

전체교류전원 상실시 비상대응지침에 관한 연구

A Study on the Emergency Response Guideline During the Loss of
All AC Power in Pressurizer Water Reactor

윤덕주

한전 전력연구원

대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

원자력 발전소 교류전원 전체 상실사고는 발전소 비상 디젤 발전기로부터의 비상 교류 모선의 여자 상실사고와 고전압 선로로부터 출력격자의 다중 상실의 결과로서 생긴다. 이차 냉각재의 상실, 혹은 증기발생기세관 파손, 원자로 냉각재의 상실과 같은 다중사건에 의한 것이 동반하지 않는다면, 교류전류 상실의 직접적인 결과는 심각하지는 않다. 그러나, 비상 디젤 혹은 교류 전원이 빠르게 회복되지 않는다면, 발전소 결과는 심각할 수 있다. 모든 교류 전원 상실에 의한 심각성의 정도는 밀봉냉각의 손실에 대한 RCP 축밀봉의 대응, 즉 RCP 열 차폐의 기기냉각수(CCW) 유동과 RCP 밀봉에서 고압안전 주입유량의 다중상실과 교류전원에 의한 운전정지시간에 따라 다르다. RCP 밀봉으로부터 누출은 상대적으로 높은 값에서 출발하여 과도상태동안 압력감소에 따라 감소하면서 지속된다. 전체적으로 RCS가 포화에 접근하는 약 2시간 후 RCP 밀봉누출은 초기 유동의 30%값에서 안정화된다는 것을 알았다.

Abstract

A total loss of ac power at a nuclear power station can result only through a coincident loss of grid power from the high voltage distribution lines serving the station and some combination of events preventing the station emergency diesel generators from energizing the emergency ac busses. The immediate consequences of the loss of ac power, if not accompanied by some other complicating event such as a loss of reactor coolant, loss of secondary coolant or steam generator tube rupture, are not severe. However, should ac power either from the grid or the emergency diesels not be restored quickly, the consequences to plant and public safety can potentially be extreme. The degree of severity of a loss of all ac power depends primarily on the duration of the ac power outage and the response of the reactor coolant pump (RCP) shaft seals to the loss of seal cooling, i.e., the simultaneous loss of high pressure injection flow to the RCP seals and of component cooling water (CCW) flow to the RCP thermal barrier. Loss of high pressure seal injection flow from the motor driven charging/SI pumps results in out leakage from the RCS along the RCP shafts. Without power this leakage cannot be replaced and a continuous loss of reactor coolant occurs with time. Loss of RCP seal cooling potentially can also cause degradation of the sealing capability of the RCP seals as a result of overheating. Degradation of the sealing capability may result in an increase in leakage out of the RCS from several GPM per RCP to several hundred GPM per RCP. To mitigate the severity of a loss of all ac power, it is necessary to minimize RCS inventory loss with time and to restore ac power so that RCS inventory can be restored. Various aspects of the loss of all ac power event are discussed as appropriate in succeeding subsections.

1. 개요

충전/안전주입 펌프로부터 고압 밀봉주입의 상실은 RCP를 통하여 냉각재의 외부 누출을 나타낸다. 전원이 복구되지 않으면 이 누출은 회복되지 않으며, 원자로 냉각재의 상실이 계속된다. 잠재적으로 RCP 밀봉 냉각 상실은 과열의 결과로 RCP 밀봉능력의 저하를 일으킬 수 있다. 밀봉능력의 저하는 RCP 당 약 수백 GPM까지 RCS의 누설증가를 가져온다. 모든 교류 전원의 상실시 사고를 완화하기 위하여, 시간에 따른 RCS 재고량 상실을 최소화하는 것과 교류전원을 회복하는 것이 필수적이며 그렇게 함으로서 RCS 재고량을 회복할 수 있다. 모든 교류 전원 상실사고의 여러 가지 현상에 대한 평가를 수행하였으며 모든 교류 전원의 상실에 따른 상세한 RCP 평가를 수행하였다[4].

2. RCP 밀봉계통 누출

2.1 RCP 밀봉계통 누출

RCP 축을 통한 누출은 연속적으로 정렬된 세 가지 축 밀봉에 의하여 조절되도록 RCP는 설계한다. 정규의 운전조건아래에서, RCP 밀봉 누출을 지시하고 제어하기 위한 RCP 축 밀봉 계통 기능에서 격납용기로의 누출은 필수적으로 0 이다. 다음은 간단히 세 가지 축 밀봉을 설명한다.

1번 밀봉은 주 밀봉장치이다. 이것은 밀봉 하우징, 접촉한 비 회전 밀봉 링과 축과 함께 회전하는 회전자로 구성되는 제어누설 막 밀봉장치이다. 유로는 밀봉 회전자와 밀봉링의 면판 사이에서 형성되며 각도와 이격거리에 따라 누설속도가 제어된다. 1번 밀봉은 2,235 psig의 RCS 압력에 견디고 4.5 GPM의 최대 허용 누설과 3 GPM의 Nominal 누설량으로 설계되었다. 1번 밀봉 누설의 대부분은 2번 밀봉 장치로 유로가 형성되는 작은 부분으로 이뤄진 1번 밀봉 누설관으로 이어진다. 1번 밀봉 누설관은 격납용기를 통과하여 충전/안전주입 펌프 흡입관으로 누설량을 복구시킨다. 이 밀봉관은 격납용기가 격리되었을 때 누설 유동이 가압기 방출 탱크로 형성되도록 설계된 격납용기 내부 방출 밸브를 가진다. 이 방출밸브는 설정압력이 150 psig를 가진다.

