

**월성원전 4호기 전 출력 운전시 소외전원상실시험 실패 원인분석**

蔣 台 輝\*

韓電.月城原子力本部 第2發電所

**Failure Cause Analysis for Loss of Off-site Power Test during Normal Full Power Operation On Wolsong-4 NPP**

Tae-Hee Chang\*

Nuclear Power Plant-2 of Wolsong Nuclear Power Div. KEPCO

**Abstract**—월성원전 4호기가 '99.06.09일 11:53분경 전출력 소외전원상실시험시 주발전기 병입차단기 및 기동용변압기 차단기의 트립과 동시에 예상 밖의 13.8Kv 원자로 냉각재펌프모터#3(9,000HP)이 순시 과전류 보호계전기(50Y) 동작으로 트립되어 이로 인한 냉각재 저유량으로 원자로 제1정지계통이 동작되고 원자로가 비상정지 되어 동 시험이 실패되었음. 이 비정상적인 고장은 예비디젤발전기의 수동 기동 병입과 터빈 수동 정지 및 주발전기 트립후 적절한 조치로 소내전원은 정상적으로 복구되었음. 이에 대해 냉각재펌프모터#3의 순시과전류 동작 원인을 유도전동기의 전원상실 후 발생하는 잔류전압(Residual Voltage)과 공급 모션전압(Bus Voltage) 측면에서 분석하며, 모터의 회전속도, 위상각, 잔류전압크기 변화 및 신속개방 절차시 냉각재펌프모터의 돌입 기동전류를 계산하고, PSS/E 프로그램을 사용한 간략한 모의 사례로 검증하였으며 이에 대한 재발방지를 위한 대책을 제시함.

단기(CB7800, 7872)를 동시에 개방하여 소외전원을 상실 시켰을 때 발전소의 각 계통이 정상적으로 동작하여 원자로 출력은 60%FP로 연속감발 되고 터빈/주발전기는 트립되지 않고 소내부하운전이 가능함을 입증하기 위함이다.

**(2) 초기조건**

발전소 운전상태는 대체 운전 모드(Alternate Mode)에서 원자로 및 터빈출력을 100%FP로 유지하고, 터빈출력제어기인 Mark-V는 터빈모드를 'Semi Auto'로, Load Control Mode는 'Remote'로 선택한다. 13.8Kv 모션인 BUA는 기동용변압기(SST: System Service Transformer)에서, BUB는 소내용변압기(UST: Unit Service Transformer)로부터 전력이 공급 중으로 상호 동기상태이어야 하고, 이들 변압기의 탭절환장치는 자동모드에서 각 모션의 자동전압조정계전기(90R)에 따라 정상 운전 중이어야 한다. 만약의 시험 실패시 정전을 대비하여 예비디젤발전기 두 대는 자동 기동 가능상태로 두고, 터빈 베어링용 비상윤활유 펌프와 주발전기용 비상 수소밀봉유펌프는 자동 기동 대기상태에 있어야 한다. 또한 13.8Kv 모션 절체와 관련된 경보는 발생된 것이 없으며, 각종 시험 기록장치와 시험용 조작회로 및 스위치는 준비되어 있어야 한다. 시험 도중 원자로 트립후에도 원자로 및 증기발생기에 저장된 열에너지로 인하여 터빈/발전기가 계속 정상 구동을 할 수 있는 경우에는 발전소 상태를 감시하면서 계속 운전하되 보일러 압력이 39Bar 이하, 또는 저압터빈 후드온도가 93℃ 이상시에는 터빈을 수동 트립시킬 수 있도록 준비가 되어 있어야 한다.

**(3) 시험방법**

본 시험은 초기조건이 만족된 상태에서 카운트를 10에서 시작하여 카운트 3에서 모든 기록계를 가동하고 카운트 0에서 시험용 스위치를 조작하여 주발전기와 기동용변압기의 차단기를 동시에 트립시킨다(그림 1 참조). 이에 따라 모션 5314-BUA 부하는 신속개방절체로 소내용변압기로 절체되어 전원공급을 받으므로 5314-BUA, BUB 부하는 모두 소내용변압기로부터 공급받는 소내부하운전을 하게 된다. 시험 시작 후 매 5분마다 발전소 전산기의 각종 트렌드와 로그(Log)를 출력하며 발전소 응답상태를 확인한다.

중요 확인사항은

- 원자로출력 60%FP 연속감발 운전중일 것.
- 터빈/주발전기가 소내부하운전(5314-BUA, BUB 부하 공급)중일 것.
- 소내 전원 자동절체(5314-BUA/05 트립, 5314-BUA/11 투입) 성공.
- 증기발생기 수위 정상상태 확인 등이다.

**1. 서 론**

중수로 원전에서 전 출력에서의 소외전원상실시험은 원자로 출력 100%FP상태에서 345Kv 주변압기와 기동용변압기측 차단기를 동시에 개방하여 소외전원을 상실 시켰을 때 발전소계통이 정상적으로 동작하여 원자로 출력은 60%FP로 연속 출력감발(Setback)된 상태에서 터빈/발전기는 트립되지 않고 소내부하운전(House Load Operation)의 가능성을 입증함을 목적으로 하고 있다. 이것은 원자력발전소의 외부로 연결되는 모든 소외전력계통이 어떤 원인으로 트립되어 송수전이 불가능한 상태가 되더라도 원전의 터빈/발전기에 의한 일차적인 소내전원 확보로 원자로 및 보조기기에 안전한 전력 공급이 가능하도록 하는 것이다.

본시험의 시험 방법은 먼저 초기 조건을 만족시킨 후 주발전기용과 기동용변압기용 차단기를 동시에 개방이나 트립을 시키므로 설계된 시퀀스에 따라 터빈/발전기의 적절한 출력감발과 이에 따른 원자로의 연속 감발이 이루어져 원전 전체가 발전정지 없이 소내 부하운전을 감당하게 되어 있었으나, 예상치 않은 냉각재 펌프모터 #3의 불시 트립으로 원자로가 정지되고 소내부하운전은 실패로 끝났었다. 이에 대한 시험방법상의 문제점과 설계상의 문제점을 규명하고 정상, 비정상 및 비상운전 절차서 개정을 포함한 적절한 대책을 수립하고자 한다.

