

수력발전소 소내계통 보호협조 개선 방안 도출에 관한 연구

이장현, 정대현, 박수향, 김보영

한국수력원자력 청평수력발전소

A Study on Deriving Improvement Measures for Protection Coordination in Hydroelectric Power Plant

Jangheon Lee, Daehyeon Jung, Suhyang Park, Boyeong Kim

Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd, Cheongpyeong Hydro Power Plant

1. 서 론

수력발전소의 소내계통은 발전기, 주변압기, 냉각수 펌프, 수문(Gate) 제어설비 등 핵심 설비의 구동을 위한 전력을 공급하는 발전소의 심장과도 같은 신경망이다. 이러한 소내계통에서 단락(Short-circuit)이나 지락(Ground fault)과 같은 전기적 사고가 발생할 경우, 해당 고장 구간을 신속하고 정확하게 분리하지 못하면 사고가 상위 계통으로 파급되어 발전소 전체의 정전(Black-out)을 유발할 수 있다. 따라서 다양한 전압 계층(13.8kV, 11kV, 440V, 220V)에 설치된 차단기(CB)와 보호계전기 간의 동작 시간 및 동작 전류를 단계적으로 설정하여 사고 구간만을 선택적으로 차단하는 ‘보호협조(Protection Coordination)’ 체계의 최적화는 발전소의 안정성 확보를 위한 최우선 과제가 된다.

본 연구는 한국수력원자력(주) 청평수력발전소 1~3호기 및 4호기의 소내계통 보호계전기 정정 사례를 중심으로, 기존 소내계통 보호방식이 내포하고 있던 기술적 한계와 오동작 리스크를 분석하고 이를 해결하기 위한 실무적인 보호협조 개선 방안을 제시하는 데 그 목적이 있다. 특히 고장전류 계산 결과를 바탕으로 계전기 간의 보호 맹점을 극복하는 교차커브 기법, 막대한 고장전류로 인한 변류기(CT)소손 가능성 및 이에 따른 보호 역할 이관, 비상발전기(EDG)의 열적 한계 보호, 그리고 비접지 및 직접접지 계통의 지락 사고 감지 최적화 방안을 중점적으로 분석 및 고찰하고자 한다.

2. 본 론

2.1 이론적 배경 및 검토 기준

2.1.1 고장전류 계산 기준

보호계전기의 정확한 정정을 위해서는 전력계통의 정확한 고장전류 산출이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 KS C IEC-60909 기준에 따라 고장전류를 계산하였다[1]. 주요 산출 인자로는 차단기의 정격투입용량 선정에 적용되는 고장 발생 직후의 비대칭 피크 단락전류(I_p), 케이블 굵기 검토 및 보호계전기 순시 정정에 적용되는 초기 대칭 단락전류($I_{k''}$), 그리고 일정 시간 경과 후의 대칭 단락전류(I_k)가 있다. 계산 과정에서는 발전기, 전동기, 한전 계통 등 모든 단락전류 기여분을 고려하였으며, 회전기의 경우 차파도 리액턴스(X_d')를 적용하여 보수적인 고장전류를 산정하였다.

2.1.2 보호계전기 간 시간 협조 기준 (CTI)

상하위 보호기기 간의 오동작을 방지하기 위해서는 적절한 협조 시간차(CTI, Coordination Time Interval)를 확보해야 한다. 계전기의 특성에 따라 차단기 개방 시간(Circuit Breaker Opening Time, 0.08초), 계전기 오버트래블(Relay Overtravel, 0.00~0.10초), 여유율(Safety Factor, 0.12~0.17초)을 합산하여 산정된다. 본 발전소에 적용된 정밀한 Static(디지털) 계전기의 경우 현장 교정(Calibration)을 거쳤다는 전제하에 총 CTI를 0.20초로 적용

하여 보호협조 곡선의 신뢰성을 확보하였다.

2.2 소내계통 구성 및 고장전류 특성 분석

2.2.1 계통 구성 및 부하 특성

청평수력발전소는 1~3호기와 증설된 4호기로 구성되어 있다. 1, 2호기는 각각 19.8MW (22MVA) 용량이며, 3호기는 40.5MW (45MVA)의 출력을 낸다. 4호기는 가장 큰 60MW (66.7MVA) 용량의 발전기를 운영 중이다. 소내 전력 공급을 위한 소내변압기(HTR)는 1~3호기의 경우 11/0.44kV (750kVA) 강하 변압기를 사용하며, 4호기는 13.8/0.44kV (750kVA) 강하 변압기를 사용한다. 각 하위 계통에는 440V/220V 강하용 LTR 변압기(1~3호기: 500kVA, 4호기: 250kVA)가 상용 및 예비로 구성되어 있다.

