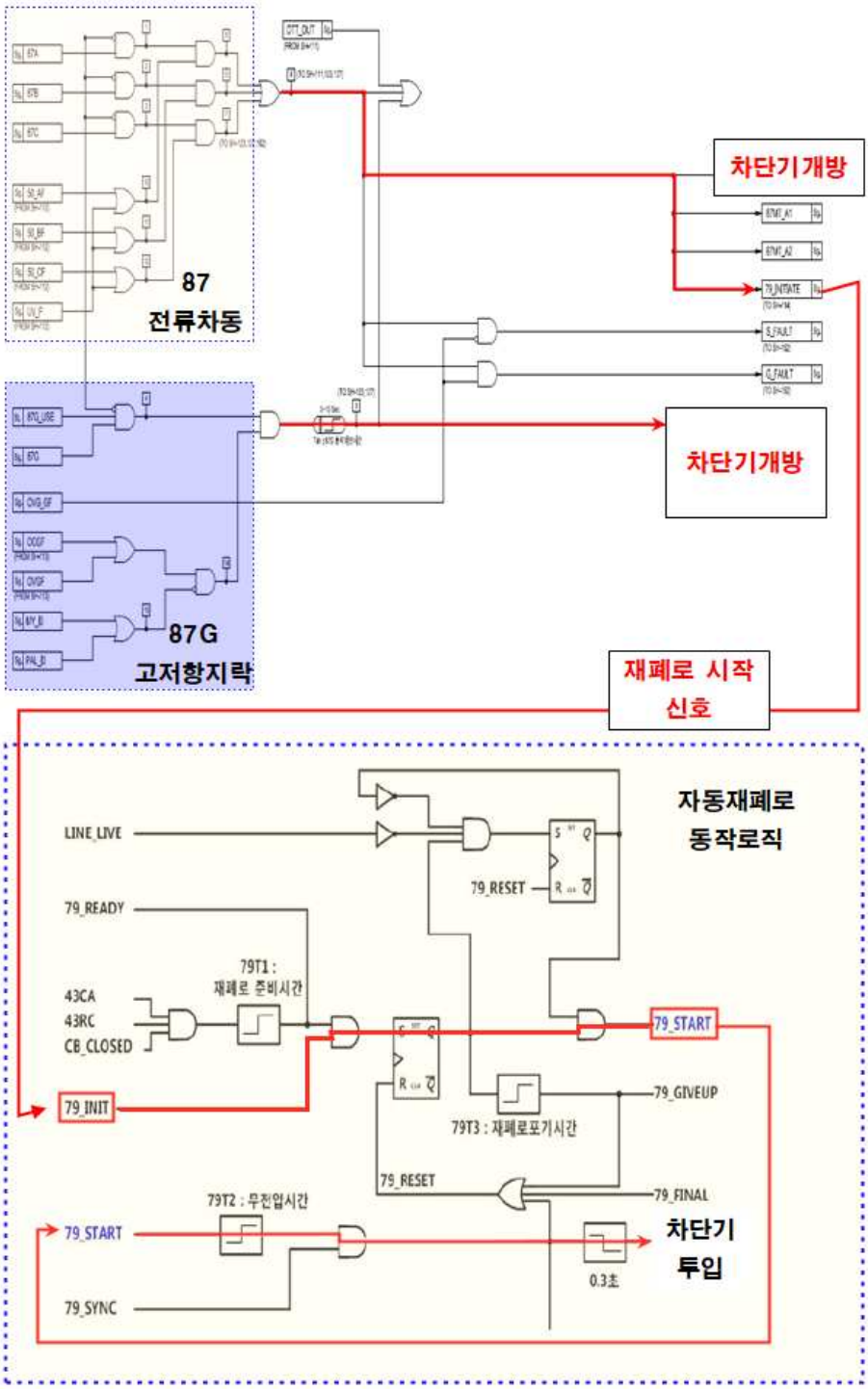


그림 2.3.3 ㈜세니온 송전선로 자동재폐로 로직

3. 고저항 지락사고 동작사례 및 문제점

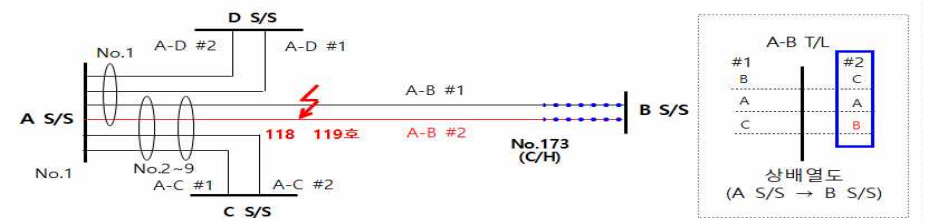
아래의 표 2.3.1은 광주전남지역 154kV AB #2T/L 크레인 접촉사고 고장이벤트로 크레인 접촉사고는 고저항을 동반하기 때문에 대표적인 고저항 지락사고 중 하나이며, 3절 2에서 기술한 바와 같이 고저항 지락사고에는 자동재폐로가 수행되면 안되지만, 이벤트 확인결과 자동재폐로가 수행된 후 차단기가 최종 개방되었다.

발생시간	A S/S 고장이벤트	상태표시	비고
2020-02-03 13:39:40.264	AB #2T/L 지락주보호	동작	고장발생
2020-02-03 13:39:40.276	AB #2T/L-627-CB	열림	차단기 개방 자동재폐로 시작
2020-02-03 13:39:40.310	AB #2T/L 지락주보호	복귀	고장제거 완료 (아크소호)
2020-02-03 13:39:40.564	AB #2T/L 재폐로동작	동작	차단기 투입신호 발생
2020-02-03 13:39:40.675	AB #2T/L-627-CB	닫힘	차단기 투입
2020-02-03 13:39:40.703	AB #2T/L 지락주보호	동작	2차 고장
2020-02-03 13:39:40.719	AB #2T/L-627-CB	열림	차단기 개방
2020-02-03 14:49:14.913	AB #2T/L-627-CB	닫힘	고장제거 후 수동투입

표 2.3.1 154kV AB #2T/L 고장이벤트

가. 154㎸ AB #2T/L 크레인 접촉사고 동작개요

154㎸ AB #2T/L은 2회선으로 구성되어 있으며, 긍장은 32.5㎞로 지중(1.8㎞)과 가공(30.7㎞)이 혼재된 복합선로이지만, 지중구간이 전체 송전선로의 30% 이하로 자동재폐로를 사용한다. #2T/L은 B상이 제일 하단에 배치되어 있으며, A변전소에서 22.7㎞ 떨어진 지점에서 크레인 작업에 의한 근접으로 고장이 발생하였다. 보호계전기는 양단 주보호 전류차동계전기 B상이 동작하였고, 후비보호 거리계전기는 양단 모두 부동작 하였으며, 자동재폐로는 실패하였다.



○ 길이 : 32.501km / 지지물 : 89기('70년)

- ACSR 410㎟ × S, 2.477km / HSTACIR/AW 240㎟ × S, 28.188km
  XLPE2000㎟, 1.836㎞

순천-승주 No.118~119 5t 카고크레인 접촉

사고 크레인 아크흔적 | 크레인 타이어 (파손 없음)

구분	A S/S	B S/S	자동재폐로
#2T/L	87(B상) 21(부동작)	87(B상) 21(부동작)	실패
※ 87 : 전류차동(주보호), 21 : 거리계전(후비보호)			

그림 2.3.4 154㎸ AB #2T/L 고장개요

나. PCM 전류차동계전기 동작분석

그림 2.3.5는 AB #2T/L 전류차동계전기 동작파형으로 B상 지락고장이 발생하여 87(B상)요소가 동작 후 양단 차단기가 개방되었으며, 고장발생 후 보호계전기는 정상동작하여 65.7㎳만에 고장이 제거되었고, 자동재폐로에 의해 약 300㎳ 후 가압단인 A 변전소에서 차단기 투입 신호를 보내 차단기가 재투입(97.0㎳) 되었으나 고장이 해소되지 않아 82㎳만에 재개방되었다. 최초 고장 발생부터 자동재폐로 시행 후 차단기 최종개방까지 총 약 560㎳ 소요되었다.

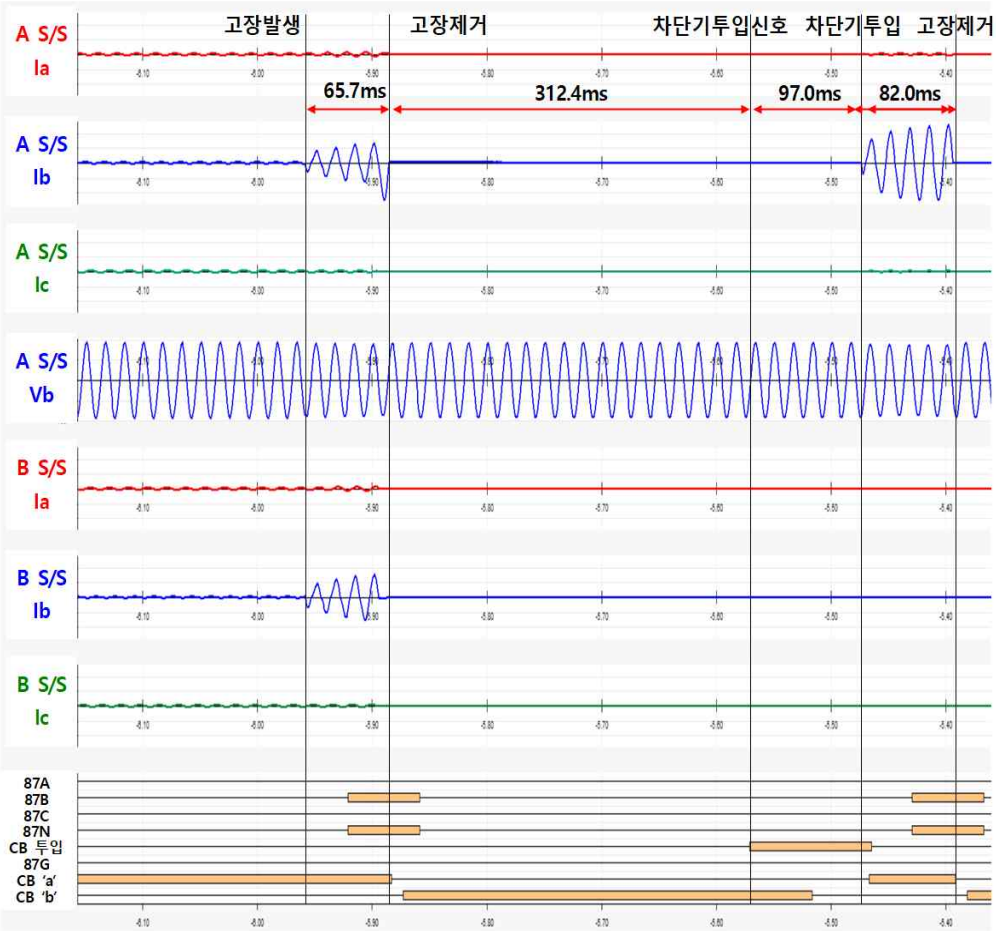


그림 2.3.5 154㎸ AB #2T/L 전류차동계전기 동작파형

그림 2.3.6은 154kV AB #2T/L 전압과 전류 위상차 분석결과로 고장발생 전 정상상태의 전압과 전류 위상차 분석결과 A 변전소측 B상 전류는 전압보다 38.8° 진상운전하는 것으로 보아 A 변전소는 송전단이며, B 변전소측 B상 전류는 전압보다 166.2° 진상운전 하므로 수전단임을 알 수 있다. 고장발생 후 파형을 바탕으로 고장지속시간 동안의 고장상(B상) 전압과 전류 위상차를 분석한 결과 A변전소는 전압기준 전류 위상이 -8.4° , B변전소는 -16.4° 로 저항성분이 많이 포함된 고저항 지락사고로 볼 수 있다.

No	Channel Name	정상상태	B상 지락
1	A S/S Ia	46A ∠ 137.0°	93A ∠ 145.1°
2	A S/S Ib	39A ∠ 38.8°	819A ∠ -8.4°
3	A S/S Ic	59A ∠ -81.3°	48A ∠ -105.4°
4	A S/S I0	5.5A ∠ -24.4°	727A ∠ -8.3°
5	A S/S Vb	92.3kV ∠ 0.0°	90.0kV ∠ 0.0°
6	B S/S Ia	54A ∠ -74.6°	93A ∠ -50.4°
7	B S/S Ib	36A ∠ 166.2°	962A ∠ -16.4°
8	B S/S Ic	48A ∠ 65.4°	52A ∠ 36.0°
9	B S/S I0	1.4A ∠ 150.0°	1,071A ∠ -17.8°

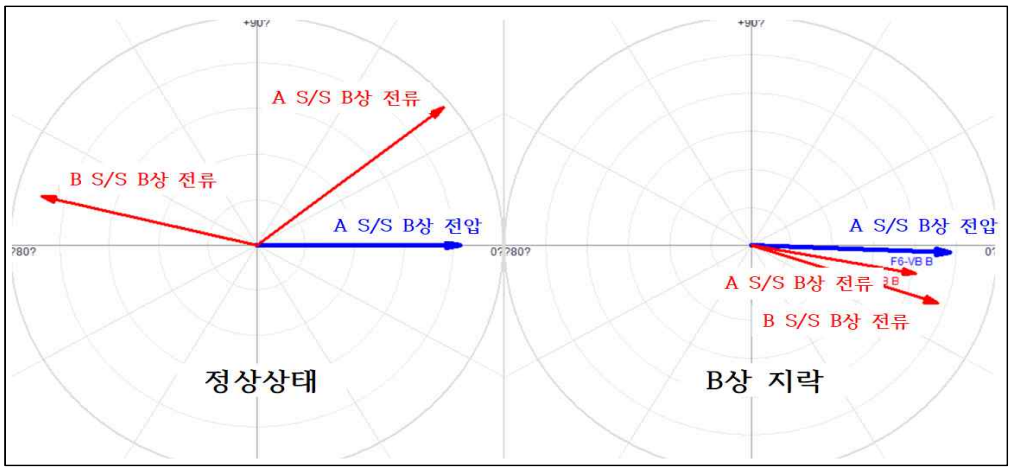


그림 2.3.6 154kV AB #2T/L 전압과 전류 위상차 분석

표 2.3.7은 전류차동계전기 동작분석으로 전류차동요소 87의 최소동작전류 설정값은 2차측 기준 0.4pu(2A), 고저항지락 검출요소인 87G는 0.15pu(0.75A)로 87G 요소가 87보다 민감하게 설정되어 87G가 87보다 우선하여 동작하도록 하였다. 하지만 본 사례는 저항성분이 많이 포함된 고저항 지락사고(약 51Ω)임에도 동작전류는 4.43A, 억제전류가 4.44A로 87 동작영역에 충분히 들어와 있었고, 87G요소도 동작영역에 들어와 있었지만, 동작지연시간이 0.24초로 설정되어 정부동작 하였다.

○ 87 전류차동요소 설정

– 87 Pickup : 0.4pu, Break PT : 3pu, Slope1 : 30%, Slope2 : 60%

○ 87G 영상차전류요소 설정

– 87G Pickup : 0.15pu, 87G Restraint 15pu, 87G Delay : 0.24 sec

○ 87 전류차동요소 연산결과 (CT비 : 2000/5A)

A S/S Ib : 819A∠−8.4° 를 2차로 환산 2.04A∠−8.4

B S/S Ib : 962A∠−16.4° 를 2차로 환산 2.40A∠−16.4°

– 동작전류(Id) = |I + I' |=|(Ir + Ir')+j(Ii + Ii')| = 4.43A

– 억제전류(Ir) = | I | + | I' | = 4.44A

○ 87G는 동작지연시간에 의해 정부동작

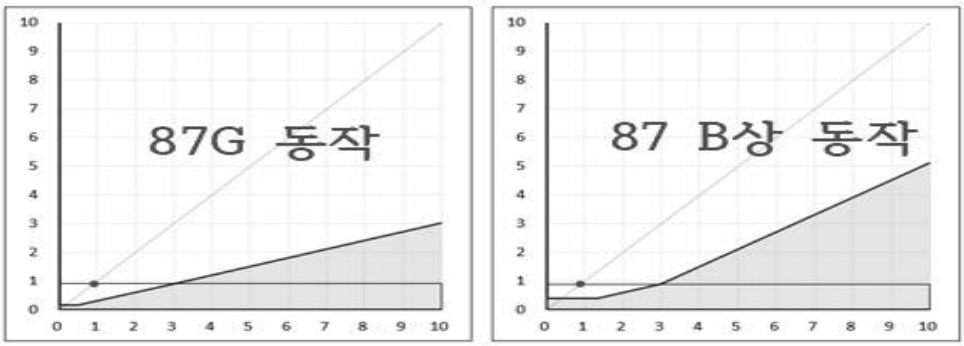


그림 2.3.7 전류차동계전기 87, 87G 동작분석

라. 송전선로 고저항 지락사고 검출방식 문제점

크레인 접촉사고는 대표적인 고저항 지락사고로 한전은 송전선로 주보호 전류차동계전기 87G(영상차전류)요소를 사용하여 고장을 검출하고 자동재폐로를 방지하고 있다. 하지만 위 크레인 접촉사고 동작사례와 같이 현재는 87(전류차동)요소가 동작하고 87G는 부동작하여 자동재폐로가 시행되었다.

전류차동계전기 87G요소는 지락고장시 동작하고, 87요소는 단·지락고장 모두에서 동작한다. 두요소의 동작전류 설정값 차이가 크지 않으면 송전선로 지락고장시 87G와 87요소가 동시에 동작 할 수 있다.

제작사	87	87G	
	최소동작전류 (순시동작)	최소동작전류	동작지연
LJ파워	87L.I_Biased = 2.0A 1A<87L.I_Biased<2.831A	2.0A (영상차전류)	0.24초
유 호	K1 = 2.0A 1A<K1<14.5A →2A, p=0.3	1.0A (영상차전류)	0.2초
선 도	DIFL_I1 = 2.0A 0.5A<DIFL_I1<16.1A →2A, α=0.3	1.0A (영상차전류)	0.24초
세니온	Iop = 2.0A 1A<Iop<11.1A →2A, KS1=0.3	1.0A (영상차전류)	0.23초
YPP	$\sqrt{2\times\frac{P^2}{(1-2S_1^2)}}$ = 3.12A 0.03A<P<3.7A→2A, S1=0.3	1.47A (영상차전류)	0.24초
가 보	87-1 Pickup = 2.0A 1A<87-1 Pickup<5.65A	2.0A (차전류)	순시
영 인	Pickup = 2.0A 1.37A<Pickup<6.97A	1.25A (역상과전류)	순시
새롬 프로텍	Idmin = 2.0A 0.08A<Pickup<7.81A	0.4A (영상전류)	0.23초

표 2.3.2 보호계전기 제작사별 87G, 87요소 설정값

위 표 2.3.2는 송전선로 보호계전기 제작사별 87G와 87요소 설정값을 나타낸 것으로 제작사별 동작전류 설정값의 차이는 있지만, 두 요소간 동작전류 설정값 차이는 크지 않다. 87G요소가 더 민감하게 설정되어 87보다는 큰 고저항 지락사고를 검출할 수 있지만, 87G요소는 부하전류에 일시적인 불평형 전류에 오동작하지 않도록 동작지연시간이 설정되어, 87요소가 순시동작 할 경우 87G는 부동작 한다.

결과적으로, 87G요소의 설정값은 87요소보다 조금 민감하게 되어 있으나, 동작지연시간 설정에 의해 실제 크레인 접촉사고에는 87요소만 동작하고 있으며, 자동재폐로 방지는 87G요소가 단독으로 동작했을 때만 가능한데, 현 검출방식은 크레인 접촉사고시 87G요소가 단독으로 동작하기는 어려워, 지속해서 자동재폐로가 시행 후 차단기가 최종 개방되고 있다.

전력계통 안정도 향상을 위해서는 자동재폐로 사용은 필수적이며, 동시에 성공률 향상을 위한 노력도 필요하다. 하지만 영구고장이 확실한 크레인 접촉사고시 차단기 재투입은 불필요하며, 차단기 재투입에 의한 2차 사고를 방지하기 위해서는 보호계전기에서 크레인 접촉사고를 정확히 검출해 자동재폐로를 방지해야 한다.

이를 위해 단순히 87요소의 설정값을 높여 검출감도를 둔감하게 하거나, 87G 동작지연시간을 순시로 바꾼다면, 실제고장에 보호계전기가 부동작 할 우려가 있고, 정상상태에서는 부하전류에 오동작 할 수 있으므로, 설정값 변경은 신중하게 고려해야 하며, 크레인 접촉사고와 타 고장사례를 전기적으로 구분할 수 있도록 검출 알고리즘 개선하여 자동재폐로를 선별적으로 방지해야 한다.

제 3 장 가공 송전선로 크레인 접촉사고 자동재폐로 방지를 위한 알고리즘 제안

제 1 절 송전선로 고장데이터 분석방법

가공 송전선로는 장거리에 걸쳐 분포되어 있어 타 전력설비보다 상대적으로 자연재해에 노출이 많이 되어 있으므로, 그만큼 고장이 발생할 확률이 높다. 대표적으로 낙뢰에 의한 절연파괴, 빙설 또는 강풍에 의한 전선도약, 갤러핑 등이 있으며, 그밖에 수목이나 크레인, 철탑도괴 등에 의해 고장이 발생할 수 있다. 이러한 고장은 1선지락, 선간단락, 2선단지락, 3상단락 및 단선고장 등의 형태로 나타난다. 이중 가장 가혹한 고장은 3상단락 고장이며, 발생빈도가 가장 높은 것은 1선 지락고장이다.

송전선로에 고장이 발생하면 계통에 큰 동요가 일어나 기기손상이나 유도장해 등이 야기되므로, 파급고장을 예방하기 위해 적절한 보호대책과 전력계통보강이 필요하다. 이를 위해 고장해석이 선행되어야 하며, 이는 보호계전기 설정, 차단기 차단용량 산정, 피뢰기 정격전압, 계통안정도 등에 이용된다. 고장해석을 위해서는 단상 등가회로로 변환하여 계산하는 대칭좌표법을 사용하는 것이 편리하며, 송전계통은 보통 변압기가 포함 된 다양한 전압계통으로 구성되어 있어, 고장해석시 오옴법을 사용하면 계산이 복잡해지므로 단위법(pu)이나 백분율법(%법)을 사용한다.

1. 송전선로 고장해석 방법

가. 백분율법(%법)

백분율법은 단위법(pu)과 같이 모든 물리량을 어떤 기준량에 대한 백분율(%)로 표시하는 방법이다. 보통은 임피던스의 크기를 Ω값 대신에 %값으로 나타내는 경우가 많으며, 정격전류를 In, 정격전압을 E[V] 라고 하면, %Z는 아래식과 같다.

$$\%Z = \frac{ZI_n}{E} \times 100(\%)$$

모두 같은 정격용량(기준용량)에 대하여 환산한 %Z 데이터만 갖고 있으면 고장용량을 쉽게 알 수 있다. 현재 우리계통은 100MVA 기준으로 임피던스를 통일 환산하여 계통해석을 하고 있으며, 단위법이나 백분율법에서의 기준량 상호간의 관계(3상 계통)를 살펴보면 다음과 같다.

$$\text{기준전류}(I_B) = \frac{\text{기준전력}(VA_B)}{\sqrt{3} \times \text{기준전압}(V_B)}(A)$$

$$\text{기준임피던스}(Z_B) = \frac{\text{기준전압}(V_B)}{\sqrt{3} \times \text{기준전류}(I_B)}(\Omega)$$

$$\text{기준임피던스}(Z_B) = \frac{\text{기준전압}^2(V_B^2)}{\text{기준전력}(VA_B)}(\Omega)$$

기준전류, 기준전압, 기준임피던스, 기준전력(용량)은 상호 함수관계를

가지게 되는데, 이를 응용하여 임의의 임피던스(Z)를 퍼센트 법(%Z)으로 나타내보면, 아래식과 같이 %Z(또는 PU Z)는 용량이나 전압을 기준으로 표시할 수도 있다.

$$\%Z = \frac{Z}{Z_B} \times 100(\%) = \frac{Z \times VA_B}{V_B^{\ 2}} \times 100(\%)$$

나. 발전기 기본식

3상 불평형 전압, 전류 특히 고장상태에서 전압, 전류를 계산하기 위해서 발전기 기본식은 반드시 필요하다. 그림 3.1.1은 무부하 발전기 3상 단자전압과 전류의 관계식을 대칭분 전압과 전류의 관계식으로 바꾸어 표현한 것으로 발전기 단자에 나타나는 불평형 고장을 대칭좌표법으로 해석할 경우에 유용하다.

