

스마트 그리드 수용가 설비 양방향 보호협조 문제점 분석

왕용필 <한국전기산업연구원 기술연구팀장> · 노대석 <한국기술교육대학 교수>

1 서 론

중래의 배전계통에 있어서의 전력조류는 변전소에서 선로말단을 향한 단방향이었지만, 신재생에너지전원이 연계된 배전계통의 경우에는 그 출력용량의 여부에 따라 양방향의 전력조류가 발생할 가능성이 있어, 계통운용상 여러 가지의 문제점이 야기될 수 있다. 신재생에너지전원에 대규모전원의 보완적 역할과 배전선로상의 국부적 부하 감당 역할을 부과하여 그의 적극적 활용을 피하기 위해서는, 신재생에너지전원으로부터 배전계통에 전력을 공급하는 역조류의 기능을 허용할 수 있는 양방향 보호협조 제어장치의 필요성이 대두되고 있다.

따라서 실제로 신재생에너지전원이 배전계통에 연계되어 운전되는 경우 발생 가능한 보호협조의 문제점을 분석한다. 그림 1과 같이 신재생에너지전원의 영향에 의한 보호협조에 대한 문제점은 크게 3가지로 요약할 수 있다. 즉 F1 사고시(자기선로 고장)의 신재생에너지전원의 사고전류공급에 의한 보호기기의 정격차단용량(12.5(kA))의 상회 가능성, F1 사고시에 발생할 수 있는 분류효과(신재생에너지전원의 연계로 임피던스 병렬화로 사고전류의 감소)로 인한 보호기기의 부동작 및 F2 사고 시(타선로 사고)나

F1사고 시의 역방향 고장전류에 의한 보호기기의 오동작을 들 수 있다.

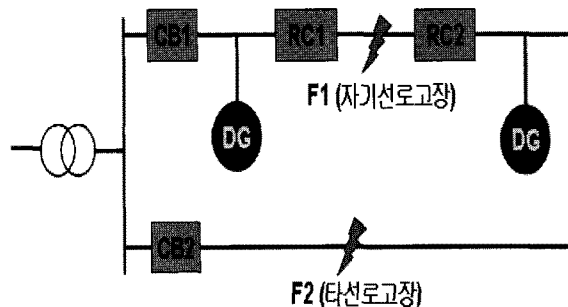


그림 1. 신재생에너지전원의 영향에 의한 보호협조 개요도

2. 단락용량 초과 문제점

신재생에너지전원의 설치위치와 사고발생 위치에 따라 신재생에너지전원의 고장전류 공급으로 계통의 전체 사고전류가 증가하는 경우가 발생한다. 대용량의 신재생에너지전원이 어느 한 주변압기(M.Tr)에 집중적으로 연계되는 최악의 경우에는 사고전류가 증가하여 보호기기의 차단용량을 상회할 가능성이 있다.

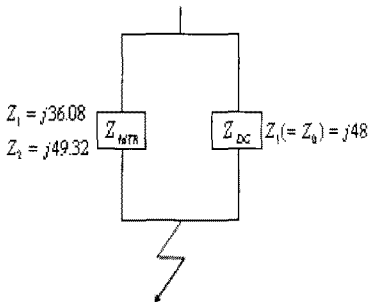
따라서 이에 대한 문제점을 신재생에너지전원의 용량을 파라메타로 분석하였다. 다만 여기서는 회전기

가 아닌 전력변환장치가 개입되는 경우, 최악의 경우에도 사고전류의 공급치가 정격용량의 1.5배 이상을 넘지 않으므로 보호기기의 차단용량을 상회할 가능성이 없으므로 회전기(동기기, 유도기)에 대하여 분석하였다.

2.1 일반적인 경우

일반적으로 사고해석에서는 배전용변전소의 주변압기(45/60(MVA), 154/22.9(kV))의 결선방식이 중요하데, 3권선변압기의 1차측 접지와 비접지, 2차측 접지와 NGR 유무 등이 큰 영향을 미친다. 여기서는 보통 일반적인 경우인 1차측을 비접지하고, 주변압기 2차 측에는 배전계통의 지락고장전류를 제한할 목적으로 보통 0.6(Ω)의 NGR(접지저항)을 사용한 경우에 대한 사고해석을 수행하였다.

