

The Assessment and Development of Protection Models in HVDC DC side

이성두* · 김찬기†
(Seong-doo Lee · Chan-ki Kim)

Abstract - The HVDC system consists of ac side and dc side through thyristor valve. ac side protection is similar to conventional ac system protection schemes but dc side protection is different from ac side of HVDC system. AC system don't have controller but HVDC system has controller that controls and protects system from faults and disturbance. This paper show protectional function of HVDC dc side such as asymmetry protection, ac/dc differential protection, dc overvoltage, dc overcurrent protection. Protection models is developed using RTDS software and assessment of protection models is also performed by RTDS system.

Key Words : HVDC, Protection, RTDS, Commutation failure

1. 서론

HVDC(High Voltage Direct Current, 이하 HVDC) 시스템의 보호동작은 교류측 보호기능과 직류측 보호기능으로 분류될 수 있다. 교류측 보호기능은 주로 컨버터 변압기, 교류 필터, 병렬 커패시터, 병렬 리액터, 모선을 보호하는 것으로 우리가 알고 있는 전통적인 의미의 전력계통 보호회로로 구성되어 있다. 반면에, 직류측 보호는 HVDC 시스템 자체를 보호하는 개념과 HVDC 시스템에 의해서 교류측에 과급될 수 있는 문제를 해결하는 개념으로 나눌 수 있으며 직류측 보호동작은 제어 동작과 혼합되어 보호 동작을 수행하기 때문에 구현에 기술적인 난이도를 가지고 있다. HVDC시스템의 직류측의 보호개념은 교류 시스템 보호와 유사하며, 다음과 같이 요약될 수 있다[1].

- 불필요하거나 원하지 않는 트립에 대한 안전 보장
- 실제 고장 제거에서의 신뢰성
- 고장 주변지역의 최소 시스템만을 분리할 수 있는 선택성
- 주요 보호시스템의 실패시를 위한 백업 보호

2. 본론

HVDC 변환소에 대한 보호는 크게 교류측 보호 기능, 직류측 보호 기능으로 나누어 질 수 있다. 그림 1은 한 개의

HVDC 극에 대한 배치도를 보여준다. HVDC 설비는 여러 개의 분리된 보호영역이 중첩되게 된다. 그림 1에서 Zone 1은 변환용 변압기에 대한 보호 영역이며, Zone 2는 극에 대한 보호영역이며, Zone 3은 컨버터에 대한 보호영역, Zone 4는 중성선에 대한 보호영역, Zone 5는 송전선로에 대한 보호영역을 나타낸다.

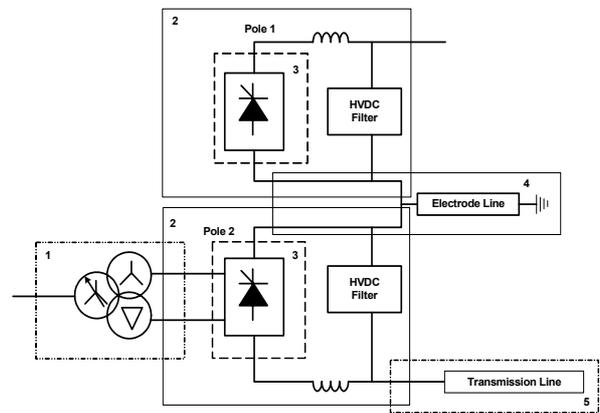


그림 1 HVDC 시스템 보호 구역
Fig. 1 Protection Zone for HVDC system

2.1 교류측 보호기능

HVDC 시스템에 있어서 교류측 보호기능은 일반적인 교류 시스템의 보호기능과 유사하며, 단지 제어시스템에서 제어동작과 함께 직류측 보호와 교류측 보호기능이 협조가 되어서 제어가 이루어진다는 점이 다른 점이다. 그림 2는 HVDC 시스템의 교류측 보호 개략도를 보여준다[2].

* 정 회 원 : 한전전력연구원 선임연구원
† 교신저자, 정회원 : 한전전력연구원 책임연구원
E-mail : cckim@kepri.re.kr
접수일자 : 2010년 7월 29일
최종완료 : 2010년 8월 31일

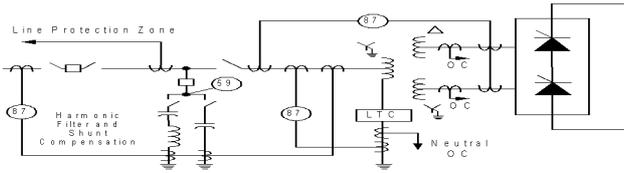


그림 2 교류측 보호 다이어그램
Fig. 2 One-line diagram for AC side protection

2.1.1 변압기 차동 보호

이 보호기능은 변환용 변압기의 내부 고장을 검출하기 위한 것이며, 선로측의 상전류와 밸브측의 상전류를 비교하여서 고장을 검출하게 된다. 변압기가 투입될 때, 트립이 억제 되도록 하기 위해 2차 고조파 제한이 주어진다. 과전류 보호는 이 보호기능의 후비 보호로서 제공되며, 상전류의 측정 은 변환용 변압기의 선로 측에서 이루어진다.