2.2.2 고장전류 산출 결과

위 데이터를 바탕으로 ETAP 프로그램을 활용해 도출한 고장전류 특성은 계통의 전압별로 판이한 양상을 보였다 [4], [5].

○ 1~3호기 계통: 440V 주모선(Bus_LV-M1)의 3상 초기 대칭 단락전류($I_{k''}$)는 21.437kA로 산출되었으며, 220V 모선(Bus_LV-M7)에서는 16.682kA로 나타났다. 이는 설치된 기중차단기(ACB, 50kA/65kA 정격)의 차단 용량을 충분히 만족하는 수치이다.

○ 4호기 계통: 440V 모선의 3상 단락전류($I_{k''}$)는 20.004kA, 220V 모선은 9.226kA로 산출되어 이 역시 차단기 정격 이내의 안전한 수치로 확인되었다.

○ 4호기 13.8kV 측 특이사항: 가장 중대한 문제는 4호기의 13.8kV HTR 1차 측 모선에서 발생했다. 이곳의 3상 단락전류는 무려 36.719kA에 달하는 것으로 계산되었다. 반면, 이 구간에 설치된 CT(변류기)의 정격은 50/5A에 불과했다. 이처럼 막대한 단락전류(CT 정격의 약 734배)가 유입될 경우, CT는 과전류 강도 한계를 초과하여 철심이 즉각적으로 포화될 뿐만 아니라 물리적인 소손이 확실시된다.

2.3 단락 보호협조의 문제점 및 개선 방안

기존 소내계통의 보호방식을 시뮬레이션한 결과, 상위 ACB와 하위 MCCB 간에 보호 곡선이 교차하거나 단락 전류를 계전기가 견디지 못하는 등 여러 취약점이 발견되었다. 이를 해결하기 위해 다음과 같은 실무적 정정 개선안을 적용하였다.

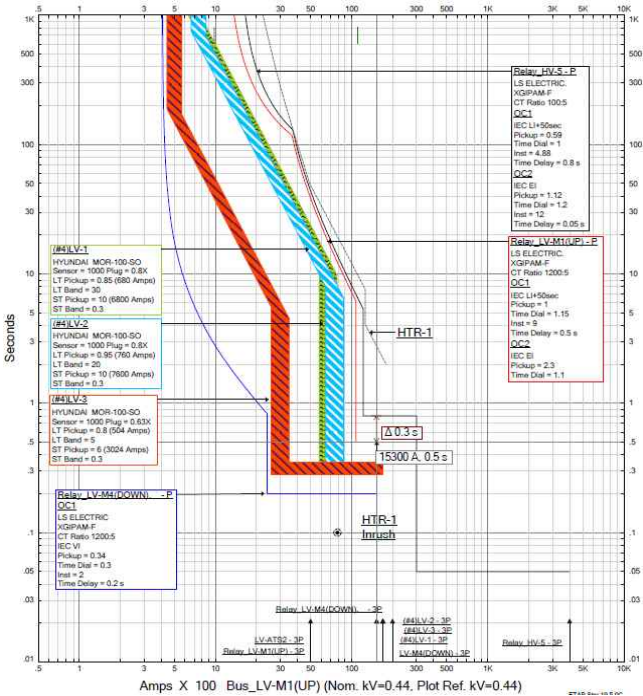
2.3.1 교차커브 적용 및 ACB 자체 Trip 요소 배제

일반적으로 과전류 보호는 반한시 특성(전류가 클수록 빨리 동작)을 가진다. 그러나 기존 세팅에서는 과부하 영역(과전류가 비교적 적은 구간)에서 상위 HTR 2차 440V Main ACB(디지털 계전기)의 곡선이 하위 부하 분전반의 MCCB 동작 곡선보다 아래에 위치하는 현상(보호 겹침)이 발생했다. 이 경우, 하위 부하에서 사고가 발생해도 상위 Main ACB가 먼저 동작하여 소내 전체가 정전되는 치명적인 결과가 초래된다.