2번 밀봉은 축과 회전자에서 수축 끼워 맞춤으로 이뤄진 마찰 밀봉 링으로 구성된 마찰면 밀봉이다. 1번 밀봉이 운전중이면, 2번 밀봉은 시간당 3 gal/min으로 RCS 누설을 제한하고 30 psig 압력차를 수용하도록 설계되었다. 1번 밀봉이 운전 불가시에는, 2번 밀봉은 거의 12 GPM의 최대 허용 누설과 8 GPM의 RCS 정상누설로 제한하고, 2,235 psig의 전체 RCS 압력을 수용하도록 설계되었다. 2번 밀봉의 역할은 1번 밀봉에서 역압을 형성시켜 1번 밀봉수의 대부분을 1번 밀봉 누설관으로 흐르도록 유도하는 것이다. 2번 밀봉을 통한 누설의 대부분 3번 밀봉수의 설계에 따라 달라지지만 3번 밀봉을 통하여 2번 밀봉 누설관으로 유도된다.

2.2 RCP 제3번 밀봉 누설

3번 밀봉은 정상외 펌프 운전조건아래에서 격납용기 환경으로의 누설을 제한하기 위한 마찰 밀봉장치이다. 이는 3번 밀봉 설계에 따라 격납용기 수조 혹은 원자로 냉각재 배수 탱크로 흐르도록 설계된 3번 밀봉 누설로서 저차압을 수용하도록 설계되었다. 3번 밀봉은 압력경계 밀봉도 아니며 모든 교류 전원의 상실에 따른 제한된 RCP 밀봉 누설에서 중요한 역할을 하는 것도 아니다.

정상운전조건아래에서, 제어된 누설 축 밀봉 계통은 독립적이고 여분의 냉각 계통에 의해 냉각된다. RCP 운전을 지속하기 위한 적절한 밀봉냉각은 충전/안전주입 펌프로부터 고압 밀봉 주입 혹은 RCP 열차폐를 통하여 저압 CCW 냉각수에 의하여 제공될 수 있다. 밀봉수 주입은 펌프의 베어링과 펌프 밀봉부위로 원자로 냉각재가 들어가는 것을 막기 위한 완충작용을 한다. 밀봉수 주입의 일부는 축을 따라 RCS로 흘러 들어가는 반면 나머지부분은 밀봉수 계통을 따라 흐른다. RCP로의 밀봉 주입이 상실되면 고온의 원자로 냉각재가 펌프 축을 통하여 유입될 수 있다. 이러한 상황에서 RCP 열차폐는 고온의 원자로 냉각재가 RCP 베어링이나 밀봉영역으로 들어가기 전에 이

를 냉각하기 위한 열교환기로서 기능을 한다. RCP는 비상 교류 전원으로 RCP 전원을 재공급할 때의 시간지연을 포함한 소외전원의 상실을 수반하는 CCW 유동과 밀봉 주입 유동의 일시적인 상실에 대응하도록 설계되었다. 이것은 고온의 냉각재가 밀봉으로 들어가기 전에 RCP 밀봉을 통하여 밀봉수가 누설되는 데에 시간이 소요되고 밀봉영역의 차가운 밀봉수가 있으므로 이뤄진다. RCP는 소외전원 상실에 따라 일분동안 보조계통의 상실을 수용하도록 설계되었다. 최적평가에 의한 RCP 설계는 수분동안 고온수가 밀봉영역으로 들어가는 것을 방지하여야 한다.

모든 교류전원 상실 사고상태에서, RCP 보조계통은 밀봉계통 내부로 고온의 원자로 냉각재가 유입되기 전에 회복되지 않을 것이다. 이러한 상태아래, RCP 밀봉 누출 속도는 RCS 압력뿐만 아니라 RCS 온도에 결정된다. 300°F 이상의 온도에서, RCP 밀봉계통의 밀봉능력과 밀봉수명은 밀봉 누설유량의 증가와 함께 저해된다. 밀봉 능력과 밀봉 수명저하의 가능성은 300°F 이상으로 온도가 상승할 때 증가한다. 고온의 상태에서 밀봉능력은 다음과 같은 여러 가지 사항이 상호 작용하기 때문에 분석하기가 어렵다.

- 1) 밀봉 O-링 물질은 온도 증가와 함께 부드러워진다. 여기서 온도는 O-링 밀봉 능력과 수명에 영향을 미친다.
- 2) 열 기울기는 밀봉 표면에 영향을 미치는 Number 2 Seal Ring Insert의 Shrink Fit과 Number 1 Seal Ring과 회전자 Face Plate에 영향을 끼친다. 균일하지 않은 열의 기울기와 O-링의 Extrusion 압출 성형은 균일하지 않은 밀봉 표면을 야기시킨다.
- 3) 밀봉을 통한 원자로 냉각재의 누설은 밀봉의 침전 차단으로 나타날 수 있다.

여러 가지 상호작용을 검토한 결과 모든 교류전원 상실시 RCP 누설유동을 분석과 실험으로 예측하는 것은 어렵다. 더욱이, RCP는 누설 유동의 여러 가지 측면에서 영향을 받는다. 모든 교류 전원의 상실에 따른 RCP 밀봉 누설 유동을 정확히 예측하는 것은 어려우므로 현장의 경험을 검토하여 관련 정보를 수집하고, 최대 누설속도를 평가하기 위한 분석이 수행되어왔다. 현장 경험에서 밀봉수 주입과 열 차폐 CCW가 동시에 상실할지라도, RCP 밀봉 거동을 정확히 예측할 수는 없다는 것이다. 이 경험에서 얻은 일반적인 결론은 전체교류 전원상실 사고시 밀봉수 누설은 6GPM의 정상 밀봉수 유량이상으로 증가할 것으로 기대된다. 그러나 이러한 제한된 경험으로 비쳐봤을 때 RCP 보조계통의 회복 전에 비정상적으로 지나친 누설을 경험하지는 않았다.

