

분산전원이 연계된 배전계통의 보호협조기기의 문제점에 대한 해석 및 대책에 관한 연구

노대석 <한국기술교육대학교 부교수>

1 서 론

최근, 국가적인 차원에서 추진되고 있는 풍력발전, 태양광발전 등과 같은 분산전원은 기존의 전원에 비하여 소규모 전원인 관계로 주로 수용가에 가까운 배전계통에 도입되어지고 있으며, 그 특성상 배전계통과 연계하여 운전함으로써 보다 안정된 전력의 확보 및 전력설비의 효율적인 활용, 자원의 효율적인 이용

등의 이점을 얻을 수 있다. 한편, 태양광과 풍력 등의 자연에너지를 이용한 분산전원은 일정한 출력을 내는 기존의 전원보다 기후나 온도, 지형적인 영향을 많이 받는 간헐적인 전원이므로, 이들이 도입된 배전계통은 기존의 단 방향 공급형태의 배전계통과는 달리 부하와 전원이 혼재되어 운용되는 형태로 된다. 그림 1과 같이 분산전원이 연계된 배전계통의 경우에는 분산전원의 출력 용량의 여부에 따라 양방향의 전력조

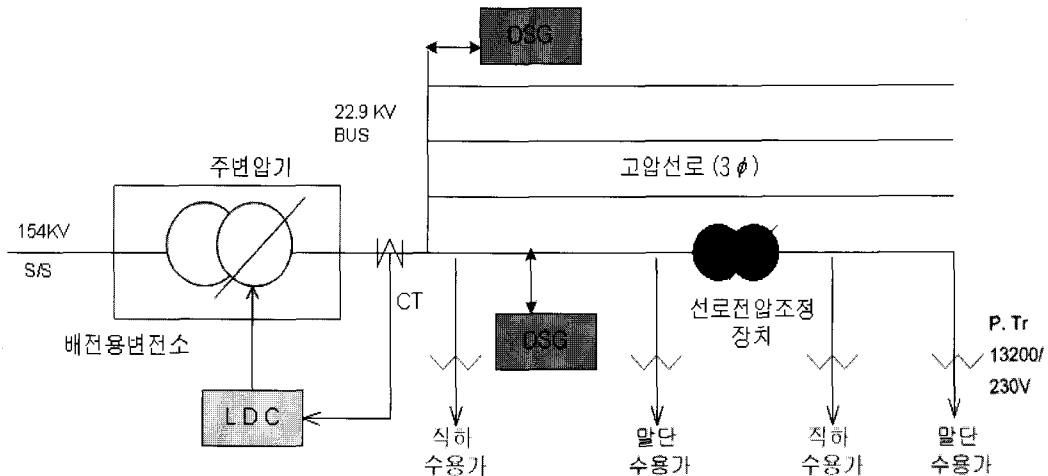


그림 1. 분산전원(DSG)이 도입된 배전계통

류가 발생할 가능성이 있어, 계통운용상 여러 가지의 문제점이 야기될 수 있다. 따라서 분산전원에 대규모 전원의 보완적 역할과 배전선로 상의 국부적 부하 감당 역할을 부과하여 그의 적극적 활용을 피하기 위해서는, 분산전원으로부터 배전계통에 전력을 공급하는 역 조류의 기능을 허용할 수 있는 양방향 보호협조 방식의 체제를 확립할 필요가 있다.

2. 분산전원 연계시의 보호협조에 대한 문제점 분석

배전계통에 있어서, 낙뢰 및 수목접촉 등의 원인으로 지락사고 및 단락사고가 발생하였을 경우, 사고과급 확대를 방지하기 위하여 사고전류를 공급하고 있는 전원을 신속하게 차단하도록 하고 있다. 이와 같은 목적으로 배전선로에는 보호 장치가 설치되어 사고를 정확히 검출하여, 사고구간 또는 사고선로를 계통으로부터 분리하게 된다. 그러나 분산전원이 기존의 어떤 보호협조 체제하의 배전선로에 도입될 경우는 분산전원의 계통에 대한 역 조류에 의해 사고 시 고장구간의 분리 및 선로재구성에 따른 차단기 및 개폐기 제어알고리즘, 그리고 순시정전 시 분산전원의 기동정지, 개폐기의 기능, 차단용량 등에 악영향을 끼칠 우려가 다분히 있다. 또한, 사고 시, 일시적으로 분리된 건전구간 내에 분산전원이 존재하여 그 구간 내의 부하와 평형을 이루며 운전되고 있는 경우(단독운전)가 있을 수 있는데, 이 경우에는 인체 및 전기설비에 위험을 초래하게 될 뿐만 아니라 사고의 신속한 복구에도 저해의 요인이 된다.

