

분산전원이 연결된 22.9[kV] 배전계통의 양방향 보호기기 실증시험 연구

(The Study on the Actual Examination of the Bidirectional Protection Device
in the 22.9[kV] Distribution Power System Interconnected with the DG)

이흥재* · 최명호**

(Heung-Jae Lee · Myeong-Ho Choi)

Abstract

The existing power flow has a single direction to the line end but the bidirectional power flow will possibly occur depending on the output capacity in the 22.9[kV] distribution power system connected with the dispersed generation(DG). So these characteristics would influence the power system management. The DG have many advantages such as assistance source, Load share etc. So the utility must apply the bidirectional protection system so as to maximize an advantage of DG. This paper describes the field test case of bidirectional protective device in order to investigate the device performance when applied to bidirectional power system. We have tested in the power system test site of KEPCO and these tests provide the basis for performance verification test of bidirectional protective device in the power system.

Key Words : Bidirectional Device, Distribution Power System With DG, Real Examination

1. 서 론

분산전원이 기존의 보호협조 방식의 배전선로에 도입될 경우 분산전원의 계통에 대한 역조류에 의해 고장시 고장구간의 분리 및 선로재구성에 따른 차단기 및 개폐기 제어알고리즘, 그리고 순시정전 시 분산전

원의 기동정지, 개폐기의 기능, 차단용량 등에 다양한 영향을 미칠 가능성이 높다[1]. 또한 고장 시 일시적으로 분리된 건전구간 내에 분산전원이 존재하여 그 구간내의 부하와 평형을 이루며 운전되고 있는 경우가 있을 수 있는데, 이 경우는 인체 및 전기설비에 위험을 초래하게 될 뿐만 아니라 고장의 신속한 복구에도 저해의 요인이 된다[2-3]. 따라서 이와 같은 문제점들에 대해서 배전계통의 보호체제와 분산전원의 보호기기가 서로 협조하여 대처할 수 있도록 전반적인 검토가 이루어져야 한다[4-5]. 본 논문에서는 이와 같은 양방향 보호기기의 성능확인을 위하여 시뮬레이터를 이용한 실증시험을 통한 안정성을 분석하고자 한다.

* 주저자 : 광운대학교 전기공학과 교수
** 교신저자 : 한전 아산지점 부장
Tel : 041-539-3230, Fax : 041-539-3289
E-mail : jayou@kepco.co.kr
접수일자 : 2011년 8월 19일
1차심사 : 2011년 8월 25일, 2차심사 : 2011년 9월 21일
심사완료 : 2011년 9월 29일

2. 양방향 보호 방향성 판별 알고리즘

2.1 방향성 판별요소

방향성 계전은 기준량과 작동량으로 구성되는 2개 성분의 크기와 각도로 방향을 판별한다. 기존의 상 방향요소는 아래 표 1과 같은 방향 판별요소를 사용하였다.

표 1. 일반적인 상별 방향요소 구성
Table 1. Conventional direction factor for each phase

| 상 | 작동성분 | 기준성분 |
|---|-------|---------------------|
| A | I_A | $V_{POLA} = V_{BC}$ |
| B | I_B | $V_{POLB} = V_{CA}$ |
| C | I_C | $V_{POLC} = V_{AB}$ |

표 1의 작동성분이 기준성분과 이루는 각이 $-90 \sim 90[^\circ]$ 사이이면 정방향, 그 범위를 넘으면 역방향로 방향 판별을 하는 방식이며, 다음과 같은 수식에 근거하여 방향을 판별한다.

