

발전기 과도현상에 따른 발전기 보호 계전기 동작 분석

권영진, 강상희, 김철훈
 명지대학교 차세대전력기술연구센터

An Analysis of Protection Relay Operation During Transient State of Generator

Young-Jin Kwon, Sang-Hee Kang, Chul-Hun Kim
 NPTC Moynji University

Abstract - Loss of excitation, over excitation and motoring of generator are simulated by using synchronous generator with an exciter and a governor. This paper presents an analysis of transient state of generator and protection relay operation with loss of excitation, over excitation and motoring of generator.

1. 서 론

전력계통의 과도상태 해석시 발전기를 포함한 배후 전력계통을 전압원과 등가 임피던스로 표현한 등가 전원형태로 모델링 하는 것이 일반적이다. 하지만 과도 또는 차과도시 배후 전압을 일정한 것으로 가정하는 것이 불충분할 경우 동기기 모델을 이용한 상세 발전기 모델을 사용하여야 한다. 이런 발전기 모델은 불평형 고장에 대한 안정도 해석, 여자기와 조속기를 포함한 발전기의 응답 상태, 고장 위치와 차단 시간 및 제어계통의 동작 조건에 따른 발전기 안정도 판단 등에 사용되어 왔다. 제어를 포함한 발전기 모델은 주로 안정도를 분석하는데 편중되어 있었으며 발전기 운전중에 발생할 수 있는 여자계통의 이상이나 터빈 입력의 상실 등이 발생하였을 때 발전기 출력 변화에 따른 현상과 이를 보호하기 위한 보호계전기의 동작을 분석한 사례가 많지 않다. 따라서 본 논문에서는 PSCAD/EMTDC를 이용하여 터빈과 여자기, 조속기를 포함한 발전기 모델에서 여자계통의 이상으로 발생하는 계자상실, 과여자 현상과 발전기의 원동기 입력감소로 인한 발전기 전동기화(Motoring) 현상을 모의하고 모의된 결과를 이용하여 이를 보호하기 위한 발전기 보호 계전기들의 동작을 분석하였다.

2. 본 론

발전기의 여자시스템은 동기 발전기가 연속 운전할 수 있는 범위 내에서의 출력 변화에 대응하여 계자전류를 자동 제어함으로써 전압 제어, 무효전력 제어, 계통 안정도 향상 등의 기능을 수행한다. 또한 순간적인 계통의 외란에 대하여 단시간 능력에 부합하는 계자 강화를 수행함으로써 과도적인 외란에 적절하게 대응한다. 여자기 계통에서는 높은 계자전압으로 인한 계자권선의 절연 파괴, 계자전류의 과다로 인한 과열, 부족여자에 의한 발전기의 철심 끝단부 과열과 전압 주파수비의 증대로 과다 조속 등의 현상이 발생할 수 있다. 각 인자에 의한 열적 한계는 시간 의존적인 특성을 가지고 있으며 동기 발전기의 단시간 과부하 능력은 15초에서 60초 범위에 있으나 일반적으로는 과부하의 크기에 따라 반한시 특성을 가지고 있다.[1]

여자계통 보호에 관하여서는 계자상실 검출을 위한 연구가 주로 수행되었으며, 가장 일반적으로 사용되고 있는 Off-set Mho 타입 계전기의 사용이 처음 소개된 이후 안정적인 전력동용시 Off-set Mho 타입 계전기가

오동작 할 수 있는 단점을 보완한 2단계 Off-set Mho 타입과 시간지연 요소를 사용한 방법들이 제안되었다.[2]-[4] 그러나 과여자 및 원동기 입력 상실 등의 현상 모의와 이에 대한 보호 방법에 관한 연구가 부족하였으므로 본 논문에서는 계자상실과 과여자 및 발전기 전동기화 등의 발전기 과도 현상 모의 방법을 제시하고 계자상실 보호 계전기, 과여자 보호계전기, 전동기화 검출용 역전력 계전기의 동작을 분석하였다.

