

발전기 계자상실 현상 분석 및 정정검토 기준 고찰

유영식 주행로 김완중 김재호
 한국전력거래소

A Study on Setting Rule and Analysis for Loss of Generator Exciter

Young-Sik Lyu Haeng-Ro Joo Wan-Jong Kim Jae-Ho Kim
 Korea Power Exchange

Abstract - □□ 발전기가 운전 중 계자차단기의 Trip으로 인해 계자가 상실되었으며, 이의 파급에 의해 계자상실보호계전기의 작동으로 발전기가 정지하였다. 고장분석을 위해 현장에 설치된 계통현상분석장치에서 기록한 실측자료와 계통해석프로그램인 PSS/E의 계자상실 모의결과를 비교분석하였으며, 이를 토대로 계자상실보호계전기 정정기준의 적정성을 검토하였다. 또한 계자시스템 관련 보호계전기시간 시간협조 미흡으로 불필요하게 발전기 정지를 유발하여 계통 불안정 상태를 더욱 악화시킬 수 있기 때문에 종합적인 시간협조의 적정성 검토 필요성을 제안하였다.

1. 서 론

동기발전기의 계자시스템은 동기속도를 유지하기 위한 필수장치이다. 계자시스템의 이상으로 동기 발전기에 부분적 또는 완전한 계자자속 상실 발생하게 되면 발전기의 단자전압이 저하함으로 인해 발전기는 진상 운전하게 되며 무효전력을 계통으로부터 흡수하게 된다. 동기발전기는 유도발전기로 전환 운전하게 되고 일정한 시간이 지나면 적은 양의 유효전력(Real Power)을 공급하게 되어 에너지의 불균형이 발생하게 되므로 속도가 증가하여 동기를 상실하게 된다. 또한 계통에서 발전기로 과도한 무효전력이 지속적으로 유입하게 되어 계통이 불안정해지고, 고정자권선에 과도한 전류가 흐르며, 발전기 속도가 증가함으로써 계자권선(Field Winding), 회전자 본체(Rotor Body), 보호 환(Retaining Ring), 슬롯웨지(Slot Wedge)등에 전류가 유입되어 과열된다. 이때 발전기는 유도발전기가 되므로 회전자에도 큰 유도전류가 흐르며 회전자 철심은 슬립(Slip)에 따라 다르지만, 일정시간이 지나면 위험상태까지 급속히 과열될 수 있다. 또 발전기가 유도발전기로 운전되는 동안 슬립(Slip)에 따라 고정자 전류도 정격의 2~4배가 흘러 고정자도 과열될 우려가 있다. 발전기의 계자상실은 전력동요를 발생시켜 탈조(Out-Of-Step)의 원인이 된다. 계자상실에서 탈조로 발전하면, 큰 전류와 맥동으로 인해 터빈을 손상시킬 수 있다. 또한 인근의 계통은 비정상적인 크기의 주기적인 전력동요(Power Swing)이 발생하게 된다. 따라서 계자상실이 발생하면 신속하게 검출하여 보호하여야 한다.