$$D_A = V_{BC} \cdot I_A \cdot \cos(\angle V_{BC} - \angle I_A)$$

$$D_B = V_{CA} \cdot I_B \cdot \cos(\angle V_{CA} - \angle I_B)$$

$$D_C = V_{AB} \cdot I_C \cdot \cos(\angle V_{AB} - \angle I_C)$$

그러나 이러한 상별 방향판별방법은 3상 단락고장 같은 평형고장에 대하여는 방향판별이 항상 유효하지만, 단상지락고장 같은 불평형 고장에 대해서는 방향판별이 유효하지 않고, 각 상별 방향판정 방향이 서로 일치하지 않는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 경우에 대한 정확한 방향 판별을 위하여 정상분 전압과 전류를 이용하여 상의 방향을 판정하는 방식으로 보완한다[6-7]. 정상분 요소를 이용한 상방향 판별요소는 아래의 표 2와 같이 구성되며, 여기서 $\angle Z_{L1}$ 는 정상성분 선로각이다. 즉 기준성분인 $3V_1$ 의 위상각에서 정상분 선로각을 뺀 성분이 $3I_1$ 과 비교하여 $\pm 90[^\circ]$ 범위내에 있으면 정방향으로 판정한다.

표 2. 정상성분에 의한 평형고장 방향성 판별
Table 2. Direction distinction of the balance fault by positive phase sequence component

| 상 | 작동성분 | 기준성분 |
|----|--|--------|
| 3상 | $3I_1 \cdot 1 \angle Z_{L1}$ | $3V_1$ |
| | $D_{3P} = 3V_1 \cdot 3I_1 \cdot \cos(\angle 3V_1 - \angle 3I_1 + \angle Z_{L1})$ | |

영상분 전압, 전류를 이용한 지락 방향 계전요소는 아래의 표 3을 이용하며, $\angle Z_{L0}$ 는 영상성분 선로각이다. 즉 기준성분인 $-3V_0$ 의 위상각에서 영상분 선로각을 뺀 성분이 $3I_0$ 과 $\pm 90[^\circ]$ 범위내에 있으면 정방향으로 판정한다. 여기서 기준이 되는 V_0 의 크기가 아주 작으면 방향성 판별에 신뢰성이 떨어지므로 이에 대한 문턱값을 설정할 수 있어야 한다.

표 3. 영상성분에 의한 지락고장 방향성 판별
Table 3. Direction distinction of the ground fault by zero phase sequence component

| 상 | 작동성분 | 기준성분 |
|----|---|---------|
| 3상 | $3I_0 \cdot 1 \angle Z_{L0}$ | $-3V_0$ |
| | $D_{3G} = 3V_0 \cdot 3I_0 \cdot \cos(\angle -3V_0 - \angle 3I_0 + \angle Z_{L0})$ | |

역상분 전압, 전류를 이용한 상 방향 계전요소는 아래의 표 4와 같으며, 역상분 전압, 전류를 이용하여 상에 대한 방향을 판별할 수 있다.

표 4. 역상성분에 의한 지락고장 방향성 판별
Table 4. Direction distinction of the ground fault by negative phase sequence component

| 성분 | 작동성분 | 기준성분 |
|----|---|---------|
| 역상 | $3I_2 \cdot 1 \angle MTA_2$ | $-3V_2$ |
| | $D_2 = 3V_2 \cdot 3I_2 \cdot \cos(\angle -3V_2 - \angle 3I_2 + \angle MTA_2)$ | |

2.2 방향성 판별 내부 변수설정

방향성 과전류 계전기의 방향성 판별을 위해서는 최대위상 감도각(M.T.A ; Maximum Torque Angle), 최소 문턱값(Minimum Threshold) 등 내·외부변수를 설정하여야 한다. 최대위상 감도각(MTA)은 리클로저

설치위치에서 배전선로에서의 임피던스 위상각을 고려하여 산정하여야 한다.

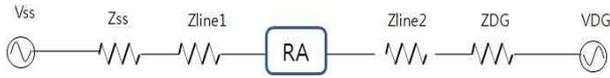


그림 1. 배전선로 임피던스 구성
Fig. 1. Composition of distribution line impedance

그림 1과 같은 일반 배전선로의 임피던스 구성에서 대칭성분별로 전압, 전류 관계식을 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ V_{1,ss} - V_{1,RA} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{0,ss} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{1,ss} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{2,ss} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{0,line1} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{1,line1} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{2,line1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{0,RA} \\ I_{1,RA} \\ I_{2,RA} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{0,RA} \\ V_{1,RA} \\ V_{2,RA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & Z_{0,ss} + Z_{0,line1} & 0 & 0 \\ V_{1,ss} - & 0 & Z_{1,ss} + Z_{1,line1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{2,ss} + Z_{2,line1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{0,RA} \\ I_{1,RA} \\ I_{2,RA} \end{bmatrix}$$

