

**전력계통사고에 의한 월성2호기 주발전기 정지중  
기동시 보호용계전기(50/27) 동작분석과 대책**

장 태 휘\*

한수원(주). 월성원자력본부 제2발전소

**Analysis & Countermeasures for Operation of Dead Machine Protection  
Relay(50/27) of Wolsong-2 Unit by KEPCO Grid Electrical Fault**

Tae-Hee Chang\*

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

**Abstract** 월성2호기가 100% 출력 운전중 2001. 4.6일 20:16분에 345kV 신경산변전소 GIS모선#1 축 지락고장 파급으로 주발전기 정지중 기동시 보호용계전기(50/27)가 동작되어 발전정지 되고 원자로 출력은 60%까지 감발 되었음. 본 보호계전기는 발전기 정지나 터닝기어로 저속운전 중 인적 실수에 의해 발전기 병입용차단기 투입시 발전기가 과도한 돌입전류로 손상되는 것을 방지하기 위한 계전기로, 정상운전중이거나 외부사고시에는 동작할 수 없는 보호계전기임. 따라서 본 보호계전기의 동작원인을 당시 동작상황과 기록데이터를 정정치와 함께 분석하고 적정동작을 위한 대책을 제시함.

부족하다 하겠다[01]. 따라서 고속 순시차단이 가능한 계전기를 요구함에 따라 주발전기의 50/27계전기와 같은 보호계전기가 개발 적용하게 되었다. 그러나 본 계전기가 설치된 월성2-4호기중 2호기가 100% 출력운전중에 인근 345kV 신경산변전소 정비작업중에 GIS 모선#1축 지락, 단락고장 파급으로 50/27계전기가 동작되어 발전정지되고, 원자로 출력은 60%까지 감발되었다. 50/27계전기는 발전기가 정상 운전중이거나 외부사고시에는 동작할 수 없는 보호계전기였다. 본 논문에서 50/27계전기의 동작원인을 당시 동작상황 기록데이터를 정정치와 함께 분석하고, 동 보호계전기의 적정 동작을 위한 적절한 대책을 제시하였다.

**1. 서 론**

대용량 발전기를 전기적 사고로부터 보호하는 것은 주로 발전기의 권선 또는 모선의 단락, 지락사고와 계자상실, 동기상실, 정지중 기동보호 및 터빈의 저주파운전 보호 등이 있다. 특히 발전기가 정지중이거나 터닝기어로 저속도 운전중일 때 인적실수로 발전기 병입용차단기를 투입하여 발전기가 전동기로 기동시 과도한 돌입전류에 의한 발전기와 관련 설비의 손상을 방지하기 위해서는 ①발전기 저단자전압시 차단기 투입방지 인터록, ②발전기 병입용 단로기 개방신호 인터록, ③보호계전기 적용 등이 있다. 이중 보호계전기에 의한 방법중 하나로 "사고에 의한 가압 보호계전기(Accidental Energization Protection Relay)"로 정지중기동시 보호용계전기(Dead Machine Protection Relay:50/27)를 설치하여 사용한다. 종래에는 이 목적으로 역전력계전기(32)나 계자상실계전기(40)가 사용되어 왔었다[01] 여기서 32계전기는 정지중인 발전기에 전압이 인가되었을때 순간적으로 흘러 들어오는 역전력을 픽업하여 동작하나, 원목적상 병입시 전력동요(Power Swing)나, 원동기의 출력이 감소시 터빈 발전기 전동기화(Turbine Motoring)로 인한 터빈 동익의 과온 손상방지를 위해 시지연(최소 3-10초)요소가 있으므로 이와 같은 사고의 순시차단에는 적절하지 못하다. 또한 40계전기는 발전기 정지중에 역가압이 되는 순간 여자장치는 정지로 계자상실 상태이기 때문에 동작하나 회전자속의 가속과 유입되는 무효전력의 크기에 따라 약간의 시지연을 가지므로 주발전기 보호를 위한 순시차단에는

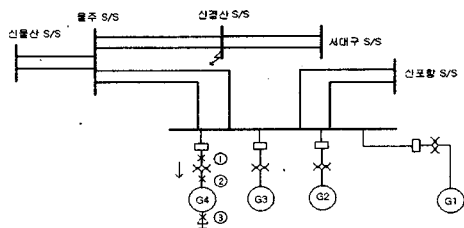
**2. 본 론**

**2.1 월성2호기 주발전기용 50/27 보호계전기 동작 상황**

**2.1.1 일시 및 장소 :**

2001.04.06일 20:16분경 345kV신경산변전소 GIS 모선#1의 A상 절연파괴로 지락사고 후 C상으로 절연파괴가 확대되었다. 이로 인해 [그림01]과 같은 전력계통의 동변전소에 인접한 월성원전에서 큰 고장전류를 공급하였는데, 당시 운전중인 월성1,2,4호기 중 2호기만이 전력계통사고 파급으로 발전기 트립이 발생하였다.

[그림01]. 345Kv 월성원전 인근 영남지역 계통도



**2.1.2 보호계전기, 경보동작 및 판정 :**

신경산변전소의 A.C상 지락사고중 발생된 월성2-4호기에 동작된 보호계전기와 경보는 [표01]과 같다. 전출력 운전중인 2대의 발전기에서는 불평형 지

락사고로 인해 역상계전기(46A)와 주변압기 고압측 중성점 과전류계전기(50/51NH)가 동작하였고, 계획 예방정비로 역가압 수전중인 3호기는 50/51NH 만 이 동일시간에 동작한 것은 정동작이었다. 단지 월성-2호기에서 발전기 50/27계전기의 동작은 오동작으로 판단되었다.

