

정전기 화재로 인한 원전 주변압기 손상사례

이 상 현 | 원성 프로젝트팀 과장

1. 개요

1980년대 초반 이후 정전기에 의한 것으로 추정되는 변압기 고장이 전 세계적으로(원자력 분야와 기타 분야를 포함) 20건 이상 있었다. 이 사고는 서로 다른 공급자가 제조하고 여러 가지 분야에서 사용한 외철형(Shell-form)과 내철형(Core-form) 변압기 모두에서 발생하였다.

2. 사고 요약

열교환기, 펌프와 변압기 권선의 절연물질은 순환하는 절연유가 이온화됨에 따라 변압기 내부에는 정전하가 축적된다. (-)이온은 권선의 절연물질, (+)이온은 변압기함 내부에 있는 절연유에 모인다. 이 전하들은 높은 전위 차로 축적될 때 변압기 냉각용 절연유를 통하여 방전된다. 이러한 직류 방전은 절연유의 성질과 코일의 절연성능을 파괴시키고, 변압기 권선 사이에 교류 절연 파괴(플래시오버)를 일으켜서 결국 변압기가 파

손된다.

대형 전력용 변압기는 냉각용 절연유를 강제 순환시킨다. 이 절연유는 권선으로부터 열전도성능을 향상시키고 고온으로 인하여 코일과 절연물질이 열화되지 않도록 한다. 냉각설비는 변압기의 폭넓은 부하범위와 주위 환경에서도 작동하고 일부 환경에서는 더 큰 냉각용량이 필요할 수 있다. 비교적 저온이고 유속이 빠른 절연유는 정전기가 발생하기 쉽다.

대표적으로 절연유 강제순환 및 공기냉각식 변압기의 외부 냉각설비는 절연유펌프 1대, 열교환기 1대, 냉각팬 여러 대로 구성되어 있다. 이러한 변압기는 외부 냉각설비가 몇 개의 그룹으로 되어 있다. 냉각용 절연유는 변압기함의 최상부로 유입되어서 강제 공기냉각식 열교환기를 통과한 후 변압기 권선을 거쳐서 변압기함의 최하부로 유출된다. 하나 이상의 냉각그룹은 냉각용 탱크를 보충할 수 있다. 작동중인 많은 냉각 그룹/탱크는 변압기 내부에 축적될 수 있는 정전기에 의한 전위에 직접 영향을 미친다.

변압기에서 가장 고온인 권선의 온도는 직접 측정할 수 없고, 변압기함 내부의 냉각유 절연유에 설치된 열전대에 의해서 알 수 있다. 이 열전대와 가장 가까운 가열기는 “고온(Hot Spot)” 권선의 온도에 대한 하중의 영향을 모의시험하기 위하여 변압기의 부하부담을 기초로 출력을 변화시킨다.

결과적으로, “고온” 권선 열전대의 출력은 냉각유 절연유의 온도변화뿐 아니라 변압기의 부하 변동에 의해 변화한다. 열전대 출력은 “고온 권선”으로 표시되고 변압기 냉각유 탱크의 작동을 미리 정해진 절차에 적합하게 제어하는데 사용한다.

가. PAIO VERDE 원자력발전소

(1) 사고 설명

발전기용 주변압기(원자로 1호기당 3대)는 Westinghouse 전기회사가 제조하였고, 발전기의 제원은 단상, 외철형, 511MVA, 22.8/525kV이다. 이 변압기는 각각 3개의 냉각그룹으로 구성된 냉각유 탱크 2개에 의한 절연유 강제순환 및 공기냉각식으로 설계되어 있다. 사고 당시 3개의 냉각그룹은 제조자가 명시한 것과 같이 변압기를 냉각시키고 있었다.

전력공급 정지기간 후 운전을 시작하는 중, 원자로는 정격 전력의 11%에 도달하였고 주 변압기는 전력계통에 104MWe로 동기화되었다. 주 변압기의 권선온도는 정상 작동온도보다 낮았고, 절연유의 온도는 10~15℃로 매우 낮았다. 터빈/발전기는 주 제어실에서 경보신호를 수신한 후 “주 변압기의 급격한 압력 변동”, “발전기 차동장치의 작동”, “전력선과 발전기의 차동장치 작동”, “육의 개폐기의 개방”을 방지하기 위하여 운전 정지시켰다.

소규모 화재는 주 변압기와 서지보호기 캐비닛에서 발생하였다. 사고 전 단상 주변압기는 기초 부분에서 소음이 있었다. 사고중 변압기함은 파열되었고, 변압기의 고압측 부싱도 파열되어 땅

바닥에 떨어져 있었다. 냉각유 절연유는 파열된 변압기함으로부터 누출되었으나 연소하지는 않았다. 그러나, 변압기 내부의 절연물질은 사고 초기에 발화하였고 약 22시간동안 훈소연소하였다.

