

Positive Offset Mho 계자 상실 계전기 보호 협조 정정에 관한 연구

A Study on Protective Coordination Setting of Positive Offset Mho Loss of Field Relay

김 광 현* · 박 지 경* · 김 준 혁* · 김 두 웅* · 강 성 범* · 김 철 환* · 유 영 식** · 양 정 재** · 고 윤 태***
(Kwnag-Hyun Kim · Ji-Kyung Park · Jun-Hyeok Kim · Doo-Ung Kim · Sung-Bum Kang ·
Chul-Hwan Kim · Young-Sik Lyu · Jeong-Jae Yang · Yun-Tae Ko)

Abstract - It is important to clear the fault and prevent resulting in damage to power system. Although the frequency of generator internal fault is relatively low, it can lead to incalculable damage to power system as well as generator. Especially, loss of field on generator can cause the generator to lose synchronism for a short time if it is not removed promptly. Therefore, it is needed to conduct research on loss of field relay for detecting or clearing the loss of field. However, the setting of the relay may vary in generator operator or engineer, and the relay is not coordinated well with other elements associated with loss of field. In this paper, we address specifically the coordination of positive offset mho loss of field relay which is one of the protection schemes for loss of field. Computer simulations are performed by using ElectroMagnetic Transients Program-Restructured Version (EMTP-RV) based on actual data.

Key Words : Loss of Field, Coordination, UEL, 40Ry, GCC, SSSL

1. 서 론

안정적인 전력 공급의 요구와 함께 고장 발생 시 신속하게 고장을 제거하고 계통을 안정적으로 복구함으로써 피해의 범위와 규모를 최소화하는 능력 또한 중요해지고 있다. 발전기 내부 고장은 송·변전설비의 고장에 비해 사고 빈도는 상대적으로 낮지만 고장 발생 시 발전기뿐만 아니라 계통에도 막대한 피해와 충격을 줄 수 있기 때문에 신뢰성 높은 발전기 보호계전 시스템이 요구된다[1].

발전기의 비정상 운전의 원인으로는 대표적으로 계자 상실, 과전압, 과여자, 상불평형 등이 있다. 특히 계자 상실의 경우 고장이 신속히 제거되지 않는다면 수 초에서 수 분이내의 짧은 시간 안에 발전기의 동기 상실로 이어질 수 있다. 이 때 발전기는 열적 손상뿐만 아니라 계통으로부터 과도한 무효전력을 흡수하게 되며, 발전기의 출력 동요로 인해 발전기뿐만 아니라 계통으로도 고장의 피해가 확산될 수 있다[2]. 따라서 계자 상실이 발생할 경우 고장을 신속하게 검출하여 발전기 및 계통을 보호해야 하며, 이에 따라 계자 상실 계전기(40Ry)의 정정 기준 검토에 관한 연구가 필요하다. 계자 상실 계전기는 발전기가 부족 여자 영역

에서 동작할 때 동작하는 계전기로서 부족 여자 제한기(UnderExcitation Limtier, UEL)뿐만 아니라 발전기 용량 곡선(Generator Capability Curve, GCC), 정태 안정도 한계 곡선(Steady State Stability, SSSL)과의 보호 협조도 요구된다[3]. 하지만 발전기 보호 및 제어 시스템에 관련된 분야의 연구가 미미하기 때문에 정정 기준 및 보호 협조에 관한 내용이 상세하지 못하고 부족하며, 현재 국내에서 이러한 보호 및 제한 요소들이 어떠한 기준에 의해 정정되어 있는지 알 수 없는 실정이기 때문에 요소들 간에 서로 보호 협조되지 않는 문제가 발생할 수도 있다.

따라서 본 논문에서는 실제 데이터를 바탕으로 EMTP-RV를 이용하여 계자 상실 계전기를 비롯하여 정정 시 고려되어야 할 요소들을 모델링하고 요소들의 보호 협조 방안을 분석하였다.

2. 발전기의 계자 상실

2.1 계자 상실 발생 원인 및 결과

발전기는 여자시스템으로부터 직류 계자 전류를 공급 받는다. 하지만, 계자 전원 공급용 차단기의 갑작스러운 트립, 계자 회로의 개방 사고, 슬립링의 섬락에 의한 계자 회로의 단락 사고, AVR 고장, 또는 여자시스템에 공급되는 전원 차단 등에 의해 발전기의 계자 전원이 부분적으로 또는 완전히 공급되지 않을 수 있다. 동기발전기가 여자를 상실하면 유효전력은 지속적으로 출력하더라도 무효전력의 출력이 감소함으로써 발전기가 동작하는

† Corresponding Author : Dept. of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Korea.
E-mail: hmwkim@hanmail.net

* Dept. of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Korea.