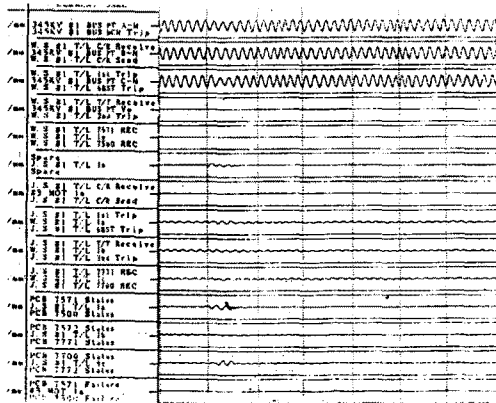
[표01] 월성2-4호기 보호계전기, 경보동작 및 판정

구분	판정번호 (설비명)	동작 보호계전기	CI, WA 정보	동작 원인	판정	비고
월성-2호기	주발전기 보호반	26NF	CI 1792, WA19-4	터빈트립	정동작	100% 출력 운전중
		50/27	CI 0790, WA19-4	고장전류 유입 및 143타이머 불탐에 의한 동작	오동작	
		46A(경보)	CI 2348	지락고장의 역상전류 유입동작	정동작	
		86G, 86GBU	CI 1790, WA19-4	50/27동작에 의한 연동	정동작	
	주변압기 보호반	50/51NH (순시)	CI 2358, WA19-4	345KV 차단기 트립시 상간 불평형 전류에 의한 동작	정동작	
월성-3호기	주발전기 보호반	138KV 과전류계	86-1 CI 1790, WA19-4	86G 동작에 의한 연동	정동작	계획정비 역가압중
		주발전기 보호반	50/51NH (순시)	상동	정동작	
월성-4호기	주발전기 보호반	주발전기 보호반	50/51NH (순시)	상동	정동작	100% 출력 운전중
		주발전기 보호반	46A(경보)	CI 2348	지락고장의 역상전류 유입동작	
2-4호기 옥외개폐소 제어반	옥외개폐소 제어반	586NT2	WA309, 317,348	86G 동작에 의한 연동	정동작	

2.1.3 고장 기록계 동작

사고 당시 월성원전 345KV 옥외개폐소의 고장 기록계 기록지는 [그림2]와 같으며, 동작치 요약은 [표02]와 같다.

[그림02] 월성2-4호기 옥외개폐소 고장기록계 기록지



당시 모선의 상전압은 A상은 195~144.9kV로, C 상은 198~171kV로 강하되었고, 신경산S/S와 연결된 주성#1T/L은 Ia가 80→2,720A로, Ic는 80→3,280A로, 중성점전류(Io)가 0→1,760A로 증가되었다. 이는 고장전류가 정상시의 1.8 ~ 2.8배까지 증가되었으며, 모선전압도 13.7% ~ 35.6%까지 감소되었다. 고장기록계의 전압, 전류파형을 보았을 때 A 상 지락후 C상 단락으로 진전된 직접접지계통의 A-C상 2상 단락 형태임을 알 수 있다.[02]

[표02] 345KV옥외개폐소 고장기록계의 전압, 전류변동

구분	전압변동(V)				전류변동(A)				비고
	Va(kV)	Vb(kV)	Vc(kV)	Vo(kV)	Ia(A)	Ib(A)	Ic(A)	Io(A)	
월성#1T/L	-	-	-	-	800~2240 (280%)	800~1440 (180%)	800~1600 (200%)	0.0~0.0	
월성#2T/L	-	-	-	-	800~2160 (270%)	800~1440 (180%)	800~1440 (180%)	0~0	
주성#1T/L	-	-	-	-	80~2220	0~400	80~2280	0~1260	
주성#2T/L	-	-	-	-	8~2280	0~480	80~3120	0~1600	
모선 1선압	195~144.9 (74.3%)	198~164 (83.3%)	198~171 (86.4%)	0.0~0.0	-	-	-	-	
모선 2선압	195~171 (87.7%)	198~164 (83.3%)	198~171 (86.4%)	0.0~0.0	-	-	-	-	
주발전기 2	-	-	-	-	0~1380	0~1280	0~1680	0~640	전출력 운전중
주발전기 4	-	-	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	역수전 중
주발전기 4A	-	-	-	-	1040~1360 (130.7%)	1040~1280 (124.0%)	1120~1760 (157.1%)	0~640	전출력 운전중

\*주: PT Ratio: 3.000(200KV/66.5V : 상전압 기준), CT Ratio: 800(+4.000/5A).