2. 본 론

2.1 계자상실 보호계전기

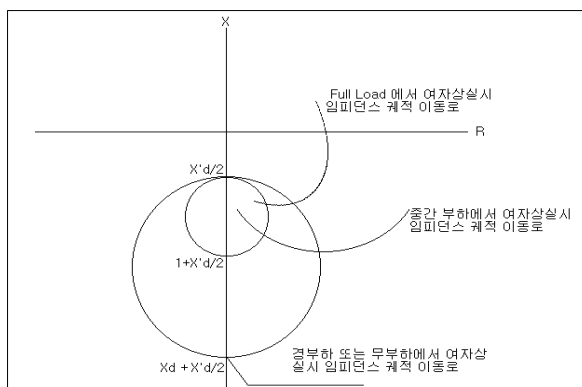
계자 상실의 주 원인은 여자기 고장, 계자 차단기 개방, 계자 회로 단락, 브러쉬 접촉 불량 등이 있다. 계통으로부터 유입되는 무효전력의 크기는 기기 임피던스와 계통임피던스에 의해 결정되는데 계자상실시 기기로부터 유입되는 전류는 일반적으로 기기 정격전류의 2~4배 정도로 매우 크게 흐른다. 이러한 계자상실 현상을 검출하기 위하여 Off-set Mho형 계전기를 주로 사용하며 계자상실시 발전기 단자에서 본 임피던스 궤적이 $0.5X_d'$ 와 X_d 사이로 이동하는 것을 이용하여 검출한다. 전력계통의 과도현상에 동작하는 것을 방지하기 위하여 시간지연을 두거나 저전압 계전기와 조합하여 사용하는 경우가 있고, 동일한 성능의 계전기 요소 2개를 이용하는 2-Zone 형을 사용하는 경우도 있다. 우리나라 전력계통은 주로 2-Zone형을 사용하며 중부하와 경부하로 구분 적용한다. 중부하는 발전기의 기준임피던스 값을 적용하고, 순시로 정정한다. 경부하는 발전기의 동기리액턴스를 적용하며 0.5S²1S의 시지연을 두고 있다. 발전기는 계자상실 또는 기계적 동력 상실 여부에 따라 <표1>로 요약할 수 있다. 또한 <그림 1>은 계자상실 관련 2-Zone형 계전기의 특성도를 나타내었다.

<표1> 정정기준

구 분	정 정	시 지 연
Zone-1	발전기 기준 임피던스 $\angle 270^\circ$	순시
Zone-2	발전기 동기리액턴스 $\angle 270^\circ$	0.5s
Offset	$\frac{1}{2} X_d' \angle 270^\circ$	-

<표2> 계자전류와 유입 증기량과의 관계

계 자 전 류	터빈 유입 증기량	현 상
정 상	부 족	동기전동기
상 실	부 족	유도전동기
상 실	정 상	유도발전기



<그림 1> 계자상실계전기 특성도

2.2 고장사례 분석

2008. Δ월 ●●일 □□ 발전기의 계자차단기의 Trip으로 계자상실이 발생하였으며, 이로 인해 계자상실보호계전기의 ZONE-2가 동작하여 발전기가 정지하였다. 고장상태를 기록하기 위해 설치한 발전소의 계통현상분석장치에서 기록한 고장 Data를 살펴보면 계자상실시 발생하는 이론적 결과와 유사하였으나, 일반적 이론과 달리 유효전력이 증가함을 볼 수 있는데 이에 대해서는 향후 더 많은 검토가 필요할 것으로 판단된다.

2.2.1 계자상실계전기 정정 및 임피던스 계산 값

1) □□ 발전기 기준값 : $P_b=1219.6\text{MVA}, V_b=22\text{kV}$

2) 기준 임피던스 계산값 : $Z_b = \frac{22^2}{1219.6} = 0.397\Omega$

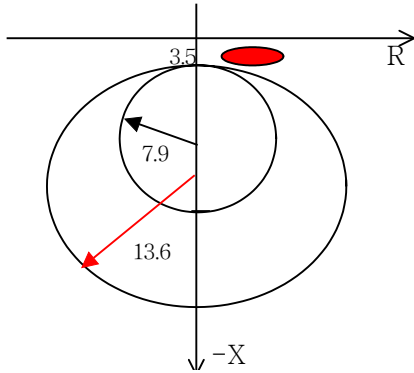
3) 계전기측 환산 $Z_b = 0.397 \times \frac{40000/5}{24000/120} = 15.88\Omega$

4) 정정값
○ ZONE-1 = 15.88Ω → 7.94(반지름)
○ ZONE-2 = 2nd Circle = 27.202Ω → 13.6(반지름)