2.1 계자상실 보호 계전기

동기발전기의 계자가 상실되면 유도발전기로 운전되며 결국 동기탈조가 된다. 따라서 회전자는 회전자계에 의해 과열되고 전기자 역시 정격 전류의 2~4배의 전류가 흘러 과열되며 계통의 저전압과 동요가 일어나게 된다. 계자상실 보호는 기본적으로 발전기 모선에서 발전기의 내부방향을 보는 Off-set Mho형 거리계전기가 사용되며 경우에 따라 저전압계전기와 조합 또는 전력 동용시 오동작 방지를 위해 그림 1의 우측과 같이 시지연 동작 영역을 갖는 2단계 거리계전기를 사용한다. Off-set 정정은 과도 리액턴스의 절반($\frac{1}{2}X'_d$)으로 하고 동작영역의 직경은 동기 리액턴스인 X_d 로 정정하며 정한시 0.5~1 초 범위로 정정한다. 오른쪽과 같은 2단계 동작 특성의 계전기는 Z_{base} 를 직경으로 하는 순시 동작 영역을 추가하여 사용한다.

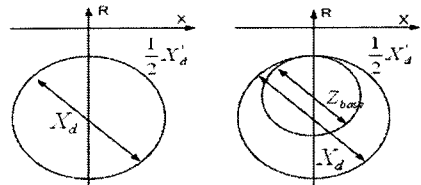


그림 1. Off-set Mho 타입 거리계전기

2.2 과여자 보호 계전기

과여자로 인해 자속이 증가하게 되면 자기회로가 포화되며, 이로 인해 누설 자속, 와류손, 히스테리손 등도 증가하여 발전기를 과열시키게 되어 발전기를 손상시킨다. 자기회로 내의 자속은 전압에 비례하고 주파수에 반비례하기 때문에 [전압/주파수] 값을 사용하여 과여자를 검출한다. 그림 2는 발전기 과여자 제한 곡선에 따른 과여자 검출 계전기의 동작 특성 곡선이다. 좌측과 같이 2 단계의 정한시를 사용하거나 우측과 같이 정한시와 반한시 특성을 함께 사용하기도 한다. 계전기 제작사에 따라 다르지만 그림 2의 좌측 특성은 일반적으로 정한시의 경우 118-120%에서 2-6초 시간지연, 110%에서 45-60초의 시간지연을 갖도록 정정한다. 이때 제한 곡선은 초과했으나 특성곡선 아래인 구간이 존재해 보호하

지 못하는 구간이 발생하는 것을 방지하기 위해 우측과 같은 방식을 사용하는 것이 추천된다.[5]

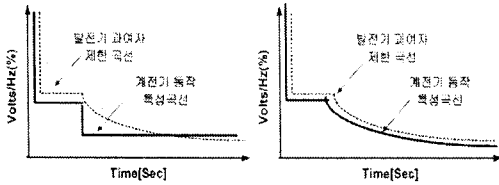


그림 2. 과여자 검출용 Volts/Hz 동작 특성

2.3 전동기화(Motoring) 보호계전기

발전기에서 스톱 공급이 중단되면 발전기는 계통으로부터 전력을 공급받아 동기전동기로 운전하게 되는데 이때 풍순에 의한 열이 축적되어 터빈이 과열된다. 전동기화 검출 및 보호를 위해서는 정한시형 유효 역전력 계전기가 사용되며 정정은 발전기와 터빈을 동기 속도로 회전시키는데 필요한 전력의 50[%]이하에서 동작하도록 하고 3~10초 범위로 정정한다.