** Korea Power eXchange, Korea.

***Corning, Korea.

Received : April 18, 2016; Accepted : July 2, 2016

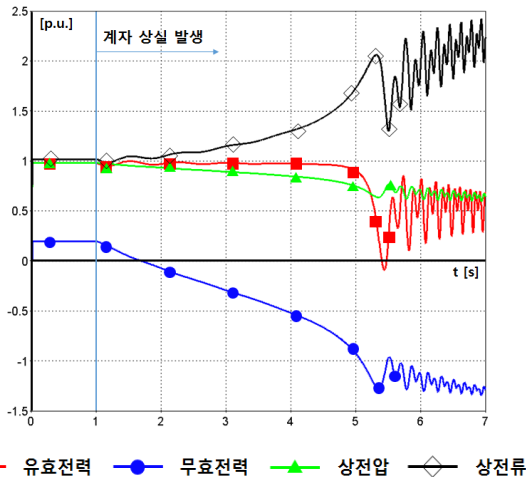


그림 1 계자 상실 시 발전기 단자 출력 파형

Fig. 1 Terminal output variations for loss of field on Generator

데 필요한 무효전력을 계통으로부터 흡수하게 된다. 즉, 동기발전기가 진상 운전을 함으로써 유도발전기로 운전하게 되는데 이와 같은 과도한 무효전력이 계통에서 발전기로 흐르게 되면 커다란 전압 강하를 발생하여 송전선로의 트립을 야기할 수 있다. 또한 유도발전기로 운전 시 고정자 및 회전자에 과도한 전류가 지속적으로 흘러 고정자 철심 단부가 비정상적으로 과열될 수 있으며 발전기의 소손으로 이어질 수 있다[4, 5].

그림 1은 계자 상실 시 전부하 조건에서 발전기 단자에서 출력되는 유효전력 및 무효전력, 상전압과 상전류를 나타낸다. 계자 상실이 1초에 발생하였으며 그 이후 무효전력이 지속적으로 감소하다 음수가 되면서 발전기가 계통으로부터 무효전력을 공급받는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 1에서 확인할 수 있듯이 계자 상실 이후 상전압은 감소하고 상전류는 증가하며 유효전력은 거의 일정하게 유지된다. 하지만, 계자 상실이 신속하게 제거되지 않고 지속될 경우 발전기 단자 출력 파형이 요동치게 되어 출력 동요를 발생시키며 계통 전체로 고장이 확산될 수도 있다. 따라서 고장 확산을 방지하기 위해 계전기에 의해 신속하고 정확하게 계자 상실 조건을 검출해야 한다.

2.2 발전기 계자 상실 보호

계자 상실 조건을 검출하기 위한 계전기로서 발전기의 계자 전류 또는 무효 전력 측정을 기반으로 한 보호 기법이 있다. 이 기법은 비용이 적게 들지만 외부 고장 시 계자 회로에 계자 전류가 일시적으로 감소하여 오동작을 일으킬 우려가 있기 때문에 보통 소형 발전기에만 적용하곤 한다[6].

따라서 오동작의 위험을 줄이고 고장을 신속하게 검출하기 위한 방법으로 거리 계전기에 기반한 Offset mho 계전기가 가장 널리 쓰인다. Offset mho 계전기는 발전기 단자로부터 PT전압과 CT전류 신호를 받아 발전기단에서 본 임피던스의 변화를 감지한

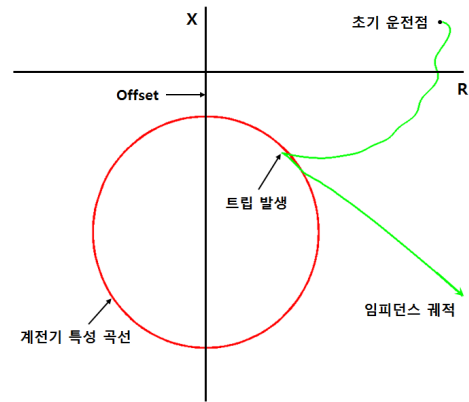


그림 2 Offset mho 계전기 특성 곡선

Fig. 2 Offset mho relay characteristic

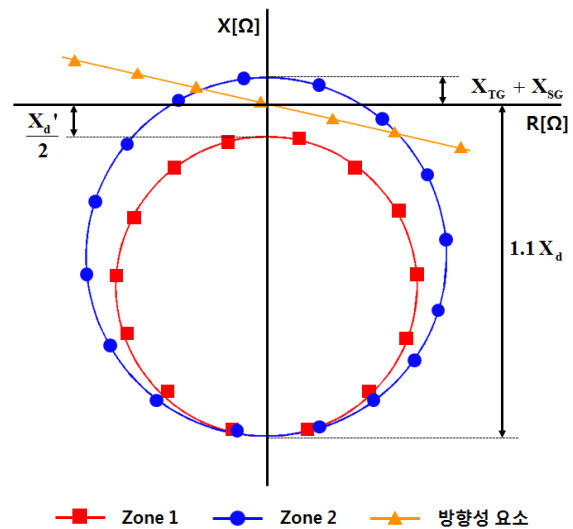


그림 3 Positive offset mho 계자 상실 계전기 특성 곡선

Fig. 3 Positive offset mho loss of field relay characteristic

다. 이 때 임피던스가 그림 2와 같이 원 내부로 들어오게 되면 계전기가 발전기 차단기로 신호를 보내 트립이 이루어진다.

Offset mho 계전기는 크게 Negative offset mho 계전기와 Positive offset mho 계전기로 나눌 수 있는데, 본 논문에서는 Positive offset mho 특성을 가지는 계자 상실 계전기를 대상으로 하였다. Positive offset mho 40Ry는 Zone 1과 Zone 2, 그리고 방향성 요소를 사용하며 IEEE standard에 의하면 일반적으로 그림 3과 같이 정정된다.