**2. 본 론**

**2.1 전출력 운전 소외전원상실시험과 실패 현상**

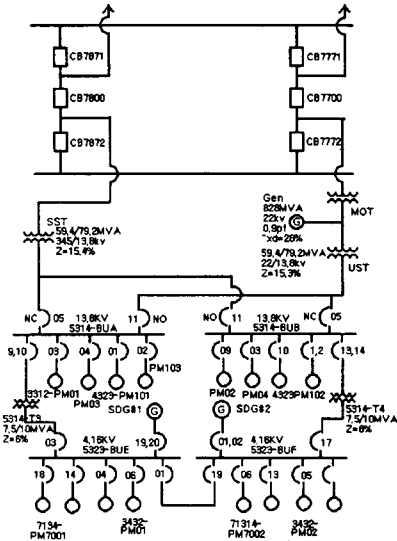
**2.1.1 소외전원상실시험**

**(1)시험 목적**

원자로 출력 100%FP 상태에서 345Kv 주발전기용 병입차단기(CB7700, 7772)와 기동용변압기의 차

그림 1. 월성-4호기 전력계통도(주발전기, 주변압기,

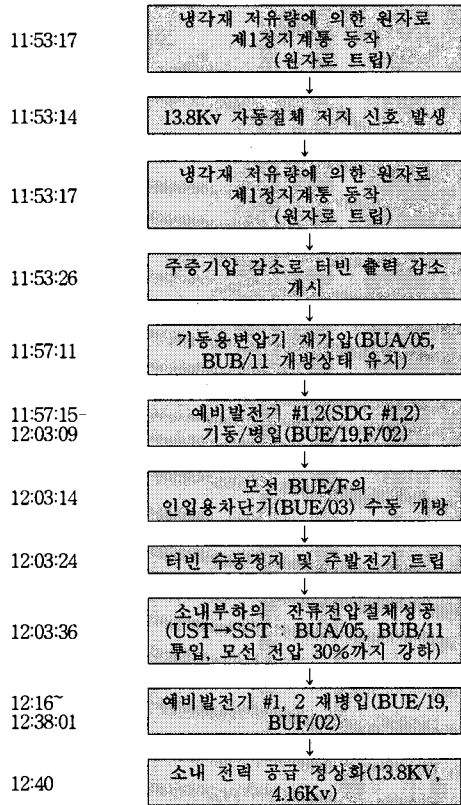
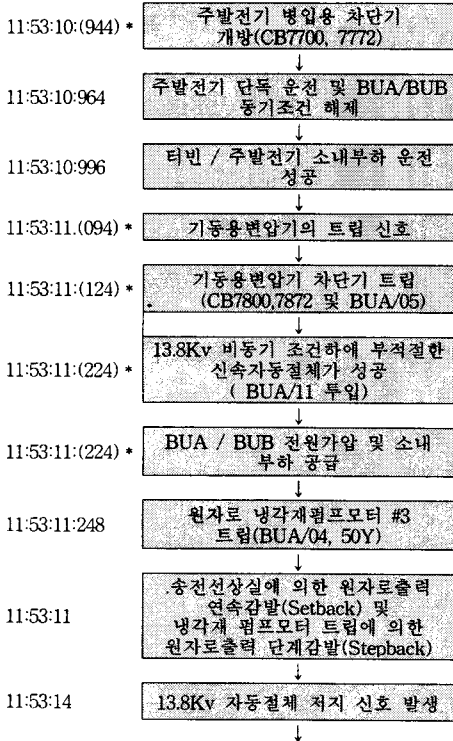
소내용변압기, 기동용변압기)



2.1.2 시험 및 고장 발생 시퀀스

시험당시 발생된 경보 메시지를 근거로 고장 발생 및 조치사항을 시퀀스로 정리하면 그림2와 같다.

그림2. 시험 및 고장 발생 시퀀스



\* ( )수치는 기기동작 시간을 감안한 예상 추정값임.

2.1.3 경보 메시지 분석

본 시험실패 기간 중 발생된 경보를 검토한 결과 주발전기 및 기동용변압기 차단기 트립시 발생된 CI 경보와 발생시각은 아래와 같았다. 즉 CI1823(\*) 외에는 소의전원 상실 시험시 발생하는 정상적인 경보였다. A CI1470 5314-BUA/B Not Synchronized(115310.964) A CI1078 51020 Loss of Line(115310.996) A CI1392 51020 Generator BKR Open(115310.996) A CI1823 5314-BUA04 BRK Trip 3312-PM03(115311.248)\* A CI1793 51041-T1 Gen/MOT Abnormal(115311) A CI1485 51043-T1 SST Trip Mech Fault A CI1071 4122-01 Excit. Mal Fault(115311.368) N CI1793 51041-T1 Gen/MOT Abnormal(115311) N CI1071 4122-01 Excit. Mal Fault(115312.428) A CI1734 5054-PL501 13.8Kv Transfer Blocked(115314) 이상의 경보는 시험기록계 용지의 기록처럼 주발전기용 차단기(7700, 7772)가 11:53:10.964에 먼저 트립되고, 약 32ms 뒤에 송전선로상실 및 주발전기용 차단기 개방(CI1078, 1392) 경보가 발생되었으며, 약 252ms 뒤에 냉각재펌프#3이 트립된 것으로 보아 이 기간동안 기동용변압기 차단기(7700, 7772) 트립후 0.2초내 자동 트립 신호를 발생하도록 되어 있음)되어 BUA/05가 트립되는 순간에 소내용변압기로 신속개방절체를 시도하여 BUA/11이 100ms 정도에서 투입된 것으로 판단된다. 순시과전류 보호계전기(51Y) 동작 당시 상황을 살펴보고자 한다. 소의전원상실 시험절차상 기동용변압기 차단기(CB7800, 7872)가 주발전기 병입용차단기(CB7700, 7772)보다 0.2초 정도 먼저 차단토록 되어 있었으나, 실제 시험 기록용지의 기록을 검

