

분산전원이 연계된 배전계통의 온라인 보호협조 방안

(The Online Protective Coordination Schemes of the Distribution Systems
with Distributed Generation)

최준호* · 노경수 · 김재철

(Joon-Ho Choi · Kyoung-Soo Ro · Jae-Chul Kim)

요 약

최근 경제 발전으로 인한 전력 에너지 소비 증가로 발전설비의 확충이 요구되는 상황이다. 그러나 화석연료고갈 및 지구환경문제로 대형 화력 발전설비의 확충이 어려워지고 있다. 따라서 발전부지 확보가 용이하고 환경오염의 위험이 적은 분산전원에 대한 관심이 한층 더 고조되고 있다. 그러나 이러한 분산전원이 배전계통에 연계되면 전압 변동, 고조파, 보호협조, 고장전류 증가 등의 문제를 일으키므로 이에 대한 적절한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 국내 22.9[kV] 배전계통에 다수의 분산전원이 연계되었을 경우, 각 계전기가 감지하는 고장전류의 크기와 방향성을 고려하여 고장 감지 및 고장 지점을 확인하는 방법을 제안하였다. 이를 기반으로 하여 배전계통 보호기기인 자동재폐로 차단기-구분개폐기 보호시스템이 상호협조를 이루기 위한 온라인 보호 협조방안을 제시하였다.

Abstract

Recently, there has been growing interest in distributed resources with high-energy efficiency due to the increasing energy consumption and environmental pollution problems. But an insertion of new distributed generation to existing power distribution systems can cause several problems such as voltage variations, harmonics, protective coordination, increasing fault current etc. In this paper, a new method of the fault location identification at the distribution system with distributed resources, which can be determined by the magnitude and direction of the fault current, is proposed. In addition, a new online protective coordination scheme of recloser-sectionalizer is proposed based on the proposed fault location identification method for distribution system with distributed resources.

Key Words : Distributed resources, Online protection, Distribution protection practice, Recloser, Sectionalizer

1. 서 론

최근 경제 발전으로 인한 전력 에너지 소비 증가로 발전설비의 확충이 요구되는 상황이다. 그러나 화석연료고갈 및 지구환경문제로 대형 화력 발전설비의 확충이 어려워지고 있다. 따라서 발전소 부지

* 주저자 : 전남대학교 전기공학과 조교수
Tel : 062-530-1742, Fax : 062-530-1749
E-mail : joono@chonnam.ac.kr
접수일자 : 2007년 2월 6일
1차심사 : 2007년 2월 7일
심사완료 : 2007년 2월 13일

확보난 및 환경오염의 위험이 적은 분산전원에 대한 관심이 한층 더 고조되고 있다. 그러나 이러한 분산전원의 배전계통연계는 배전계통의 운전, 보호 및 제어에 있어서 그 복잡성을 증가시킨다. 특히 보호협조에 있어서는 문제 발생 시 그 파급효과가 분산전원 자체뿐만 아니라 배전계통의 다른 인근 수용가들에까지 큰 악영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 적절한 보호협조 연구가 필요하다.

배전계통은 송전 시스템과는 달리 단방향 전원에 의해 방사상으로 운전되고 있으며 보호 시스템 또한 단방향 사고전류를 기초로 하는 과전류 계전방식을 사용하고 있다. 그러나 배전계통에 분산전원 연계되면 분산전원의 고장 전류기여로 고장전류가 증가되고 이로 인해 보호기기 설정치 정정 및 보호협조시스템의 재구성 등과 같은 보호 협조 문제점이 발생한다. 따라서 국내 배전계통 보호 시스템을 구성하고 있는 자동재폐로 차단기와 구분 개폐기와의 협조에 있어서 발생할 수 있는 문제점에 대한 충분한 연구가 필요하다[1]. 보호협조와 관련된 지금까지의 연구사례를 살펴보면 기존 배전계통에 분산전원이 연계되었을 때 자동재폐로 차단기(recloser)-퓨즈(fuse) 보호협조 영향 및 대책을 다룬 논문들이 대부분 이었다[2-3].

본 논문에서는 배전계통에 다수의 분산전원이 연계되었을 때 배전계통에 설치된 각 계전기가 감지하는 고장전류 및 이의 방향성을 이용하여 고장지점을 찾는 알고리즘을 제안하였다. 더불어 이를 기반으로 다수의 분산전원이 연계된 배전계통의 자동재폐로 차단기-구분개폐기(sectionalizer) 보호시스템의 협조 알고리즘을 제안하였다.

2. 기존 배전계통 보호협조방식과 분산전원 연계의 문제점

배전계통은 여러 개의 전원이 연결된 루프(Loop) 형태의 운전을 하고 있는 송전시스템과는 달리 단일 전원에 의한 방사상 운전을 하고 있으며 보호 시스템 또한 이러한 특성에 적합하도록 구성되어 있다. 보호시스템은 배전용 변전소, 모선 그리고 배전용 피더 사고 시 정전시간 및 정전구간을 최소화하고

전력용 기기들을 보호하기 위해 각 계전기를 포함한 자동재폐로 차단기, 구분개폐기, 퓨즈 등의 보호기기가 서로 적절한 협조를 이루도록 구성되어 있다.