3. 사례연구

3.1 발전기 및 계통 모델링

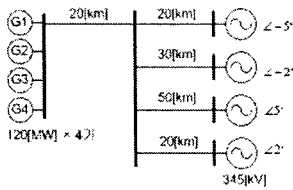


그림 3. 발전기를 포함한 모델계통

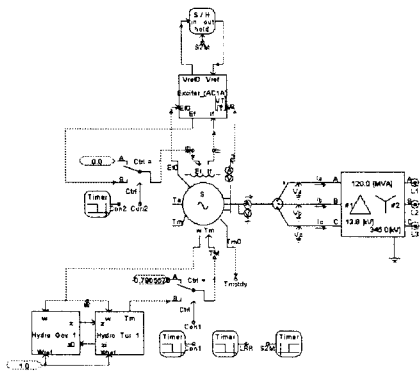


그림 4. Exciter, Governor 및 발전기 모델링

모의 계통은 PSCAD/EMTDC를 사용하여 모델링 하였으며, 전압은 345[kV] 송전계통이며, 발전단은 13.8[kV], 120[MW] 동기 발전기 4대로 구성하였으며, 나머지 계통은 등가전원으로 모의하였다. 여자와 조속기는 Mechanical-hydraulic governor와 AC1A exciter를 사용하였으며, 13.8/345[kV], Δ-Y 승압 변압기를 통하여 모선에 연결하였다. 모의된 모든 사례연구는 발전단 발전기 G1 1기에서만 모의하였으며 나머지 3기의 발전기는 정상 운전되고 있는 조건을 모의하였다. 사용된 발전기 정수는 다음과 같다.

동기 리액턴스 X_d : 1.014 [pu]
 과도 리액턴스, 시정수 X_d' : 0.314[pu], T_{do} : 6.55 [s]

차과도 리액턴스, 시정수 X_d'' : 0.28[pu], T_{do}'' : 0.039[s]

3.2 계자상실시 보호계전기 동작

계자상실은 1[pu]의 여자전압을 0.2[pu]씩 단계적으로 상실시킴으로써 모의하였고 정정은 그림 4의 발전기 정수를 사용하여 1단계 Off-set Mho 타입 계전기의 정정방법과 정한시 2초로 정정했다. 동기발전기의 계자상실되면 유도발전기로 운전되게 되어 계통으로부터 무효전력을 공급받게 됨으로 임피던스는 평면의 4사분면으로 수렴하게 된다. 그림 5는 계자상실시 Off-set Mho 타입 거리계전기 모의 케이스별 임피던스 궤적이다. 그림 5는 계자상실 전 1초와 후 7초로 총 8초를 모의한 결과이며 화살표가 가르키는 부분은 7초까지 모의하였을 때 측정된 최종 임피던스 값이다. 계자전압 상실의 정도에 따라 임피던스가 동작 영역까지 진입하는데 소요되는 시간이 다름을 그림 6의 계자상실 보호계전기 픽업과 트립 신호를 통해 확인할 수 있으며, 표 1은 총 1분간 모의를 하였을 때 계자상실 보호계전기의 픽업 시간이다. 따라서 계자상실의 정도에 따라 계전기가 동작하는 시간은 다르지만 계자상실은 정격 계자전압에서 작은 양만 상실되어도 계자상실로 인해 보호계전기가 동작함을 볼 수 있다.