2.1.2 교류측 필터와 커패시터 뱅크 불평형 보호

HVDC 시스템은 유효전력에 비해하여서 무효전력을 흡수 하기 때문에, 대개 무효전력 공급을 위해 큰 커패시터 뱅크 가 필요하게 된다. 이러한 병렬 커패시터 뱅크와 고조파 필터는 과전압 보호 기능을 가져야 한다. 커패시터 뱅크는 고 장난 개별 커패시터 단위의 위치와 개수에 따라 전압 분포 가 달라지게 되는데, 이러한 전압 분포를 검출하게 되며, 심 각한 불균형이 발생되었을 때 알람 신호가 발생하게 된다. 같은 연결 브랜치나 2개의 다른 브랜치에 있는 2개의 커패 시터에서 기본과 전류를 측정하여 비교함으로써 보호동작이 이루어진다.

2.1.3 교류 모션 보호

교류모션은 컨버터에 무효전력 공급하고 고조파 필터를 연결해 주는 역할을 한다. 주 차단기는 모든 모션고장에 대 하여 트립신호를 발생시켜야 한다. 교류 모션에 대한 보호 영역은 변환용 변압기 고전압 권선과 차단기의 전원측의 변 류기사이에 있게 된다. 이 영역은 각 병렬연결의 변류기와 중성점을 사용해 무효전력 공급과 고조파 필터 연결을 하게 된다. 모션 차동릴레이가 보통 이 보호에서 사용된다.

2.2 직류측 보호 기능

HVDC 시스템의 직류측 보호는 양극, 극, 컨버터 레벨에 서의 설비를 포함한다. 보호 동작과 검출에 필요한 다양한 고장 모드와 보호 설비가 존재한다. 직류측 보호기능은 HVDC 시스템에 대해서만 특별히 존재하는 것으로 고조파 공진을 막기 위한 기능인 비대칭 보호(Asymmetry Protection), 정류 실패나 AC측 고장에 의한 과전류를 보호 를 위한 교류/직류 차동 보호(AC/DC Differential Protection), 교류측 과전압/과전류로부터 시스템을 보호하기 위한 기능인 교류 과전압/과전류 보호(AC Overvoltage 및 Overcurrent Protection), 직류측 과전압/과전류로부터 HVDC 시스템을 보호하기 위한 기능인 직류 과전압/과전류 보호(DC Overvoltage/DC Overcurrent Protection), HVDC 시스템이 비정상적인 스위칭 동작을 하는 경우 밸브 스택을

보호하기 위한 기능인 비정상 점호 보호(Abnormal Firing Protection) 등이 있다. 그림 3은 HVDC 시스템의 직류측 보호 기능을 시스템 블록도와 연계하여 나타낸 것이다.

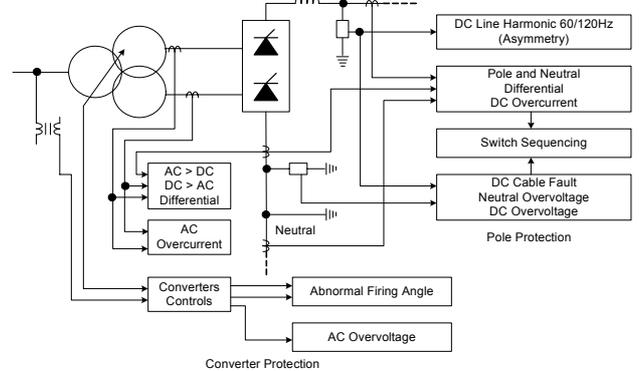


그림 3 HVDC 시스템의 DC측 보호 블록도
Fig. 3 Protection block diagram for HVDC DC side

HVDC 직류측 보호에 사용되는 모델들을 실시간 디지털 시뮬레이션(RTDS, Real Time Digital Simulation) 프로그램을 이용하여 구현하고 그 동작특성을 분석하였다.

2.2.1 교류/직류 차동 보호

교류/직류 차동 보호(AC/DC Differential Protection)에는 크게 2가지 모드가 있는데, 교류측이 직류측보다 높아지는 경우와 직류측이 교류측보다 높아지는 경우이다.

교류측이 직류측보다 높아지는 AC>DC Differential 보호는 밸브의 단락 고장이 발생되면 높은 교류전류와 낮은 직류전류가 발생되며, 이때 교류전류와 직류전류의 차가 설정치 이상이 되면 동작한다. 개발된 모델은 그림 4와 같이 레벨 감지기와 동작시간을 결정하는 타이머로 구성되어있다. AC>DC Differential 보호 동작 설정은 각 결선에 대한 레벨 감지기의 셋팅신호의 OR 조건으로 결정되며 리셋은 AND 조건으로 결정되게 된다.