RCP 밀봉 계통에 대한 모든 교류 전원 상실의 가장 심각한 결과를 평가하기 위하여 보수적인 최대 RCP 누설유량은 300GPM으로 예측된다. 이는 2,235 psig의 전체 RCS 압력이 RCP 열 차폐 Labyrinth 밀봉(비효과적으로 제어된 누설)을 통과한다는 가정하에 예측된 유량이다. 이 평가에서는 일부 RCP에 설치된 플로팅 링 밀봉의 신뢰성을 고려하지 않았다. 플로팅 링 밀봉을 가진 RCP에 대한 최대 누출 속도는 300GPM보다 작을 것이다. 여기서 검토한 것을 기준으로 RCP 밀봉의 건전성은 모든 교류 전원 상실시 중요한 관심사이다. 발전소 무부하 조건의 RCS 고압과 고온 특성은 RCS 재고량 상실을 증가시키고 RCP 밀봉 저하를 가져올 수 있다. 이러한 밀봉능력저하는 다른 발전소 제한치와 마찬가지로 RCS 온도와 압력 감소에 의해 완화될 수 있다. RCS 압력이 감소함으로 인해 RCP 밀봉을 통한 누설유량이 감소하고 이 결과로서 주어진 밀봉 조건에 대한 RCS 재고량 상실을 감소시킨다. RCS 온도를 감소하는 것은 밀봉 수명과 밀봉계통의 밀봉능력을 저하시키는 열 팽창 영향과 재질의 열화가 감소한다. 결론적으로, 모든 교류 전원 상실 사고시 RCS 온도와 압력을 감소하기 위한 조치는 노심 노출을 최대로 지연시키고 RCS 재고량 상실을 최소화하려는 조치와 일관성이 있다.

2.3 밀봉 냉각회복의 영향분석

교류 전원의 회복에 따라 운전원은 기기 냉각수 계통을 통한 열차폐 냉각이 재 가동되고 밀봉수 주입을 재개시함으로 밀봉 냉각능력을 확보하게된다. 밀봉수 냉각의 회복은 밀봉누설을 감소시키고 밀봉 기기의 더 많은 손상을 방지하는 등 여러 가지 이익이 있다. 그러나, 웨스팅하우스 원전

에 대해 밀봉 냉각, 수축 끼워 맞춤, 축 이동 등과 같이 RCP 밀봉 팩키지가 어떻게 대응하는지의 분석은 수행하지 않았다. 여기서 상황에 따라 다르지만 밀봉수 냉각이 회복됨으로서 밀봉누설을 더욱 악화시킬 가능성이 있다. RCP 공급자 메뉴얼은 불균등한 냉각 때문에 RCP 축의 벗어남을 막고, 열충격 때문에 더 많은 손상을 막기 위하여 고온 밀봉수로의 밀봉 냉각을 제한한다. 이러한 제한사항은 밀봉 패키지의 가열 동안 밀봉냉각의 상실을 고려하기 위한 것이다. 확대 밀봉냉각 사고의 예측결과에 의하면 RCP의 설계기준을 넘는 사건에 대하여 유효하지 않다. 그러므로 밀봉냉각사고시 장기간의 상실후 밀봉냉각수의 재공급을 위하여 RCP 공급자 메뉴얼로부터 취해지는 특별한 결론은 없다. 다음은 모든 교류 전원 사고의 장기간 상실후 밀봉냉각수의 회복에 가장 적절한 방법을 결정하는 평가를 수행하였다. 축의 굵음과 밀봉의 열충격에 대한 잠재력을 최소화하기 위하여, 밀봉주입이 공급되기 전에 기기냉각수가 열교환기의 열차폐에 공급될 수 있다. 모든 교류 전원 상실은 발전소의 설계기준사고를 초과하기 때문에 기기냉각수계통의 성능은 이러한 조건 아래에서 분석되지 않았다. 고온 열차폐 열교환기로의 CCW 공급시 CCW 계통이 어떻게 대응하는지가 관심사이다. 열교환기로 CCW가 유입됨으로서, CCW 계통의 압력과 일차계통 유체의 온도 때문에 증기의 일정한 양이 생성되는 것으로 기대된다. 유체가 증기로 팽창할 때 CCW 계통의 과압 완충용량을 초과할 수 있다. 또한 증기로 열교환기를 떠나더라도 그것은 결국 액체로 돌아올 것이다. 만약 이것이 빠르게 일어난다면, 증기-물 충격은 배관 허용응력 한계를 초과하여 일어날 것이다. 결국, 열교환기를 통한 CCW 유동이 펌프 밀봉을 통과하는 원자로 냉각재 누설수를 적절히 냉각할 수 없을 것이다. 그러므로 장기간에 걸친 모든 교류전원 상실사고 후 열차폐 열교환기로의 CCW 공급의 효과는 잘 알려져 있지 않고, 단지 안전 관련계통의 건전성이 위협할 수도 있다. 장기간에 걸친 밀봉냉각 상실후 열차폐 열교환기로의 CCW 복구의 영향은 상세한 분석을 수행함 없이 전체적으로 이해할 수 없다. 그러므로 결론은 장기간에 걸친 모든 교류 전원 상실 후 밀봉냉각회복은 CCW 계통의 건전성을 위험에 빠트릴 수 있다. CCW 계통은 안전과 관련된 계통이다. 열차폐를 냉각하지 않은 상태에서 밀봉 냉각문제를 해결하기 위하여 RCP 밀봉 팩키지와 축에서 일어날 수 있는 손상의 가능성에 개의치 않고 밀봉주입을 재공급할 것인지 혹은, 밀봉 팩키지 냉각하기 위한 다른 대안을 찾는 것 중 선택해야 한다. RCP 손상을 최소화하기 위하여 밀봉 팩키지 냉각시키기 위한 대안이 선택되어야 하는 지를 결정해야 한다. 이러한 대안은 펌프 밀봉을 통하여 흐르는 물의 온도를 감소시키기 위하여 일차계통의 온도를 감소시키는 것이다. 조절된 RCS 냉각을 경유하여 밀봉온도를 감소시키는 것은 여러 가지 이익이 있다. 첫째, 밀봉 팩키지에 설치된 열 기율기와 RCP 축 굵힘의 가능성을 최소화하고 밀봉 팩키지를 일정하게 냉각하는 것이다. 두 번째는 밀봉온도가 감소할 때 밀봉누설이 밀봉 차압과 계통압력 감소에 의해 줄어든다. 최종적으로, 이 밀봉냉각을 사용하여 발전소 안전계통을 위험하게 하지는 않을 것이다. 밀봉온도를 감소시키기 위하여 RCS 냉각에 의존하는 것은 밀봉주입을 재공급할 수 있을 때까지 밀봉누설이 지속될 것이다. 이 누설량은 정상 충전 계통의 용량 범위 내에 있으므로 노심 노출을 야기하지 않을 것이다. 그러나, 이 누설은 PRT로 모이고 최종적으로 파열 디스크의 손상원인이 된다. 이것은 격납용기 바닥으로 원자로 냉각재 유체를 유출시키는 것이다. 밀봉의 냉각속도는 밀봉의 냉각방법에 관계없이 1°F/분으로 제한되므로, CCW에서 열차폐 열교환기를 사용한 밀봉냉각이 회복할 때까지가 관심사이다(즉 열차폐 냉각은 RCS 냉각보다 빠르게 누설을 감소시키지는 않을 것이다). 또한, 앞에서 검토한 것과 같이, 열교환기의 열차폐는 RCS 냉각과 동시에 수행하지 않는 한 필요한 온도까지 밀봉을 냉각하기 위한 용량을 가지지 않는다. 최종적으로 PRT 파손의 결과는 전체 CCW 계통 파손의 결과보다 훨씬 심각하다. 그러므로 열교환기 열차폐를 사용하는 것 대신에 RCS 냉각을 거쳐 RCP 밀봉을 냉각하는 것이 발전소 안전에 심각한 충격을 주지 않고, CCW 계통의 건전성을 유지함으로써 실제적으로 발전소 안전을 개선한다. 위의 검토를 근거로 하여, 장기간에 걸친 모든 교류전원상실에서 회복하는 동안 열교환기 열차폐를 통하여 밀봉냉각을 회복하기 위한 시도가 수행되지 않을 것이다. 밀봉주입 회복에 대한 이러한 제한 사항은 RCP 공급자 메뉴