현재 국내에서는 배전선로의 보호를 위하여 자동재폐로 차단기, 구분개폐기 및 선로용 퓨즈(line fuse)를 사용하고 있으며 주로 각 급전선과 각 분기선에 자동재폐로 차단기와 구분개폐기를 설치하여 보호하는 보호협조방식을 채택하고 있다[4].

2.1 자동재폐로 차단기

자동재폐로 차단기는 배전계통 보호기기 중 전위와 후비 보호장치 사이의 보호협조를 이루게 하는 중추적 역할을 담당하며 순간사고 시 선로를 순시로 차단한 후 자동으로 재폐로 함으로써 전력공급의 신뢰도를 향상시키며 영구사고 시 설정된 동작 후 고장구간을 배전계통으로부터 분리시키는 기능을 갖는다. 즉 순간 사고와 영구사고를 구별할 수 있는 기능을 가진 보호기기이며 동작 특성을 위한 순시동작 곡선과 지연동작곡선을 가지고 총 4회까지 정정이 가능하다.

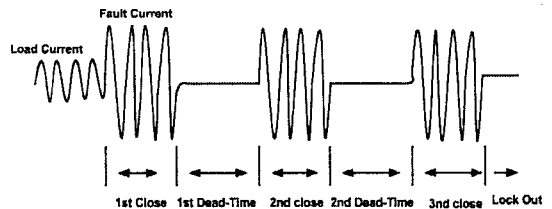


그림 1. 영구사고시 전형적인 자동재폐로 차단기 동작
Fig. 1. Typical reclosing operation when a permanent fault

2.2 구분개폐기

구분개폐기는 후비 보호장치인 재폐로 차단기의 동작횟수를 카운트하여 동작하며 자동재폐로 차단기 동작에 의해 선로가 무전압 상태가 된 고장구간을 분리하므로 일반적으로 후비 보호장치와 직렬로 연결하여 사용한다. 구분 개폐기는 자동으로 제어되는 배전선로의 개폐기이며 고장전류를 차단할 수 있는 능력은 없으므로 T-C 특성이 불필요하여 다

분산전원이 연계된 배전계통의 온라인 보호협조 방안

른 보호장치와 협조를 이루기가 용이하다. 그 동작에 있어서는 최소동작전류 이상의 전류가 흐르면 재폐로 차단기의 동작을 카운트할 준비를 하며 후비 보호장치인 재폐로 차단기가 동작을 시작하면 그 동작횟수를 카운트하여 동작하게 된다. 예를 들어 구분개폐기의 동작 설정값을 2회로 가정하였을 경우 위 그림의 자동 재폐로 차단기 동작에 따라 2회째 차단기 동작(2nd breaker tripping)과 2회째 자동재폐로(2nd reclosing) 사이에 구분개폐기가 동작하게 된다.

2.3 분산전원 연계 시 보호협조 문제점

2.3.1 자동재폐로 차단기와의 협조시 문제점

자동재폐로 차단기의 보호영역 내에서 분산전원이 연계되었을 경우에는 사고 시 자동재폐로 차단기에 의해 선로가 차단되었을 때 분산전원에 의한 단독운전이 발생할 수 있으며, 이러한 상황은 수용가 측 설비에 주파수 및 전압에 있어서 저 품질의 전력을 공급함으로써 악영향을 줄 수 있을 뿐 아니라 전력회사 측 수리공이 이러한 상황을 인지하지 못할 경우 인명 사고의 가능성이 발생한다. 또한 자동재폐로 차단기에 의해 선로가 차단된 후 다시 재투입이 이루어질 경우 배전계통과 분산전원 사이의 비동기 투입이 이루어 질 수 있으며 이러한 상황은 배전계통 전체뿐 아니라 분산전원 자체에 큰 악영향을 줄 수 있다[1, 5-6].

2.3.2 구분개폐기와의 협조 시 문제점

구분개폐기는 후비 보호장치인 자동재폐로 차단기에 의한 선로 무전압 상태를 카운트함으로써 동작하게 된다. 하지만 분산전원이 자동재폐로 차단기와 구분개폐기 사이에 연계되고 사고가 구분개폐기 이후에 발생하거나 분산전원이 구분개폐기 이후에 연계되고 사고가 자동재폐로 차단기와 구분개폐기 사이에 발생하였을 경우 자동재폐로 차단기에 의해 선로가 차단되더라도 분산전원의 단독운전에 의해 선로 무전압 상태를 감지하는 구분개폐기의 오동작, 즉 자동재폐로 차단기 동작횟수의 카운트에 실패하

여 선로를 차단할 수 없는 경우가 발생할 수 있다. 따라서 이러한 경우 자동재폐로 차단기에 의해 선로가 재투입되었을 때 분산전원의 단독운전뿐 아니라 배전계통과 분산전원의 비동기 투입에 의한 악영향이 발생할 수 있다[1, 5-6].

