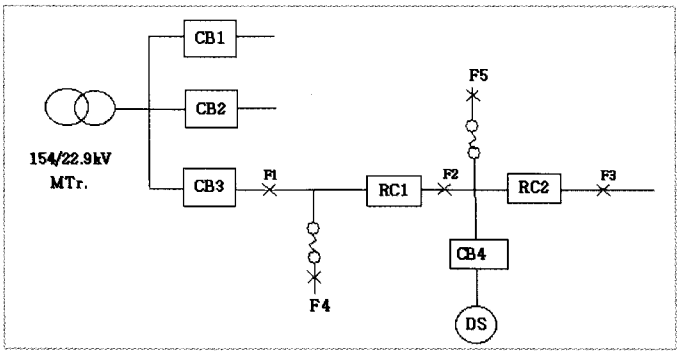
양방향 보호협조 알고리즘 검토

▌노 대 석 / 한국기술교육대

1. 개 요

기존의 대규모 집중형 전원과는 달리 소비지 근방에 분산 설치하는 분산전원을 기존 배전계통에 연결할 경우, 역조류가 발생하며, 이로 인하여 배전계통의 보호협조가 곤란한 상황이 발생될 수 있다. 기존 배전계통시스템은 수지상 단일방향으로 연결되어 있으나 분산전원이 도입되면 양방향으로 전력의 융통이 이루어지기 때문에 보호협조에 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 분산전원이 연계되는 경우 상정할 수 있는 3가지의 상태에 대한 보호협조 방안을 제시하고자 한다. 구체적으로는 분산전원 연계 선로에 사고가 발생한 경우의 보호협조 기본 방안과 분산전원이 연계된 선로의 동일 뱅크의 타 선로에서의 사고가 발생한 경우의 보호협조 방안, 배전자동화에 의한 부하절체 운전에 따른 보호협조 방안 등에 대한 알고리즘을 제시하였다.



분산전원 연계 선로의 사고 시 보호협조 개념도

2. 양방향 보호협조 방안

2.1 분산전원 연계 선로의 사고 시 보호협조 방안

분산전원이 연계되어 있는 고압배전선로에서 사고가 발생할 때, 분산전원의 고장전류 기여 수준이 배전선로용 리클로저나 분산전원 발전장치의 보호협조 설계에 주요 변수로 작용한다. 또한, 분산전원의 종류에 따라서 고장전류 기여도가 달라진다. 따라서 배전계통에는 전원 종류가 다른 여러 분산전원이 혼재할 수 있기 때문에 다양한 종류의 보호협조 체제가 필요하게 된다. 보호협조의 제 1원칙은 고장이 발생할 때 최소한도의 계통 구간만 분리시키는 것이다. 다음은 분산전원 연계 선로 상에서 사고가 발생한 경우의 보호협조 방안을 제시한 것이다.

① 그림 1의 F1지점에서 고장이 발생하면, CB3가 고장을 검출하여 동작해야 한다. 리클로저 RC1은 분산전원 DS에서 공급하는 고장전류의 크기와 리클로저 RC1의 최소 픽업 정정치에 의하여 F1 고장을 검출할 수도 있고 검출 못 할 수도 있다. 따라서 리클로저 RC1은 방

향성 과전류 보호기능을 구비하고 있어야 한다. 만일 리클로져 RC1이 동작하면, 리클로져 RC1과 선로 종단(End) 사이에는 단독운전(Islanding) 상태가 되므로 CB4를 동작시켜 DS를 분리시켜야 한다.

② 그림 1의 F2지점에서 고장이 발생하면, 리클로져 RC1과 DS를 연계하는 CB4가 동작하여야 한다. 리클로져 RC1은 DS를 연계하는 CB4가 분리된 후에만 재폐로를 할 수 있다. 만일 재폐로가 성공하게 되면 CB4의 동기화 조건에 의하여 DS를 배전계통에 다시 연계할 수 있다.

