

분산전원이 연계된 배전계통의 고장특성을 고려한 방향성 보호계전 방식 적용 연구

(Application of Directional Over Current Protection Schemes Considering the Fault Characteristics in the Distribution System with Dispersed Generation)

정원옥* · 이학주 · 권성철 · 채우규

(Won-Wook Jung · Hak-Ju Lee · Seong-Chul Kwon · Woo-Kyu Chae)

Abstract

Penetration of distributed generator(DG) to power distribution system can cause malfunction of existing protection schemes. Because grid interconnected DG can contribute fault currents and make bidirectional current flows on the system, fault contributions from DG can cause an interference of protection relay operation. Therefore, over current protection device of the distribution system with DGs need directional protection schemes. In this paper, improved directional protection algorithms are proposed for the distribution system with DG considering their fault characteristics. And then, these directional protection algorithms are tested and validated in various fault conditions. From the simulation results, it can be seen that the proposed directional protection algorithms are practically efficient for the radial distribution system with DG.

Key Words : Directional Element, Protection, Dispersed Generation, Distribution System, Fault

1. 서 론

최근 녹색성장 및 신재생에너지 확대 보급 정책으로 신재생에너지원을 포함한 분산전원의 전력계통 연계가 급속도로 증가하고 있다. 특히 10[MW]급 이하 대부분의 분산전원은 한전의 배전급(22.9[kV] 특고압, 380[V] 저압) 계통에 연계되고 있다. 분산전원은 친환경

경적이며 부하와 밀접한 지역에서 발전하는 이른바, On-site Generation 방식의 전력공급을 가능하게 하여 기존 전력계통에 여러 가지 이점을 준다. 그러나 기존의 배전계통은 변전소를 전원으로 하여 부하에 전력을 공급할 목적으로 설계되고 운영되고 있어 배전계통에서 분산전원의 연계용량이 증가함에 따라 전기품질, 보호협조, 안전, 선로 운영상의 문제 등을 야기한다.

본 논문에서는 보호측면에서 분산전원이 배전계통의 보호체계에 미치는 영향을 다루고자 한다. 배전계통에서 고장이 발생하는 경우 고장전류를 공급하는 전원은 오직 변전소측의 전원이었고, 변전소부터 고장

* 주저자 : 한전 전력연구원 선임연구원
Tel : 042-865-5978, Fax : 042-865-5944
E-mail : wwjung@kepri.re.kr
접수일자 : 2010년 6월 3일
1차심사 : 2010년 6월 9일
심사완료 : 2010년 7월 5일

점으로 단방향으로 고장전류가 공급되었다. 이러한 이유로 배전계통의 보호는 기본적으로 방향성을 고려하지 않는 과전류 계전방식을 채택해 왔다. 그러나 분산전원의 배전계통 연계로 인하여 배전계통에서의 고장전류 공급원은 변전소 이외에도 분산전원이 추가되었으며 고장전류의 분포 또한 양방향으로 분포하게 되어 기존 과전류 보호체계에 여러 가지 문제점이 발생하게 된다[1].

분산전원 연계 배전계통에서의 양방향 고장 전류(Bidirectional Fault Current)는 기존 단방향 과전류계전기의 보호협조 정정만으로 해결할 수 없으며, 보호기기에 방향성을 부여해야만 보호협조뿐만 아니라 보호기기의 오동작 문제를 해결할 수 있다[2-3].

본 논문에서는 배전용 보호기기에 방향성을 부여하기 위해 주로 송전계통 혹은 Loop 배전계통에서 사용되어 온 전압, 전류의 시퀀스 요소를 이용한 방향관별 계전 방식(DOCR, DOCGR)을 분산전원 연계 배전계통의 리클로저에 적용할 경우 문제점을 분석하고 분산전원 연계 배전계통의 고장 특성을 고려한 방향관별 알고리즘을 제안하였다.

2. 분산전원 연계에 따른 배전계통의 보호측면에서의 문제점

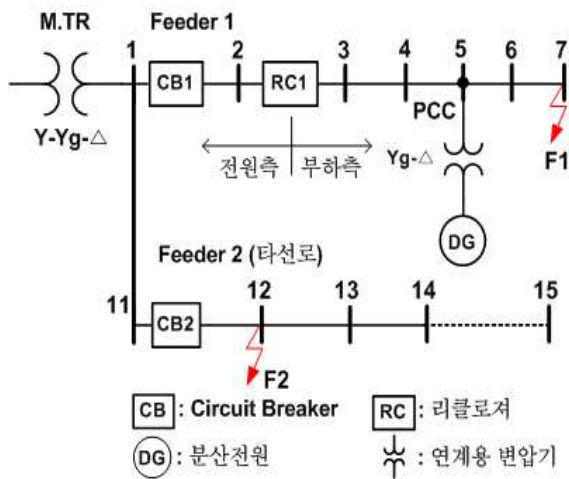


그림 1. 분산전원 연계 배전계통 도면
Fig. 1. Single Line Diagram of Distribution System with Dispersed Generation

배전계통에 분산전원의 연계로 인해 배전계통은 기존의 단방향 계통에서 양방향 조류계통으로 변화된다. 배전계통의 특정 지점에서 고장 발생시 기존 계통측(변전소)에서 공급하는 고장전류와 분산전원측에서 기여하는 고장전류로 인해 기존 단방향 과전류계전방식을 채용하고 있는 배전계통의 보호측면에서 문제점이 발생한다. 이러한 문제점은 크게 다음과 같이 3가지 문제로 정리될 수 있다.