한편, 지락사고 시 선로가 계통과 차단된 상태에서 분산전원의 차단기가 늦게 동작하게 되면 선로의 커패시터와 부하가 분산전원과 작용하여 공진으로 인한 과전압이 발생할 수 있다. 또한, 차단기(리클로저 또는 CB)와 퓨즈의 보호협조체제 하에서 순시사고 시, 퓨즈의 불필요한 용단으로 인한 장시간정전상태가 발

생하거나, CB 또는 리클로저의 재폐로 방식에 대한 분산전원의 확실한 분리보장문제 등이 열거될 수 있다. 따라서 상기에서 지적된 문제점들에 대해서 배전계통의 보호체제와 분산전원의 보호 장치가 서로 협조하여 대처할 수 있도록 전반적인 검토가 이루어져야 한다. 한편, 연료전지 및 태양광 발전의 경우, 전원의 특성이 종래의 발전시스템과 달리 직류전원에 인버터를 개입시켜 계통에 연계되기 때문에 그 특성을 충분히 파악하여 새로운 보호협조 방식의 적용여부를 검토할 필요가 있다.

3. 분산전원 연계시의 보호협조에 대한 실제 계통 사례분석

3.1 사례 개요

그림 2와 같이, 강릉지사 동해지점의 북평 변전소의 1(MW) 용량의 태양광 발전이 설치된 고압배전선로의 보호기기(리클로저)가 동일변전소의 동일 배그 내의 타 배전선로의 고장 발생시에 오동작하는 경우가 발생하였다. 북평변전소 #3 M.Tr 배그에서 인출된 북평 D/L에 설치된 리클로저가 동일배그 인출선로인 삼화, 동삼, 어달 D/L에서 외물접촉, LA 파손, 변압기 소손 등의 이유로 발생한 10건의 고장에 대하여 오동작하여 재폐로하였다. 여기서는 사고가 발생하지 않은 태양광 연계선로인 북평 D/L에 설치된 리클로저의 오동작 원인을 규명하고, 양방향 보호협조에 대한 사례를 분석하였다.

3.2 MATLAB/SIMULINK에 의한 사례 분석

태양광 연계선로인 북평 D/L에 설치된 리클로저의 설정 값은 상전류가 400(A)이고 지락전류가 70(A)이다. 표 1과 같이, 동일배그 내 타 선로에서 발생한 고장에 반응하여 리클로저에는 약 130~480(A)의 N상 전류(영상전류)가 흘러서 OCGR이