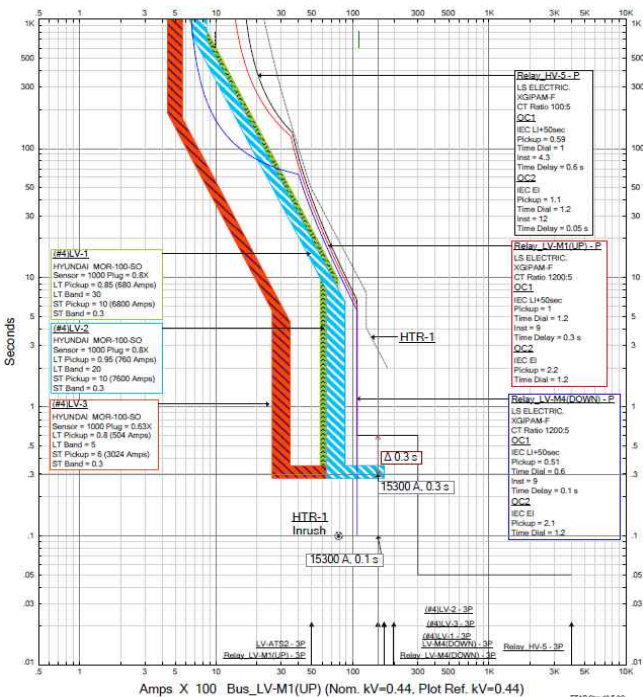
이를 근본적으로 해결하기 위해 LS ELECTRIC의 X-GIPAM F 디지털 보호계전기가 제공하는 ‘설정 1’과 ‘설정 2’ 다중 세팅 기능을 교차 적용하여 교차커브(Intersection Curve)를 적용하였다. 과부하 영역에서는 설정 1(장기지연 특성, IEC-LI 곡선)을 적용

하여 하위 MCCB보다 느리게 동작하도록 상향 조정하고, 단락 사고 영역에서는 설정 2(강방한시 특성, IEC-EI 곡선)를 적용하여 신속히 차단하도록 구성함으로써 전 영역에 걸친 완벽한 보호협조를 구현하였다.

또한, 기존에는 변압기(HTR)의 열적 한계 특성 곡선과 협조 대상 MCCB의 동작 특성 곡선 사이의 갭(여유)이 매우 협소하여 ACB 자체의 Trip Device 오차로 인한 불필요한 차단 가능성이 컸다. 이에 따라 ACB에 내장된 자체 Trip 기능은 전면 OFF 처리하고, 오직 정밀한 외부 디지털 보호계전기(X-GIPAM F)의 접점 신호만으로 차단기를 제어하도록 신뢰성을 격상시켰다.



<그림 1> 조치 전 보호협조 곡선



<그림 2> 조치 후 보호협조 곡선

2.3.2 큰 단락전류에 대비한 50H 요소 소거 및 보호 역할 이관
앞서 산출된 4호기 13.8kVHTR 1차 측의 3상 단락전류(36.719kA)는 50/5A 정격의 CT를 확실하게 소손시키는 수준이다. 기존 보호 체계에서는 이 구간의 단락을 신속하게 보호하기 위해 해당 차단기의 순시과전류(50H) 계전 요소를 활성화해 두고 있었다. 그러나 CT가 포화 및 과손되는 조건에서는 계전기가 정상적인 2차 전류를 계속할 수 없어 오동작하거나 아예 동작하지 않는 현상이 발생한다.

이에 따라 전력거래소(KPX)의 검토 결과와 본 연구의 분석을 종합하여, 해당 구간의 순시과전류 보호요소(50H)를 과감하게 '사용 불가(OFF)'로 설정하였다. 단락 사고에 대한 보호의 공백이 우려될 수 있으나, 13.8kV 모선에서 단락 사고가 발생할 경우 상위의 주변압기 보호계전기인 비율차동계전기(87T)가 이를 내부 고장으로 인지하여 발전기 유닛 전체를 안전하고 신속하게 트립시키도록 단락 보호 역할을 상위로 완벽하게 이관하였다. 이를 통해 기기 소손을 막고 보호의 신뢰성을 유지할 수 있었다.