먼저 최악의 경우를 상정하여 30(MVA)의 회전기형 신재생에너지전원이 하나의 주변압기에 연계되고, 직하지점에서 사고가 발생한 경우에 대한 사고전류 해석은 다음과 같다. 단 연계용변압기(신재생에너지전원 용량의 1.25배 정격용량)는 6(%)이고, 신재생에너지전원 자체의 임피던스(과도리액턴스 또는 구속리액턴스)는 12(%)를 기준으로 하였다. 배전계통 데이터와 신재생에너지전원 데이터를 고려하여, 임피던스도를 구하면 다음과 같다.



상기의 임피던스도로부터 정상분과 영상분의 임피

던스를 구하고, 3상 단락전류와 1선 지락전류를 계산하면 다음과 같다.

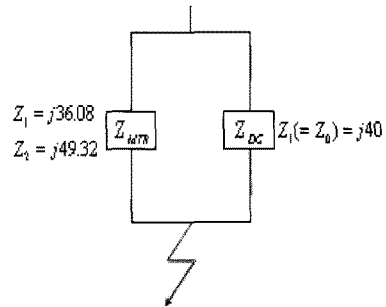
$$Z_1 = \frac{36.08 \times 48}{36.08 + 48} = 20.6 (\%)$$

$$Z_0 = \frac{49.3 \times 48}{49.3 + 48} = 24.33 (\%)$$

$$I_{3s} = \frac{100}{20.6} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 22.9} = 12.24 (\text{kA})$$

$$I_g = \frac{300}{24.33 + (20.6 \times 2)} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 22.9} = 11.54 (\text{kA})$$

한편 연계용변압기(신재생에너지전원 용량의 1.25배 정격용량)의 임피던스를 5(%)로 하고, 신재생에너지전원 자체의 임피던스(과도리액턴스 또는 구속리액턴스)는 10(%)로 가정하여 임피던스도를 구하면 다음과 같다.



상기의 임피던스도로부터 정상분과 영상분의 임피던스를 구하고, 3상 단락전류와 1선 지락전류를 계산하면 다음과 같다.

$$Z_1 = \frac{36.08 \times 40}{36.08 + 40} = 18.97 (\%)$$

$$Z_0 = \frac{49.3 \times 40}{49.3 + 40} = 22.09 (\%)$$

$$I_{3S} = \frac{100}{18.97} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 22.9} = 13.29 \text{ (kA)}$$

$$I_g = \frac{300}{18.97 + (18.97 \times 2)} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 22.9} = 12.6 \text{ (kA)}$$

따라서 일반적인 조건에서 30(MVA) 이하의 분산 전원용량의 연계 시에는 보호기기의 차단용량(12.5(kA))을 상회하지 않으므로 문제점이 일어나지 않지만, 최악의 시나리오(신재생에너지전원용량 30(MVA) 이상과 직하사고)에 대해서는 연계용변압기와 신재생에너지전원의 임피던스의 합계가 정격용량의 15(%)를 초과하면 3상 단락전류와 1선 지락전류가 정격 차단용량을 초과하여 문제점이 발생할 수 있음을 알 수 있다.

2.2 특수한 경우

배전용변전소의 주변압기가 비접지이고 NGR이 없는 특수한 경우에는 배전계통의 지락오장 전류가 상승하여 문제점을 유발시킬 수 있다. 이때에는 신재생에너지전원이 연계되지 않아도 보호기기의 차단용량의 상회 가능성이 존재한다. 예를 들어 주 변압기의 정상분 임피던스와 Y접지-Y접지-델타의 경우 NGR이 없는 경우의 영상분 임피던스는 다음과 같다.

$$Z1 = 0.00131 + j0.368 \text{ (pu)} \approx j0.368 \text{ (pu)}$$

$$Z0 = j0.1241 - j0.0302 = j0.0939 \text{ (pu)} \text{ (NGR 없는 경우)}$$

Y접지-Y접지-델타에 대한 주변압기 2차 측 직하 지점에 지락사고가 발생하면 1선 지락사고전류를 구하면 다음과 같다. 여기서는 발전기내부전압을 1.1(pu)를 적용하였다.