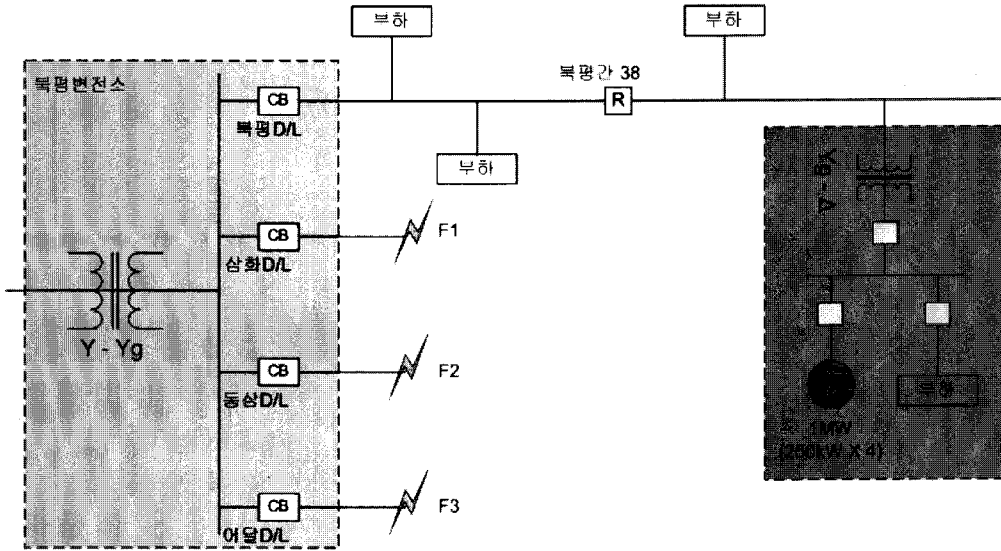


그림 2. 북평변전소의 배전계통 구성도

표 1. 북평 D/L의 고장상황 및 고장전류 분석

번호	고상일시	고장 상황	고장원인	고장전류	북평간 38호 고장전류
1	2006.07.20 10:12	동삼DL 동삼간 51(RA) 2회 재폐로	LA 파손	A: 2,795(A), N: 2,749(A)	A76, B105, C72, N237
2	2006.08.06 14:37	삼화D/L 삼화간 30(RA) 1회 재폐로	외물접촉	A: 1,077, N: 1,006	A120, B71, C62, N193
3	2006.08.06 15:04	동삼D/L 동삼간 51(RA) 1회 재폐로	외물접촉	B: 1,308, C: 2,093, N: 1,096	A218, B297, C184, N477
4	2006.11.05 13:07	삼화D/L 단봉지 2(RA) 1회 재폐로	변압기 소손	B: 3,580, N: 3,573	A115, B81, C102, N272
5	2007.03.09 11:51	어달D/L 어달간 208(RA) 1회 재폐로	외물접촉	B: 231, N: 134	A145, B114, C80, N181
6	2007.03.15 19:15	어달D/L 어달간 116(RA) 트립	LP애자 파손	C: 1,209, N: 1,225	A48, B81, C40, N137
7	2007.04.01 09:50	삼화D/L 단봉지 2(RA) 2회 재폐로	조류	B: 3,700, N: 3,695	A94, B51, C65, N180
8	2007.04.04 17:07	어달D/L 어달간 116(RA) 1회 재폐로	LA 파손	C: 1,207, N: 1,224	A145, B114, C80, N181
9	2007.04.25 17:07	삼화D/L 삼화간 41(RA) 1회 재폐로	원인불명	A: 220, N: 190	A91, B86, C62, N215
10	2007.05.10 13:15	동삼D/L CB 트립	차량충돌	CB 51(N) 순시 : 2,797	A188, B118, C166, N473

오동작을 하였다. 이에 대한 구체적인 원인을 분석하기 위하여, 여기서는 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 해석하였다.

3.2.1 배전계통 및 태양광발전 모델링

그림 3은 북평변전소 #3 M.Tr의 인출 배전선로와

태양광발전설비 연계에 대한 모의시험 대상선로를 Matlab/Simulink를 이용하여 모델링한 것이고, 그림 4는 인버터를 이용하여 연계되어진 태양광 발전설비를 모델링한 것이다.

