

실시간 계통시뮬레이터를 이용한 송전계통 자동재폐로 교육 및 훈련 시스템 개발

논 문

59P-1-1

Development of Education and Training System for the Auto-Reclosing of Power Transmission System Using a Real Time Digital Simulator

박 종 찬[†] · 윤 상 윤*
(Jong-Chan Park · Sang-Yun Yun)

Abstract - This paper summarizes an education and training system for the auto-reclosing of power transmission system using a real time digital simulator. The system is developed to understand the principle of reclosing and the sequence of automatic reclosing schemes, and practice the effects of reclosing actions to power system in real-time simulator. This study is concentrated into the following two parts. One is the development of real time education and training system of automatic reclosing schemes. For this, we use the RTDS(real time digital simulator) and the actual digital protective relay. The mathematical relay model of RTDS and the actual distance relay which is equipped automatic reclosing function are also used. The other is the user friendly interface between trainee and trainer. The various interface displays are used for user handing and result display. The conditions of automatic reclosing which is a number of reclosing, reclosing dead time, reset time, and so on, can be changed by the user interface panel. A number of scenario cases are reserved for the education and training. Through the test, we verified that the proposed system can be effectively used to accomplish the education and training of automatic reclosing.

Key Words : Auto-Reclosing, Education and Training System, Reclosing Relay, Distance Relay, Transmission System

1. 서 론

오랜 경기 침체에도 불구하고 지속적으로 증가하는 전력 수요는 계통 운용자의 적절한 계통 조종의 중요성을 증대시키고 있으며 이를 위한 교육 및 훈련 시스템의 개발에 대한 수요를 증대시키고 있다. 더욱이 IT 기술의 보급이 보편화됨에 따라 디지털 기술의 계통 훈련 및 교육시스템에의 접목은 점차 그 범위를 확대하고 있다.

송전 선로 사고의 대부분은 뇌에 의한 아크 지락사고로서 영구사고는 전 사고의 10% 미만이다. 따라서 사고제거 후 아크의 자연소멸을 기다렸다가 재투입하면 사고점의 절연은 회복되어 있어서 다시 송전을 계속할 수 있는 경우가 많다. 재폐로 방식은 사고차단후의 재투입을 자동으로 하는 것이며, 송전선 보호 계전기에서 신호를 받아서 기동하고 계통의 여러 가지 조건을 확인하여 규정된 시간후에 투입지령을 내는 가장 기본적인 보호 방식이다.

전력계통의 과도현상 분석용으로 개발되어 사용되고 있는 수치계산 프로그램은 미국의 EMTP를 비롯하여 영국의 CEGB의 BESSO, GE사의 ANTRAP, MCGRAW Edison사의 METAP등이 있다 [1]. EMTP를 포함한 여러 비실시간 시뮬레이션 프로그램들은 수치적인 해석만을 목적으로 개발되었기 때문에 1초 동안의 현상을 모의하는데 수 초 내지

수 분의 시뮬레이션 시간을 요구한다. 그러나 디지털 방식의 보호계전기가 대중화되고 FACTS, HVDC 등의 신규 설비가 계통에 적용되면서 새로운 설비의 신뢰성 확보를 위한 실제 보호계전기 또는 신규설비 제어기의 시험 방법의 필요성이 대두되었고 이로 인해 전력설비를 연계하여 페루프 형태로 실제 기기를 시험 할 수 있는 실시간 시뮬레이터의 개발이 시도되었다 [2].

이제까지의 재폐로 교육 및 관련연구는 대학 및 산업체 종사자는 물론이요, 운용을 담당하는 전력회사에 있어서도 텍스트 위주의 이론적 방식이 대부분이었으며 [3-8] 좀더 발전된 방식으로 비 실시간 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 제공되는 가상의 계전요소를 사용해왔다 [9, 10]. 이러한 방식은 개념적 이해를 돕거나 유연한 교육 훈련에 유용한 측면이 있으나, 실질적인 계통 운용의 교육 훈련에 사용하기는 무리가 있었다. 따라서 계통 운용자, 대학 및 산업체 종사자들로 하여금 송전계통의 재폐로의 운용을 좀더 현실적으로 훈련시키기 위한 실시간 교육 훈련 시스템의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 송전계통 재폐로 보호에 대한 실시간 모의 교육훈련시스템을 제안하였다. 재폐로 보호의 가장 중요한 요소는 무전압 시간(dead time), 대기 시간(reclaim time) 및 1회 및 다회 재폐로 등으로 나눌 수 있다. 이러한 요소들은 보호대상, 차단기 종류, 안정도 문제 및 수용가 부하의 영향 등에 따라 달라지며 위 요소의 비중은 154kV 또는 345kV 계통에 따라 다르다. 이를 위해 모의 교육훈련 코스는 크게 두 가지 부분으로 나뉘어 구성되었다. 하나는 3상 일괄 재폐로 부분으로 각 고장 종류(1선지락, 선간단락 및 3상단락 고장)들에 대해 3상이 모두 트립 및 재폐로되는 것을 모의

[†] 교신저자, 시니어회원 : 오산대학 전기시스템제어과 교수 · 공박
E-mail : jcpark@osan.ac.kr

* 정 회 원 : 한전 전력연구원 송배전연구소 책임연구원 · 공박
접수일자 : 2009년 10월 6일
최종완료 : 2009년 11월 3일

하였으며 대상 계통은 154kV 및 345kV의 전형적인 송전계통을 대상으로 하였다. RTDS를 이용한 모의 과일의 구성 시 각 계통(154 및 345kV 계통)은 양단에 거리계전기를 설치한 것으로 모의하였다. 154kV 계통의 경우 송전단의 경우 미쓰비시사의 실제 거리계전기를 이용하여 구성하였으며 수전단의 경우 RTDS의 내부 콤포넌트들을 이용하여 구성된 계전기 모델을 이용하였다. 345kV 계통의 경우 송전단 및 수전단 모두 RTDS 내부 콤포넌트들을 이용하여 구성된 거리계전기 모델을 이용하여 모의하였다. 다른 하나는 1상 및 3상 재폐로 부분으로 1선지락 고장에 대해서는 해당상만 트립 및 재폐로를 하도록 하고 나머지 고장에 대해서는 3상 일괄 트립 및 재폐로가 되도록 모의하였으며 대상 계통은 345kV의 전형적인 송전계통을 대상으로 하였다. 고장종류, 고장지속시간, 1상 및 3상 재폐로 선택, 재폐로 횟수 및 재폐로 시간 등은 현재 국내의 재폐로 규정에 언급된 것을 모의하는 것은 물론 사용자 임의로 변경이 가능하도록 구성하였다.