$$I_{SLG} = 3 \times \frac{1.1}{2 \times 0.368 + 0.0939} \times \frac{100,000}{1.732 \times 22.9} = 3.976 \text{ (pu)}$$

$$= 10,025.2 \text{ (A)}$$

또한 발전기 내부전압을 1.0(p.u)을 적용하면 다음과 같다.

$$I_{SLG} = 3 \times \frac{1.0}{2 \times 0.368 + 0.0939} \times \frac{100,000}{1.732 \times 22.9} = 3.615 \text{ (pu)}$$

$$= 9113.4 \text{ (A)}$$

한편 배전계통의 X/R에 대한 비대칭계수 K = 1.247을 고려하면 차단전류는 다음과 같다.

$$\text{차단전류} = 1.247 \times 10,025.2 = 12.5 \text{ (kA)}$$

따라서 주 변압기의 NGR 유무나 비접지방식을 고려한 특수한 조건에서는 신재생에너지전원의 연계 시에 보호기기의 차단용량(12.5(kA))을 상회할 가능성이 상존하므로 특히 유의해야 함을 알 수 있다.

3. 보호기기 부동작 문제점

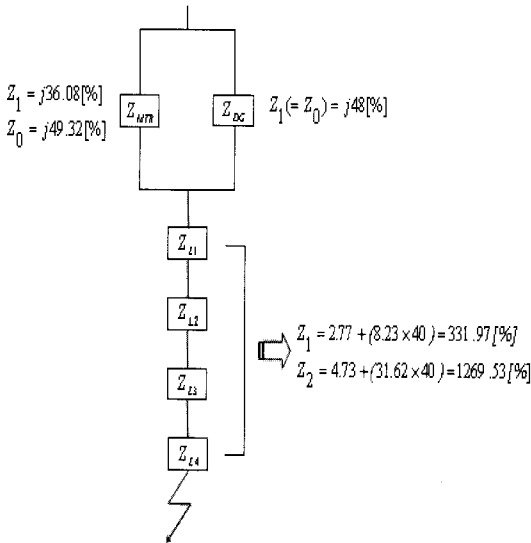
일반적으로 신재생에너지전원이 설치되면, 연계지점 위치와 사고발생 위치에 따라 %임피던스의 병렬화로 사고전류가 감소하는 분류효과가 발생할 수 있다. 이 때, 보호기기의 최소 정정치 이하로 사고전류가 감소하여 보호기기가 부동작하는 문제점이 발생한다. 여기서는 보호기기의 부동작의 원인이 되는 분류효과에 지대한 영향을 끼치는 선로 공장과 신재생에너지전원 용량을 파라메타로 분류효과 크기를 구하였다.

3.1 10(MVA) 신재생에너지전원이 연계된 경우(공장 40(km))

40(km)의 공장을 가진 배전선로에서 10(MVA) 용량(1,250(kVA)×10기, 변압기용량 기준)의 신재생에너지전원이 직하에 연계되고, 사고는 말단지점에

기술해설

서 발생한 것으로 가정하여, 선로말단 지점을 기준으로 정상분과 영상분 임피던스를 구하고, 3상 단락전류와 1선 지락전류(지락저항 30(Ω) 가정)를 구하면 다음과 같다.



$$Z_1 = 36.08 // 48 + 331.97 = 352.57(\%)$$

$$Z_2 = 49.32 // 48 + 1269.53 = 1293.86(\%)$$

$$I_{3S} = \frac{100}{352.57} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 22.9} = 715.09(\text{A})$$

$$I_{2S} = 0.866 \times 715.09 = 619.27(\text{A})$$

$$I_g = \frac{300}{1293.86 + (352.57 \times 2)} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 22.9} = 378.37(\text{A})$$

$$I_{g(30)} = \frac{300}{1293.86 + (352.57 \times 2) + (3 \times 573)} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 22.9}$$

$$= 203.43(\text{A}) (R_f = 30 \times 19.1 = 573)$$

따라서 변전소의 CB(또는 보호기기)로 흐르는 3상 단락전류는 전류분배법칙에 의하여 다음과 같다.