2.1 단락용량 증대

그림 1에서 Feeder 2의 F2 지점에서 고장이 발생하는 경우 CB2에서는 변전소에서 공급하는 고장전류와 Feeder 1에 연계되어 있는 분산전원에서 공급하는 고장전류가 동시에 공급된다. 즉 분산전원이 없는 경우와 비교해서 단락용량이 증대된다. 분산전원의 연계로 인해 단락용량이 증가하는 문제와 관련하여 기존의 연구 결과에서는 분산전원의 추가 고장전류 기여 효과로 인해 기존 설치된 차단기의 차단용량 보다 큰 고장전류가 유입될 수 있고 이로 인해 보호설비의 손상을 발생시킬 수 있으며, 고장이 파급되어 정전 범위가 확대될 가능성이 있다고 보고 되고 있다[3].

2.2 자기선로 사고시 보호기기 부동작

그림 1에서 분산전원이 연계된 Feeder1의 F1 지점에서 3상 단락고장이 발생하는 경우, 고장점으로 변전소측과 분산전원측에서 고장전류를 공급하게 된다. 분산전원의 연계로 인하여 고장점에서 바라본 전체 임피던스는 줄어들게 되어 고장점에서 고장전류는 증가하게 된다. 그러나 고장전류가 분산전원측으로 분류되어 보호기기에서 경험하는 고장전류의 크기는 줄어들게 된다. 결국 분산전원측으로의 고장전류 분류로 인하여 고장전류가 보호기기의 최소동작전류 이하로 흐르게 되면 보호기기는 부동작(동작해야 하나 동작하지 않는 것)하게 될 가능성이 있다[2-3].

분산전원의 고장전류 기여에 따른 단락용량 증가 및 보호기기의 부동작 문제는 분산전원에 한류리액터를

설치하여 분산전원에서 기여하는 고장전류를 저감하는 대책으로 문제를 해결할 수 있다.

2.3 타선로 사고시 보호기기 오동작

최근 분산전원이 연계된 한전 배전계통에서 가장 빈번하게 발생하는 사고는 사고선로 이외에 분산전원이 연계된 건전선로에서의 보호기기 오동작 문제이다[4]. 분산전원의 연계용 변압기는 한전의 분산형전원 계통 연계 기준에서 명시하는 유효접지 기준을 만족하기 위해 대부분 Grounded Y-Delta 결선 방식을 사용하고 있다[5]. 이 때문에 지락고장시 발전 유·무에 관계없이 연계용 변압기가 계통에 연계되어 있으면 변압기의 1차측 접지가 지락고장전류의 통로를 제공하게 된다.

그림 1의 고장점 F2에서 지락고장이 발생하는 경우 분산전원이 연계되어 있는 Feeder 1에서 영상회로가 형성되어 분산전원이 공급하는 역방향 고장전류가 RC1에서 감지되고 고장전류의 크기가 최소동작전류 이상인 경우 보호협조 시간차에 의해 RC1이 트립되게 된다. 물론 사고선로의 보호기기인 CB2가 RC1보다 먼저 고장을 제거하게 되면 Feeder 1에서 RC1에 의한 정전을 막을 수 있다. 하지만 한전의 보호협조 정정지침에 의하면 배전계통에서 전위보호기기라 할 수 있는 리클로저는 후비보호기기인 변전소 차단기보다 동작시간을 빠르게 설정하는 것이 일반적이다. 따라서 타선로 사고로 인한 분산전원이 연계된 건전선로에서의 보호기기의 오동작을 보호협조 정정만으로 해결할 수는 없으며 배전용 보호기기에 방향성 판별 기능을 부여해야 할 필요가 있다.

3. 고장 방향판별 방법 및 분산전원 연계 배전계통 적용 평가

본 절에서는 기존 전력계통에서 사용되어 온 방향판별 방법을 알아보고 분산전원 연계 배전계통의 보호기기에 적용하여 다양한 고장조건에서 오류 없이 고장 방향을 구분할 수 있는지를 검토한다.

3.1 고장 방향판별 방법

3.1.1 상별 방향판별 요소

일반적인 방향성 계전은 기준량과 작동량으로 구성되는 두 개의 성분과 이 두 성분이 이루는 각을 기준으로 방향을 판별한다. 기존의 상 방향요소는 아래와 같은 방향 판별요소를 사용한다.

표 1. 일반적인 상별 방향 판별요소
Table 1. Phase Directional Elements

Phase	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 $\pm 90^\circ$ 이내이면 정방향(Forward), $\pm 90^\circ$ 범위를 넘으면 역방향(Reverse)으로 방향 판별을 하는 방식이다. 이를 수학적으로 표시하면

$$D_A = V_{BC} \cdot I_A \cdot \cos(\angle V_{BC} - \angle I_A) \quad (1)$$

$$D_B = V_{CA} \cdot I_B \cdot \cos(\angle V_{CA} - \angle I_B) \quad (2)$$

$$D_C = V_{AB} \cdot I_C \cdot \cos(\angle V_{AB} - \angle I_C) \quad (3)$$

식 (1), (2), (3)을 통해, 각 상별로 고장 방향을 판별할 수 있다.

그러나 이러한 상별 방향판별 방법은 3상단락고장 같은 평형고장(Balanced Fault)에 대하여는 각 상의 방향 판정 결과가 일치하여 방향판별이 항상 유효하지만, 지락고장과 같은 불평형고장(Unbalanced Fault)에 대해서는 각 상의 방향 판별 결과가 일치하지 않는 문제가 발생하여 방향판별 결과가 유효하지 않다. 이러한 문제를 극복하기 위해 A상, B상, C상에서 개별적으로 판단하는 3개의 방향판별 요소를 전압과 전류의 시퀀스 요소를 사용하여 1개로 줄일 수 있다. 시퀀스 요소를 이용한 방향판별은 1개의 판별요소를 사용하기 때문에 상별 판정 결과가 불일치하는

일은 발생하지 않는 장점이 있어 현재 전력계통의 방향계전에 시퀀스 방향판별 요소가 주로 사용된다 [6-7].