2. 송전계통의 자동재폐로

가공 선로의 고장은 크게 과도, 반영구 및 영구의 세가지 범주로 나눌 수 있다. 가공 선로의 고장 중 80-90%는 사실상 과도고장이며, 나머지 10-20%는 반영구 또는 영구 고장이다. 과도 고장은 일반적으로 뇌격과 외부 물체의 일시적인 접촉에 의해 발생되며 차단기의 즉각적인 트립에 의한 절연 확보와 자동 재폐로에 의해 제거될 수 있다. 송전선의 전체사고 중 재폐로 성공률은 57% 정도이며 인위적 재송전까지 포함시키면 재송전 성공률은 95%에 달해 그 효과는 매우 크다 [4]. 송전선 자동 재폐로의 장점은 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫째, 계통의 과도안정도를 향상시킬 수 있어 송전용량이 증대한다. 둘째, 기기나 선로의 과부하를 감소시킨다. 셋째, 계통의 자동복구로 운전원의 노력을 줄일 수 있다.

그림 1은 재폐로 동작에 관계되는 보호계전기, 차단기 및 재폐로계전기의 동작을 송전선 한 단자에 대해서 나타낸 시간별 순서를 보인 것이다. 재폐로 계전기는 보호계전기의 동작으로 시동되며 차단기 동작으로 무전압이 된 후, 사고점의

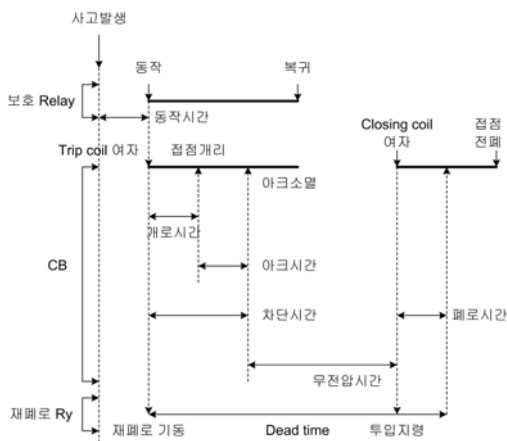


그림 1 재폐로 동작 시퀀스
Fig. 1 Sequence of reclosing operation

소이온시간(deionigation time)을 기다렸다가 CB에 투입 지령을 내려 재폐로 시킨다. 무전압 시간은 CB 차단 후 재투입되어 통전을 시작할 때까지의 시간을 말한다. 재폐로 시간은 사고발생시부터 재폐로에 의해 양측 차단기가 폐쇄할 때까지의 총시간을 말한다. 무전압 시간을 결정하는 요인은 차단기의 허용투입시간외에 소이온 시간과 계통 안정도 등이 있다. 일반적으로 재투입 시간은 빠를수록 계통안정도 향상을 위해 유리하지만, 너무 빠르면 전압을 인가했을 때 재발호(restriking of arc)할 우려가 있어 일정시간 후에야 투입할 수 있다.

소이온 시간은 사고 점에 생긴 잔류 이온이 소멸해서 사고 점의 절연이 회복하기까지의 시간을 말하는데, 이것은 주로 건전회선이나 건전상에서의 정전 유도와 전자 유도에 의해 사고 점의 잔류 이온을 통해 흐르는 전류에 의해 좌우되며, 일반적으로 계통 전압이 높을수록, 또 차단선로의 공장이 길수록 이 전류가 커지기 때문에 절연회복에 더 긴 시간이 걸린다. 오랜 경험으로 보면 소요되는 최소 무전압 시간은 식 (1)과 같이 산출할 수 있다 [9].

$$t = 10.5 + \frac{kV}{34.5} (\text{cycles}) \tag{1}$$

여기서 kV 는 계통의 정격전압을 나타내며 예를 들면 765kV 계통에서는 $t = 10.5 + 765/34.5 = 33 \text{cycles}$ 이다. 고속도 재폐로란 무전압 시간이 0.5초(또는 1.0초) 이내인 재폐로를 말한다. 표 1에 각 공칭전압 별 재폐로 성공확률을 나타내었다.

표 1 재폐로 성공확률(60Hz 기준)
Table 1 Probability of reclosing success(baseed on 60Hz)

회로 공칭전압 (L-L) kV	최소 소이온 시간(cycles)	
	95% 성공율	75% 성공율
23	4	-
46	5	3.5
69	6	4
115	8.5	6
138	10	7.5
161	13	10
230	18	14
300	24	20

재폐로 방식은 대상 송전선의 적용보호방식, 전압계급, 배후 전원의 유무 등에 따라 재폐로 시간, 기동조건, 재폐로 상수에 차이가 있으며 3상 재폐로, 단상 재폐로, 1상+3상 재폐로 및 다상 재폐로 등으로 구분할 수 있다. 재폐로를 할 때에는 동기 운전하고 있는 것을 확인해야 한다. 양단 전원이 동기되어 있지 않은 상태에서 재투입되면 탈조를 일으켜 계통의 해열이나 대정전을 일으킬 수 있다. 이 동기검정방식을 재폐로 조건이라고 한다.

2.1 3상 재폐로(three phase reclosing)

사고의 종류에 관계없이 3상을 모두 차단하고 3상을 재투입하는 방식이다. 따라서 차단기를 재투입시는 양쪽 계통의

동기를 검정하여야 하므로 동기검출 계전기나 조류검출 계전기 등과 함께 사용한다. 3상재폐로는 단상재폐로보다 고속도로 차단기를 투입할 수 있다는 점과 관련 제어회로가 간단하다는 장점이 있으나 양전원 1회선 계통에 적용할 경우에는 사고 차단후 동기투입이 어렵게 된다. 근래에는 단상재폐로의 장점과 3상재폐로의 장점을 모두 이용하기 위해서 단상+3상재폐로 방식을 적용하기도 하는데 이는 1선지락사고시는 단상재폐로하고 1선지락사고 이외의 사고시는 3상재폐로 하는 방식으로 국내 345kV급 계통의 재폐로가 여기 해당한다.

2.2 단상 재폐로(single phase reclosing)

단상재폐로는 1선 지락 시에 사고상만을 차단하고 나머지 2상으로는 전력을 송수전하여 동기를 유지하고, 사고상의 절연회복을 기다려서 차단했던 1상을 재폐로 하는 방식이다. 2상에 의한 연계로 동기는 유지되고 있으므로 3상 재폐로와 같이 특별히 동기검출할 필요가 없으므로 1회선 송전선에도 적용할 수 있다. 단상 재폐로는 1선 지락사고 시 사고상만 차단하며, 2상 이상이 포함된 사고시에는 3상 차단하고 재폐로 하지 않는다. 따라서 1선 지락사고의 사고상을 선별할 필요가 있다.