Zone 1과 Zone 2는 계자 상실을 검출하기 위한 요소이고, 방향성 요소는 외부 고장 시 임피던스 궤적이 Zone 2 내부로 진입 하더라도 방향성 요소 위쪽 영역에 위치할 경우 계전기가 동작하지 않도록 오동작의 피해를 줄여주는 역할을 한다. Zone 1의 offset은 $-X_d'/2$ 로, 직경은 $1.1X_d - X_d'/2$ 로 정정하며, Zone 2의 offset은 $X_{TC} + X_{SC}$ 로, 직경은 $1.1X_d + X_{TC} + X_{SC}$ 로 정정한

다. Negative offset mho 40Ry와 달리 방향성 요소가 포함되어 있다는 것이 가장 큰 차이점 중 하나라고 볼 수 있다. 발전기 외부 고장이 발생하거나 일시적으로 여자가 낮아지는 비정상 조건에서 임피던스 궤적이 순간적으로 y축(X축) 또는 원점을 향해 접근할 수 있는데, Positive offset mho 40Ry의 경우 Zone 2의 offset이 위쪽(양수)으로 설정되어 있기 때문에 발전기 외부 고장에 대해서 오동작이 발생할 가능성이 더 높을 수밖에 없다. 따라서 이러한 오동작을 줄이기 위해서 Positive offset mho 40Ry의 경우 방향성 요소를 추가함으로써 오동작이 발생할 수 있는 영역에서는 계전기가 동작하지 못하게끔 막는다. 방향성 요소는 원점을 지나는 직선으로서 임피던스 궤적을 감시하는데 만약 임피던스가 직선 위쪽 영역에 위치할 경우 임피던스가 Zone 2 내부에 있더라도 계전기가 동작하지 못하게 방지해주는 역할을 한다. 방향성 요소는 일반적으로 -10° 에서 -20° 사이의 기울기를 가지며 보통 -13° 로 설정한다[3].

여기서, X_d' 는 과도 리액턴스, X_d 는 동기 리액턴스를 나타내며 X_{TC} 와 X_{SC} 는 각각 발전기 base 임피던스를 바탕으로 한 변압기 리액턴스와 계통 리액턴스를 나타낸다.

3. 계자 상실 보호 협조 시 고려사항

표 1과 같이 계자 상실 발생 시 발전기가 부족 여자 영역에서 동작할 때 계자 상실 계전기와 함께 고려해야 할 요소들이 있다.

표 1 계자 상실 보호 협조 시 고려사항

Table 1 Considerations on protection coordination for loss of field

부족 여자 제한기 (UEL)
발전기가 부족 여자 영역에서 동작할 때 발전기의 고정자 철심 단부의 과열을 방지하기 위한 제어 역할을 함
계자 상실 계전기 (40Ry)
계자(여자) 상실 시 발전기를 보호하기 위해 Multi-function 발전기 보호계전기에 포함되어 있는 계전기로서 여자가 심하게 낮아질 경우 트립을 발생시킴으로써 고장을 제거함
발전기 용량 곡선 (GCC)
정격 전압에서 발전기가 과열 제한을 초과하지 않으면서 동작할 수 있는 조건
정태 안정도 한계 (SSSL)
부하량의 변화에 따른 발전기의 출력 조정 능력

GCC와 SSSL은 발전기와 계통의 파라미터 값에 의해 결정되는 고정된 곡선인 반면, UEL과 Positive offset mho 40Ry는 수동적으로 조절이 가능하므로 이들의 위치를 조정함으로써 계자 상실 보호 요소들을 협조시킬 수 있다.

발전기가 GCC 범위를 벗어나 저여자 상태로 운전하면 회전자 단부 누설자속 증가로 인해 고정자 철심 단부에 과열이 발생할

수 있다. 즉, 발전기 설비에 손상이 가해질 수 있으므로 이를 위해 GCC 범위 내에서 발전기가 동작해야 한다. 계자 상실과 같은 고장에 의하여 발전기가 심각한 부족 여자 상태로 운전하는 것을 막기 위해 1차적으로 여자시스템의 UEL이 동작하여 증자 작용(Boost Excitation) 역할을 하게 된다[7].

만약 여자시스템에서 발전기로 공급되는 여자가 매우 부족해지면 발전기가 SSSL를 넘어 동작하게 되고 동기 상실이 이어질 수 있다. 계자 상실 시 UEL의 제어에도 불구하고 발전기가 SSSL를 넘어 동작한다면 Positive offset mho 40Ry가 동작하여 발전기를 차단시켜야 한다.

즉, UEL은 발전기가 GCC를 넘어서 동작하지 않도록 제어하며 Positive offset mho 40Ry는 발전기가 SSSL를 넘어서 동작하지 않도록 트립하는 역할을 한다.

4. Positive offset mho 40Ry 보호 협조

Positive offset mho 40Ry 및 계자 상실 보호 요소들을 협조하기 위해 실질적으로 설정할 수 있는 요소는 Positive offset mho 40Ry와 UEL이다. 따라서 본 논문에서는 Positive offset mho 40Ry의 반경(임피던스 크기)과 시간 지연(time delay), 그리고 UEL의 반경 측면에서 보호 협조를 검토하였다.

4.1 시뮬레이션 조건

그림 4는 Positive offset mho 40Ry의 보호 협조 방안을 평가하기 위해 선정된 154kV 모델 계통이다. 이 모델 계통은 실제 표 2의 국내 발전기와 송전계통의 실제 데이터를 기반으로 EMTP-RV를 사용하여 모델링되었다.