$$I_{CB} = I_{3S} \times \frac{48}{36.08 + 48} = 408.23(\text{A})$$

신재생에너지전원 연계 전에 보호기기로 흐르는 사고전류와 신재생에너지전원이 연계된 후에 흐르는 전류를 비교하여 분류효과를 계산하면 다음과 같다.

$$Ds(\text{단락 분류효과}) = (685.01 - 408.23) / 685.01$$

$$= 40.41(\%)$$

한편 변전소의 CB로 흐르는 1선 지락전류와 분류효과를 구하면 다음과 같다.

$$I_{g(CB)} = I_{g(30)} \times \frac{48}{49.32 + 48} = 100.34(\text{A})$$

$$Dg(\text{지락 분류효과}) = (200.41 - 100.34) / 200.41$$

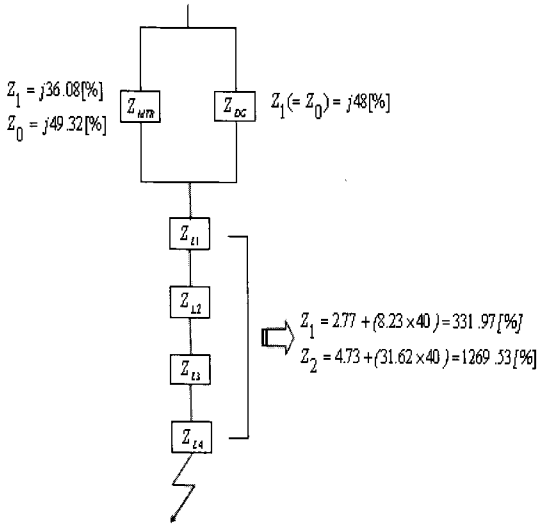
$$= 49.93(\%)$$

따라서 각각 40.4(%) , 49.9(%)의 사고전류가 감소하는 상당한 크기의 분류효과가 발생함을 알 수 있다. 또한 보호기기를 부동작(OCR : 300(A), 지락 : 70(A))할만한 크기의 전류는 아니지만, 단락전류가 400(A), 지락전류가 100(A)정도까지 감소하여 분류효과에 의한 부동작 발생 가능성이 존재함을 알 수 있다.

3.2 특수한 경우(고 지락저항)

여기서는 분류효과를 더욱 심화시키는 지락저항의 크기를 파라미터로 최악의 경우인 지락저항 100(Ω)을 고려하여, 하기와 같이 분류효과를 산정하였다.

정상분과 영상분 임피던스를 구하고, 3상 단락전류와 1선 지락전류(지락저항 100(Ω) 가정)를 구하면 다음과 같다.



$$Z_1 = 36.08 // 48 + 331.97 = 352.57 (\%)$$

$$Z_2 = 49.32 // 48 + 1269.53 = 1293.86 (\%)$$

$$I_{3S} = \frac{100}{352.57} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 22.9} = 715.09 (A)$$

$$I_{2S} = 0.866 \times 715.09 = 619.27 (A)$$

$$I_g = \frac{300}{1293.86 + (352.57 \times 2)} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 22.9} = 378.37 (A)$$

$$I_{g(30)} = \frac{300}{1293.86 + (352.57 \times 2) + (3 \times 573)} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 22.9} = 203.43 (A) (R_f = 30 \times 19.1 = 573)$$

$$I_{g(100)} = \frac{300}{1293.86 + (352.57 \times 2) + (3 \times 1910)} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 22.9} = 97.0 (A) (R_f = 100 \times 19.1 = 1,910)$$

따라서 변전소의 CB(또는 보호기기)로 흐르는 3상 단락전류는 전류분배법칙에 의하여 다음과 같이 구해진다.

$$I_{CB} = I_{3S} \times \frac{48}{36.08 + 48} = 408.23 (A)$$

신재생에너지전원 연계 전에 보호기기로 흐르는 사고전류와 신재생에너지전원이 연계된 후에 흐르는 전류를 비교하여 분류효과를 계산하면 다음과 같다.

$$Ds(\text{단락 분류효과}) = (685.01 - 408.23) / 685.01 = 40.41 (\%)$$

한편 변전소의 CB로 흐르는 1선 지락전류와 분류효과를 구하면 다음과 같다.

$$I_{g(CB)} = I_{g(100)} \times \frac{48}{49.32 + 48} = 48.3 (A)$$

$$Dg(\text{지락 분류효과}) = (200.41 - 48.3) / 200.41 = 75.9 (\%)$$

따라서 각각 40.4(%), 75.9(%의 사고전류가 감소하는 상당한 크기의 분류효과가 발생함을 알 수 있다. 또한 지락사고 시에는 보호기기를 부동작(OCR : 300(A), 지락 : 70(A))할만한 크기의 전류인 약 48(A)까지 감소하여, 분류효과에 의한 부동작 발생 가능성이 존재함을 알 수 있다.