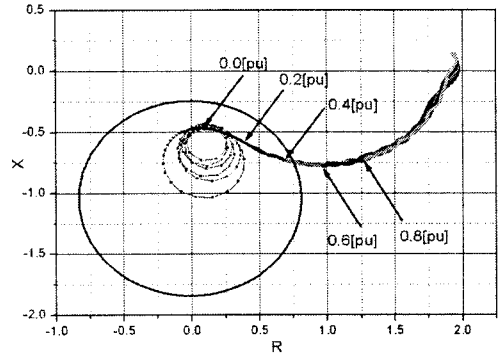


그림 5. 계자상실 보호계전기 임피던스 궤적

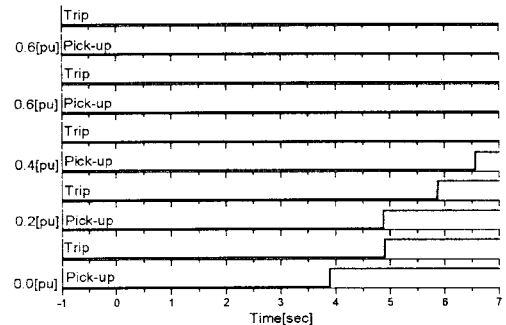


그림 6. 계자상실 보호계전기 동작결과

표 1. 계자상실 보호계전기 픽업 시간

계자전압[pu]	0.0	0.2	0.4	0.6	0.8
픽업(ms)	3.88	4.87	6.56	13.11	27.03

3.3 과여자시 보호계전기 동작

과여자는 계자전압을 정격전압 1[pu]를 기준으로 0.25[pu]씩 증가시켜 2.5[pu]까지 총 50초간 모의 하였으며, 계전기 정정값은 1단계 110[%], 45초, 2단계 118[%], 2초로 정정 하였다. 4기의 발전기 1기가 과여자 되었다 하더라도 조속기의 동작과 나머지 발전기의 제어기 동작으로 과여자된 발전기의 주파수는 일정하게

유지되었다. 그림 7은 각 계자전압 변화에 따른 Volts/Hz 값의 변화로써 2(pu)인가시 까지 1단계 정정값도 넘지 않았으며 2.25, 2.5(pu)의 계자전압 인가로 인한 과여자 시에 1단계 동작하였음을 볼 수 있다. 그림 8은 각 모의 케이스에 대한 Volts/Hz 계전기 동작 결과이다.

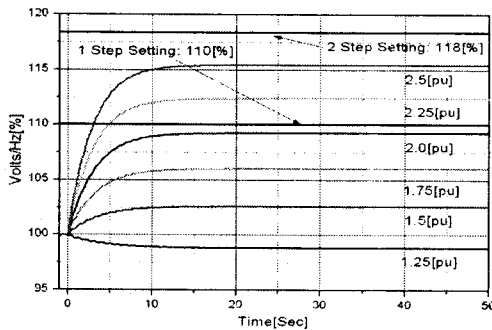


그림 7. 과여자시 Volts/Hz 값의 변화

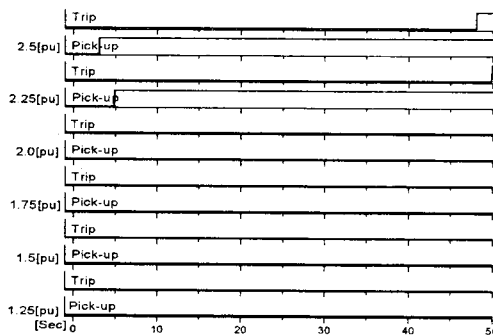


그림 8. Volts/Hz 계전기 동작 결과

3.4 전동기화(Motoring)시 보호계전기 동작

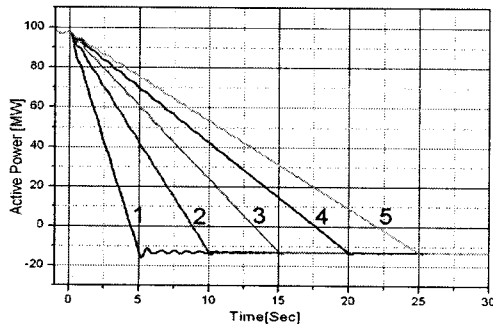


그림 9. 발전기 전동기화시 유효전력 변화

발전기를 전동기로 동작시키기 위해서 기계적 입력 토크를 음의 방향으로 변경시켜 모의 하였다. 스텝 입력 감소는 발생하는 상황에 따라 감소정도 및 추이가 다르고 비선형적이거나 본 논문에서는 시간에 따라 스텝입력 감소가 선형적인 것으로 가정하고 따라서 계기적인 입력 토크도 선형적으로 변하는 것으로 감소되는 시간을 달리 하여 모의 하였다. 발전기의 입력이 상실되고 전동기화 되면 발전기 축에 터빈만이 부하로 역할을 함으로 이때를 정격용량의 10%인 $-0.1[\text{pu}]$ 토크 값으로 사용하였다. 발전기의 정격출력인 120(MW)일 때 토크를 1(pu)로 했을 때 모의 계통의 발전기는 정상상태에서