4.2 Positive offset mho 40Ry 및 UEL의 반경

발전기가 출력할 수 있는 용량 한계를 제한하지 않으면서 계자 상실 조건을 신속하게 검출할 수 있도록 Positive offset mho 40Ry의 반경을 도출하는 것이 요구된다. 뿐만 아니라 Positive offset mho 40Ry 동작 이전에 UEL의 제어가 이루어질 수 있도록 UEL의 반경 또한 고려해야 할 것이다.

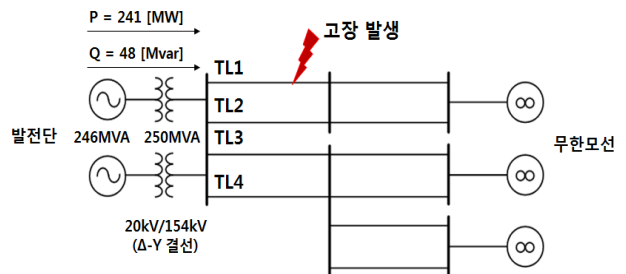


그림 4 시뮬레이션을 위한 154kV 모의 계통
Fig. 4 154kV system model for simulations

표 2 154kV 모의 계통 데이터

Table 2 Data of 154kV system model

파라미터	값
발전기 정격 용량 S_G	246 [MVA]
발전기 단자 정격 전압 V	20 [kV]
발전기 동기 리액턴스 X_d	1.7853 [p.u.]
발전기 과도 리액턴스 X_d'	0.3856 [p.u.]
변압기 용량 S_T	250 [MVA]
변압기 리액턴스 $X_T(X_{TC})$	0.1172(0.1153) [p.u.]
계통 용량 S_S	100 [MVA]
계통 리액턴스 $X_S(X_{SC})$	0.01826(0.04109) [p.u.]

4.2.1 Positive offset mho 40Ry와 SSSL의 보호 협조

계자 상실 시 SSSL를 넘어 발전기가 동작할 경우 기기의 비정상 과열의 위험성뿐만 아니라 계자 상실시 지속될 경우 동기 상실로 이어질 수 있다. 따라서 Positive offset mho 40Ry의 Zone 2를 R-X 다이어그램 상에서 SSSL 곡선 외부에 위치시킴으로써 발전기가 SSSL를 넘어 동작하는 것을 방지해야 한다[3, 7].

4.2.2 Positive offset mho 40Ry와 GCC의 보호 협조

Positive offset mho 40Ry의 보호 범위가 GCC를 침범한다면 민감한 트립으로 인해 발전기의 무효전력 운전 용량을 오히려 제한하는 결과를 초래할 것이다. 따라서 Positive offset mho 40Ry의 보호 범위는 R-X 다이어그램 상에서 GCC 내부에 위치하여야 한다[7]. 하지만 최근 대형 발전기가 많이 보급됨에 따라 큰 동기 리액턴스를 가지는 발전기도 증가하고 있다. 발전기의 동기 리액턴스 값에 비례하여 Positive offset mho 40Ry의 Zone 1과 Zone 2의 직경도 커지게 되므로 GCC를 침범할 우려가 있다. 그러므로 운영자 측에서는 발전기에 따라 이를 고려하여 Positive offset mho 40Ry를 조정해야 한다[8].

4.2.3 UEL과 GCC의 보호 협조

계자 상실 발생 시 발전기의 여자가 부족해지고 발전기 무효 전력 출력량이 감소한다. 만약 계자 상실에 대한 제어 역할이 없다면 과도한 AVR 출력 전압의 변동에도 발전기가 고정자 권선 단부 한계(GCC)를 넘어 운전하면서 고정자 및 회전자 과열을 야기할 수 있다. 즉, UEL이 계자 상실 시 발전기의 여자 상태가 감소하는 것을 억제하기 위해 증자 작용 역할을 함으로써 발전기가 GCC를 넘어 동작하지 않도록 AVR 출력 전압을 제어할 수 있다. 따라서, UEL은 Positive offset mho 40Ry가 동작하기 전에 충분한 여유도를 가지고 1차적으로 증자 제어가 이루어져야 한다. 일반적으로 R-X 다이어그램 상에서 Positive offset mho 40Ry는 GCC 내부에 위치하고 UEL은 GCC 외부(10%의 margin을 가짐)에 위치한다. 이에 따라, 계자 상실 시 발전기가 GCC를 넘어 운전하지 않도록 UEL이 1차적으로 여자를 제어하고 만약

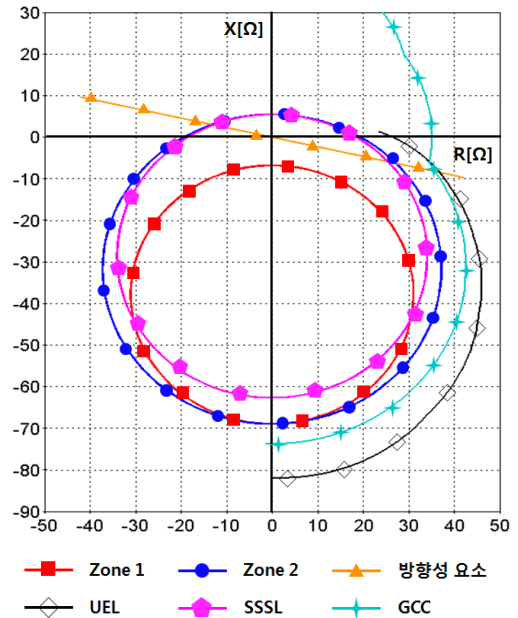


그림 5 Positive off set mho 40Ry 보호 협조

Fig. 5 Protection coordination of positive offset mho 40Ry

발전기가 지속적으로 GCC를 넘어 운전할 경우 Positive offset mho 40Ry가 최종적으로 계자 상실에 대해 발전기를 보호할 수 있다.