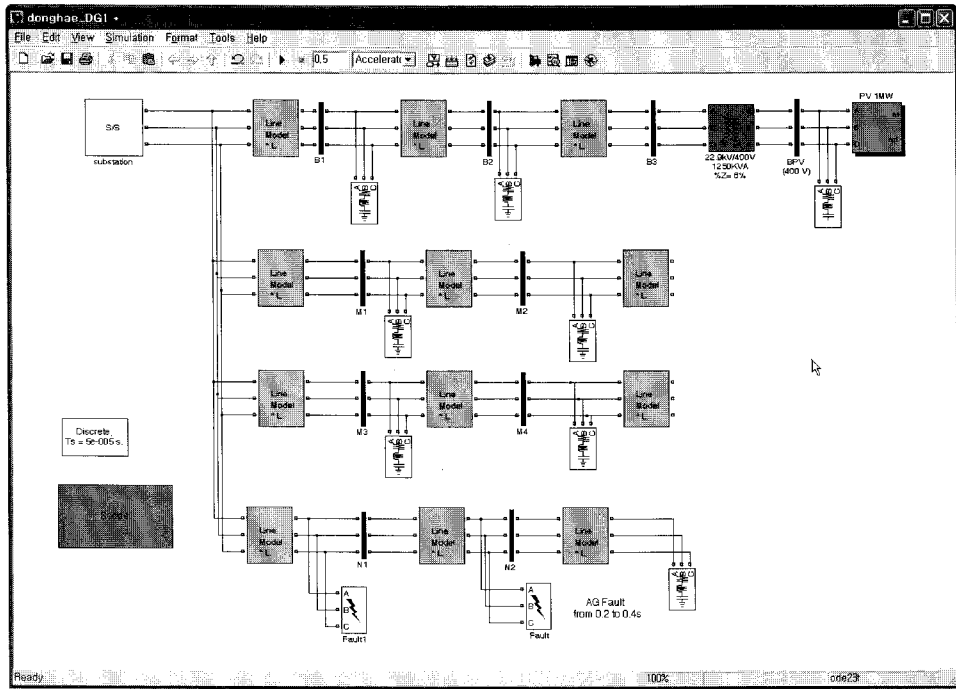


그림 3. Matlab/Simulink를 이용한 태양광설비가 연계된 배전계통 모델링

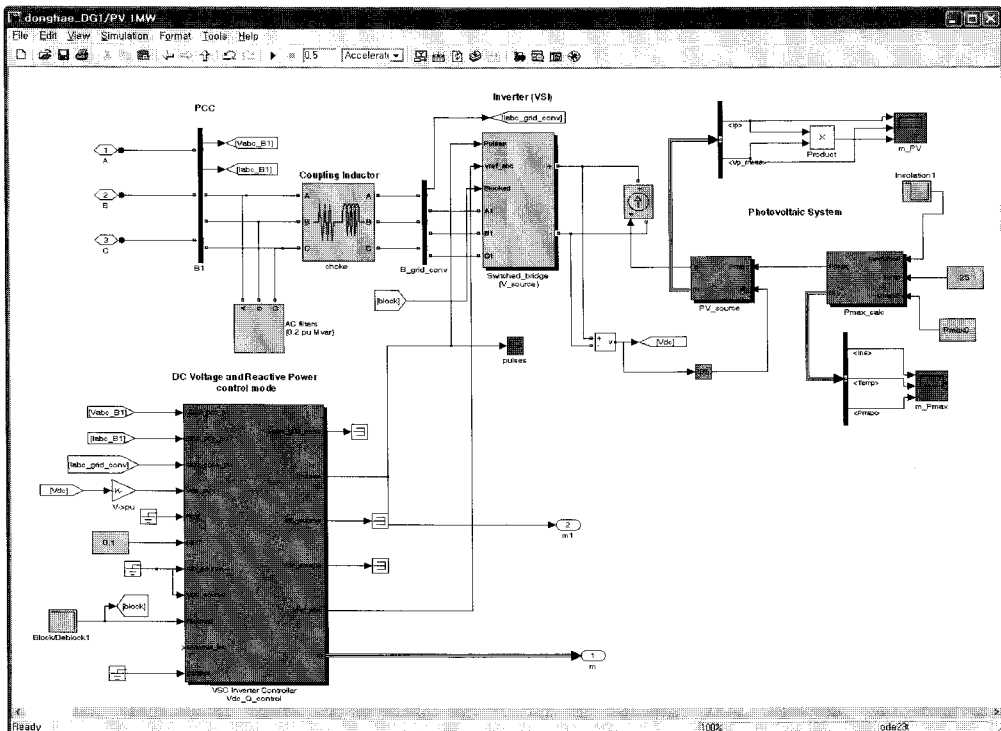


그림 4. Matlab/Simulink에서의 태양광발전원 모델링

3.2.2 보호기기 오동작 현상 해석

여기서는 오동작 현상을 해석하기 위하여, 상기의 모의선로에 대하여 태양광발전이 연계되어 있지 않은 3개의 선로 중 하단의 선로에 고장을 발생시켰다. A상 1선지락 고장을 0.2초에서 발생시켜 0.2초간 지속하도록 하였다. 모의한 고장에 대하여 복평D/L에서의 A, B, C상 및 N상 전류 값을 시뮬레이션하면 그림 4와 같다. 이 그림을 살펴보면, 복평 D/L의 A상 전류(AG Fault)가 다른 상에 비하여 현저하게 감소하고, 복평 D/L의 N상전류가 약 131[A]임을 확인할 수 있었다. 이 전류는 리클로저를 오동작시킬 만큼 충분히 큰 전류임을 알 수 있었다(N상 : 70[A]로 설정).