임피던스는 아래 수식 (1), (2)와 같이 계산되어진다.

$$Z_{0,RA} = \frac{V_{0,RA}}{I_{0,RA}} = -(Z_{0,ss} + Z_{0,line1}) \quad (1)$$

$$Z_{2,RA} = \frac{V_{2,RA}}{I_{2,RA}} = -(Z_{2,ss} + Z_{2,line1}) \quad (2)$$

즉 영상 및 역상임피던스는 리클로저 설치위치에서 전원측으로 변전소 임피던스와 선로임피던스의 합계로 계산되고, 이에 대한 위상각은 임피던스 R, X의 위상각이 된다. 정상임피던스는 고장형태에 따라 다르게 산출되며, 각 고장형태별 임피던스는 아래와 같이 계산된다. 수식 (3)은 3상 단락, (4)는 1선 지락, (5)는 2선 단락에 대한 산출식을 나타내고 있다.

$$\cdot Z_1 = \frac{V_{1,RA}}{I_{1,RA}} = \frac{V_{1,ss} - Z_{1,ss} \cdot I_{1,RA}}{\frac{V_{1,ss}}{Z_{1,ss} + Z_{1,line1,FLT}}} = Z_{1,Line,FLT} \quad (3)$$

$$\cdot Z_1 = Z_{0,ss} + Z_{0,line,FLT} + Z_{1,line,FLT} + Z_{2,ss} + Z_{2,line,FLT} \quad (4)$$

$$\cdot Z_1 = Z_{2,ss} + Z_{1,line,FLT} + Z_{2,line,FLT} \quad (5)$$

상기 수식의 첨자 RA는 리클로저를 의미하며, SS는 전원측, FLT는 고장위치를 의미한다. 즉 $Z_{1,Line,FLT}$ 는 고장지점으로 전원측으로의 정상분 선로임피던스를 의미한다.

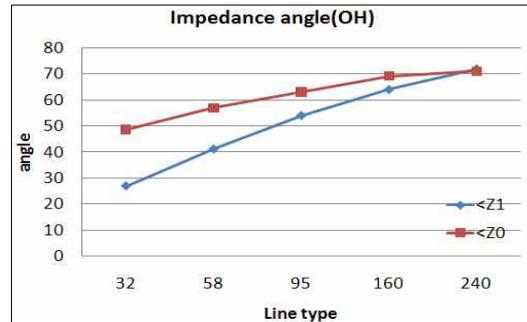


그림 2. 가공선로 임피던스 위상각 변화
Fig. 2. Impedance phase angle of overhead distribution power line(overhead)

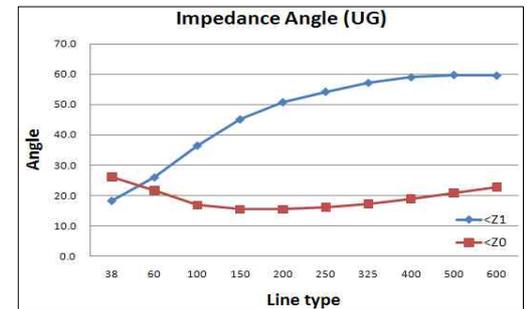


그림 3. 지중선로 임피던스 위상각 변화
Fig. 3. Impedance phase angle of underground distribution power line

위의 계산식에서 볼 수 있듯이, 정상임피던스는 소스 임피던스와 선로 임피던스의 조합으로 계산된다. 주로 50~85[°] 범위에서 사용되며, 한전에서 사용되는 선종 및 변전소 등가 임피던스를 이용하여 계산하면 위 그림 2, 3과 같은 결과를 얻을 수 있다.