주 변압기 아래에 있던 서지어레스터도 폭발하였고, 서지어레스터의 캐비닛 문이 폭발 압력에 의해 개방되었고, 일부 헐거운 전선이 단선되었다. 이 헐거운 전선은 캐비닛 벽면 사이에서 아크를 발생시켰고, 캐비닛 내부에서 조그만 화재가 발생하였다.

변압기 내부에서 발생한 전기적인 고장의 원인은 정전기로 판단하였다.

(2) 보완 조치

변압기 공급자가 제공한 자료를 이용하여 절연유 냉각그룹 6개는 3개의 탱크로 다시 배분하였다. 첫 번째 탱크는 하나의 냉각그룹, 두 번째 탱크는 2개의 냉각그룹, 3번째 탱크는 3개의 냉각그룹을 담당하게 하였다. 발전소 모든 전기장치를 위한 주 발전기 변압기의 냉각유 탱크 운전절차는 절연유 온도가 정상 작동온도 미만인 경우 유속을 감소시키는 것으로 개정하였으며, 정전기에 의한 전위를 감소하기 위한 방법은 다음과 같다.

- 변압기가 통전상태이고 “고온” 권선의 온도가 70℃ 미만일 때에는 절연유 냉각유 첫 번째 탱크만 작동시킨다.
- “고온” 권선의 온도가 70℃로 증가할 때에는 절연유 냉각유 두 번째 탱크를 기동시킨다.
- “고온” 권선의 온도가 정상 작동온도 75℃를 초과하는 경우에는 절연유 냉각유 3번째 탱크를 기동시킨다.

이러한 운전절차는 변압기를 적절하게 냉각시키는 반면, 절연유의 온도가 상승할 때까지 유속을 최소화시킬 수 있다.

나. SALEM 2 원자력발전소

(1) 사고 설명

주발전기 변압기(원자로당 3대)는 Westing-house에서 공급한 단상, 외철형, 360MVA, 24/288kV, 절연유 강제순환 및 공기냉각식 변압기이다.

주발전기 변압기는 공급자가 보수하고 사용상태로 복구한 뒤 며칠 후, 가연성 가스의 농도를 측정하기 위해 62°C 절연유 샘플을 채취하였다. 이 샘플은 가연성 가스의 농도가 감지될 수 있는 값으로 나타났다. 이로부터 며칠 후에 채취한 추가 샘플은 변압기에서 정전기 방전이 발생하는가를 나타내는 가연성 가스의 농도가 증가된 것으로 확인되었다.

변압기는 운전에 사용하지 않고 변압기함 내부에서 나오는 균열(Cracking), 분출(Popping), 황황하는 소리(Thudding)를 기초로 약 1주일 후에 교체하였다. 변압기 내부를 점검한 결과, 고전압 코일의 절연재 표면에서 정전기 방전과 탄소 트레킹현상이 발생한 것으로 나타났다.

(2) 보완 조치

변압기 절연유의 냉각그룹은 온도가 낮을 때 냉각펌프의 운전대수를 감소시킴으로써 정전기에 의한 전위를 감소시키기 위해 공급자가 제공한 권장사항에 적합하게 운전절차를 개정하였다.

다. Hope Creek 원자력발전소(1982)

(1) 사고 설명

주발전기 변압기(원자로당 3대)는 Westing-house에서 공급한 단상, 외철형, 406MVA, 24/500kV, 절연유 강제순환 및 공기냉각식 변압기이다.

Hope Creek에 새로 설치하려는 변압기를 공급자 시험시설에서 시험하는 동안, 변압기가 통전 상태로 있지 않을 때 변압기함 내부에서 소리가

들렸다. 시험 후 변압기를 점검하기 위해 해체하였을 때 고전압측 말단코일의 다수 절연링에 탄소 트레킹현상(정전기 방전이 발생한 것으로 보임)이 발견되었다. 또한, 조그만 구멍(Pinhole)이 고전압 코일의 외부 권선과 인접한 저전압 코일에 나타났다. 코일 사이의 절연나사에서도 일부 탄소 트레킹현상이 있었으며 손상된 원인은 정전기에 의한 것이다.

이와 동일한 다른 변압기에서는 정전기 방전을 경험하지 않았기 때문에, 사고 원인은 시험 전 변압기에 넣은 절연유에 함유된 유기 오염물에 의해 발생한 정전기로 결론을 맺었다. 오염물의 종류에 대해서는 밝혀지지 않았다.

(2) 보완 조치

변압기를 보수하고 절연유를 교체하였다. 변압기는 발전소에 설치하기 전 인수시험에서 합격하였다.