2.1.4 PSDM 동작 (03) (04)

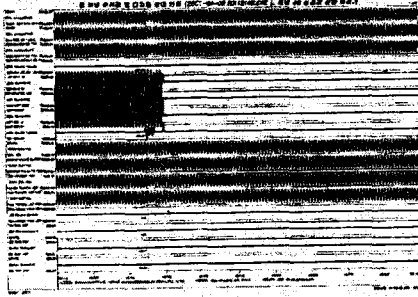
표(3)에서 보는바와 같이 월성-2호기의 발전기 전압은 A상, C상이 각각 85%, 86.2%로 정정치에 근접하여 저전압은 A, C상이 동작되었고, 전류는 Ia, Ic가 정정치 115%를 초과했으므로 순시과전류 동작조건은 만족되었으나, 동작 지속시간이 120~125ms로 시지연 3.0초에는 미달되어 50/27계전에 의한 트립은 없는 것으로 나타났다. 단지 0.5초 타이머(143)의 단선으로, 3.0초 시지연타이머(343)가 미복귀 되어 트립이 발생되었음이 확인되었다. 월성4호기는 오히려 2호기보다 전압강하와 고장전류가 더 커서 저전압과 순시과전류는 3상 모두 발생되었고 단지 동작시간만 38~69ms로 짧은 편이었다. 만약 신경산측 차단기가 Z-1, Z-2(24사이클), Z-3(100 사이클)에 적절히 차단되지 않았다면 3.0초 시지연에 걸려 두 대의 발전기가 모두 트립될 우려가 있었다고 본다. [그림03],[그림04]는 월성-2호기 주발전기의 전압, 전류 순시치, 실효치 파형과 디지털신호의 변동을 보여주고 있다.

[표03] 월성-2호기 PSDM상의 전압, 전류 변동

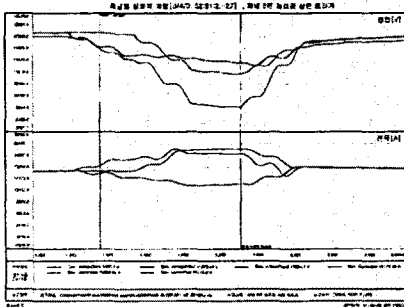
구분	월성-2		월성-4		판정	비고
	변동(V)	지속시간(ms)	변동(V)	지속시간(ms)		
발전기 전압 (V)	Va	12641~9671 (76.1%)	130ms	14158~9726 (76.5%)	69ms	동작 (W-2.4)
	Vb	12506~11275(8.7%)	120	13925~9396 (78.2%)	67	동작 (W-4)
	Vc	12674~10362(8.2%)	120	13997~10017 (78.8%)	69	동작 (W-2.4)
	Vn	0.3~0.0	0	04.6~12.9	0	
발전기 전류 (A)	Ia	26304~18206(33.9%)	125ms	32630~78 (130.0%)	64ms	동작 (W-2.4)
	Ib	21506~15060(10.9%)	125	26083~8.2 (119.8%)	62	동작 (W-4)
	Ic	26780~18442(33.2%)	125	32200~10.1 (130.9%)	47	동작 (W-2.4)
	Io	0.0~1.8	37	879.4~0.1	38	
US(T)A	In	0.0~0.0	0	3.6~0.0	0	
SS(T)A	In	0.0~0.0	0	0.1~0.0	0	
V(V)		512~274.9	0	56.5~17.4	86	
I(A)		3.001~2.908	0	71.9~10.4	54	

\* 주발전기 정격 상전압: 22.000 / 3 \* 12.021(V)  
 전정류: 828.000 / 3 \* 22-21.730(A)  
 \*\* ( ) : 정격전압, 전류에 대한 백분율(%)

[그림03] 월성2호기 주발전기 관련 PSDM 기록지(순시치, 디지털 신호 변동)



[그림04] 월성2호기 주발전기 관련 PSMD 기록지(전압 및 전류 실효치 파형)



강하하므로 이때는 오동작 하지 않고 후비보호계전기 (21G)와 협조하도록 필요하다. 일반적으로 2초에 정정할 것을 권고하지만, 송전선로 보호계전방식에 거리계전기의 Z-3 시지연이 100사이클(=1.67초)등을 고려하여 3.0초로 정정하였다.

### 2.2.3 50/27 보호계전기 전압, 전류 입력 및 논리 회로도

50/27계전기의 전압, 전류 입력회로도는 [그림05]와 같다. 즉 주발전기 CT 3과 Meter PT, Ry PT 신호를 입력으로 사용한다.

[그림05] 50/27계전기 전압, 전류 입력회로도.

## 2.2 주발전기 정지중 기동시 보호용계전기(50/27)의 설계와 정정치 검토

**2.2.1 설치 목적 :** 발전기가 정지나 터닝이어 운전중 사고로 가압되는 경우에 과도한 돌입여자전류로 인해 고정자 및 회전자 권선이 수초내 손상을 입을 수 있으며, 베어링의 경우 윤활유 압력 부족으로 더 빨리 손상을 입을 수 있다. 따라서 이러한 경우 보호를 위해 고속도 보호계전기가 필요하며, 월성2호기에 설치된 50/27계전기는 순시과전류요소 동작시간이 7mS이다.

**2.2.2 보호범위 :** 발전기의 단자전압이 정정치인 정격전압 85%이하로 3.0초간 유지한 조건에 정격 115%이상의 과전류가 흐르는 경우 발전기를 트립시키도록 3개의 순시과전류계전기(50), 2개의 저전압계전기(27:계측용 PT 및 보호계전기용 PT전압을 동시에 감시함),경보용 계전기 및 타이머 2개가 함께 설치되어 있다. 27계전기는 2개의 타이머를 제어하며, 1개의 143(0.5초 지연)은 27계전기가 전압 정정치보다 큰 전압이 순간적으로 발전기에 인가되는 과도전압에 대하여 지체없이 트립시키기 위한 것이다. 이러한 과도전압은 발전기가 정지되어 있거나, 저속 운전중일 때 발전기 병입용차단기가 투입되는 경우 발생한다. 발전기가 정상 기동시는 발전기 단자전압이 정격전압의 85% 이상이 된 후에 50/27계전기가 동작되도록 시간이 늘어난다. 또 한개의 343(3.0초 지연)은 27계전기(85%이하에 동작) 2개가 모두 동작할 때 지연 트립시키기 위해 적용되는데, 발전기의 근단 고장시 단자전압이 27계전기 정정치 이하로