3. 양방향 보호기기 실계통 시험

3.1 실증시험장 구성

전절에서 설명한 방향성 판별 알고리즘이 탑재된 양

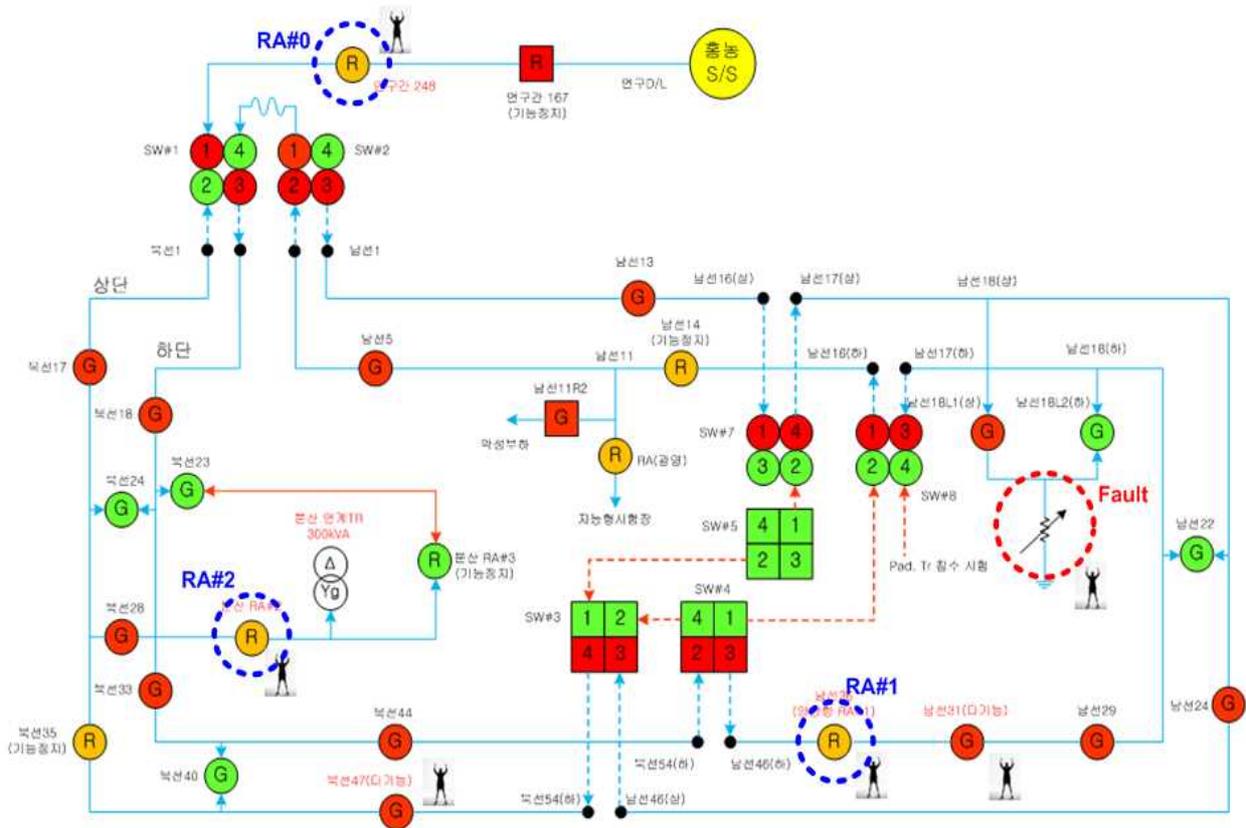


그림 4. 실증시험 선로구성
Fig. 4. Power line diagram of the examination site



그림 5. 시험선로 단선도
Fig. 5. Single line diagram of examination line

방향 리클로저를 전력계통 실증시험장의 배전시험선로와 분산전원시험설비를 이용하여 분산전원이 연계된 계통에서의 고장전류의 방향을 정확히 판정할 수 있는지를 확인하였다. 시험선로의 구성은 전력시험센터에 설치된 시험선로의 개폐기 조작은 시험센터의 상단 및 하단선배전선로와 분산전원시험설비를 이용하여 그림 4와 같이 구성하였다. 시험선로 전체를 이용할 수 있도록 실시[적색(단합), 녹색(열림)]하였고, 말단에 분산전원 연계용 변압기(Yg-