얼에 기술된다.

2.4 밀봉계통냉각 회복후 RCP 기동

RCP 밀봉냉각의 회복 후, RCP 손상의 가능성을 최소화하기 위한 RCP 상태 평가를 완성하기에 앞서 RCP를 기동해서는 안 된다. 상태 평가는 발전소 고유의 RCP 운전지침과 사용자 메뉴얼의 권고사항과 제한사항에 모순 없이 수행하여야한다. 일반적으로, 상태 평가는 다음의 세 가지로 구성되어야한다.

1. RCP 밀봉냉각이 회복하였을 때, 제한사항 및 권고사항에 따라 펌프를 수동으로 회전한다.
2. RCP를 재기동한다. 진동과 밀봉누설속도를 감시하는 것.
 - a. 밀봉누출과 펌프진동을 받아들일 수 있다면, 발전소의 강제순환 냉각을 위하여 RCP를 사용한다.
 - b. 밀봉누출과 펌프의 진동을 초과하면 펌프를 정지한다.
3. 상온정지상태에 도달했을 때, RCP 밀봉을 분해하고, O-링, 채널 밀봉, 1번 밀봉 접촉면 등을 포함하여 모든 밀봉 구성부품을 검사한다.

격납용기 접근 제한 때문에 RCP를 수동으로 회전시킬 수 없다면, 발전소는 상태 평가의 일환으로 육안 점검과 펌프 분해를 허용하기 위하여 자연순환의 상온정지상태로 두어야한다. 밀봉의 잘못된 정렬과 Crud 차단은 RCP 밀봉 손상, RCP 밀봉손상을 전파시키고, 밀봉누설유동 등을 증가시키기 때문에 상태 평가 없이 RCP를 기동해서는 안 된다. 그러나, RCP를 기동하기에 앞서 상태평가를 위한 이 권고사항에 대한 예외사항 한가지가 있다. 상태 수목 감시 결과, 임계 안전기능에 대한 극한(Red Level), 심각한(Orange Level) 위험이 진단된다면 그리고 운전원에게 기능 회복 지침과 관련하여 RCP를 기동하도록 지시된다면 상태 평가에 앞서 RCP를 기동해야 한다. 이러한 상황아래, RCP 보조계통은 가능한 정상상태에 가깝게 복구하고 RCP를 기동한다.

3. 과도상태 분석

모든 교류 전원 상실사고 초기에 대한 증기공급계통(NSSS)의 대응과 NSSS거동을 확인하기 위하여 분석되었다. 이 분석은 RCP 누설유동, 증기발생기 감압(냉각) 등을 포함한다. 발전소에서 실제 교류전원 상실사고에서 이러한 변수의 응답은 분석에서 가정된 조건에 의해 변할 수 있고 결과적으로 이러한 것들로부터 정량적인 결과도 변할 수 있다. 그러므로 이러한 조건사항을 보다 명확히 정의하기 위하여, 이 분석에 사용된 조건을 단순화할 경우 중요한 가정은 아래와 같다. 모든 분석에서 RCP 밀봉 누설은 RCS 저온관에서 파열되는 것으로 모델링하였다. 기 결정된 밀봉 누설량이 저온관 파열유동의 운전조건과 같도록 파단크기가 결정되었다. 분석동안 RCS 상태가 변하기 때문에, 파열유동은 과냉각과 포화상태의 임계유동 관계식에 의하여 변할 수 있다.

