

영광 3,4호기 원자로 제어봉 제어계통 설계내용 분석

김선호, 윤원영, 조항운

한국원자력안전기술원

요 약

국내 최초 운전경험을 갖는 CE 형 원전 설계인 영광 원자력 발전소 3,4호기의 제어봉 제어 구동 설비는 시운전 시험 과정 중 제어봉 제어용 전원설비의 전기적 잡음에 의해 일부 제어봉이 미끄러짐으로서 원자로가 계속적으로 불시정지 되었다. 이와 같은 현상으로 이미 국내에서도 가동 중인 고리 원자력 발전소 2호기에서도 고주파 용접기의 전도성 잡음에 의하여 제어봉 제어회로에 영향을 주어 여러차례 원자로 정지를 겪은바 있다.

따라서 원자력 안전기술원에서 제어봉 미끄러짐의 원인을 조사결과 직접적인 원인은 제어봉 전원공급 설비에서 발생한 전기적 잡음에 의해 제어봉 제어회로의 오동작 및 발전소 부하탈락 시험시 소내전원 주파수 상승으로 제어봉 코일에 정격이하의 저전압이 공급됨으로서 원자로가 불시정지 됨을 확인 하였다.

1. 개요

원자력 발전소의 제어봉 제어 계통은 운전 중인 원자로의 출력을 제어하는 일차적인 수단으로서 원전의 운전 안전성 확보 측면에서 보호 계통 이상으로 중요한 비중을 차지하여 왔다. 제어봉 제어 계통의 주요 기능은 발전소 기동 및 정상 운전시에는 제어봉 구동장치에 부착된 전자석의 힘을 이용하여 제어봉을 삽입 또는 인출함으로써 원자로의 출력을 조절하고, 원자로 정지신호 발생시에는 제어봉이 중력에 의하여 원자로 바닥에 신속히 낙하될 수 있도록 제어봉 구동 공급 전원을 차단한다. 영광 3,4호기 제어봉 구동 전원은 MG-SET(Motor Generator-Set)로부터 발생한 안정화된 교류 전원을 정류하여 사용하며, 이때 사용되는 정류소자는 Thyristor이다. 발전소 정상운전 중 제어봉 구동회로는 원자로 냉각재 평균 온도에 의해 계산된 제어 출력 요구 신호에 따라 제어봉의 이동 방향 및 속도를 결정한다.

영광 3,4호기 제어봉 제어 계통의 설계는 국내에 가동 중인 Westinghouse형 원전 제어봉 제어

설비와 유사한 구조로 되어 있으나 제어봉 구동 논리회로 설계에 PLC(Programmable Logic Controller)를 도입한 점과 제어봉 코일의 구성이 Upper Lift, Upper Latch, Lower Lift, Lower Latch 와 같이 4개의 코일 스택으로 이루어 있다는 점이 특이하다. 영광 3,4호기 제어봉 구동회로의 출력 전류를 생산하는 회로카드 종류로는 Phase Sync Pulse & CEA Select Logic Card, Individual CEA Enable & Pulse Count Logic Card, Coil Driver Actuating Logic Card, ACTM Card 등이 있다. 이 회로들의 주요 기능을 간략히 소개하면 Phase Sync Pulse & CEA Select Logic Card는 제어봉 구동코일에 공급되는 전원의 전압 크기를 조절하고, 교류전압 파형의 위상이 바뀌어지는 Zero Cross 지점을 감지하며 제어봉에 적절한 전압이 공급할 수 있도록 Thyristor에 적절한 Firing 신호를 전달한다. Individual CEA Enable & Pulse Count Logic Card는 구동되어질 제어봉의 선택 및 구동방향을 결정하며 Coil Driver Actuating Logic Card는 각 제어봉 전원공급에 관련하는 Thyristor의 구동 및 ACTM Card 상태를 감시한다. 이외에도 ACTM (Automatic CEDM Timer Module) Card는 제어봉의 원활한 동작과 제어봉 코일의 과열을 방지하기 위하여 ACTM Card 내에 소프트웨어 프로그램이 내장되어 제어봉 상태를 감시하면서 최적의 구동 동작이 이루어 질 수 있도록 설계된 것이 특징이다. 제어봉 제어 계통의 시운전 과정에서는 제어봉에 공급되는 전원 상태와 제어 설비의 기능 건전성이 확인되어야 하는데, 이 과정에서 타 설비와의 연계성을 점검하여 설계 요구대로 동작되는지도 확인되어야 한다.