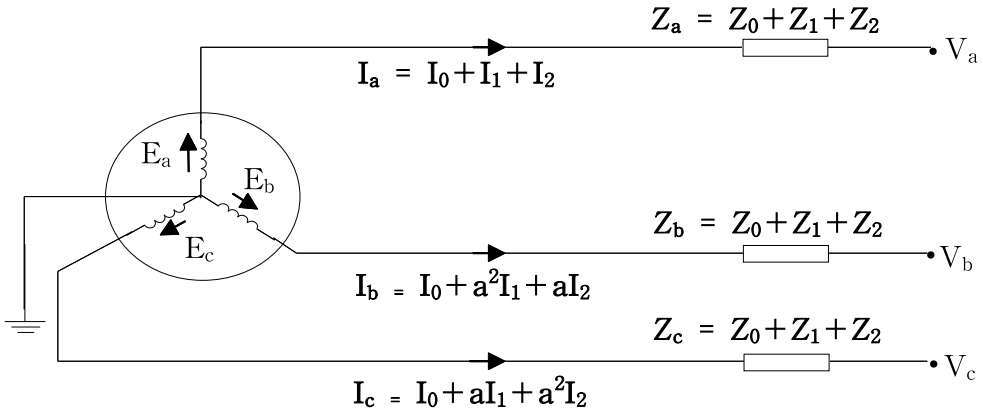


그림 3.1.1 발전기 3상 회로

3상 교류발전기의 각 상 유기기전력이 E_a, E_b, E_c, 각 상의 전압강하가 v_a, v_b, v_c, 각 상의 단자전압이 V_a, V_b, V_c, 각 상의 대칭분 임피던스 및 전류가 각각 Z_0, Z_1, Z_2, I_0, I_1, I_2, 각 상 유기전압 대칭분이 E_0, E_1,

E_2 로 표시되어 있다. 각 상의 전압강하는 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\upsilon_a = I_aZ = Z_0I_0 + Z_1I_1 + Z_2I_2$$

$$\upsilon_b = I_bZ = Z_0I_0 + a^2Z_1I_1 + aZ_2I_2$$

$$\upsilon_c = I_cZ = Z_0I_0 + aZ_1I_1 + a^2Z_2I_2$$

3상 전압, 전류와 대칭분 전압, 전류와의 관계식을 적용하여 정리하면 아래와 같이 바꾸어 표현할 수 있다.

3상 전압, 전류 관계식

$V_a = E_a - I_aZ$

$V_b = E_b - I_bZ$

$V_c = E_c - I_cZ$

대칭분 전압, 전류 관계식

$V_0 = E_0 - I_0Z_0$

$V_1 = E_1 - I_1Z_1$

$V_2 = E_2 - I_2Z_2$

3상 교류발전기 유기기전력은 3상대칭이므로 E_0, E_2가 0

발전기 기본식

$V_0 = -I_0Z_0$

$V_1 = E_1 - I_1Z_1$ (또는 $V_1 = E_a - I_1Z_1$)

$V_2 = -I_2Z_2$

그림 3.1.2 발전기 기본식 유도 및 개념

다. 대칭좌표법

송전선로 고장은 1선 지락과 같은 불평형 고장이 대부분이며, 이러한 불평형 고장을 중첩정리나 테브난정리로 해석하는 것은 매우 복잡하고 어렵다. 그리고 3상 단락고장처럼 각 상이 평형된 고장에서는 각 상의 전압과 임피던스를 구하여 쉽게 해석이 가능하지만, 1선 지락과 같이 상이 불평형되는 고장은 각 상에 걸리는 전압을 각각 구해야 하는데 이 방법이 쉽지 않아, 불평형 성분을 대칭성분으로 분해하고, 단상 등가회로로 변환하여 계산하는 대칭좌표법을 이용하지 않고서는 불평형 고장을 해석할 수 없다. 여기서 불평형 고장이란 각 상 전압이나 전류의 크기, 위상차가 다른 고장을 말한다.

정상상태에서 각 상이 대지에 대하여 전압 V_a, V_b, V_c[V], 전류 I_a, I_b, I_c[A] 일 때 이들 성분을 아래식과 같이 V_1, V_2, V_0[V] 및 I_1, I_2, I_0[A]인 대칭분 전압, 전류로 변환한다.

$$V_1 = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \qquad I_1 = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c)$$

$$V_2 = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \qquad I_2 = \frac{1}{3}(I_a + a^2I_b + aI_c)$$

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \qquad I_0 = \frac{1}{3}(I_a + I_b + I_c)$$

벡터 연산자 a는 120° , a^2은 240° 앞선다는 것을 의미하며 위식을 상성분에 대하여 풀면, 아래식과 같이 환원할 수 있다.

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 \qquad I_a = I_0 + I_1 + I_2$$

$$V_b = V_0 + a^2V_1 + aV_2 \qquad I_b = I_0 + a^2I_1 + aI_2$$

$$V_c = V_0 + aV_1 + a^2V_2 \qquad I_c = I_0 + aI_1 + a^2I_2$$

2. 고장유형별 페이저 특징

가. 정상상태

정상상태의 전압은 전기품질 확보를 위해 일정한 유지폭 안에서 공급되고 있으며 전류는 부하크기 및 특성에 따라 흐른다. 일반적으로 송전단에서 수전단으로 전류를 보내면 전압기준 전류는 위상이 뒤지는 지상운전을 하며, 송전선로 부하역률($\cos\theta$)은 0.85($\cos^{-1}(0.85)$ = ±32°) 이내로 운전하기 때문에 전압에 비해 전류가 32° 이내에 지상운전하게 된다. 반대로 수전단에서 전압과 전류를 측정하면 전류는 전압기준 180° +역률각(±32° , $\cos\theta$=0.85 기준)으로 지상운전 하는 것으로 나타난다.

구분	154kV 전력계통(1차값)
Va	88.06kV ∠ 0°
Vb	88.06kV ∠ -120°
Vc	88.06kV ∠ 120°
Ia	388A ∠ -13.3°
Ib	388A ∠ -133.3°
Ic	388A ∠ 106.7°
※ 부하 : 102.5MW	

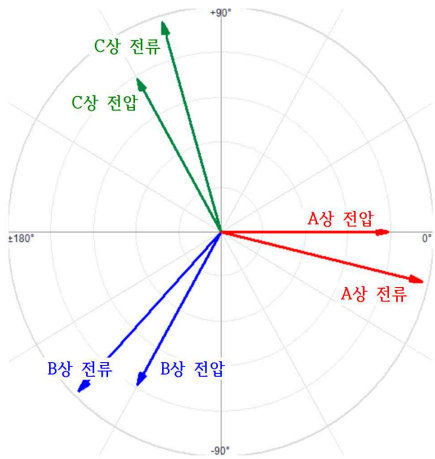


그림 3.1.3 정상상태 페이저 특징

가. 3상 단락고장

단락고장은 선간단락과 3상 단락으로 구분되며 송전선로 3상 단락고장은 선간단락에 비해 발생확률이 낮지만 발생시 전력계통과 인근 발전기에 큰 영향을 미친다. 각 상 전류는 선로의 임피던스 특성각만큼 상전압에 대해 뒤진 전류가 흐르며, 3상의 전압과 전류의 크기가 서로 같고 120° 간격을 유지하며, 각상의 단락전류 위상은 상전압보다 약 90° 정도 뒤진다. 또한, 고장전류에는 정상분만 존재하고 영상전류와 역상전류는 존재하지 않는다.

3상 단락고장시 상전압, 상전류 크기 및 위상차는 아래와 같다.

구분	154kV 전력계통(1차값)
Va	4.34kV ∠ 0°
Vb	4.34kV ∠ -119.7°
Vc	4.34kV ∠ 120°
Ia	13.8kA ∠ -88.4°
Ib	13.8kA ∠ -155.7°
Ic	13.8kA ∠ 33.7°
※ 위상차 Va 기준	

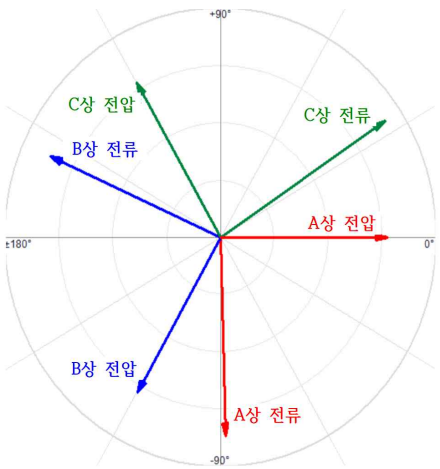


그림 3.1.4 3상 단락고장 페이저 특징

나. 2상 단락고장

2상 단락고장(A,B상)시 고장상의 상전압 위상과 크기가 변동되고, 건전상(C상) 전압은 거의 같거나 약간 상승한다. 고장상의 상전류는 서로 반대 위상을 가지며, 고장전류의 위상은 선간전압(AB)을 기준으로 선로의 임피던스 특성각 만큼 뒤진 전류가 흐른다. 고장전류에는 정상분과 역상분이 존재하고 영상전류는 흐르지 않는다.

A, B상 선간 단락고장시 상전압, 상전류 및 위상차는 아래와 같다.

구분	154kV 전력계통(1차값)
Va	44.52kV ∠ 0°
Vb	44.52kV ∠ -9.8°
Vc	88.06kV ∠ 175.1°
Ia	12.8kA ∠ -3.5°
Ib	12.8kA ∠ 176.9°
Ic	0.37kA ∠ 161.8°
※ 위상차 Va 기준	

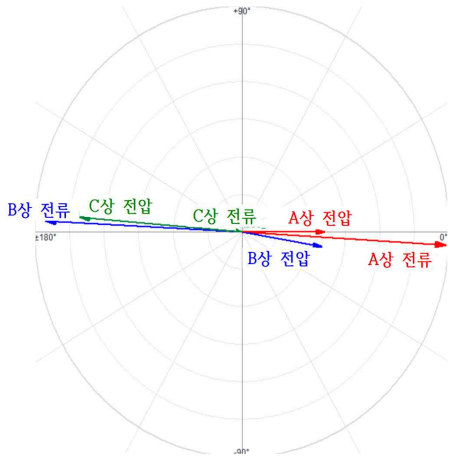


그림 3.1.5 2상 단락고장 페이저 특징

다. 1선 지락고장

1선 지락고장시 고장상 상전압 위상은 변동하지 않고 크기만 감소한다. 고장상 상전류는 선로의 임피던스 특성각 만큼 상전압에 대하여 뒤

지며, 상전류는 영상분, 정상분 및 역상분의 합이다. 이때 건전상의 전압은 중성점의 대지전위 상승에 따라 상전압의 크기와 위상이 달라지며, 비접지계통에서는 건전상의 상전압이 $\sqrt{3}$배까지 상승하며, 유효접지(직접접지) 계통에서는 선간전압의 70~80%까지 상승한다.

A상 지락고장시 상전압, 상전류 및 위상차는 아래와 같다.

구분	154kV 전력계통(1차값)
Va	20.86kV ∠ 0°
Vb	103.46kV ∠ -129.5°
Vc	105.56kV ∠ 135.7°
Ia	13.82kA ∠ -75.5°
Ib	0.380kA ∠ -117.3°
Ic	0.452kA∠ 130.2°
※ 위상차 Va 기준	

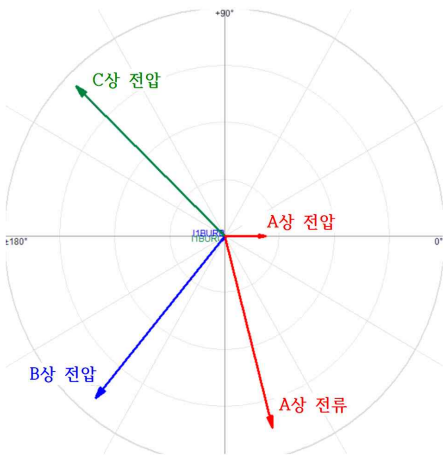


그림 3.1.6 1선 지락고장 페이저 특징

라. 2선 단지락고장

2선 단지락고장은 단락전류와 지락전류가 동시에 흐르게 된다. 2선 단지락고장이 발생하면 상전압 크기와 위상은 같이 변동되며, 상전류의 위상은 단락전류와 지락전류가 중첩되어 흐르기 때문에 임피던스 특성각보다 약간 더 뒤진다. 고장상의 전류가 선간단락과 같이 서로 반대 위상이 되지 않고 약 150° 정도 위상차를 갖는다.

2선 단지락고장은 단락임피던스와 지락임피던스의 비율에 따라 고장전류가 다양하게 분포되며, 2선 지락고장이 A상과 B상의 비교적 동일한 지점에서 발생할 경우 각 상전압, 상전류 및 위상차는 아래와 같다.

구분	1차값(전력계통)
Va	55.86㎸ ∠ 0°
Vb	32.48㎸ ∠ -116.2°
Vc	56.70㎸ ∠ 125°
Ia	11.0kA ∠ -72.0°
Ib	7.6kA ∠ 128.5°
Ic	1,0kA ∠ -170.9°
※ 위상차 Va 기준	

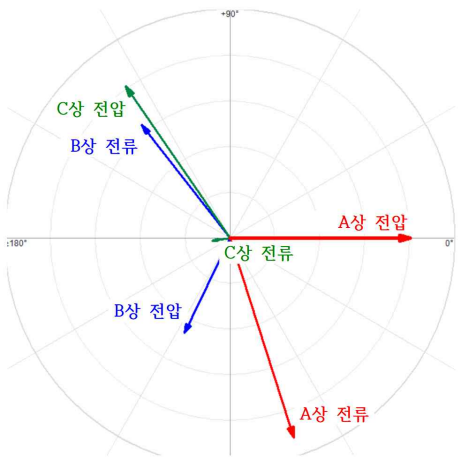


그림 3.1.7 2선 단지락고장 페이저 특징

3. 양단 고장데이터를 활용한 고장저항 연산

송전선로 지락고장시 고장저항 연산의 정확도를 높이기 위해 양단 고장데이터를 활용하였다. 그림 3.1.8은 양단전원이 구성되어 있는 송전선로에 1선 지락고장이 발생 할 경우 정상, 역상, 영상분 등가회로를 나타낸 것으로, 양단 전압(V_{aL}, V_{aR})을 연산하는 방정식1과 2를 풀어, 방정식3으로 고장저항(R_F)을 구하는 식을 유도하였다.

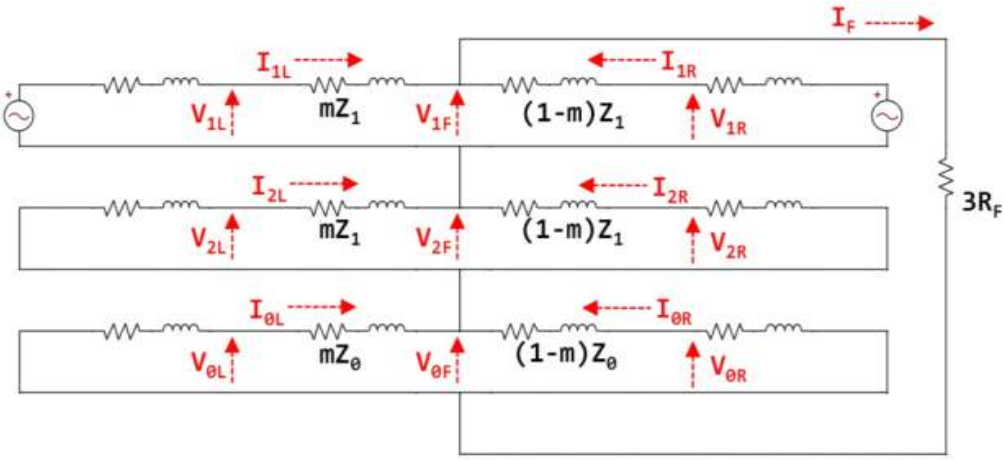


그림 3.1.8 양단 전원이 있는 송전선로 1선지락시 등가회로

$$V_{aL} = m \times Z_1(I_{0L}K_N + I_{aL}) + (I_{aR} + I_{aL})R_F \qquad (1)$$

$$V_{aR} = (1-m)Z_Z(I_{0R}K_N + I_{aR}) + (I_{aR} + I_{aL})R_F \qquad (2)$$

단, V_{aL}, V_{aR} : 좌, 우측 전원단 고장상 전압

m : 고장위치 $(0 \sim 1)$

I_{0L}, I_{0R} : 좌우측 전원단 영상전류

I_{aL}, I_{aR} : 좌우측 전원단 고장상 전류

R_F : 고장저항, Z_1 : 정상분 임피던스

K_N : 영상보상계수 , $(K_N = \dfrac{Z_0 - Z_1}{Z_1})$

$$R_F = \frac{(K_N I_{0R} + I_{aR})V_{aL} - (K_N I_{0L} + I_{aL})(K_N I_{0R} Z_1 + I_{aR} Z_1 - V_{aR})}{(I_{aR} + I_{aL})(K_N I_{0R} + K_N I_{0L} + I_{aL} + I_{aR})} \qquad (3)$$

유도된 식 검증은 한전 계통 PSS/E 데이터에서 154㎸ 송전선로(1,215개) 1회선에서 고장위치(0.1 ~ 0.9)와 고장저항값(3~15Ω)을 달리하여 총 30,375 케이스(1,215 선로 × 위치 5개소 × 저항 5종류)의 선로고장을 모의하였고, 선로 양단 전압과 전류를 이용하여 역산한 고정저항값과 입력값을 비교한 결과 99%이상의 정확도를 보였다.

그림 3.1.9 양단계통 고장저항 연산식 정확도

제 2 절 가공 송전선로 주요고장 분석

1. 고장분석 사례선정 및 방법

본 절에서는 크레인 접촉사고와 타 고장사례와의 전기적인 차이점을 알아보기 위해, 3장 1절에서 기술한 방식을 활용하여 고장데이터를 분석하였다. 분석대상은 154㎸ 송전선로 전류차동계전기가 동작한 사례 중 가장 많이 발생하는 고장인 크레인, 낙뢰, 조류배설물, 강풍 중 설비부서 고장분석보고서와 양단 고장데이터가 확보된 총 50건을 선정하였다.

고장분석을 위해 송전선로 양단에 설치된 전류차동계전기 고장데이터(고장파형)를 활용하였고, 실효치 크기와 위상을 이용해 송전선로의 정상상태와 고장상태의 상전압, 상전류, 고장저항, 고장임피던스, 전압과 전류의 위상차, 그리고 자동재폐로 동작시간을 분석하였다.

전류차동계전기는 Comtrade 파일형식으로 고장데이터를 저장하며, 상전압과 상전류 분석은 K_ComViewer R.M.S Values 기능을 활용하였다. 고장저항과 위상차 분석은 양단데이터의 동기화가 선행되어야 하므로 Sigra synchronize fault records를 활용하여 최초 고장발생 시점으로 두 고장데이터를 동기화 한 후, K_ComViewer DFT 기능으로 고조파를 제거한 전압과 전류의 sample 데이터를 추출하여, 전압과 전류 위상차와 3장 1절 3에서 유도 된 수식(양단데이터 활용)으로 고장저항을 연산하였다. 또한, 선로 임피던스를 이용해 영상보상 팩터를 구하고 가압단에서 바라 본 고장임피던스(지락)를 연산하였다.

송전선로 고장 직후에는 과도현상에 의해 연산한 결과값에 오류가 발

생할 수 있으므로, 최종연산결과값 도출시점은 고장발생 약 2cycle (33 ㎳) 후 sample 데이터로 하였고, 분석대상은 표 3.2.1과 같다.

고장원인	case	동작일시	동작설비(T/L)	고장상	긍장(km)	실고장점(km)
크레인 (14건)	1	'20.07.16	HA	B,N	6.32	0.5(7.9%)
	2	'20.04.16	HB	B,N	18.706	7.8(42%)
	3	'20.02.03	HC	B,N	32.501	22.7(70%)
	4	'19.06.20	HD	C,N	6.795	0.34(5%)
	5	'19.01.22	HE	B,N	11.1	1.62(14.6%)
	6	'18.01.25	HF	A,N	30.011	2.83(9.4%)
	7	'17.11.18	HG	A,N	5.0	2.5(50%)
	8	'17.10.31	HI	B,N	21.766	5.4(25%)
	9	'17.05.24	HJ	A,N	25.292	10(39%)
	10	'16.10.09	HK	B,N	19.276	13.32(69%)
	11	'16.03.19	HL	A,N	9.246	2.6(28%)
	12	'15.12.22	HM	A,N	25.29	10.8(43%)
	13	'15.11.29	HN	C,N	45.442	42.41(93%)
	14	'15.09.30	HO	C,N	22.95	18.07(79%)
낙뢰 (25건)	1	'20.11.19	IA	B,C,N	39.883	24.7(62%)
	2	'20.08.31	IB	A,B,N	11.723	4.55(39%)
	3	'20.08.26	IC	B,N	44.60	11.0(25%)
	4	'20.08.08	ID	C,N	17.029	7.73(45%)
	5	'20.08.07	IE	C,N	21.894	13.41(61%)
	6	'20.07.30	IF	C,N	21.457	4.90(23%)
	7	'20.07.10	IG	B,N	30.596	26.2(85%)
	8	'19.10.01	IH	A,N	47.132	2.69(5.7%)
	9	'19.04.07	IJ	C,N	37.358	36.95(99%)
	10	'19.04.07	IK	C,N	32.80	32.08(98%)
	11	'18.08.27	IL	B,N	17.781	1.945(11%)
	12	'18.08.07	IM	C,N	29.26	6.219(21%)
	13	'18.08.07	IN	B,N	17.781	13.21(74%)
	14	'18.07.28	IO	A,N	47.132	19.74(42%)
	15	'18.06.28	IP	C,N	12.156	6.587(54%)
	16	'18.06.28	IQ	A,N	38.716	8.08(21%)
	17	'18.03.04	IR	B,N	37.069	10.73(29%)
	18	'17.08.21	IS	B,N	21.94	15.9(72%)
	19	'17.08.21	IT	C,N	37.358	2.95(8%)
	20	'17.07.17	IU	A,N	18.805	17.54(93%)
	21	'17.07.14	IV	A,N	24.904	23.4(94%)
	22	'17.07.08	IW	B,N	38.716	1.802(4.6%)
	23	'17.07.06	IX	B,N	38.716	34.44(89%)
	24	'17.05.31	IY	A,N	29.26	12.2(41%)
	25	'15.06.22	IZ	A,N	38.824	23.15(59%)
조류 배설물 (6건)	1	'20.07.08	JA	A,N	25.156	24.7(98%)
	2	'20.03.16	JB	B,N	49.201	20.5(41%)
	3	'19.12.30	JC	C,N	30.05	11.2(37%)
	4	'19.12.18	JD	C,N	33.12	23.8(72%)
	5	'19.08.08	JE	A,N	28.71	18.3(64%)
	6	'19.02.24	JF	A,N	30.05	5.28(18%)
강풍 (5건)	1	'19.10.02	KA	A,B,C	9.105	9.084(99%)
	2	'19.02.13	KB	A,B	32.501	26.66(82%)
	3	'19.01.31	KC	A,B	11.723	5.83(50%)
	4	'19.01.31	KD	A,B	24.4	0.16(0.6%)
	5	'19.01.31	KE	A,B	11.7	4.4(37%)

- 동작설비 표기 : HA (H_가입단변전소, A_수전단변전소)
- 실고장지점 : H측(가입단) 변전소 기준
- 고장저항 : 고장지속시간 중 최저연산치 표기

표 3.2.1 154kV 송전선로 주요고장 분석대상

2. 크레인 고장데이터 분석

크레인 고장은 주로 송전선로 인근에서 공사용 크레인이 작업 시 선로에 직접적인 접촉이나 직접적인 접촉이 없어도 선로와 크레인 간의 절연간격이 유지되지 못하면 발생한다.

그림 3.2.1은 크레인 Case3 고장데이터 분석을 통해 얻은 결과값으로 선종 및 긍장은 ACSR 410㎟ × S, 2.477㎞ / HSTACIR/AW 240㎟ × S, 28.188㎞ / XLPE2000㎟, 1.836㎞로 총긍장 32.5㎞(철탑 89기)였으며, 고장은 22.7㎞(70%) 지점에서 크레인에 의해 B상 지락고장이 발생하였다.

고장지속시간은 72.8㎳로 총 141개 sample 데이터를 분석하였다.