2.3 다상재폐로(multi phase reclosing)

우리나라는 2회선 철탑이 대부분이기 때문에 뇌격사고 등에 2회선에 걸친 다중사고가 일어날 빈도가 높다. 일본에서의 사고통계에 의하면 2회선에 걸친 다중사고는 전사고의 15% 정도에 달하며 이런 사고에서 다상재폐로는 성공율이 높고 유리하다 [4]. 이 방식은 어떤 사고에 대해서도 사고상만을 차단하므로 차단상태에서의 송전전력이 크고 과도 안정도 면에서도 유리하다. 이 방식의 재폐로 조건은 사고차단 후 2회선 전체로서 건전상의 상수(같은 상이면 2개 도체라도 1개로 취급)가 2상, 또는 3상이면 재폐로 시키는 것이다. 이 방식을 적용하려면 사고상만을 확실하게 판별할 수 있는 보호방식이어야 하므로 각상위상비교 계전방식, 각상 표시선 계전방식 또는 전류차동 계전방식을 사용할 경우에만 적용할 수 있다.

배전계통의 경우 저속도 재폐로 방식이 사용되며 사고차단 후의 계통복구 조작을 자동화하여 공급지장시간의 단축과 운전의 합리화를 기하기 위한 목적으로 쓰인다. 22.9kV 배전방식에서는 선로에 달리 리클로저, 구간개폐기(sectionalizer) 및 퓨즈등과 협조하도록 변전소의 차단기에 적용하는데 0.5초 및 15초의 재폐로 무전압시간을 사용한다.

2.4 국내 송전계통의 자동 재폐로 현황

154kV 송전선의 보호책무는 전류 차동 계전기가 주보호를 담당하며 거리 계전기는 후비 보호를 담당한다. 345kV 송전선의 보호책무는 전류차동 계전기와 거리 계전기가 병렬로 조합되어 트립신호가 빠른 것이 먼저 차단기를 동작시키며 재투입은 트립시킨 계전기가 명령을 내리는 방식이다. 송전선 자동 재폐로는 재폐로 횟수의 경우 1회로하며 재폐로 형태는 154kV급 계통(주보호: 전류차동, 후비보호: 거리)의 경우 3상 일괄이며 345kV급 계통(전류차동 및 거리계전기 병렬보호)의 경우 1+3상 재폐로를 하고 있다. 표 2에 현행 국내 송전계통의 재폐로 방식을 정리하였다.

표 2 국내 송전계통에서의 재폐로 방식

Table 2 Reclosing scheme of domestic transmission system

전압 (kV)	1Φ/3Φ 재폐로	재폐로 시간	조건
345	3Φ	24	2회선 이상 사고시
	1Φ	48	1회선 1Φ사고 발생시
154	3Φ	18	주 보호방식 미 적용시 ⇒ 26(reader), 18(follower)(단, 주 보호방식 미 적용시 33(follower))
	1Φ	-	-

주 1) 양단에 전원이 있는 100% 지중계통: 재폐로 안함
 주 2) 가공+지중 복합선로의 경우 아직 일정한 기준이 없음

계통의 선로양단(또는 각단)에서 고속도 차단된 경우 송전단은 모선전압은 정상이며 선로전압이 없을 경우 및 동기조건 양호(1상 재폐로의 경우 무시)의 조건이 만족하면 재폐로 한다. 수전단의 경우 모선전압은 없으며 선로전압이 정상인 경우 및 동기조건 양호(1상 재폐로의 경우 무시)의 조건이 만족되면 재폐로 한다. 단, 발전단은 동기조건 양호만 적용한다. 동기 검출조건은 154kV 계통의 경우, 위상차(Δ)는 ±25, 전압은 정격의 80% 및 전압차(ΔV)(VL과 VB 간의 전압차) 10%이내 등의 조건을 가지며, 345kV 계통의 경우 위상차(Δ)는 ±30, 전압은 정격의 80% 및 전압차(ΔV) 10%이내 등의 조건을 가진다.

3. 실시간 디지털 시뮬레이터를 이용한 재폐로 교육 및 훈련 시스템 구성

본 논문에서 제시한 재폐로 교육 및 모의 훈련시스템의 구성을 그림 2에 도시하였다. 실시간 디지털 시뮬레이터의 경우 RTI의 RTDS(real time digital simulator)가 사용되었다. 그림 2에서 송전측 거리계전기는 154kV 계통의 경우 미쓰비시사의 실제 거리계전기를 연동하여 구성되었으며 수전측 거리계전기는 RSCAD 내부의 소자를 이용한 거리 계전기를 사용하였다. 345kV 계통의 경우 송전측 및 수전측 모두 RSCAD 내부의 계전기를 사용하였다. 재폐로 계전기의 경우 모두 RTDS 내부의 소자를 이용하여 구현되었다.

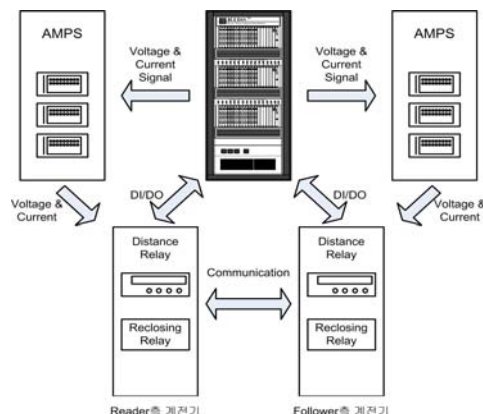
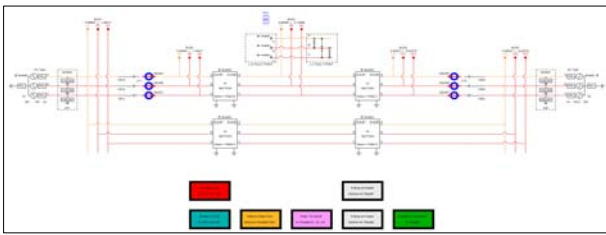