③ 그림 1의 F3 지점에서 고장이 발생하면, 리클로져 RC2가 동작하여 고장을 제거하여야 한다. F3 고장에 대하여 리클로져 RC1, 리클로져 RC2와 DS의 CB4가 보호협조를 하여야 한다.

④ 그림 1의 F4 지점에서 고장이 발생하는 경우, 이 고장은 COS의 부하측이 된다. COS 퓨즈를 절약하기 위해서라면, COS 퓨즈가 동작하기 전에 CB3가 동작하여야 한다. 만일 DS의 고장전류 기여도가 크면 리클로져 RC1이 동작하여야 한다. DS가 단독운전(Islanding)하는 것을 방지하기 위하여, CB4가 동작하여 DS를 분리시켜야 한다. 만일 DS의 설비용량이 크고 고장전류가 크다면 CB3, 리클로져 RC1, CB4의 순시 과전류 보호 동작에도 불구하고, COS의 퓨즈가 동작할 수도 있다.

⑤ 그림 1의 F5 지점에서 고장이 발생하는 경우, COS 퓨즈를 절약하기 위해서라면 COS 퓨즈가 동작하기 전에 DS의 CB4가 동작하여 DS를 분리시켜야 한다. 이 때 리클로져 RC2와 CB4가 보호협조를 해야 한다.

2.2 타 피더 사고 시 분산전원 연계선로의 보호협조 방안

① R/C #1이 동작을 해야 하는데, R/C #3가 DS에 의하여 R/C #3까지 동작을 하는 경우가 있으므로, 역방향 사고전류 시에 검출하여 동작을 못하도록 정정이 필요하다. 이 경우에는 양방향성의 보호협조기기가 필요하다.

② R/C #3이 전단 사고에도 동작하지 않도록 방향성 감지가 필요하다. 이 경우에는 양방향성의 보호협조기기가 요구된다.

2.3 부하절체 운전 시 보호협조 방안

(1) 사고 발생시

① R/C #4가 R/C #2 동작하기 전에 먼저 동작하도록 정정치 값을 조정해야 한다.

② R/C #4가 2번 선로의 중간지점 정정치로 셋팅되어 있는데, 부하절체에 의해 말단지점 정정치로 변경되어야 하는데, OCGR이 감지 못하는 상황이 발생할 수 있다.

(2) 사고지점(동일)

① R/C #2가 분류효과에 의해 사고전류가 작아져 감지 못하는 경우가 발생할 수 있다.