2.3.3 하위 부하 MCCB 용량의 최적화 제안

4호기 220V 강하 변압기(LTR) 후단에 연결된 피더 차단기(LV-6, 7, 8)의 경우, 실제 연결된 부하 용량(약 51~123kVA)에 비해 과도하게 큰 800A 및 600A 프레임의 MCCB가 설치되어 있었다. 이로 인해 220V 말단에서 단락 사고가 발생했을 때, 해당 MCCB가 순시 영역에서 신속히 동작하지 못하고 상위의 LTR 2차 Main ACB가 동작하는 시간대(약 0.3초)와 겹치는 현상이 시뮬레이션 곡선 상에서 드러난다.

이를 방지하기 위해 현재 800A 정격인 MCCB를 부하 전류에 적합한 400A 수준으로 교체(Downsizing)할 것을 강력히 제안하였다. 차단기 용량을 줄이면 보호 동작 곡선이 좌측으로 이동하게 되어, 사고 발생 시 하위 MCCB가 0.05초 이내에 상위 계전기보다 무조건 먼저 동작(순시 트립)하게 되므로 상하위 보호협조가 완벽히 성립된다.

2.3.4 연계(TIE) 선로의 불필요한 트립 방지

1~3호기 측 440V 모선과 4호기 440V 모선 사이에는 비상시 전원을 융통하기 위한 연계 차단기(LV-ATS-2)가 설치되어 있다. 이 연계 라인에는 400sq 규격의 케이블이 포설되어 있는데, 이 케이블의 허용 전류(616A) 한계치로 인해 차단기의 보호 세팅을 과감하게 높일 수 없는 한계가 있었다. 그 결과 4호기 측에 단락 사고가 발생했을 때 하위 부하 분전반의 MCCB보다 연계 차단기(LV-ATS-2)의 보호 계전기가 먼저 동작해버리는 교차 현상이 발생했다.

이 차단기가 떨어지면 4호기 전체가 비상 전원을 잃게 되는 심각한 정전 상태에 빠지게 된다. 따라서 연계 차단기는 4호기의 Main ACB로서의 역할을 원활히 수행할 수 있도록 해당 차단기 자체의 과전류 보호 요소를 OFF 처리하여, 외부 고장으로 인한 불필요한 차단과 정전 파급을 차단하였다.

2.4 지락 사고 및 비상발전기(EDG)보호 최적화 방안

2.4.1 비상발전기(EDG) 보호 및 돌입전류 오동작 대책

소내 정전 시 가동되는 440V 비상발전기(EDG)는 정상 운전 시 한전 계통으로부터 유입되는 고장전류에 비해 자체 제공하는 단락전류가 현저히 작다. 1~3호기 EDG의 경우 3상 단락전류가 약 7.906kA에 불과하다. 이처럼 작은 고장전류로는 하위 MCCB를 순시 동작시키기 어려워 보호협조를 구성하는 것이 물리적으로 불가능하다.

따라서 비상 운전 시에는 부하와의 보호협조보다는 '비상발전기 자체의 소손을 방지'하는 것을 보호의 최우선 목표로 삼았다. 발전기 고정자의 열적 한계(Stator Damage Curve)를 분석하여, 발전기 허용 한계 시간 이내에 차단기가 무조건 트립되도록 재조정하였다.

또한, 비상발전기를 통해 440V/220V 강하 변압기(LTR)에 전원을 투입할 때 순간적으로 변압기 여자 돌입전류(Inrush Current)가 발생하여 발전기 운전반이 단락 사고로 오인하고 오동작 트립되는 현상이 우려되었다. 안정적인 전원 복구를 위해 발전기 투입

직전에는 발전기만의 단기지연요소(STD, Short Time Delay)를 일시적으로 OFF 상태로 설정하고, 투입 후 계통 전압이 안정화된 이후에 다시 ON으로 전환하여 발전기 근거리 사고를 순시 보호하도록 운영 절차(Sequence)를 확립하였다.