따라서 안전기술원에서는 영광 3호기 시운전 기간중 제어봉 구동 설비에 대해 M-G Set 용량 문제와 제어봉 구동회로에 대한 정밀 진단을 수행하였으며, 점검 결과 제어봉 구동 과정에서 발생한 전기적 잡음(Line-Notch)이 제어봉 제어카드의 오동작을 유발시키고, 발전소 부하탈락에 의한 소내전원 주파수 상승은 제어봉 제어코일에 비정상적인 저전압을 공급한다는 사실을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 이와 같은 영광 3호기 제어봉 구동 회로에 대한 시운전 시험 결과를 토대로 제어봉 제어설비의 Zero Cross Detect Card 오동작 원인 및 부하 탈락에 의한 전원 주파수 상승에 대한 문제점을 분석하고자 한다.

2. 문제점 고찰

영광 3,4호기 제어봉 구동제어설비 전원인 MG-SET는 정상운전시 2대가 병렬운전되며 1대의 MG-SET 고장이 발생하더라도 나머지 1대만으로도 충분한 전원공급이 가능하도록 설계되어 있다. 그러나 실제 영광 3호기 시운전과정에서 한 대의 M-G Set로서 제어봉 Group Mode 이동시 모든 제어봉이 인출되지 않는 사례가 나타난바 있으며, Manual Individual Mode 에서도 총 73개중 7개의 제어봉이 인출되지 않았거나 부적절한 동작이 나타나는 사례가 발생된바 있다. 2개의 제어봉이 겨우 동작할수 있음을 보여 주었다. 이때 모든제어봉을 고정하고 있는 Gripper Coil에 정격 이하의 저전압이 공급되고 있음을 확인하였고 ACTM은 인출되지 않는 5개의 제어봉이 저전압상태임을 감지하였다. 또한 영광 3호기 시운전 말기에 실시된 이차측 발전기 부하 탈락에 의한 일

차측 원자로 제어 추종 능력을 확인하는 발전소 부하 탈락(Load Rejection Test)시험에서도 소내 전원 주파수가 일시적으로 약 63 Hz까지 상승되는 과정에서 일부 제어봉의 미끄러짐 현상이 발생되었고 이로 인한 원자로 정지를 수차례 경험한 바 있었다. 이를 계기로 영광 3,4호기 MG-SET의 설계 용량부족에 관심이 모아졌으나 안전기술원 요원의 입회하에 실시된 정밀진단 결과의 분석을 통하여 영광 3,4호기 MG-SET의 전원공급능력에는 이상이 없는 것으로 확인 된바 있다. 그 후, 제어봉 제어전원 공급상태를 점검하면서 공급전원선로에 일정한 형태의 Line Notch Noise 현상이 발견되었는데 이러한 전기적 잡음의 발생원인은 제어봉 정류소자인 Thyristor가 동작 단계에서 유도성 부하에 의하여 두개의 상이 동시에 도통될 때 Thyristor 내부에서 순간적인 전기적 단락에 의한 것임을 확인 할 수 있었다.

첨부된 그림 1에서는 제어봉에 공급되는 전압의 생성과정을 나타낸다. 영광 3,4호기는 양파 정류 제어 방식을 사용하는데 만일 Zero Cross Detector Card의 오동작으로 Thyristor의 동작시점이 과도하게 이동되었을 때는 전혀 다른 전압이 발생할 수도 있음을 알 수 있다. 제어봉 구동 코일에 적절한 공급 전압을 인가하기 위하여는 Phase Sync Card에 내장된 Zero Cross Detector 회로에서 교류 전원의 위상이 영전위(Zero Cross)를 통과하는 지점을 정확히 감지하여 Thyristor 제어 기준 신호를 전달하는 것이 매우 중요하다. 영광 3호기 시운전 과정중에서 발견된 제어봉 제어전원의 Line-Notch Noise현상은 Zero Cross Detector Card의 오동작에 기인하여 Thyristor의 Firing시점이 부적절하게 이루어진 것으로 확인 되었다.(그림 2참조)