△)를 접속하였다. 또한 선로와 연계된 타 시험계통은 적절히 보호되거나 분리하여 선로고장 발생에 따른 설비의 손상을 방지로 하였다. 시험선로의 주요 보호기기들의 설정은 표 5, 6과 같이 설정하였고, 기타 보호기기들의 계전기능은 정지하였다. 보호기기의 설정값은 Off-DAS 프로그램을 이용하여 선로 고장 시 보호기기간 보호협조가 가능한지 미리 검토하였으며, 협조에 필요한 충분한 시간을 확보할 수 있음을 확인하였다.

그림 5는 시험선로 단선도이며, 변전소에서 인출된 배전로부터 말단의 분산전원 연계변압기에 도달하는 총 18[km]의 배전선로를 구성하였고, 말단에는 분산전원 연계변압기(Yg-Δ)에 를 설치하여 고장시 지락 역방향 고장전류가 발생토록 하였다. 남선18상에 인공고장발생장치(AFG)를 설치하여 선로고장을 발생시켜 고장점을 기준으로 전원측 리클로저에 정방향 고장전류를 발생시켜 전원측 리클로저가 차단되는지 확인하고, 부하측 리클로저에 역방향 고장전류를 발생시켜 부하측 리클로저가 고장전류를 감지하였음에도 역방향 고장전류임을 인식하여 동작하지 않음을 확인할 수 있도록 하였다.

표 5. 시험선로 CB(차단기) 계전기 설정
Table 5. Set up of CB relay

| | OCR | OCGR |
|----------|-------------|-------------|
| CT Ratio | 600/5 | 600/5 |
| Type | DOG-D42(EI) | DOG-D42(EI) |
| 순시 Tab | 38 (4560A) | 34 (4080A) |
| 한시 Tab | 3.1 (372A) | 0.6 (72A) |
| 한시 Lever | 3.1 | 4.1 |
| 재폐로 횟수 | 2회 | 2회 |

표 6. 시험선로 RA(리클로저) 설정
Table 6. Set up of RA relay

| 종 류 | | RA#0 (연구간248) | RA#1 (남선36) | RA#2 (분산2) | |
|-------------|------------|------------------|----------------|---------------|------|
| 최소 동작전류 | 상 | 300[A] | 250[A] | 50[A] | |
| | 지락 | 70[A] | 60[A] | 50[A] | |
| 총 동작횟수 | 상 | 2회(1F1D) | 1회(1F) | 1회(1F) | |
| | 지락 | 2회(1F1D) | 1회(1F) | 1회(1F) | |
| 재폐로 시간 | | 0.6[s] | - | - | |
| TC Curve | 상 | 커브명 | N2 | N1 | N1 |
| | | 순시 시간증가 | 0.2[s] | 0.1[s] | 0[s] |
| | 지연 | 커브명 | N4 | N3 | N3 |
| | | 순시 시간증가 | 0.2[s] | 0.1[s] | 0[s] |
| | 지락 | 커브명 | N2 | N1 | N1 |
| | | 순시 시간증가 | 0.2[s] | 0.1[s] | 0[s] |
| 지연 | 커브명 | N4 | N3 | N3 | |
| | 순시 시간증가 | 0.2[s] | 0.1[s] | 0[s] | |

| 방향 요소 | 동작방향 | - | Forward | Forward |
|----------|--------|-------|---------|---------|
| | MTA | - | 60 | 60 |
| | | - | 60 | 60 |
| | V1 문턱값 | - | 30%Vn | 30%Vn |
| | V0 문턱값 | - | 상동 | 상동 |
| | I1 문턱값 | - | 5[A] | 5[A] |
| | I0 문턱값 | - | 상동 | 상동 |
| 돌입억제배수 | 4배/8배 | 4배/8배 | 4배/8배 | |
| 구간협조기능 | OFF | OFF | OFF | |

3.2 고장저항이 30[Ω]인 경우 1선 지락

본 논문에서는 다양한 고장조건에서 실증시험을 수행하였으나, 지면상 1선지락 고장에 대한 실증시험 결과만 기술하였다.