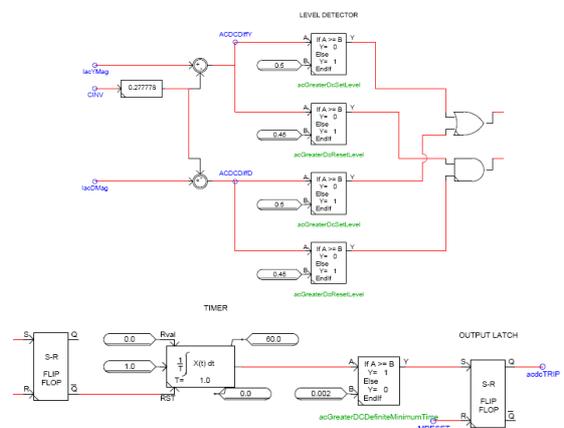


그림 4 AC/DC Differential Protection 모델 구성도
Fig. 4 Model for AC/DC Differential Protection

반면에 직류전류가 교류전류보다 커지게 되는 DC>AC Differential 보호는 12펄스 컨버터에서 발생하는 정류 실패를 검출하고 지속적인 정류 실패의 경우 해당 극을 차단시키게 된다. AC>DC Differential 보호와 반대로 동작하며 여기서 교류전류와 직류전류의 차이가 정류 실패를 의미하게 된다. 일반적으로 HVDC 시스템은 정류 실패로부터 자동으로 회복할 수 있으나 정류 실패가 지속되는 경우에는 제어기의 오동작을 유발할 수 있으므로 지속적인 브리지 고장에 대해서 극을 분리시키게 된다. 개발된 모델은 그림 5와 같이 직류전류와 밸브측 Y결선 및 Δ결선의 계산된 교류전류의 차를 계산하여 레벨 감지기를 통해 정류실패 여부를 판단하고 2개의 타이머를 통해 점호각을 앞당기는 제어 동작 신호(CF_Control)와 지속 정류실패에 대한 보호 신호(dcacTRIP)를 생성하게 된다.

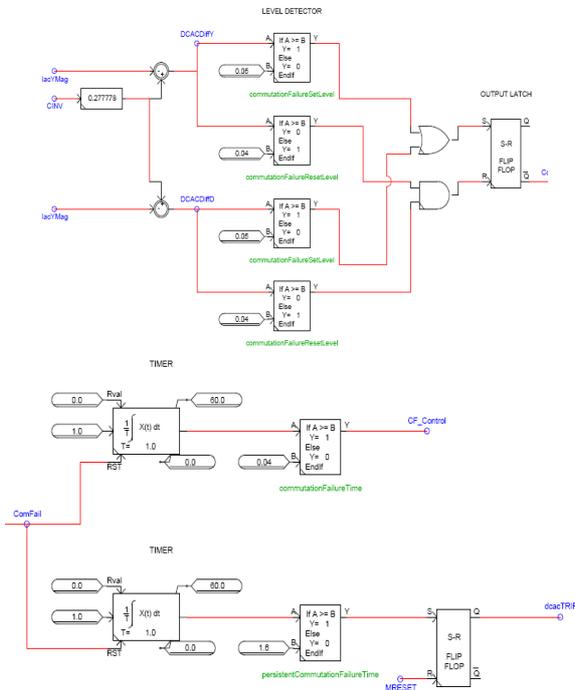


그림 5 DC/AC Differential Protection 모델 구성도
Fig. 5 Model for DC/AC Differential Protection

그림 6은 Y측 밸브 결선에 A상-B상의 상간 단락이 발생한 경우로 그림에서 알 수 있듯이 큰 변화가 없는 직류전류에 비해 단락이 발생한 교류전류는 크게 증가하여 AC>DC Differential이 동작하여 트립이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 교류모선에서 3상 사고가 2.0초 동안 발생하였을 때 DC>AC Differential의 동작결과를 보여준다. 첫 번째 파형은 사고로 인한 직류전류를 나타내며 두 번째 및 세 번째 파형은 Y측 및 Δ측의 계산된 교류전류를 나타낸다. 그리고 네 번째 및 다섯 번째 파형은 직류전류와 각 교류측 전류의 차이를 나타내며 여섯 번째 파형은 점호각을 앞당기는 제어 동작 신호, 일곱 번째 파형은 지속적인 정류 실패를 막는 트립 동작 신호를 나타낸다.

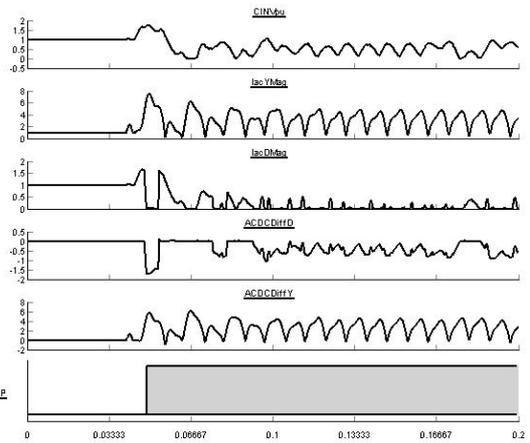


그림 6 AC>DC 차동 보호(Y밸브 권선 A상-B상 단락)
Fig. 6 AC>DC Differential Protection(Y-valve winding AB Short Circuit)