3. 배전계통에 분산전원 연계시 보호협조 알고리즘 제안

분산전원이 연계된 배전계통의 온라인 보호협조에 관한 기존의 연구는, 자동재폐로 차단기-퓨즈의 보호협조가 이루어지는 배전계통에 관한 분산전원의 영향[2] 및 이의 온라인보호협조에 관한 내용이 다[3]. 기존에 제안된 방법은 배전계통의 모든 부하점에서의 데이터 취득이 필요하다는 단점이 있다[3].

국내 배전계통의 주 보호협조는 자동재폐로 차단기-구분개폐기의 보호협조를 적용하고 있으므로 본 논문에서는 배전계통에 다수의 분산전원이 연계되었을 때 설치된 각 계전기가 감지하는 고장전류 및 이의 방향성을 이용하여 고장지점을 판별하는 방법과 자동재폐로 차단기-구분개폐기 보호시스템의 협조 알고리즘을 제안하였다.

3.1 조류계산과 사고해석

조류계산과 사고해석은 고장을 감지하고 고장구간을 판별하기 위해 필요하며, 배전계통의 구성, 분산전원의 연계 유무 등의 계통 데이터로부터 조류계산 및 사고해석을 미리 오프라인으로 수행하여 각 계전점의 최대 부하 전류 값과 사고 전류 값을 미리 계산하여 이를 데이터베이스화 한다. 조류계산과 사고해석은 분산전원, 시스템 구성의 변동 등이 있을 경우에는 반드시 다시 수행하여 각 계전점의 전류 값을 계산하여 데이터베이스를 갱신하여야 한다.

3.2 고장감지 및 고장구간 판별

온라인 보호협조에서는 실시간으로 각 계전점의 전류 값을 취득하여 고장을 감지하여야 하고 고장구간을 판별하여야 한다. 제안된 고장감시 방법은

배전계통에 사고가 발생하여 고장이 발생을 하였을 경우 실시간으로 취득된 각 계전점의 전류 값을 정상상태의 조류계산값으로부터 얻어진 최대 부하전류의 2.8~4배가 초과되었을 경우 이를 고장으로 감지한다. 이러한 방법은 일반적으로 사용되는 계전기 최소동작전류 정정 값 설정과 동일한 방법으로 매우 유용한 방법이다. 계전기의 최소동작전류는 부하의 돌입전류 등으로 인하여 발생할 수 있는 불필요한 계전기의 오동작을 방지하기 위함이며, 해

당선로가 전등부하 선로의 경우는 2.8배, 동력부하 선로의 경우는 4.0배로 설정한다[4]. 이러한 방법을 사용함으로써 기존의 방법과 같이 고장검출을 위해 모든 부하점에서 데이터 취득 없이 고장의 감지가 가능하다[3].

일단 고장이 감지되면, 고장구간 판별 방법은 미리 계산되어 데이터베이스화된 사고전류 lookup 테이블과 취득된 계전점의 전류 값을 비교하여 고장구간을 판별한다. 적용되는 배전시스템이 방사상시스템이므로 계전기에서 감지하는 전류의 방향성을 고려하면 기존의 방법[3]보다 쉽게 고장구간을 판별할 수 있다. 전류의 방향성을 고려하게 되면 실제 계통 사고에서 존재하는 고장저항으로 인한 사고전류와 계산 값의 오차로 인한 고장구간 판별의 오차가 생기는 것을 방지할 수 있다.

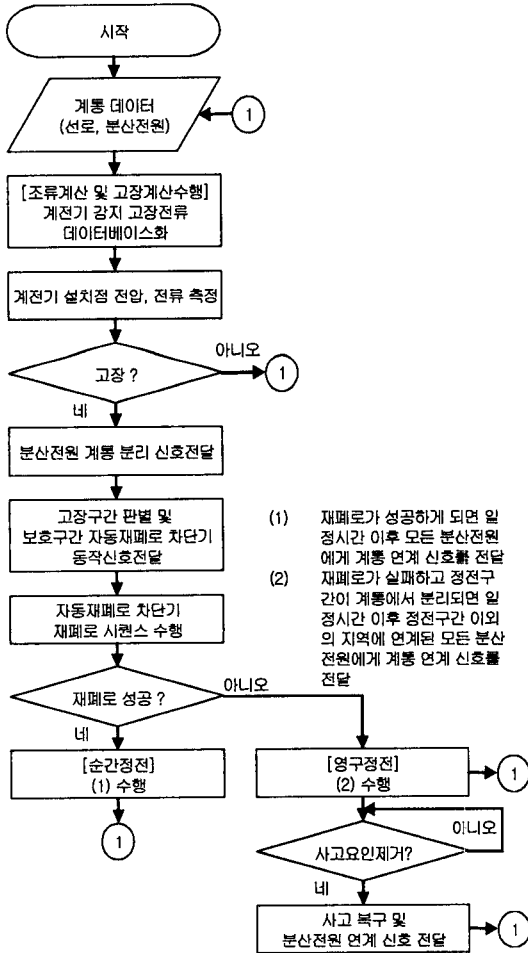


그림 2. 분산전원이 연계된 배전계통의 온라인 자동재폐로 차단기-구분개폐기 보호협조 알고리즘
Fig. 2. On-line recloser-sectionalizer protection algorithms of distribution system with dispersed generation