### 2.2.4 정정치(04)(05)(06)(07)

(가) 50(순시과전류계전기:RXIB 24) 정정  
주발전기가 정상 운전시 오동작 하지 않도록 발전기 정격전류의 120%에 정정하면,

$$\text{발전기 정격전류}(I_n) = 828,000 / (\sqrt{3} \times 22) = 21,729.4[A],$$

$$\text{계산값} = 1.2 \times 21,729.4 \times 5 / 25,000 = 5.215[A],$$

정정치를 (2.5)x(2)=5A로 두면, 픽업치의 정격전류에 대한 비율은 115%에서 동작하게 되어있다.

(나) 27(저전압계전기:RXEG 21) 정정

제작사 추천치인 정격전압의 85%에 정정하면

$$\text{PT2차}(U_n) = 22,000 \times 120 / 24,000 = 110[V]$$

$$\text{계산값} = 0.85 \times 110 = 93.5[V]$$

정정치는 (40)x(2.3)=92V로 픽업치의 정격전압에 대한 비율은 정격전압의 83.6%에 동작하게 된다.

(다) 143, 343(타이머:RXKL1) 정정

143(상위 타이머)는 제작사 추천치인 0.5초에 정정하고, 343(하위 타이머)는 후비보호용 21G계전기와 협조토록 3초에 둔다.

### 2.2.5 시험치 (04)(05)(06)

(가) 27(저전압계전기) 시험치

27계전기는 월성2-4호기 모두 92V이하에서 픽업하도록 정정되어 있으며, 준공시험시 시험치도 모두 92V이하에서 동작되었다. 사고후 임시시험결과는 [표04]처럼 월성2호기 307, 319계전기의 픽업치는 양호하였다. 그러나 두개의 타이머 중 143의 코일단선으로 픽업이 불량한 것이 50/27계전기의 오동작 원인으로 확인되었다.

[표04] 월성2-4호기 27, 타이머의 준공 및 사고후 임시 시험 결과

계전기 번호	정정치	시험치		판정	비고
		표기(2000)*/준공시험치	임시시험치(01.4.6)		
307	40V x 2.3	90V 이하 락업*	90V 이하 락업	정상	V <sub>ab</sub> 보호 계전기 축
		91V 이하 락업	-	-	
		92V 이하 락업	-	-	
319	40V x 2.3	92V 이하 락업*	92V 이하 락업	정상	V <sub>ab</sub> 계기축
		92V 이하 락업	-	-	
		92V 이하 락업	-	-	
143	월성-2	0.5초	0.56초	부동작	락업 불량 단선
343	월성-2	3.0초	3.0초	3.0초	정상

(나) 50(순시과전류계전기)시험치

[표05]와 같이 50계전기의 정정치는 월성2-4호기가 동일하며 동작시간은 계전기 특성에 따라 미소한 차이가 있었으나 모두 양호했으며, 사고후 임시시험에서도 정정치에 모두 양호한 동작으로 정상으로 판정되었다.

[표05] 월성2-4호기 50의 준공/정기 및 임시시험 결과

보호계전기 번호	정정치	준공 정기시험(2000.)		임시 시험치 (01.4.6)	판정	비고
		시험치(A)	동작시간(ms)			
107	2.5 x 2 (3.0A)	3.2A	7.1ms	5.14A	정상	la(04)
		5.0A이상	10.1	-	-	lb(05)
		5.0A이상	8.5	-	-	lc(06)
119	2.5 x 2 (3.0A)	3.2A	7.1	5.14A	정상	la
		5.0A이상	9.0	-	-	lb
		5.0A이상	8.4	-	-	lc
131	2.5 x 2 (3.0A)	5.1A	7.1	5.11A	정상	la
		5.0A이상	9.0	-	-	lb
		5.0A이상	8.2	-	-	lc

## 2.3 실제 차단기 투입사고시 관련 계전기 동작 검토

### 2.3.1 주발전기 정지중 차단기 투입시 돌입전류 계산(08)

(가) 계통 상황

월성원전 인근의 345Kv 영남지역 전력계통의 구성은 [그림01]과 같으며, 선로 및 기기의 특성정수는 아래와 같다.

- .신포항S/S : A480x4B x 26.381Km
- .울주S/S : A480x4B x 28.716Km
- .신포항축 고장 레벨 = 24,583.4MVA
- .울주축 고장 레벨 = 21,803.0MVA
- .월성-2,3,4N/P 주변압기: 345/22Kv, 831MVA, j1.685 (100MVA 기준, Zt = 14.0%)

(나) 계통 고장점의 고장 돌입전류 계산

- 2000년말 345Kv 모선 3상 단락사고시
  - .월성축 고장레벨 = 24,051.3MVA(2000.12.31기준, 한전 급전처 계통보호팀)
  - .월성축 모선 등가임피던스 Z1는 = 10,000MVA/24,051.3 = 0.4157%/100MVA 기준이다.
  - .월성축 고장전류는 24,051.3MVA x 1.674A/MVA = 40,261.87A(신포항S/S축+울주S/S축+월성발전기축(4대 운전))이다.
- 월성2-4호기 주발전기 상분리모선의 고장점에서 고장전류
  - .고장점 등가 임피던스 Zf1, = 0.4157% + 1.685% =

2.1007% {월성-2,3,4N/P모선(Zb) + 주변압기(Zt)}

.고장점의 고장레벨=10,000/2.1007%=4,760.31MVA, 따라서 고장전류는 4,760.31x1.674A/MVA= 7,968.77A. 변압비는 345/22kV = 15.6818이며, 고장전류는 7,968.77A x 15.6818 = 123,396[A]이다.