3.1.2 정상분 방향판별 요소

정상분 방향 판별 요소는 정상분 전압(V_1)과 정상분 전류(I_1)를 기준성분과 작동성분으로 각각 사용하고 정상분 선로 임피던스를 고려하여 고장시 고장전류를 최대감도가 되도록 설정하는 최대감도 위상각(MTA : Maximum Torque Angle)을 설정하여 다음의 식을 이용하여 방향성을 판별한다.

$$D_1 = k \cdot \cos(\angle 3V_1 - \angle 3I_1 + \angle MTA_1) \quad (4)$$

$$T_1 = \angle 3V_1 - \angle 3I_1 + \angle MTA_1 \quad (5)$$

정상분 전압(V_1)에 대한 정상분 전류(I_1)의 각이 MTA₁를 기준으로 $\pm 90^\circ$ 범위에 있으면 정방향으로 판정을 하고, 이 범위 밖에 있으면 역방향으로 판정한다.

3.1.3 영상분 방향판별 요소

영상분 방향 판별 요소는 영상분 전압(V_0)과 영상분 전류(I_0)를 기준성분과 작동성분으로 각각 사용하고 영상분 선로 임피던스를 고려하여 MTA₀ 설정하고 아래식과 같이 방향성을 판별한다.

$$D_0 = k \cdot \cos(\angle 3V_0 - \angle 3I_0 + \angle MTA_0) \quad (6)$$

$$T_0 = \angle 3V_0 - \angle 3I_0 + \angle MTA_0 \quad (7)$$

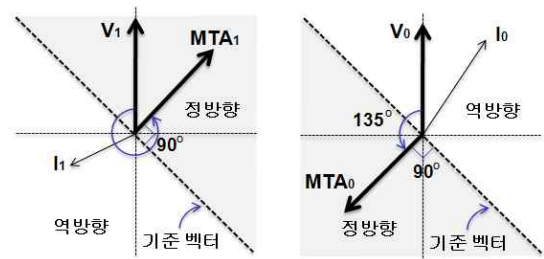
영상분 방향 판별 요소에서는, 기준성분인 영상분 전압(V_0)의 위상각에서 MTA₀의 위상각 만큼 더한 성분을 기준으로 영상분 전류(I_0)가 $\pm 90^\circ$ 범위 내에 있으면 정방향으로 판정을 하게 되고, 이 범위 밖에 있으면 역방향으로 판정을 하게 된다.

3.1.3 방향성 과전류 계전 방식

일반적으로, 시퀀스 요소를 사용하는 방향성 판별 방법은 상과 지락 고장에 대한 판별 방법을 각각 구분

하여 적용된다. 보통 상고장에 대한 방향성 과전류 계전(DOCR : Directional Over Current Relay)으로 정상분(Positive Sequence) 요소를 사용하고, 지락 고장에 대한 방향성 과전류 계전(DOCGR : Directional Over Current Ground Relay)으로는 영상분(Zero Sequence) 요소를 사용한다.

방향성 과전류 계전기의 상고장에 대해서는 정상분 전압(V_1)을 기준으로 MTA₁를 기본값 300° (진상기준)로 설정하고, 지락고장에 대해서는 영상분 전압(V_0)을 기준으로 MTA₀를 기본값으로 135° (진상기준)로 설정하여 방향판별을 수행한다. 그림 2에는 상 및 지락 고장에 대한 과전류계전기의 방향성 판별 알고리즘을 도시하였다.



(가) 정상분 방향 판별 (나) 영상분 방향 판별

그림 2. 시퀀스 요소를 이용한 방향성 계전 알고리즘
Fig. 2. Directional Decision Algorithm by Sequence Elements

3.2 배전계통에서 방향성 판별 방법 적용

3.2.1 방향판별 요소 평가 방법

본 절에서는 정상분 및 영상분 방향판별 요소를 분산전원이 연계된 배전계통의 리클로저(RC)에 적용하여 방향 판별의 정확도를 검토한다.

먼저 그림 1의 분산전원이 연계된 1Bank 2 Feeder 특고압 배전계통을 CYMDIST 배전계통 해석 프로그램을 이용하여 그림 3과 같이 모델링하였다. 그리고 분산전원이 연계된 배전계통에서 일어날 수 있는 모든 고장 조건에 대하여 정상분과 영상분 전압 전류에 영향을 미치는 고장 조건을 표 2와 같이 정리하였다.

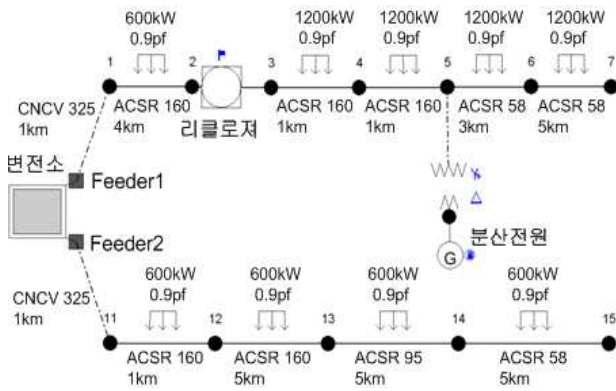


그림 3. 분산전원 연계 배전계통 고장 해석 모델(CYMDIST)
Fig. 3 Simulation Model for Fault Study of Distribution System with Dispersed Generation