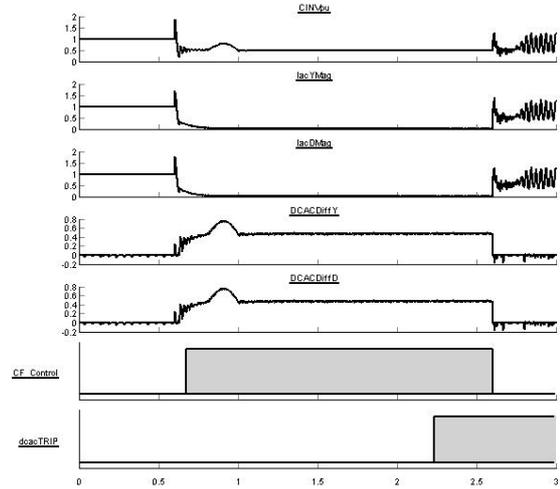


그림 7 DC>AC 차동 보호(AC모선 3상 단락, 2초)
Fig. 7 DC>AC Differential Protection(AC Bus 3-Phase Short Circuit, 2s)

2.2.2 비대칭 보호

비대칭 보호(Asymmetry Protection)는 밸브의 점호실패 또는 정류실패로 인해 야기될 수 있는 DC전압 및 DC전류의 기본 주파수(60Hz) 및 2차 고조파(120Hz) 성분을 감지한다. 측정된 DC전압에서 밴드패스 필터를 이용하여 기본 주파수 및 2차 고조파 성분을 추출하여 실효값을 계산하고 실효값이 설정된 값을 초과하면 보호 기능이 동작하게 된다. 고장이 지속되면 반한시(Inverse time) 특성에 따라 극을 분리하기 위한 보호 신호가 발생하게 된다. 개발된 보호 모델은 그림 8과 같이 직류전압으로부터 60Hz 성분을 추출하는 밴드패스 필터와 추출된 60Hz 성분의 실효치를 계산하는 실효치 계산기, 그리고 계산된 실효치를 통하여 설정치와 비교하여 보호동작 여부를 결정하는 레벨 감지기, 동작시간을 결정하는 적분기 및 비교기로 구성되어 있다.

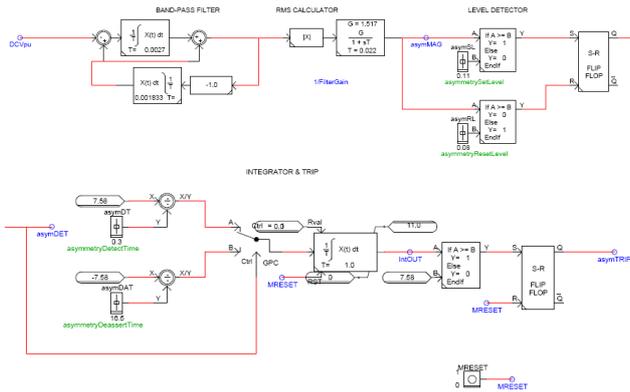


그림 8 비대칭 보호 모델 구성도
 Fig. 8 Model for Asymmetry Differential Protection

여기서, 비대칭 보호 모델에서 사용된 밴드 패스 필터의 주파수에 대한 Gain 특성은 그림 9와 같이 된다.

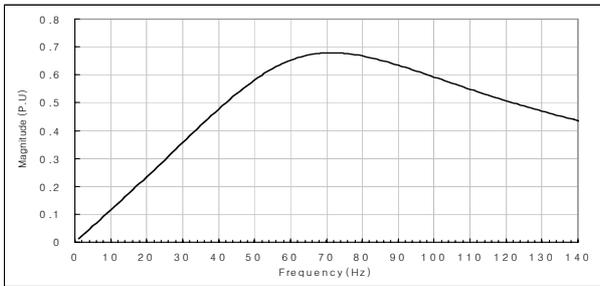


그림 9 밴드 패스 필터의 주파수별 Gain
 Fig. 9 Frequency Gain for Band-Pass Filter

그림 10은 직류측에 기본파(60Hz) 성분이 반복적으로 포함되는 경우를 나타낸다. 이때 초기 교류성분 포함 시에는 지속시간이 트립 설정치에 미치지 못하여 트립이 발생되지 않으나 두 번째 반복시에는 누적치로 인하여 트립이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

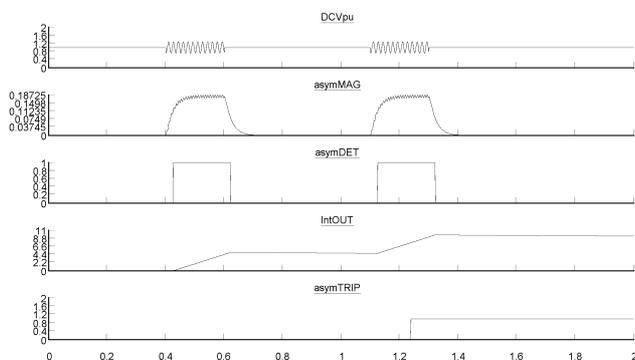


그림 10 비대칭 보호 (60Hz성분:펄스폭:0.2초,시간간격:0.3초)
 Fig. 10 Asymmetry Protection (60Hz:PG:0.2s, Delay:0.3s)