3.3 자동재폐로 차단기-구분개폐기 보호협조

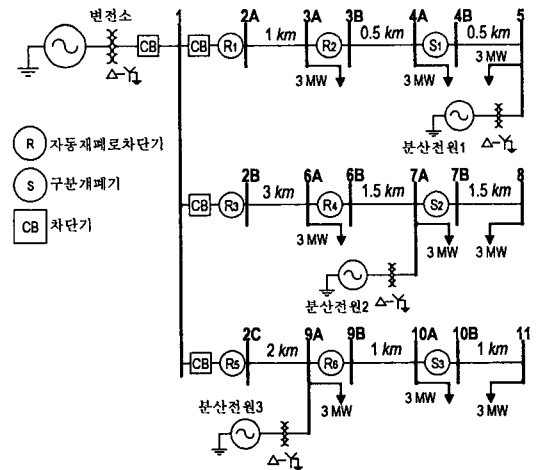


그림 3. 사례연구 배전계통 모델
Fig. 3. A sample distribution system model

배전계통의 설비 및 분산전원의 설비보호를 위해 모든 분산전원은 자동재폐로 차단기가 재폐로 동작을 하기 전에 계통에서 분리되어야 한다. 따라서 사고가 감지되면 배전계통에 연계된 모든 분산전원은 즉시 계통에서 분리되어야 하기 때문에 통신으로 모든 분산전원이 계통에서 즉시 분리되도록 신호를 전

분산전원이 연계된 배전계통의 온라인 보호협조 방안

달한다. 모든 분산전원에 계통 분리신호가 전달되어 계통 분리가 확인되고 고장구간이 판별되면 해당되는 자동재폐로 차단기-구분개폐기는 정해진 보호 시퀀스(sequence)에 의해 순간사고와 영구사고를 구분하기 위해 동작한다. 순간사고와 영구사고에 따른 보호협조 알고리즘은 다음과 같다.

- (1) 순간사고로 재폐로가 성공하게 되면 일정시간 이후 모든 분산전원에 계통 연계신호를 전달하게 된다.
- (2) 영구사고로 재폐로가 실패하고 사고구간이 계통에서 분리되면 일정시간이후 사고구간의의 계통의 모든 분산전원에 계통 연계신호를 전달한다.

3.4 제안된 온라인 보호협조 알고리즘

그림 2에는 본 논문에서 제안된 분산전원이 연계된 배전계통의 온라인 자동재폐로 차단기-구분개폐기 보호협조 알고리즘의 흐름도를 나타내었다.

4. 사례연구

4.1 사례연구 모델

제안된 온라인 자동재폐로 차단기-구분개폐기의 보호협조 알고리즘의 검증을 위한 배전계통 모델은 전형적인 국내 배전계통을 모델링 하였다. 이를 그림 3에 나타내었고 파라미터는 표 1에 나타내었다.

4.2 고장계산 및 고장구간 판별

온라인으로 고장구간을 판별하기 위해서는 분산전원들의 연계 유, 무에 따라 오프라인으로 조류계산과 고장계산을 실시하여 각 계전기가 감지하는 전류의 크기를 데이터베이스화 하여야 한다. 이를 위해 각 계전기가 감지하는 고장전류로서 고장지점을 확인하기 위해 그림 3의 예제 모델 배전계통에 대하여 조류계산 및 모선에서의 1선 지락과 3상 단락고장 해석 시뮬레이션을 실행하였고 이의 결과를 표 2, 표 3 및 표 4에 나타내었다.

각 모선과 모선의 중앙에서 3상 단락사고가 발생하였을 때 각 계전기에서 감지하는 사고전류를 근거로 고장지점을 확인하는 방법을 표 5에 나타내었다. 표 6에는 3상 단락사고 시 각 계전기에 방향성을 부여하여 고장지점을 확인하는 방법을 나타내었다. 각 모선과 모선의 중앙에서 1선 지락사고가 발생하였을 때 각 계전기에서 감지하는 사고전류를 근거로 고장지점을 확인하는 방법을 표 7에 나타내었다. 표 8에는 1선 지락사고 시 각 계전기에 방향성을 부여하여 고장지점을 확인하는 방법을 나타내었다.