표 2. 고장조건별 시퀀스 요소에 영향을 미치는 고장 조건

Table 2. Fault Conditions affecting Directional Elements

고장 조건	방향판별 요소에 미치는 영향		영상분 (T_0)	정상분 (T_1)
고장 종류	3상단락	V_0, I_0 는 없고	X	0
	선간단락	V_1, I_1 은 존재	X	0
	지락고장	V_0, I_0, V_1, I_1 모두 존재	0	0
DG 연계 형태	Tr만 가압 (발전정지)	Tr은 Ground Source로 작용하여 I_0 를 발생시킴.	0	0
	PV발전	고장기여 전류의 많고(동기기) 적은(태양광) 차이는 있으나 정상분에 해당하며 영상분에 영향 없음.	X	0
부하 조건	경부하	부하의 많고 적은은 정상분에 해당하며 영상분에 영향 없음.	X	0
	중부하	고장전 V_0, I_0 를 형성하고 있어 고장시 영상분의 위상각에 영향을 미침.	0	X

그림 3의 해석 모델을 이용하여 분산전원 종류, 발전 유·무, 연계용 변압기 가압 여부에 따라 Feeder1에 설치된 리클로저(RC)를 기준으로 부하측과 전원측 그리고 타선로에서 각각 고장을 상정하여 리클로저

설치점에서 측정되는 전압과 전류의 위상 정보를 정상분 및 영상분 방향 판별 요소인 식 (5)와 (7)에 적용하여 방향판별 결과를 분석하였다.

영상분과 정상분 방향판별 요소의 적용 평가를 위해 표 2에 정리된 바와 같이 영상분과 정상분 방향판별 요소 각각에 영향을 주는 고장 조건을 시뮬레이션으로 모의하여 시험을 진행하였다.

3.2.2 DOCGR 방향 판별 요소 평가

DOCGR에 채용되는 영상분 방향판별 요소의 방향판별 정확도를 시험하기 위해서 표 2과 같이 영상분 전압 및 전류에 영향을 미치는 고장 조건을 상정하여 고장해석을 수행하였다. 표 3은 선로 부하의 불평형률, 고장점, 고장저항에 따른 1선 지락고장을 모의하고 그림 3의 리클로저 설치점에서 검출한 전압, 전류를 이용한 영상분 방향판별 요소의 방향판정 결과를 보여 준다. 표 3에서 T_0 가 $\pm 90^\circ$ 이내인 경우 정(정방향)으로 판정하고 그 외의 경우 역(역방향)으로 판정한다. 실험 결과에서와 같이 지락고장에 대하여 영상분 방향판별 요소의 오류는 없는 것을 확인할 수 있으며 분산전원 연계 배전계통의 DOCGR 방향계전 방법으로 영상분 방향판별 요소의 적용이 유효함을 확인할 수 있다.

표 3. 지락고장에 대한 영상분 방향판별 결과
Table 3. The Results of Directional Decision by Zero Sequence Element under Ground Fault Conditions

부하 불평형률	고장점	T_0 (degree)	방향 판별	판별 결과
0[%]	부하측(7)	-27	정	O
20[%]	부하측(7)	-26	정	O
30[%]	부하측(7)	-25	정	O
30[%]	전원측(2)	154	역	O
0[%]	타선로(11)	149	역	O
30[%]	타선로(11)	153	역	O
40[%]	타선로(13)	137	역	O

3.2.3 DOCR 방향 판별 요소 평가

배전계통에서 고장발생시 보호기기의 상고장에 대한

방향계전을 위해 DOCR에 정상분 방향판별 요소를 적용하여 다양한 고장조건에서 방향판별 정확도를 시험하기 위해 표 2와 같이 정상분 전압 및 전류에 영향을 미치는 고장 조건을 상정하여 고장해석을 수행하였다.

고장조건으로 분산전원 연계 형태, 부하조건, 고장점에 따른 3상단락, 선간단락, 지락고장을 모의하였다. 고장점은 그림 3의 RC 설치점을 기준으로 부하측, 전원측, 타선로에서 각각 고장을 상정하였으며 분산전원 연계 형태는 아래와 같이 정의하였다.

- ① Tr만 가압 : 연계용 변압기만 가압 상태 (즉, 발전 전력은 없는 상태)
- ② PV발전 : 태양광 3,000[kW]가 최대출력 발전 상태
- ③ SG발전 : 동기기 3,000[kW]가 최대발전 발전 상태

표 4에는 고장조건에 대한 정상분 방향판별 요소의 방향 판별 결과를 나타내었다. 여기서 정상분 방향 판별 요소 T_1 이 $\pm 90^\circ$ 이내인 경우 정(정방향)으로 판정하고 그 외의 경우 역(역방향)으로 판정한다.

표 4의 시험결과에서와 같이 1선 지락고장을 모의한 결과 특정 고장조건에서 방향판별의 오류가 발생하는 결과를 얻을 수 있었다. 부하측의 고장에 대해서 모든 고장조건에서 정(정방향)으로 정확히 고장 방향을 판별하였으나 분산전원 연계용 변압기만 가압되어 있는 경우 전원측 및 타선로 사고시 방향 판별에 실패하였고, PV가 발전하는 경우 역시 전원측 및 타선로 고장에 대해서는 방향 판별에 실패하였다. 또한 선간단락과 3상단락고장의 경우도 부하측 고장에 대해서는 모두 정확히 방향판별을 하였으나, 1선 지락과 마찬가지로 Tr만 가압되어 있는 조건과 PV 발전하는 경우 역

표 4. 고장조건에 따른 정상분 방향판별 요소의 방향판별 결과
Table 4. The Results of Directional Decision by Positive Sequence Element under Various Fault Conditions