3.2.3 보호기기의 오동작 현상 평가

복평 D/L에 1[MW]의 태양광발전설비가 연계되어 있고, 태양광발전설비의 연계를 위하여 1,250 [kVA]의 연계변압기가 설치되어 있다. 이 연계변압

기는 Yg- Δ 결선으로 구성되어 있다. 복평 D/L에 연계되는 태양광 설비는 인버터를 통하여 연계가 되어 태양광발전에서 계통으로 공급되는 고장전류의 크기는 크지 않다(정격전류의 1.5배 정도). 그러나 연계변압기의 결선이 Yg- Δ 로 구성되어 영상전류의 통로를 제공하여, 타 선로의 지락고장전류가 중성선을 통하여 주변압기 뿐만 아니라, 연계변압기의 접지 측으로 흐르게 된다. 따라서 연계변압기의 결선방식에 의하여 복평 D/L에 상당한 크기의 중성선 전류를 흐르게 하여, 이로 인하여 리클로저(P:400[A], N:70[A])의 오동작을 야기 시켰다고 할 수 있다.

3.2.4 보호기기의 오동작에 대한 대책

분산전원이 연계될 경우 연계변압기의 결선방식에 따라 고장전류의 파급으로 다양한 형태의 보호기기의 오동작 발생가능성이 존재한다. 본 사례의 고장전류 발생원인은 연계변압기의 결선이 Yg- Δ 로 구성되어 동일뱅크 타 선로에서 지락고장이 발생하였을 경우 타 선로의 지락전류가 주변압기의 NGR을 통하여 뿐

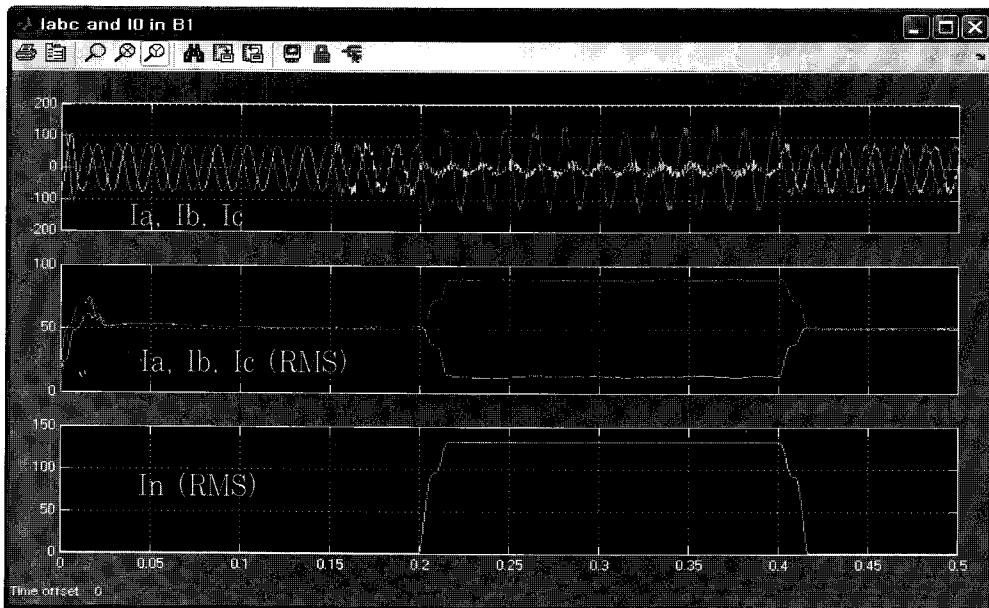


그림 4. 복평D/L에서의 A, B, C상 및 N상 전류

만 아니라 연계변압기 Yg결선을 통하여 회귀되어 고장이 발생하지 않은 선로의 중성선 전류로 보호기기를 동작시킬 만큼의 전류가 흐르게 되기 때문이다. 따라서 리클로저의 오동작을 방지하기 위한 단기적인 해결책으로는 리클로저의 N상 최소 동작전류를 최대한 높이거나 지락고장 검출을 억제함으로써 타 선로 고장에 대한 고장파급으로 인한 오동작을 방지할 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 장기적인 대책으로는 현재 개발 중에 있는 양방향 리클로저를 설치하여, 전류의 방향성을 고려한 고장위치 판정으로 보호기기의 오동작을 방지할 수 있을 것이다.