또한 결과 주발전기 병입용차단기가 먼저 개방되고, 0.15초 후에 기동용변압기의 차단기가 트립 되었다. 따라서 주발전기가 100%FP에서 부하 차단하여 부하가 급감된 후 소내부하 운전으로 이는 소외전력계통과는 완전 분리된 단독운전이며 BUB 부하에만 전력을 공급하고 있었다. 따라서 소외전력계통에 병입되어 운전중인 기동용변압기가 공급하고 있는 BUA와는 동기가 이뤄지지 않는 상태였다. 이때 기동용변압기가 86T-S2동작으로 트립되자 BUA는 전원상실이 발생되었고 이때 소내용변압기로 신속 자동절체는 동기조건을 만족시키지 못하여 수행될 수 없었으나, 실제로 25CH 동기점정계전기가 동기조건 상실후 0.25초 시지연트립 아웃 조건으로 마치 동기가 된 것처럼 인식하고 BUA 절체용차단기(BUA/11)가 투입되었다. 이것은 BUA 모션전압이 전력계통 분리후 대형 모터부하에 의한 잔류전압이 서서히 감소하는 순간 소내용변압기로부터 공급전압과 모터측의 잔류전압간 위상각은 100mS 동안 상당히 벌어진 상태에서 BUA/11이 투입되었고, 두 전원의 과대한 위상각이 있는 비동기상태에서의 부적절한 차단기 투입은 원자로 냉각재 펌프모터의 전원단자에 약 2배의 공급전압으로 인가되어 약 2배의 돌입전류가 재기동 및 가속하려는 동 모터에 흘러 들어감으로 순시과전류 보호계전기가 정동작 된 것으로 판단되었다. 또한 약 2.5초후 13.8Kv 자동절체 저지 경보(CI1734)가 정상적으로 발생되었으며, 송전선 상실로 인한 원자로 연속 출력감발(RRS553 : 115311)과 냉각재펌프 트립에 의한 원자로 단계 출력감발(RRS445 : 115311)도 정상적으로 이루어졌고, 잇따른 냉각재 고압에 의한 단계 출력감발(RRS447 : 115313)도 정상적으로 개시되었다.

원자로 트립에 따라 중기발생기의 주중기압이 계속 강하됨에 따라 터빈/주발전기를 정지하기 전 예비발전기를 기동 운전하여 등급3 전원을 먼저 확보하고 등급4 전원을 상실케 한 것은 원자로 안전상 적절한 조치였다.

## 2.2. 원자로 냉각재펌프 모터 트립 원인

### 2.2.1 순시과전류 보호계전기(51Y) 동작 분석

#### (1) 냉각재 펌프모터의 순시과전류보호계전기(BUA/04, 50Y) 정정치 검토.

냉각재 펌프모터(3312-PM 03)의 정격 및 보호계전기 정정치는 다음과 같다.

- 정격: 13,200V, 9,000HP, FLC=355A, LRC=2,070A.
- 정정치: 50Y: 800/5A, 26A(26x800/5)=4,160A
- MPR-2000: Hiset O/C=400/5A, 1100% FLC(355A x 1.1=3,905A), 순시동작.

정정치를 검토한 결과 순시과전류는 동 모터의 기동전류(LRC)의 약 2배로, 이는 정상부하전류의 약 11배로 적절하게 정정되어 동 모터 인입케이블의 단락사고시 순시 차단에 의해 적절하게 보호하도록 되어 있었다.

또한 사고 이후 동 50Y 보호계전기를 임시 시험한 결과 정정치에 정동작 함을 확인하였다.

본 시험 중 냉각재펌프모터 트립 당시의 순시 과전류치를 계산해보면, 만약 BUA/11 차단기가 투입될 당시 소내용변압기에서 공급 전압과 모션 BUA의 잔류전압 사이에 위상각이 백터적으로 약 2배의 정격전압만큼 벌어져 있었다면, 유도전동기의 기동전류는 슬립과 공급전압에 비례하므로 돌입 기동전류 Iir는

$$I_{ir} = 13.8 \times 2 / 13.8 \times 2,070 A = 4,140 A$$

이는 순시과전류계전기(50Y) 동작치인 4,160A에 근접하는 수치로 정동작 되었다고 본다.

### 2.2.2 유도전동기의 잔류전압변화에 의한 분석 [01][02][03]

냉각재 펌프 모터의 잔류전압 계산에 관련된 데이터는 공장시험성적서에 따르면 아래와 같다

(모터)

- 9,000HP(6,711.3 KWe), 13.2Kv, 3상, 60 Hz.
- 동기속도: 1,800rpm ○ 서비스계수: 1.0
- 전부하 속도: 1787rpm ○ 전부하 슬립: 0.72 %
- 효율 : 94.98 % (전부하)
- 역률 : 89.54 % (전부하)
- 전부하 전류 : 345 A
- 기동 전류 : 2085 A (돌입 전류비 : 604 %)
- $X_d' = 3.655 \Omega$ ,  $X_d = 4.60 \Omega$
- 개방회로 시정수( $T_0'$ ) : 1.89 (초)
- 회전자 관성정수( $WK^2$ ) : 30,000(lb-ft)

(= 278.8Kg-m<sup>2</sup>)

○ 정격전압에서 토오크

$$+ \text{전부하} = 26,440 \text{ lb.f.}, + \text{기동} = 25,382 \text{ lb.ft.}$$

$$+ \text{정동} = 58,168 \text{ lb.ft}$$

$$+ \text{정동토오크} / \text{기동 토오크} = 2.291 \text{ 배}$$

$$+ \text{정동토오크} / \text{전부하 토오크} = 2.20 \text{ 배}$$

(펌프)

○ 전부하 토오크 : 26,440 (lb-ft)

○ 회전자 관성정수( $WK^2$ ): 1,100(lb-ft<sup>2</sup>) (= 7.83Kg-m<sup>2</sup>)

#### (1) 전원 상실 후 냉각재펌프모터#3 회전속도 계산

○ t 시각:

100/1000 초 (= 6.0 사이클 : A/05 트립후 A/11 투입까지 시간)

○ t 초 후 모터의 회전속도 :

$$S(t) = \left[ \frac{1-s}{1 + \frac{308 \times T_f \times t}{wk^2 \times rpm \times (1-s)}} \right] = S(0.1초) \quad (1)$$

$$= \left[ \frac{1-0.0072}{1 + \frac{308 \times 26,440 \times \frac{6.0}{60}}{31,100 \times 1,800 \times (1-0.0072)}} \right] = 0.9784$$

$$S(\text{실제}) = (0.9784) \times 1,800 \text{ rpm} = 1761.2 \text{ rpm}$$

#### (2) 잔류전압 E'와 BUA 정상전압간의 위상각

• 동기 각속도  $\omega_0 = 360f$  이므로

$$\theta(0.1초) = \frac{360 \times 60 \times 6.0}{60} \times \left[ 1 - \frac{(1-0.0072)}{1 + \frac{154 \times 26,440 \times \frac{6.0}{60}}{31,100 \times 1,800 \times (1-0.0072)}} \right] \quad (2)$$

= 31.148° 가 된다.