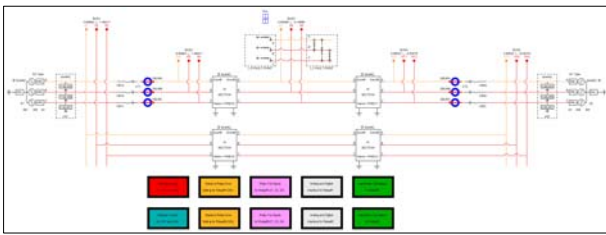
그림 2 재폐로 훈련 코스 개발을 위한 장치 구성

Fig. 2 Facilities for developing the reclosing training course

그림 3에는 154kV 및 345kV 계통의 교육 및 훈련을 위한 모의 계통을 나타내었다. 그림 3에서 보는 바와 같이 계통은 양쪽 무한 모선과 2회선의 송전선으로 구성되어 있으며 선로의 중간 지점에서 고장을 모의하도록 설계되었다. 그림의 왼쪽 편을 송전단으로 보았으며 오른쪽을 수전단으로 보았다. 양단에는 거리계전기가 설치되어 있으며 154kV 계통의 경우 미쯔비시 사의 실제 거리계전기가 RTDS를 통해 연결되었으며 345kV의 경우 내부 계전기 모델이 사용되었다. 수전단의 경우 RTDS 내부의 제어 소자들을 이용하여 구성된 거리계전기 모델이 연결되었다. 표 3에 실시간 교육 훈련 시스템의 블록단위의 제어 모델을 나타내었다.



(a) 154kV 교육 훈련을 위한 모의 시스템



(b) 345kV 교육 훈련을 위한 모의 시스템

그림 3 교육 훈련을 위한 모의 시스템

Fig. 3 Simulation system for education and training

표 3 제어 블록의 기능 설명

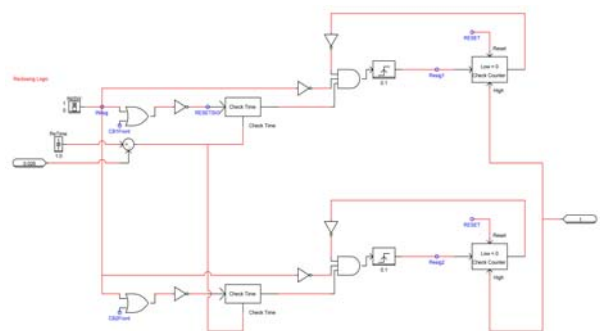
Table 3 Functions of control block

제어 블록명칭	기능
Reclosing logic	재폐로에 필요한 로직
Breaker control for CB1 and CB2	송전단 및 수전단 차단기 동작 제어 및 고장제어
Analog and digital interface for Relay1	송전단의 실제 거리 계전기와 RTDS 간의 링크
Relay trip signal for Relay1	송전단 내부 거리 계전기 모델의 트립 신호 제어
Distance relay zone setting for Relay1	송전단 내부 거리 계전기 모델의 Zone setting
Impedance calculation for Relay1	송전단 내부 거리 계전기 모델의 임피던스 계산
Analog and digital interface for Relay2	수전단의 내부 거리 계전기 모델의 출력신호 전달
Relay trip signal for Relay2	수전단 내부 거리 계전기 모델의 트립 신호 제어
Distance relay zone setting for Relay2	수전단 내부 거리 계전기 모델의 Zone setting
Impedance calculation for Relay2	수전단 내부 거리 계전기 모델의 임피던스 계산

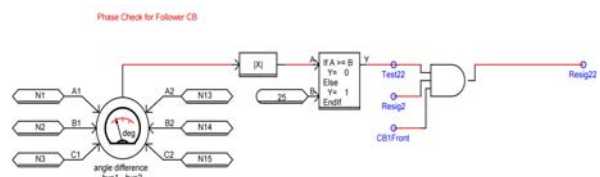
제어 블록 중 재폐로 로직은 본 모의에 있어서 가장 핵심적인 부분이라 할 수 있다. 그림 4(a)에서 그림 4(c)에 재폐로 로직의 제어 블록의 구성을 나타내었다. 그림 4(a)의 재폐로 로직은 크게 다음과 같이 구성되어 있다.

- 1) 초기화 S/W: RSCAD의 모의 시작시점에 알 수 없는 펄스 신호로 인한 재폐로 횟수의 카운팅 오류를 방지하기 위한 S/W이다. 모의 시작시점에 1값을 출력하며 모의가 양단의 스위치를 투입하여 모의가 안정상태에 들어가면 사용자에게 의해 수동 개방되어 초기 상태를 유지시켜 준다. 초기화 S/W의 투입 및 개방 방법은 뒤에 런타임(runtime) 모의에서 다시 설명하도록 한다.
- 2) 재폐로 무전압 시간 입력 슬라이드: 재폐로 무전압 시간의 외부 입력을 위한 슬라이드 스위치이다.
- 3) 재폐로 신호 생성: "Check Timer"이라는 UDC(user define component) 모델을 이용하여 구현된 재폐로 신호 생성부이다. 계통내의 차단기의 개방 신호와 재폐로 무전압 시간 입력값을 입력받아 무전압 시간 후에 차단기 재폐로 신호를 내보낸다.
- 4) 재폐로 횟수 카운터: "Check Counter"라는 UDC 모델을 이용하여 구현된 재폐로 횟수 카운터이다. 재폐로 신호에 의해 카운팅하며 재폐로 기준 횟수를 외부 입력을 받아서 이 값보다 재폐로 신호의 누적이 같아지면 이후부터 재투입 신호를 출력하지 않도록 한다. 또한 외부 입력인 리셋 신호를 입력받아 누적되어 있던 횟수를 삭제한다.

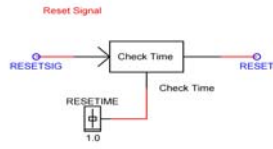
그림 4(b)의 위상 동기 검출 로직의 설명에서 보는 바와 같이 위상 동기 검출 로직은 크게 송전단과 수전단 전압의 위상차를 계산하는 부분과, 기준값과의 비교가 수행되는 부분, 송전단 차단기 투입 확인 부분 및 수전단 재폐로 신호 출력 부분으로 구성된다. 그림 4(c)의 리셋 신호 생성 로직은 리셋 신호 입력 및 리셋 신호 생성 부분으로 구성된다.