4. 양방향보호협조 알고리즘

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 유통이 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 발생

한 경우의 보호협조 기본 방안과 분산전원이 연계된 선로의 동일 बैं크의 타 선로에서의 사고가 발생한 경우의 보호협조 방안, 배전자동화에 의한 부하절체 운전 등에 따른 보호협조 방안 등에 대한 알고리즘을 제시하였다.

4.1 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

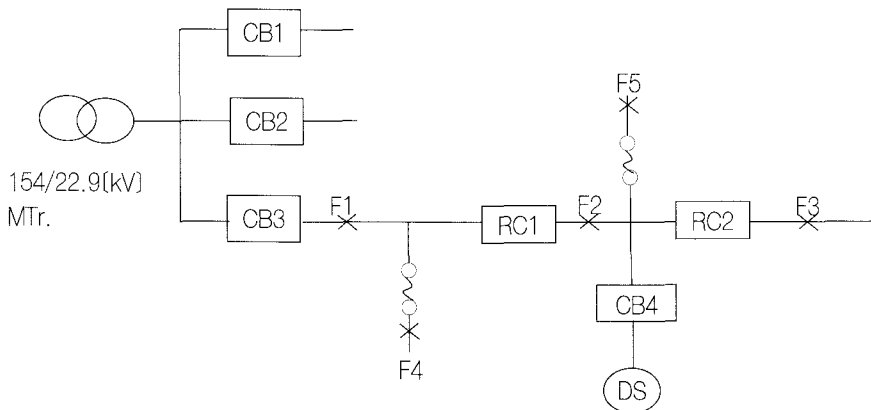


그림 5. 분산전원 연계 선로의 사고 시 보호협조 개념도

F1 고장을 검출할 수도 있고 검출 못 할 수도 있다. 따라서 리클로저 RC1은 방향성 과전류 보호기능을 구비하고 있어야 한다. 만일 리클로저 RC1이 동작하면, 리클로저 RC1과 선로 종단(End) 사이에는 단독운전(Islanding) 상태가 되므로 CB4를 동작시켜 DS를 분리시켜야 한다.

- ② 그림 1의 F2지점에서 고장이 발생하면, 리클로저 RC1과 DS를 연계하는 CB4가 동작하여야 한다. 리클로저 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, 리클로저 RC2가 동작하여 고장을 제거하여야 한다.

F3 고장에 대하여 리클로저 RC1, 리클로저 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 고장 전류 기여도가 크면 리클로저 RC1이 동작하여야 한다. DS가 단독운전 (Islanding)하는 것을 방지하기 위하여, CB4가 동작하여 DS를 분리시켜야 한다. 만일 DS의 설비용량이 크고 고장전류가 크다면 CB3, 리클로저 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 퓨즈

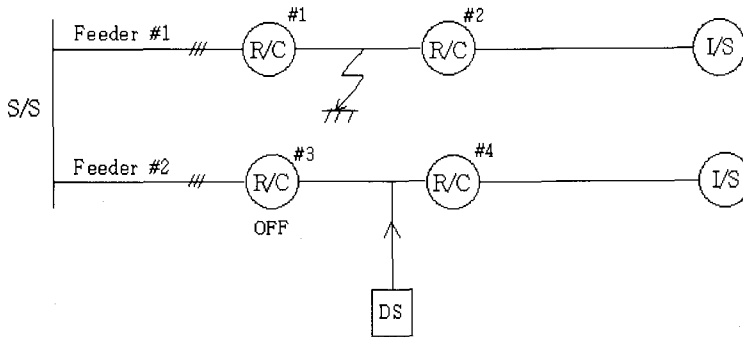


그림 6. 타 선로 사고 시 보호협조 개념도

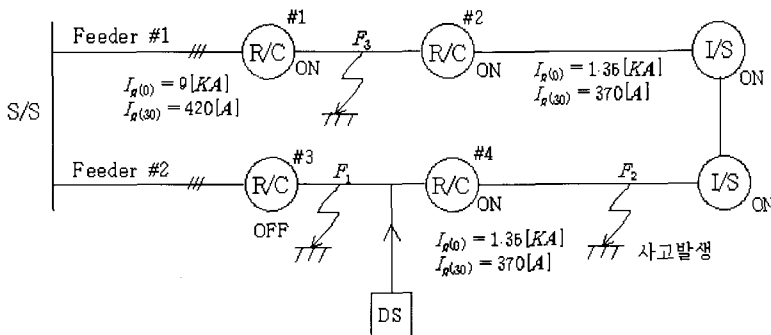


그림 7. 부하절체 운전 시 보호협조 개념도

가 동작하기 전에 DS의 CB4가 동작하여 DS를 분리시켜야 한다. 이 때 리클로저 RC2와 CB4가 보호협조를 해야 한다.