#### (3) A/05 차단기 트립후 잔류전압의 크기 계산

0.1 초(6.0 사이클)후의 잔류전압의 크기는

$$E'(t) = V_b \times e^{-(t/T_0')} \quad (3)$$

$$T_0' = X_m + X_2 / \omega_0 \times R_2 \quad (4)$$

$$= X_m + X_1 / \omega_0 \times R_2$$

$$E'(0.1초) = 1.0 \times e^{-\frac{0.1}{1.89}} = 0.9478 \text{ p.u.}$$

$$= 13.08 \text{ Kv} (= 13.8 \text{ Kv} \times 0.9478)$$

가 된다.

#### (4) 차단기(A/11) 투입시 돌입전류 계산

A/11 차단기 투입시 돌입전류 I는

$$I = \frac{|V_s - E'(t) \angle \theta(t)|}{|\Sigma Z|} \quad \Sigma Z = Z_s + Z_m \quad (5)$$

모터의 전부하 KVA 기준으로 모든 임피던스를 변환하면 모터의

$$KVA = \sqrt{3} \times VI = \sqrt{3} \times 13,200 \times 345 = 7,887.5 \text{ KVA}$$

$$Z_t = \frac{7,887.5}{59,400 \times 0.153} = 0.0203 \text{ p.u.} \quad (6)$$

$$Z_{sys} = \frac{7,887.5}{750,000} = 0.0105 \text{ p.u.} \quad (7)$$

$$Z_s = Z_{sys} + Z_t = 0.0105 + 0.0203 = 0.0308 \text{ p.u.} \quad (8)$$

$$Z_m = \frac{7,887.5}{7,887.5} X_d' = \frac{7,887.5}{7,887.5} (13.0\%) = 0.13(\text{p.u.}) \quad (9)$$

계통 분리된 주발전기와 감속중인 냉각제펌프모터간의 위상각은 주발전기측 전원의 위상각이 0.15+0.1초 후에 전력계통측과 72° 이라면, A/05 차단기트립 0.1초(4.08 사이클)후 Vg- Vm간 위상각은

Vg 위상각 = 72°, 단 주발전기 단자전압은 부하 차단에 따른 터빈의 속도 상승에 따른 6%/초의 전압 상승을 감안함. 따라서 0.218초 후 단자전압은  $1.0 + (1.0 \times 0.218 \text{ 초} \times 0.06) = 1.013 \text{ p.u.}$

Vm 위상각 = 31.148°

Vg- Vm간 위상각 : 103.148°

ΣZ = 0.1608

$$I = \frac{|V_s - E'(t) \angle \theta(t)|}{\Sigma Z}$$

$$= [(1.013 \angle +72 - (13.088/13.8 \angle -103.148^\circ)) / \Sigma Z$$

$$= (1.013 \sin(72^\circ) - (13.088/13.8 \sin(103.148^\circ)) / \Sigma Z$$

$$= (1.013 \times 0.951) - (0.9484 \times 0.9738) / 0.1608$$

$$= 11.7327 (= 4.047A)$$

따라서 Ft/Fi =  $(1173.27/604)^2 = 3.769 \text{ p.u.}$

표 1. 냉각제펌프모터의 운전자료

No	출입 (Slp)	부하 용량	관성 정수	유기 속도	일회 시간	최소 전압	개발 회로 시정수	기동 전류	전류 하 전계 (Za)	임피던스 (Zm)	임피던스 합 (Z)	
1	0.0072	26440	31100	1800	0	13.8	1.89	2085	345	0.0308	0.13	0.160832955
2	0.0072	26440	31100	1800	0.001	13.8	1.89	2085	345	0.0308	0.13	0.160832955
3	0.0072	26440	31100	1800	0.002	13.8	1.89	2085	345	0.0308	0.13	0.160832955
4	0.0072	26440	31100	1800	0.068	13.8	1.89	2085	345	0.0308	0.13	0.160832955
5	0.0072	26440	31100	1800	0.07	13.8	1.89	2085	345	0.0308	0.13	0.160832955
6	0.0072	26440	31100	1800	0.072	13.8	1.89	2085	345	0.0308	0.13	0.160832955
7	0.0072	26440	31100	1800	0.074	13.8	1.89	2085	345	0.0308	0.13	0.160832955
8	0.0072	26440	31100	1800	0.076	13.8	1.89	2085	345	0.0308	0.13	0.160832955
9	0.0072	26440	31100	1800	0.078	13.8	1.89	2085	345	0.0308	0.13	0.160832955
10	0.0072	26440	31100	1800	0.08	13.8	1.89	2085	345	0.0308	0.13	0.160832955
11	0.0072	26440	31100	1800	0.082	13.8	1.89	2085	345	0.0308	0.13	0.160832955
12	0.0072	26440	31100	1800	0.1	13.8	1.89	2085	345	0.0308	0.13	0.160832955
13	0.0072	26440	31100	1800	0.124	13.8	1.89	2085	345	0.0308	0.13	0.160832955
14	0.0072	26440	31100	1800	0.2	13.8	1.89	2085	345	0.0308	0.13	#REF!

표 2. 냉각제펌프모터#3의 잔류전압 계산결과

NC	최종속도	실제속도	위상각	잔류전압크기	돌입전류	기동 토오크
1	0.9928	1787.04	72	13.8	11.90104	3.877896
2	0.992655	1786.778	72.15709	13.7927	11.90317	3.87928
3	0.992509	1786.516	72.31732	13.7854	11.90535	3.8807
4	0.983005	1769.41	89.8041	13.31232	11.9868	3.933985
5	0.98272	1768.897	90.5455	13.29824	11.98028	3.929708
6	0.982435	1768.384	91.29927	13.28417	11.97274	3.924763
7	0.982151	1767.871	92.06542	13.27012	11.96413	3.91912
8	0.981866	1767.359	92.84393	13.25609	11.95441	3.91275
9	0.981581	1766.847	93.6348	13.24207	11.94351	3.905623
10	0.981297	1766.335	94.43803	13.22806	11.93141	3.897709
11	0.981013	1765.823	95.25361	13.21407	11.91804	3.888979
12	0.978463	1761.233	103.1487	13.08882	11.73277	3.769011
13	0.975083	1755.15	115.2242	12.92366	11.25905	3.470802
14	0.964534	1736.161	165.0403	12.41429	#REF!	#REF!