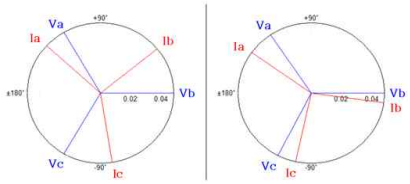
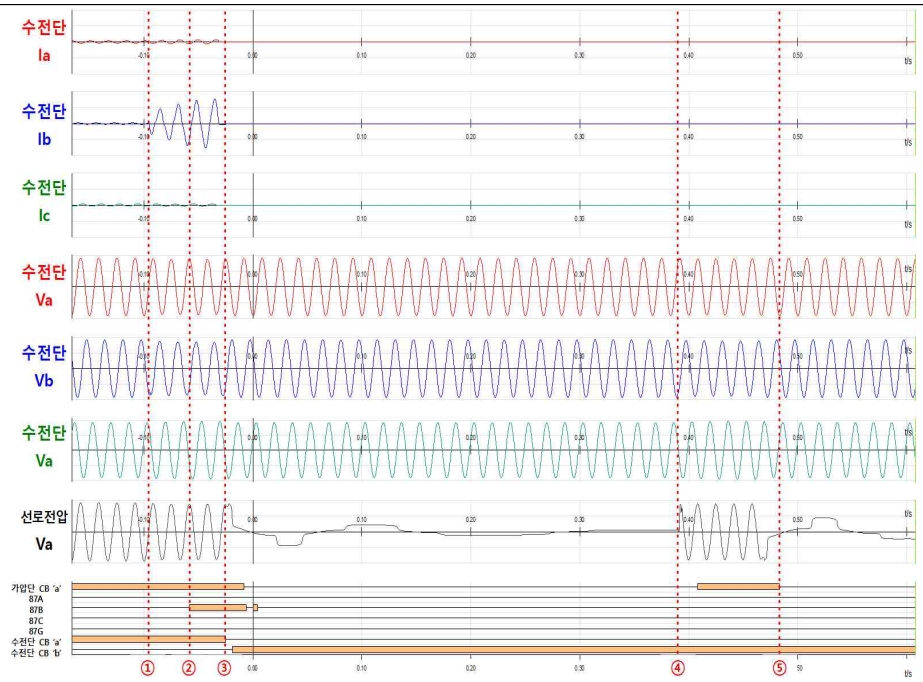
크레인 Case3			
※ 154kV 전력계통(1차값), Reference : Vb, 고장발생 후 2cycle			※ 고장지속시간 72.8ms, sample 데이터 141개
구분	고장 전	고장 후	
Va	92.7kV ∠ 120.3°	91.7kV ∠ 123.9°	고장전류(A)
Vb	92.4kV ∠ 0°	90.3kV ∠ 0°	
Vc	92.2kV ∠ -120.0°	93.7kV ∠ -117°	
Ia	0.047kA ∠ 136.9°	0.093kA ∠ 144.4°	
Ib	0.040kA ∠ 38.6°	0.782kA ∠ -9.4°	
Ic	0.059kA∠ -81.0°	0.049kA∠ -102.3°	
벡터도			고장저항(Ω)
고장점 임피던스	Z : 115.4∠8.8°, R : 114.1, X : 17.7		위상차(°)

그림 3.2.1 크레인 Case3 고장데이터 분석결과

고장발생 후 2cycle 지점의 고장저항은 약 51.0Ω으로 연산되었고, 고장이 지속될수록 고장전류(782A)가 점점 커지면서 고장저항은 작아지는 추이를 보였다. 비교적 큰 고장저항에 의해 전압강하는 정상상태 대비 2.3%밖에 떨어지지 않았다. 고장발생 직전의 B상 전압과 전류 위상차는 38.6° 로 선로는 송전중이었으며, 고장시 -9.4° 의 위상차를 나타냈다. 가압단에서 바라본 고장점 임피던스(지락)는 고장저항과, 선로 임피던스가 합쳐진 값으로 Z는 115.4∠8.8° (R 114, X 17.7)로 연산되었다.



■ 재폐로시간(577㎳) = 1) 보호계전기 동작 + 2) 차단기 개방 + 3) 가압단재폐로 + 4) 가압단차단기 재개방

1) 가압단 보호계전기 동작(②-①) : 37㎳

2) 수전단 차단기 개방(③-②) : 33㎳

3) 가압단 재폐로(④-③) : 415㎳ (재폐로시간 300㎳ + 차단기투입 115㎳)

※ 선로전압 Va : 재폐로용 송전선로 A상 LINE PT

4) 가압단 차단기 재개방(⑤-④) : 92㎳

그림 3.2.2 크레인 Case3 자동재폐로 시간분석

위 그림 3.2.2는 Case3의 자동재폐로 동작시퀀스를 분석한 것으로, 수전단 고장파형을 활용하였다. 고장발생 후 양단 보호계전기가 정상동작하여 양단 차단기가 개방되고, 가압단 차단기가 재폐로시간(300㎳) 이후 재투입 되었으나 선로전압(Va)이 다시 사라지는 것으로 보아 고장이 제거되지 않았고, 자동재폐로는 1회 시행 후 최종 실패하였다. 총 자동재폐로 시간은 577㎳가 소요됨을 알 수 있다.

그림 3.2.3은 크레인 Case12 고장데이터 분석을 통해 얻은 결과값으로 선종 및 긍장은 ACSR 410㎟×2B, 25.2㎞(철탑 83기) 였으며, 고장은 10.8㎞(43%) 지점에서 크레인에 의해 A상 지락고장이 발생하였다.

고장지속시간은 75㎳로 총 109개 sample 데이터를 분석하였다.

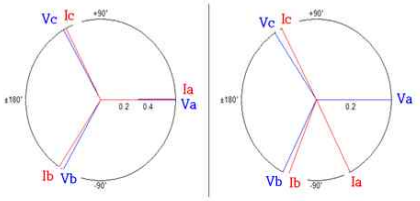
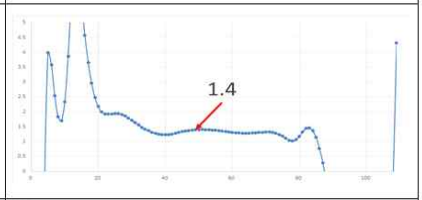
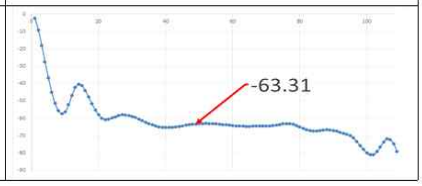
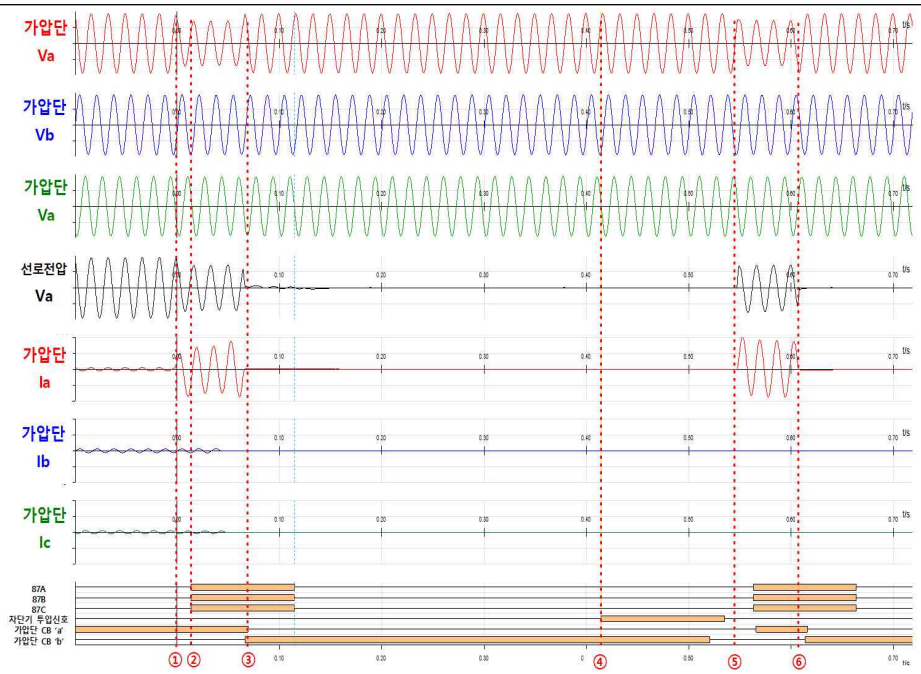
크레인 Case12			
※ 154kV 전력계통(1차값), Reference : Va, 고장발생 후 2cycle			※ 고장지속시간 75.0ms, sample 데이터 109개
구분	고장 전	고장 후	
Va	93.0kV ∠ 0°	68.3kV ∠ 0°	
Vb	93.0kV ∠ -119.9°	93.8kV ∠ -116.8°	
Vc	93.0kV ∠ -119.8°	91.4kV ∠ -123.7°	
Ia	0.632kA ∠ 0.1°	8.248kA ∠ -63.3°	
Ib	0.654kA ∠ -123.6°	0.720kA ∠ -112°	
Ic	0.638kA∠ 117.6°	0.516kA∠ 117.8°	
벡터도			고장전류(A)
			고장저항(Ω) 
			위상차(°) 
고장점 임피던스	Z : 8.3∠67.0°, R : 3.2, X : 7.6		

그림 3.2.3 크레인 Case12 고장데이터 분석결과

고장발생 후 2cycle 지점에서 고장저항은 약 1.4Ω으로 연산되었고, 고장전류 8.248kA가 계측되었다. 전압강하는 정상상태 대비 26.9%가 떨어졌고, 고장발생 직전의 A상 전압과 전류 위상차는 -0.1° 로 선로는 송전중이었으며, 지락고장이 발생하여 -63.3° 의 위상차를 나타냈다. 가압단에서 바라본 고장점 임피던스(지락) Z는 8.3∠67.0° (R 3.2, X 7.6)로 연산되었다.



■ 재폐로시간(606㎳) = 1) 보호계전기 동작 + 2) 차단기 개방 + 3) 재폐로시간 4) 차단기 투입 + 5) 차단기 재개방

1) 가압단 보호계전기 동작(②-①) : 14㎳

2) 가압단 차단기 개방(③-②) : 53㎳

3) 가압단 재폐로시간(④-③) : 348㎳ (계전기 동작복귀 48㎳ 포함)

4) 가압단 차단기 투입(⑤-④) : 131㎳

5) 가압단 차단기 재개방(⑥-⑤) : 60㎳

그림 3.2.4 크레인 Case12 자동재폐로 시간분석

그림 3.2.4는 크레인 Case12의 자동재폐로 동작시퀀스를 분석한 것으로, 가압단 고장파형을 활용하였다. 고장발생 후 양단 보호계전기가 정상 동작하여 양단 차단기가 개방되고, 가압단 차단기가 재폐로시간(300㎳) 이후 재투입 되었으나 고장전류(Ia)가 다시 발생하고 동시에 보호계전기가 동작하는 것으로 보아 고장이 제거되지 않은 것으로 보이며, 자동재폐로는 1회 시행 후 최종 실패하였다. 총 자동재폐로 시간은 606㎳가 소요됨을 알 수 있다.

HM T/L 철탑 No.37~38 전경	철탑 No.37~38 전력선 아크흔적
고장유발 크레인	철탑 No.37~38 외물접촉 고장 현장

그림 3.2.5 크레인 Case12 고장현장

3. 낙뢰 고장데이터 분석

낙뢰고장은 낙뢰로 인하여 철탑과 전선사이에 뇌과전압이 철탑과 전선사이의 공기절연 내력(직류기준 30㎸/cm)보다 크게 발생하면, 애자표면을 타고 섬락이 발생하게 되고, 이 경로로 전류가 흘러 고장이 발생하게 된다.

그림 3.2.6은 낙뢰 Case6 고장데이터 분석을 통해 얻은 결과값으로 선종 및 긍장은 ACSR 410㎟×2B, 21.3㎞(철탑 72기) 였으며, 고장은 4.9㎞(23%) 지점에서 낙뢰로 인한 아킹혼 섬락으로 C상 지락고장이 발생하였다.

고장지속시간은 56.2㎳로 총 55개 sample 데이터를 분석하였다.

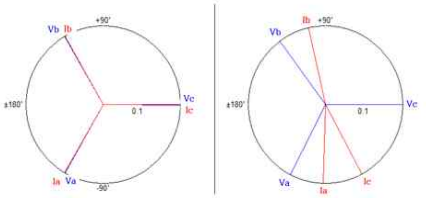
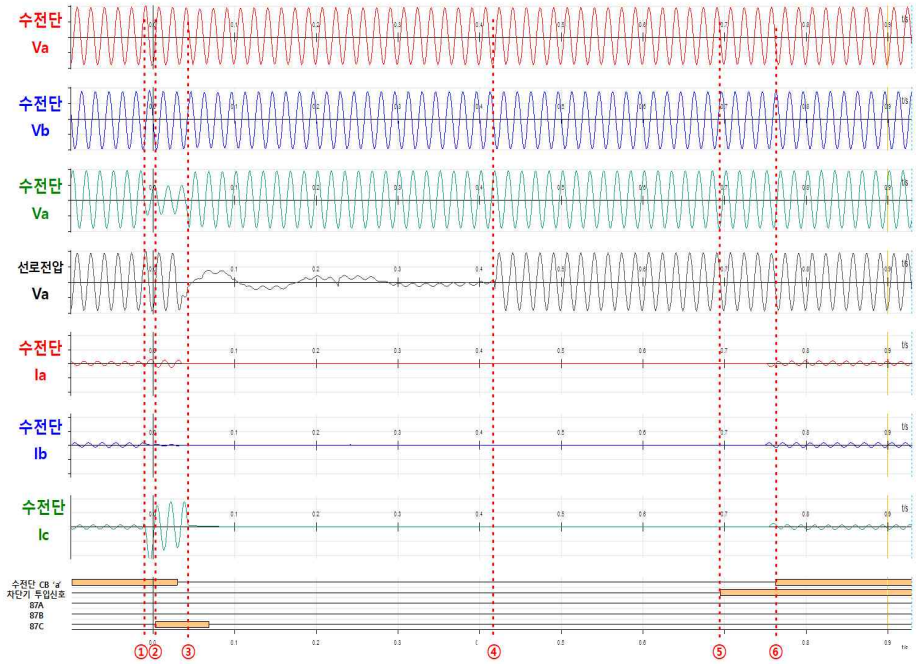
낙뢰 Case6			
※ 154kV 전력계통(1차값), Reference : Vc, 고장발생 후 2cycle			※ 고장지속시간 56.2㎳, sample 데이터 55개
구분	고장 전	고장 후	
Va	91.7kV ∠ -120.6°	93.0kV ∠ -117.3°	
Vb	92.3kV ∠ 119.4°	90.5kV ∠ 126.4°	
Vc	91.1kV ∠ 0°	42.7kV ∠ 0°	
Ia	0.429kA ∠ -120.5°	0.740kA ∠ -91.8°	
Ib	0.445kA ∠ 118.6°	0.126kA ∠ 102.6°	
Ic	0.475kA∠ -0.5°	15.0kA∠ -61.7°	
벡터도			
고장점 임피던스	Z : 2.8∠62.8°, R : 1.3, X : 2.5		

그림 3.2.6 낙뢰 Case6 고장데이터 분석결과

고장발생 후 2cycle 지점의 고장저항은 약 0.68Ω으로 연산되었고, 고장전류 15kA가 계측되었다. 전압강하는 정상상태 대비 53.1%가 떨어졌고, 고장발생 직전의 C상 전압과 전류 위상차는 -0.5° 로 선로는 송전 중이었으며, 지락고장이 발생하여 -61.7° 의 위상차를 나타냈다. 가압단에서 바라본 고장점 임피던스(지락) Z는 2.8∠62.8° (R 1.3, X 2.5)로 연산되었다.



■ 재폐로시간(786㎳) = 1) 보호계전기 동작 + 2) 차단기 개방 + 3) 가압단 재폐로시간 4) 차단기 투입신호 발생 + 5) 수전단 차단기 투입완료

1) 수전단 보호계전기 동작(②-①) : 14㎳

2) 수전단 차단기 개방(③-②) : 41㎳ (아크소호 시간 14㎳ 포함)

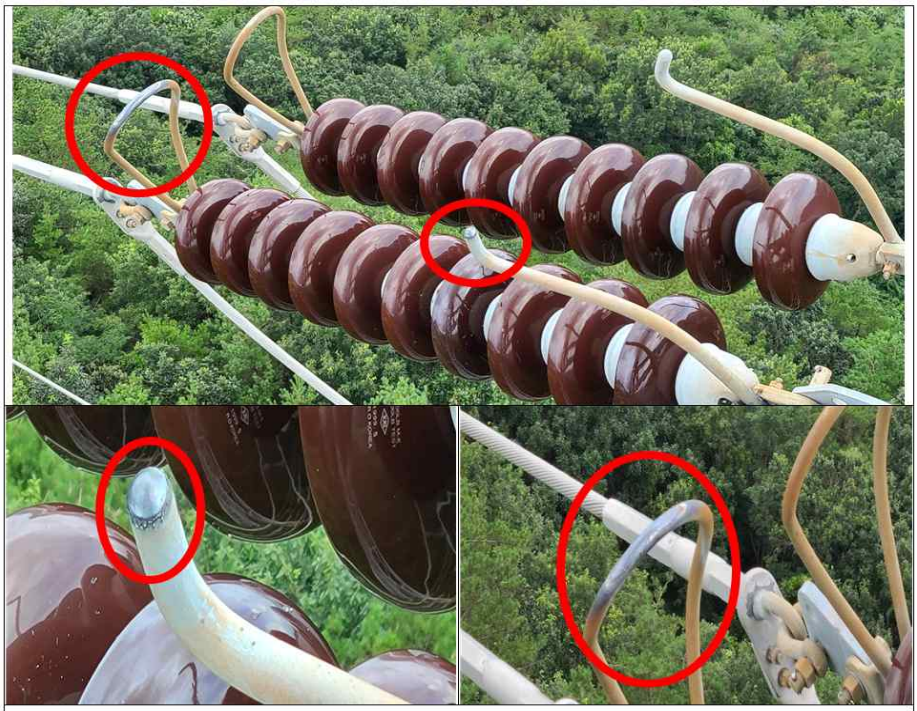
3) 가압단 재폐로시간(④-③) : 388㎳ (가압단 재폐로 시간 + 차단기 투입시간)

4) 수전단 차단기 투입신호 발생(⑤-④) : 276㎳ (동기시간 200㎳ 포함)

5) 수전단 차단기 투입완료(⑥-⑤) : 67㎳

그림 3.2.7 낙뢰 Case6 자동재폐로 시간분석

그림 3.2.7은 낙뢰 Case6의 자동재폐로 동작시퀀스를 분석한 것으로, 자동재폐로 성공시 총 동작시간은 고장이 발생하고 수전단 차단기의 투입 또는 개방상태를 확인하면 되므로 수전단 고장파형을 활용하면 한번에 분석이 가능하다. 고장발생 후 보호계전기가 정상동작하여 차단기는 기계적으로 개방되었으나 아크는 14㎳이후에 소호되었으며, 388㎳이후 선로전압(Va)이 발생하는 것으로 보아 가압단 차단기가 재폐로시간 이후 재투입 되었다. 수전단은 양단 동기불일치에 의한 고장을 방지하기 위해 선로전압이 발생하고 동기시간(200㎳) 이후에 차단기 투입신호를 보내며, 67㎳ 이후에 3상 부하전류가 발생하는 것으로 보아 수전단 차단기까지 최종투입 되었고, 자동재폐로는 성공하였다. 총 자동재폐로 시간은 786㎳가 소요됨을 알 수 있다.



154kV IF #2T/L No. 15호 부하측 상단(C상) 내측 아킹혼

그림 3.2.8 낙뢰 Case6 고장현장

그림 3.2.9는 낙뢰 Case24 고장데이터 분석을 통해 얻은 결과값으로 선종 및 긍장은 ACSR 410㎟×2S, 29.2㎞(철탑 98기) 였으며, 고장은 12.2㎞(41%) 지점에서 낙뢰로 인한 아킹혼 섬락으로 A상 지락고장이 발생하였다.

고장지속시간은 47.2㎳로 총 35개 sample 데이터를 분석하였다.

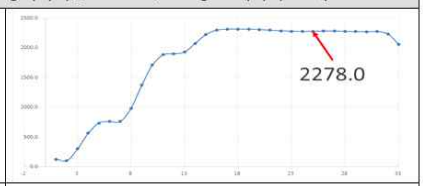
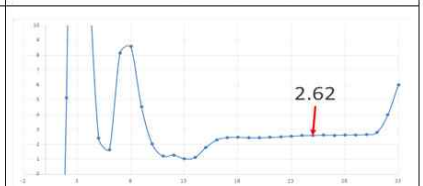
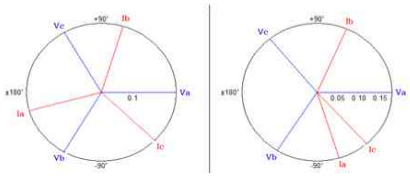
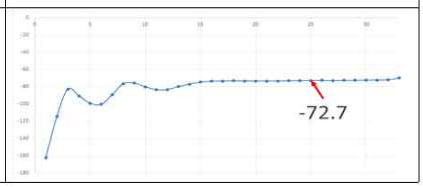
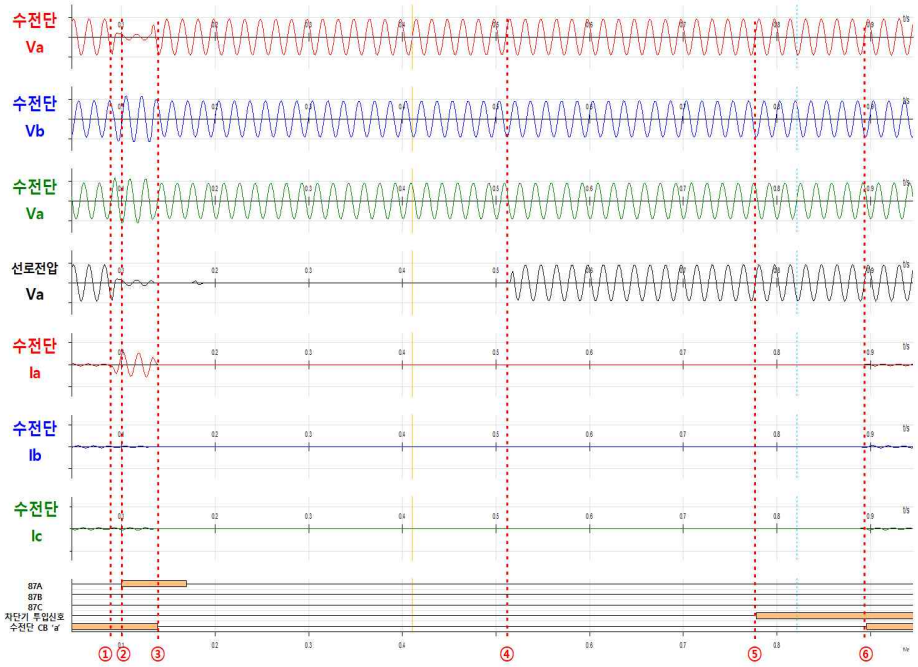
낙뢰 Case24			
※ 154kV 전력계통(1차값), Reference : Va, 고장발생 후 2cycle			※ 고장지속시간 47.2ms, sample 데이터 35개
구분	고장 전	고장 후	
Va	91.8kV ∠ 0°	57.8kV ∠ 0°	고장전류(A) 
Vb	92.2kV ∠ -120.2°	99.9kV ∠ -122.4°	
Vc	92.2kV ∠ 119.8°	96.7kV ∠ 129.3°	
Ia	0.135kA ∠ -164.3°	2.278kA ∠ -72.7°	
Ib	0.134kA ∠ 73.0°	0.113kA ∠ 66.6°	고장저항(Ω) 
Ic	0.132kA∠ -44.5°	0.155kA∠ -48.4°	
벡터도			위상차(°) 
고장점 임피던스	Z : 25.4∠74.4°, R : 6.8, X : 24.5		

그림 3.2.9 낙뢰 Case24 고장데이터 분석결과

고장저항은 약 2.62Ω으로 연산되었고, 고장전류 2.27kA가 계측되었다. 전압강하는 정상상태 대비 57.0%가 떨어졌고, 고장발생 직전의 A상 전압과 전류 위상차는 -164.3° 로 선로는 수전 중이었으며, 지락고장이 발생하여 -72.8° 의 위상차를 나타냈다. 가압단에서 바라본 고장점 임피던스(지락) Z는 24.4∠74.4° (R 6.8, X 24.5)로 연산되었다.



■ 재폐로시간(803㎳) = 1) 보호계전기 동작 + 2) 차단기 개방 + 3) 가압단 재폐로시간 4) 차단기 투입신호 발생 + 5) 수전단 차단기 투입완료

1) 수전단 보호계전기 동작(②-①) : 8㎳

2) 수전단 차단기 개방(③-②) : 39㎳

3) 가압단 재폐로시간(④-③) : 375㎳ (가압단 재폐로 시간 + 차단기 투입시간)

4) 수전단 차단기 투입신호 발생(⑤-④) : 263㎳ (동기시간 200㎳ 포함)

5) 수전단 차단기 투입완료(⑥-⑤) : 118㎳

그림 3.2.10 낙뢰 Case24 자동재폐로 시간분석

그림 3.2.10은 낙뢰 Case24의 자동재폐로 동작시퀀스를 분석한 것으로, 수전단 고장파형을 활용하였다. 고장발생 후 보호계전기가 동작하여 양단 차단기가 개방되었고, 375㎳이후 선로전압(Va)이 발생하는 것으로 보아 가압단 차단기가 재폐로시간 이후 재투입 되었다. 수전단 차단기는 선로전압이 발생하고 동기시간 이후에 차단기 투입신호를 보내며, 118㎳ 이후에 3상 부하전류가 발생하는 것으로 보아 수전단 차단기까지 최종

투입되었고, 자동재폐로는 성공하였다. 총 자동재폐로 시간은 803㎳가 소요됨을 알 수 있다.

4. 조류 고장데이터 분석

조류고장은 조류가 먹이를 찾아 활동하는 새벽 및 아침에 주로 발생하며, 조류가 철탑암 끝에 머물다가 날아가면서 동시에 발생하는 배설물에 의해 애자의 절연성이 파괴되어 애자에 섬락이 발생하게 되고, 이 경로로 전류가 흘러 고장이 발생하게 된다.