4. 보호기기 오동작 문제점

그림 2의 같이 한국전력공사의 강릉지사 동해지점의 북평 변전소의 1MW 용량의 태양광 발전이 설치된 고압배전선로의 보호기기(리클로저)가 동일변전소의 동일 배전선로의 고장 발생 시에 오동작하는 경우가 다수 발생하였다.

북평변전소 #3 M.Tr 배크에서 인출된 북평 D/L에 설치된 리클로저가 동일배전 인출 선로인 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 오

동작 원인을 규명하고, 그 문제점에 대한 대책을 마련하여야 한다.

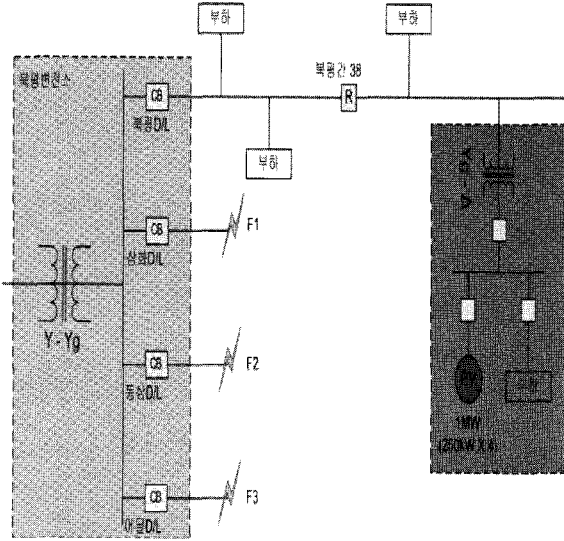
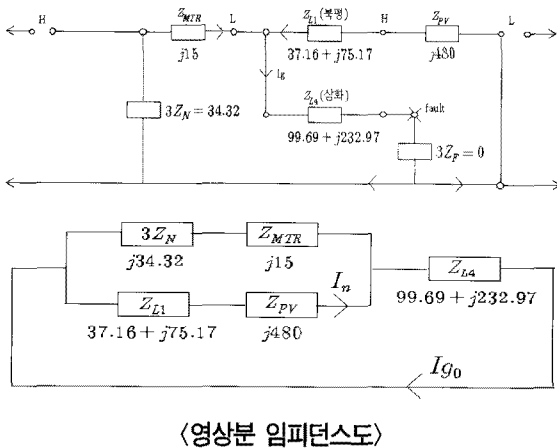


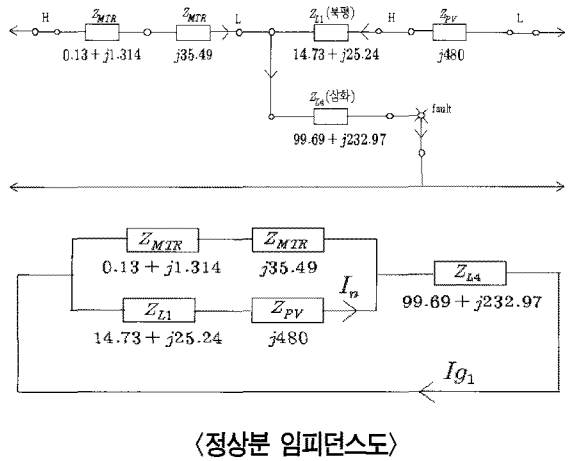
그림 2. 북평변전소 #3 M.Tr의 구성도

4.1 말단지점 사고시

그림 2와 같이 북평변전소 #3 M.tr의 북평 D/L에 1(MVA) 용량의 태양광발전이 연계된 경우에 대하여, 동일 बैं크의 타 선로인 삼화 D/L의 말단지점에서 1선 지락사고가 발생한 경우의 영상분 임피던스도와 정상분 임피던스도를 구하면 다음과 같다.