4.2 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.

4.3 부하절체 운전 시 보호협조 방안

4.3.1 F_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.

4.3.2 F_2 사고지점(F_3 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 방향성을 감시해야 한다. 이 경우에는 양방향성의 보호협조기기가 요구된다.

5. 결 론

본 논문에서는 분산전원이 연계된 배전선로의 보호협조에 대한 문제점을 분석하고 그 대책을 제시하였다. 주요 연구내용은 다음과 같다.

- 분산전원이 연계된 배전선로에서는 동일 बैं크의 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- Δ 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 498[A]정도, 말단지점에 사고가 발생하면 약 131[A]가 흐른다. 따라서 사고지점에 상관없이 중성선에는 상당한 크기의 지락전류가 흐르게 되어, 분산전원이 연계된 건전한 배전선로의 OCGR(보통 70[A]로 설정)이 오동작을 일으키게 될 가능성이 크다. 따라서, 상기의 문제점을 해결하기 위하여 연계용변압기의 결선방식을 Y비접지- Δ 결선으로 변경을 해보았다. 여기서는 동일한 효과를 가지는 Y고저항접지- Δ 결선방식을 사용하여 시뮬레이션을 수행했다. 이 경우, 타 선로의 지락사고에 대하여 분산전원 연계선로의 중성선(N선)에는 약 13[A]정도만 흘러, 중성선의 지락사고전류를 획기적으로 줄일 수 있음을 확인했다.
- 연계용변압기의 결선방식(Y직접접지- Δ 결선,

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

참고문헌

- [1] 일본 전력중앙협의회, 분산전원대응자료집, 2007.5.
- [2] 풍력발전 계통연계 기술지침 및 연계선로 운영기준 제정에 관한 연구, 산업자원부 2004. 9.
- [3] 발전기 병렬운전 연계선로 보호업무 기준서, 한국전력공사 2005.
- [4] 배전망 이용규정, 산업자원부 2005.
- [5] 배전용 전기설비 이용규정, 산업자원부 2004. 2.
- [6] 분산전원 배전계통 연계기술기준, 한국전력공사 2005. 4.
- [7] 분산전원 배전계통 연계기술기준, 한국전력공사 2005. 4.
- [8] 일본 분산형전원 계통연계 기술지침 (사)일본전기협회 2001.
- [9] 일본 전력계통 연계 기술요건 가이드라인 1998.
- [10] 일본 북해도전력 분산형전원 연계업무 절차서 및 기술해설서 2002.
- [11] 일본 북해도전력 분산형전원 배전계통연계 기술검토시스템 2004.
- [12] 분산전원 도입에 따른 복합배전계통 운영에 관한 연구, 산업자원부 2004. 8.
- [13] IEEE 1547 "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems" 2003. 7.
- [14] IEEE 1547 "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems" 2003. 7.
- [15] IEEE 1547.1 "IEEE Standard conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems" 2005. 1.
- [16] Hadi Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill, Printed in Singapore, 1999.

◇ 저자 소개 ◇



노대석(盧大錫)

1962년 2월 21일생. 1985년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 3월 일본 북해도대학교 전기공학과 졸업(박사). 1987~1998년 한국전기연구소 선임연구원 근무. 1999년~현재 한국기술교육대학교 정보기술공학부 전기전공 부교수. 배전계통운용, [MW]급 전지전력저장시스템 설계 및 운용, 분산전원 계통연계 해석 및 운용, 복합에너지시스템, 자율분산배전계통, 전력품질 해석, Custom Power Devices 등의 연구 분야에 종사.

Tel : 041-560-1167

Fax : 041-564-3261

E-mail : dsrho@kut.ac.kr