2.2.4 직류 극 차동 보호

직류 극 차동 보호(Pole DC Differential Protection)는 컨버터 직류측과 컨버터 변압기와 밸브 홀 사이의 교류 도체에서 발생하는 지락 사고를 검출한다. 극의 고압 모선에 흐르는 직류전류와 중성 모선에 흐르는 직류전류의 차이로 인해 동작한다. 지락전류의 크기에 따라 높은 레벨과 낮은 레벨의 2가지 레벨의 보호 감도를 가지고 있으며 낮은 레벨에서는 약 30ms의 지연시간을 갖고 동작하며 높은 레벨에서는 약 3ms의 지연시간으로 동작한다. 여기서 지연시간은 HVDC 가압 시 케이블의 충전 전류에 의해 발생하는 불균형에 의한 오동작을 방지하기 위한 목적이다. 그림 11은 개발된 직류 극 차동 보호 모델을 나타낸 것이다.

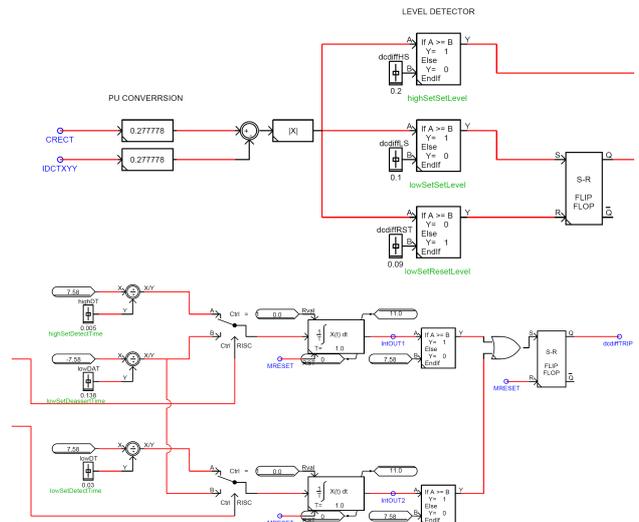
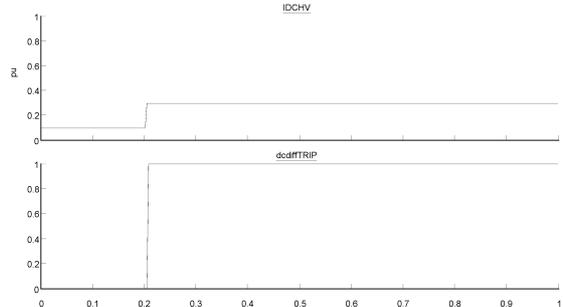


그림 11 DC Pole Differential Protection 모델 구성도
 Fig. 11 Asymmetry Protection

그림 12(a)는 고압 및 중성점 전류의 차이를 고 레벨 설정치인 0.2pu 이상으로 인가하였을 경우이며 그림 12(b)는 저 레벨 설정치인 0.1pu 이상으로 인가하였을 경우를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 고 레벨 설정치 이상을 인가하였을 때에는 0.005초에 트립 신호가 발생하고 저 레벨 설정치 이상으로 인가하였을 때에는 0.03초에 트립 신호가 발생하게 된다.



(b) Difference : 0.0pu → 0.2pu

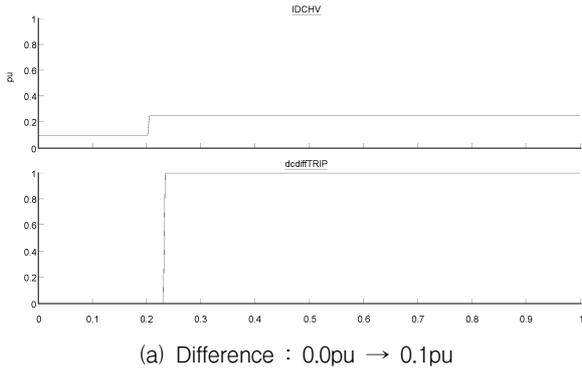


그림 12 직류 극 차동 보호
Fig. 12 Pole DC Differential Protection

2.2.5 교류 저전압 보호

교류 저전압 보호(AC Undervoltage Protection)는 교류시스템의 선간전압을 감시하고 싸이리스터 밸브 점호 회로(VBE, Valve Base Electronic)에 싸이리스터 게이트 유닛 충전 상태를 유지하기에 충분한 전압상태를 알려준다. 만일 극이 운전 준비 상태에서 교류전압이 설정된 시간 동안 너무 낮은 전압으로 유지되면 교류 저전압 보호는 극을 차단시키고 차단기를 트립시키게 된다.

그림 13은 개발된 교류 저전압 보호 모델을 보여준다.