현재 영광 3호기에서는 이러한 오동작을 방지하기 위하여 과도한 Line-Notch 현상이 발생시에도 Zero Cross Detector Card가 오동작 되지 않도록 60Hz 주파수 대역 통과필터회로(Band Pass Filter)의 Quality Factor를 조정하여 그 기능을 개선한바 있다. 일반적으로 제어봉 구동전류 제어의 불안정은 제어봉이 미끄러지게되는 주원인으로 작용할 수 있다. 한편, 발전소 부하 탈락(Load Rejection Test)시험시 발생된 제어봉 미끄러짐 현상은 발전소 부하 탈락시 나타나는 소내전원의 주파수 상승과 밀접한 관계에 있음을 알 수 있었다. 즉 소내 전원 주파수 상승시 이로인한 Thyristor의 동작 주기가 단축되면서 제어봉에 공급되는 전압이 감소되며 이로 인한 부적절한 동작이 발생됨을 알 수 있었다. 실제 발전소 부하 탈락 시험중 부하 탈락이 일어나면 RPCS(Reactor Power Cutback System)에서는 Group 5 제어봉을 먼저 원자로 속으로 낙하시키고 RRS에 의해 Group 4 제어봉으로 원자로 출력을 조절한다. 이때 이차측에 과도한 증기를 SBCS(Steam Bypass Control System)에 의해 우회 시켜 원자로 출력과 발전기 출력의 균형을 이루면서 발전소 상태를 안정화시키려 하며 이러한 과정에서 Governor Valve가 이차측 발전기 출력에 해당하는 증기의 양을 공급하도록 조절되어야 되나 기계적인 설계 특성으로 일시적인 소내전원 주파수 상승은 필연적으로 나타나게 된다. 영광 3호기의 경우 발전소 부하 탈락 이후 약 8초경과시 전원주파수가 63Hz까지 상승되는 것으로 관찰되었으며 이때 제어봉에 공급되는 전압은 24.4Vdc까지 감소되었다.(그림 3참조)

따라서 발전소 부하탈락 후 원자로 불시정지를 방지하기위한 목적으로 영광 3,4호기에서는 현재 RPCS에 10초동안 어떠한 신호의 발생시 제어봉이 작동되지 않도록 CMI(CEA Motion Inhibit)신

호를 추가하여 운전되고 있다. 이러한 설계 변경은 현재 정상 운전 중 약 70 Psia의 운전 압력 여유도를 가지고 있고 10초동안 제어봉이 움직이지 않더라도 약 3 Psia 정도 계통 압력이 상승함으로서 영광 3,4호기 운전 안전성은 확보 될 수 있을 것이라는 사실에 기인한다. 그러나 영광 3,4호기 운전중 부하탈락 신호발생후 제어봉의 움직임을 10초동안 고정함으로서 신속한 제어봉의 인출 또는 삽입이 이루어 지지 못할 가능성은 배제할 수 없는 것으로 평가되어 진다.

3. 결론

이와 같이 영광 3호기 에서 발생한 제어봉 미끄러짐 현상은 제어봉 전원설비의 전기적 잡음발생 문제를 설계초기 단계에서 예상치 못함으로 인하여 발생되었고, 부하탈락으로 인한 소내전원 주파수 상승시 제어봉에 정상적인 전압을 공급하지 못하므로서 발생되었다. 따라서 후속기부터는 아래과 같은 3가지 요인이 설계초기부터 고려된다면 영광 3,4호기에서 발생되었던 문제점은 근본적으로 해결될 수 있을것이라 판단된다.

첫째, MG-SET 출력단에서 검출된 Line-Notch Noise 발생은 회로 특성상 불가피한 것으로 평가되어지지만 이러한 현상을 최소화하기 위하여 AC Line Filter에 대한 재평가와 제어봉 제어설비의 Ground 및 Shield방법에 대해 충분히 고려되어야 한다.

둘째, 전원주파수의 Zero Cross지점을 감지하여 위상제어하는 현설비 특성상 제어봉에 공급되는 전원의 주파수가 안정되게 공급될 수 있는 방안이 연구되어야 한다.

셋째, 제어봉 제어설비는 마이크로프로세서를 기반으로한 디지털 제어설비로서 신뢰할 수 있는 소프트웨어사용과 전자기파 장애에도 충분한 내성을 지니고 있음을 보증하여야한다.

4. 참고문헌

1. CEDMCS Technical Manual for YGN 3&4 (10487-ME-TM250-00 Rev.0)
2. YGN 3 CEDMCS Zero Cross Detector Test Report(Feb. 27, 1995)
3. YGN 3&4 CEDMCS 시운전 절차서 수행 결과
4. Muhammad Harunur Rashid "Power Electronics Circuit Devices, and Applications", 1992.
5. Plant Outage Report From SONGS & PALO-VERDE (NUS CARL CD-ROM)