② DS의 사고전류에 의하여 R/C #4가 동작하게 되면, 순시사고 복구 시에 R/C #4가 동작하지 않도록 방

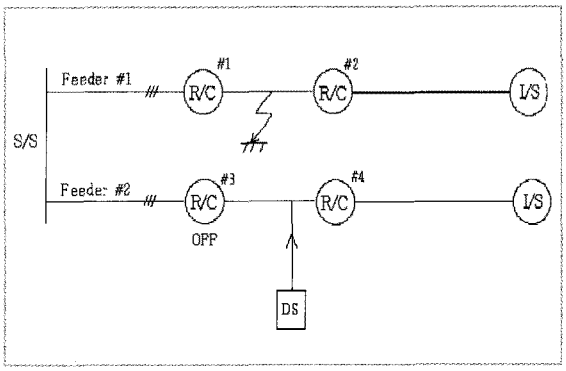


그림 2 타 선로 사고 시 보호협조 개념도

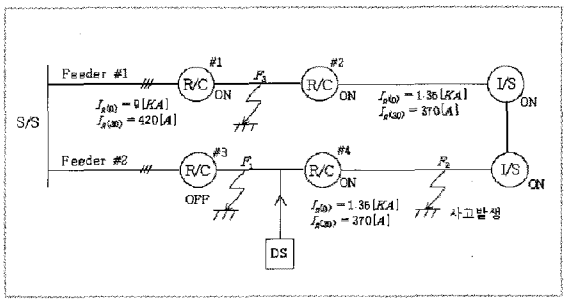


그림 3 부하절체 운전 시 보호협조 개념도

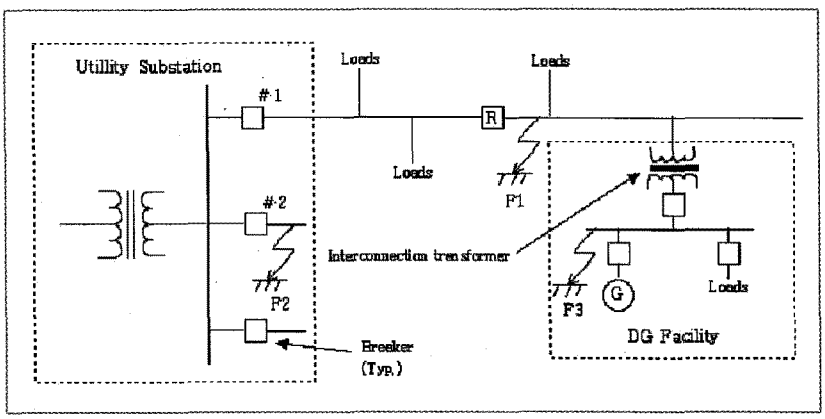


그림 4 변압기결선 방식에 따른 보호협조 개념도

향성을 감시해야 한다. 이 경우에는 양방향성의 보호 협조기기가 요구된다.

2.4 변압기결선 방식에 따른 보호협조 방안

(1) △ - △ 결선

(가) 장점

① F1, F2 사고에 대하여 역으로 지락사고를 공급하지 않는다.

② F3 사고에 대하여 CB #1의 지락전류에 기여하지 않는다.

(나) 단점

① CB #1이 트립된 후에 선로에 비접지 전원을 공급하여 과전압 유발한다.

② DG 설비에 접지전원을 공급하지 않는다.

(2) △ - Y 결선

(가) 장점

① F1, F2 사고에 역으로 지락사고를 공급하지 않는다.

② F3 사고 시에 CB #1의 지락전류에 기여하지 않는다.

③ DG 설비에 접지전원 공급한다.

(나) 단점

① CB #1이 트립된 후, 선로에 비접지 전원을 공급하여 과전압 유발한다.

(3) Y(비접지) - △ 결선

(가) 장점

① F1, F2 사고에 역으로 지락사고를 공급하지 않는다.

② F3 사고 시에 CB #1의 지락전류에 기여하지 않는다.

(나) 단점

① CB #1이 트립된 후, 선로에 비접지 전원을 공급하여 과전압 유발한다.

(4) Y(접지) - △ 결선

(가) 장점

① F3 사고 시에 CB #1의 지락전류에 기여하지 않는다.

② F1 지락 사고 시에 과전압을 유발하지 않는다.

(나) 단점

① F1, F2 사고 시에 원치 않는 지락전류를 공급한다.

(5) Y(접지) - Y(접지) 결선

(가) 장점

① F1 지락 사고 시에 과전압을 유발하지 않는다.

② DG 설비에 접지전원을 공급한다.

(나) 단점

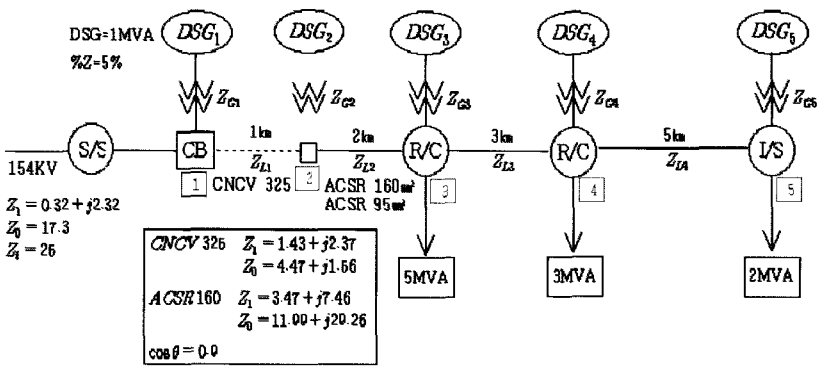
① F1, F2 사고에 대하여 역으로 지락사고를 공급한다.