그림 3.2.11은 조류 Case2 고장데이터 분석을 통해 얻은 결과값으로 선종 및 긍장은 ACSR 410㎟×2B, 17.7㎞(철탑 57기) 였으며, 고장은 20.5㎞(41%) 지점에서 조류배설물로 인한 아킹혼 섬락으로 B상 지락 고장이 발생하였다.

고장지속시간은 52.7㎳로 총 39개 sample 데이터를 분석하였다.

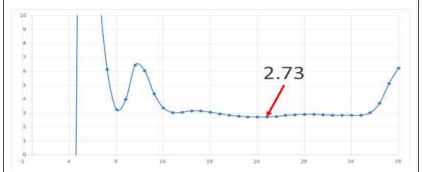
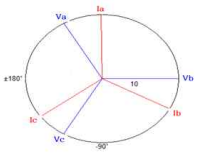
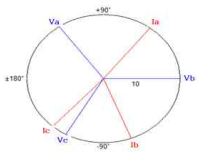
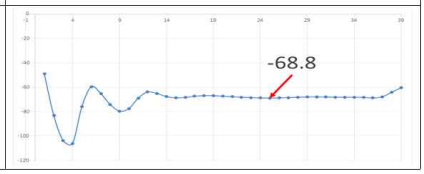
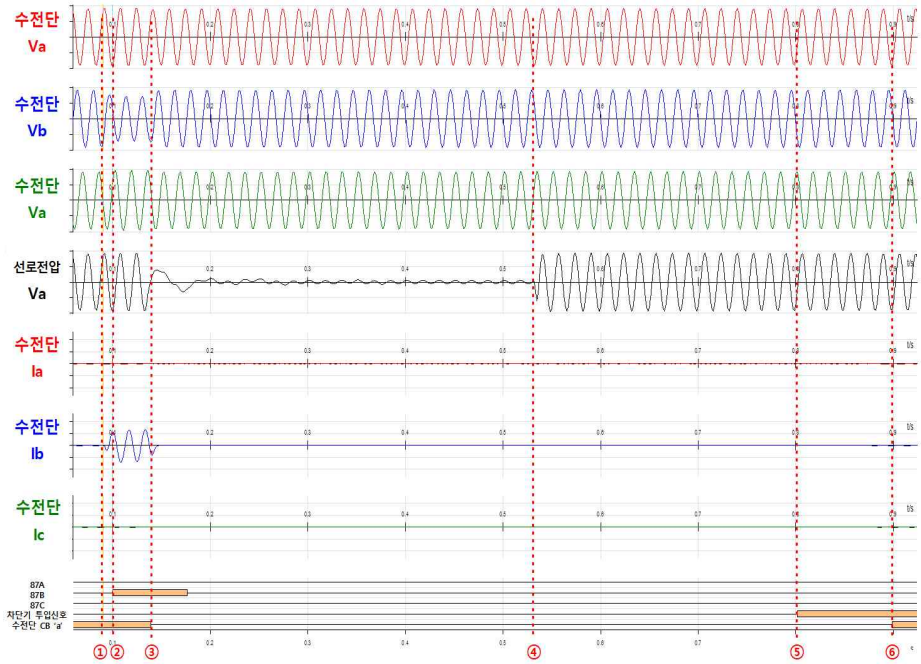
조류 Case2			
※ 154kV 전력계통(1차값), Reference : Vb, 고장발생 후 2cycle			※ 고장지속시간 52.7ms, sample 데이터 39개
구분	고장 전	고장 후	
Va	91.8kV ∠ 120.1°	92.8kV ∠ 125.3°	고장전류(A)
Vb	92.7kV ∠ 0°	74.7kV ∠ 0°	
Vc	92.2kV ∠ -120.4°	95.2kV ∠ -119.4°	
Ia	0.052kA ∠ 91.1°	0.030kA ∠ 52.4°	
Ib	0.044kA ∠ -28.4°	3.213kA ∠ -68.8°	고장저항(Ω) 
Ic	0.048kA∠ -143.8°	0.038kA∠ -131.7°	
벡터도	 		위상차(°) 
고장점 임피던스	Z : 23.3∠68.0°, R : 8.7, X : 21.6		

그림 3.2.11 조류 Case2 고장데이터 분석결과

고장발생 후 2cycle 지점의 고장저항은 약 2.73Ω으로 연산되었고, 고장전류 3.21kA가 계측되었다. 전압강하는 정상상태 대비 19.4%가 떨어졌으며, 고장발생 직전의 B상 전압과 전류 위상차는 -28.4° 로 선로는 수전중이었으며, 지락고장이 발생하여 -68.8° 의 위상차를 나타냈다. 가압단에서 바라본 고장점 임피던스(지락) Z는 23.3∠68.0° (R 8.7, X 21.6)로 연산되었다.



■ 재폐로시간(807㎳) = 1) 보호계전기 동작 + 2) 차단기 개방 + 3) 가압단 재폐로시간 4) 차단기 투입신호 발생 + 5) 수전단 차단기 투입완료

1) 수전단 보호계전기 동작(②-①) : 9㎳

2) 수전단 차단기 개방(③-②) : 39㎳

3) 가압단 재폐로시간(④-③) : 393㎳ (가압단 재폐로 시간 + 차단기 투입시간)

4) 수전단 차단기 투입신호 발생(⑤-④) : 269㎳ (동기시간 200㎳ 포함)

5) 수전단 차단기 투입완료(⑥-⑤) : 97㎳

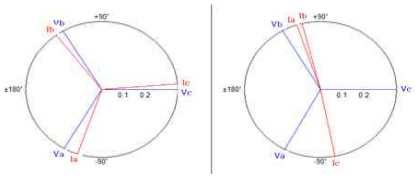
그림 3.2.12 조류 Case2 자동재폐로 시간분석

그림 3.2.12는 조류 Case2의 자동재폐로 동작시퀀스를 분석한 것으로, 수전단 고장파형을 활용하였다. 고장발생 후 보호계전기가 동작하여 양단 차단기가 개방되었고, 393㎳이후 선로전압(Va)이 발생하는 것으로 보아 가압단 차단기가 재폐로시간 이후 재투입 되었다. 수전단 차단기는 선로전압이 발생하고 동기시간 이후에 차단기 투입신호를 보내며, 97㎳ 이후에 3상 부하전류가 발생하는 것으로 보아 수전단 차단기까지 최종

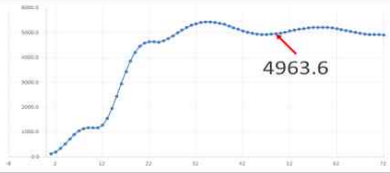
투입되었고, 자동재폐로는 성공하였다. 총 자동재폐로 시간은 807㎳가 소요됨을 알 수 있다.

그림 3.2.13은 조류 Case4 고장데이터 분석을 통해 얻은 결과값으로 선종 및 긍장은 ACSR 410㎟×2B, 33.4㎞(철탑 93기) 였으며, 고장은 23.8㎞(72%) 지점에서 조류배설물로 인한 아킹혼 섬락으로 C상 지락 고장이 발생하였다.

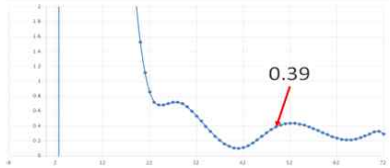
고장지속시간은 49.3㎳로 총 72개 sample 데이터를 분석하였다.

조류 Case4			
※ 154kV 전력계통(1차값), Reference : Vc, 고장발생 후 2cycle			※ 고장지속시간 49.3㎳, sample 데이터 72개
구분	고장 전	고장 후	
Va	90.9kV ∠ -119.6°	90.1kV ∠ -118.2°	
Vb	91.7kV ∠ 1205°	90.2kV ∠ 120.2°	
Vc	91.8kV ∠ 0°	74.6kV ∠ 0°	
Ia	0.107kA ∠ -108.7°	0.320kA ∠ 108.2°	
Ib	0.119kA ∠ 127.9°	0.328kA ∠ 103.9°	
Ic	0.112kA∠ 4.3°	4.963kA∠ -78.8°	
벡터도			
고장점 임피던스	Z : 15.0∠82.1°, R : 2.1, X : 14.9		

고장전류(A)



고장저항(Ω)



위상차(°)

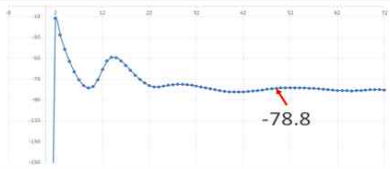
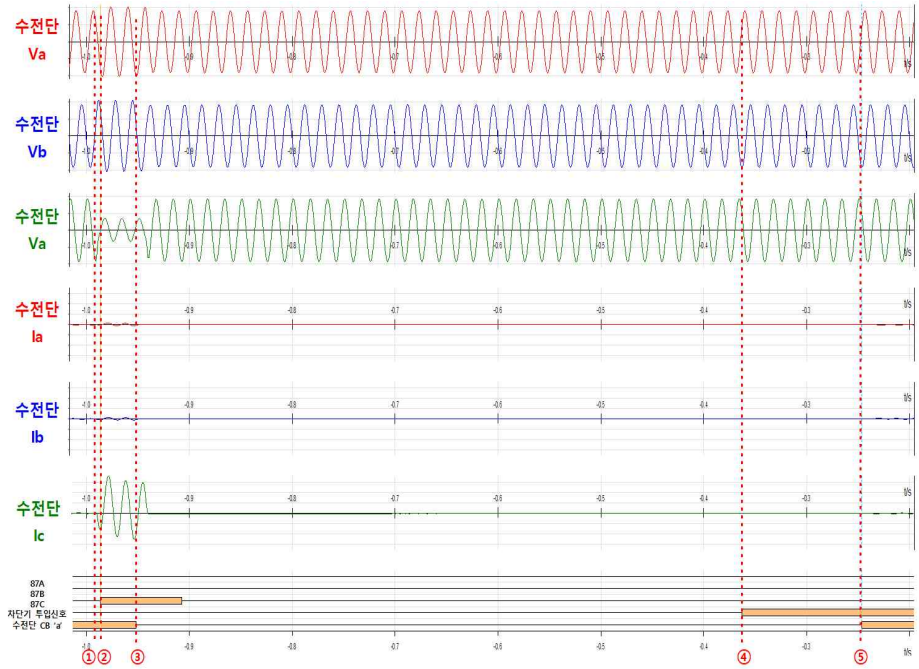


그림 3.2.13 조류 Case4 고장데이터 분석결과

고장저항은 약 0.39Ω으로 연산되었고, 고장전류 4.96kA가 계측되었다. 전압강하는 정상상태 대비 19.4%가 떨어졌고, 고장발생 직전의 C상 전압과 전류 위상차는 4.3° 로 선로는 송전중이었으며, 지락고장이 발생

하여 -78.8° 의 위상차를 나타냈다. 가압단에서 바라본 고장점 임피던스(지락) Z는 15.0∠82.1° (R 2.1, X 14.9)로 연산되었다.



■ 재폐로시간(756㎳) = 1) 보호계전기 동작 + 2) 차단기 개방 + 3) 수전단 차단기 투입신호 4) 수전단 차단기 투입완료

1) 수전단 보호계전기 동작(②-①) : 6㎳

2) 수전단 차단기 개방(③-②) : 46㎳ (아크소호시간 11㎳ 포함)

3) 수전단 차단기 투입신호 발생(④-③) : 588㎳

[가압단 (재폐로 시간 + 차단기 투입시간) + 동기시간 200㎳ 포함]

4) 수전단 차단기 투입완료(⑤-④) : 116㎳

그림 3.2.14 조류 Case4 자동재폐로 시간분석

그림 3.2.14는 조류 Case4의 자동재폐로 동작시퀀스를 분석한 것으로, 수전단 고장파형을 활용하였다. 고장발생 후 보호계전기가 동작하여 양단 차단기가 개방되었고, 588㎳이후 수전단 차단기 투입신호가 발생한 것으로 보아 가압단 차단기가 재폐로시간 이후 재투입 되었고 수전단에서 동기시간이 지난 것으로 보인다. 116㎳ 이후에 3상 부하전류가 발생하는 것으로 보아 수전단 차단기까지 최종 투입되었고, 자동재폐로는 성공하였다. 총 자동재폐로 시간은 807㎳가 소요됨을 알 수 있다.

154㎸ JD #2T/L 철탑 No.66 1번선(C상) 조류배설물 사진

그림 3.2.15 조류 Case4 고장현장

4. 강풍 고장데이터 분석

강풍에 의한 고장은 바람에 의해 전력선이 심하게 흔들리는 갤러핑 현상에 의한 것으로 수직 배열된 전력선 상간단락 또는 전력선과 가공지선 간의 지락고장 등이 있다.

그림 3.2.16은 강풍 Case3 고장데이터 분석을 통해 얻은 결과값으로 선종 및 긍장은 ACSR 410㎟, 11.7㎞(철탑 39기) 였으며, 고장은 5.8㎞(50%) 지점에서 강풍에 의한 갤러핑현상으로 A,B상 단락고장이 발생하였다.

고장지속시간은 58.8㎳로 총 114개 sample 데이터를 분석하였다.

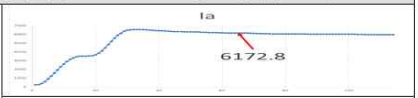
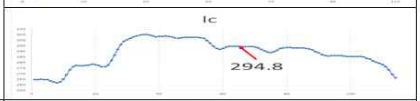
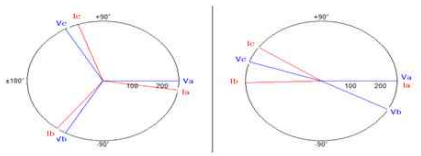
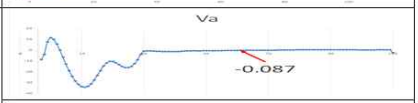
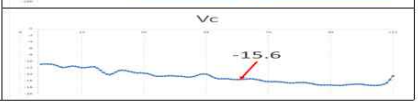
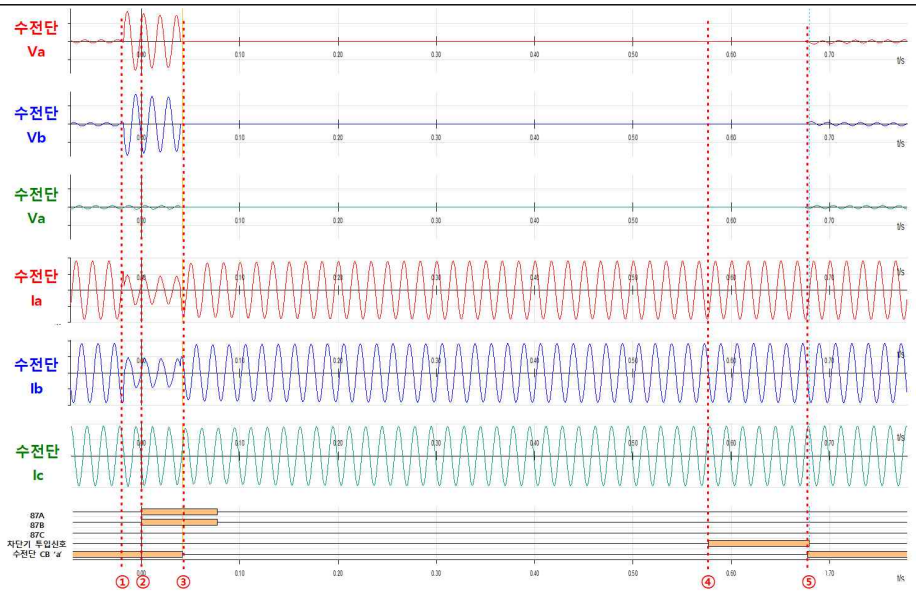
강풍 Case3				
※ 154kV 전력계통(1차값), Reference : Va, 고장발생 후 2cycle			※ 고장지속시간 58.8ms, sample 데이터 114개	
구분	고장 전	고장 후		
Va	91.5kV ∠ 0°	43.0kV ∠ 0°	고장전류 (A)	
Vb	92.9kV ∠ -119.8°	45.9kV ∠ -28.5°		
Vc	93.3kV ∠ 119.8°	89.1kV ∠ 161.6°		
Ia	0.254kA ∠ -8.6°	6.173kA ∠ -0.1°		
Ib	0.265kA ∠ -127.3°	6.010kA ∠ -178.5°		
Ic	0.265kA∠ 108.9°	0.295kA∠ 146.0°		
벡터도			위상차 (°)	 

그림 3.2.16 강풍 Case3 고장데이터 분석결과

선로는 갤러핑으로 인해 AB상 단락고장이 발생하였고, 고장전류 A상 6.17kA, B상 6.01kA가 계측되었다. A, B상 전압강하는 정상상태 대비 각각 50.5%가 떨어졌으며, 고장발생 직전의 A상 전압과 전류 위상차는 -8.6° 로 선로는 송전중이었으며, 단락고장이 발생하여 A상 -0.1° , B상 -149.9° 의 위상차를 나타냈다.



■ 재폐로시간(695㎳) = 1) 보호계전기 동작 + 2) 차단기 개방 + 3) 수전단 차단기 투입신호 4) 수전단 차단기 투입완료

1) 수전단 보호계전기 동작(②-①) : 19㎳

2) 수전단 차단기 개방(③-②) : 41㎳

3) 수전단 차단기 투입신호 발생(④-③) : 535㎳

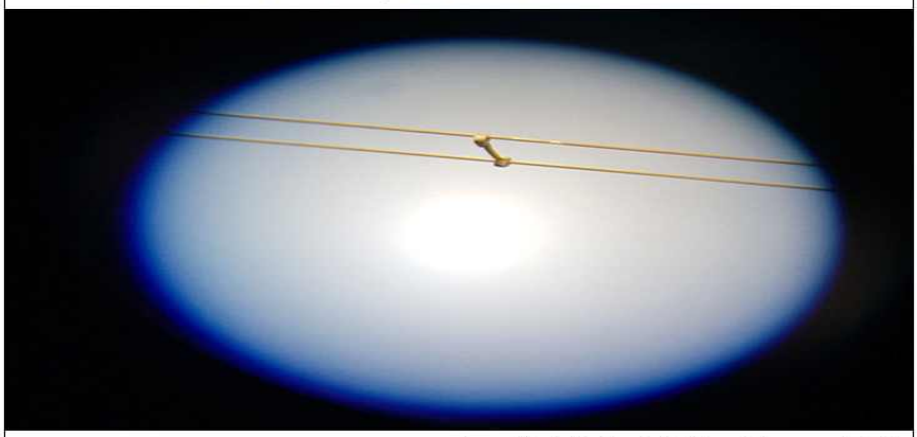
[가압단 (재폐로 시간 + 차단기 투입시간) + 동기시간 200㎳ 포함]

4) 수전단 차단기 투입완료(⑤-④) : 100㎳

그림 3.2.17 강풍 Case3 자동재폐로 시간분석

그림 3.2.17은 강풍 Case3의 자동재폐로 동작시퀀스를 분석한 것으로, 수전단 고장파형을 활용하였다. 고장발생 후 보호계전기가 동작하여 양단 차단기가 개방되었고, 535㎳ 이후 수전단 차단기 투입신호가 발생한 것으로 보아 가압단 차단기가 재폐로시간 이후 재투입 되었고 수전단에서 동기시간이 지난 것으로 보인다. 100㎳ 이후에 3상 부하전류가 발생하는 것으로 보아 수전단 차단기까지 최종투입 되었고, 자동재폐로는 성공하였다. 총 자동재폐로 시간은 695㎳가 소요됨을 알 수 있다.

154kV KC T/L No.75~76호 전경



154kV KC T/L No.75~76호 상,중단 전선 아크 흔적

그림 3.2.18 강풍 Case3 고장현장

6. 주요 송전선로 고장 종합분석

고장 원인	case	동작설비 (T/L)	고장상	가입단 변전소											
				고장 전						고장 후					
				정상전류 [kA]			정상전입 [kV]			고장전류 [kA]			고장전입 [kV]		
				A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
크레인	1	HA	B,N	0.191	0.191	0.191	90.9	91.9	91.8	0.170	14.45	0.318	79.7	51.0	97.7
	2	HB	B,N	0.295	0.300	0.299	92.4	92.5	93.4	0.416	4.275	0.307	90.2	85.1	97.6
	3	HC	B,N	0.047	0.040	0.059	92.7	92.4	92.2	0.093	0.806	0.049	91.7	90.3	93.7
	4	HD	C,N	0.778	0.815	0.797	92.3	91.9	91.3	0.773	0.944	1.998	98.8	89.2	63.0
	5	HE	B,N	0.569	0.607	0.590	92.6	92.5	92.0	0.158	7.180	0.839	100.1	33.6	109.9
	6	HF	A,N	0.252	0.276	0.267	91.7	91.7	91.3	0.840	0.271	0.228	80.4	98.0	88.9
	7	HG	A,N	0.048	0.048	0.053	88.5	91.0	91.7	8.721	0.072	0.065	28.9	91.3	91.6
	8	HI	B,N	0.256	0.264	0.251	91.7	92.1	91.7	0.241	9.621	0.285	91.5	76.0	90.6
	9	HJ	A,N	0.652	0.680	0.666	91.0	92.0	91.0	7.881	0.718	0.593	72.0	92.0	90.0
	10	HK	B,N	0.073	0.080	0.070	90.9	91.7	91.4	0.028	3.632	0.095	90.7	75.6	88.0
	11	HL	A,N	0.512	0.516	0.544	89.2	88.4	91.7	5.727	0.583	0.464	73.1	94.3	87.1
	12	HM	A,N	0.632	0.654	0.638	93.0	93.0	93.0	8.431	0.719	0.525	68.0	94.0	91.0
	13	HN	C,N	0.162	0.160	0.162	90.7	91.8	91.9	0.180	0.028	1.741	96.2	93.2	63.0
	14	HO	C,N	0.133	0.127	0.140	91.5	91.3	91.1	0.172	0.079	1.862	103.2	92.1	56.8
낙뢰	1	IA	B,C,N	0.039	0.038	0.042	91.8	92.5	92.2	0.127	4.830	4.717	95.3	65.5	66.1
	2	IB	A,B,N	0.272	0.285	0.285	92.0	93.0	93.2	6.875	7.280	0.283	13.6	10.6	104.4
	3	IC	B,N	0.081	0.075	0.077	91.2	91.6	92.0	0.049	2.488	0.131	89.9	57.8	94.6
	4	ID	C,N	0.405	0.414	0.409	92.8	93.3	93.1	0.347	0.375	11.45	93.8	91.7	53.1
	5	IE	C,N	0.036	0.022	0.046	91.8	92.0	92.1	0.111	0.073	8.22	91.8	90.3	59.9
	6	IF	C,N	0.429	0.443	0.445	91.8	92.6	92.1	0.830	0.125	15.72	92.7	89.5	42.0
	7	IG	B,N	0.058	0.065	0.058	93.2	93.9	94.0	0.110	2.956	0.055	97.5	52.5	100.1
	8	IH	A,N	0.138	0.142	0.143	92.0	91.9	91.8	7.122	0.228	0.092	9.43	109.1	107.7
	9	IJ	C,N	0.011	0.011	0.011	92.3	93.3	93.3	0.105	0.062	1.707	93.6	94.7	73.5
	10	IK	C,N	0.332	0.311	0.332	92.5	92.6	92.4	0.211	0.382	2.223	94.3	94.2	73.0
	11	IL	B,N	0.328	0.337	0.338	91.0	92.1	92.5	0.212	6.662	0.440	114.3	7.711	115.8
	12	IM	C,N	0.115	0.116	0.115	91.5	92.3	92.8	0.155	0.097	6.810	104.5	104.3	36.3
	13	IN	B,N	0.407	0.416	0.418	91.2	92.4	93.0	0.336	2.488	0.465	104.2	23.2	111.2
	14	IO	A,N	0.247	0.254	0.255	90.8	90.9	90.7	3.033	0.277	0.283	47.6	100.2	98.8
	15	IP	C,N	0.286	0.284	0.284	92.5	92.5	92.2	0.527	0.263	9.165	92.8	90.3	43.8
	16	IQ	A,N	0.204	0.208	0.207	92.7	93.1	92.8	7.536	0.088	0.398	43.7	100.7	98.5
	17	IR	B,N	0.079	0.071	0.073	91.0	91.7	91.2	0.058	8.827	0.048	90.7	71.6	91.9
	18	IS	B,N	0.124	0.125	0.128	91.0	91.5	91.1	0.062	5.329	0.168	89.9	70.2	90.9
	19	IT	C,N	0.069	0.068	0.068	92.2	93.1	93.1	0.051	0.040	4.915	115.7	116.8	14.9
	20	IU	A,N	0.099	0.098	0.102	91.1	91.8	91.8	5.046	0.101	0.248	62.7	96.7	95.5
	21	IV	A,N	0.388	0.389	0.395	91.2	91.1	91.0	3.452	0.203	0.728	65.1	89.9	86.3
	22	IW	B,N	0.268	0.272	0.272	91.2	91.6	91.4	0.431	13.1	0.203	101.7	16.7	103.7
	23	IX	B,N	0.294	0.298	0.298	91.4	91.8	91.6	0.718	2.574	0.156	89.9	64.9	92.9
	24	IY	A,N	0.135	0.134	0.132	91.8	92.2	92.2	2.281	0.106	0.156	57.8	99.9	96.7
	25	IZ	A,N	0.048	0.047	0.048	91.2	92.3	92.7	3.112	0.106	0.148	47.6	101.6	100.1
조류배설물	1	JA	A,N	0.639	0.642	0.647	89.1	90.6	90.9	2.757	0.723	0.465	57.1	91.3	88.8
	2	JB	B,N	0.052	0.048	0.047	91.8	92.5	92.3	0.030	3.216	0.038	92.8	74.7	95.2
	3	JC	C,N	0.163	0.173	0.169	91.3	91.6	91.4	0.172	0.179	5.133	99.4	99.3	46.6
	4	JD	C,N	0.171	0.148	0.162	91.1	91.9	92.0	0.372	0.362	5.052	90.3	90.4	74.8
	5	JE	A,N	0.164	0.181	0.187	92.3	93.3	93.4	3.420	0.099	0.348	42.3	104.1	101.6
	6	JF	A,N	0.258	0.274	0.271	91.9	92.2	92.1	7.344	0.324	0.183	33.7	105.7	102.5
강풍	1	KA	A,B,C	0.061	0.058	0.051	92.5	93.1	92.8	10.41	10.43	9.95	45.6	46.8	48.3
	2	KB	A,B	0.328	0.351	0.388	92.2	92.1	91.7	3.900	3.992	0.412	72.7	72.0	90.5
	3	KC	A,B	0.254	0.265	0.265	91.5	92.9	93.3	6.091	5.934	0.294	42.7	45.7	88.7
	4	KD	A,B	0.230	0.244	0.241	92.0	93.0	94.0	10.26	10.18	0.201	44.0	44.0	90.0
	5	KE	A,B	0.233	0.246	0.253	91.2	92.7	92.9	6.858	6.569	0.226	42.9	45.2	88.6