(a) 재폐로 로직



(b) 위상 동기 검출 로직



(c) 리셋 신호 생성 로직

그림 4 재폐로 제어 로직

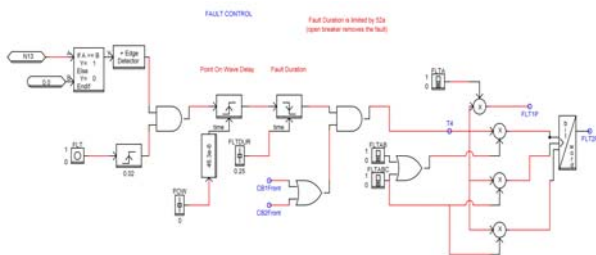
Fig. 4 Control logic of reclosing

그림 5(a)와 그림 5(b)는 고장발생 및 차단기 제어 로직을 나타내었다. 그림 5(a)의 고장 발생 제어 로직은 크게 다음과 같은 3가지 부분으로 구성되어 있다.

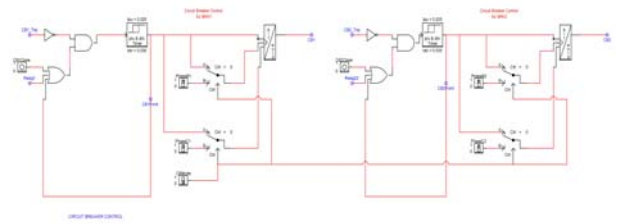
- 1) 고장 발생 스위치: 고장 발생시점을 제어할 수 있는 외부 버튼 스위치를 사용자가 직접 제어함으로써 고장을 발생시킨다.
- 2) 고장 지속시간 생성: 고장 지속시간(리셋 시간 이전까지의 고장시간)을 제어하는 슬라이드로써 역시 외부에서 사용자에게 의해 입력된 값에 의해 결정된다. 이 값은 1개 고장이 총 지속되는 시간을 말하며 차단기 개방 및 재투입 등에 의한 강제적인 고장 제어 동작은 무시한다.
- 3) 고장종류 발생: 1상, 2상, 3상 고장을 제어하는 스위치로써 외부에서 사용자에게 의해 입력되는 값에 의해 결정된다.

그림 5(b)의 송수전단 차단기 제어 로직은 다음과 같이 크게 네 부분으로 구성되어 있다.

- 1) 차단기 초기 투입 스위치: 모의 시작 후 송수전 차단기를 투입하는 것으로 외부에서 사용자에게 의해 조작된다.
- 2) 계전신호와 실제 차단기 동작간의 지연시간: 계전 신호인 차단기 트립신호(CB1_trip, CB2_trip)를 입력받은 후 실제 차단기가 동작하기까지의 지연시간을 시간 지연 소자를 이용하여 구현하였다. 지연시간은 35ms로 지정하였다.
- 3) 상별 차단기 제어: 1상 및 3상 차단기 트립/재투입을 구현한 것으로 외부에서 사용자에게 의해 입력된 값(CBMode: 1상, 3상 Trip)을 받아서 동작하도록 구성되었다. 154kV 계통에서는 모두 3상 일괄 트립/재투입을 하고 있으므로 상별 차단기 제어는 하지 않는 상태로 모의되었다.
- 4) 차단기 동작 신호: 차단기의 개방 및 투입 신호를 전달한다.



(a) 고장 발생 제어 로직



(b) 송수전단 차단기 제어 로직

그림 5 고장발생 및 차단기 제어 로직

Fig. 5 Control logic of fault and breakers

송수전단의 실제 거리 계전기와 RTDS간의 링크를 그림 6에 나타내었다. 계전기에서 RTDS로 신호가 전달되는 로직은 크게 3부분으로 구성되어 있다.

- 1) 계전기 신호의 RTDS 전달: 디지털 포트 모델을 이용하여 계전기에서 나온 신호를 RTDS로 전달한다.
- 2) 차단기 트립 신호 전달: 계전기 신호를 받아서 RTDS 내부의 차단기에 트립 신호를 전달한다.
- 3) 계전기 동작시간 검출: 고장발생시점에 구동되어 차단기 트립 신호의 전달 시점에 정지되는 타이머를 부착하여 계전기 동작시간을 검출하였다.

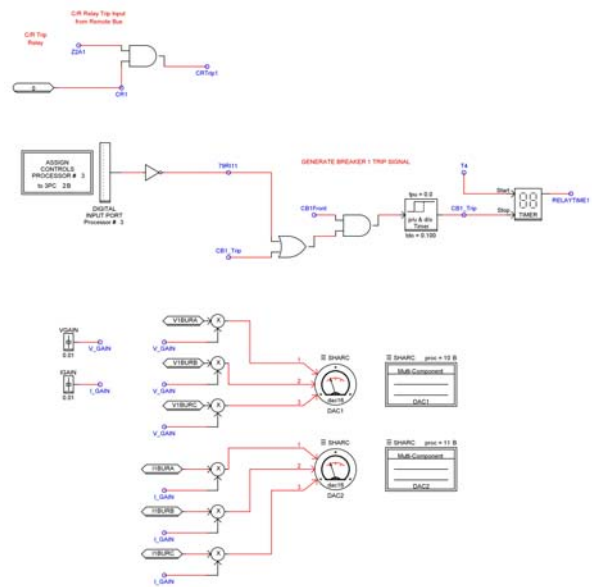


그림 6 실제 계전기와 RTDS간의 링크 로직

Fig. 6 Link logic between RTDS and actual relay

수전단의 내부 거리 계전기의 출력신호를 전달하는 로직은 그림 7과 같이 구성되었다. 그림과 같이 이 로직은 크게 2부분으로 구성되어 있다. 상단은 내부 계전기에 의한 Zone1, Zone2 및 캐리어 트립 신호를 전달하는 것이며 하단은 출력신호에 의해 차단기 트립 신호를 발생하는 것이다. 수전단 내부 거리 계전기 모델의 임피던스 계산을 위한 로직은 그림 8과 같이 구성되어 있다.

교육훈련을 위해 직접 사용자의 조작 및 결과 확인을 위한 MMI(man machine interface)는 표 4 및 표 5와 같이 구성되었다.