고장조건			지락고장				선간단락고장				3상단락고장			
연계 형태	부하 조건	고장점	고장 전류	T_1 (deg)	방향 판별	판별 결과	고장 전류	T_1 (deg)	방향 판별	판별 결과	고장 전류	T_1 (deg)	방향 판별	판별 결과
Tr만 가압	경부하	부하측(6)	1338	2.1	정	O	1787	3	정	O	2012	11	정	O
		전원측(1)	386	41	정	X	123	41	정	X	0	-	-	-
		타선로(12)	301	41	정	X	123	41	정	X	27	42	정	X
	중부하	부하측(6)	1291	5	정	O	1819	4	정	O	2024	11	정	O
		전원측(1)	413	41	정	X	187	41	정	X	0	119	역	O
		타선로(12)	357	41	정	X	187	41	정	X	42	41	정	X
PV 발전	경부하	부하측(6)	1308	-5	정	O	1727	-1	정	O	1983	8	정	O
		전원측(1)	316	-71	정	X	150	-99	역	O	147	175	역	O
		타선로(12)	227	-35	정	X	122	-74	정	X	112	-95	역	O
	중부하	부하측(6)	1330	-1	정	O	1759	0	정	O	1994	8	정	O
		전원측(1)	370	-11	정	X	164	-68	정	X	146	175	역	O
		타선로(12)	284	8	정	X	137	-25	정	X	101	-90	역	O
SG 발전	경부하	부하측(6)	1230	-2	정	O	1666	1	정	O	1913	11	정	O
		전원측(1)	579	156	역	O	393	160	역	O	436	175	역	O
		타선로(12)	365	161	역	O	293	167	역	O	323	185	역	O
	중부하	부하측(6)	1256	1	정	O	1700	3	정	O	1927	11	정	O
		전원측(1)	564	135	역	O	415	150	역	O	429	175	역	O
		타선로(12)	335	106	역	O	147	158	역	O	304	183	역	O

방향 고장 조건(전원측, 타선로 고장)에서는 방향판별에 오류가 발생하였다.

선간단락과 3상단락 고장 상정시 특정고장 조건에서 방향판별에 오류를 발생하긴 했지만 역방향 고장 조건에서 고장전류 자체가 작기 때문에 보호기기의 오동작 가능성은 없어 크게 문제되지는 않았다. 그러나 1선지락고장 조건에서는 역방향 고장에 대해서 300[A] 이상의 고장전류가 흐르고 방향판별에도 실패했기 때문에 보호기기가 오동작할 수 있어 개선이 요구된다.

3.3 정상분 방향판별 요소의 오류 분석

3.3.1 분산전원 연계 형태에 따른 고장 특성

DOCR 방향판별 요소인 정상분 요소가 특정 고장조건에서 방향판별에 실패하는 원인을 도출하기 위해 분산전원 연계 형태에 따른 고장 특성을 분석한다. 그림 4는 리클로저의 전원측에서 1선 지락고장이 발생한 경우 고장회로를 보여준다.

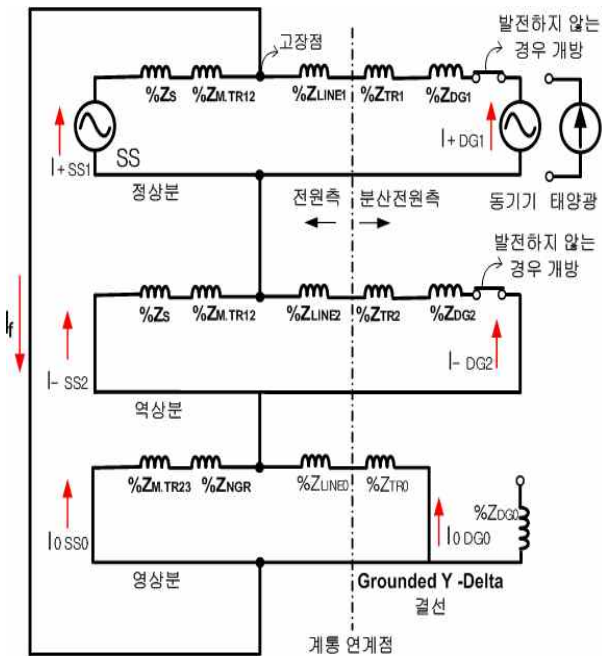


그림 4. 전원측 1선지락고장시 등가회로
Fig. 4. Equivalent Circuit when Single Line Ground Fault at Substation side

① 연계용 변압기(Tr)만 가압시

분산전원은 발전을 정지하고 연계용 변압기만 계통에 가압되어 있는 경우 그림 4의 고장회로에서 정상분 회로와 역상분 회로는 개방회로가 되고 영상분 회로는 Grounded Y-Delta 결선을 사용하는 변압기의 1차측 접지에 의해 그림 4과 같은 영상회로가 구성된다. 따라서 분산전원이 발전을 하지 않더라도 변압기 결선을 통해 영상회로가 형성되어 지락 고장전류의 공급 통로를 제공하게 된다. 이때 상에 흐르는 고장전류의 크기는 Ground에 흐르는 고장전류에 비하여 매우 작다고 할 수 있다.

② 태양광이 연계되어 발전하고 있는 경우

태양광은 인버터를 통해 계통에 연계되어 계통 고장시 고장특성은 인버터의 고장특성을 따른다고 볼 수 있다. 인버터는 계통 고장발생시 자체 전류 제한 기능에 의해 정격 전류의 1~1.2배 수준의 고장전류를 공급한다. 즉 그림 4의 고장회로에서 태양광의 정상분 등가회로는 전류원으로 대체 될 수 있으며 정격전류 정도만을 고장전류로 기여한다고 볼 수 있다. 따라서 1선 지락고장시 분산전원에서 기여하는 고장전류는 비교적 작다고 할 수 있다.