그림 5는 위의 설명을 고려하여 적절하게 보호 협조된 계자 상실 보호 요소들(Positive offset mho 40Ry, UEL, GCC, SSSL)을 나타낸 것이다. 즉, R-X 다이어그램 상에서 SSSL, Zone 2(Positive offset mho 40Ry), GCC, UEL 순으로 안쪽에서 바깥쪽으로 위치하도록 Positive offset mho 40Ry 및 UEL의 반경을 조정해야 한다.

4.3 Positive offset mho 40Ry의 시간 지연 조정

계자 상실 시 고장이 제거되지 않은 채 계자 상실 상태로 발전기가 계속 동작할 경우 출력 동요가 발생하며 동기 상실로 이어질 수 있다. 따라서 고장을 신속하게 검출하고 제거할 수 있도록 Positive offset mho 40Ry의 시간 지연을 조정하는 것이 요구된다. 그러나 계자 상실이 아닌 외부 고장에 의해 임피던스 궤적이 순간적으로 Positive offset mho 40Ry 보호 영역 내부로 들어올 수도 있기 때문에 시간 지연이 너무 짧을 경우 계전기의 오동작을 일으킬 수 있으므로 이를 고려하여 시간 지연을 조정해야 한다.

4.3.1 발전기 출력 동요 고려

계자 상실 시 발전기 단자 출력이 변화가 생기며 고장이 제거되지 않고 계자 상실시 지속될 경우 발전기 단자 출력이 요동친다. 이러한 조건은 발전기뿐만 아니라 계통 전체에 악영향을 미

치므로 출력 동요 이전에 고장을 신속하게 제거하는 것이 요구된다. 동일 시간 내에서 발전기 단자 출력 파형의 변화 정도는 발전기 부하량이 커질수록 계자 상실 정도가 심할수록 커진다[8, 9]. 즉 전부하, 완전 계자 상실 조건에서 가장 짧은 시간 내에 출력 동요로 이어질 수 있기 때문에 시간 지연 정정 검토 시 이러한 조건 하에서 모의를 하는 것이 바람직하다.

전부하 조건에서 시뮬레이션을 진행하였고 1초에 계자 회로를 개방함으로써 완전 계자 상실을 모의하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 6과 같이 나타나고 이에 따른 발전기단 출력 파형은 그림 1과 같다. 임피던스 궤적이 4.56초에 Zone 1을 진입하였고 그림 1에서 확인할 수 있듯이 약 5초에 출력 동요가 발생한다. 따라서 Zone 1은 출력 동요가 발생하기 이전에 발전기가 트립이 되도록 시간 지연을 정정해야 하므로 Zone 1 시간 지연은 0.44초 보다 짧게 정정해야 한다. 일반적으로 Positive offset mho 40Ry의 Zone 1의 시간 지연은 0.2 ~ 0.3초로 정정한다[4].

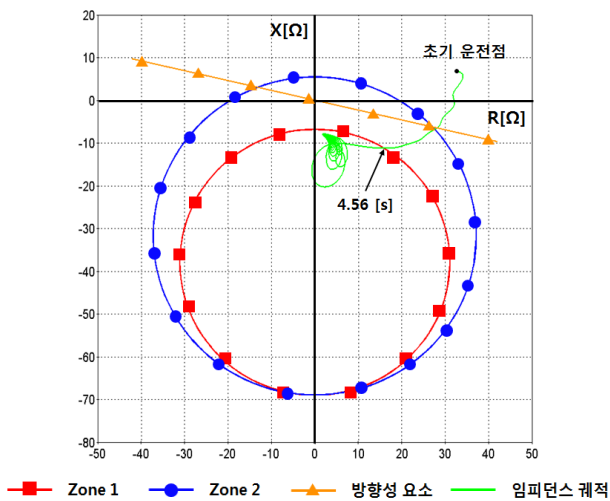


그림 6 계자 상실 시 임피던스 궤적
Fig. 6 Impedance trajectory for loss of field

4.3.2 오동작 고려

시간 지연이 짧을수록 고장을 신속히 제거할 수 있는 장점이 있지만, 시간 지연이 너무 짧을 경우 계전기 오동작의 위험이 있으므로 주의해야 한다. 대표적으로 발전소 인근 선로에서 3상 단락 고장이 발생한 후 고장 제거가 지연될 경우 순간적으로 임피던스 궤적이 Positive offset mho 40Ry 보호 범위 안으로 들어올 수 있다[10, 11].

본 논문에서는 표 3과 같이 3상 단락 고장과 함께 1선 지락 고장과 선간 단락 고장을 추가적으로 모의하여 오동작이 발생하는지를 검토했다.