### 2.2.3 타 보호계전기 동작 가능성 검토

#### (1) 냉각제 펌프모터 #3의 프로세스 트립(3TR) 검토

BUA/04 큐비클내에 있는 3TR은 동작시 냉각제 펌프모터의 차단기를 트립시키며, 동작조건은 조작스위치(HS-23)에 의한 수동 조작이나, 동 모터의 상부측 베어링의 고온도(115℃ 설정) 동작(RL-70), 또는 냉각제 저압력 트립 동작(RL-55.56)인 경우와 기타 전기적인 록아웃계전기(86)의 동작이나 모션 저전압 동작(27A1+27C1) 인 경우이다. 사고 중에 출력된 경보 메시지가 각종 자료를 볼 때 모터의 상부측 베어링 온도나, 냉각제 저압력 트립이나 모션 저전압 발생의 근거는 없었으며, 만약 3TR이 동작했을 경우 반드시 조건 유지계전기(30)가 동작되었을 것이고, 이는 재기동전 반드시 조작 스위치로 복귀를 시켜야 하는데 그런 조작이 없는 것을 보아 사고 당시 3TR은 동작되지 않은 것으로 판단되었다.

#### (2) 록아웃 계전기(86) 동작 검토

록아웃계전기(86)의 동작 조건은 50/51(R.Y, B),87M(A,B,C),MPR(Motor Protection Relay: 49X)뿐이다. 사고 당시 상기 보호계전기 중 동작한 것은 50Y 뿐이었으며, 사고 후 보호계전기의 임시 개제 시험 결과 50/51(한시요소:6A, 순시요소:26A 정정 및 타게트 : 0.2A), 87M(2A 정정) 및 MPR (49X = 50S, 49S, 50G, 46)등 모든 계전기는 정상적이었고, 86 계전기 관련 트립회로 점검 결과도 이상이 없었다. 사고 당시 경보는 모션절체 순간에 트립이 발생된 것으로 보아 한시 과전류인 51(R, Y, B)이나 49S (15%PLC+30ch 지연)는 동작 할 시간이 없었다고 판단되며, 사고 후 모터 점검시 지락오장이나 내부저항/절연저항이 정상적인 것으로 보아 지락보호인 50G나 불평형 전류에 따른 역상보호인 46의 동작은 없었다고 판단된다. 단지 MPR의 정정치 중 50S가 1100%정정치 임에도 1200%(355A x 1/80 x 12 = 53.25A (=4.260A) 인가시 0.5초 후 트립)에 설정되어 있어 급번 사고시 과도한 돌입전류가 흘렀을 때 50Y(정정치:4.160A)가 먼저 동작되었다고 본다. 본 50S 정정치는 재조정되어야 한다고 본다.

#### (3) 진동이나 충격에 의한 오동작 검토

원판형식의 전자식 보호계전기가 진동이나 외부 충격에 의해 오동작할 수 있는 소지는 충분치 있으나, 트립 당시 이웃 차단기의 충격이라고만 바로 이웃인 A/03 차단기측이 더 큰 영향을 받았으리라 보며, 13.8Kv 개폐장치실의 평소 진동은 심하지 않은 편으로 급번 사고에 영향을 미쳤다고는 볼 수 없었다. 사고 후 몇 번의 이웃 차단기의 투입과 개방에도 전혀 영향이 나타나지 않았으며, 보호계전기의 커버를 두드렸을 때 타게트 는 간혹 떨어 질 수 있으나, 86 록아웃계전기가 동작 할 정도로 전기적인 접촉을 형성시켜 주지는 못했다.

#### 2.2.4 냉각제펌프모터 #3만이 순시과전류로 트립된 이유 검토

냉각제 펌프모터 #1, #3이 동일 모션인 BUA에 연결되어 운전중 기동용변압기 트립으로 인입차단기(A/05)가 차단되자 전정이 발생되었고 즉시 0.2초 이내 신속개방절체가 개시되어 절체용차단기(BUA/11)가 투입되었다. 이때 소내용변압기로 인가되는 공급전압과 모션 BUA에 걸려 있는 통합 잔류전압의 페이저 위상각과 전압차 및 주파수차는 냉각제 펌프모터의 순시과전류 정정치가 이상으로 나타날 만큼 크게 나타났다고 본다. 문제는 동일 모션에 연결되어 있는 냉각제 펌프모터 #1과 주급수펌프모터#1은 왜 순시과전류 트립이 발생되지 않았을까 하는 의문이었다. 이것은 간단히 순시과전류 정정치가 매우 높은 값으로 보호계전기의 오차(통상 5%)와 변류기 포화부분오차 및 각 모터의 특성차에 따른 것으로 볼 수 있다. 약차는 동

일 모선에 물려 있고 하나의 절체용차단기로 재투입하여 공급되었으므로 있을 수는 없으나, 페이저 위상각은 각 모터의 기계적인 특성 즉 회전자 및 공극의 잔류자속과 회전수의 감속율(Coast down rate) 등에 따라 변할 수 있어 돌입전류는 달라질 수 있다고 본다. 따라서 동일 모선에서 감속되고 있었던 동일형의 냉각재 펌프와 대형 주급수펌프가 순시과전류로 트립되지 않은 것으로 판단되나 이 부분에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 보며, 또한 과도한 돌입전류에 의해 모터 재기동시 굉장한 기동 토크와 모터 자체에 전자력에 의한 힘이 발생되는데 이때 보호계전기로서 트립을 시키는 것과 모터 및 축의 강도를 높이는 방안은 좀더 연구가 필요하다고 본다.