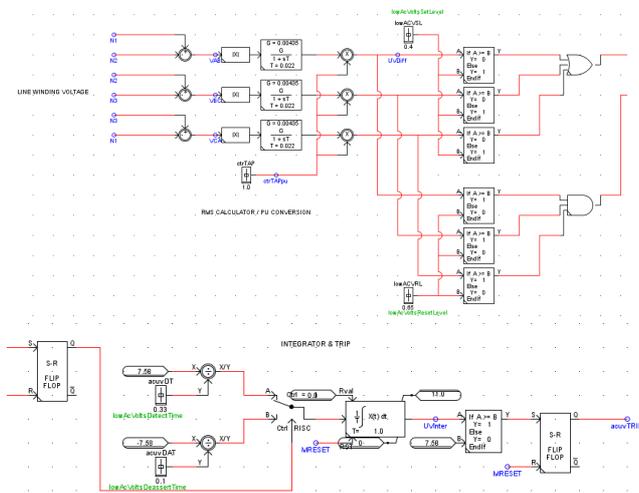


그림 13 AC Undervoltage Protection 모델 구성도
Fig. 13 Model for AC Undervoltage Protection

그림 14는 반복적인 저전압 상태가 발생되었을 경우를 나타내며 이때에는 지속 시간을 확인하는 적분기의 누적치로 인하여 트립 신호가 발생된다.

전압이 설정치 이하로 하락하면 저전압 상태가 설정되며 이때부터 지속 시간 확인을 위하여 적분기 출력이 상승하게 된다.

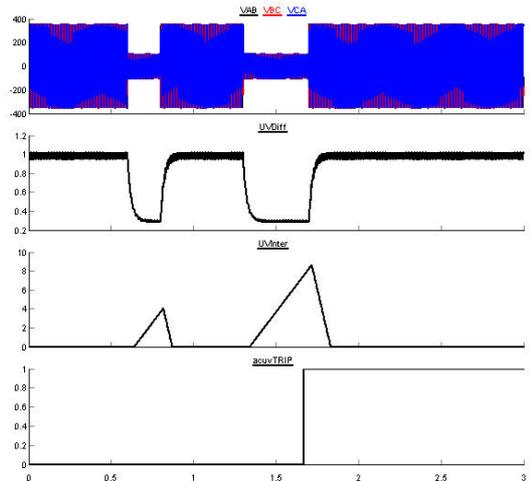


그림 14 교류 저전압 보호(AC Bus Fault, UVDiff:1.0→0.3)
Fig. 14 AC UnderVoltage Protection(AC Bus Fault)

2.3 컨버터 고장 모의 시뮬레이션

본 논문에서 개발한 보호 모델의 성능 검증을 위하여 그림 15와 같은 RTDS HVDC시스템 모델을 이용하여 HVDC 컨버터에 대하여 3가지의 고장을 모의하고 보호 모델의 동작 여부를 확인하였다. 본 고장 케이스에 대한 모의 조건은 200MW Bipole 운전중에 고장을 일으킨 경우를 모의한 것이다.

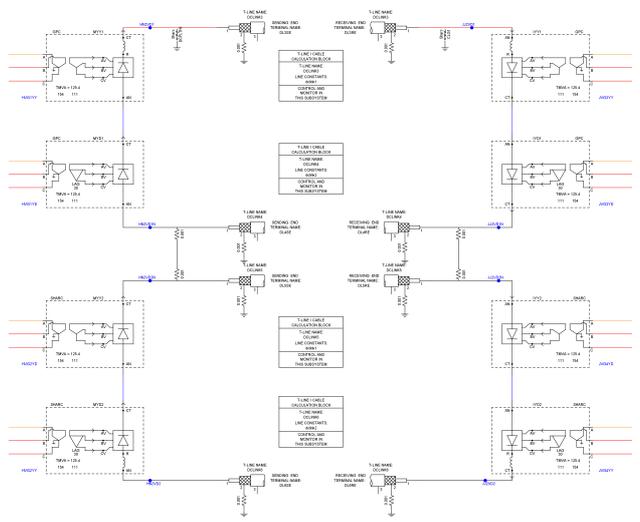


그림 15 고장모의를 위한 사용된 RTDS HVDC 시스템 모델
Fig. 15 HVDC System RTDS Model for Fault Study

2.3.1 싸이리스터 밸브측 단락 사고 모의

싸이리스터 밸브 단락 사고는 그림 16(a)와 같이 극의 교류측의 지락 사고가 발생한 경우로 이때 동작 할 수 있는 보호동작은 직류 극 차동보호, 교류 과전류 보호 등이 있다.

그림 16(b)에서 첫 번째 파형에서 고압측 직류전류(JJ2ID1)가 중성점 직류전류(JJ2ID1D)와 차이가 발생하는 것을 알 수 있고 두 번째 파형에서 교류측 지락고장으로 인해 직류전압이 큰 폭으로 감소함을 알 수 있다. 그리고 세

번째 파형에서 Y측 교류 등가전류와 D측 교류 등가전류가 모두 증가함을 알 수 있다. 따라서, 이 경우에는 직류 극 차단 보호(dcdiffTRIP) 및 교류 과전류 보호(ACOCTRIP), AC>DC Differential보호(acdcTRIP)가 동작한 것을 확인할 수 있다.