③ 동기계 연계되어 발전하는 경우

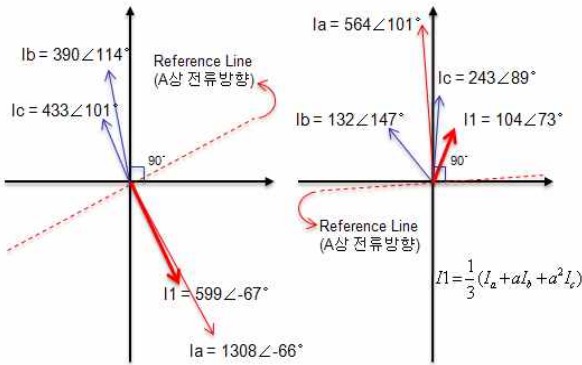
동기발전기는 고장시 그림 4와 같이 정상분 등가회로는 전압원과 과도리액턴스로 모델링될 수 있다. 과도리액턴스는 동기리액턴스(고장전)에 비해 5~8배 작기 때문에 정격전류의 최대 8배까지 고장전류를 공급하게 되므로 동기계가 공급하는 고장전류의 크기는 비교적 크다고 볼 수 있다.

3.3.2 정상분 요소 방향판별 오류 원인 규명

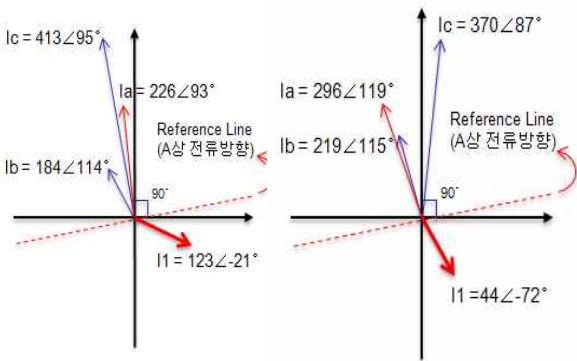
분산전원의 연계 형태에 따른 고장 특성과 표 4의 1선지락고장시 정상분 방향판별 요소의 방향판정 결과를 비교해 볼 때 정상분 방향판별 요소는 지락고장시 고장전류가 큰 경우 정확한 방향판단을 할 수 있으나 연계용 변압기만 가압되어 있거나 태양광발전이 발전하는 경우와 같이 분산전원측에서 공급하는 고장전류의 크기가 비교적 작은 경우 방향판별에 실패하는 것으로 분석된다.

그림 5는 정상분 방향판별 요소가 방향판별에 성공

한 경우와 실패한 경우의 상별 고장전류의 벡터와 정상분 전류의 벡터를 보여준다. 그림 5의 (가)는 연계용 변압기가 가압되어 있고 부하측에 고장전류가 발생한 경우이고 (나)는 동기가 발전하고 전원측 고장인 경우로 고장상인 A상의 전류(I_a)가 비교적 크다. 이때 정상분 전류 벡터(I_1)는 부하측과 전원측 고장 모두에서 고장상 전류(I_a) 방향과 일치함을 확인할 수 있다.



(가) Tr만 가압 + 부하측 고장 (나) 동기가 + 전원측 고장



(다) Tr만 가압 + 전원측 고장 (라)태양광 + 전원측 고장

그림 5. 지락고장시 상전류 및 정상분 전류 벡터
Fig. 5. Vector Diagram of Phase and Positive Sequence of Fault Current when Single Line Ground Fault

그림 5의 (다)는 연계용 변압기가 가압되어 있는 상태에서 전원측 고장이 발생한 경우이고 (라)는 태양광이 발전하고 전원측 고장인 경우로 고장상인 A상의 고장전류(I_a)가 비교적 작다. 고장상인 A상 전류가 건전상인 C상의 전류보다도 작은 것을 확인할 수 있다.

기존 전력계통에서는 고장 발생시 고장상의 전류가 일반적으로 큰 것이 보통이나 그림 5의 (다)와 (라)의 경우는 예외라고 할 수 있다. 이러한 경우 고장상의 전류(I_a)는 정상분 전류 벡터(I_1)와 방향이 일치하지 않는다. 결국 보호기기를 기준으로 전원측 혹은 타선로 고장시 분산전원측에서 상으로 기여하는 고장전류의 크기가 작은 경우 정상분 방향판별 요소에 의한 방향판별은 실패하는 것으로 분석된다.

4. 제안된 배전용 보호기기의 방향성 부여 방법

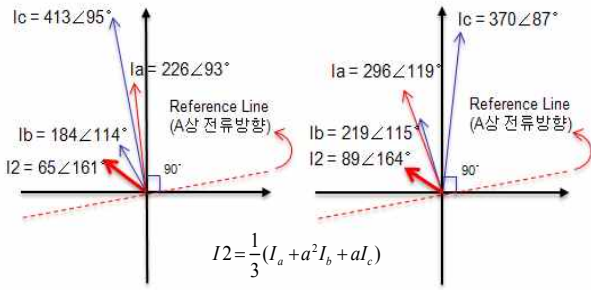
4.1 DOCR 방향판별 요소 개선 방안

본 절에서는 분산전원 연계 배전계통의 고장특성을 고려한 DOCR의 방향판별 알고리즘을 도출하고자 한다. 표 5는 고장종류별 검출 가능한 시퀀스 요소이다. DOCR은 모든 고장조건에서 방향판별이 가능해야 한다. 선간단락이나 3상단락 고장시 영상분 요소는 검출이 되지 않으므로 적용할 수가 없으며, 정상분 요소는 앞서 언급한 바와 같이 지락고장 조건에서 오류를 발생기 때문에 제외하면 역상분 요소가 DOCR의 방향판별 요소로 적용 가능하다.