3.1 RCP 밀봉 누설

RCP 밀봉 누설은 O-링, 밀봉 표면 부식과 과열에 의하여 밀봉이 열화 되는 정도에 따라 달라진다. 실제 누설 상태로부터의 차이는 임계 유동 관계의 누설속도 특성의 과 예측에 의해 기인된다. 그러나, 이러한 차이는 보수적인 방향이고, 분석에 의하여 설명된 정성적인 현상이 달라지는 것은 아니다. 펌프누설에 관한 분석에서 중요한 가정은 교류전원이 상실된 후 바로 기 계산된 유량으로 누설이 시작하는 것이다. 밀봉 열화의 영향을 모사하기 위한 시간지연은 고려되지 않았다. 교류전원 상실사고의 실제적인 상실에서, 밀봉 열화 현상이 모든 곳에서 일어나면, 수분에서 시간까지 지속하는 시간을 연장할 수 있다. 이러한 열화로 인해서 원자로 트립시 펌프당 누설속도는 느리게 증가할 것이다. 불행하게도, 밀봉강하의 모든 가능한 시나리오와 최대 예상 누설속도는 분석할 수가 없다. 그러므로, 큰 누설속도와 밀봉파손이 즉시 이뤄지는 보수적인 접근으로, 최대누설까지 여러 누설속도에서 분석하여 모든 경우에 대한 극한(Bounding Case)의 경우를 찾는다.

3.2 수동 RCS 냉각

분석에서 설명된 현상학적인 부분은 터빈운전 보조급수펌프(AFW)와 증기발생기 PORV를 사용한 RCS 냉각과 관련이 있다. 교류전원 전체상실 사고에서 AFW 펌프와 PORV의 수동제어와 현장제어가 요구될 것이다. 그러므로 냉각의 특성은 운전 중인 자동 제어시스템의 경우와 같이 정상적으로 이뤄지지 않는 것이다. 그러나 분석에서 수동/현장 계통 운전의 영향 분석의 시도는 없었다. 모든 냉각은 이차측 증기발생기에서 거의 100 F/hr의 일정한 냉각속도로 규칙적으로 진행되는 것으로 가정된다. 그러나 실제로 규칙적인 냉각은 일어나지 않을 것이다. 그 이유는 (1)펌프와 밸브를 조작하는 기기장소의 사람과 발전소 기계 사용을 관찰하는 제어실에 있는 운전원 사이의 느린 거동/피드백 루프 (2)터빈구동 AFW 펌프 운전과 증기발생기(예를 들면, 이차측 열제거를 책임지기 위하여 최소한 하나의 증기발생기 협역수위 지시)에서 적절한 수위를 유지하기 위한 권고사항의 제약조건 때문이다. RCP 누설의 상황과 같이, 분석의 제한사항은 결과의 정성적인 특성에는 영향이 없고 단지 절대적인 크기에 영향이 있다. 그러므로, 발전소 냉각의 장단점에 관해서 정성적인 결론은 변하지 않는다. 극한 제한사항이 고려되는 한, 이러한 분석보다 빠른 냉각속도는 많은 이익을 가질 것이고, 느릴 때는 작은 이익을 가질 것이다. 어떤 원자로 트립에 따른 잔열 수준은 노심의 전체 연소도 출력뿐만 아니라 직전 출력의 정도에 따라 달라진다. 모든 교류 전원의 상실 때 존재하는 모든 가능한 잔열 상황을 분석하는 것은 불가능하다. 그러나, 가정은 보수적이어야 하고, 경험에 의한 상황의 중요성을 나타내도록 해야한다. 이것은 전출력에서 장기 원자로 운전을 가정한 ANSI 표준, ANSI/ANS-5.1-1979의 자료를 이용하여 모든 분석을 수행하였다. 최적평가 분석을 수행하기 위하여 불확실도는 고려하지 않았다. 여기에 존재하는 분석의 결과는 전출력에서 150-200일 이상의 연소 주기동안 정지후 노심 반응도를 대표하는 것이다. 부분 출력에서 연장 운전동안 혹은 노심 수명 초기에 정지가 일어나면 잔열이 적게 발생한다. 그러므로 실제 값은 수행된 분석치보다 적다. 이러한 상황에서 낮은 잔열은 RCS의 보다 빠른 감압 때문에 RCP 밀봉 누설의 감소로 이어진다. 낮은 붕괴열은 터빈구동 AFW 펌프와 증기발생기 PORV를 사용한 수동의 발전소 냉각에 어려움을 덜어준다.

3.3 참조 발전소 분석

모든 교류 전원 상실사고를 평가하기 위하여 수행한 분석은 2, 3, 4 루프 NSSS 설계를 위한 웨스팅하우스 표준설계정보를 사용한다. 모든 분석은 발전소 설계가 명목상으로 600 psig로 저압 축압기를 포함하는 것으로 가정한다. 저온판이나 고온판의 온도에서 원자로 용기상부 덮개 온도의 영향은 오래된 그리고 새로운 발전소 특성을 계산하기 위하여 고려되었다. 상부 덮개로 주입되는 축압기의 영향은 어떠한 분석에서도 검토되지 않았다. 그러나, UHI(Upper Head Injection) 축압기가 존재하므로 더 많은 물이 RCP 밀봉을 통하여 잠재적으로 손실되는 것을 보충하기 때문에 분석의 결과는 이득이다. 이러한 설계 특성(예를 들면, 증기발생기 설계, 노심 평균온도, 전원수위, AFW 유동용량 등)의 차이가 표준설계를 근거로 한 분석의 정성적인 결론을 바꾸지는 않을 것이다.