표 3.2.2 고장 전·후 상전류 & 상전압 분석결과

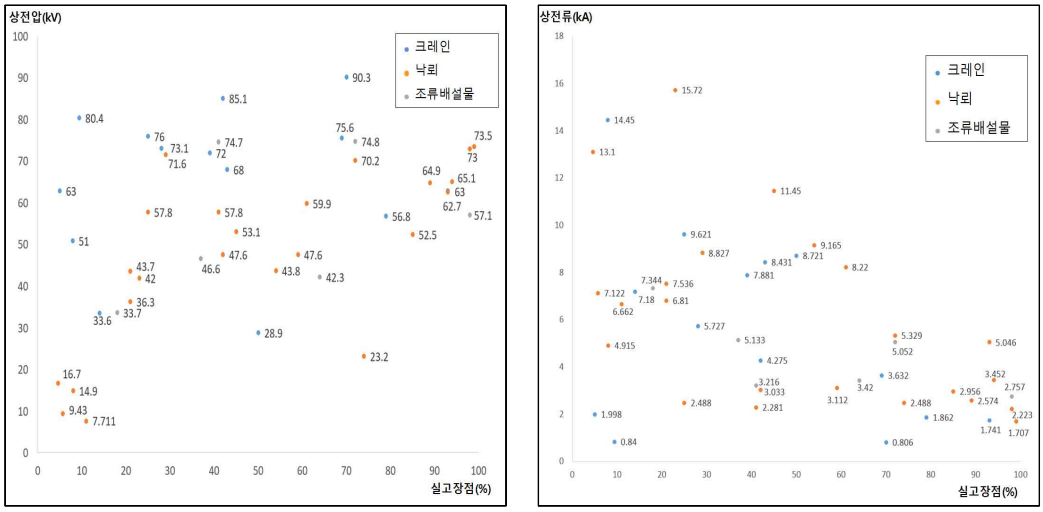


그림 3.2.19 고장 후 상전압 & 상전류 분포도

표 3.2.2와 그림 3.2.19는 주요 송전선로 고장 전후 상전압 및 상전류 종합 분석결과와 지락고장시 고장전압과 전류 분포도를 나타내고 있으며, 분포도에서는 단락고장인 강풍(5건), 낙뢰 Case1,2(2건)는 제외하였다.

분석결과 크레인 고장은 낙뢰와 조류고장보다 대체로 전압강하와 고장전류가 작게 발생하였으나, 계통구성 및 선로 임피던스, 고장저항, 고장위치 등에 의해 그 크기가 각각 달라, 단순히 수치만을 이용해서 크레인 고장을 구분할 수는 없었다. 하지만, 선로 근단에서 발생한 고장이 말단에서 발생한 고장에 비해 전압강하와 고장전류가 크게 나타났고, 모든 고장이 정상상태에 비해 고장상태(전압↓, 전류↑)에서 눈에 띄는 수치적인 변화가 있으므로, 이러한 특징은 실제 고장발생 여부와 고장상을 판별하는데 활용할 수 있으며, 크레인 고장검출 알고리즘 구성시 오동작 방지를 위한 FD(Fault Detection)로 사용이 가능하다.

가압단 고장데이터										
고장 원인	Case	고장파형분석								
		고장상	고장 지속시간 (ms/sample)	고장 전 전입 & 전류 위상차			고장 후 전입 & 전류 위상차			고장저항 (Ω)
				A상	B상	C상	A상	B상	C상	
크레인 (14건)	1	B	59.16 / 72	-353.8°	-356.0°	-353.3°	-1.328°	-7.599°	-331.4°	2.5
	2	B	65.00 / 131	-14.49°	-16.26°	-15.58°	-5.399°	-15.73°	-14.55°	14.3
	3	**B**	**72.89 / 141**	**-343.3°**	**-321.1°**	**-321.3°**	**-339.7°**	**-9.449°**	**-330.7°**	**51.0**
	4	C	48.95 / 48	-165.8°	-167.3°	-170.4°	-165.5°	-168.5°	-10.70°	7.9
	5	B	58.33 / 57	-170.3°	-173.7°	-173.9°	-14.92°	-8.382°	-133.2°	1.8
	6	A	53.47 / 76	-180.3°	-181.6°	-186.5°	-18.7°	-181.6°	-186.5°	11.9
	7	A	66.00 / 67	-171.8°	-164.5°	-168.1°	-17.09°	-53.12°	-162.4°	1.0
	8	B	49.16 / 60	-334.4°	-335.2°	-336.7°	-339.2°	-22.43°	-328.9°	4.3
	9	A	50.69 / 74	-177.9°	-181.6°	-179.9°	-53.35°	-163.8°	-181.9°	1.1
	10	B	50.0 / 49	-325.7°	-332.5°	-329.0°	-113.2°	-25.68°	-305.3°	7.3
	11	A	58.0 / 59	-356.7°	-356.5°	-356.0°	-12.49°	-349.9°	-8.558°	3.7
	12	**A**	**75.0 / 109**	**-359.3°**	**-3.721°**	**-2.078°**	**-63.3°**	**-355.2°**	**-5.8°**	**1.4**
	13	C	42.36 / 61	-184.4°	-181.5°	-181.1°	-180.3°	-152.5°	-59.27°	2.8
	14	C	55.72 / 108	-357.4°	-348.9°	-347.6°	-352.7°	-22.01°	-24.43°	8.3
낙뢰 (25건)	1	BCN	54.16 / 79	-180.2°	-179.1°	-177.9°	-331.9°	-54.54°	-90.16°	-
	2	ABN	62.98 / 48	-9.531°	-8.746°	-12.85°	-52.16°	-85.26°	-22.72°	-
	3	B	62.50 / 76	-238.3°	-235.3°	-237.8°	-25.66°	-71.04°	-157.9°	0.70
	4	C	56.25 / 82	-345.6°	-347.0°	-346.4°	-342.1°	-0.021°	-68.75°	0.32
	5	C	60.00 / 73	-27.38°	-335.7°	-336.4°	-81.12°	-281.0°	-71.95°	0.33
	6	**C**	**56.20 / 55**	**-359.4°**	**-359.7°**	**-1.687°**	**-334.5°**	**-23.8°**	**-61.7°**	**0.68**
	7	B	65.83 / 80	-173.4°	-183.9°	-184.5°	-11.13°	-73.85°	-225.6°	0.29
	8	A	61.80 / 90	-357.2°	-355.6°	-359.0°	-59.51°	-326.2°	-353.9°	0.55
	9	C	43.75 / 64	-260.4°	-250.7°	-247.0°	-98.27°	-189.0°	-63.22°	1.30
	10	C	58.33 / 57	-352.7°	-348.4°	-347.8°	-27.82°	-3.945°	-61.19°	2.25
	11	B	48.33 / 59	-177.1°	-174.8°	-178.3°	-199.7°	-50.7°	-171.5°	0.74
	12	C	50.00 / 37	-349.6°	-350.1°	-347.2°	-328.1°	-358.0°	-70.52°	0.71
	13	B	47.50 / 57	-176.8°	-174.1°	-177.0°	-188.5°	-60.2°	-153.5°	0.66
	14	A	52.08 / 76	-350.2°	-347.8°	-351.4°	-69.2°	-336.1°	-359.8°	0.77
	15	C	54.16 / 40	-353.8°	-353.2°	-353.7°	-329.1°	-359.0°	-70.67°	0.45
	16	A	76.00 / 147	-348.3°	-350.5°	-350.4°	-67.9°	-36.5°	-4.508°	0.59
	17	B	58.33 / 86	-2.517°	-3.526°	-358.8°	-24.6°	-75.9°	-24.2°	0.48
	18	B	59.72 / 130	-20.9°	-20.8°	-20.16°	-85.5°	-71.6°	-4.43°	0.93
	19	C	42.36 / 62	-165.9°	-164.4°	-161.1°	-169.7°	-173.9°	-59.9°	1.78
	20	A	57.79 / 112	-304.8°	-299.5°	-305.1°	-69.8°	-148.5°	-359.9°	1.08
	21	A	66.12 / 128	-351.2°	-351.7°	-351.3°	-70.7°	-89.3°	-10.1°	0.54
	22	B	73.96 / 143	-354.3°	-356.4°	-356.2°	-25.8°	-55.1°	-33.8°	0.31
	23	B	67.18 / 130	-356.3°	-358.1°	-358.5°	-19.4°	-72.6°	-49.8°	0.79
	24	**A**	**47.22 / 35**	**-164.2°**	**-167.0°**	**-164.2°**	**-72.8°**	**-170.9°**	**-177.6°**	**2.62**
	25	A	62.96 / 137	-164.2°	-167.0°	-164.2°	-72.8°	-170.7°	-175.6°	0.47
조류 배설물 (6건)	1	A	58.33 / 57	-171.2°	-170.0°	-172.1°	-71.9°	-128.9°	-21.4°	0.45
	2	**B**	**50.00 / 39**	**-29.36°**	**-27.02°**	**-25.59°**	**-72.8°**	**-68.8°**	**-12.2°**	**2.73**
	3	C	50.00 / 73	-186.1°	-185.2°	-190.2°	-175.2°	-189.7°	-66.75°	0.75
	4	**C**	**49.3 / 72**	**-348.5°**	**-353.4°**	**-355.8°**	**-133.6°**	**-16.2°**	**-78.8°**	**0.39**
	5	A	56.25 / 55	-326.7°	-325.4°	-328.7°	-59.37°	-22.55°	-0.021°	0.57
	6	A	59.16 / 72	-325.3°	-326.8°	-325.7°	-66.66°	-332.6°	-349.4°	0.25
강풍 (5건)	1	ABC	52.77 / 39	-102.0°	-129.8°	-126.3°	-60.44°	-70.45°	-65.68°	-
	2	AB	65.09 / 126	-358.9°	-351.7°	-353.1°	-35.89°	-113.2°	-353.1°	-
	3	**AB**	**58.8 / 114**	**-8.6°**	**-7.546°**	**-10.92°**	**-0.087°**	**-149.9°**	**-15.5°**	**-**
	4	AB	51.38 / 75	-349.4°	-353.1°	-354.2°	-344.2°	-162.9°	-16.03°	-
	5	AB	57.27 / 111	-4.435°	-0.762°	-6.606°	-357.1°	-150.7°	-22.22°	-

표 3.2.3 위상차 및 고장저항 분석결과

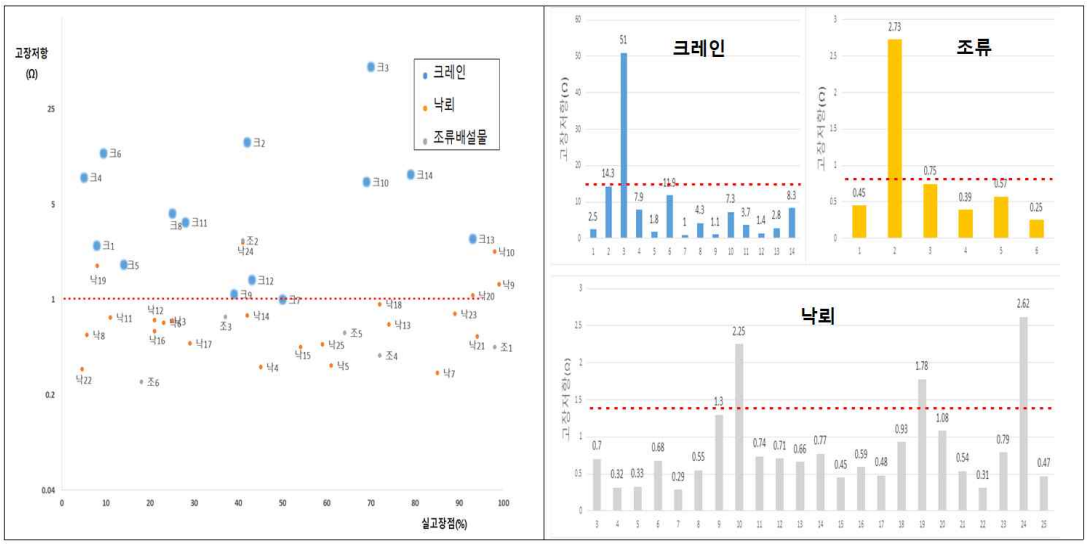


그림 3.2.20 고장저항 분포도

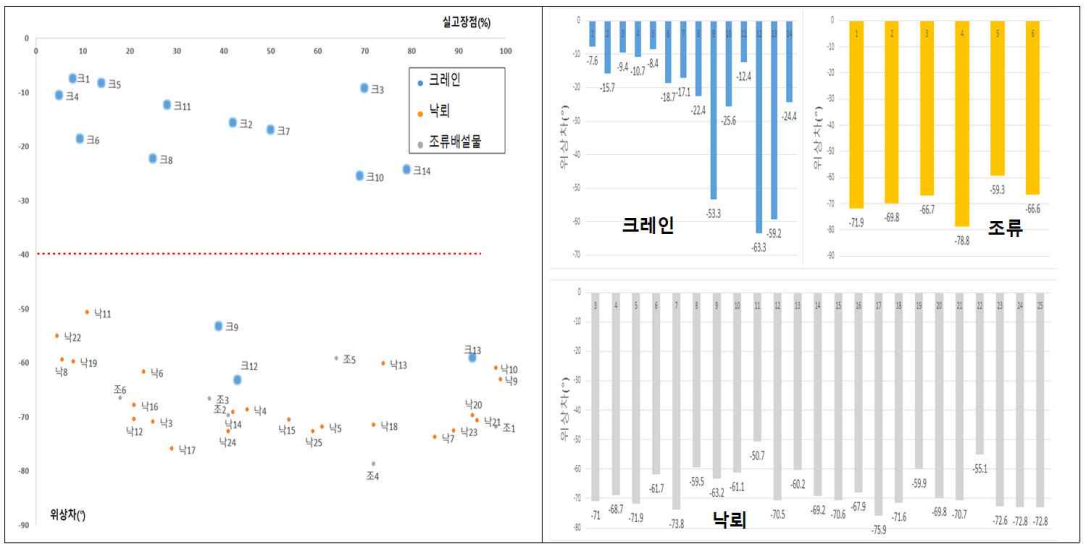


그림 3.2.21 위상차 분포도

표 3.2.3과 그림 3.2.20, 3.2.21은 주요 송전선로 고장 위상차 및 고장저항 분석결과와 분포도를 나타내고 있으며, 분포도에서는 단락고장인 강풍, 낙뢰 Case1,2는 제외하였다.

전압과 전류 위상차는 고장상 전압기준에 전류위상이며, 정상상태에서는 가압단의 경우 위상차 ±30° 이내를 유지하고 있었으며, 수전단은 변류기 극성이 가압단과 반대로 위상이 180° 뒤집히게 나타났다.

크레인 분석결과 Case3에서 가장 큰 고장저항 51Ω이 연산되었고, 고장위치가 70%지점으로 선로 리액턴스가 많이 포함되어 있는 위치이지만, 큰 고장저항에 의해 위상차는 -9.4° 가 연산되었다, Case7은 가장 작은 고장저항 1.0Ω이나, 선로 긍장이 5㎞로 비교적 단거리 선로이며, 고장위치 또한 2.5㎞ 지점에서 발생하여, 선로 리액턴스가 작아 위상차는 -17.0° 였다. Case12는 고장저항이 Case7과 비슷한 1.4Ω이지만, 고장위치가 10.8㎞ 지점으로 큰 선로 리액턴스 영향으로 위상차는 -63.3° 이다. 크레인 고장사례는 가장 큰 고장저항과 작은저항을 제외하면, 평균 5.6Ω 이상 연산되었으며, 위상차는 Case9 (10㎞, 1.1Ω), 12(10.8㎞, 1.4Ω), 13(42.4㎞, 2.8Ω)을 제외하면 모두 -26° 이하로 연산되었다.

낙뢰고장 분석결과 고장저항은 Case7(26.2㎞)에서 0.29Ω으로 최소, Case24(12.2㎞)에서 2.62Ω 가장 크게 발생되었으며, 평균 0.84Ω이 연산되었으며, 위상차는 Case11(1.9㎞, 0.74Ω)이 가장 작은 -50.7° 로 Case11을 제외하면 대부분 -55° 이상 연산되었다.

조류배설물 고장 분석결과 고장저항은 Case6(5.28㎞)가 0.25Ω으로 최소, Case2(20.5㎞)에서 2.73Ω으로 최대, 위상차는 모두 -59° 이상으로 두 수치 모두 낙뢰고장과 비슷하였다.

크레인, 낙뢰, 조류는 모두 1선 지락고장으로 고장상 상전압 위상은 변동하지 않고 크기만 감소하였으며, 고장상 상전류는 선로의 임피던스와 고장저항의 특성각 만큼 상전압에 대해서 뒤지게 연산되어 전형적인 1선 지락고장의 형태를 보였다.

강풍고장은 전력선간 단락고장으로 고장저항은 연산하지 않았고, Case3 AB상 단락시 A상 위상차는 -8.6° , B상 -127.3° , 고장상(AB)의 전류위상은 서로 반대위상을 가지고 있었으며, 전압강하가 정상상태 대비 약 50% 수준으로 전형적인 2선 단락고장의 형태를 보였다.

송전선로 주요고장의 위상차 분석결과, 크레인, 낙뢰, 조류, 강풍 고장은 특정 위상차를 가지고 있었으며, 이 수치는 계통구성 및 고장위치 등에 따라 조금씩 달라질 수 있지만, 크레인 고장의 경우 위상차에 영향을 주는 고장저항이 낙뢰나 조류보다 1.5~40배까지 크게 발생하고 있어, 크레인 고장검출 알고리즘 구성 시 FD(Fault Detection)의 중요한 요소로 사용할 수 있다.

표 3.2.4는 가압단 보호계전기 고장파형(편단데이터)을 이용해 임피던스를 연산한 결과로 2장 2절 2의 표1의 지락고장시 거리계전기 임피던스 계산식을 이용하여 Z(임피던스)값을 연산하고 R(저항), X(리액턴스)값을 각각 구하였다.

분석결과 임피던스값은 계통구성(양단계통), 고장위치, 고장저항의 크기에 영향을 많이 받으며, 분석사례는 모두 양단계통으로, 낙뢰 Case8, 11, 19는 고장위치가 비교적 가압단 근단(5.7%, 11%, 8%)으로 수전단에서 유입되는 고장전류의 크기가 작아 가압단 전압에 영향을 주지 않으므로 고장저항과 비슷하거나 적게 연산되었으나, 선로의 중간 또는 말단 부근에서 발생한 고장은 수전단에서 유입되는 고장전류의 크기가 커 가압단 전압이 높아지게 되어 보호계전기가 측정하는 임피던스는 실제 임피던스 보다 커지게 되었다. 이는 크레인 근단에서 발생한 낙뢰고장시 자동재폐로를 방지하기 위한 FD요소로 사용이 가능하다.

고장 원인	Case	고장상	실고장점	고장저항(Ω)	보호계전기 측정 임피던스 [Ω]		
					Z	R	X
크레인 (14건)	1	B	0.5(7.9%)	2.5	3.72∠11.9°	3.64	0.77
	2	B	7.8(42%)	14.3	20.59∠18.1°	19.57	6.41
	3	B	22.7(70%)	51.0	115.4∠8.8°	114.1	17.7
	4	C	0.34(5%)	7.9	29.36∠13.2°	28.58	6.72
	5	B	1.62(14.6%)	1.8	4.49∠19.0°	4.25	1.46
	6	A	2.83(9.4%)	11.9	90.00∠32.9°	75.50	48.99
	7	A	2.5(50%)	1.0	3.49∠27.1°	3.10	1.59
	8	B	5.4(25%)	4.3	7.66∠35.6°	6.22	4.46
	9	A	10(39%)	1.1	7.83∠69.7°	2.73	7.34
	10	B	13.32(69%)	7.3	23.52∠34.1°	19.47	13.20
	11	A	2.6(28%)	3.7	10.15∠37.2°	8.09	6.13
	12	A	10.8(43%)	1.4	8.30∠67.0°	3.2	7.6
	13	C	42.41(93%)	2.8	36.2∠65.6°	14.98	32.96
	14	C	18.07(79%)	8.3	29.97∠33.8°	24.89	16.69
낙뢰 (25건)	1	BCN	24.7(62%)	-	-	-	-
	2	ABN	4.55(39%)	-	-	-	-
	3	B	11.0(25%)	0.70	24.10∠78.1°	4.98	23.57
	4	C	7.73(45%)	0.32	4.71∠77.9°	0.98	4.60
	5	C	13.41(61%)	0.33	8.14∠81.0°	1.26	8.04
	6	**C**	**4.90(23%)**	**0.68**	**2.8∠62.8°**	**1.3**	**2.5**
	7	B	26.2(85%)	0.29	18.61∠82.4°	2.48	18.46
	8	A	2.69(5.7%)	0.55	1.31∠66.3°	0.52	1.19
	9	C	36.95(99%)	1.30	44.21∠74.5°	11.81	42.64
	10	C	32.08(98%)	2.25	32.22∠64.7°	14.20	30.09
	11	B	1.945(11%)	0.74	1.22∠60.4°	0.60	1.06
	12	C	6.219(21%)	0.71	5.29∠72.7°	1.56	5.06
	13	B	13.21(74%)	0.66	10.90∠72.8°	3.21	10.42
	14	A	19.74(42%)	0.77	16.11∠77.5°	3.48	15.73
	15	C	6.587(54%)	0.45	4.80∠73.9°	1.32	4.61
	16	A	8.08(21%)	0.59	6.31∠75.6°	1.57	6.11
	17	B	10.73(29%)	0.48	8.37∠78.6°	1.64	8.21
	18	B	15.9(72%)	0.93	13.20∠74.7°	3.49	12.73
	19	C	2.95(8%)	1.78	3.08∠59.8°	1.54	2.66
	20	A	17.54(93%)	1.08	12.57∠75.7°	3.12	12.17
	21	A	23.4(94%)	0.54	19.31∠78.3°	3.95	18.90
	22	B	1.802(4.6%)	0.31	1.51∠68.4°	0.55	1.41
	23	B	34.44(89%)	0.79	25.63∠74.2°	6.96	24.67
	24	**A**	**12.2(41%)**	**2.62**	**25.4∠74.4°**	**6.8**	**24.5**
	25	A	23.15(59%)	0.47	16.93∠82.6°	2.18	19.78
조류 배설물 (6건)	1	A	24.7(98%)	0.45	20.86∠82.9°	2.54	20.71
	2	**B**	**20.5(41%)**	**2.73**	**23.3∠68.0°**	**8.7**	**21.6**
	3	C	11.2(37%)	0.75	8.85∠76.7°	2.03	8.61
	4	**C**	**23.8(72%)**	**0.39**	**15.0∠82.1°**	**2.1**	**14.9**
	5	A	18.3(64%)	0.57	12.04∠76.8°	2.74	11.72
	6	A	5.28(18%)	0.25	4.40∠69.1°	1.56	4.12
강풍 (5건)	1	ABC	9.084(99%)	-	-	-	-
	2	AB	26.66(82%)	-	-	-	-
	3	**AB**	**5.83(50%)**	-	-	-	-
	4	AB	0.16(0.6%)	-	-	-	-
	5	AB	4.4(37%)	-	-	-	-

표 3.2.4 보호계전기 연산 임피던스 분석결과

표 3.2.5는 가압단과 수전단 고장데이터를 활용하여 자동재폐로를 분석한 결과이며, 보호계전기 동작시간, 고장제거 시간, 총 재폐로 시간, 자동재폐로 성공여부에 대해 분석하였으며, 보호계전기 동작시간은 고장이 발생하고 보호계전기가 고장을 인지하는 시간에 대한 성능을 나타낸 것으로 계전기 제작사마다 조금씩 차이는 있지만 대부분 9~30㎳ 이내에 동작한다. 전력시장 운영규칙에 기술되어 있는 고장제거 시간은 5~6cycle(100㎳) 이내이며, 고장이 발생하고 차단기가 개방되어 아크까지 완전히 소호된 시간으로 대부분 약 80㎳ 이내로 잘 동작하였다.