고장 제거 지연에 따른 발전기 단자에서 본 임피던스 궤적을 분석하기 위해서 그림 4와 같이 154kV 시뮬레이션 계통 발전기 인근 선로(TL1)에 고장을 발생시켰다. 정상 상태에서 시뮬레이션을 시작하였고 0.1초에 고장을 모의하였으며, 임의로 각각 0.1초,

표 3 시뮬레이션 조건

Table 3 Simulation conditions

Case	고장 종류	고장 제거 시간
1-1	3상 단락 고장	0.1초 후 고장 제거
1-2		0.2초 후 고장 제거
1-3		0.3초 후 고장 제거
2-1	1선 지락 고장	0.1초 후 고장 제거
2-2		0.2초 후 고장 제거
2-3		0.3초 후 고장 제거
3-1	선간 단락 고장	0.1초 후 고장 제거
3-2		0.2초 후 고장 제거
3-3		0.3초 후 고장 제거

0.2초, 0.3초의 고장 지속 시간이 지난 후 고장을 제거하였다. 여기서, 3상 단락 고장에 대한 임계 고장 제거 시간은 고장 발생 후 0.3초이다.

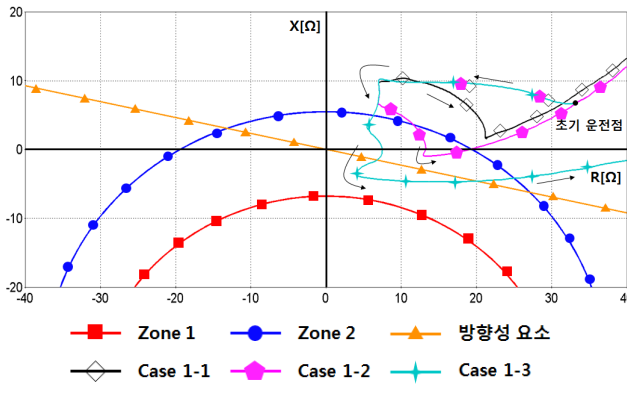
그림 7의 (a), (b), (c)는 Case 1-1~Case 1-3과 같이 발전기 인근 선로에 각각 3상 단락 고장, 1선 지락 고장, 선간 단락 고장을 발생시킨 뒤 고장 제거 지연 시의 임피던스 궤적을 나타낸다. Case 1-1과 같이 3상 단락 고장 후 고장 지속 시간이 0.1초일 때는 임피던스 궤적이 Zone 2 내부로 진입하지 않는다. Case 1-2는 고장 지속 시간이 0.2초로서 임피던스 궤적이 Zone 2 내부로 진입하지만 방향성 요소 윗부분에 위치하기 때문에 Positive offset mho 40Ry가 동작하지는 않는다. 그러나 Case 1-3과 같이 고장 지속 시간이 0.3초일 때는 임피던스 궤적이 Zone 2 내부를 넘어 방향성 요소 아래까지 순간적으로(1초 이내) 들어왔다가 빠져나가는 것을 확인할 수 있다. 따라서 Zone 2의 시간 지연 정정 값에 따라 외부 고장에 의해 Positive offset mho 40Ry가 오동작할 수 있음을 확인할 수 있다. Case 1-3에서는 0.73초 동안 임피던스 궤적이 Zone 2에 머물러 있었고 따라서 이보다 길게 Zone 2의 시간 지연을 정정할 필요가 있다.

1선 지락 고장의 경우 Case 2-1~Case 2-3과 같이 Zone 2 보호 범위 내로 들어오지 않기 때문에 오동작의 문제가 없다고 사료된다. 선간 단락 고장의 경우도 Case 3-1~Case 3-3과 같이 임피던스 궤적이 순간적으로 Zone 2 내부로 들어오기는 하지만 방향성 요소 위에 위치하기 때문에 오동작의 문제가 없다고 사료된다.

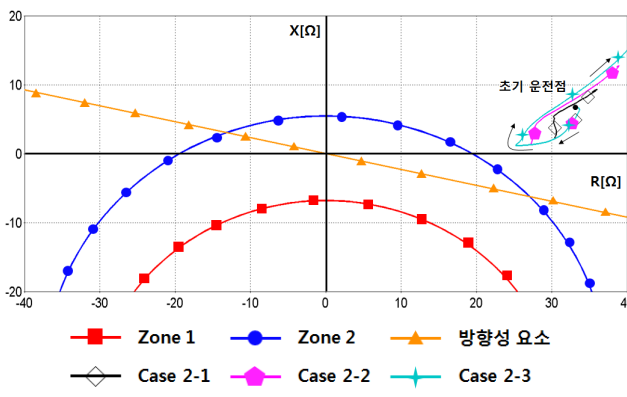
앞서 모의한 결과를 바탕으로 하고 Zone 2 시간 지연은 오동작을 고려하여 0.73초보다 길게 정정해야 할 것이다. 일반적으로 Positive offset mho 40Ry의 Zone 2 시간 지연은 1초 ~ 1분으로 정정한다[4]. 하지만 발전사 별로 보다 정확하고 신뢰성 있는 시간 지연을 정정하기 위해서는 상기에 설명한 방법을 토대로 시뮬레이션을 통하여 Positive offset mho 40Ry의 정정 값을 결정 및 검토해야 할 것이다.