### 2.3 전산 모의 결과(04)(05)(06)(07)

주발전기가 소의전력계통과 분리되면 동기화(Synchronizing)가 되지 않으므로 주발전기와 연결된 소내용변압기로 수전 하는 부하는 전력계통과 연결된 기동용변압기로 신속개방절체를 하는 것이 금지되며, 또한 이 상태에서는 역으로 기동용변압기로 수전 하는 부하는 소내용변압기로 신속개방절체가 되는 것을 금지해야 한다. 만약 동기가 맞지 않는 상태에서 절체를 할 경우 비동기 모선 자동절체(Out-of-Phase Bus Transfer)로 차단기가 투입되는 시점에서의 상차각에 따라 전동기에 기동전류보다 큰 돌입전류가 흐르게 되며 이러한 과도 돌입전류에 의한 과전류보호계전기의 동작이나 과도한 축 토크에 의한 전동기의 축손상 등의 문제점이 발생할 수 있다.

한기(주) PSS/E 전산 프로그램을 사용하여 그림 01 월성4호기 전력계통도에서 13.8Kv 이상급 기기의 계통정수를 넣어 간략한 모델링으로 모의하였다. 냉각재 펌프와 같은 대용량모터를 대상으로 월성-4호기의 금번 사고와 같은 주발전기가 계통에서 분리된 후 기동용변압기에서 수전하던 부하가 소내용변압기로 신속자동절체를 하는 경우에 냉각재펌프모터의 돌입전류(In-rush Current)를 구하기 위해 본 시험 실패시 방법과 같이 다음과 같은 시나리오로 전산 모의한 한 결과는 아래 그림3,4,5,6과 같은 결과를 얻었다.

#### + Event Sequence :

1. 345Kv SWYD CB#1(7700,7772CB) Open
2. 345Kv SWYD CB#2(7800,7872CB) Open
3. 13.8Kv SWGR CB#1(BUA/05) Open
4. 13.8Kv SWGR CB#1(BUA/11) Close

그림3에서 냉각재펌프모터#3의 단자/잔류전압 변화는 전원 차단후 플라이회효과로 서서히 떨어지나 A/11 투입 순간 과대한 돌입전류로 공급측인 소내용변압기와 주발전기의 %Z강하로 최대 49.7%까지 떨어졌다가 복귀된 것으로 나타났다. 그림4에서 주발전기와 냉각재펌프모터#3간의 전압 벡터적인 V/Hz는 1.67pu까지 상승한 것으로 나타나 특수 유도전동기 설계치(=1.5)보다 높게 나타났다. 그림5에서 A/05 트립후 0.1초에 A/11 투입시 냉각재펌프모터#3과 주발전기간 위상각은 108°까지 변화한 것은 앞서 계산식에서 풀었을 때 103°와 유사하였음을 알 수 있고, 그림6에서 만약에 A/05트립후 0.2초에 A/11이 투입되었을 경우 그 위상각은 180°까지 변화함을 보여준다.

그림3. 냉각재펌프모터#3의 단자/잔류전압 변화

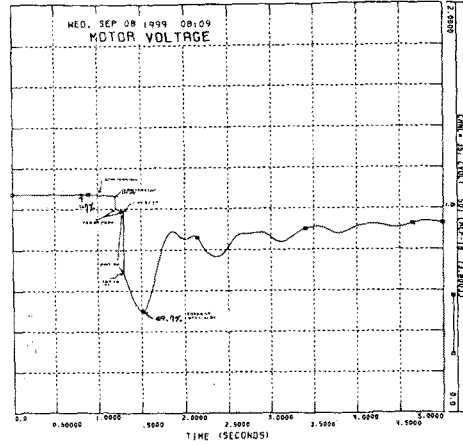


그림4. A/11 투입시 냉각재펌프모터#3과 주발전기간의 V/Hz 변화

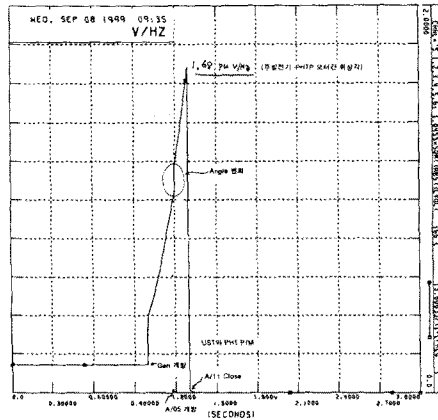


그림5. A/5트립후 0.1초에 A/11투입시 냉각재펌프모터#3과 주발전기간 위상각 변화

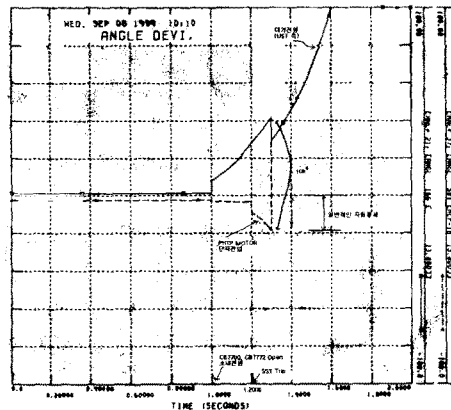
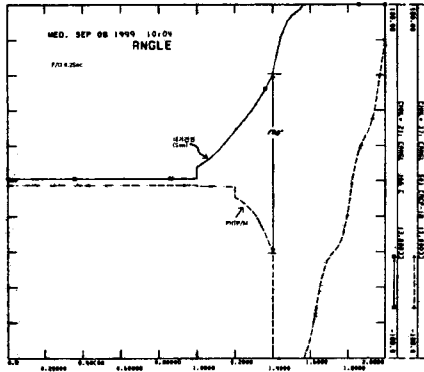


그림6. A/5트립후 0.2초에 A/11 투입시  
냉각재펌프모터#3과 주발전기간 위상각 변화



**2.4 소외전원상실시험 실패분석과 대책**  
**2.4.1 송전선 상실에 대한 소내배전계통의 자동절체방식의 설계상 문제점 (08) (09)**

일반적으로 모선 절체방식은 고속 모선절체방식(Fast Bus Transfer), 잔류전압 모선절체방식(Residual Voltage Bus Transfer), 위상감시모선절체방식(In-Phase Bus Transfer) 저속 모선절체방식(Slow Bus Transfer) 등이 있으며, 중수로인 월성2,3,4호기에서는 고속 모선절체방식인 신속개방절체방식(Fast Open Transfer), 잔류전압 모선절체방식 및 병렬절체방식(Parallel Transfer)이 사용되고 있다. 각 모선절체 방식의 장. 단점 비교는 표3과 같다.