사고구간 판별의 예를 들면 3B-4A 모선의 중간지점에서 3상 단락사고가 발생하였을 때, 이때 R_1 이 감지하는 사고전류의 값은 $2.97[pu]$ 이므로 3B-4A 모선 구간이 선택되고, R_2 가 감지하는 사고전류의 값은 $2.97[pu]$ 이므로 3B-4A 모선 구간이 선택되고, S_1 이 감지하는 사고전류의 값이 $0.0903[pu]$ 이므로 3B-4A 모선 구간이 선택된다. R_3, R_4 및 R_5 가 감지하는 사고 전류의 값으로 사고구간을 판별하면 마찬가지로 모두 3B-4A 구간이 선택된다.

표 1. 사례연구 배전계통 모델 파라미터
Table 1. Parameters of the sample distribution system model

전 원	영상 임피던스[%]	$0.257 + j1.336$
	정상, 역상 임피던스[%]	$0.072 + j0.757$
	공급전압[kV]	154
배전용변전소 주변압기	정격용량[MVA]	45/60
	누설 임피던스[%]	$j11$
배전선로 (ACSR 160[mm ²])	영상 임피던스[%/km]	$11.99 + j29.26$
	정상, 역상 임피던스 [%/km]	$3.47 + j7.46$
분산전원	발전기종류	동기발전기
	발전기 정격용량[MW]	2
	발전기 정격전압[V]	480
	발전기 X'd[pu]	0.2
	변압기 정격 전압비 [kV]	0.48/22.9
	변압기 정격 용량 [MVA]	2[MVA]
변압기 누설임피던스 [%]	$j2$	

표 2. 모선사이 부하 전류 값(pu)
(기준 전류 I_{base} : 2.521(kA))

Table 2. Load current between nodes(pu)
(base current I_{base} : 2.521(kA))

모선	2-3	3-4	4-5	2-6	6-7
전류	0.07022	0.04004	0.01001	0.07065	0.04014
모선	7-8	2-9	9-10	10-11	
전류	0.03005	0.07051	0.06015	0.03003	

표 3. 계전기 감지 고장전류 값 : 3상 단락사고(pu)
(기준 전류 I_{base} : 2.521(kA))

Table 3. Relay sensing current : 3-phase fault
(pu)(base current I_{base} : 2.521(kA))

		2A	3A	3B	4A	4B	5
R1	3F	+3.7805	+3.1508	+3.1508	+2.8025	+2.8025	+2.5211
R2	3F	-0.0708	-0.0900	+3.1508	+2.8025	+2.8025	+2.5211
S1	3F	-0.0708	-0.0900	-0.0900	-0.0906	+2.8025	+2.5211
R3	3F	-0.0755	-0.0669	-0.0669	-0.0595	-0.0595	-0.0535
R4	3F	-0.0755	-0.0669	-0.0669	-0.0595	-0.0595	-0.0535
S2	3F						
R5	3F	-0.0790	-0.0680	-0.0680	-0.0605	-0.0605	-0.0544
R6	3F						
S3	3F						
		2B	6A	6B	7A	7B	8
R1	3F	-0.0708	-0.0453	-0.0453	-0.0361	-0.0361	-0.0297
R2	3F	-0.0708	-0.0453	-0.0453	-0.0361	-0.0361	-0.0297
S1	3F	-0.0708	-0.0453	-0.0453	-0.0361	-0.0361	-0.0297
R3	3F	+3.7806	+2.1000	+2.1000	+1.6735	+1.6735	+1.3777
R4	3F	-0.0755	-0.0900	+2.1000	+1.6735	+1.6735	+1.3777
S2	3F					+1.7613	+1.4500
R5	3F	-0.0759	-0.0453	-0.0453	-0.0361	-0.0361	-0.0297
R6	3F						
S3	3F						
		2C	9A	9B	10A	10B	11
R1	3F	-0.0708	-0.0545	-0.0545	-0.0451	-0.0451	-0.0384
R2	3F	-0.0708	-0.0545	-0.0545	-0.0451	-0.0451	-0.0384
S1	3F	-0.0708	-0.0545	-0.0545	-0.0451	-0.0451	-0.0384
R3	3F	-0.0755	-0.0536	-0.0536	-0.0443	-0.0443	-0.0378
R4	3F	-0.0755	-0.0536	-0.0536	-0.0443	-0.0443	-0.0378
S2	3F						
R5	3F	+3.7806	+2.5236	+2.5236	+2.0876	+2.0876	+1.7777
R6	3F			+2.6132	+2.1616	+2.1616	+1.8409
S3	3F					+2.1616	+1.8409

표 4. 계전기 감지 고장전류 값 : 1선 지락사고(pu)
(기준 전류 I_{base} : 2.521(kA))

Table 4. Relay sensing current : single
line-to-ground fault(pu)
(base current I_{base} : 2.521(kA))