총 재폐로 시간을 나타낼 때, 실패할 경우는 고장이 발생하고 자동재폐로 동작 후 고장이 제거되지 못해 가압단 차단기가 완전 재개방되는 시간을 말하며, 대부분 약 650㎳이내에 완료 되었고, 크레인 고장(14건)은 전부 실패하였다. 자동재폐로 성공의 경우는 고장이 발생하고 자동재폐로 동작 후 수전단 차단기가 최종 투입되어 부하전류가 다시 흐르는 시간을 말하며, 대부분 약 900㎳이내에 완료가 되었다.

고장원인	case	동작설비	분석데이터	① 보호계전기 동작시간(㎳)	② 고장제거 시간(㎳)	③ 총 재폐로 시간(㎳)	자동재폐로 성공여부
크레인 (14건)	1	HA	가압단	21	60	653	실패
	2	HB	가압단	14	64	551	실패
	3	HC	수전단	37	70	577	실패
	4	HD	가압단	14	50	521	실패
	5	HE	가압단	21	58	509	실패
	6	HF	가압단	9	58	501	실패
	7	HG	가압단	16	67	542	실패
	8	HI	가압단	13	50	450	실패
	9	HJ	가압단	20	58	608	실패
	10	HK	가압단	9	49	532	실패
	11	HL	가압단	19	56	474	실패
	12	HM	가압단	14	67	606	실패
	13	HN	가압단	6	52	476	실패
	14	HO	가압단	18	58	541	실패
낙뢰 (25건)	1	IA	수전단	9	73	847	성공
	2	IB	수전단	18	63	680	성공
	3	IC	수전단	19	66	869	성공
	4	ID	수전단	9	64	722	성공
	5	IE	수전단	15	60	777	성공
	6	IF	수전단	14	55	786	성공
	7	IG	수전단	22	67	750	성공
	8	IH	수전단	9	74	766	성공
	9	IJ	수전단	8	52	840	성공
	10	IK	수전단	13	61	808	성공
	11	IL	수전단	21	67	801	성공
	12	IM	수전단	11	51	791	성공
	13	IN	수전단	20	48	789	성공
	14	IO	수전단	10	57	748	성공
	15	IP	수전단	8	59	787	성공
	16	IQ	수전단	16	77	733	성공
	17	IR	수전단	18	60	846	성공
	18	IS	수전단	11	61	806	성공
	19	IT	수전단	9	53	852	성공
	20	IU	수전단	23	59	745	성공
	21	IV	수전단	20	67	800	성공
	22	IW	수전단	27	76	749	성공
	23	IX	수전단	27	69	701	성공
	24	IY	수전단	8	47	803	성공
	25	IZ	수전단	14	61	759	성공
조류 배설물 (6건)	1	JA	수전단	13	53	782	성공
	2	JB	수전단	9	48	807	성공
	3	JC	수전단	8	64	881	성공
	4	JD	수전단	6	52	756	성공
	5	JE	수전단	16	57	813	성공
	6	JF	수전단	15	59	856	성공
강풍 (5건)	1	KA	수전단	14	61	759	성공
	2	KB	수전단	16	71	726	성공
	3	KC	수전단	19	60	695	성공
	4	KD	수전단	11	59	801	성공
	5	KE	수전단	15	55	832	성공

① 보호계전기 동작시간 : 선로에 고장이 발생한 순간부터 보호계전기 동작시점
② 고장제거 시간 : 선로에 고장이 발생한 순간부터 차단기가 개방되고 아크소호까지 끝난 시간
③ 총 재폐로 시간
- 성공 : 선로에 고장이 발생한 순간부터 자동재폐로가 시행되고 수전단 차단기가 투입되어 부하전류가 흐르는 시간
- 실패 : 선로에 고장이 발생한 순간부터 자동재폐로가 시행되고 가압단 차단기가 완전 재개방되는 시간
※ 동작설비 표기 : HA (H_가압단변전소, A_수전단변전소)

표 3.2.5 자동재폐로 분석결과

제 3 절 가공 송전선로 크레인 접촉사고 자동재폐로 방지를 위한 알고리즘 제안

3장 2절에서 가공 송전선로 주요고장을 분석한 결과 크레인 접촉사고는 모두 1선 지락사고로 고장시의 전압과 전류 크기는 타 고장에 비해 작게 발생하였지만 두드러진 차이점은 없었다. 하지만 전압과 전류 위상차 분석 시 크레인 접촉사고는 특정한 위상차를 가지고 있었으며, 본 연구보고서에서는 현재 전류차동계전기에 적용되어 있는 고저항 지락사고 검출방식에 고장상 전압과 전류 위상차 요소을 추가하는 것이 크레인 접촉사고의 합리적인 검출 방법이라고 제안한다.

단, 2선 단락 고장시와 정상상태의 부하전류 위상차가 크레인 접촉사고시 나타나는 위상차와 유사한 특징을 보였으므로 각 상의 전압크기 및 전류변동률을 조합하여 단락고장 및 정상상태를 구분하고, 가압단에서 일정저항을 연산하여 근단에서 낙뢰고장 발생 시 자동재폐로가 방지되지 않도록 해야 한다.

그림 3.3.1은 이러한 특징들을 고려한 크레인 접촉사고 검출 알고리즘으로, 자단과 상대단에서 각각 영상전류를 연산 또는 측정하여 양단 비교 후 영상차전류(87G)가 발생하면 고장으로 인식하고, 오동작 방지를 위해 FD1(Fault Detection)요소로 지락고장시 발생하는 영상과전압과 영상과전류요소를 적용한다. 87G와 FD1은 기존의 고저항 지락사고를 검출하는 방식이며, 여기에 FD2 요소로 고장상 전압과 전류 위상차, 일정전압 및 일정저항 크기 이상, 상별 전류변동률을 조합하여 크레인 접촉사고를 검출한다.

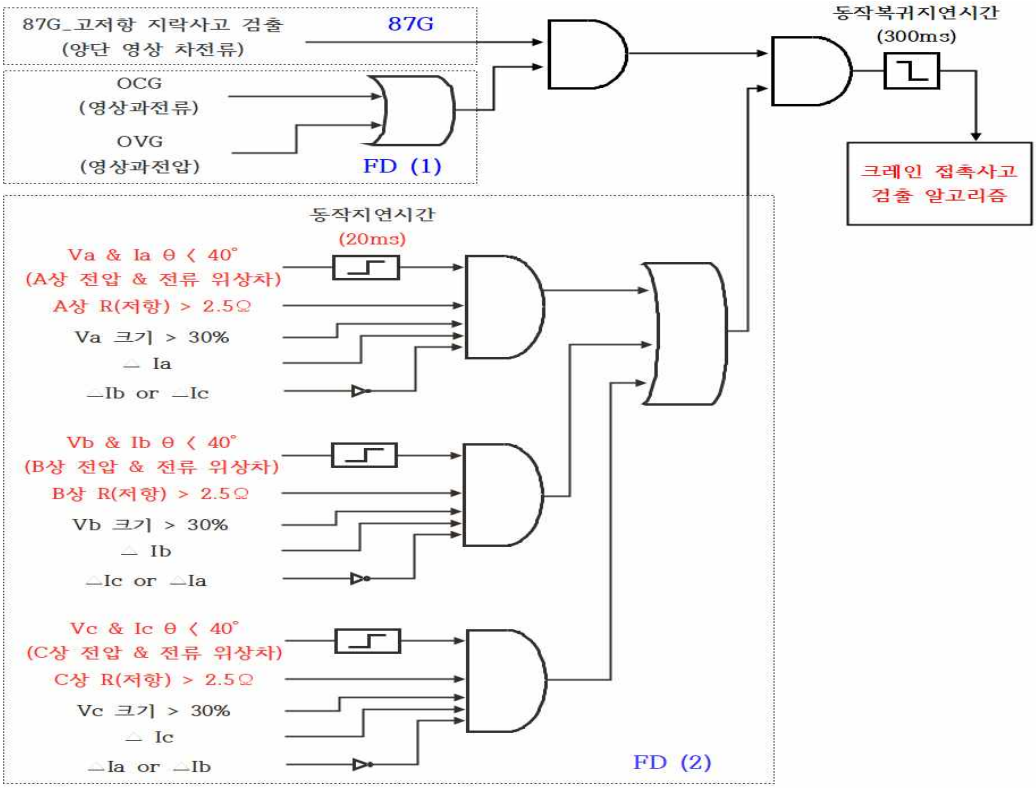
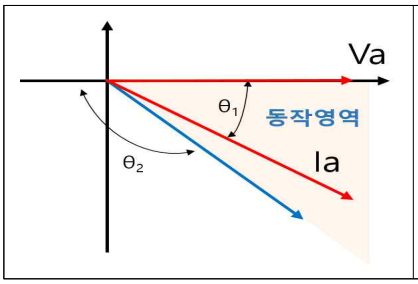


그림 3.3.1 크레인 접촉사고 검출 알고리즘

FD2 요소의 위상차 설정값은 위상차 분석결과를 참고하며, 크레인은 평균적으로 약 -25° , 낙뢰 -66° , 조류 −68° 로 연산되어, 크레인 접촉사고를 안정적으로 검출하기 위해 마진을 두어 최종적으로 -40° 에 설정하고, 고장초기에는 위상차 변동이 심해 오부동작 우려가 있고, 고장이 발생하고 차단기가 최종 개방되는 시간이 약 50㎳ 이상이므로, 최소 20㎳ 이상 설정값 이하 지속 시 동작하도록 한다.

전압과 전류 위상차요소는 크레인 접촉사고 동작판별의 주요소로 사용되며 동작영역 및 계산식은 아래의 그림 3.3.2와 같고 판별요소가 동작하기 위해서는 식(1), (2)가 동시에 만족해야 한다. 만약 A상 지락고장이 발생하여 고장상 전압과 전류 위상차 θ_1이 -35° 로 계측되고 위상

차 설정값인 θ_2가 140° (위상차 -40° 이하)라면, 식(1)에 의해 sin(-35°) = -0.573이 되고, 식(2)에 의해 sin(-35° - 140°) = -0.087이 되어, 두 결과값이 모두 음수로 판별요소는 동작하게 된다. 그림 3.3.3는 보호계전기 위상차 연산 및 동작로직을 나타낸다.



Va : 극성전압, Ia : 고장전류
Θ1 : Va 기준 Ia 위상크기
Θ2 : 위상설정값
※ 동작영역 계산 : (1),(2)식 동시만족
(1) $\sin(\Theta_1) < 0$
(2) $\sin(\Theta_1 - \Theta_2) < 0$

그림 3.3.2 위상차 동작영역 연산식

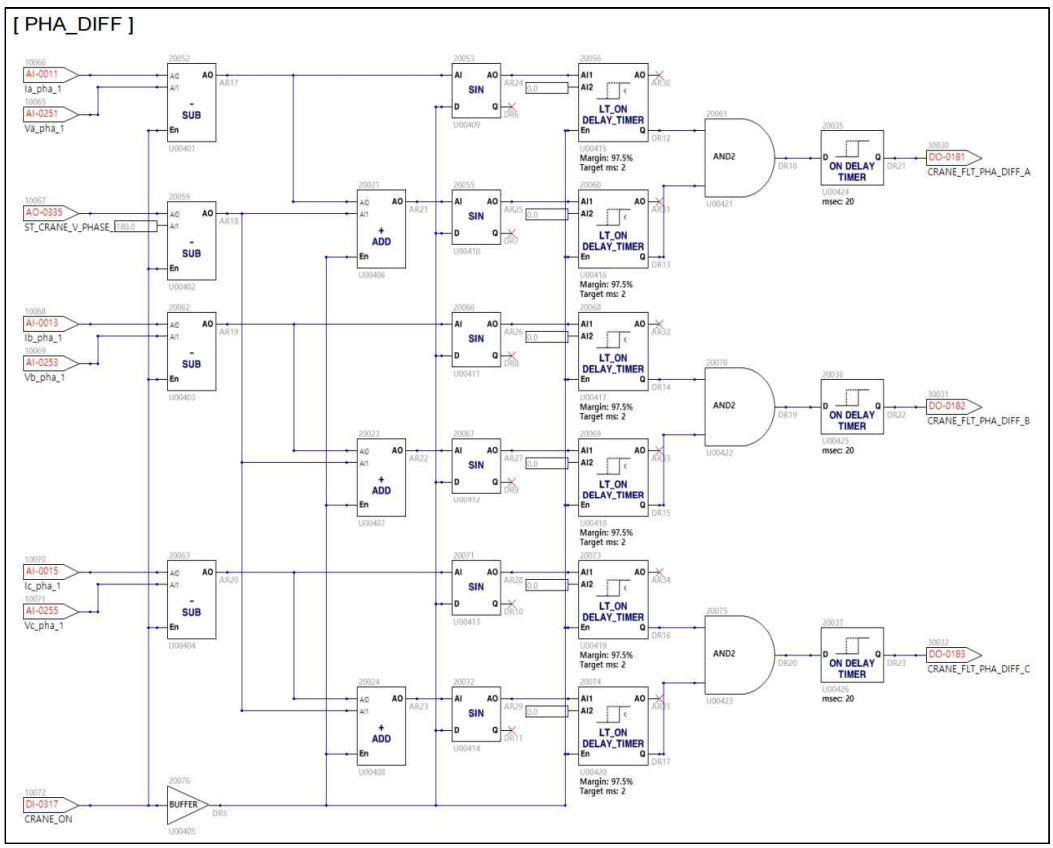


그림 3.3.3 보호계전기 위상차 연산 및 동작로직

계통상황 및 구성에 따라 θ_2 설정값 변경은 가능하며, 위상차를 정확하게 계측하기 위해서는 극성전압이 일정크기 이상 유지하는게 중요하다. 크레인 접촉사고는 고저항으로 전압강하가 작아 근단에서 고장이 발생하더라도 극성전압이 일정수준 이상 유지가 되지만, 낙뢰와 같이 고장저항이 작은 고장이 근단에서 발생하면 고장상 전압이 상실되어 위상차 계측에 오류가 발생할 수 있으므로 일정전압(30% 이상)이 계측되지 않으면 낙뢰에 의한 근단사고로 구분한다. 그림 3.3.4는 보호계전기 일정전압 연산 및 동작로직을 나타낸다.

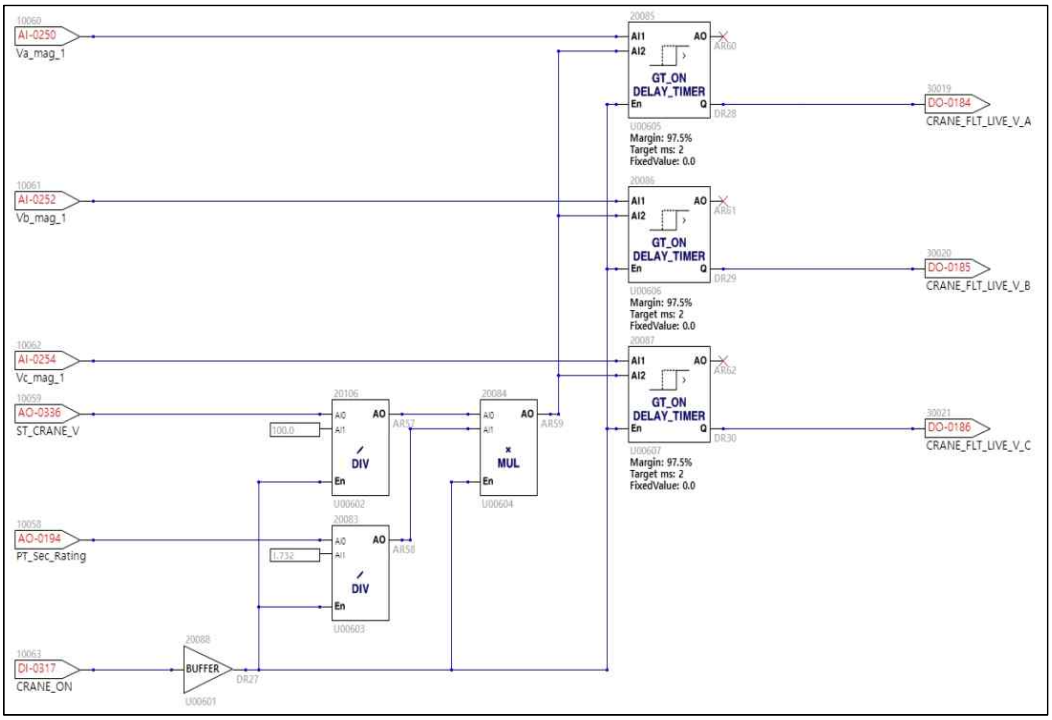
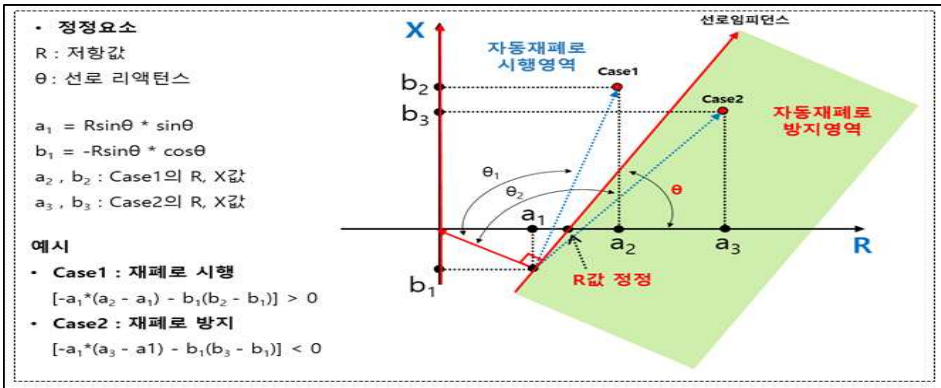


그림 3.3.4 보호계전기 일정전압 연산 및 동작로직

양단데이터를 이용한 송전선로 고장저항 분석 시 크레인은 평균적으로 약 5.9Ω, 낙뢰는 약 0.84Ω으로 연산되었으나, 만약 낙뢰가 근단에서 발생하면 제안된 알고리즘의 위상차 요소에 의해 자동재폐로가 방지 될 수 있으므로 일정저항요소에 마진을 두어 2.5Ω이하는 낙뢰고장으로 판단하

여 자동재폐로를 시행하도록 한다. 단, 보호계전기에서 편단데이터를 이용하여 일정저항요소를 연산한다. 편단데이터를 이용한 일정저항 연산은 근단고장의 경우 비교적 정확한 연산을 하지만 양단계통에서 가압단과 떨어진 고장일수록 수전단에서 공급하는 고장전류에 의해 많은 오차를 발생하고 있다. 하지만 일정저항 요소의 목적은 근단에서 발생한 고장을 검출하기 위한 목적이므로 원거리에서 발생한 오차는 무시할 수 있다.

그림 3.3.3은 편단데이터를 이용한 R, X값 산출 후 일정저항 동작영역과 연산식을 나타내며, 선로 임피던스 데이터를 이용한 선로 리액턴스(θ)와 검출 저항값(R)을 설정하여, 고장시 R, X값을 예시의 연산식에 대입해 0 보다 크면 재폐로 시행, 작으면 재폐로를 방지한다.



◆ 연산예시

1) R(저항값) : 2.5Ω

2) θ(선로 정상분 임피던스 위상각) : $\tan^{-1}(\frac{\%X1}{\%R1}) = \tan^{-1}(\frac{3.045}{0.387}) = 82.7°$

※ 선로 임피던스 $Z_1 = R_1 + jX_1 = 0.387 + j3.045$

$a_1 = 2.5\sin(82.7°) \times \sin(82.7°) = 2.46\Omega$
$b_1 = -2.5\sin(82.7°) \times \cos(82.7°) = -0.31\Omega$

• $Case1$

$a_2 = 2\Omega,\ b_2 = 5\Omega$ 일때,

$[-2.46 \times (2-2.46) + 0.31(5+0.31)] = 1.82 > 0$ 므로 재폐로 시행

• $Case2$

$a_3 = 5\Omega,\ b_3 = 2\Omega$ 일때,

$[-2.46 \times (5-2.46) + 0.31(2+0.31)] = -5.53 > 0$ 므로 재폐로 방지

그림 3.3.5 지락고장시 일정저항 동작영역 및 연산식

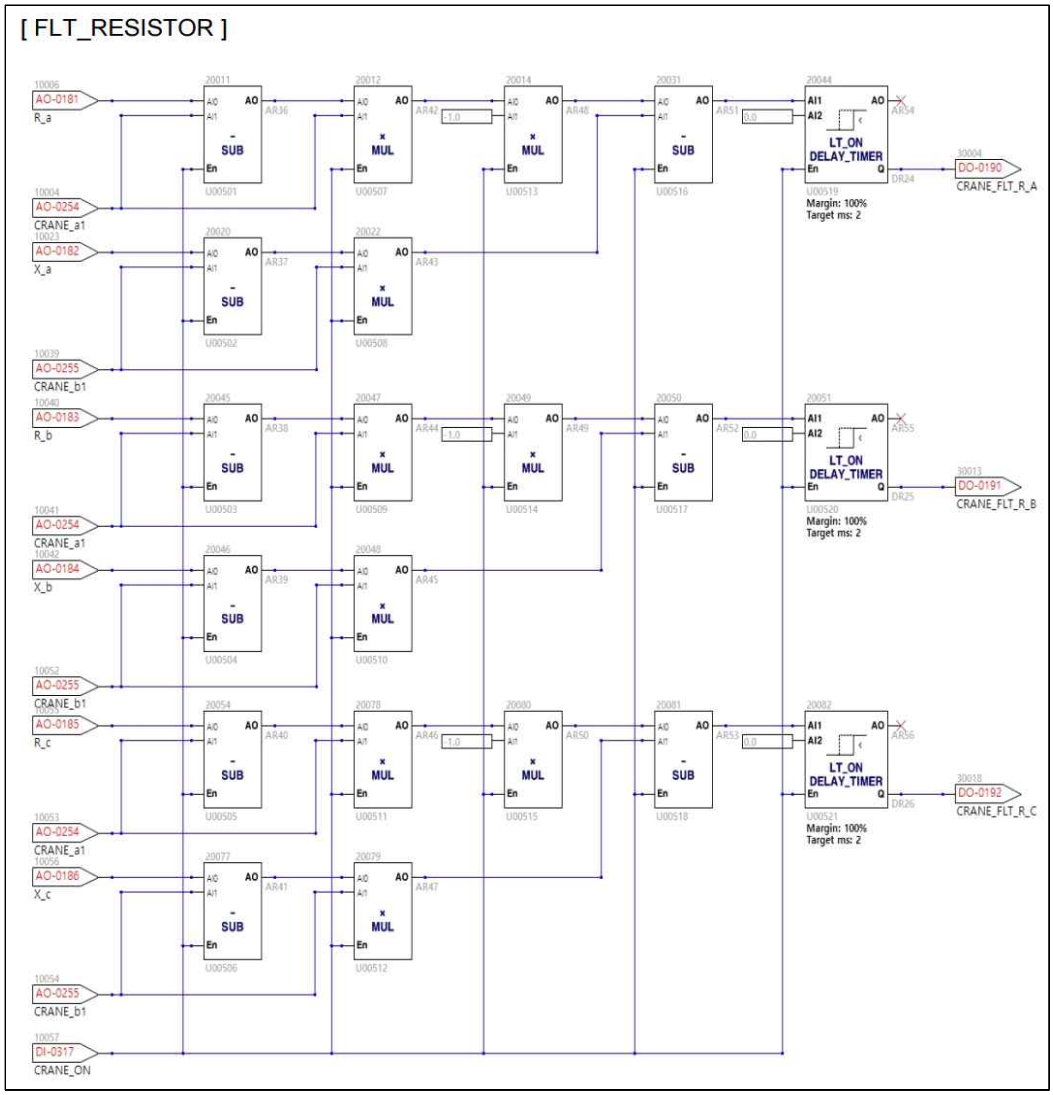


그림 3.3.6 보호계전기 일정저항 연산 및 동작로직

또한 지락고장과 단락고장을 구분할 수 있도록 상별 전류변화율을 추가하여, 두상 이상이 동시에 변화가 있을 경우에는 단락고장으로 구분하여 알고리즘을 부동작시키며, 정상과 고장상태를 구분하기 위해 고장상에 전류변화율을 적용하여 전류변화율이 발생한 상에서만 전압과 전류 위상차를 연산하도록 한다. 그림 3.3.7는 보호계전기 전류변화율 연산 및 동작로직을 나타낸다.