라. Hope Creek 원자력발전소(1987, 10)

(1) 사고 설명

주발전기 변압기(원자로당 3대)는 Westing-house에서 공급한 단상, 외철형, 406MVA, 24/500kV, 절연유 강제순환 및 공기냉각식 변압기이다.

변압기를 약 1일 동안 통전상태로 놓은 후, "A"상 변압기함 내부의 고압측에서 균열(Cracking), 분출(Popping), 황황하는 소리(Thudding)가 들렸다. 그 소리는 간헐적이지만 30ft 멀리 떨어진 곳에서도 들을 수 있을 정도였다. 소리가 처음 들렸을 때 "고온" 권선의 온도는 60°C, 절연유의 온도는 40°C였고 절연유 냉각용 탱크 2개는 작동하고 있었다.

냉각펌프 중 하나의 탱크가 작동하지 않으면 소음이 없어졌다. 냉각그룹은 그 소리가 변압기 내부에서 발생하는 것이거나 기계적인 것으로 입증하기 위해 개별적으로 작동시켰다. 절연유 샘플은

정전기 방전이 발생하였다는 것을 나타내는 아세틸렌 가스가 소량 함유되었던 것으로 확인되었다.

변압기는 “고온” 권선의 설정온도를 상승시키고, 유량이 감소된 상태에서 두 번째 절연유 냉각뱅크의 기동온도를 70℃에서 95℃로 변경시키는 냉각모드를 바꾼 후에 운전하였다.

(2) 보완 조치

이러한 사고를 대비하기 위한 발전소 보완조치는 다음과 같다.

- 원자력발전소에서 변압기를 교체하는 경우에는 운전 전에 통전상태와 전압을 인가하지 않은 상태에서 공급자가 정전기의 발생 경향을 시험한다.
- 각 주발전기 변압기에는 가연성 가스 분석기를 설치한다. 가연성 가스의 전체 농도가 사전 설정된 농도를 초과하여 상승하면 주 제어실에 정보를 발하고 설비 기술자에게 통보한다.

3. 사고 결과

일반적인 주변압기 고장은 정전기로 인하여 발생하였고, 그 결과 주변압기 운전을 정지시켰으며, 그 내부에서 화재가 발생하고, 발전소는 강제 정전상태에 이르렀다. 이러한 변압기의 고장은 발전소의 일시적인 정전기 현상에 대한 미흡한 대응과 발전소의 손상을 초래하였다.

가. 사고 분석

미국전기연구소(EPRI), 기술자문, 공급자의 사고 조사 결과, 정전기에 영향을 미치는 것은 다음과 같은 요소로 확인되었다.

- ▶ 절연유의 빠른 유속
- ▶ 절연유의 낮은 온도
- ▶ 변압기 내부 절연재의 불규칙적인 표면구조
- ▶ 절연유 내부의 오염물질

▶ 절연유의 수분함량

작동중인 많은 냉각펌프와 냉각배은 절연유의 유속을 결정하고 절연유의 온도, 점도, 난류정도를 제어한다. 시험으로 절연물질은 지나가는 절연유의 유속이 증가하면 전위가 상승한다. 전위는 절연유의 온도가 낮아지면 최대로 상승한다. 대표적으로 절연유의 온도가 10℃~40℃ 범위에 있을 때 전위는 최대가 된다. 변압기를 통과하는 절연유는 정전기로 인한 전위를 최소화하기 위해 절연유 온도가 정상 작동온도보다 낮아질 때 유속을 최소로 하여야 한다.

이 사고와 관련된 기술자와 변압기 전문가들은 정전기에 관한 지식을 가지고 있지만, 기타 발전소 운전원들은 대형 변압기에서 정전기 방전을 인지할 수 있는 방법 또는 정전기 방전이 발생하였을 때 취해야 할 조치에 대해서 교육훈련을 받아야 한다.

나. 결론

(1) 변압기의 절연유 강제순환 및 공기냉각 설비는 공급자와 함께 운전절차를 재검토하고 정전기에 의한 전위를 최소화시켜야 한다.

(2) 절연유 강제냉각식 변압기는 주기적으로 다음 사항을 감시하여야 한다.

- 권선 온도
- 절연유 온도, 유속(운전중인 펌프의 수)
- 비정상적인 소음(예: 분출음, 균열음, 쿵쿵하는 소리)
- 절연유 샘플에 가연성 가스와 오염물질의 유무

(3) 변압기의 운전이나 보수와 관련된 운전자, 관리자, 엔지니어, 기타 사람들의 훈련에는 다음과 같은 정전기에 관한 사항이 포함되어야 한다.

- 정전기의 발생을 방지하는 기술
- 정전기의 발생을 인지하는 방법
- 정전기 방전으로 의심되는 경우 취해야 할 행동 🚫