2.4.2 비접지 및 직접접지 계통의 지락 사고 감지력 향상

청평수력의 440V 계통은 비접지 방식(Δ 결선)으로 운영된다. 비접지 방식은 1선 지락 사고 시 고장전류의 귀로가 없어, 대지 정전용량에 의한 미세한 충전전류(Charging Current)만이 흐른다. 케이블 스펙과 정전용량($C = 0.02413\epsilon_r / \log_{10}(R/r)$)을 바탕으로 계산한 결과, 1~3호기 계통은 약 0.318A, 4호기 계통은 약 0.335A의 극히 미미한 지락전류만이 흐르는 것으로 나타났다.

이렇게 미세한 전류로는 일반적인 과전류 지락계전기(51N)나 영상변류기(ZCT)를 통해 고장 위치를 선별해 차단하는 것이 불가능하다. 또한 지락 시 영상전압($3V_0$)이 해당 버스 전체에 동일하게 상승하는 특성이 있다.

이를 보완하고 감지력을 극대화하기 위해, 접지형 계기용 변압기(GPT)를 통해 영상전압을 감지하는 지락과전압계전기(59G, OVGR)를 주 보호 요소로 적극 활용하였다. 지락 발생 시 59G 요소가 57V 이상에서 최우선으로 0.1초 만에 선동작하여 알람을 띄우거나 차단하도록 설정하였으며, 이와 더불어 저전압/과전압(27/59) 요소를 후비 보호로 구성하여 지락 인지 속도와 시스템 신뢰성을 이중으로 높였다.

반면, 1~3호기의 220V 계통은 직접접지 방식을 채택하고 있음에도 불구하고 기존 세팅에서 지락 보호 요소가 누락되어 있었다. 이를 시정하기 위해 잔류회로(Residual) 방식의 지락과전류 보호(51N) 요소를 정정치에 새롭게 추가하였다. 변압기 정격의 약 50% 수준에서 동작하도록 설정하여, 하위 부하 측에서 지락 보호에 실패하더라도 상위 Main ACB에서 확실한 후비 보호 차단이 이루어지도록 계통의 안전망을 촘촘히 보강하였다.

3. 결 론

수력발전소 소내계통의 운전 신뢰성 향상을 위해서는 확실적인 계전기 세팅을 탈피하고, 각 전압 계층과 설비의 특성(단락전류의 크기, 변류기의 포화 한계, 접지 방식, 비상발전기의 특성 등)을 면밀히 분석한 보호협조 세팅이 필수적이다.

본 연구에서는 청평수력발전소 1~4호기의 실제 데이터를 바탕으로 다음과 같은 개선 방안을 도출하였다.

1. 디지털 계전기의 다중 세팅을 활용한 교차커브(Intersection Curve) 적용 및 차단기 자체 Trip 기능의 전면 배제를 통해, 과부하와 단락 사고 전 영역에서 상·하위 기기 간의 완벽한 시간적/전류적 보호협조를 달성하였다.
2. 막대한 고장전류(36.7kA)로 인해 CT 소손이 예상되는 13.8kV 구간은 50H 요소를 과감히 OFF 하고 주변압기 87T로 보호 역할을 이관하여 오동작과 2차 피해를 방지하였다. 아울러 하위 계통의 가스팩 MCCB 용량을 축소하여 물리적인 보호협조 계적을 정상화하였다.
3. 고장전류가 적은 비상발전기(EDG) 운전 시에는 발전기 고정자의 열적 한계 보호를 최우선으로 하였으며, 돌입전류로 인한 오동작을 막기 위해 계전기 지연요소의 운영 절차를 개선하였다.
4. 지락 사고 시, 비접지 계통은 지락과전압(59G) 계전기를 선동작 시켜 미세한 충전전류 사고를 즉각 판별하고, 직접접지 계통은 51N 요소를 신규 추가하여 확실한 후비 보호망을 구축하였다.

본 연구를 통해 도출된 소내계통 보호협조 개선 기법을 통해 향후 타 수력발전소 및 대규모 산업용 플랜트의 전력계통 신뢰성 확보와 정전 사고 예방을 위한 중요한 엔지니어링 가이드라인으로 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국표준협회, “KS C IEC 60909-3”, 2025
- [2] LS산전, “X-GIPAM F O&M Manual”, 2006
- [3] IEEE, “IEEE Std242-2001, 보호계전기간 시간 협조 기준”, 2001
- [4] (주)파워토스, “#1~3호기 소내계통 보호계전기 정정보고서”, 2025
- [5] (주)파워토스, “#4호기 소내계통 보호계전기 정정보고서”, 2025