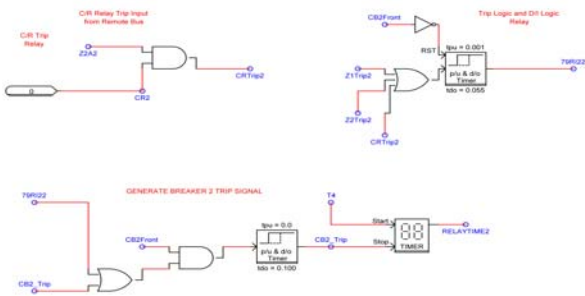


그림 7 RTDS 계전기 모델의 출력신호 전달 로직
Fig. 7 Output signal transfer logic of RTDS relay model

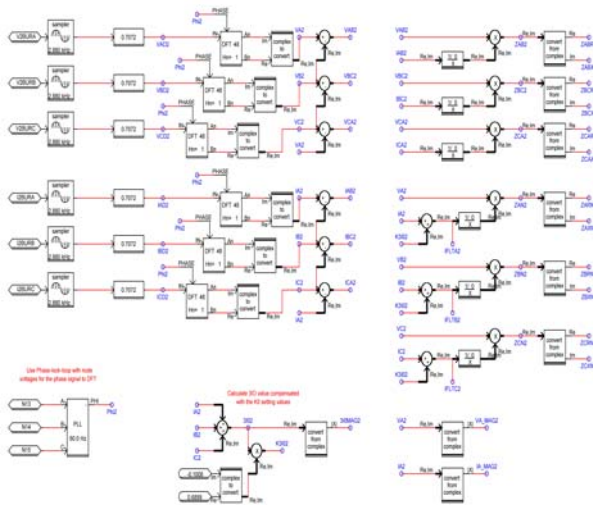


그림 8 RTDS 거리계전기 모델의 임피던스 계산
Fig. 8 Impedance calculation of RTDS relay model

표 4 사용자에게 정보를 제공하는 콤포넌트들
Table 4 Components of the display for user

번호	컴포넌트	명칭	의미
1		리셋 표시 램프	리셋이 되었음 표시
2		송전단 계전기의 동작시간 표시계	송전단 계전기의 동작시간 표시
3		수전단 계전기의 동작시간 표시계	수전단 계전기의 동작시간 표시
4		재폐로 횟수 표시계	재폐로 신호의 출력 횟수 표시 (리셋 신호 후 0)

표 5 사용자 조작에 사용되는 콤포넌트들
Table 5 Components for user control

조작 순서	컴포넌트	명칭	사용자 조작
1		고장 종류 선택 스위치	고장 종류에 따라 1개 스위치를 "On" 상태로 함
2		고장 지속시간 입력	고장지속시간 입력
3		재폐로 무전압 시간 입력 슬라이드	무전압 시간 입력
4		리셋 시간 입력 슬라이드	리셋시간 입력
5		초기화 스위치	모의전 "On"상태로 하고, 모의직후 "Off" 상태로 함
6		송수전단 차단기 투입 스위치	초기화 스위치 조작후 각 버튼을 한번씩 누름
7		고장 발생 스위치	송수전단 차단기 투입 스위치 조작후 버튼 누름
8		상별차단기 제어 스위치	상별 투입/재폐로 수행시 차단기 제어

4. 자동재폐로 교육 훈련을 위한 시뮬레이션

RTDS를 이용한 송전 계통의 재폐로 모의는 크게 다음의 두 가지 시나리오로 구성되었다.

- 1) 154kV 계통의 재폐로 모의: 재폐로는 어떠한 사고에 대해서도 3상 일괄 트립/재투입을 수행하며 재폐로 횟수는 1회로 한다. 재폐로 무전압 시간은 18cycle(0.3초)로 하며 리셋 시간은 1분으로 한다. 수전단 차단기는 동기 검출 후 재폐로를 수행한다.
- 2) 345kV 계통의 재폐로 모의: 재폐로는 1상사고에 대해서는 1상 트립/재투입을, 2상 이상의 사고에 대해서는 3상 일괄 트립/재투입을 수행한다. 재폐로 횟수는 1회이며 재폐로 무전압 시간은 3상 재폐로의 경우 24cycles(0.4초)로 하고 1상 재폐로의 경우 48cycles(0.8초)로 한다. 리셋 시간은 1분이며 수전단 차단기는 3상 재폐로시만 동기 검출 후 재폐로를 수행한다. 이상의 기준을 적용하여 표 6과 같은 세부 훈련 코스를 구성하였다.

시뮬레이션을 위한 구성은 다음과 같이 크게 두 부분으로 나뉘어 각각의 절차를 통해 이루어진다.

- 1) 실제 거리계전기를 이용하여 모의한 경우: 154kV 계통 재폐로(Case 1~Case 3)

표 6 RTDS를 이용한 재폐로 모의 훈련코스

Table 6 Simulation training course of reclosing using RTDS

훈련 Case		전압(kV)	고장종류	고장양태	재폐로 방식	모의 절차	
1	1-1	154	1선지락	일시	3 ϕ 일괄	1st RS \Rightarrow TFBR \Rightarrow ARLO	
	1-2			영구		1st RS \Rightarrow SFAR \Rightarrow ARLO	
	1-3					ARLO	
2	2-1		2선단락	일시		1st RS \Rightarrow TFBR \Rightarrow ARLO	
	2-2			영구		1st RS \Rightarrow SFAR \Rightarrow ARLO	
	2-3					ARLO	
3	3-1		3선단락	일시		1st RS \Rightarrow TFBR \Rightarrow ARLO	
	3-2			영구		1st RS \Rightarrow SFAR \Rightarrow ARLO	
	3-3					ARLO	
4	4-1	345	1선지락	일시	1 ϕ +3 ϕ	STRS \Rightarrow TFBR \Rightarrow LO	
	4-2			영구		STRS \Rightarrow SFBR \Rightarrow ARLO	
	4-3					STRS \Rightarrow LO	
5	5-1		2선단락	일시		3 ϕ 일괄	1st RS \Rightarrow TFBR \Rightarrow LO
	5-2			영구			1st RS \Rightarrow SFAR \Rightarrow ARLO
	5-3						ARLO
6	6-1		3선단락	일시			1st RS \Rightarrow TFBR \Rightarrow ARLO
	6-2			영구			1st RS \Rightarrow SFAR \Rightarrow ARLO
	6-3						ARLO
7	7-1	154	1선지락	일시	3 ϕ 일괄		PSF \Rightarrow RF
				영구			PSF \Rightarrow RF
	7-2			일시			PSS \Rightarrow 1st RS
				영구		PSS \Rightarrow ARLO	
8	8-1		2선단락	일시		PSF \Rightarrow RF	
				영구		PSF \Rightarrow RF	
	8-2			일시		PSS \Rightarrow 1st RS	
				영구		PSS \Rightarrow ARLO	