3.4 과도상태 분석의 정성적인 결과

여러 가지 RCP 누설속도와 발전소 설계 변화를 가정한 모든 교류전원의 여러 가지 손실의 교류의 현상 분석도 수행하였다. 그러나 모든 분석에 대한 일반적 결과는 먼저 검토될 것이다. 이러한 검토는 교류전원 상실사고로 NSSS 공정제어 변수의 대응에 초점을 맞출 것이다. 발생 가능성이 있고(제어실 전원의 상실, 비상모션 저 전압 경보 등)와 사고대응을 돕기 위한 진단 정보를 운전원에게 제공하는 발전소 징후들은 여기서 고려되지 않는다.

3.5 운전원이 제어하지 않는 상태에서 발전소 대응

교류전원 전체 상실사고의 시작에서 발전소 공정변수의 대응은 발전소 소내정전 후 직접적으로

일어나는 것과 필수적으로 동일 할 것이다. 즉 RCP 트립에 의한 루프 유동 감소, 원자로 트립에 의한 중성자속 감소, 증기/급수 유동 불일치에 의한 증기발생기 수위의 빠른 감소, 열 부하의 감소에 의한 가압기 수위 감소 등이 일어난다. 그러나, 발전소 후속대응은 다르게 나타날 수 있다. 증기 덤프계통과 증기발생기 PORV를 교류전원의 상실 때문에 사용할 수 없으므로, 이차 측의 압력은 무부하 증기 압력에 더 이상 제한되지 않을 것이고, 이차 측 안전 밸브 설정 압력까지 지속적으로 상승할 것이다. 원자로 냉각재 강제유동의 상실과 관련하여 증기온도 증가는 원자로 트립에 의한 초기 외란 후 발전소 평균온도로 회복하려는 경향이 있으며 따라서 전출력 가압기 수위로 회복한다. 그러나, 모든 교류전원 상실사고가 일어나는 곳에는 밀봉누설이 있을 것이고, 그 결과, 가압기 수위는 안정화되지 않고 단지 떨어지기 시작할 것이다. 수위 감소의 속도는 밀봉누설의 크기에 의존할 것이다. 누설속도가 각각의 펌프로부터 수 GPM인 밀봉으로 보전되어 있다면, 수위 강하는 몇 시간에 걸쳐 눈에 띄게 감소할 것이다. 역으로 밀봉이 밀봉냉각수의 상실 때문에 빠르게 열화되면, 누설속도는 수백GPM까지 증가할 것이고, 가압기는 10분 이내에 비워지게 될 것이다. RCS로부터 모든 유출배관이 격리되는 한, 가압기 수위 반응으로부터 운전원은 RCP 밀봉 상태를 파악할 수 있다. 가압기 수위의 감소는 RCS 압력의 감소에 의하여도 일어날 수 있다. 충전/안전주입 펌프와 가압기 가열기가 가동되지 않는 상태에서 밀봉을 통한 냉각재의 상실이 수위와 압력이 감소시키면서 가압기에서 고온의 냉각재를 고갈시킬 것이다. 이 시점에 RCS 고온관에서 혹은 원자로 용기의 상부에서 증기화(Flashing)가 일어날 것이다. 이 시점에서 플래싱이 가능한 고온냉각재의 풍부한 체적 때문에 압력감소율은 감소할 것이다. 교류전원을 사용할 수 없다면 결국에는 거의 전체 RCS가 증기발생기 안전밸브의 설정압력에서 포화될 때까지 감압은 지속될 것이다. 가압기 수위 과도상태와 같은 압력 감소의 시간 이력은 RCP 밀봉으로부터 누설의 양에 의하여 조절될 것이다. 전체 RCS가 포화된 후 증기발생기 안전밸브를 경유한 냉각은 RCS 압력과 필수적으로 일정한 값에서 RCP 누설을 유지할 것이다. 밀봉누출은 증기발생기 U-튜브에서 증기 기포를 생성하는 것과 노심 상부의 극한적인 배수의 RCS 재고량을 소비하기 위하여 지속될 것이다. U 튜브에서 기포생성은 RCS 냉각재 루프를 통한 자연순환을 멈추게 할 것이고, 역류 비등은 노심 잔열을 제거하기 위한 증기발생기 사이에서 필요한 것이다. 교류 전원이 회복되지 않는다면, 많은 재고량이 손실되어 잔열 제거가 이뤄지지 않을 때까지 그리고 부적절한 노심 냉각상태가 일어날 때까지 이 상황은 지속될 것이다.