		2A	3A	3B	4A	4B	5
R1	1GF	+3.4091	+2.7211	+2.7211	+2.3128	+2.3128	+2.0331
R2	1GF	-0.1822	-0.3427	+2.7211	+2.3128	+2.3128	+2.0331
S1	1GF	-0.1822	-0.3427	-0.3427	-0.3866	+2.3128	+2.0331
R3	1GF	-0.1242	-0.1020	-0.1020	-0.0833	-0.0833	-0.0700
R4	1GF	-0.1242	-0.1020	-0.1020	-0.0833	-0.0833	-0.0700
S2	1GF						
R5	1GF	-0.1463	-0.1322	-0.1322	-0.1069	-0.1069	-0.0889
R6	1GF						
S3	1GF						
		2B	6A	6B	7A	7B	8
R1	1GF	-0.1822	-0.0690	-0.0690	-0.0487	-0.0487	-0.0347
R2	1GF	-0.1822	-0.0690	-0.0690	-0.0487	-0.0487	-0.0347
S1	1GF	-0.1822	-0.0690	-0.0690	-0.0487	-0.0487	-0.0347
R3	1GF	+3.4091	+1.6013	+1.6013	+1.2999	+1.2999	+0.9251
R4	1GF	-0.1242	-0.3362	+1.6013	+1.2999	+1.2999	+0.9251
S2	1GF					+1.7074	+1.2152
R5	1GF	-0.1463	-0.0691	-0.0691	-0.0487	-0.0487	-0.0347
R6	1GF						
S3	1GF						
		2C	9A	9B	10A	10B	11
R1	1GF	-0.1822	-0.0890	-0.0890	-0.0642	-0.0642	-0.0501
R2	1GF	-0.1822	-0.0890	-0.0890	-0.0642	-0.0642	-0.0501
S1	1GF	-0.1822	-0.0890	-0.0890	-0.0642	-0.0642	-0.0501
R3	1GF	-0.1242	-0.0701	-0.0701	-0.0506	-0.0506	-0.0395
R4	1GF	-0.1242	-0.0701	-0.0701	-0.0506	-0.0506	-0.0395
S2	1GF						
R5	1GF	+3.4091	+2.0351	+2.0351	+1.4683	+1.4683	+1.1462
R6	1GF			+2.4577	+1.7732	+1.7732	+1.3842
S3	1GF					+1.7732	+1.3842

본산전원이 연계된 배전계통의 온라인 보호협조 방안

표 5. 고장 구간판별 : 3상 단락사고
(기준 전류 I_{base} : 2.521(kA))

Table 5. Identification of fault location : 3-phase fault(base current I_{base} : 2.521(kA))

	3B-4A	4B-5	6B-7A	7B-8	9B-10A	10B-11
R1	(2.976(pu)) 3B-4A	(2.6618(pu)) 4B-5	(0.0407(pu)) 6B-7A 10B-11	(0.0329(pu)) 7B-8	(0.0498(pu)) 9B-10A	(0.0417(pu)) 10B-11 6B-7A
R2	(2.976(pu)) 3B-4A	(2.6618(pu)) 4B-5	(0.0407(pu)) 6B-7A 10B-11	(0.0329(pu)) 7B-8	(0.0498(pu)) 9B-10A	(0.0417(pu)) 10B-11 6B-7A
S1	(0.0903(pu)) 3B-4A	(2.6618(pu)) 4B-5	(0.0407(pu)) 6B-7A 10B-11	(0.0329(pu)) 7B-8	(0.0498(pu)) 9B-10A	(0.0417(pu)) 10B-11 6B-7A
R3	(0.063(pu)) 3B-4A	(0.0564(pu)) 4B-5	(1.886(pu)) 6B-7A	(1.5256(pu)) 7B-8	(0.0498(pu)) 9B-10A	(0.0409(pu)) 10B-11
R4	(0.063(pu)) 3B-4A	(0.0564(pu)) 4B-5	(1.886(pu)) 6B-7A	(1.5256(pu)) 7B-8	(0.0498(pu)) 9B-10A	(0.0409(pu)) 10B-11
S2				(1.6066(pu)) 7B-8		
R5	(0.064(pu)) 3B-4A	(0.0574(pu)) 4B-5	(0.0407(pu)) 6B-7A	(0.0328(pu)) 7B-8	(2.3066(pu)) 9B-10A	(1.9326(pu)) 10B-11
R6					(2.3066(pu)) 9B-10A	(2.0012(pu)) 10B-11
S3						(2.0012(pu)) 10B-11
판별	3B-4A	4B-5	6B-7A	7B-8	9B-10A	10B-11

표 6. 방향성을 고려한 구간판별 : 3상 단락사고
(기준 전류 I_{base} : 2.521(kA))

Table 6. Identification of fault location considering current direction : 3-phase fault(base current I_{base} : 2.521(kA))

	3B-4A	4B-5	6B-7A	7B-8	9B-10A	10B-11
R1	(2.976(pu)) 3B-4A	(2.6618(pu)) 4B-5				
R2	(2.976(pu)) 3B-4A	(2.6618(pu)) 4B-5				
S1		(2.6618(pu)) 4B-5				
R3			(1.886(pu)) 6B-7A	(1.5256(pu)) 7B-8		
R4			(1.886(pu)) 6B-7A	(1.5256(pu)) 7B-8		
S2				(1.6066(pu)) 7B-8		
R5					(2.3066(pu)) 9B-10A	(1.9326(pu)) 10B-11
R6					(2.3066(pu)) 9B-10A	(2.0012(pu)) 10B-11
S3						(2.0012(pu)) 10B-11
판별	3B-4A	4B-5	6B-7A	7B-8	9B-10A	10B-11