5) 계통현상분석 장치 기록값을 기준하여 임피던스를 구하면

$$Z = \frac{1219.6}{P + jQ} \times Z_b \times V^2 = \frac{1219.6}{1268 - j285} \times 15.88 \times 0.75^2$$

$$= 8.18857 - j1.84[\Omega]$$



<그림 2> □□호기 동작특성도

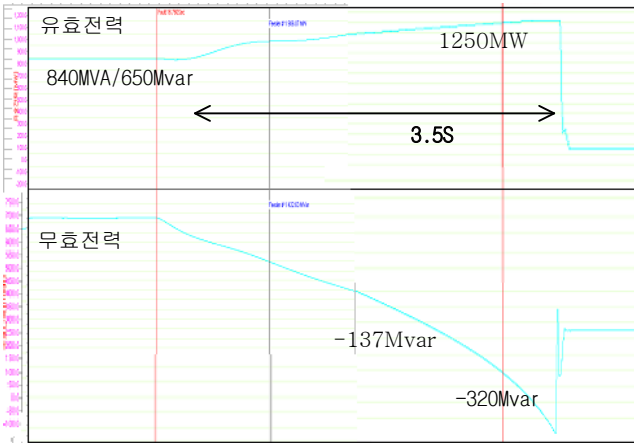
2.2.2 분석결과

임피던스 계산결과 계자상실보호계전기의 동작은 <그림2>에 표시한 것처럼 동작영역 범위를 벗어났으나 이는 F/R 설정 환경 또는 기록값의 오차로 인해 임피던스 계산결과와 부합하지 않은 것으로 추정된다.

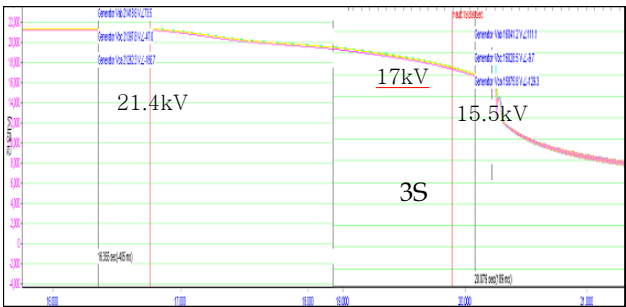
2.2.3 계통현상분석장치 기록 Data

고장기록값을 요약하면 아래와 같으며 고장기록 Data는 <그림3,4>와 같다.

- 가. 추정 동작시점에서 발전기 출력 : P-jQ = 1268-j285
- 나. 발전기의 운전상태는 지상운전에서 진상운전으로 전환다.
- 다. 유효전력은 증가(850MW → 1250MW 전후)
- 라. 전압은 0.7PU 전후까지 감소
- 마. 여자기 Trip 후 약 3. 487S 후 발전기 정지