3.2.1 전원측 양방향 리클로저의 동작

전원측 양방향 리클로저에 기록된 고장파형은 그림 6, 7과 같고, 계측값은 표 7에 요약하였다. 1선 지락으로 인하여 고장상과 N상의 전류가 증가하였으며, 이로 인하여 고장상의 전압이 감소하는 것을 알 수 있다. 계측값에는 각 상별 고장전류 및 전압의 크기(I_{abcn} , V_{abc})와 위상뿐만 아니라, 방향관정을 위한 V_0 , V_1 , V_2 크기와 위상, 그리고 I_0 , I_1 , I_2 의 크기와 위상을 표시하였다.

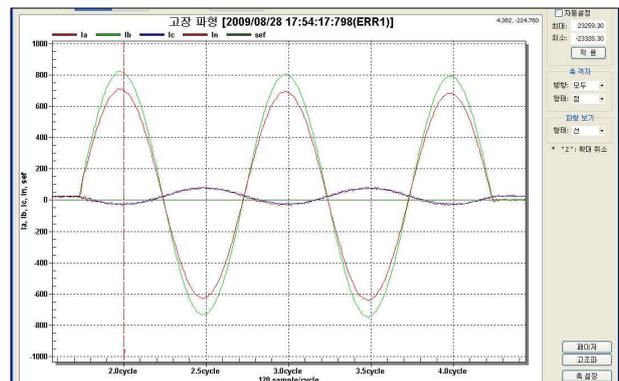


그림 6. 전원측 고장전류 파형(순시값)
Fig. 6. Fault current of the source side

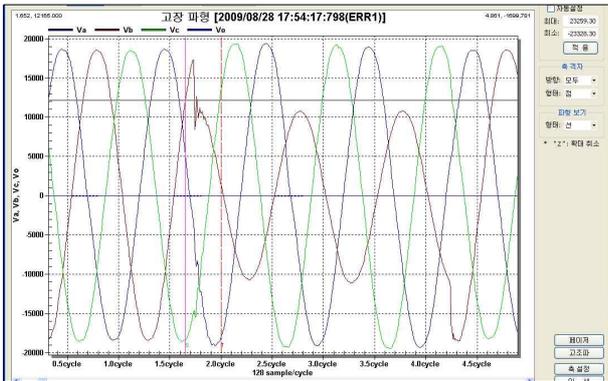


그림 7. 전원측 고장전압 파형(순시값)
Fig. 7. Fault voltage of the source side

표 7. 전원측 리클로저 계측값(실효치)
Table 7. Bidirectional recloser measurement RMS value of the source side

| 항목 | A(0) | B(1) | C(2) | N |
|------------------------|-------|-------|-------|-------|
| I_{abcn} [A] | 38 | 547 | 36 | 470 |
| I_{abcn} (Angle) [°] | 25.3 | 195.5 | 12.5 | 195.4 |
| I_{012} (Mag) [A] | 231.9 | 93.5 | 95.8 | - |
| I_{012} (Angle) [°] | 195.4 | 316.3 | 75.1 | - |
| V_{abc} [V] | 13874 | 13302 | 13929 | - |
| V_{abc} (Angle) [°] | 0.0 | 242.1 | 116.4 | - |
| V_{012} (Mag) [V] | 4451 | 17916 | 793 | - |
| V_{012} (Angle) [°] | 41.1 | 359.3 | 277.4 | - |