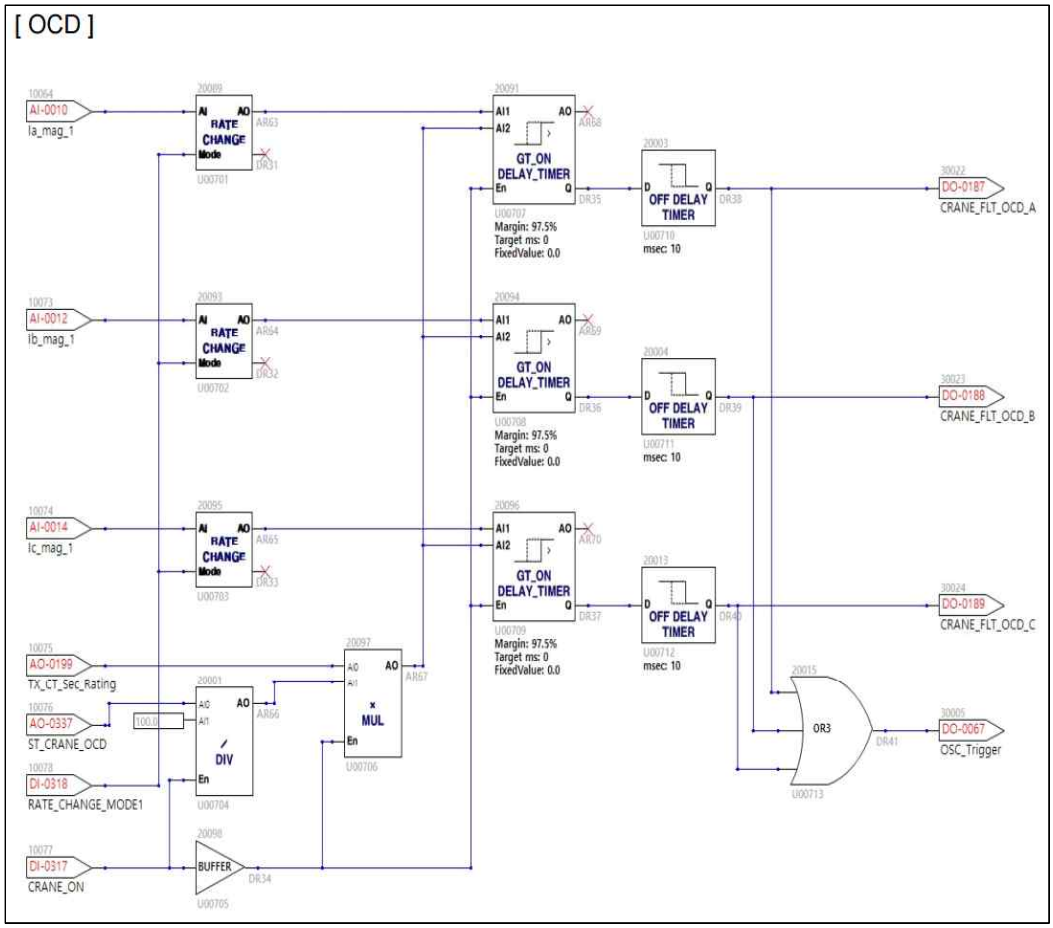


그림 3.3.7 보호계전기 전류변화율 연산 및 동작로직

그림 3.3.8는 제안된 크레인 접촉사고 검출 알고리즘이 적용된 자동재폐로 동작로직으로 재폐로 가압단에 로직이 적용되며, 크레인 접촉사고 검출시 보호계전기 Final Trip을 발생하여 자동재폐로를 방지한다. 이는 보호계전기 Trip 회로와는 무관하게 알고리즘을 적용한 것으로, 주보호 전류차동계전기의 전류차동요소 설정값과 고저항 지락사고 검출 동작시간을 변경할 필요없이 크레인 접촉사고시 자동재폐로 동작로직 수행을 방지할 수 있다.

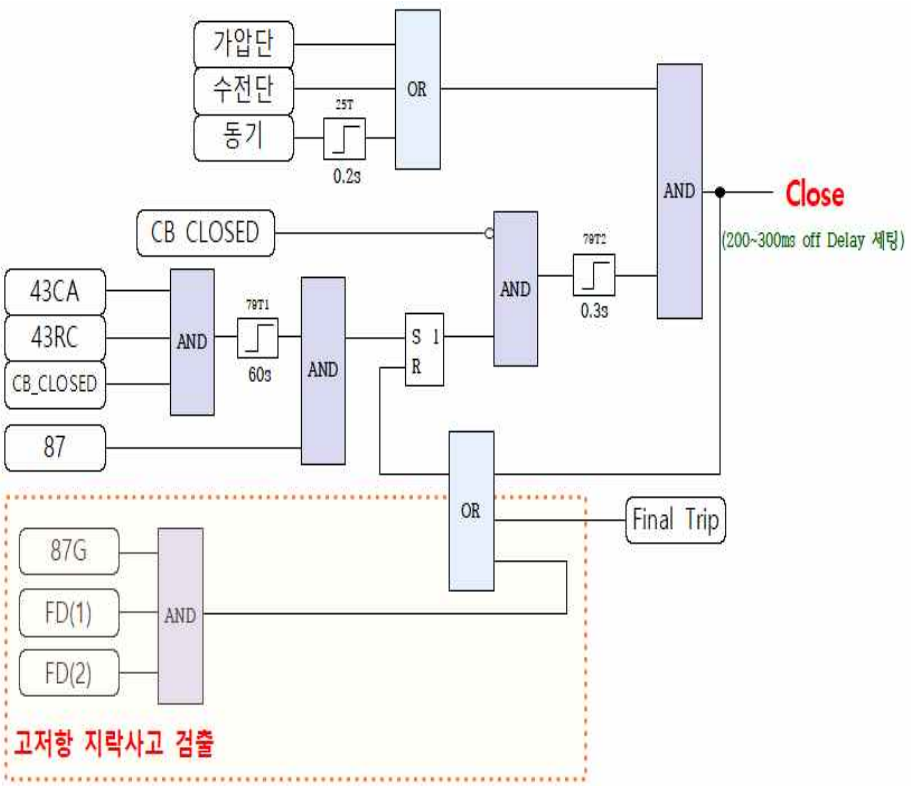


그림 3.3.8 크레인 접촉사고 검출 알고리즘이 적용된 자동재폐로 동작로직

제 4 장 사례연구

제 1 절 EMTP 계통모델링 및 고장모의

제안한 크레인 접촉사고 검출 알고리즘의 설정값에서 송전선로 고장위치에 따라 크레인 접촉사고를 검출할 수 있는 고장저항이 어떠한 값을 갖는지 확인하기 위해 EMTP-ATP Draw를 활용하여 154kV 송전선로 계통을 모델링하였고, 고장위치에 따라 고장저항을 변경하여 다양하게 모의 한 후 고장파형를 생성하였다. 그리고 생성 된 고장파형을 보호계전기 시험장비(Doble-6150) TransWin 기능을 활용하여 제안한 크레인 접촉사고 검출 알고리즘이 적용된 보호계전기에 재생하였고, 그 결과를 확인하였다.

1. EMTP 계통모델링

항 목	데이터(%Z @ 100MVA Base)			비 고
전 원 단	Source 1	R1+jX1	0.473 + j 3.851	
		R0+jX0	1.682 + j 8.477	
	Source 2	R1+jX1	0.156 + j 1.850	
		R0+jX0	0.737 + j 3.904	
송전선로	#1, #2 T/L	R1+jX1	0.387 + j 3.045	CT : 2000/5A PT : $\frac{154kV}{\sqrt{3}}/\frac{110V}{\sqrt{3}}$
		R0+jX0	2.123 + j 9.139	
		선종/긍장	A410B / 21.912km	

표 4.1.1 가공 송전선로 모델링을 위한 전원 및 선로 임피던스

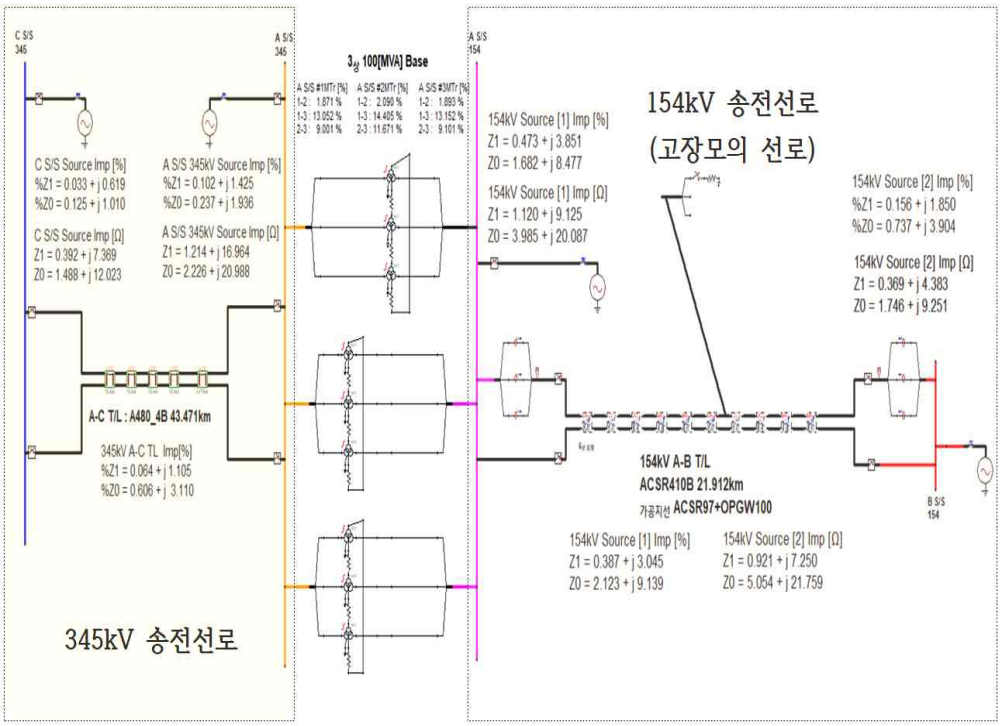


그림 4.1.1 EMTP-ATP draw 가공 송전선로 모델링

표 4.1.1과 그림 4.1.1은 EMTP ATP-draw 가공 송전선로 모델링으로 광주전남지역 345kV변전소내 154kV 송전선로를 모의하였으며, 송전선로는 EMTP LCC(Line/Cable Date)를 사용하여 송전선로 상수, 연가, 복도체 사용여부, Model Type, 송전선로 기본데이터 등 전반적인 사항을 입력하였다. 전원임피던스(Source Impedence)는 PSS/E(Power System Simulator for Engineering)를 이용하여 정상분과 영상분 %임피던스를 구하고 Ω으로 환산하여 모델링에 입력하였다.

표 4.1.2는 송전선로 선종별 기본데이터를 나타내며, 그림 4.1.2는 EMTP 송전선로 세부모델링 데이터 입력값을 보여준다.

선 종	연선구성 소선수/소선경(mm)		계산단면적 (㎟)			외경 (㎜)		계산 중량 (kg/m)	계산 전기저항 (Ω/㎞)
	Al	St	Al	St	계	Al	St		
A330	26/4.0	7/3.1	326.8	52.84	379.64	25.3	9.3	1.320	0.08880
TACSR 330	내열시 Al26/4.0	강선 7/3.1	326.8	52.84	379.64	25.3	9.3	1.320	0.09040
STACIR 330	초내열시 26/4.0	Invar 7/3.1 Al피복	326.8	52.84	379.64	25.3	9.3	1.330	0.09040
STACIR/ AW330	초내열시 26/4.0	Invar 7/3.1	326.8	52.84	379.64	25.3	9.3	1.285	0.08690
A410	26/4.5	7/3.5	413.4	67.35	480.75	28.5	10.5	1.673	0.07020
TACSR 410	내열시 26/4.5	강선 7/3.5	413.4	67.35	480.75	28.5	10.5	1.673	0.07140
STACIR 410	초내열시 26/4.5	Invar 7/3.5 Al피복	413.4	67.35	480.75	28.5	10.5	1.687	0.06860
STACIR/ AW410	초내열시 26/4.5	Invar 7/3.5	413.4	67.35	480.75	28.5	10.0	1.625	0.05994

표 4.1.2 송전선로 선종별 기본데이터

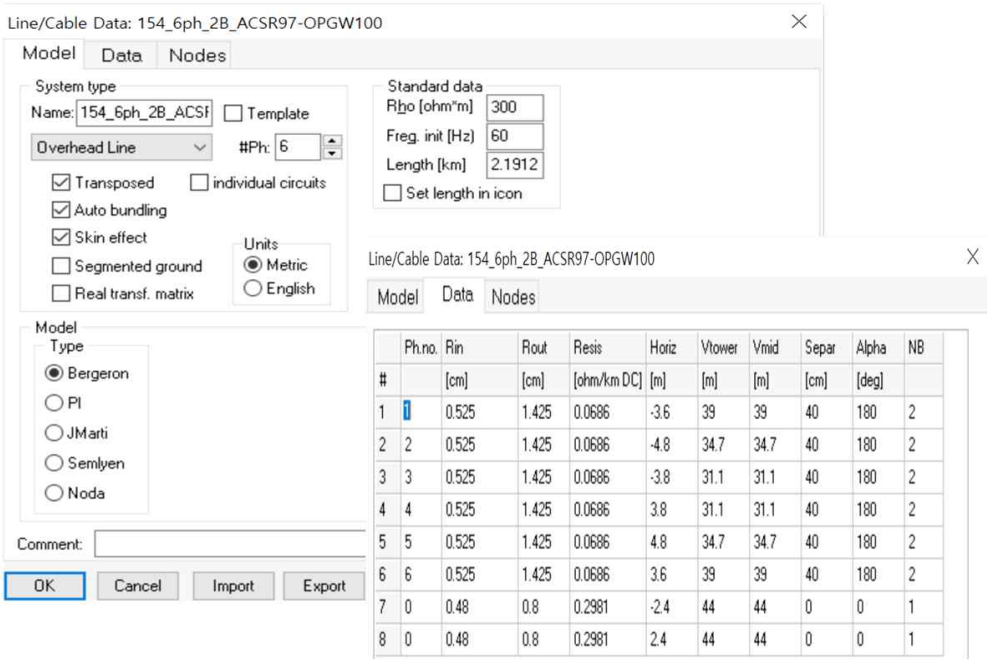


그림 4.1.2 EMTP 송전선로 모델링 데이터 입력값

EMTP 모델링 검증방법은 모의선로에서 발생한 실계통 고장파형과 PSS/E로 모의 한 고장, EMTP로 모의한 고장의 결과값(고장전압 및 고장전류 크기)을 서로 비교하였고, 그 결과 표 4.1.3과 같이 실계통 고장파형 기준 EMTP 모델링의 결과값은 오차가 0.4% 이내로 확인되었다.

1. 고장원인 및 고장상 : 낙뢰, C상 지락 2. 송전선로 긍장 : ACSR 410㎟ x 2B, 21.89㎞ 3. 실제 고장거리 및 고장저항 : 가압단에서 13.41㎞(61.2%), 0.2Ω 4. 오차율 : 실고장파형 기준				
구분	고장전압		고장전류	
	측정치	오차율	측정치	오차율
실고장파형	60.09㎸	-	7.696A	-
PSS/E	62.34㎸	+3.74%	7,978A	+3.66%
EMTP	59.90㎸	-0.31%	7,666A	-0.38%

표 4.1.3 EMTP 송전선로 모델링 검증결과

2. 고장모의 결과분석

표 4.1.4는 보호계전기 검출요소 및 D/O(Digital Output) 설정으로 전압과 전류 위상차 검출요소 설정값이 -40° 이하, 일정저항 2.5Ω이상일 때, 고장위치에 따라 크레인 접촉사고를 검출할 수 있는 고장저항의 값을 확인하였다.

구분	검출요소 설정	보호계전기 D/O	비 고
1	Va & Ia θ < -40°	CRANE_FLT_PHA_DIF_A	전압 & 전류 위상차
2	Vb & Ib θ < -40°	CRANE_FLT_PHA_DIF_B	
3	Vc & Ic θ < -40°	CRANE_FLT_PHA_DIF_C	
4-1,2,3	A,B,C상 R(저항) > 2.5Ω	CRANE_FLT_R_A/B/C	일정저항
5-1,2,3	Va, Vb, Vc 크기 > 30%	CRANE_FLT_LIVE_V_A/B/C	일정전압
6-1,2,3	△Ia, △Ib, △Ic	CRANE_FLT_OCD_A/B/C	전류변동률
7	1, 4-1, 5-1, 6-1 동시동작	CRANE_FLT_OP	크레인 접촉사고 검출
※ 선로 리액턴스 : 82.7° [$\tan^{-1}(\frac{3.045}{0.387}) = 82.7°$] (선로 정상분임피던스 Z_1 = 0.387 + J3.045)			

표 4.1.4 보호계전기 검출요소 및 D/O 설정

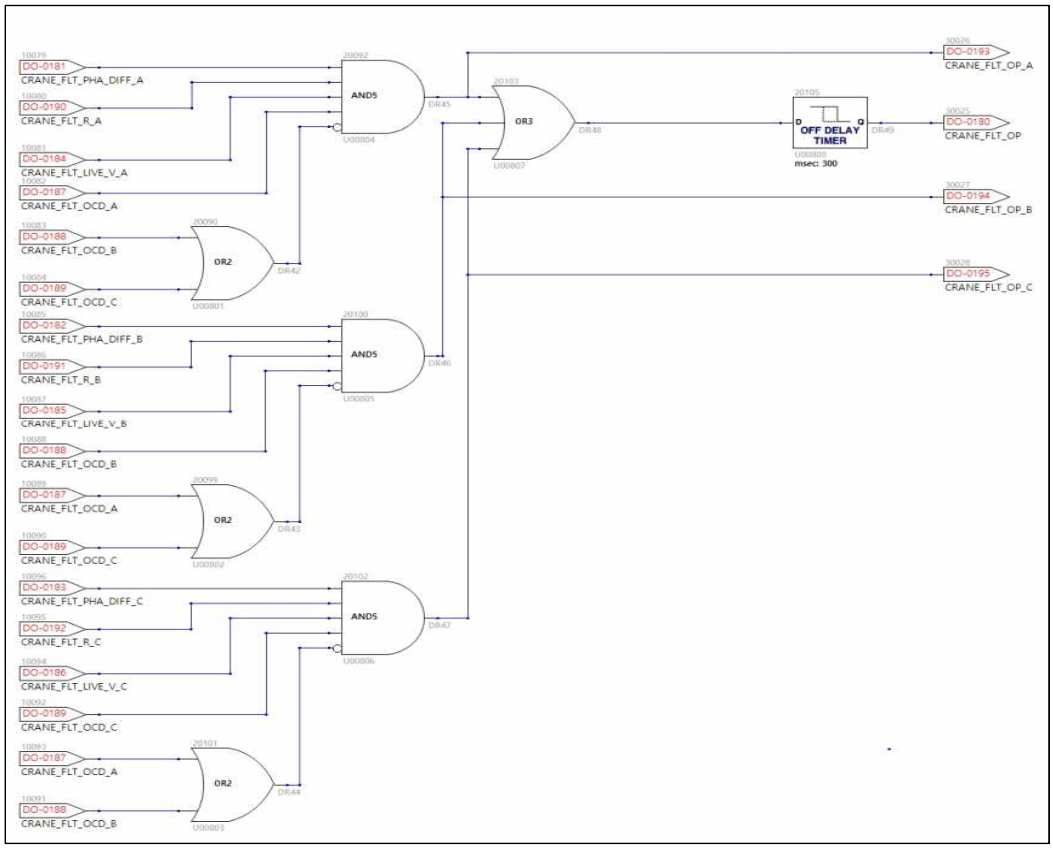


그림 4.1.3 보호계전기 크레인 접촉사고 검출 알고리즘

검출결과는 위 그림 4.1.3의 크레인 접촉사고 검출 알고리즘의 보호계전기 D/O(Digital Output) 동작여부 확인을 통해 가능하며, 보호계전기 고장파형을 K-ComViewer(고장파형 뷰어)로 실행하면 D/O 확인이 가능하다. D/O에는 각각의 검출요소가 지정되어 있으며, 위상차 검출요소, 저항 검출요소, 전압 검출요소, 고장상 전류변동률이 동시에 발생하면 크레인 접촉사고가 검출된다.

가. Case2 (FA10_고장위치 10%, 시험저항 1.1Ω) 분석결과

그림 4.1.4는 송전선로 10% 지점에 고장저항 1.1Ω의 A상 지락고장이 발생하였을 때 크레인 접촉사고 검출 알고리즘 동작여부를 분석한 결과를 보여준다. 분석결과 A상 지락고장시 전압요소는 정상상태 대비 40% (37.4kV)로 설정값 30% 이상을 만족하였고, 위상차도 -37.8° 로 설정값 -40° 이하를 만족하였다. 하지만 일정저항이 0.92Ω으로 설정값 이하로 연산되어, 저항요소에 의해 크레인 접촉사고 검출 알고리즘은 정부동작하였다.

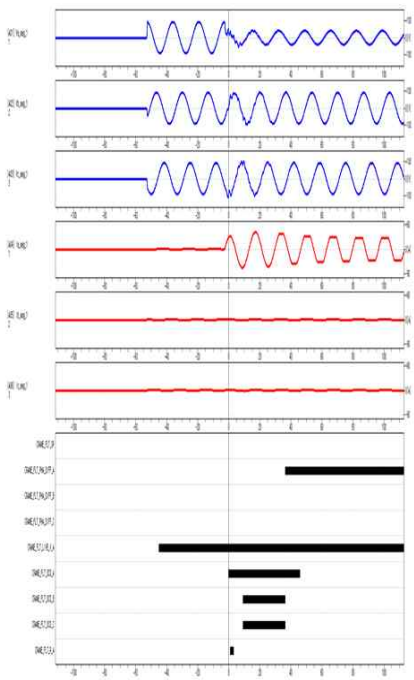
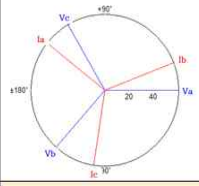
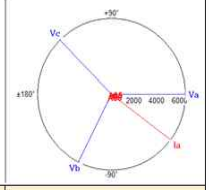
Case2				
※ 154kV 전력계통(1차값), Reference : Va, 고장발생 후 2cycle				
※ 고장위치 : 10% 지점, 시험저항 : 1.1Ω				
고장파형 분석결과				보호계전기 고장파형
구분		고장 전	고장 후	
전압	Va	92.6kV ∠ 0°	37.4kV ∠ 0°	
	Vb	92.7kV ∠ -119.1°	91.9kV ∠ -88.9°	
	Vc	92.6kV ∠ 119.9°	92.0kV ∠ 149.7°	
전류	Ia	0.09kA ∠ 142.1°	18.9kA ∠ -37.8°	
	Ib	0.09kA ∠ 22.2°	0.72kA ∠ -37.7°	
	Ic	0.09kA∠ -97.9°	0.80kA∠ -42.9°	
벡터도				
보호계전기 연산 임피던스		R (저항)	X (리액턴스)	
		0.92	0.72	
검출결과		검출요소	결과	
		-40° < Va & Ia θ < 0°	동작	
		A,B,C상 R(저항) > 2.5Ω	A상 부동작	
		Va, Vb, Vc 크기 > 30%	Va, Vb, Vc 동작	
		⌒Ia, ⌒Ib, ⌒Ic	⌒Ia 동작	
		크레인 접촉사고 검출	부동작	
		※ 부동작 사유 : 위상차 부동작, 저항요소 2.5Ω이하		

그림 4.1.4 Case2 (FA10_고장위치 10%, 시험저항 1.1Ω) 분석결과

나. Case13 (FA40_고장위치 40%, 시험저항 2.0Ω) 분석결과

그림 4.1.5는 송전선로 40% 지점에 고장저항 2.0Ω의 A상 지락고장이 발생하였을 때 크레인 접촉사고 검출 알고리즘 동작여부 분석결과로 전압요소는 정상상태 대비 67.0%로 설정값 30%이상을 만족하였고, 일정저항도 2.52Ω으로 설정값 이상 연산되어 조건을 만족하였으나 위상차가 -50.7° 로 설정값 -40° 이하를 만족하지 못해, 크레인 접촉사고 검출 알고리즘은 정부동작하였다.