3) 주발전기 후단(중성점)에서 발전기 정지상태서 3상 단락 사고시(X"di 적용 경우)

.고장점 등가 임피던스 Zf2  
Zf2 = 2.1007% + 28.0%/8.28 = 5.48%/100MVA기준  
[주]X"di = 직축 초기과도리액턴스(Direct Axis Sub-transient Reactance)를 적용할 경우  
X"di = 0.280[p.u], 따라서 100MVA기준 X"di는 28.0% x 100/828 = 3.38%이다.

.고장점의 고장 레벨은 10,000/5.48%=1,824.58MVA  
.345Kv축으로부터 인입하는 고장점 고장전류는 1,824.58MVA x 1.674A = 3,054.35A  
.22Kv 상분리모선의 고장점의 고장전류는 3,054.35A x 15.6818 = 47,897A(정격전류 21,730A의 220.4%)가 된다.

이는 월성2-4 모선과 주변압기 임피던스 Zf1 (= 2.1007%)을 고려하면, 월성-2호기 주발전기의 대칭3상 단락사고시 전기자 전류가 0사이클에 최대 4.36[p.u], 10사이클에 3.2[p.u], 20사이클에 3.1[p.u], 40사이클에 2.8[p.u], 60사이클에 2.55[p.u]와 비슷한 특성이라 하겠다[08]

### 2.3.2 40(계자상실 보호계전기) 동작

(가) 40계전기 사양: 형식이 RAGPC, ABB사 제품으로 발전기가 부족여자로 운전시 경보를 발하며, 여자 상실시 트립을 발생시킨다. 발전기가 터빈으로부터 받은 양만큼의 유효출력을 유지하기 위해 가속하여 계통으로부터 무효전력을 흡수할 때에 40계전기가 이를 감지한다. 이러한 여자상실이 발생하면 회전자에 유기되는 전류에 의하여 회전자가 과열하게 되며, 원통형인 터빈발전기의 경우는 특히 손상을 받기 쉽다.

계통으로부터 유입되는 무효전력의 크기는 기기 및 계통 임피던스에 의해 결정되며, 특히 이런 전류는 정태적인 것이 아니고 펄스적인 것이어서 기존의 한시과전류계전기로는 보호가 곤란하다. 본 40계전기는 여자상실시 기기의 단자전압이 0.85 [p.u] 이상으로 유지되는 경우를 위해 1.1[p.u]에 정정된 과전류 감시요소(저전압감시 요소 포함)가 내장되어 있다. 계자상실시 기기로 유입되는 전류는 일반적으로 기기 정격전류의 2~5배 정도이다.

본 계전기의 주요 특성은 기본 유니트로 방향성 전류계전기 요소(RXPE40)를 내장하며, 저항을 통하여 -75°를 갖도록 하고 있다. 이 계전기는 A상전압와 극성전압(Polarizing Voltage)으로 B상전압 및 A-C상 전압의 일부를 입력요소로 사용된다. 경보용

타이머가 있으며, 저전압 감시요소(RXEG21)와 과전류감시요소(RXIG21)를 or 조건으로 트립을 감시한다. 이 계전기는 전력동요에는 오동작 않고, 계통으로부터 유입되는 무효분전류와 트립 감시요소(저전압 또는 과전류)로 동작여부를 판단한다. 동작특성은 발생 유효전력에 대한 수전 무효전력의 기울기가 8°의 특성을 갖도록 되어있다.

(나) 40(RXPE40) 정정치:

발전기의 정격전류(I)는  $= (828,000/\sqrt{3} \times 22) \times 5/25,000 = 4.35[A]$ 이며,

기기 정격전류 40%의 무효전력이 유입할 때를 동작 조건으로 하면, 40% 정격전류는  $0.4 \times 4.35 = 1.656[A]$ 로 1.7[A]에 정정한다. 이때 정격전류에 대한 동작전류의 비는 39.1%가 된다.

(다) RXIG21의 정치는 정격전류의 1.1(p.u)인  $1.1 \times 4.35 = 4.785[A]$ 이며, Scale은 2.0에 정정한다.

(라) RXEG21의 정치는 정격전압의 0.85(p.u)인  $22,000 \times 120/24,000 \times 0.85 = 93.5[V]$ 이며, Scale은 2.3에 정정한다.

(마) 타이머(RXKL 1) 정치는 RXPE40이 전력동요시 오동작을 방지하기 위해 역한시 특성곡선에 따라 동작하므로 별도의 시지연 없이 최소치에 정정한다.

### 2.3.3 32(역전력 보호계전기) 동작

(가) 32 보호계전기 사양 : 형식이 RXPE40, ABB사 제품이며, 원동기인 터빈의 손상을 방지하기 위하여 적용된다. 터빈의 입력이 상실되었을 때 발전기로 역전력이 발생될 경우 터빈발전기의 전동기화로 터빈 손상을 방지하는 목적이며, 무효전력을 공급하는 동기전동기로 운전되는 경우 터빈날개, 베어링 또는 케이싱에 손상을 주게 된다. 특히 터빈이 탈락되었을 때 터빈발전기의 전동기화로 공급받는 유효전력은 일반적으로 기기 정격용량의 2%이하가 되고 발생하는 무효전력은 크게 되므로 32계전기는 위상각 오차교정 기능을 가져야 한다.