표 3. 모선절체방식의 장단점 비교

모선절체 방식	고속모선절체	잔류전압모선절체	위상감시 모선절체	저속 모선절체
장점	절체 시간이 짧음. 모든 모선에 적용 가능	모터에 주는 충격이 적음. 절체 논리회로가 간단. 절체 실패 가능성이 적음.	모터에 주는 충격 최소화	절체 논리회로가 간단.
단점	모터에 충격을 줄 수 있음. 절체에 실패할 가능성이 많음. 절체 논리회로가 복잡함. 후비절체 방식이 필요함.	모든 모선에 적용하기 힘들. 절체 시간이 비교적 길다.	별도의 동기정지기 필요. 검증되지 않았음. 절체 논리회로가 복잡함.	절체 시간이 길다. 순차절체가 필요함.
적용처	월성-1~4 고리-3,4 영광-1~4 울진-3,4	월성-1~4(후비) 고리-3,4(후비) 영광-1,2(후비) 월진-1,2 울진-3,4(후비)		
기타	가장 일반적인 방식			잔류전압모선절체의 후비용으로 채택 가능.

송전선 상실에 대한 소내 배전계통 모선절체방식에서 적정 설계 여부를 판단하기 위해서는 소외전원과 연결되는 주발전기(CB7700/7772) 및 기동용변압기(CB7800/7872)의 차단기에 대해 다음의 3가지 경우 조건 성립 검토와 시험이 필요하다. 즉

- +조건 1. 주발전기(CB7700/7772) 선 트립후 3초 뒤 기동용변압기(CB7800/7872)가 트립된 경우
  - +조건 2. 기동용변압기(CB7800/7872) 선 트립후 3초 뒤 주발전기(CB7700/7772)가 트립된 경우
  - +조건 3. 주발전기(CB7700/7772) 트립과 동시에 기동용변압기(CB7800/7872)가 트립된 경우
- 를 상정할 수 있다. 여기서 3초간의 여유를 둔 것은 상기 선 조건 차단기가 트립된 경우 13.8Kv 모선의 자동절체 중 후비인 잔류전압 자동절체까지 이뤄질 수 있는 시간(설계 시지연 : 1.2초 + 1.8초의 여유도) 만

큼의 여유를 줄 경우 자동절체 논리회로가 적정한지를 검토하고, 최종적으로 최악의 경우인 두쪽의 4대 차단기가 동시에 트립되는 경우 신속개방절체(설계 시지연 : 0.2초)까지도 우선 이뤄질 수 없는 상황에서도 소외전원 상실시 주발전기는 부하차단과 동시에 적절한 모선 자동절체와 함께 소내부하운전을 성공적으로 수행하는지를 판단하게 된다. 현재의 자동절체용 논리회로 검토 결과는 어떤 경우라도 적정하게 절체 되도록 설계되어 있다.

**(1) 비동기시 차단기 투입조건 설계 오류 (0.25초 시지연)**

중수로의 1차 배전계통 자동절체방식 설계상 주발전기가 먼저 트립되고 0.25초내 기동용변압기가 트립되었을 경우 비동기시 차단기 투입에 따른 돌입과전류로 모터나 차단기등 기기 손상을 초래 하게 되는 문제점이 있는 것으로 확인되었다. 13.8Kv 자동절체방식중 특히 신속개방절체에 대하여 0.25초 시지연 동안 비동기 차단기 투입을 방지하는 설계 재검토가 필요하다.

**(2) 비동기시 차단기 투입에 따른 돌입기동전류 검토**

모선 자동절체 방식에서 병렬절체나 신속개방절체를 할 경우 두 모선간에 동기를 정정치 이내로 유지하는 것은 절대적인 조건이다. 그러나 급변 시험 실패시와 같이 단독 운전중인 주발전기와 소외전력계통과 동기 운전중인 기동용변압기와는 비동기 상태에서 신속개방 자동절체를 시도하여 결국 비동기 차단기 투입에 따라 냉각재펌프모터에 예상치 않은 돌입기동전류를 발생하였다. 비동기시 투입에 따른 돌입기동전류의 크기는 차단기 투입 당시의 전압차, 주파수차 및 위상차의 크기와 전원측의 계통정수인 동기임피던스의 크기에 따른다고 하겠다. 유도모터의 돌입기동전류는 공급전압과 모터의 잔류전압과의 차, 위상차 및 모터의 슬립에 의한 기동토크에 따른 기동전류와 전원측인 발전기와 소내용변압기의 동기임피던스에 따라 좌우 될 것이다. 과도돌입전류치는 계산식이나 전산프로그램(PSS/E, CYMER등)에 의한 모의시험으로 계산 할 수 있다. 또한 관련 차단기의 투입이나 트립시간과 자동절체에 관한 보조계전기의 점점 동작시간에 따라 잔류전압의 크기와 상차각이 달라지므로 이에 따라 과도 돌입전류치는 달라질 수 있다. 통상 차단기의 투입은 78ms이고 트립은 38ms 이내이며 절점의 개폐시간은 각 접점마다 10ms 이내이므로 신속개방 자동절체에 소요되는 전체 시간은 0.1초 이내이다. 즉 유도 모터의 잔류전압과 위상각은 최대 0.2초 내에서 변동을 분석하면 될 것으로 본다.

**2.4.2 소외전원상실 시험 수행상 오류 문제**

확실한 신속개방 자동절체와 소외전원 상실시험을 위해 기동용변압기의 차단기를 먼저 트립하고, 약 0.2초 후 주발전기용 차단기를 개방토록 동시 트립장치를 설치 운영하였으나 현장 단차결선의 오류로 인해 차단기 트립 순서가 바뀌어졌으며, 소외전력계통에서 분리되어 단독 운전중인 주발전기와 소외전력계통에 동기되어 운전중인 기동용변압기 전원과 비동기상태 조건에서 13.8Kv 절체용차단기(A/11)가 투입이 발생되었다. 시험장비 결선의 철저한 확인과 가능한 100%FP 부하차단시험과 소외전원상실 시험은 분리하여 순차적으로 시행함이 요구된다.