3.6 운전원이 냉각을 제어하는 상태에서 발전소 반응

위에서 설명된 시나리오는 교류 전원의 상실까지 이어진다는 가정하에 예측되는 상황이다. 열은 증기발생기 안전밸브를 통하여 제거된다. RCP 밀봉을 통하여 손실된 물을 다시 공급할 능력이 없으면 이 상황은 결국에는 증기발생기는 이러한 조건보다 약간 더 높은 값의 압력과 온도에서 안정화될 것이고 RCS는 포화상태에 이를 것이다. 만약 운전원이 이 조건을 변화시키기 위하여 아무런 조치도 취하지 않는다면, 노심 손상의 확률은 이러한 조건 이하로 RCS 압력과 온도를 감소시킬 때 보다 훨씬 더 큰 값을 가질 것이다. 이러한 이득은 RCS 압력과 온도에서 감소를 수반하는 RCP 밀봉 누설의 감소로부터 온다. 밀봉누설을 감소하는 것은 원자로노심이 노출되는데 까지 걸리는 시간이 증가할 것이다. 예상되는 노심 냉각 상황이 전개되기 이전에 교류 전원을 회복하기 위하여 조치를 할 수 있는 시간이 증가한다. RCS 온도와 압력의 감소는 RCS로부터 냉각재 손실 양을 감소시킬 뿐만 아니라 RCP 밀봉의 환경온도와 압력을 감소시켜서 결국에는 열화의 정도와 열화가 진행되는 속도를 감소시킬 것이다. 궁극적으로는 2차측 냉각을 통해 RCS 감압을 함으로써 손실된 RCS 냉각수를 보충하기 위한 피동 저압 축압기의 사용이 가능해진다. 이와 같이 교류전원 완전상실 사건에서 시간에 맞춰 RCS 냉각 조치를 취함으로써 이점이 있는 것이다. 그리고 아래 기술된 분석에서는 이러한 사항을 고려한다. 이러한 분석에서, 증기발생기 PORV와 터빈 구동 AFW 펌프의 수동 혹은 현장제어에 의해 안전밸브 설정치 아래로 냉각을 유지하는 것으로 가정

된다. 정상 정지 계통을 사용하지 않고 발전소를 냉각할 때는 운전원이 준수해야 할 제약사항이 몇 가지 있다. 그 하나는 음의 중성자 감속재 피드백의 영향 때문에 임계 상태까지 원자로 노심을 회복할 수 있느냐 하는 것이다. 교류전원 상실시 RCS 붕소 조절 계통은 사용할 수가 없다. 축압기 주입을 허용하기까지 압력이 충분히 감소되지 않는 한, 임계 노심 이하로 유지하기 위한 부 반응도 조절장치는 정지봉과 제어봉이다. 임계 저 출력 상태로 회복하지 않는다면 축압기 주입 압력 이하로 감압하는 것이 불가능한 상황이 많이 생긴다. 계통의 낮은 보온농도의 영향과 노심 수명 후반기에 나타나는 고 음의 감속재 피드백 때문에 그런 상황이 나타난다. 모든 교류전원 상실시 이 시점에 일어난다면, 그리고 모든 제어봉이 주입되고 붕소 주입되지 않는다면, 노심이 임계로 회복되는 온도는 축압기 주입 압력에 해당하는 포화온도 보다 높을 수도 있다. 그렇다면, 이차 감압을 통하여 교류 전원 상실 후 즉각적으로 축압기 주입 압력까지 감압하는 것이 불가능할 수도 있다. 다행히도, 이 문제는 제논 생성시 증가하는 음의 반응도 영향에 의하여 제한된다. 평형 출력상태에서 사고가 일어났다고 가정하면, 노심에서의 제논 생성이 노심 임계온도를 점진적으로 감소시킬 것이다. 이로서 운전원은 축압기 주입을 허용하는 RCS 압력 이하로 충분히 감소시킬 수 있다. 교류 전원상실시 제어냉각에 대한 두 번째 제약사항은 RCS로 비응축성 기체의 유입 가능성과 관련이 있다. 교류 전원을 사용할 수 있는 발전소 정상 정지 상태 하에서, 축압기 주입관은 1000 psig 이하로 RCS 압력을 감소하기에 앞서 격리되어야한다. 이것은 축압기의 냉각수가 원자로 냉각재 계통으로 주입되는 것을 막기 위해서다. 대부분의 경우, 주입관의 격리는 교류 전원 없이 불가능하다. 그래서 전체 교류전원 상실 후 축압기를 완전히 고갈시킬 정도로 충분히 낮은 압력까지 감압하는 것은 피해야 한다. 일반적으로 운전원이 이것을 하는 수단은 증기발생기로부터 방출되는 증기의 양을 제어하는 것이다. 비록 그렇다 하더라도, RCP로부터 밀봉누설이 매우 크다면, 운전원은 계통으로 질소의 유입을 피하고 RCS 압력을 제어하는 것은 불가능하다. 교류 전원 전체 상실 후 냉각에 있어서 이러한 제약사항이 미치는 영향은 운전원이 노심 임계도의 중요성과 연료 연소도의 영향을 깨닫는 것이다. 축압기 냉각수로 손실된 RCS 재고량을 보충하고 RCP 밀봉 파손에 의한 가능성을 줄이기 위하여 RCS를 감압하고 냉각하는 것이 바람직함을 이해해야 한다. 최종적으로, 축압기로부터 비응축성 기체의 유입을 막기 위해서는 저압 한계가 필요하다는 것을 인식해야 한다. 이러한 사항을 이해할 때 질소의 유입을 막고 노심이 임계조건에 복귀하는 것을 방지하면서 RCS 재고량 상실을 최소화하기 위하여 이차측 압력을 제어하고 감압할 수 있을 것이다.