표 5. 고장종류별 검출 가능한 시퀀스 요소
Table 5. Available Sequence Elements with Fault Type

시퀀스요소	3상단락	선간단락	1선지락
V_1	Yes	Yes	Yes
V_2	Yes	Yes	Yes
V_0	No	No	Yes
I_1	Yes	Yes	Yes
I_2	Yes	Yes	Yes
I_0	NO	NO	Yes

그림 5에서 정상분 방향판별 요소가 방향판별에 실패한 고장조건에 대하여, 역상분을 적용한 결과 그림 6과 같이 고장상 전류(I_a)와 역상분 전류 벡터(I_2)의 방향이 일치함을 확인할 수 있다.



(가) Tr 만가압 + 전원측 고장 (나)태양광 + 전원측 고장

그림 6. 지락고장시 상전류 및 역상분 전류 벡터
Fig. 6. Vector Diagram of Phase and Negative Sequence of Fault Current when Single Line Ground Fault

4.2 분산전원 고장특성을 고려한 DOCR 방향판별 알고리즘

앞 절에서와 같이 역상분 방향판별 요소는 정상분 방향 판별 요소와 비교하여 연계용 변압기(Tr)만 가압되어 있거나 태양광(PV)이 발전하는 경우와 같이 역방향 고장시 고장전류가 작은 경우에도 고장 방향을 정확히 판별할 수 있는 것으로 분석되었다.

전통적인 역상분 방향판별 요소는 역상분 전압(V_2)과 역상분 전류(I_2) 그리고 최대감도 위상각(MTA) 설정값을 이용하여 수식 (8), (9)와 같이 방향을 판별

표 6. 고장조건에 따른 역상분 방향판별 요소의 방향판별 결과
Table 6. The Results of Directional Decision by Negative Sequence Element under Various Fault Conditions

고장조건			지락고장				선간단락고장				3상단락고장			
연계 형태	부하 조건	고장점	고장 전류	T_2	방향 판별	판별 결과	고장 전류	T_2	방향 판별	판별 결과	고장 전류	T_2	방향 판별	판별 결과
Tr만 가압	경부하	부하측(6)	1338	-17	정	O	1787	-17	정	O	2012	131	역	X
		전원측(1)	386	221	역	O	124	-139	역	O	0	-	-	-
		타선로(12)	301	222	역	O	124	-138	역	O	27	222	역	O
	중부하	부하측(6)	1292	-16	정	O	1820	-17	정	O	2024	131	역	X
		전원측(1)	414	221	역	O	187	-139	역	O	0	184	정	O
		타선로(12)	358	221	역	O	187	-138	역	O	42	221	역	O
PV 발전	경부하	부하측(6)	1308	-17	정	O	1727	-16	정	O	1983	128	역	X
		전원측(1)	316	226	역	O	150	-132	역	O	147	55	정	X
		타선로(12)	227	226	역	O	122	-132	역	O	112	-35	정	X
	중부하	부하측(6)	1330	-17	정	O	1759	-16	정	O	1994	128	역	X
		전원측(1)	371	225	역	O	164	-135	역	O	146	55	정	X
		타선로(12)	284	225	역	O	137	-134	역	O	101	30	정	X
SG 발전	경부하	부하측(6)	1230	-17	정	O	1666	-17	정	O	1913	131	역	X
		전원측(1)	579	166	역	O	393	167	역	O	436	115	역	O
		타선로(12)	365	166	역	O	293	167	역	O	323	125	역	O
	중부하	부하측(6)	1257	-17	정	O	1700	-16	정	O	1927	131	역	X
		전원측(1)	565	172	역	O	415	172	역	O	429	115	역	O
		타선로(12)	336	172	역	O	148	170	역	O	304	68	정	X

할 수 있으며 역상분의 최대감도 위상각(MTA₂)은 정상분과 동일하게 300°(진상기준)로 설정한다.

$$D_2 = k \cdot \cos(\angle(-3V_2) - \angle 3I_2 + \angle MTA_2) \quad (8)$$

$$T_2 = \angle(-3V_2) - \angle 3I_2 + \angle MTA_2 \quad (9)$$

DOCR에 역상분 방향판별 요소를 적용하여 표 4의 정상분 방향판별 요소의 시험 조건과 동일한 고장조건에서 시험한 결과를 표 6에 도시하였다. 시험 결과에서와 같이 역상분 방향판별 요소는 모든 지락고장 조건에 대해서 방향판별에 오류가 없었으며 선간단락 고장 조건의 경우, 표 4에서 정상분 방향판별 요소가 오류를 보였던 고장조건에서 역상분 방향판별 요소는 정확히 고장 판단을 할 수 있었다. 그러나 3상 단락고장의 경우 역상분 방향 판별 요소는 거의 대부분의 경우 방향 판별에 실패하였다.

결국 DOCR의 방향계전 방법으로 정상분 요소를 적용한 표 4와 역상분 요소를 적용한 표 6의 시험결과를 볼 때, 분산전원 연계 배전계통의 상고장에 대하여 불평형고장 조건(지락고장, 선간단락 고장)에서는 역상분 요소 방향 판별 요소로 적합하고 평형고장(3상 단락)인 경우는 정상분 요소가 적합한 것으로 분석되었다.