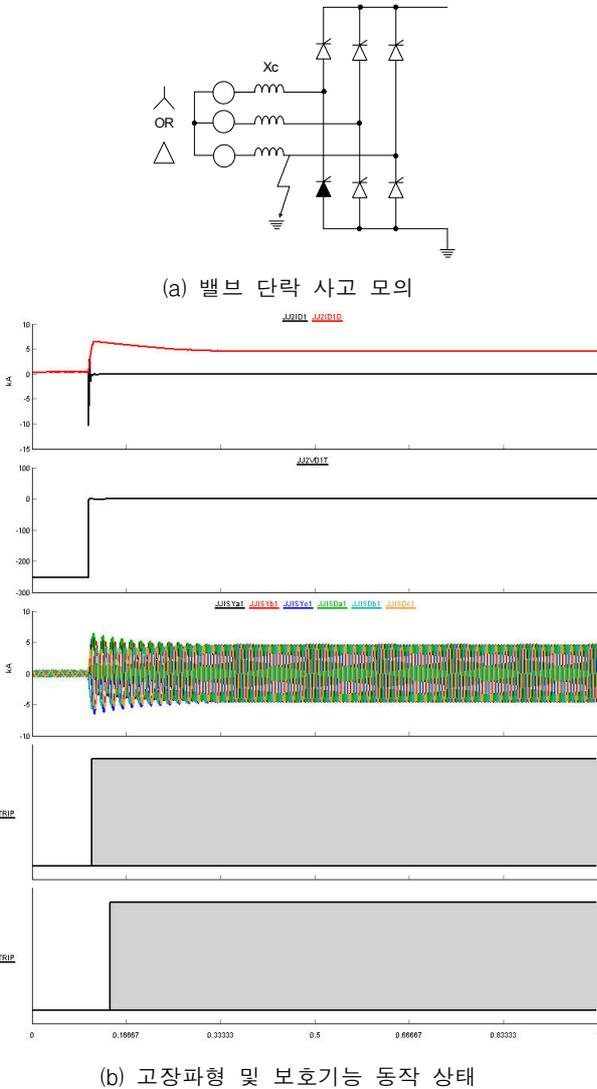


그림 16 밸브 단락 사고 모의
Fig. 16 Valve Short-Circuit Fault

2.3.2 싸이리스터 브리지 단락 사고 모의

브리지 단락 사고는 그림 17(a)와 같이 극의 고압 직류측과 브리지 중심점에 단락 사고가 발생한 경우로 이때 동작할 수 있는 보호 동작은 직류 극 차단 보호, 교류 과전류 보호 등이 있다. 그림 17(b)에서 첫 번째 파형에서 사고 순간에 고압측 직류전류(JJ2ID1)가 중성점 직류전류(JJ2ID1D)와 차이가 발생하는 것을 알 수 있고 두 번째 파형에서 브리지측 단락고장으로 인해 직류전압이 약 50%로 감소함을 알 수 있다. 그리고 세 번째 파형에서 Y결선의 교류전류 및 Δ결선의 교류전류가 사고 순간에 증가하였다가 이후에 원래 크기로 감소함을 알 수 있다. 따라서 이 경우에는 직류 극 차단

보호(dcdiffTRIP) 및 AC>DC Differential보호(acdcTRIP)가 동작한 것을 확인할 수 있다.

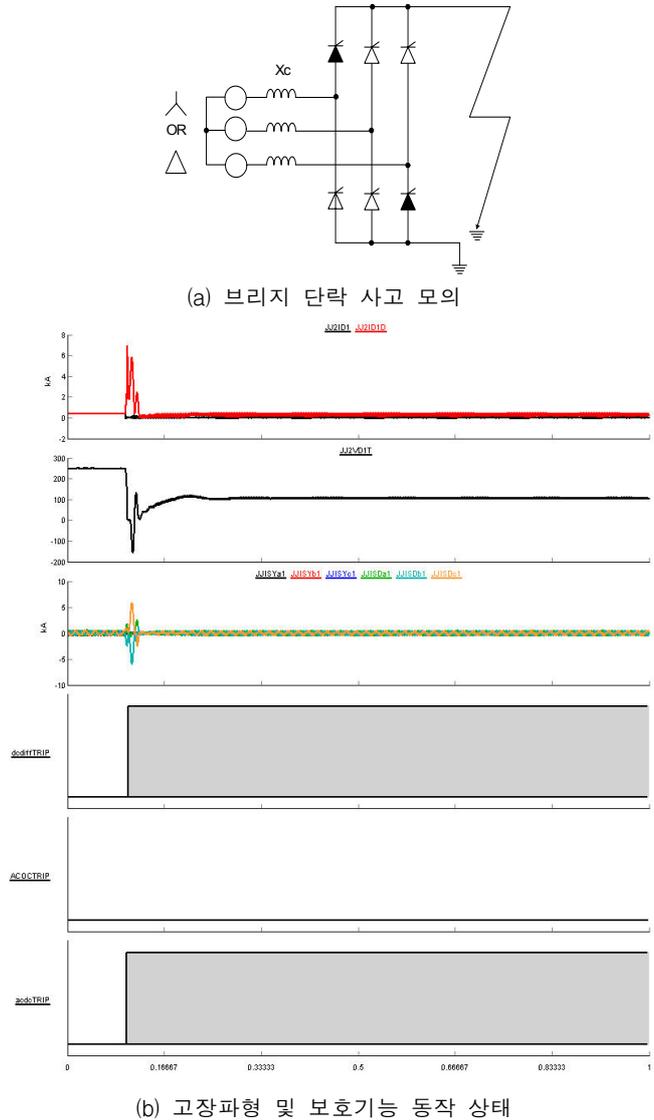
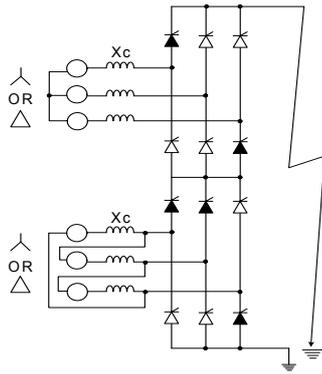