4 결론

전체교류 전원상실에 대한 계통 반응을 정량적으로 설명하기 위하여, 여러 가지 시나리오를 고려하여 전산 과도해석결과가 여기에 기술된다. 분석결과는 고압(HP)참조발전소(즉, 표준 4 루프, 3425 Mwt NSSS 설계)에 대한 것이다. 그러나 표준 2~3루프 설계도 비슷한 분석결과를 나타낸다. 교류 전원 상실사고 후 RCS 반응을 설명하기 위하여 교류 전원 시나리오의 6가지에 대해 LOFTRAN 코드를 사용하여 분석하였다. 이 시나리오는 RCS 반응을 보기 위하여 (1) 다른 RCP 밀봉 누출 속도와 (2)RCP 밀봉 누설을 감소하기 위한 운전원 이차측 감압조치의 영향을 분석하도록 선택되었다. RCP 밀봉 누설속도에 대한 반응 민감도는 세 가지 누설속도의 분석 즉, 펌프당 50 GPM의 중간 속도, 펌프당 300 GPM의 최대속도와 펌프당 5 GPM의 최소 속도에 대해 분석했다. 중간속도는 교류전원의 상실을 수반하는 여러 가지 발전소 대응 현상을 설명하기 위하여 분석되었다. 최대와 최소의 속도는 교류 전원상실에 대하여 발전소 응답의 범위를 결정하기 위하여 선택되었다. 제어냉각의 운전자 영향은 운전자가 냉각을 제어하는 경우와 운전자가 냉각을 제어하지 않는 경우에 각각의 밀봉누설의 분석을 통하여 결과를 보았다. 각각의 시나리오에 대해 가압기 수위, RCS 압력, RCS 온도, 증기발생기 압력과 RCP 밀봉 누설의 응답을 분석하였다. 중요한 시

간과 사건은 적절히 나타내었다. 교류 전원상실의 6가지 시나리오는 표 1에 요약되어 있다. 경우 1은 이차측을 냉각하기 위한 운전원 조치없이 50 GPM/펌프의 가정된 RCP 밀봉 누설 속도에 대한 RCS를 분석하였다. 가압기가 약 32 분경 고갈시까지 가압기 수위는 거의 1.5 %/분의 속도로 일정하게 감소한다. 거의 이 시간에서, 원자로용기 상부덮개의 물은 플래싱을 시작하고 압력 감소는 지연된다. 결국에 노심 상부는 고온관 배관에서 유체의 포화압력까지 붕괴를 시작하여 허용압력까지 충분히 냉각된다. 이것은 과도상태 시작 후 약 80분에 일어난다. 압력은 안전밸브 설정압력까지 빠르게 증가하여 과도상태 동안 그 압력을 지속한다. RCP 밀봉으로부터 누출은 상대적으로 높은 값에서 출발하여 과도상태동안 지속하고 단지 압력감소와 함께 감소한다. 전체적으로 RCS가 포화에 접근하는 약 2시간 후 RCP 밀봉누출은 초기 유동의 30%값에서 안정화된다. 경우 2는 경우 1 과도상태에서 2차 냉각의 영향을 고려하여 분석한 결과이다. 가압기 수위가 스펠의 10%로 떨어지는 약 30분에 냉각은 시작한다. 2차 증기발생기의 냉각속도는 거의 100 °F/hr이고 터빈구동 보조급수 펌프와 증기발생기 PORV가 동시에 작동하는 수동제어를 통해 수행한 것으로 가정된다. 여기에는 경우 2에 대한 결과는 몇 가지 차이가 있다. 기대했던 대로, RCS 압력 강하는 이차측 냉각이 일단 시작되면 매우 빠르게 진행된다. 또한 그러한 냉각 때문에, 저온관 배관에서 과냉각은 약간 길게 지속된다. 이것은 저온 축압기와 증기발생기의 냉각영향 때문이다.

표1 전체 교류전원 상실 분석 시나리오

CASE	분석 시나리오
1	밀봉 누설 : 50 GPM(정상 RCS 조건) 냉각 방법 : 2 차측 냉각/감압을 위한 운전원 조치 없음
2	밀봉 누설 : 50 GPM(정상 RCS 조건) 냉각 방법 : 안전밸브 설정 압력에 해당하는 포화 온도로부터 470 °F까지 100°F/hr로 2 차측 온도 냉각(가압기 수위가 10%시 출발)
3	밀봉 누설 : 300 GPM(정상 RCS 조건) 냉각 방법 : 2 차측 냉각/감압을 위한 운전원 조치 없음
4	밀봉 누설 : 300 GPM(정상 RCS 조건) 냉각 방법 : 안전밸브 설정 압력에 해당하는 포화 온도로부터 470 °F까지 100°F/hr로 2 차측 온도 냉각(가압기 수위가 10%시 출발)
5	밀봉 누설 : 5 GPM(정상 RCS 조건) 냉각 방법 : 2 차측 냉각/감압을 위한 운전원 조치 없음
6	밀봉 누설 : 5 GPM(정상 RCS 조건) 냉각 방법 : 안전밸브 설정 압력에 해당하는 포화 온도로부터 470 °F까지 100°F/hr로 2 차측 온도 냉각(원자로 정지 10분 후 출발)

Reference

- 1) Letter from D. G. Eisenhut to All licensees of operating Nuclear Power Reactors and Applicants for operating licenses, Emergency Procedures and Training for Station Black out Events Generic Letter 81-04, Februry 25, 1981.
- 2) Letter from R.W. Jurgensen to D.G. Eigenhut, Emergency Procedures and Training for Station Blackout Events, OG 57, April 9, 1981.
- 3) Letter from B.L. King to R.W. Jurgensen, Emergency Procedures and Training for Station Blackout Events, WOG81-148, April 10, 1981.
- 4) WCAP-10541, Revision 2, Westinghouse Owners Group Report, Reactor Coolant Pump seal Performance following A loss of All AC Power, November 1986.

- 5) Westinghouse Owner's Group, "Emergency Response Guideline" Revision 1C, HP Version 1996
- 6) Westinghouse Owner's Group, "Emergency Response Guideline" Revision 1C, LP Version 1996
- 7) 고리3,4호기 비상운전절차서 고유기술배경서
- 8) 고리3,4호기 비상운전절차서
- 9) 영광1,2호기 비상운전절차서 고유기술배경서
- 10) 영광1,2호기 비상운전절차서