99(MW) 유효전력 출력, $0.825[\text{pu}]$ 기계적 입력 토크이다. 그림 9의 각 직선에 표기된 숫자는 현재 토크값 $0.825[\text{pu}]$ 에서 $-0.1[\text{pu}]$ 로 5초부터 5초의 간격으로 5단계로 25초까지 토크의 감소시간을 각각 변경하여 발전기의 전동기화를 모의했을 때의 유효전력 변화이다. 모의 계통은 수력터빈을 사용하였으므로 정정 기준인 정격용량 120(MW)의 2%인 $-2.4[\text{MW}]$, 정한시 3초로 정정하였다. 그림 9와 같이 기계적인 입력 토크가 선형적으로 감소함에 따라 유효전력도 선형적으로 감소하며 전동기 동작을 하게 되면 계통으로부터 유효전력을 공급받게 되고 그림 10과 같이 유효전력 값이 정정값 보다 작아짐과 동시에 안정적으로 전동기화를 검출함을 보였다.

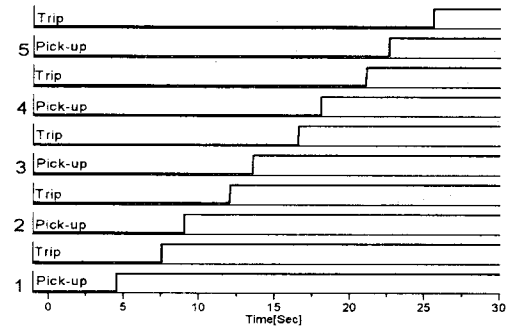


그림 10. 전동기화 발생시 역전력 계전기 동작 결과

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-B-100) 및 과학기술부/한국과학기술재단 우수연구센터육성사업의 지원으로 수행되었음(차세대전력기술연구센터)으로 관계기관에 감사드립니다.

4. 결 론

본 논문에서는 터빈을 포함한 여자기, 조속기로 구성된 동기발전기를 모의하고 계통의 외란이 아닌 발전기 자체에 발생할 수 있는 과도현상인 계자상실과 과여자 및 발전기 전동기화 등의 과도 현상들을 그 정도를 달리하여 모의하였고, 각 경우에 대하여 이를 보하기 위한 계자상실 보호 계전기, 과여자 보호계전기, 전동기화 보호용 역전력 계전기를 적용하여 발전기 과도 현상의 정도에 따라 발전기 보호계전기의 동작이 다음을 보였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 감찬기, 김수열, 류호선, 정창기, 이주현, 임익현, 류홍우, "발전소용 여자기시스템의 기술동향" 전기학회지, 제 46권 9호, pp. 29-35, 1997
- [2] C. R. Arndt and M. Rogers, "A Study of Loss of Excitation Relaying and Stability of a 595-MVA Generator on the Detroit Edison System," IEEE Trans. on Power App. and Syst., vol. 94, no.5, pp.1449-1456 and 1481-1483, Sept/Oct 1975.
- [3] J. Berdy, "Loss of Excitation Protection for Modern Synchronous Generators," IEEE Trans. on Power App. and Syst., vol. 94, no.5, pp.1457-1463 and 1481-1483, Sept/Oct 1975.
- [4] R. D. Rana, R. P. Schulz et al, "Generator Loss of Field Study for AEP's Rockport Plant", Comp. Applications in Power, IEEE, vol. 3, issue 2, pp 44-49, April 1990.
- [5] 한국 전력거래소, "보호계전기 정정기준 수립에 관한 연구" 2003.