② F3 사고에 대하여 CB #1의 지락전류에 공급한다.

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

3.1 분산전원 연계 선로의 사고 시 결과 분석

(1) 대상 배전계통 (모델 계통)



① 154KV 임피던스

Z1=0.32+j 2.3=2.32

② M.TR(45/60MVA) : 15%

→25%(100MVA 기준)

③ CNCV 325

Z1=1.43+j 2.37=2.77

Z0=4.47+j 1.56=4.73

④ ACSR 160

Z1=3.47+j 7.46=8.23

Z0=11.99+j 2.96=31.62

⑤ 분산전원(DSG) 연계 변압기 임피던스

%Z=500(100MVA기준)

Z1=Z0=500

(2) 시뮬레이션 결과 및 분석

임피던스 맵과 대칭좌표법을 이용한 고장계산법에 의하여 시뮬레이션을 수행한 결과를 정리하면 다음과 같다.

○ 분산전원이 어느 지점에 도입되는 경우나, 그리고 배전선로의 어느 지점에서 사고가 발생하는 경우에 대하여, 3상 단락전류와 1선 지락전류의 값은 분산전원이 도입되기 전보다 증가함을 알 수 있다. 이것은 분산전원이 계통의 사고지점으로 사고전류를 공급하는 전원으로 작용하기 때문이다. 예를 들어, 1번 지점(변전소 직하)에 분산전원이 1MW가 도입되는 경우, 3상 단락전류가 9,228A에서 9,734A로 약 5.5% 상승한다. 따라서 이 증가분의 고장전류 값을 고려하여 리클로저의 차단용량을 적정하게 선정해야 한다.

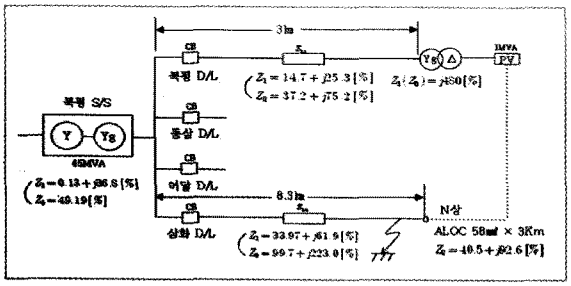
○ 분산전원의 설치위치와 사고지점에 따라 변전소의 CB(또는 직하지점의 리클로저)에 흐르는 단락전류의 값이 오히려 감소하는 분류효과(분산전원 도입에 의한 %임피던스의 병렬화로 인한 영향)가 발생한다. 예를 들어, 변전소 말단지역인 5번 지점에서 단락사고가 발생한 경우, 분산전원이 도입되기 전에는 변전소의 CB에 2,243A가 흐르지만, 분산전원(1MW, 5%)이 도입된 후에는 2,155A가 흐른다. 약 4%의 사고전류가 감소하여 OCR의 감지불능으로 인한 리클로저의 부동작에 영향을 줄 수 있으므로, 이 값을 고려하여 정정치를 수정해야 한다.

○ 분산전원의 설치 용량에 따라 변전소의 CB에 흐르는 단락전류의 값이 더 크게 감소하는 분류효과(분산전원 도입에 의한 %임피던스의 병렬화로 인한 영향)가 발생한다. 예를 들어, 변전소 말단지역인 5번 지점에서 단락사고가 발생한 경우, 분산전원이 도입되기 전에는 변전소의 CB에 2,243A가 흐르지만, 분산전원(3MW, 5%)이 도입된 후에는 1,996A까지 줄어든다. 약

11%의 사고전류가 감소하여 OCR의 감지불능으로 인한 리클로저의 부동작에 영향을 줄 수 있으므로, 이 값을 고려하여 정정치를 수정해야 한다.

3.2 분타 피더 사고 시 분산전원 연계선로의 결과 분석

(1) 대상 배전계통 (실 배전계통)



(2) 시뮬레이션 결과 및 분석

○ 분산전원이 연계된 배전선로에서는 동일 뱅크의 타 배전선로에서 지락사고가 발생하는 경우, 사고가 발생하지 않은 분산전원 연계선로의 중성선(N선)에 상당히 큰 지락 사고전류가 흐르게 되어, 건전한 배전선로의 OCGR이 오동작을 일으킬 수 있음을 확인했다.