**2.4.3 중요시험의 순서적인 수행**

발전소 건설후 전출력에서 부하차단시험은 지금까지의 25, 50, 75%FP에서 부하차단시험과는 다른 의미를 갖고 있다. 전출력 차단시험은 계통측에서 볼 때 714MWe의 출력 상실로 인한 주파수 강하와 계통안정도 저하를 감당하는지를 확인하고, 발전소 측면에서

는 주발전기/터빈, 원자로 출력의 적절한 응답을 검증하는 계기가 되는 것이다. 건설 마지막 단계에서 최종 시험인 본 전출력 소외전원 상실시험은 지금까지의 시험이 종합적으로 성공적으로 완료되고, 시험결과치가 설계값과 적정함을 확인 후 수행되어야 할 것이다. 한편의 시험결과물로 원전의 중요 기기를 영구적으로 손상을 가져와 장기간 동안 발전소 운전 불가능 사태까지 갈 수 있는 가능성이 다분히 있기 때문이다. 면밀한 시험 방법 검토와 확정된 절차에 따른 시험 준비가 필요하다 하겠다.

#### 2.4.4 모터 부하들의 잔류전압 측정 자료가 없음

원전의 대형펌프모터의 잔류전압을 실측한 자료는 구할 수가 없다. 그러나 유도모터 관련 코드인 ANSI C50.41(Poly phase induction motors for Power generating Stations)에 의거 일반모터가 설계되어 1.33pu(특별한 경우 1.5pu)의 Voltage/ Hertz에서 견딜 수 있도록 설계 제작 된 것으로 판단된다. 따라서 본 냉각재 펌프모터의 축을 포함한 전체적인 설계가 공급전압과 잔류전압 사이에 과도한 위상차로 인해 과도한 인가전압과 단락에 가까운 돌입전류가 흘렀을 경우 기동 토오크에 의한 축 파손이나, 과도한 전자력에 의한 고정자, 회전자 손상을 방지 할 수 있었는지는 알 수 없었다. 전산 모의 결과는 A/11 투입시 1.68pu까지 V/Hz가 상승되었으나 다행히 본 사고 후 펌프모터의 축 손상 사고는 발견되지 않았는데, 이점은 원 설계 제작자에게 확인해야 할 사항이다. 주요모터의 잔류전압 측정방법 개발과 관련 자료 확보가 시급하다 하겠다.

#### 2.4.5 사고 진행상황 기록장치의 mSec 단위

##### 과도현상 기록이 안됨.

전력계통 상태분석장치(PSDM) 활용과 DCCX/Y 전산 경보 메시지 보완(1/1000초 기록)이 요구된다. 월성 2,3,4호기에 설치된 전력계통상태분석장치(PSDM: Power System Dynamics Monitor)를 이용하여 소내의 전력계통 고장 발생시 고장현상 및 각종 보호장치의 동작상태를 기록하여 사고원인을 분석하고, 전력계통의 동요 및 불안정 상황 발생시 사전 자료를 검출, 기록, 분석 및 평가에 의한 사고 예지 및 계통동요 분석기능을 활용 할 수 있겠다. 특히 실효값 재생과 벡터도를 나타내며, 분석 시점의 임피던스 계측, 순시파형 재생, 고조파 분석 기능 등을 할 수 있어 고장원인 분석과 대책 수립에 큰 도움이 되리라 본다.

### 3. 결 론(10)

가. 전출력 소외전원 상실시험 실패원인 분석 결과 냉각재 펌프모터#3의 순시과전류 보호계전기(50Y) 동작은 13.8Kv 모선 자동절체시 신속개방절체가 비동기 조건에서 이뤄짐으로 차단기 투입 순간 과도한 돌입 기동전류로 인해 실패 한 것으로 확인됨.

나. 기존 13.8Kv의 자동절체방식중 주발전기 선차단 후 기동용변압기 트립시 신속자동절체 방식에 대한 신속개방절체의 동기조건 유지시간인 0.25초(25X-2) 시지연드롭아웃에 대하여 저지회로(Blocking Circuits) 신설등 설계 변경은 시행 되어 함. 또한 각 모선 절체 시 어떠한 경우라도 비동기투입 방지를 위한 설계 측면에서 재검토가 필요함.

다. 냉각재 펌프모터의 자체 및 각 모선 전체의 총합 잔류전압 측정이 필요

라. 냉각재 펌프모터의 모선 절체시 전압벡터적인 Voltage/Hertz (p.u)와 위상각의 설계값이 확인 되

야 할 것임.

마. 동 사고와 관련된 정상, 비정상 및 비상운전절차서는 적절히 보완 작성 되어 할 것임.

바. 유도모터의 잔류전압에 대한 연구는 계속되어야 함.

예) 모선 자동절체 방식, PLC의 순간정지 고장시 모터 부하의 순시과전류 동작동

사. 월성 13.8Kv의 모선자동 절체시 돌입 기동전류에 대한 순시과전류 보호계전기 동작은 PSS/E 또는 CYMER 프로그램을 이용한 상세 설계통 모의사례 연구는 원자로 및 전력기기 안전성을 위해 별도로 필요함.

#### [참 고 자 료]

- [01] Thomas A. Hauck, "Motor Reclosing and Bus Transfer", IEEE Transaction, Vol.IGA-6, No.3, May June 1970, pp266-271.
- [02] T.A.Hauck, R.L.Auxer, "Timing Motor Reclosure or Bus Transfer", Allis-Chalmers Engineering Review, pp31-35.
- [03] "Transfer of Auxiliary Power systems", pp12-1 ~22.
- [04] T.A.Higgins, W.L.Snider etc, "Report on bus Transfer Part I-Assessment and Application", IEEE transaction on Energy Conversion, Vol.5, No.3, Sep 1990, pp462-469.
- [05] T.A.Higgins, W.L.Snider etc, "Report on bus Transfer Part II-Computer Modelling for Bus Transfer Studies", IEEE transaction on Energy Conversion, Vol.5, No.3, Sep 1990, pp470-484.
- [06] 조성돈, "대용량 유도전동기의 모델링 및 응용", 한국전력기술(주), EMTP연구회, pp13-33.
- [07] "PSS/E program Application Guide", Section13, Modeling of Generators and Motors, Dec.1994, pp13-1 ~60.
- [08] R.D Pettigrew, P.Powell, "Motor Bus Transfer", IEEE transactions on Power Delivery, Vol.8, No.4, Oct 1993, pp1747-1758.
- [09] EPRI, "Bus Transfer Criteria for Plant Electric Auxiliary Systems", EPRI TR-103185s, final Report, Oct 1993, A-1 ~G-31.
- [10] ANSI "for Polyphase Induction Motors for Power Generating Station", ANSI C50.41-198A2. 13~B-2.