표 7. 1선 지락사고 고장구간 판별
(기준 전류 I_{base} : 2.521(kA))

Table 7. Identification of fault location : single line-to-ground fault (base current I_{base} : 2.521(kA))

	3B-4A	4B-5	6B-7A	7B-8	9B-10A	10B-11
R1	(2.516(pu)) 3B-4A	(2.172(pu)) 4B-5	(0.0588(pu)) 6B-7A 10B-11	(0.0417(pu)) 7B-8	(0.0766(pu)) 9B-10A 2B-6A	(0.0571(pu)) 10B-11 6B-7A
R2	(2.516(pu)) 3B-4A	(2.172(pu)) 4B-5	(0.0588(pu)) 6B-7A 10B-11	(0.0417(pu)) 7B-8	(0.0766(pu)) 9B-10A 2B-6A	(0.0571(pu)) 10B-11 6B-7A
S1	(0.364(pu)) 3B-4A	(2.172(pu)) 4B-5	(0.0588(pu)) 6B-7A 10B-11	(0.0417(pu)) 7B-8	(0.0766(pu)) 9B-10A 2B-6A	(0.0571(pu)) 10B-11 6B-7A
R3	(0.0926(pu)) 3B-4A 2C-9A	(0.0766(pu)) 4B-5 2C-9A	(1.451(pu)) 6B-7A	(1.112(pu)) 7B-8	(0.0603(pu)) 9B-10A	(0.0450(pu)) 10B-11
R4	(0.0926(pu)) 3B-4A 2C-9A	(0.0766(pu)) 4B-5 2C-9A	(1.451(pu)) 6B-7A	(1.112(pu)) 7B-8	(0.0603(pu)) 9B-10A	(0.0450(pu)) 10B-11
S2				(1.461(pu)) 7B-8		
R5	(0.1195(pu)) 3B-4A 2B-6A	(0.979(pu)) 4B-5 2B-6A	(0.059(pu)) 6B-7A	(0.0417(pu)) 7B-8	(1.752(pu)) 9B-10A	(1.307(pu)) 10B-11
R6					(2.115(pu)) 9B-10A	(1.578(pu)) 10B-11
S3						(1.578(pu)) 10B-11
판별	3B-4A	4B-5	6B-7A	7B-8	9B-10A	10B-11

표 6 및 표 8과 같이 각 계전기가 감지하는 전류에 방향성을 부여하면 보다 쉽고 정확하게 사고지점을 판별할 수 있음을 알 수 있다.

표 8. 방향성을 고려한 고장구간 판별 : 1선 지락사고
(기준 전류 $I_{base} : 2.521(kA)$)

Table 8. Identification of fault location
considering current direction : single
line-to-ground fault(base current $I_{base} :$
 $2.521(kA)$)

	3B~4A	4B~5	6B~7A	7B~8	9B~10A	10B~11
R1	(2.516(pu)) 3B~4A	(2.172(pu)) 4B~5				
R2	(2.516(pu)) 3B~4A	(2.172(pu)) 4B~5				
S1		(2.172(pu)) 4B~5				
R3			(1.451(pu)) 6B~7A	(1.112(pu)) 7B~8		
R4			(1.451(pu)) 6B~7A	(1.112(pu)) 7B~8		
S2				(1.461(pu)) 7B~8		
R5					(1.752(pu)) 9B~10A	(1.307(pu)) 10B~11
R6					(2.115(pu)) 9B~10A	(1.578(pu)) 10B~11
S3						(1.578(pu)) 10B~11
판별	3B~4A	4B~5	6B~7A	7B~8	9B~10A	10B~11

4.3 보호협조 절차

고장사례를 통해 고장구간을 판별하고 자동재폐로 차단기와 구분개폐기의 보호협조 절차를 설명하고 제안한 알고리즘의 유효성을 검증한다.

4.3.1 모선 4B~5 사이의 영구사고 사례

4B~5번 모선의 중간지점에서 3상 영구사고가 발생한 경우 고장구간 판별 및 보호협조 절차는 다음과 같다.

- 1) 고장 전류의 흐름은 그림 4에 나타내었다. 계전기 감지전류를 바탕으로 표 3을 통해 고장구간을 판별하면 표 6과 같이 4B~5 모선 구간이 선택이 된다.
- 2) 표 6에서 고장구간이 4B~5 모선사이로 판별되

- 면 고장 보호구간의 보호협조기기는 R_2-S_1 이 선택되고 R_1 이 후비 보호장치로 선택된다.
- 3) 모든 분산전원에 계통 분리신호를 전달한다.
 - 4) R_2 는 S_1 과 협조하여 순간사고와 영구사고를 판별하기 위한 재폐로 동작을 수행한다.
 - 5) 재폐로 실패 후 S_1 의 동작으로 고장구간(4B~5 모선 구간)이 전원에서 분리된다.
 - 6) 고장구간의외에 연계된 분산전원에 계통 연계신호를 전달한다.
 - 7) 변경된 선로 구성 및 분산전원의 정보를 통해 데이터베이스를 갱신한다.
 - 8) 고장요인이 제거되면 고장구간을 복구하고 복구구간의 분산전원을 재연계한다.