○ 중성선에 흐르는 사고전류는 분산전원에서 공급하는 사고전류의 영향이 아니라 분산전원의 연계용변압기의 결선방식에 의한 것임을 확인했다.

○ 일반적으로 분산전원의 연계용변압기의 결선방식은 Y직접접지-△결선을 사용한다. 이 경우, 타 선로의 사고지점에 따라 분산전원 연계선로의 중성선(N선)에 흐르는 지락사고전류의 크기도 달라진다. 예를 들어, 변전소 직하지점에 지락사고가 발생하면 분산전원 연계선로의 중성선에는 약 498A정도, 말단지점에 사고가 발생하면 약 131A가 흐른다. 따라서 사고지점에 상관없이 중성선에는 상당한 크기의 지락전류가 흐르데 되어, 분산전원이 연계된 건전한 배전선로의 OCGR(보통 70A로 설정)이 오동작을 일으키게 될 가능성이 크다.

○ 따라서, 상기의 문제점을 해결하기 위하여 연계용변압기의 결선방식을 Y비접지-△결선으로 변경을 해보았다. 여기서는 동일한 효과를 가지는 Y고저항접지-△결선방식을 사용하여 시뮬레이션을 수행했다. 이 경우, 타 선로의 지락사고에 대하여 분산전원 연계선로의 중성선(N선)에는 약 13A정도만 흘러, 중선선의 지락사고전류를 획기적으로 줄일 수 있음을 확인했다.

○ 연계용변압기의 결선방식(Y직접접지-△결선, Y고저항접지-△결선)에 따라 사고지점의 건전상의 전압을 비교해 본 결과 Y직접접지-△결선에서는 약 0.82배에서 1.3배정도이지만, Y고저항접지-△결선에서는 약 0.6배에서 1.4배정도로 약간 차이가 보인다. 그러나 이론적인 값인 1.5배 이하의 값으로 Y고저항접지-△결선을 사용해도 1선 지락 사고에 대하여 건전상의 전압상승은 거의 문제가 없으므로 하나의 대책으로 사용해도 무방함을 알 수 있다.

4. 사고특성에 대한 문제점 및 대책

분산전원이 연계되는 경우 상정할 수 있는 3가지의 상태에 대한 사고특성 및 이에 대한 보호협조 방안을 정리하면 다음과 같다.

분류	문제점	사고특성	해결방안	비고(해석기법)
	분산전원 연계에 따른 사고전류 증가	○ 분산전원이 연계되는 지점이나, 배전선로의 사고 지점에 따라서 사고전류(3상 단락전류와 1선 지락전류)의 값은 분산전원이 도입되기 전보다 증가할 수 있다. 특히 분산전원의 도입 용량에 따라 사고전류의 크기가 증가할 수 있다. 시뮬레이션에서는 약 5%의 증가분을 확인하였다.	○ 분산전원 연계에 따른 고장전류의 증가분을 고려하여 보호협조기기(리클로저)의 차단용량을 적정하게 선정해야 한다.	