4.4 대형 발전기 40Ry 정정 시 고려사항

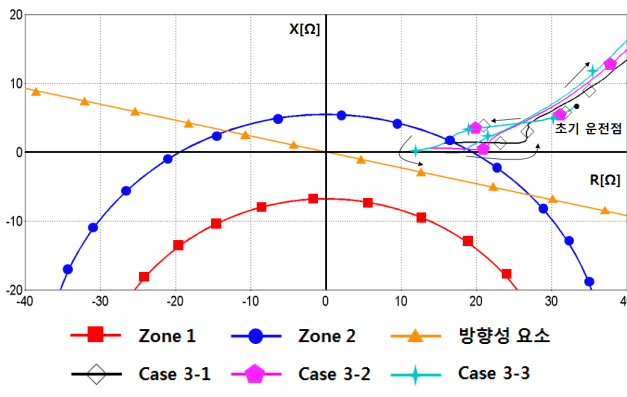
앞서 4.2.2절에서 언급했듯이 발전기 동기 리액턴스 값이 커질



(a) 3상 단락 고장



(b) 1선 지락 고장



(c) 선간 단락 고장

그림 7 고장 제거 지연 시 임피던스 궤적

Fig. 7 Impedance trajectory with delay of fault clearing

에 따라 Zone 1과 Zone 2의 보호 반경도 커진다. 즉, 대형 발전기의 경우 Positive offset mho 40Ry를 그림 3과 같이 IEEE Standard를 바탕으로 정정한다면 계전기 특성 곡선이 GCC를 침범할 수 있다.

이를 검토하기 위해 345kV 계통에 연결된 대형 발전기를 대상으로 Positive offset mho 40Ry 특성 곡선 반경을 도식화했다.

표 4 345kV 모의 계통 데이터

Table 4 Data of 345kV system model

파라미터	값
발전기 정격 용량 S_G	1213 [MVA]
발전기 단자 정격 전압 V	22 [kV]
발전기 동기 리액턴스 X_d	2.17 [p.u.]
발전기 과도 리액턴스 X'_d	0.49 [p.u.]
변압기 용량 S_T	1060 [MVA]
변압기 리액턴스 $X_T(X_{TC})$	0.16(0.1652) [p.u.]
계통 용량 S_S	100 [MVA]
계통 리액턴스 $X_S(X_{SC})$	0.02(0.2189) [p.u.]

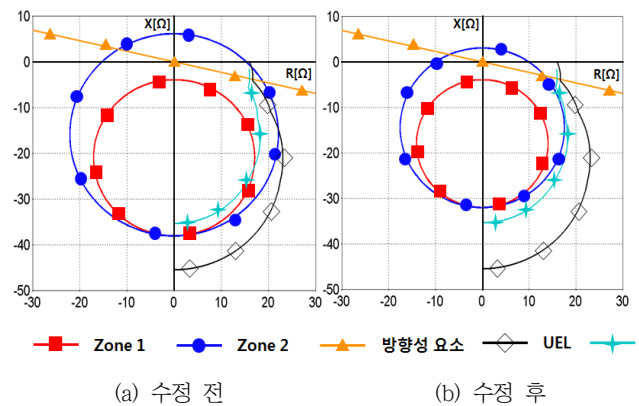


그림 8 계전기 특성 곡선 반경 검토

Fig. 8 Consideration on radius of relay characteristic curve

그림 8(a)는 표 4의 데이터를 바탕으로 그려진 계전기 특성 곡선이다. 대용량 발전기처럼 동기 리액턴스가 큰 경우 그림 8(a)와 같이 GCC를 침범하고 일부 UEL도 침범하는 것을 확인할 수 있다. 이 경우 발전기 용량을 제한할 수 있고 UEL의 제어가 이루어지기 전에 계전기가 동작하여 제대로 된 보호가 이루어질 수 없다. 따라서 Zone 1과 Zone 2의 반경을 줄여 그림 8(b)와 같이 GCC와 UEL과의 협조가 이루어지도록 정정할 필요가 있다.

시간 지연의 경우 4.3절과 동일한 방법으로 적용한다면 Zone 1은 0.2초, Zone 2는 1.0초로 정정할 때 효과적으로 Positive offset mho 40Ry가 동작할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 GCC, SSSL, UEL를 고려하여 Positive offset mho 40Ry의 보호 협조 방안에 대한 연구를 수행하였다. 보호 기능과 제한 기능의 정정 검토를 위해 계자 상실 보호 요소들 간의 상대적인 위치와 계전기의 시간 지연을 고려하였으며, 실제 국내 데이터를 기반으로 EMTP-RV를 통해 모델링하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있으며 R-X

다이어그램을 기준으로 서술하였다.