주요 특징은 1개의 방향성 전류계전기(RXPE 40), 2개의 타이머(RXKL1), 1개의 출력계전기(RXSF1) 및 위상 보상요소(RXTMB1)로 구성된다.

(나) 32 정정치: 주발전기의 전동기화 손실은 17.422[Mw]로 정격용량의 2.44%이며, 전동기화 손실전류(I)는  $457.2[A] (= 17.422/\sqrt{3} \times 22 \times \cos \theta)$ 가 되므로, 전동기화 전류의 50%에 정정하면,  $I_s = 1/2 \times 457.2 \times 5/25,000 = 45.72[mA]$ 로 46[mA]에 정정하며, Scale Factor가 30[mA]이므로 다이얼 1.5에 정정한다.

(다) 타이머 정정: 32A계전기를 위한 시지연은 32A 계전기가 터빈 자체 고장시 터빈 트립과 동시에 발전기를 급정지(Sequential Trip: 터빈트립 + 3초 시지연)시키기 위해 터빈 밸브 논리회로를 사용하나, 동기병입시 전력동요에 의한 오동작을 방지하기 위해

시지연 3초에 정정한다.

.32B계전기를 위한 시지연은 터빈 밸브논리 회로를 사용하지 않으며, 발전기가 계통에 연계되어 있는 상태에서 터빈으로 유입되는 증기량이 무부하 손실을 감당하기 위한 양 이하로 감소할 때 발전기를 비상정지(Simultaneous trip: 10초 시지연)시키기 위하여 적용되나 근단 외부고장시 오동작을 방지하기 위하여 시지연 10초에 정정한다[01]

현재 설치된 32계전기의 정정치로써 주발전기 정지중 기동될 경우에 적절히 동작된다면 3.2초(3.0초 + 30mS + 50mS)내에 차단기를 트립시킬 수 있으므로, 0.5초내 순시차단하는 50/27계전기의 후비보호로는 가능하다고 본다. 그러나 발전기에 따라 회전자 손상이 우려될 수도 있다[09]

### 2.3.4 관련 계전기의 정정치 및 동작시간 비교

돌입전류와 관련된 계전기의 정치는 [표06]과 같고, 동작시간은 [표07]과 같다. 초기돌입전류가 앞서 계산된 47,897A(=220.4%)가 발생시 관련계전기중 정정치 200%이상일 때 동작시간은 50/27이 51mS, 40이 250mS, 32가 3.0초순으로 되어 50/27계전기가 순시차단에 적합하며, 40, 32계전기가 후비보호로 적합함을 알 수 있다.

[표06] 관련 계전기의 정정치 비교표

보호계전기 종류	전압 정정[V]	전류 정정[A]	시지연[초]		전류 방향성 여부	비고
			T1	T2		
50/27	93.5(85.0%)	5.215(정격의 115%)	0.5	3.0	무	
40	93.5(85.0%)	4.785(정격의 110%)	0	-	유, -75도	
32	-	46mA(전동기화 전류의 1/2)	3	10	유, 0°도	

[표07] 돌입전류 발생시 관련 계전기 동작시간 비교표

계전기 구분	최소 동작 조건			동작시간(200%)		시지연 요소	판정	비고
	전류	전압	위상각	동작 시간	조건			
50/27	5.0A	92V	-	7mS	-	T1-0.5초 T2-3.0초	51mS 내 동작	44-7mS =51mS
40	1.72A	92V	75°	1mS	0.6초 (0.23초)*	3.44A, 90° 1.3A (18.6A)*	250mS 내 동작	(1°:500%)임
32	45mA	65V	180°	1mS	113mS	65V, 4A T1:3.0초 T2:10.0초	3.0초에 동작	

## 2.4 외부 사고에 대응 가능성 검토

### 2.4.1 외부사고에 대응 가능성 검토

50/27(RAGUA)의 순시과전류계전기는 전류신호에 방향성이 없는 반면에 32계전기(RXPE40)와 40계전기(RAGPC)는 방향성 과전류계전기를 갖고 있다. 따라서 50/27 계전기는 115%의 순시과전류가 흘렀을 경우 발전기측에서 송출인지 수전인지를 구분하지 않고 동작하게 된다. 이것은 대용량 발전기의 계통 탈락으로 저주파수와 계통 저전압이 발생할 경우 발전기의 과부하 허용시간이내라 할지라도 3초후에는 이 보호계전기로 우선 트립될 수 있다. 이는 전력계통 전체의 안정도를 극히 악화시키는 설계라 볼 수 있겠다.

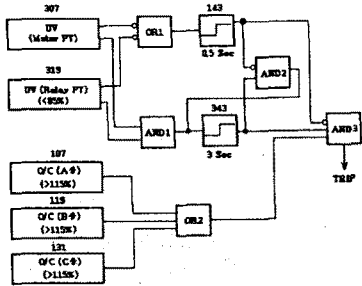
주발전기 과부하(115%)는 주발전기 근단에서 외부단락이나 지락사고시 후비보호인 21G계전기로 담

당해야할 것이다. 21G계전기의 정정치는 T/L 및 주 변압기의 총임피던스에서 전후방 임피던스(Forward & Reverse Impedance)에 동작하도록 정정하며, 시지연은 345kV T/L의 Z-2 및 Z-3의 고장 소거시간(0.4초 및 1.67초)에 협조되도록 2.5초에 정정되어 있다. 따라서 50/27계전기의 115%과전류 + 85% 저전압 조건에 3초 시지연 트립은 발전기 과부하가 허락하는 한 전력계통 안정도 차원에서 재검토가 필요하다고 본다.