주 1) 고장 지속시간(1선지락, 2선단락, 3선단락)
 ①일시고장: 0.2초(154kV), 0.5초(345kV) ②영구고장: 1.0초(154kV), 1.2초(345kV)
 주 2) 재폐로 무전압시간: 0.3sec(단, ①1 ϕ +3 ϕ 재폐로: 0.8sec ②3 ϕ 재폐로: 0.4sec)
 주 3) 리셋 시간: 60sec
 주 4) 송전단 위상각 설정치: 9.6°(단, case 7 및 8의 경우는 35°)
 주 5) 위상 동기 검출 기준값: 25°(154kV), 30°(345kV)(단, case 7 및 8의 경우는 실패 25° 성공 40°)
 주 6)여기서, 1st RS는 1회 재폐로 후 재폐로 성공, STRS는 1상 트립/재폐로 후 재폐로 성공, ARLO는 1회 재폐로 후 로크아웃, LO는 트립 후 로크아웃, TFBR는 리셋시간내 일시고장 재발생, SFAR는 리셋시간후 영시고장 재발생, PSF는 위상 동기 검출 실패, PSS는 위상동기 검출 성공, RF는 재폐로 실패)

- 단계 1) 사용자는 RSCAD/EMTDC 소프트웨어를 통해 RTDS 시뮬레이터에 각 계통 및 제어 회로를 구성하여 실행한다.
- 단계 2) RTDS는 증폭기를 통해 거리 계전기에 변류기(CT 및 PT) 2차측의 실제 계통 전압 및 전류 신호를 전달한다.
- 단계 3) 거리 계전기는 고장을 감지하여 차단기에 트립 신호를 전달하며 RSCAD/EMTDC 내부의 차단기 모델이 응답한다.
- 단계 4) 차단기의 동작을 감지한 재폐로 계전기가 전압 및 위상 동기, 재폐로 횟수 및 리셋 시간 등을 고려하여 차단기에 재투입 신호나 로크아웃(lock-out) 신호를 전달한다.

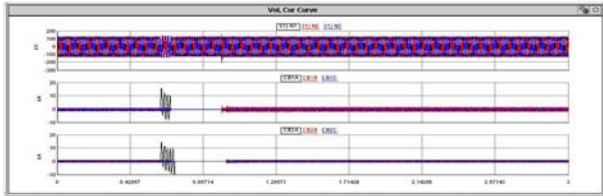
- 단계 1) 사용자는 RSCAD/EMTDC 소프트웨어를 통해 RTDS 시뮬레이터에 각 계통 및 제어 회로를 구성하여 실행한다.
- 단계 2) RTDS는 내부 모듈을 이용하여 계통 전압 및 전류 신호를 이용한 임피던스 연산을 수행한다.
- 단계 3) 내부 거리 계전기 모델이 고장을 감지하여 차단기에 트립 신호를 전달하며 RSCAD/EMTDC 내부의 차단기 모델이 응답한다.
- 단계 4) 차단기의 동작을 감지한 재폐로 계전기가 전압 및 위상 동기, 재폐로 횟수 및 리셋 시간 등을 고려하여 차단기에 재투입 신호나 로크아웃 신호를 전달한다.

2) RTDS 내부 소자를 이용한 거리계전기를 이용하여 모의한 경우: 345kV 계통 재폐로(Case 4~Case 6) 및 동기검출 실패 케이스(Case 7~Case 8)

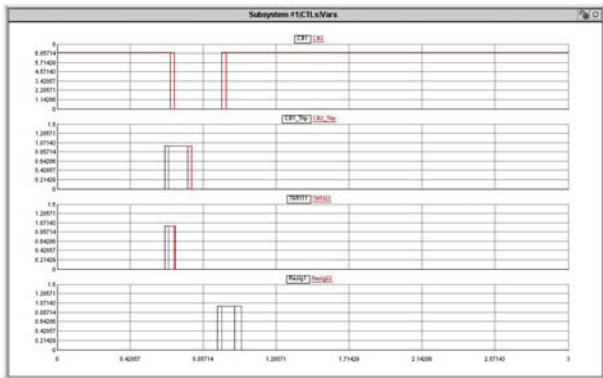
4.1 Case1-1의 모의 결과 파형 분석

1선 지락 고장 발생 후 0.2초 동안 고장이 지속되며 차단기 3상 트립 후 0.3초 후에 재투입이 되는 것으로 재폐로 성공하고, 리셋 시간내에 0.2초 지속시간의 사고가 한번 더

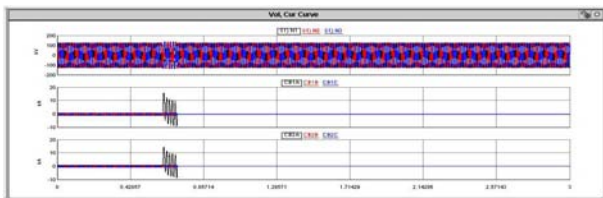
발생한 것을 모의한 것이다. 그림 9에 송수전단 전압 및 전류 파형과 각종 제어신호를 나타내었다. 제어신호는 위에서부터 차례로 차단기 On/Off 신호, 차단기 트립 신호, 송수전단 계전기 트립 신호 및 재투입 신호이다. 리셋 시간내에 재사고(0.2초 지속시간의)가 발생한 경우의 전압전류 파형을 통해 로크-아웃 상태가 되어 재폐로는 이루어지지 않음을 알 수 있다.



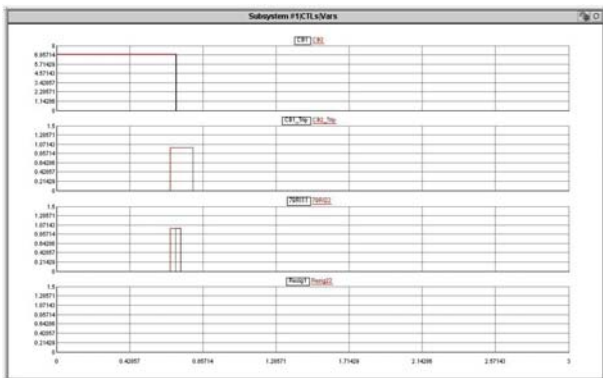
(a) 첫 번째 일시 고장시 재폐로 성공 파형



(b) 제어신호 파형



(c) 리셋 시간내 재 고장 발생시 트립 후 로크아웃

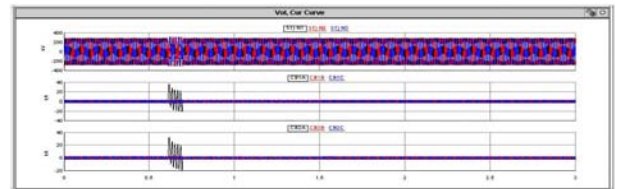


(d) 제어신호 파형

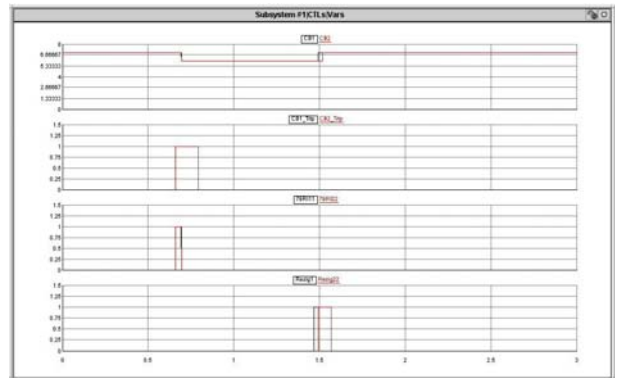
그림 9 시나리오 Case 1-1의 모의 파형
Fig. 9 Simulation results of scenario case 1-1