분류	문제점	사고특성	해결방안	비고(해석기법)
분산전원 연계선로 사고시 보호협조 방안	분산전원 연계에 따른 사고전류 증가	○ 분산전원의 설치위치와 사고지점의 조합에 따라, 보호협조기기(리클로저, 변전소의 CB)에 흐르는 단락전류의 값이 오히려 감소하는 분류효과(분산전원 도입에 의한 %임피던스의 병렬화로 인한 영향)가 발생할 수 있다. 시뮬레이션에서는 약 4%의 사고전류가 감소한 사례를 확인하였지만, 조합에 따라 감소 폭이 증가할 수도 있다.	○ 분산전원 연계에 따른 고장전류의 감소분을 고려하여 보호협조기기(리클로저)의 정정치를 적정하게 선정해야 한다. OCR의 감지불능으로 인한 리클로저의 부동작에 영향을 줄 수 있으므로, 이 값을 고려하여 정정치를 수정해야 한다.	고장계산법, EMTDC
	분산전원의 설치위치와 사고위치에 따른사고전류 감소 (분류효과)	○ 분산전원의 연계 용량에 따라 변전소의 CB에 흐르는 단락전류의 값이 더 크게 감소하는 분류효과(분산전원 도입에 의한 %임피던스의 병렬화로 인한 영향)가 발생한다. 시뮬레이션에서는 약 11%의 사고전류가 감소하였다.	○ 분산전원 연계에 따른 고장전류의 감소분을 고려하여 보호협조기기(리클로저)의 정정치를 적정하게 선정해야 한다. OCR의 감지불능으로 인한 리클로저의 부동작에 영향을 줄 수 있으므로, 이 값을 고려하여 정정치를 수정해야 한다.	
	연계용변압기의 결선방식에 따른 계통측 사고전류	○ 분산전원의 연계용 변압기의 결선방식에 따라 분산전원(태양광발전) 연계 전후의 계통 측(배전용변전소)의 사고전류 공급 값은 달라진다. Y직접접지-△결선방식에 대하여, 다른 방식(Y직접-Y직접접지 결선 : 7,803A, 비 연계 : 7,713A)보다 약 3% 정도 작은 값으로 나타났다.	○ 이것은 고장전류의 분류효과가 Y직접접지-△결선방식에서 크게 나타난다는 것을 의미한다. 따라서 분산전원의 연계용 변압기의 결선방식에 따라 OCGR의 정정치를 산정해야 한다.	
	연계용변압기의 결선방식에 따른 계통측 사고전류	○ 분산전원의 연계용 변압기의 결선방식에 따라 분산전원(태양광발전) 연계 전후의 분산전원 측(태양광발전 연계 점)의 사고전류 공급 값은 달라진다. Y직접접지-△결선방식에 대하여, 분산전원 측 공급고장 전류 값(약 200A)이 다른 방식(Y직접-Y직접접지 결선 : 39.6A, Y비접지-△결선 : 17A)보다 약 5.1배와 11.8배 정도로 큰 값으로 나타났다.	○ 분산전원의 연계용 변압기의 결선방식에 따라, 분산전원 구내의 보호협조기기의 차단용량 및 정정치를 선정해야 한다.	
	연계용변압기의 결선방식에 따른 계통측 사고전류	○ 지락사고가 발생한 경우, 변전소 차단기가 이를 검출하여 트립한 후, 분산전원(태양광발전) 측에서 고장전류의 검출차단 동작이 늦어지는 경우, 분산전원(태양광발전)은 1선 지락 상태의 선로에 연계되어 단독 운전되고 있는 상태 하에 있게 되고, 이 때 고장공급 전류는 Y-Y결선 및 Y-△결선에 대하여 각각, 정격전류의 약 214%, 150% 정도로 상승하게 된다.	○ 분산전원의 연계용 변압기의 결선방식에 따라, 분산전원 구내의 보호협조기기의 협조방식을 고려해야 한다.	