표 8. 전원측 리클로저 방향판정 및 동작
Table 8. Bidirectional recloser direction distinction & movement in the source side

| | 방향판정결과 | 리클로저동작 | 검증결과 |
|--|--------|--------|------|
| 상요소 | 정방향 | 동작 | 적합 |
| $D_1 = 3 V_1 \cdot 3 I_1 \cdot \cos(\angle 3 V_1 - (\angle 3 I_1 + \angle MTA_1))$ $= \cos(359 - (316 + 60)) = \cos(-17) = \text{정}(+)$ | | | |
| 지락요소 | 정방향 | 동작 | 적합 |
| $D_0 = 3 V_0 \cdot 3 I_0 \cdot \cos(\angle -3 V_0 - (\angle 3 I_0 + \angle MTA_0))$ $= \cos(221 - (195 + 60)) = \cos(-19) = \text{정}(+)$ | | | |

방향판정요소별 실측값을 이용한 방향판정 결과와 전원측 양방향 리클로저의 동작결과는 표 8과 같으며, 리클로저는 상과 지락요소에서 모두 정방향 고장전류 감지함으로써 정상적으로 차단되었다.

3.2.2 부하측 양방향 리클로저의 동작

부하측 양방향 리클로저에 기록된 고장파형은 그림 8, 9와 같고, 계측값은 표 9에 요약하였다. 계통에 고장이 발생하면 분산전원의 출력전류는 큰 차이가 발생하지 않으며, N상 전류만 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

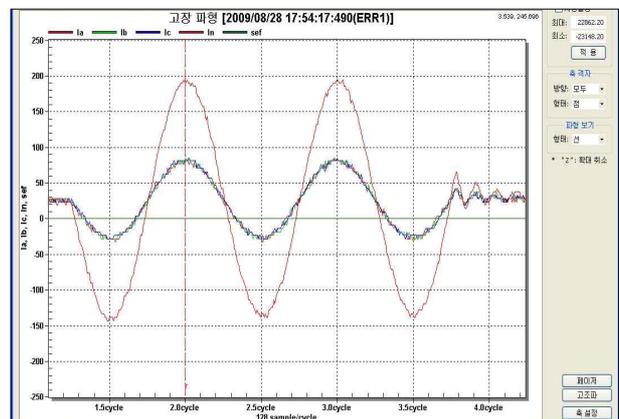


그림 8. 부하측 고장전류 파형(순시값)
Fig. 8. Fault current of the load side

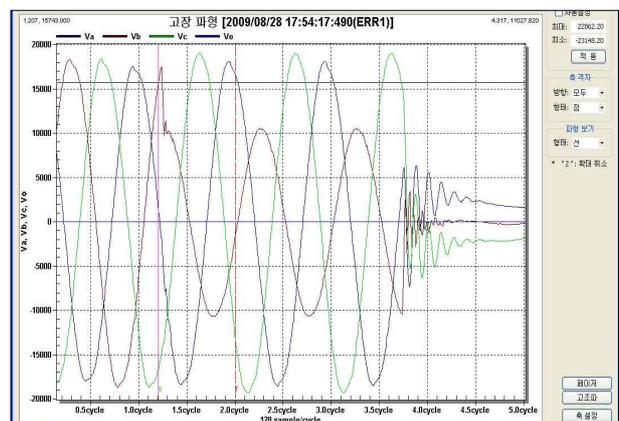


그림 9. 부하측 고장전압 파형(순시값)
Fig. 9. Fault voltage of the load side

표 9. 부하측 리클로저 계속값(실효치)
Table 9. Bidirectional recloser measurement RMS value of the load side

| 항목 | A(0) | B(1) | C(2) | N |
|------------------------|--------|-------|-------|-------|
| I_{abcn} [A] | 38 | 37 | 37 | 117 |
| I_{abcn} (Angle) [°] | 357.5 | 355.2 | 356.6 | 355.0 |
| I_{012} (Mag) [A] | 126.35 | 0.82 | 0.17 | - |
| I_{012} (Angle) [°] | 355.0 | 54.7 | 146.7 | - |
| V_{ABC} [V] | 13047 | 9766 | 13704 | - |
| V_{abc} (Angle) [°] | 0.0 | 246.9 | 116.2 | - |
| V_{012} (Mag) [V] | 8239 | 16361 | 2151 | - |
| V_{012} (Angle) [°] | 49.1 | 0.2 | 277.0 | - |