4.2 Case 4-1의 모의 결과 파형 분석

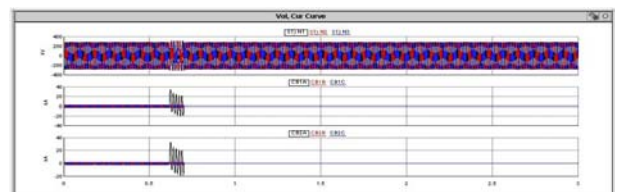
케이스 1의 경우가 3상 일괄 차단 및 재폐로를 모의했던 반면 이 케이스의 경우는 1상+3상 재폐로를 모의하였다. 1선 지락 고장 발생 후 0.5초 동안 고장이 지속되며 차단기의 고장상만이 트립된 후 0.8초 후에 재투입이 되는 것으로 1상 투입/재폐로의 성공 케이스를 모의한 후, 리셋 시간내에 0.5초 지속시간의 사고가 한번 더 발생하여 3상일괄 차단되고 로크아웃되는 것을 모의한 것이다. 그림 10에 송수전단 전압 및 전류 파형과 각종 제어신호를 나타내었다.



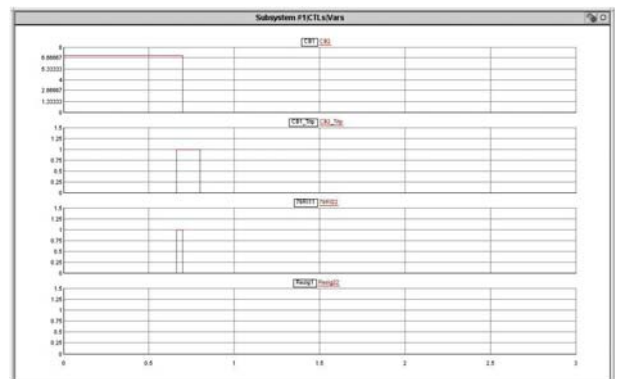
(a) 첫 번째 일시 고장시 재폐로 성공 파형



(b) 제어 신호 파형



(c) 리셋 시간내 재 고장 발생시 트립 후 로크아웃



(d) 제어 신호 파형

그림 10 시나리오 Case 4-1의 모의 파형
Fig. 10 Simulation results of scenario case 4-1

5. 결 론

본 논문에서는 실시간 시뮬레이터를 이용한 송전선로 자동재폐로 교육훈련 시스템을 제시하였다. 모든 훈련 케이스는 사용자가 스스로 재폐로 동작을 실습하며 학습할 수 있도록 계통 및 제어 시스템을 구성하였다. 이제까지의 재폐로 교육 및 훈련 시스템이 이론적 방식을 사용하거나 비실시간 해석 프로그램을 이용한 방식이었기 때문에 실제 계통 운용자의 현장 상황을 반영한 교육훈련이 이루어지지 못했다. 이를 극복하기 위해 제한한 시스템은 실제 거리계전기를 연계하였으며 이를 통해 교육훈련생이 실시간으로 계전기의 응답 및 이에 따른 계통의 변화를 학습할 수 있도록 하였다. 효율적인 교육을 위해 다양한 조작 인터페이스를 개발하였으며 이를 통해 고장종류, 고장지속시간, 1상 및 3상 재폐로 선택, 재폐로 횟수 및 재폐로 시간 등을 가변하면서 다양한 상황에 대한 교육훈련이 가능하도록 하였다. 또한 라이브러리 형태로 제공되는 훈련 케이스를 통해 154kV 및 345kV 계통에서의 다양한 사고에 대한 1상재폐로, 3상재폐로 및 1상+3상 재폐로 및 위상동기 검출 등의 교육훈련이 가능하도록 하였다. 본 논문에서 제시한 실시간 교육훈련 시스템은 실제 대학, 산업체 및 전력회사 종사자들에 대한 자동재폐로 교육훈련에 활용될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 오산대학 교내 학술연구 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 한전전력연구원, 전력계통 해석용 시뮬레이터의 개발 및 설치 최종 보고서, 한국전력공사, 2000년.
- [2] RTDS Technologies Inc, RTDS Users Manual.
- [3] 전력계통보호기술연구회, Computer relaying(제 7회 하계 교육강좌 자료), 1997년.
- [4] 김호표 외 4명, 전력계통보호(I), 한국전력공사 중앙교육원, 2002년.
- [5] IEEE Power System Relaying Committee, "Distribution line protection practices - Industry survey analysis," IEEE Trans. on PWRD, vol. 3, no. 2, pp.514-524, Apr. 1988.

- [6] IEEE Committee Report, "Single-phase Tripping and Autoreclosing of Transmission Line," IEEE Trans. on PWRD, vol.7, no.1, Jan. 1992.
- [7] IEEE Tutorial Course : Application and coordination of reclosers, sectionalizers, and fuses, 80EHO157-8-PWR, 1980.
- [8] ANSI C37.61-1973, Guide for the Application, Operation, and Maintenance of Automatic Circuit Reclosers.
- [9] 한국전력공사 전력연구원, 송배전 재폐로 방식의 최적화 연구, 한국전력공사, 1997년 12월.
- [10] 이정택, 김호표, "송배전선로의 보호계전기술," 대한전기학회지 제 43권 제 4호, pp.20-26, 1994년 4월.

저 자 소 개



박 종 찬 (朴 鍾 讚)

1955년 12월 19일생. 숭실대학교전기공학과 졸업. 1988년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993년-현재 오산대학 전기시스템제어과 교수.

E-mail : jcpark@osan.ac.kr



윤 상 운 (尹 尙 潤)

1970년 8월 28일생. 2002년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2003년-2009년 LS산전(주) 전력연구소 책임연구원. 현재 한전 전력연구원 송배전연구소 책임연구원.

E-mail : syyun@kepri.re.kr