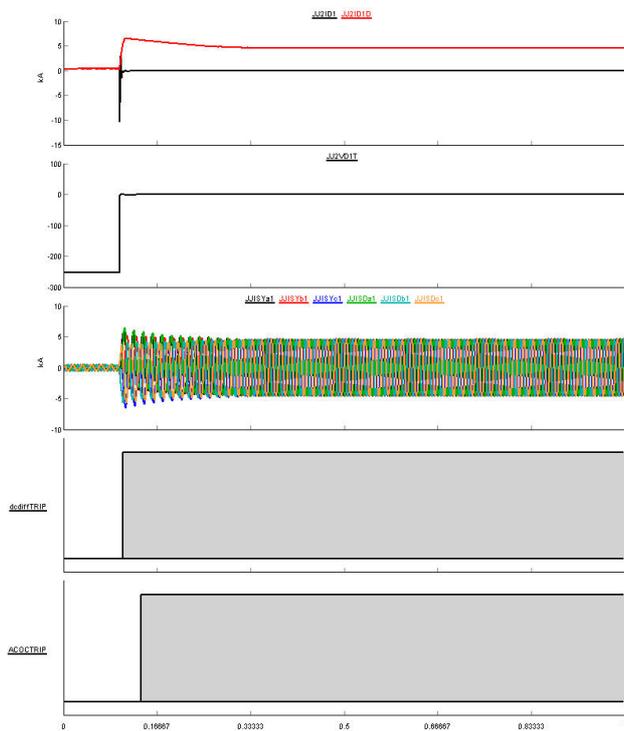
그림 17 브리지 단락 사고 모의
Fig. 17 Bridge Short-Circuit Fault

2.3.3 컨버터 단락 사고 모의

컨버터 단락 사고는 그림 18(a)와 같이 극의 직류측의 단락 사고가 발생한 경우로 이때 동작할 수 있는 보호동작은 직류 극 차단 보호, 교류 과전류 보호, 직류 저전압 보호 등이 있다. 그림 18(b)에서 첫 번째 파형상에서 고압측 직류전류(JJ2ID1)가 중성점 직류전류(JJ2ID1D)와 차이가 발생하는 것을 알 수 있고 두 번째 파형에서 직류측 단락고장으로 인해 직류전압이 0으로 감소함을 알 수 있다. 그리고 세 번째 파형에서 Y결선의 교류전류(JJISYa1, JJISYb1, JJISYc1) 및 Δ결선의 교류전류(JJISDa1, JJISDb1, JJISDc1)가 모두 사고 이후에 큰 폭으로 증가하여 직류 극 차단 보호(dcdiffTRIP) 및 교류 과전류 보호(ACOCTRIP)가 동작한 것을 확인할 수 있다.



(a) 컨버터 단락 사고 모의



(b) 고장파형 및 보호기능 동작 상태

그림 18 컨버터 단락 사고 모의
Fig. 18 Converter Short-Circuit Fault

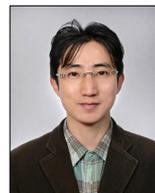
3. 결 론

HVDC시스템은 기존의 교류시스템과 다르게 별도의 직류측 보호시스템을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 보호시스템에 대한 각 보호 모델을 RTDS프로그램을 이용하여 구현하고 그 동작특성을 검증하였다. 아울러 개발된 모델들을 RTDS용 HVDC시스템에 적용하여 시스템 모의 고장을 통해 시스템 운용특성에 대하여도 검증을 수행하였다. 본 논문에서 개발된 보호 모델들은 향후 HVDC 시스템에 대한 제어 알고리즘 개발에 활용될 예정이다.

참 고 문 헌

[1] Melvold, D. J., and T. Sumi, "The Proposed Southern California-Intermountain Power Project HVDC Transmission System," Symposium Record, "Incorporating HVDC Power Transmission Into System Planning," U. S. Department of Energy, Phoenix, AZ, March 24-27, 1980, pp. 237-253.
 [2] P.M Anderson, "Power System Protection," McGRAW-HILL, IEEE PRESS
 [3] C. K. Kim, V. K. Sood, G. S. Jang, "HVDC Transmission power conversion application in power systems", IEEE PRESS, WILEY, 2009

저 자 소 개



이 성 두 (李性斗)

1973년생, 1996년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 현재 한전전력연구원 선임연구원.

Tel : (042) 865-5825

E-mail : joyful@kepri.re.kr



김 찬 기 (金燦起)

1968년생, 1996년 중앙대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사), 1996년 전력연구원 입사, 현재 한전전력연구원 책임연구원.

Tel : (042) 865-5837

E-mail : ckkim@kepri.re.kr