- ① 취득한 데이터를 바탕으로 GCC와 SSSL를 도식화
- ② UEL은 GCC 바깥에 위치하도록 정정 (일반적으로 GCC와 10%의 margin을 가짐)
- ③ Positive offset mho 40Ry의 Zone 2가 GCC와 SSSL 사이에 위치하도록 보호 반경의 크기를 조절 (대형 발전기의 경우 동기 리액턴스가 크므로 GCC를 침범할 수 있음)
- ④ 전부하 조건에서 완전 계자 상실이 발생했을 때 전력 동요 발생 이전에 계전기가 동작하도록 시간 지연 정정 → 신속한 고장 제거
- ⑤ 발전소 인근 선로 3상 단락 고장 제거 지연 시 순간적으로 임피던스 궤적이 Zone 내부에 위치하고 있는 시간보다 길게 시간 지연 정정 → 오동작 방지
(일반적으로 Zone 1은 0.2초 ~ 0.3초, Zone 2는 1초 ~ 1분으로 시간 지연 정정)

발전기나 계통에 따라 Positive offset mho 40Ry의 정정 반경 또는 시간 지연이 다소 상이할 수 있다. 따라서 발전기 운영자 측에서 본 논문을 참고하여 계통 연구를 통해 보다 정확하고 신뢰성 있는 Positive offset mho 40Ry의 정정 반경 및 시간 지연 범위를 도출하고 검토할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국전력거래소(Korea Power eXchange)의 지원으로 수행되었음.

References

[1] Chul-Won Park, "Advanced Algorithm for IED of Stator Winding Protection of Generator System", KIEE, pp. 91-95, June. 2008

[2] PJM Relay Subcommittee, "Protective Relaying Philosophy and Design Standards", June. 2013

[3] Working Group J-5 of the Rotating Machinery Subcommittee, Power System Relay Committee, "Coordination of Generator Protection with Generator Excitation Control and Generator Capability," in Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 2008. ICPS 2008. IEEE/IAS, vol., no., pp. 1-17, 4-8 May 2008

[4] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Guide for AC Generator Protection," in IEEE Std C37.102-2006 (Revision of IEEE Std C37.102-1995), vol., no., pp. 1-177, 2006

[5] Zhanpeng Shi, "Investigation on Generator Loss of Excitation Protection in Generator Protection Coordi-

nation", 2010

[6] IEEE Power System Relaying Committee, "IEEE Tutorial on the Protection of Synchronous Generators", 2011

[7] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies," in IEEE Std 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992), vol., no., pp. 0_1-85, 2006

[8] NERC System Protection and Control Subcommittee, "Power Plant and Transmission System Protection Coordination", July. 2010

[9] Berdy, John, "Loss of excitation protection for modern synchronous generators," in Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on, vol. 94, no. 5, pp. 1457-1463, Sept. 1975

[10] Pajuelo, E.; Gokaraju, R.; Sachdev, M.S., "Identification of generator loss-of-excitation from power-swing conditions using a fast pattern classification method," in Generation, Transmission & Distribution, IET, vol. 7, no. 1, pp. 24-36, Jan. 2013

[11] Mozina, C.J., "Coordinating generator protection with transmission protection and generator control - NERC standards and pending requirements," in Protective Relay Engineers, 2010 63rd Annual Conference for, vol., no., pp. 1-12, March 29 2010-April 1 2010

저 자 소 개



김 광 현 (Kwang-Hyun Kim)

1992년 4월 17일생. 2015년 성균관대 정보통신대학 졸업. 2015년~현재 동 대학원 정보통신대학 석사과정
Tel : 031-290-7166
Fax : 031-299-4137
E-mail : rlarhkdgus17@naver.com



박 지 경 (Ji-Kyung Park)

1985년 5월 16일생. 2012년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2012년~현재 동 대학원 정보통신대학 석박사통합과정
Tel : 031-290-7166
Fax : 031-299-4137
E-mail : dclover@skku.edu



김 준 혁 (Jun-Hyeok Kim)

1985년 5월 17일생. 2012년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2014년 동 대학원 정보통신대학 졸업(석사). 2014년~현재 동 대학원 정보통신대학 박사과정
Tel : 031-299-4630
Fax : 031-299-4137
E-mail : kjh30309@naver.com



양 정 재 (Jeong-Jae Yang)

1961년 2월 17일생. 1989년 건국대학교 전기공학과 졸업. 현재 한국전력거래소 계통보호팀 팀장
Tel : 061-330-8640
Fax : 031-330-8299
E-mail : jjyang@kpx.or.kr



김 두 응 (Doo-Ung Kim)

1986년 9월 8일생. 2012년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2012년~현재 성균관대 정보통신대학 석박사통합과정
Tel : 031-299-4630
Fax : 031-299-4137
E-mail : krkic@hanmail.net



고 윤 태 (Yun-Tae Ko)

1982년 11월 11일생. 2008년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2010년 성균관대 정보통신대학 졸업(석사). 2010년~현재 코닝정밀소재 근무
Tel : 031-290-7166
Fax : 031-299-4137
E-mail : hmm100@nate.com



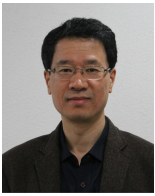
강 성 범 (Sung-Bum Kang)

1988년 5월 1일생. 2011년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2013년 성균관대 정보통신대학 졸업(석사).
Tel : 031-290-7166
Fax : 031-299-4137
E-mail : trueksb@nate.com



김 철 환 (Chul-Hwan Kim)

1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 성균관대 정보통신대학 교수, 전력IT인력양성센터 센터장
Tel : 031-290-7124
Fax : 031-299-4137
E-mail : hmwkim@hanmail.net



유 영 식 (Young-Sik Lyu)

1963년 2월 11일생. 1989년 광운대학교 전기공학과 졸업. 현재 한국전력거래소 계통보호팀 차장
Tel : 061-330-8642
Fax : 061-330-8299
E-mail : ry@kpx.or.kr