분류	문제점	사고특성	해결방안	비고(해석기법)
타 선로 사고 시 보호협조 방안	지락사고시 건전선로의 중성선 전류 크기변화	○ 분산전원이 연계된 배전선로에서는 동일 뱅크의 타 배전선로에서 지락사고가 발생하는 경우, 사고가 발생하지 않은 분산전원 연계선로의 중성선(N선)에 상당히 큰 지락 사고전류가 흐르게 된다. 중성선(N선)에 흐르는 사고전류는 분산전원에서 공급하는 사고전류의 영향이 아니라 분산전원의 연계용변압기의 결선방식에 의한 것임을 확인했다.	○ 큰 중성선의 전류(영상전류)에 의하여 분산전원이 연계된 건전한 배전선로의 리클로저(OCGR)에서 오동작 현상이 발생할 수 있으므로 이를 고려하여 양방향 보호협조기기를 설치(역방향사고에 대하여 동작하지 않도록 함)해야 한다.	고장계산법, MATLAB, EMTDC
	연계용변압기의 결선방식에 따른 중○성선 전류의 크기 변화	○ 분산전원의 연계용변압기의 일반적인 결선방식은 Y직접접지-△결선인데, 이 경우, 타 선로의 사고지점에 따라 분산전원 연계선로의 중성선(N선)에 흐르는 지락사고전류의 크기도 달라진다. 사고지점에 관계없이 중성선에는 상당한 크기의 지락전류(수백A)가 흐르데 되어, 분산전원이 연계된 건전한 배전선로의 OCGR(보통 70A로 설정)이 오동작을 일으키게 될 가능성이 크다.	○ Y고저항접지-△결선방식(접지저항 : 100Ω)을 사용한 경우, 타 선로의 지락사고에 대하여 분산전원 연계선로의 중성선(N선)에는 약 13A정도만 흘러, 중성선의 지락사고전류를 획기적으로 줄일 수 있음을 확인했다.	
	연계용변압기의 결선방식에 따른 사고지점의 건전상의 전압	○ 연계용변압기의 결선방식(Y직접접지-△결선, Y고저항접지-△결선)에 따라 사고지점의 건전상의 전압을 비교해 본 결과 약 0.6배에서 1.4배정도이다. 1선 지락 사고에 대하여 건전상의 전압상승은 거의 문제가 없음을 알 수 있었다.	○ Y고저항접지-△결선을 사용해도 1선 지락 사고에 대하여 건전상의 전압상승은 거의 문제가 없으므로 하나의 대책으로 사용해도 무방함을 알 수 있었다.	
	부하철제에의한 보호협조기의 정정치 문제	○ 부하절체 이전에 배전 선로의 중간지점에 설치된 보호협조기기의 정정치가 부하절체에 의해 선로의 말단지점의 정정치로 변경되어야 하는데, 변경이 되지 못하는 경우 OCGR이 감지를 하지 못하는 상황이 발생할 수 있다.	○ 부하절체 선로에 대한 보호협조기기의 정정치를 신속하게 재계산하여 변경하면 큰 문제점은 발생하지 않을 것이다.	
	부하철제에의한 보호협조기의 협조문제	○ 부하절체에 의하여 분산전원의 연계위치가 변경되어 분산전원의 사고전류에 의하여 보호협조기기(리클로저)가 동작할 수 있다. 이 경우 순시사고 복구 시에 문제점이 발생할 수 있다.	○ 순시사고 복구 시에 리클로저가 동작하지 않도록 방향성을 감시할 수 있는 보호협조기기를 설치해야 한다. ○ 중앙에서 모든 보호기기를 감시하여 제어하는 데에는 한계성이 있으므로 조류방향을 스스로 감시하여 자동으로 전위와 후비를 판단하는 양방향 보호협조기기가 필요하다.	
기타	단선사고	○ 직격뢰 등에 의하여 고임피던스 사고가 발생하여 건전상의 전압이 상승할 수 있다.	○ 현재는 보호협조기기에 대하여 경보성 감시요소로만 인식하고 있지만, 동작성에 대하여 판단이 요구된다.	

참 고 문 헌

[1] 분산전원 배전계통 연계기술기준, 한국전력공사 2005. 4.

[2] 일본 분산형전원 계통연계 기술지침 (사)일본전기협회 2001.

[3] 일본 전력계통 연계 기술요건 가이드라인 1998.

[4] 일본 북해도전력 분산형전원 연계업무 절차서 및 기술해설서 2002.

[5] 일본 북해도전력 분산형전원 배전계통연계 기술검토시스템 2004.

[6] 분산전원 도입에 따른 복합배전계통 운영에 관한 연구, 산업자원부 2004. 8.

[7] IEEE 1547 "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems" 2003. 7.

[8] IEEE 1547 "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems" 2003. 7.

[9] IEEE 1547.1 "IEEE Standard conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems" 2005. 1.

[10] Hadi Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill, Printed in Singapore, 1999.