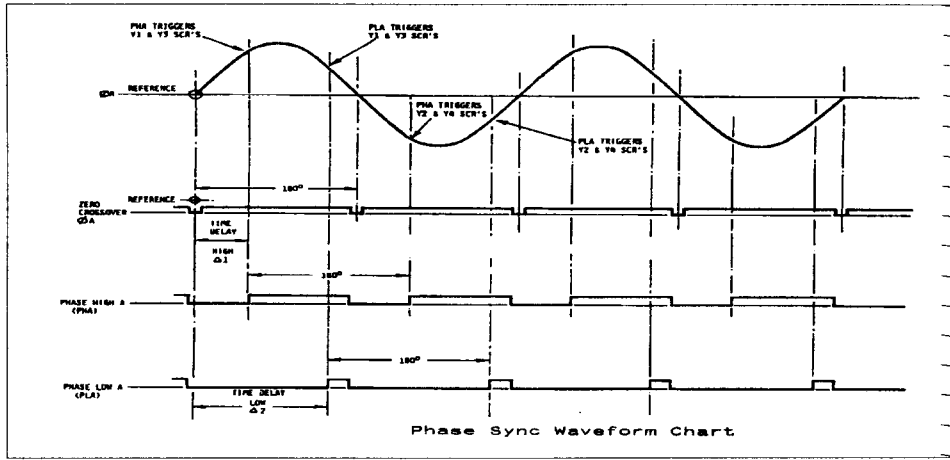


그림 1 : 제어봉 공급 전압 생성 과정

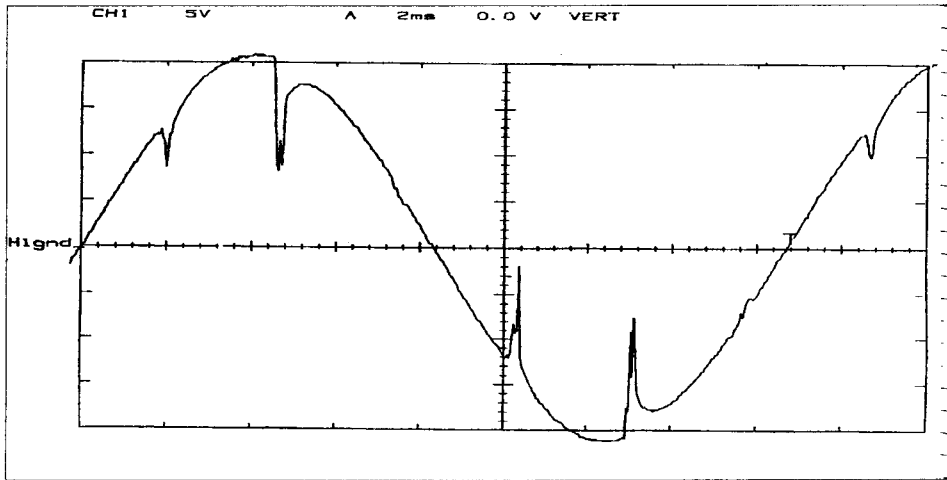


그림 2 : Thyristor 동작으로 인한 Line-Notch 현상

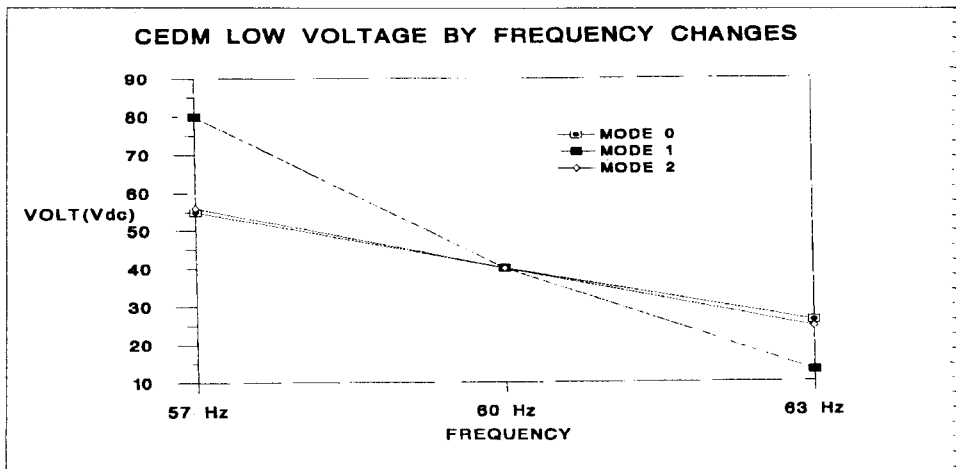


그림 3 : Zero Cross Detector Card 설비개선분석