### 2.4.2 50/27 동작 원인 검토

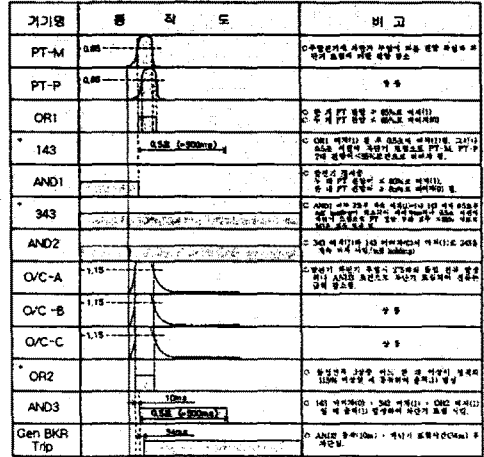
50/27계전기의 오동작은 143타이머의 단선 때문에 발생된 것이 확인되었다. [그림06] 월성2호기 주발전기 50/27계전기 동작 논리도에서 'b'점점의 트립 통로를 구성하였으며, 343 타이머는 최근 발전정지시 발전기 전압이 상실됨에 따라 한번 여자 되었는데, 143 타이머에 의한 복귀가 실패하여 자기유지 논리회로 때문에 계속 여자 되었다. 143 코일 고장은 발전기 정상 출력운전중 항상 전압이 인가되어 있어 조기 열화로 인한 단선으로 추정되며, 단선시기는 2000.9.1-22일 정기 시험후 2001.2.21일 월성4호기 발전정지를 일으켰던 345kV 울주변전소 모선 #2 지락/단락사고시 동일한 과전류 발생에도 50/27이 동작되지 않은 것으로 보아 이때는 정상이었다고 보여지며, 2001.3.24일 월성-2호기 주발전기의 64G 오동작으로 정지되었을 때 저전압 타이머가 복귀되지 않은 것으로 보아 이 사고 직전임을 알 수 있다. 상기 상태에서 월성원전에 인근한 345Kv 신경산변전소 모선#1측 지락, 단락 사고에 의해 월성2호기 주발전기 단자전압은 85%이하로 감소되고, 출력전류는 급증하여 50계전기 설정치(정격의 115%)를 초과함이 120-125mS간 지속되는 중 발전기의 트립이 발생하였다.

[그림06] 월성2호기 50/27 계전기 논리도



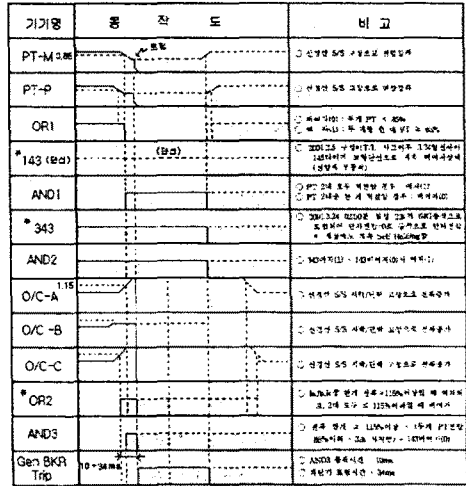
[그림07]은 발전기가 정지중 인적실수로 병입용 차단기를 투입했을 때를 가정하면, 인가전압이 85%이상으로 확립되는 순간 돌입전류는 115%를 초과하여 AND3 조건을 만족하므로 143이 여자되는 0.5초이내에 발전기용 차단기를 트립시키므로 발전기를 보호할 수 있다.

[그림07] 월성2호기 50/27 계전기 동작도(발전기 정지중 기동시)



[그림08]은 정상 출력운전중 143타이머의 코일이 단선된 경우에 계통사고가 발생하면, 85%이하 저전압과 115% 과전류신호에 즉시 발전기용 차단기가 트립됨을 보여주어 급변 50/27 계전기의 오동작 원인을 밝혀주게 된다.

[그림08] 월성2호기 50/27계전기 동작도(정상 출력운전 + 143단선 + 계통 사고시)



## 2.5 외부사고에 오동작 방지를 위한 대책

### 2.5.1 방향성 과전류 보호방식으로 변경

50/27계전기의 설치목적은 발전기 정지중에 차단기 투입으로 인한 발전기 손상을 방지하기 위함이며, 이 목적을 달성하기 위해서는 발전기측으로 유입되는 역전류에 대해서만 동작되는 계전기를 사용하여야 한다. 현재 50/27계전기는 송, 수전과 같이 전류 방향에 관계없이 순시과전류로 동작하도록 되어 있어 인근 대형 외부사고의 영향으로 불필요한 트립을 할 수 있게 되어 있다. 따라서 32계전기나 40계

전기에서 사용된 방향성 전류계전기(RXPE40)로 변경할 경우 본 계전기는 발전기가 정지중에 역수전 순시과전류에만 정확히 동작할 것이다.

### 2.5.2 50(순시과전류 보호계전기) 정정치 변경

현재 동계전기의 구조특성상 원래 정정치인 120% 보다 적은 115%에 정정되어 있으므로, 최근 345kV 전력계통의 고장레벨의 급증에 따라 단시간의 과부하에 오동작 할 수 있다. 따라서 120%가 정정 가능한 계전기 모델로 변경 할 필요가 있다.