<영상분 임피던스도>



<정상분 임피던스도>

상기의 임피던스도로부터 영상분과 정상분의 임피던스를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z_0 &= 49.32 // (37 + j555) + (99.69 + j232.97) \\ &= 99.94 + j278.28 \\ &= 295.68 \angle 1.23 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_1 = Z_2 &= (0.13 + j36.804) // (14.73 + j505.24) + (33.97 + j61.85) \\ &= 34.15 + j96.16 \\ &= 102.04 \angle 1.23 \end{aligned}$$

따라서 사고가 발생한 선로인 삼화 D/L의 1선 지락전류(I_g)는 다음과 같다.

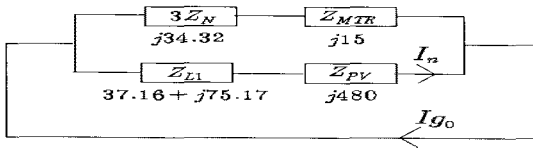
$$\begin{aligned} I_g &= \frac{3 \times 100}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_F} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 22.9} \\ &= \frac{3 \times 100}{2(102.04 \angle 1.23) + 295.68 \angle 1.23} \\ &= 1,513.43 \angle -1.23 \end{aligned}$$

또한 태양광발전이 연계된 선로인 북평 D/L의 1선 지락전류(I_n)는 전류분배법칙으로부터 다음과 같이 구해진다.

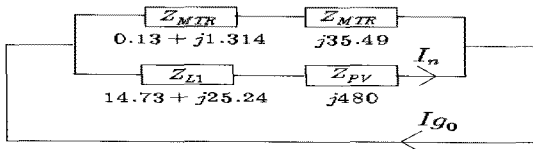
$$\begin{aligned} I_n &= \frac{j49.32}{(37.16 + j75.17) + j480 + j49.32} \times 1513.43 \angle -1.23 \\ &= 123.25 \angle -1.17 \end{aligned}$$

4.2 직하지점 사고시

그림 2와 같이 북평변전소 #3 M.tr의 북평 D/L에 1(MVA) 용량의 태양광발전이 연계된 경우에 대하여, 동일 बैं크의 타 선로인 삼화 D/L의 직하지점에서 1선 지락사고가 발생한 경우의 영상분 임피던스도와 정상분 임피던스도를 구하면 다음과 같다.



〈영상분 임피던스도〉



〈정상분 임피던스도〉

상기의 임피던스도로부터 영상분과 정상분의 임피던스를 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Z_0 &= j49.32 // (37.16 + j555.17) \\ &= 0.25 + j45.31 \\ &= 45.31 \angle 1.57 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_1 = Z_2 &= (0.13 + j36.804) // (14.73 + j505.24) \\ &= 0.18 + j34.31 \\ &= 34.31 \angle 1.57 \end{aligned}$$

따라서 사고가 발생한 선로인 삼화 D/L의 1선 지락전류(I_g)는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_g &= \frac{3 \times 100}{2(45.31 \angle 1.57) + 34.31 \angle 1.57} \times \frac{100,000}{\sqrt{3} \times 22.9} \\ &= 6054.22 \angle -3.08 \end{aligned}$$

또한 태양광발전이 연계된 선로인 북평 D/L의 1

선 지락전류(I_n)는 전류분배법칙으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} I_n &= \frac{j49.32}{(37.16 + j555.17) + j49.32} \times 6054.22 \angle -3.08 \\ &= 493 \angle -3.08 \end{aligned}$$

신재생에너지전원이 연계된 북평 D/L의 중성선의 전류는 삼화 D/L의 1선 지락사고의 위치에 따라 약 124 - 493(A) 정도가 계산된다. 따라서 리클로저의 N상 OCGR이 70(A)로 설정되어 있어서 오동작할 가능성이 있음을 확인 할 수 있었다.