<그림3> 현장 고장기록장치 유효/무효전력 변화 추이

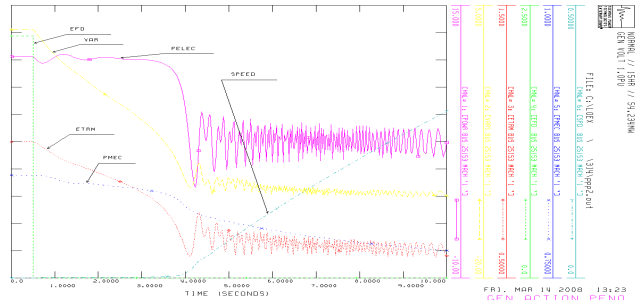


<그림 4> 현장 고장기록장치 전압 변화 추이

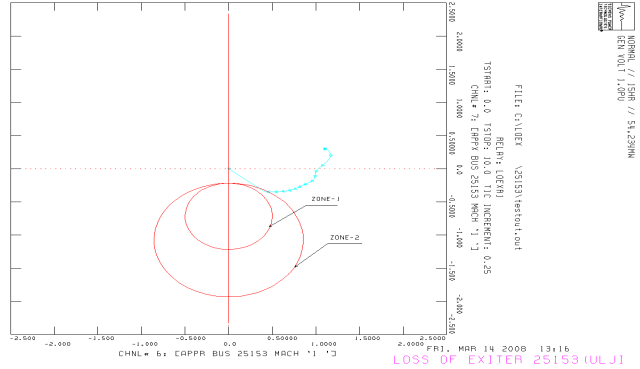
2.3 PSS/E를 이용한 계자상실 모의

계자상실 모의결과(<그림5,6>) 유효전력값의 변화추이를 제외하고는 실제 기록 자료와 유사하였으나 유효전력값은 3s초 전후까지 큰 변화가

없었다. 계자상실계전기는 3s에 동작하여 발전기를 차단하였다. 모의결과 계자상실계전기의 동작은 정동작으로 판단된다



<그림 5> 계자상실시 전압, 유효/무효전력 등 변화추이



<그림 6> 계자상실시 계자상실계전기 동작특성

2.4 정정기준 고찰

계자상실시 나타나는 현상을 살펴보면 3S 전후 까지 유효전력은 큰 변화가 없으며 전압은 0.8PU이하로 저하하고 무효전력은 일정한 수준이상으로 계통에서 발전기로 유입되는 것을 알 수 있었다. 또한, 계자상실계전기의 동작은 3S 전후에서 동작하여 발전기를 차단시킨다. 보호계전기 동작 관점에서 현재 정정기준은 적절한 것으로 판단되나 비정상적 동작 개연성을 줄이고 계자상실의 판단기준으로 사용하기 위해 전압요소를 감시요소로 추가 적용하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 전압요소를 적용하면 계자상실보호계전기의 신뢰도 향상 제고가 가능하기 때문이다. 정정기준값은 3초 전후에 0.8PU 이하까지 저하하고 마진을 고려하여 0.9~0.95PU로 정정할 것을 제안하며 보호계전기 신뢰도 향상과 계통 불안정에 의한 비정상 동작 개연성을 낮출 수 있기 때문에 광역정전발지도 효과가 있을 것으로 기대된다. 추가로 계통의 전압 불안정시 발전기 여자의 과여자 보호계전기(OCR)의 부적절한 시간협조로 인해 발전기가 탈락하여 광역정전으로 진전될 외국의 광역정전 사례를 많이 접하게 되는데 우리나라도 관련 보호계전기간 시간협조의 적정성을 확보하기 위해서도 전력거래소에서 검토하는 것이 필요하다. 이의 일환으로 전력시장운영규칙 개정을 위한 제도적 정비가 선행되어야 하며 이를 통해 과여자 계전기에 대한 검토자료를 발전사로부터 제공받을 경우 보다 안정적인 계통운영이 가능하리라 사료된다.

3. 결 론

발전기 계자상실시 기록된 실측자료와 PSS/E 프로그램을 이용한 모의결과를 비교분석하여 계자상실계전기 정정기준의 적정성과 계통해석 프로그램의 유효성을 살펴보았다. 전압, 무효전력, 계전기 동작시점 등에 대한 이론적 분석과 실측값, 모의결과와의 유사성을 볼 수 있었으며, 보호계전기의 신뢰도 제고를 위한 감시요소로 전압요소를 적용하는 것을 제안하였다. 계통의 불안정을 더욱 가속화 할 수 있는 과여자계전기(OCR)에 의한 발전기의 우선적 정지를 방지하기 위해 발전기 여자기 관련 보호계전기의 종합적 시간협조 검토의 필요성도 제기하였다. 계통운영기술의 지속적 개선과 고품질의 전기를 안정적으로 공급하기 위해서는 정보교류의 중요성을 재차 확인하였으며 전력사업에 종사하는 산업인 관계자의 협력도 필요하다.

[참 고 문 헌]

- [1] 당진화력#3,4호기 정정검토서, 전력거래소
- [2] Protective Relaying, J Lewis Blackburn,
- [3] 전력시장운영규칙 계통보호절차 “보호장치 운영기준”