표 10. 부하측 리클로저 방향판정 및 동작
Table 10. Bidirectional recloser direction distinction & movement in the load side

| | 방향판정결과 | 리클로저동작 | 검증결과 |
|---|--------|--------|------|
| 상요소 | 판정포기 | 부동작 | 적합 |
| $D_1 = 3V_1 \cdot 3I_1 \cdot \cos(\angle 3V_1 - (\angle 3I_1 + \angle MTA_1))$ $= \cos(0 - (54 + 60)) = \cos(-114) = \text{역(-)}$ (단, $I_1 < 5A$, 정상전류 방향판정 문턱값 미달로 판정결과 포기) | | | |
| 지락요소 | 역방향 | 부동작 | 적합 |
| $D_0 = 3V_0 \cdot 3I_0 \cdot \cos(\angle -3V_0 - (\angle 3I_0 + \angle MTA_0))$ $= \cos(229 - (355 + 45)) = \cos(-171) = \text{역(-)}$ | | | |

방향판정요소별 실측값을 이용한 방향판정 결과와 부하측 양방향 리클로저의 동작결과는 표 10과 같으며, 리클로저는 상요소에서 방향판정을 포기하고, 지락요소에서 역방향 고장전류를 감지함으로써 정상적으로 부동작하였다.

4. 결 론

분산전원이 연계된 배전계통의 경우에는 그 출력용량의 여부에 따라 양방향의 전력조류가 발생할 가능성이 있어, 계통운영 상 여러 가지의 문제점이 야기될 수 있다. 따라서 분산전원의 다양한 장점을 이용하여 계통운영을 최적화하기 위해서 이와 관련된 양방향 보호협조 체제를 반드시 확립해야 한다.

본 논문에서는 분산전원이 연계된 계통에서의 고장 발생시 고장전류의 방향을 정확히 판정할 수 있는지를 검증하였다. 본 논문을 통해서 확인된 시험절차, 시험방법 등을 토대로 향후 양방향 배전계통에 적용되는 보호기기의 실증시험에 대한 기반을 구축하였다. 이와 같은 연구를 통하여 양방향 배전계통을 이용한 전력공급 신뢰도를 향상시키고, 분산전원이 연계된 배전계통의 양방향 보호협조에 대한 기술 확대 및 정부의 신재생에너지 보급정책에 적극 부응할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] 배전계통에서 변압기결선에 의한 연 조류현상에 관한연구, 조명설비학회 논문지 제 22권 9호, 2009.9.
- [2] 분산전원이 연계된 배전계통의 양방향 보호 실증 연구, 한국전력공사, 2009.07.
- [3] CETC, Canada 'Protection Coordination Planning with Distributed Generation(Final Report)', June,2007.
- [4] R.A. Walling, Robert Saint, Roger C.Dugan, Jim burke, Ljubomir, 'Summary of Distributed Resources Impact in Power Delivery System', IEEE Transactions on Power Delivery.Vol23, No.3 JULY 2008.
- [5] S.C.Kwon, C.H,Shin, J,Y,Kim, 'Performance Testing for Directional Protective Devices in Distribution Network with Distributed Generation', APAP 2009.
- [6] Jeff Reberts, Armando Guzman 'Directional Element Design and Evaluation', Schweitzer Engineering Laboratories.2006.
- [7] Armando Guzman, Jeff Reberts 'New Ground Directional Elements Operate Reliably For changing System Conditions' Schweitzer Engineering Laboratories, 1996.

◇ 저자소개 ◇



이흥재 (李興載)

1958년 1월 28일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995~1996년 미국 워싱턴 주립대 방문교수. 현재 광운대 공대 전기공학과 교수.



최명호 (崔明鎬)

1965년 6월 28일생. 2002년 안동대학교 행정경영대학원 경영학과 졸업(석사). 2005년 한밭대학교 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 광운대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 한전 아산지점 전력공급팀장.