따라서 본 논문에서는 분산전원 연계 배전계통에서 상고장에 대한 방향판별 방법으로 그림 7과 같은 방향판별 방법을 제안한다. 즉 고장 발생시 역상분 전류를 검출하여 임계값(Threshold) 이상인 경우 불평형 고장으로 판단하여 역상분 요소로 방향 판별하고, 임계값 이하인 경우 평형고장으로 간주하여 정상분 요소로 방향판별을 하는 방법이다. 여기서 불평형고장과 평형고장을 구분하는 임계값은 계통의 고장전 불평형 전류에 의해 발생하는 역상분 전류(3I₂)를 사용할 수 있다. 표 4와 표 6의 시험결과에서와 같이 제안된 알고리즘을 적용하면 분산전원이 연계된 배전계통에서 발생할 수 있는 모든 고장조건에서 정확한 방향판별을 할 수 있다.

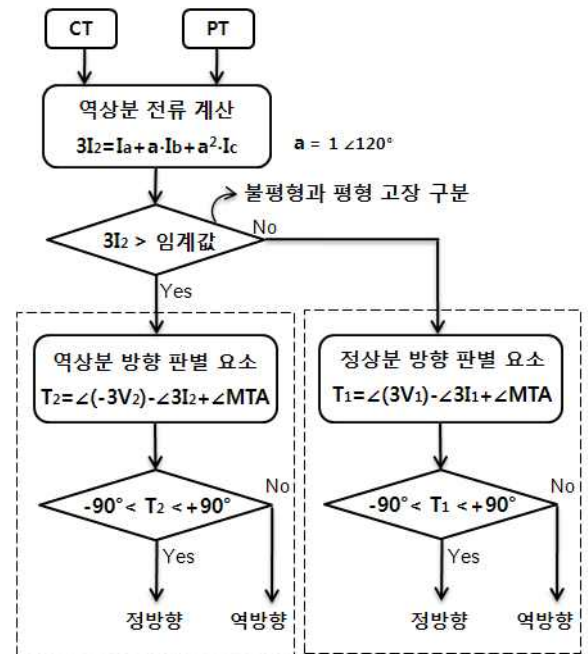


그림 7. DOCR의 개선된 방향판별 알고리즘
Fig. 7. Improved Directional Algorithm of DOCR Considering Dispersed Generation in Radial Distribution System

4. 결 론

본 논문은 분산전원의 배전계통 연계로 인해 발생할 수 있는 보호측면의 문제점을 살펴보고 특히, 건전선로 고장시 분산전원 연계 선로에서의 고장전류 기여에 따른 보호기기 오동작을 방지하고자 배전용 보호기기에 전통적으로 송전계통 혹은 Loop 배전계통에서 적용되어온 방향판별 방법을 적용하여 이 방법의 문제점을 분석하였다.

기존 방향판별 방법을 분산전원이 연계된 배전계통에 적용하는 경우, 지락고장에 대한 방향판별 요소로 역상분 요소를 사용하는데 문제가 없었으나 상고장에 대한 방향판별에 정상분 요소를 사용하는 경우 방향판별의 오류가 발생되었으며 원인 분석 결과, 분산전원 연계 계통은 일반 송전계통이나 Loop 배전계통과는 다르게 특정 고장조건에서 고장전류의 크기가 비교적 작은 경우가 발생하고 이러한 경우 정상분 방향판별 요소는 방향 판별에 실패하는 것으로 분석되었다.

본 논문에서는 고장의 종류를 불평형과 평형 고장으로 구분하고 각각 역상분과 정상분 요소를 적용하여 분산전원의 고장특성을 고려한 모든 고장조건에서 방향판별이 가능한 알고리즘을 제안하였고 이의 효용성을 시뮬레이션 결과를 통해 입증하였다. 제안된 방향성 판별 알고리즘은 분산전원이 연계된 방사상 배전계통의 보호기기에 효율적으로 적용되리라 생각된다.

References

- [1] 신동열, 하복남, 정원옥, 차한주 “배전계통에서 변압기결선에 의한 연 조류현상에 관한 연구” 조명·전기설비학회 논문지 제 22권 9호, 2008년 9월.
- [2] 한국전력공사 전력연구원 “분산전원이 연계된 배전계통의 양방향 보호 실증 연구(최종보고서)” 2009년 7월.
- [3] CETC, Canada “Protection Coordination Planning with Distributed Generation (Final Report)” June, 2007.
- [4] 전력연구원 기술지원 (2008-1-01 67-1, 서천지점) “발전고객 수전용 OCCG 오동작 원인 분석”, 2008년 3월.
- [5] 한국전력공사, 배전처 “분산형전원 배전계통 연계 기술해설서” 2006년 9월.
- [6] Jeff Roberts, Armando Guzman “Directional Element Design and Evaluation” Schweitzer Engineering Laboratories, 2006.
- [7] Armando Guzman, Jeff Roberts “New Ground Directional Elements Operate Reliably For Changing System Conditions” Schweitzer Engineering Laboratories, 1996.

◇ 저자소개 ◇



정원옥(丁元晷)

1978년 1월 25일생. 2003년 충남대학교 전기공학과 졸업. 2005년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 2005년~현재 한전 전력연구원 선임연구원.



이학주(李鶴周)

1966년 12월 5일생. 1989년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1991년 충남대학교 전기공학과 졸업(석사). 2003년 충남대학교 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 한전 전력연구원 선임연구원.



권성철(權成鐵)

1972년 9월 24일생. 1995년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1997년 포항공과대학교 전기전자공학과 졸업(석사). 1997년~현재 한전 전력연구원 선임연구원.



채우규(蔡又圭)

1977년 4월 22일생. 2004년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 2007년 충북대학교 전기공학과 졸업(석사). 2004년~현재 한전 전력연구원 선임연구원.