### 2.5.3 143(시지연용 타이머)의 동작회로 개선

발전기 정지중 기동시 보호용으로 순시(10ms 이내) 동작을 위해 143타이머(0.5초 시지연)를 정상 출력 운전시 상시 여자 시켜두므로 코일의 조기열화나 수명이 단축되고, 오, 부동작을 발생시킬 우려가 있다. 따라서 143의 논리 회로를 비여자회로로 변경하여야 한다. 만약 비여자회로 구성이 불가능한 경우, 출력감시용 LED 램프를 설치하여 출력 유무와 단선 등을 "On-정상"으로 감시하는 방법도 있겠다. 343 타이머도 출력 감시 LED를 설치하여 자기유지 상태와 비정상적 출력여부 등을 "Off-정상"으로 감시하게 한다.

### 2.5.4 보호계전기 공급전원 전압의 적정화

50/27계전기의 정격 최대전압은 250Vdc이나 통상 260Vdc가 인가되고 있어 상시 과전압(104%) 상태로 운전되고 있다. 발전소의 무정전전원계통 축전지는 특성상 분기 1회씩 균등충전을 실시하며, 이때 250Vdc 전압은 280Vdc까지 상승하여 24시간을 유지하므로 이때 보호계전기는 112%의 과전압에 노출되어 계전기 코일의 조기열화나 수명단축의 요인이 된다. 실제로 월성2호기의 143코일 단선은 40,320시간(96.10.11~01.04.06) 운전후 발생되었다.

따라서 보호계전기에 전원에 전압강하기(Voltage Dropper)를 설치하여 적정전압이 공급되도록 해야 할 것이다.

## 3. 결 론

월성 원전의 인근사업장에서 발생한 모선 2상 지락, 단락사고는 주발전기에 큰 고장전류의 공급을 일으켰다. 따라서 345kV 발전기 단자전압의 85%이하 강하와 정격 115%이상의 부하전류를 공급하므로 고장 차단이 늦어져 3.0초 이상 고장이 지속되었을 때, 정상적인 운전에서도 50/27계전기는 동작 할 수 있도록 설계되고 정정되어 있다. 상기 분석 검토된 것과 같이 주발전기 정지중 기동시 보호용계전기는 50/27외에 후비로 약간의 시지연이 있지만 40, 32계전기가 가능함을 확인했으며, 실사례로 1984.06.14일 발생한 월성-1호기 주발전기 정지중 기동 사고시 32계전기가 적절히 동작한 경우가 입증된 적이 있었다 [09]. 따라서 최근 전력계통의 대응량화, 고장레벨의 급증으로 50/27계전기가 정상적인 전력계통 운전중에도 오동작 할 가능성이 있으므로 아래와 같은 개선

이 필요하다.

가. 50/27 보호계전기의 ①방향성과전류 보호방식으로 변경, ②순시과전류 정정치 변경, ③타이머회로의 상시 비여자화 및 LED 감시회로 신설.

나. 보호계전기의 공급전압의 적정화를 위해 최대 정격 250Vdc 유지를 위한 전압강하기(Voltage Dropper) 설치.

다. 주발전기 보호계전방식의 전반적인 재검토

라. 주발전기(주변압기 포함) 정지중 차단기 투입에 따른 인가전압과 돌입전류 상승 특성곡선에 관한 연구와 이에 따라 0.5초내 50/27계전기의 픽업 및 차단기 트립이 충분한지 추가 연구.

또한 최근 전력산업구조개편에 따른 발전사업자와 송변전사업자의 분리에 따라 동 발전정지의 대한 손실금(약 6억원) 보상책임이 원인제공자(송변전측)와 기기 결합소유자(발전측)중 누구에게 얼마큼 있는지 적절한 판단이 있어야 한다고 본다.

### [참 고 자 료]

- [01]한전, 건설관리처, "원자력발전소 표준화설계를 위한 조사용역", 최종보고서(제11권), 한국전력기술(주), pp31, pp257-263, 1987.8.
- [02]한전, "보호계전기 실무 I, II", 한전연수원 교재, pp335-341, 1990.5.
- [03]한전, "월성2호기PSDM 기록지", 월성원전본부, 채널#8 실효값 상한 트리거.trg, 2001.4.6.
- [04]한전, "월성N/P #2Unit GEN, MOT, UST준공시험성적서", 전력연구원, TME06.A97.01, pp12, 27-28, 136-137, 1997.1.
- [05]한전, "월성N/P #3 Unit GEN, MOT, UST준공시험성적서", 전력연구원, TM.C97ES01.G19971242, pp12, 65-66, 120-122, 1997.12.
- [06]한전, "월성N/P #4 Unit GEN, MOT, UST준공시험성적서", 전력연구원, TM.C97ES01.G1998.822, pp20, 30-31, 125-127, 1998.11.
- [07] AECL, "Design Report of Protective Relay coordination", 8600-50520-0005-00-DR-A Rev.0, pp4, A-27, 28, 1996.03.28.
- [08] GE, "Generator No.280T274/275Manual", GE Power Systems, C-110~112, Feb.1995.
- [09]한전, "345kV 월성T/L #2 트립 원인 보고서(주발전기 돌입전류 계산서)", 월성원자력발전소 전기부, pp70-76, 1984.06.26. 끝.