이것은 태양광전원에서 공급하는 사고전류(최대 정격전류의 1.5배 정도로 약 30(A) 정도임)의 영향이 아니라 분산전원의 연계용변압기의 결선방식에 의한 것임을 확인했다. 신재생에너지전원의 연계변압기의 Yground-Delta 결선이 영상전류의 통로를 제공하여 N상의 지락전류가 증가하여 건전상의 보호기기(OCGR)를 오동작 시킬 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결론

신재생에너지전원의 사고전류공급에 의한 보호기기의 정격차단용량(12.5(kA))의 상회 가능성, 분류효과(신재생에너지전원의 연계로 임피던스병렬화로 사고전류의 감소)로 인한 보호기기의 부동작 및 타선로 사고 시의 역방향 고장전류에 의한 보호기기의 오동작에 대한 보호협조 제어장치의 필요성을 제시하였다.

5.1 단락용량 초과 문제점

이에 대한 대책으로 신재생에너지의 도입용량을 제한하는 방법이 있지만 이에 대하여 수용가가 반발하는 경우도 생길 수 있으므로, 현실적으로 가장 좋은 방안은 차단용량을 상회할 가능성이 있는 신재생에너지

지전원 설치 수용가에 사고전류를 제한하는 한류리액터 설치가 필요하다.

5.2 보호기기 부동작 문제점

이에 대한 대책으로 신재생에너지전원의 도입용량을 제한하여 임피던스의 크기를 줄일 수 있는 방법이 있지만, 이에 대하여 수용가가 반발하는 경우도 생길 수 있다. 따라서 현실적으로 가장 좋은 대책은 분류효과가 발생할 가능성이 있는 신재생에너지전원 설치 수용가에 인위적으로 임피던스를 증가시키는 한류리액터 설치가 필요하다.

5.3 보호기기 오동작 문제점

이에 대한 가장 효과적인 대책으로는 현재의 연계 용변압기의 결선방식(Yg-Delta방식)을 변경하여 지락(영상)전류의 통로를 제거(Y비접지-Delta, 또는 Delta-Yg, 등)하는 것이지만, 다른 결선 방식은 지락전류의 통로는 제거하지만, 문제점은 지락사고시에 건전상의 전압이 상승하는 피해가 발생할 수 있어서 함부로 결선방식을 변경하기도 어려운 실정이다.

따라서 결선방식은 변경하지 않고 지락전류의 크기를 감소시킬 수 있는 연계용변압기의 1차 측 접지선에 적절한 NGR(접지저항)을 삽입하여 타선로 지락사고시의 보호기기의 오동작에 대한 문제점을 해결할 수 있다. 다만 너무 큰 접지저항을 삽입하면 건전상의 전압이 상승하는 피해가 발생할 수 있으므로 유효접지 내에서 NGR 설치가 필요하다.

참 고 문 헌

- (1) 일본 북해도전력 분산형전원 연계업무 절차서 및 기술해설서 2002.
- (2) 일본 북해도전력 분산형전원 배전계통연계 기술검토시스템 2004.
- (3) 분산전원 도입에 따른 복합배전계통 운영에 관한 연구, 산업자원부 2004. 8.
- (4) 분산전원 배전계통 연계기술기준, 한국전력공사 2005. 4.

- (5) IEEE 1547 "IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems" 2003. 7.
- (6) IEEE 1547.1 "IEEE Standard conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems" 2005. 1.

◇ 저 자 소 개 ◇



왕용필(王龍泌)

1966년 8월 25일생. 1992년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동대학원 전기공학과 졸업(박사). 1999~2001년 뉴질랜드 캔터베리대학 전기공학과 Post-Doc.. 2002~2008년 동아대학교 전기공학과 초빙교수, 현재 한국전기산업연구원 선임연구원.

관심분야 : 스마트그리드 전기설비, 전력계통 전력품질, 전자기 과도현상



노대석(盧大錫)

1962년 2월 21일생. 1985년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1987년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 일본 북해도대학교 전기공학과 졸업(박사). 1987~1998년 한국전기연구소 선임연구원 근무. 현재 한국기술교육대학교 정보기술공학부 전기전공 교수.

관심분야 : 배전계통운영, [MW]급 전지전력저장시스템 설계 및 운용, 신재생에너지전원 계통연계 해석 및 운용, 복합에너지시스템, 자율분산 배전계통, 전력품질 해석, Custom Power Devices