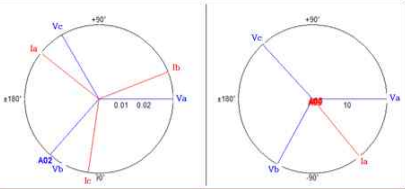
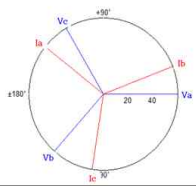
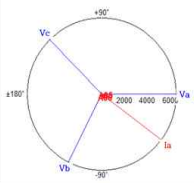
Case13			
※ 154kV 전력계통(1차값), Reference : Va, 고장발생 후 2cycle			
※ 고장위치 : 40% 지점, 시험저항 : 2.0Ω			
고장파형 분석결과			보호계전기 고장파형
구분		고장 전	고장 후
전압	Va	92.6kV ∠ 0°	62.1kV ∠ 0°
	Vb	92.7kV ∠ -119.2°	91.9kV ∠ -118.4°
	Vc	92.6kV ∠ 119.9°	92.5kV ∠ 132.6°
전류	Ia	0.09kA ∠ 142.1°	9.3kA ∠ -50.7°
	Ib	0.09kA ∠ 22.2°	0.3kA ∠ -39.5°
	Ic	0.09kA∠ -97.9°	0.4kA∠ -60.6°
벡터도			
보호계전기 연산 임피던스		R (저항)	X (리액턴스)
		2.52	3.00
검출결과		검출요소	결과
		-40° < Va & Ia θ < 0°	부동작
		A,B,C상 R(저항) > 2.5Ω	A상 동작
		Va, Vb, Vc 크기 > 30%	Va, Vb, Vc 동작
		⌐Ia, ⌐Ib, ⌐Ic	⌐Ia 동작
		크레인 접촉사고 검출	부동작
		※ 부동작 사유 : 위상차 부동작	

그림 4.1.5 Case13 (FA40_고장위치 40%, 시험저항 2.0Ω) 분석결과

다. Case16 (FA40_고장위치 40%, 시험저항 3.6Ω) 분석결과

그림 4.1.6은 송전선로 40% 지점에 고장저항 3.6Ω의 A상 지락고장이 발생하였을 때 크레인 접촉사고 검출 알고리즘 동작여부 분석결과로 전압요소는 정상상태 대비 75.5%로 설정값 30% 이상을 만족하였고, 위상차도 -36.9° 로 설정값 -40° 이하를 만족하였다. 저항요소는 4.10Ω으로 연산되어 설정값 2.5Ω 이상을 만족, 크레인 접촉사고 검출 알고리즘은 정동작하였다.

Case16			
※ 154kV 전력계통(1차값), Reference : Va, 고장발생 후 2cycle			
※ 고장위치 : 40% 지점, 시험저항 : 3.6Ω			
고장파형 분석결과			보호계전기 고장파형
구분		고장 전	고장 후
전압	Va	92.6kV ∠ 0°	70.0kV ∠ 0°
	Vb	92.7kV ∠ -119.9°	92.2kV ∠ -116.8°
	Vc	92.6kV ∠ 119.9°	92.4kV ∠ 134.4°
전류	Ia	0.09kA ∠ 142.1°	8.0kA ∠ -36.9°
	Ib	0.09kA ∠ 22.2°	0.3kA ∠ -24.3°
	Ic	0.09kA∠ -97.9°	0.4kA∠ -49.7°
벡터도			
보호계전기 연산 임피던스		R (저항)	X (리액턴스)
		4.10	2.97
검출결과		검출요소	결과
		-40° < Va & Ia θ < 0°	동작
		A,B,C상 R(저항) < 2.5Ω	부동작
		Va, Vb, Vc 크기 > 30%	Va, Vb, Vc 동작
		△Ia, △Ib, △Ic	△Ia 동작
		크레인 접촉사고 검출	동작

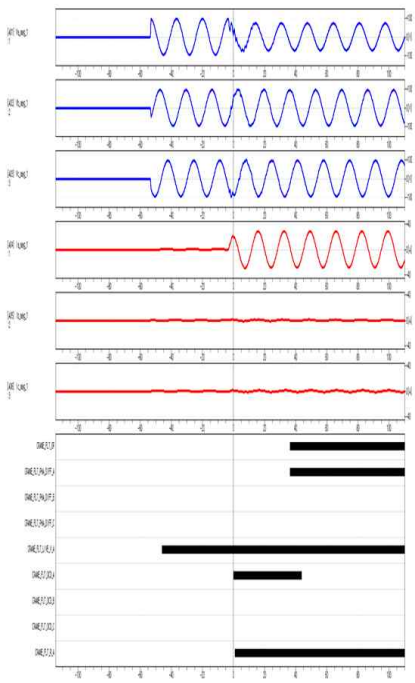


그림 4.1.6 Case16 (FA40_고장위치 40%, 시험저항 3.6Ω) 분석결과

라. 송전선로 고장모의 시험결과 종합분석

※ 검출 알고리즘 설정
- 전압 전류 위상차 및 동작지연시간 : 40°, 20ms
- 저항 크기 : 2.5Ω, 선로 리액턴스 : 82.7°, 상전압 : 30%
- 전류변화율 : 0.75A, 변화율 유지시간: 10ms

Test No.	고장지점 [%]	시험저항 [Ω]	고장상 전압 & 전류 위상차	보호계전기 측정 임피던스 [Ω]		크레인 접촉사고 검출결과
				R	X	
C1	FA10	0.1	-74.8	0.20	0.74	미검출
C2		1.1	-37.8	0.92	0.72	미검출
C3		3.3	-16.1	2.57	0.71	검출
C4		3.4	-15.6	2.62	0.73	검출
C5	FA20	1.3	-48.3	1.28	1.44	미검출
C6		1.7	-42.0	1.60	1.45	미검출
C7		2.9	-29.5	2.55	1.47	검출
C8		3.2	-27.4	2.81	1.45	검출
C9	FA30	1.0	-59.9	1.24	2.16	미검출
C10		2.3	-42.2	2.42	2.18	미검출
C11		2.6	-39.3	2.71	2.20	검출
C12		3.1	-35.1	3.13	2.18	검출
C13	FA40	2.0	-49.7	2.52	3.00	미검출
C14		2.5	-44.6	3.00	2.97	미검출
C15		3.1	-39.5	3.60	2.99	검출
C16		3.6	-35.9	4.10	2.97	검출
C17	FA50	2.8	-44.5	3.81	3.74	미검출
C18		3.3	-40.6	4.38	3.75	미검출
C19		3.5	-39.2	4.60	3.75	검출
C20		4.0	-36.0	4.18	3.75	검출
C21	FA60	2.9	-44.9	4.54	4.60	미검출
C22		3.4	-41.1	5.19	4.61	미검출
C23		3.6	-39.7	5.34	4.66	검출
C24		4.3	-35.4	6.40	4.63	검출
C25	FA70	3.0	-44.1	5.60	5.49	미검출
C26		3.5	-40.4	6.43	5.49	미검출
C27		3.6	-39.7	6.53	5.43	검출
C28		4.3	-35.5	7.68	5.46	검출
C29	FA80	2.8	-44.6	6.50	6.40	미검출
C30		3.2	-41.4	7.27	6.41	미검출
C31		3.5	-39.3	7.84	6.42	검출
C32		4.0	-36.1	8.82	6.40	검출
C33	FA90	2.5	-44.7	7.53	7.56	미검출
C34		3.0	-40.6	8.76	7.57	검출
C35		3.4	-37.6	9.77	7.55	검출
C36		4.0	-33.7	11.28	7.55	검출

표 4.1.5 송전선로 고장모의 시험결과

표 4.1.5에서 보여주듯 송전선로 지락고장시 같은 고장저항 일지라도 고장위치에 따라 선로 임피던스에 의해 가압단 인근에서의 고장은 전압과 전류의 위상차가 작게 발생(고장저항 3.4Ω : FA10 -15.6°, FA90 -37.6°) 하였으며, 보호계전기 측정임피던스는 양단 전원 특성상 수전단에서의 고장전류 유입이 커질수록 가압단 전압이 높아져 고장위치 30% 지점부터는 보호계전기에서 측정하는 임피던스가 실제 임피던스보다 커지게 되었다.

크레인 접촉사고와 타고장을 구분하는 결정적인 요소는 고장상 전압 & 전류 위상차(−40° 이하)와 보호계전기 일정저항요소(2.5Ω)였으며, Csae2 고장위치 10% 지점에서 시험저항 1.1Ω으로 고장을 모의하면 위상차(−37.8°) 조건은 만족하지만 일정저항(0.92Ω) 조건이 만족하지 못해 가압단 인근에 고장저항과 선로저항의 합이 2.5Ω 이하로 발생한 고장은 크레인 접촉사고로 보지 않는다는 조건에 만족한다.

Case13 고장위치 40%지점에서 시험저항 2.0Ω으로 고장을 모의하면, 일정저항은 선로저항과 수전단에서 유입되는 고장전류에 의해 2.52Ω으로 연산되어 조건에 만족하지만, 위상차가 -49.7° 로 만족하지 못해, 크레인 접촉사고로 검출되지 않았으며, 같은 고장위치(Case16)에서 시험저항을 3.6Ω으로 모의하면, 일정저항이 4.1Ω, 위상차 -35.9° 로 크레인 접촉사고로 검출된다. 그 외 고장위치 60% 지점은 시험저항 3.6Ω, 70% 3.6Ω, 80% 3.5Ω, 90% 3.4Ω부터 크레인 접촉사고가 검출되어, 이번 계통모델링 된 선로에서 위상차 설정값 -40°, 일정저항 2.5Ω 이하에서는 고장위치에 따라 차이는 있지만 대부분 시험저항 3.6Ω이상부터 크레인 접촉사고로 검출되었다.

크레인 접촉사고 검출영역을 확대하고 싶다면 제안한 설정값보다 위상차 설정값은 크게 하고 일정저항 설정값은 작게 하면 되지만, 비교적 큰

고장저항을 동반한 낙뢰고장이 인근단에서 발생 할 경우 자동재폐로가 시행되지 않을 수 있으므로 선로구성조건과 전력계통 운영방안을 고려하여 설정값을 결정하면 된다.

표 4.1.6은 같은 고장위치(%)와 시험저항은 같게 하고 선로긍장만 바꾸어 위상차를 분석한 결과를 보여주며, 같은 시험저항 모의 시 긍장이 짧은 선로에서 위상차는 작게 나타났다.

※ 양단계통, 송전선로 구성 : 2회선, ACSR410B, 고장상 : A상 지락						
고장지점 [%]	시험저항 [Ω]	고장상 전압 & 전류 위상차(°)				
		10km	15km	21km	30km	40km
FA10	0.1	-68.6	-72.0	-74.8	-76.1	-77.3
	1.1	-20.8	-28.8	-37.8	-45.5	-52.3
	3.3	-8.1	-11.5	-16.1	-21.0	-26.7
	3.4	-7.9	-11.2	-15.6	-20.5	-26.0
FA30	1.0	-43.3	-52.6	-59.9	-64.8	-68.4
	2.3	-24.7	-33.3	-42.2	-49.5	-55.5
	2.6	-22.4	-30.6	-39.3	-46.6	-52.9
	3.1	-19.5	-26.8	-35.1	-42.4	-49.0
FA50	2.8	-27.6	-36.1	-44.5	-51.1	-56.4
	3.3	-24.3	-32.3	-40.6	-47.4	-53.0
	3.5	-23.2	-31.0	-39.2	-46.0	-51.8
	4.0	-20.9	-28.1	-36.0	-42.8	-48.7
FA70	3.0	-28.7	-36.6	-44.1	-50.0	-54.6
	3.5	-25.6	-33.0	-40.4	-46.4	-51.2
	3.6	-25.1	-32.4	-39.7	-45.7	-50.6
	4.3	-21.9	-28.5	-35.5	-41.3	-46.3
FA90	2.5	-32.1	-39.0	-44.7	-49.3	-52.2
	3.0	-28.2	-34.8	-40.6	-45.0	-47.9
	3.4	-25.8	-32.0	-37.6	-41.9	-44.8
	4.0	-22.9	-28.4	-33.7	-37.7	-40.5

표 4.1.6 송전선로 긍장에 따른 고장모의 시험결과

제 2 절 송전선로 주요 고장 알고리즘 적용결과

주요 고장사례 50건에 대해서도 제안한 알고리즘을 통해 크레인접촉사고 검출이 가능한지 확인하였으며, 확인방법은 사례연구과 같이 고장파형을 알고리즘이 적용된 보호계전기에 재생한 후 검출요소가 설정된 계전기 D/O 동작을 확인하였다. 알고리즘 설정값은 선종과 긍장에 상관없이 위상차 -40°, 일정저항은 2.5Ω으로 적용하였다.

그 결과 아래의 표 4.2.1에서 보여주듯 낙뢰, 조류배설물, 강풍 고장은 모두 정상적으로 미검출 되었고, 크레인 고장은 14건 중 11건을 검출하였다.

크레인 고장 중 미검출된 3건(Case9, 12, 13)은 모두 위상차 조건을 만족하지 못하였으며 Case9, 12는 고장저항이 각각 1.1Ω, 1.4Ω로 비교적 작게 발생하였고, 고장위치도 선로의 약 40% 지점으로 선로 리액턴스가 커 위상차가 크게 발생하였다. Case13은 고장저항이 2.8Ω으로 낙뢰나 조류 고장보다는 비교적 크게 발생하였지만, 고장위치가 긍장 45㎞ 선로의 최말단(93%)으로 큰 선로 리액턴스에 의해 위상차가 크게 발생하여 크레인 접촉사고로 검출되지 않았다.

※ 검출 알고리즘 설정
- 전압 전류 위상차 및 동작지연시간 : 40°, 20ms
- 저항 크기 : 2.5Ω, 선로 리액턴스 : 84°, 상전압 : 30%
- 전류변화율 : 0.75A, 변화율 유지시간: 10ms

고장 원인	Case	고장상	실고장점 (km)(%)	고장저항 (Ω)	위상차	보호계전기 측정 임피던스 [Ω]		검출결과
						R	X	
크레인 (14건)	1	B	0.5(7.9%)	2.5	-7.599°	3.64	0.77	검출
	2	B	7.8(42%)	14.3	-15.73°	19.57	6.41	검출
	3	B	22.7(70%)	51.0	-9.449°	114.1	17.7	검출
	4	C	0.34(5%)	7.9	-10.70°	28.58	6.72	검출
	5	B	1.62(14.6%)	1.8	-8.382°	4.25	1.46	검출
	6	A	2.83(9.4%)	11.9	-18.7°	75.50	48.99	검출
	7	A	2.5(50%)	1.0	-17.09°	3.10	1.59	검출
	8	B	5.4(25%)	4.3	-22.43°	6.22	4.46	검출
	9	A	10(39%)	1.1	-53.35°	2.73	7.34	미검출
	10	B	13.32(69%)	7.3	-25.68°	19.47	13.20	검출
	11	A	2.6(28%)	3.7	-12.49°	8.09	6.13	검출
	12	A	10.8(43%)	1.4	-63.3°	3.2	7.6	미검출
	13	C	42.41(93%)	2.8	-59.27°	14.98	32.96	미검출
	14	C	18.07(79%)	8.3	-24.43°	24.89	16.69	검출
낙뢰 (25건)	1	BCN	24.7(62%)	-		-	-	미검출
	2	ABN	4.55(39%)	-		-	-	미검출
	3	B	11.0(25%)	0.70	-71.04°	4.98	23.57	미검출
	4	C	7.73(45%)	0.32	-68.75°	0.98	4.60	미검출
	5	C	13.41(61%)	0.33	-71.95°	1.26	8.04	미검출
	6	**C**	**4.90(23%)**	**0.68**	-61.7°	**1.3**	**2.5**	미검출
	7	B	26.2(85%)	0.29	-73.85°	2.48	18.46	미검출
	8	A	2.69(5.7%)	0.55	-59.51°	0.52	1.19	미검출
	9	C	36.95(99%)	1.30	-63.22°	11.81	42.64	미검출
	10	C	32.08(98%)	2.25	-61.19°	14.20	30.09	미검출
	11	B	1.945(11%)	0.74	-50.7°	0.60	1.06	미검출
	12	C	6.219(21%)	0.71	-70.52°	1.56	5.06	미검출
	13	B	13.21(74%)	0.66	-60.2°	3.21	10.42	미검출
	14	A	19.74(42%)	0.77	-69.2°	3.48	15.73	미검출
	15	C	6.587(54%)	0.45	-70.67°	1.32	4.61	미검출
	16	A	8.08(21%)	0.59	-67.9°	1.57	6.11	미검출
	17	B	10.73(29%)	0.48	-75.9°	1.64	8.21	미검출
	18	B	15.9(72%)	0.93	-71.6°	3.49	12.73	미검출
	19	C	2.95(8%)	1.78	-59.9°	1.54	2.66	미검출
	20	A	17.54(93%)	1.08	-69.8°	3.12	12.17	미검출
	21	A	23.4(94%)	0.54	-70.7°	3.95	18.90	미검출
	22	B	1.802(4.6%)	0.31	-55.1°	0.55	1.41	미검출
	23	B	34.44(89%)	0.79	-72.6°	6.96	24.67	미검출
	24	**A**	**12.2(41%)**	**2.62**	-72.8°	**6.8**	**24.5**	미검출
	25	A	23.15(59%)	0.47	-72.8°	2.18	19.78	미검출
조류 배설물 (6건)	1	A	24.7(98%)	0.45	-71.9°	2.54	20.71	미검출
	2	**B**	**20.5(41%)**	**2.73**	-68.8°	**8.7**	**21.6**	미검출
	3	C	11.2(37%)	0.75	-66.75°	2.03	8.61	미검출
	4	**C**	**23.8(72%)**	**0.39**	-78.8°	**2.1**	**14.9**	미검출
	5	A	18.3(64%)	0.57	-59.37°	2.74	11.72	미검출
	6	A	5.28(18%)	0.25	-66.66°	1.56	4.12	미검출
강풍 (5건)	1	ABC	9.084(99%)	-	-	-	-	미검출
	2	AB	26.66(82%)	-	-	-	-	미검출
	3	**AB**	**5.83(50%)**	-	-	-	-	미검출
	4	AB	0.16(0.6%)	-	-	-	-	미검출
	5	AB	4.4(37%)	-	-	-	-	미검출

표 4.2.1 송전선로 주요 고장사례 알고리즘 적용결과

제 5 장 결 론

본 연구보고서에서는 가공 송전선로의 대표적인 고저항 지락사고인 크레인 접촉사고시 자동재폐로를 방지하기 위해 한전에서 적용하고 있는 고저항 지락사고 검출방식의 타당성을 검토하고 좀 더 합리적인 검출방법을 제안하였다. 이를 위해 주요 송전선로 고장데이터 50건을 이용하여 크레인 접촉사고의 특징을 연구하였고, 추출된 특징을 알고리즘으로 만들어 보호계전기에 적용하였으며, EMTP로 모의한 고장파형와 주요 송전선로 고장파형을 알고리즘이 적용된 보호계전기에 재생하여, 검출결과를 확인하였다.

그 결과 기존의 고저항 지락사고 검출 알고리즘에 전압 & 전류 위상차와 일정저항 조건 등을 추가하는 것이 합리적인 것으로 생각되며, 일정저항은 2.5Ω으로 설정하고, 위상차 설정값은 송전선로(긍장, 선종 등) 및 계통구성방식에 따라 차이를 두어야 한다. 154㎸ 가공 송전선로 ACSR410B, 2회선 양단계통의 긍장이 15㎞ 이하 선로는 -35°, 15㎞ ~ 25㎞ 선로는 -40°, 25㎞ 초과 선로는 -45°로 설정하는 것이 안정적으로 크레인 접촉사고를 검출할 수 있을 것으로 생각된다.

위상차 범위를 제시한 값보다 크게 하고 일정저항을 작게 하면 크레인 고장검출에 대한 범위를 더욱 확대할 수 있다. 하지만, 송전선로 고장 중 가장 많이 발생하는 낙뢰고장 시 자칫 자동재폐로를 방지하여 전력계통 안정도에 심각한 우려를 줄 수 있으므로 제안한 설정값이 적합하다고 생각한다.

주요 고장사례 알고리즘 적용 분석결과에서 보듯, 제안한 알고리즘에 의해 크레인 고장 14건 중 3건은 미검출 되었다. 그 중 크레인 Case13

은 고장저항이 2.8Ω이고 고장위치가 말단에서 발생한 고장으로, 만약 고장위치가 가압단과 가까운 곳이었다면 충분히 크레인 접촉사고로 검출이 될 수 있었다. 이렇듯 제안한 검출 알고리즘은 같은 고장저항일지라도 고장위치에 따라 그 결과가 달라질 수 있어, 완벽한 대책은 아니며, 새로운 알고리즘에 대한 연구가 더 진행되어야 한다.

본 연구보고서에서 제안한 크레인 접촉사고 자동재폐로 방지 알고리즘은 한전계통에 적용되어 있는 송전선로 보호계전기에 추가적인 장치나 장비의 설치 없이 보호계전기 내부로직에 검출 알고리즘을 추가하고 설정값을 입력하면 즉시 사용이 가능하며, 가공 송전선로 전 개소에 적용할 수 있다.

이는 자동재폐로 축소운전과 off 운전 개소를 선별하기 위한 시간을 소요할 필요가 없으며, 크레인 접촉사고 또는 고저항을 동반한 영구고장 시 최초 차단기 개방 후 불필요한 차단기 재투입을 방지하여, 고장 주변에서 발생할 수 있는 안전사고를 사전에 예방하고, 차단기 재투입에 의한 전력설비 소손을 방지할 수 있어 전력계통 및 전력설비의 안정적인 운영에 상당한 기여를 할 것이라고 생각한다.

참 고 문 헌

[1] 최종기, 한정열, 장병태, 안용호, 최상규, 이명희, “계절별 송전선로 자동재폐로 성공률 통계분석” , 대한전기학회 학술대회 논문집, pp 604-605, 2014

[2] 한국전력공사, “가공송전 계통보호 기초” , 2020

[3] 한국전력공사, “계통보호 업무절차서” , 2019

[4] 김석일, "전력계통보호(Power Protection Theory and Applications)", 이에스피(주), 2020

[5] 한국전력거래소, “송전선로 재폐로 계전기 운영방안 적정성 확립에 관한 연구” , 2013

[6] 한국전력공사, “계통보호 정정업무 편람” , 2019

[7] 한국전력공사 전력연구원, “직접접지계통 송전선로 고저항 지락보호대책 연구” , 1997

[8] ㈜세니온 “154kV 단거리 송전선로 보호배전반(PCM 전류차동방식) 사용 설명서” , 2015

[9] 박지환, 최종기, 박진만, 이재청, 장우일, 손용범, “가공 송전선로 크레인 접촉에 의한 보호계전기 동작 사례분석, 대한전기학회 학술대회 논문집, pp 99-102, 2021

[10] 한국전력공사, “보호계전기 고장파형 패턴분석집” , 2019

[11] 최종기, 이유진, 이상영, “사후 고장분석에 기초한 송전케이블 선로정수

산정기준의 개선”, 대한전기학회 전기학회논문지, pp 1,649-1,658, 2020
[12] 이준식, 서성찬, 양귀장, “송변전 설비의 고장유형별 고장파형 패턴 및 활용방안 사례분석, 대한전기학회 학술대회 논문집, pp 589-590, 2017
[13] 한국전력거래소, “보호계전기 설정기준 수립에 관한 연구”, 2003

Abstract

A Study on the Algorithm for Automatic Reclosure Prevention of Overhead Transmission Line in case of Machine Contact Accidents

Ji Hwan, Park

Department of Engineering Practice

Graduate School of Engineering Practice

Seoul National University

The types of faults that occur in overhead transmission lines include natural disasters such as lightning, heavy snow, strong winds, forest fires, and fog, and foreign objects such as silver foil, bird droppings, and machine contact, as well as equipment fault and work negligence.

When such a fault occurs, the transmission line protection

relay detects the fault and sends an open signal to the circuit breaker to separate the fault section. We are trying to improve the transient stability of the generator.

However, if automatic input of the circuit breaker is implemented in a permanent fault such as a crane contact (high resistance ground fault), the fault will occur again in a very short time, which may cause an impact to system facilities such as the circuit breaker. There is a high possibility of secondary accidents such as safety accidents and fires.

Crane contact accidents generally have greater fault resistance than instantaneous faults such as lightning faults, but the size is not constant depending on the fault point and type. In addition, the fault current and voltage drop are not large, so it is a very difficult fault to detect.

KEPCO is configuring the automatic reclosing operation logic of the transmission line to prevent automatic closing of the circuit breaker in the event of a high-resistance ground fault accident. Since it is not technically implemented, it is currently not possible to prevent automatic reclosing in case of a crane contact accident.

Therefore, in this study, a method to minimize automatic reclosing in the event of a crane contact accident was studied.

The operation cases of the 154kV transmission line protection relay were investigated for 5 years from 2016 to 2020, and among them, 50 faults for which the equipment department fault report and the actual system fault data (fault waveform) at both ends were selected.

After sorting the selected faults by case, the fault waveform viewer program (K_ComViewer, Sigra) was used to analyze the actual system fault data in sampling units, and using the percentage method and symmetric coordinate method, voltage & current phase difference, impedance, fault resistance were calculated. As a result of the analysis, it was found that the voltage & current phase difference characteristics in the case of a crane contact accident are different from other faults, and a crane detection algorithm and set values were proposed based on the difference.

In the case study, a 154kV transmission line system was modeled using EMTP-ATP Draw to check the value of the fault resistance that can detect a crane contact accident according to the fault location in the algorithm setting value, and fault according to the fault location. After various simulations by changing the resistance, a fault waveform was generated and reproduced in the protection relay to which the detection

algorithm was applied, and the result was confirmed.

Finally, 50 cases of selected algorithms and set values were verified, and applied to the automatic reclosing logic of the current differential relay to prevent automatic reclosing in the event of a crane contact accident, thereby minimizing the automatic closing of the breaker.

keywords : High resistance ground fault, Current differential relay, Automatic reclosing

Student Number : 2020-22444