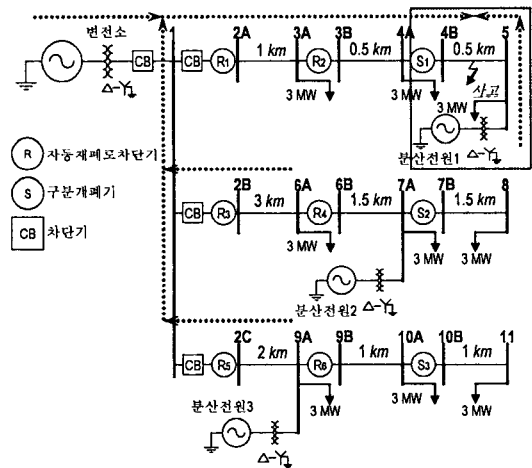


그림 4. 모선 4B~5에서 고장 발생 시 고장전류 흐름
Fig. 4. Fault current flows when a fault occurs between node 4B and 5

4.3.2 모선 6B~7A 사이의 영구사고 사례

6B~7A번 모선의 중간지점에서 3상 영구사고가 발생한 경우 고장구간 판별 및 보호협조 절차는 다음과 같다.

- 1) 고장 전류의 흐름은 그림 5에 나타내었다. 계전기 감지전류를 바탕으로 표 3을 통해 고장구간을 판별하면 표 6과 같이 6B~7A 모선 구간이 선택이 된다.
- 2) 고장구간이 6B~7A 모선사이로 판별되면 고장 보호구간의 보호협조기기는 R_4 가 선택되고 R_3

분산전원이 연계된 배전계통의 온라인 보호협조 방안

가 후비 보호장치로 선택된다.

- 3) 모든 분산전원에 계통 분리신호를 전달한다.
- 4) R₄는 순간사고와 영구사고를 판별하기 위한 재폐로 동작을 수행한다.
- 5) 재폐로 실패 후 R₄의 동작으로 고장구간(6B~7A 모선 구간)이 전원에서 분리된다.
- 6) 고장구간 외에 연계된 분산전원에 계통연계 신호를 전달한다.

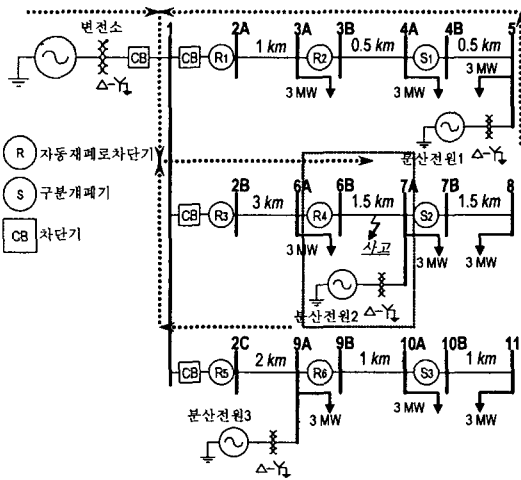


그림 5. 모선 6B~7A에서 고장 발생시 고장전류 흐름
Fig. 5. Fault current flows when a fault occurs between node 6B and 7

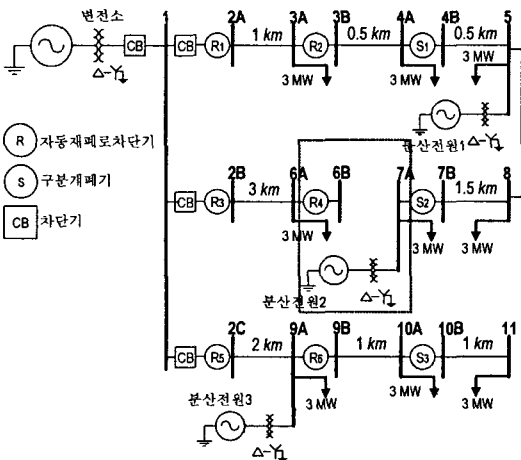


그림 6. 모선 6B~7A 고장구간 분리 후 사고구간 복구의 예
Fig. 6. A load restoration case example after isolation of fault between node 6B and 7A

- 7) 고장구간이 분리되고 사고구간을 타 선로에 연계한다(그림 6 참조). 이 때 변경된 선로 구성 및 분산전원의 정보를 통해 데이터베이스를 갱신한다.
- 8) 고장요인이 제거되면 고장구간 및 선로구성을 복구한다. 또한 복구구간의 분산전원을 재연계한다.

4.3.3 9B 모선에서 순간사고사례

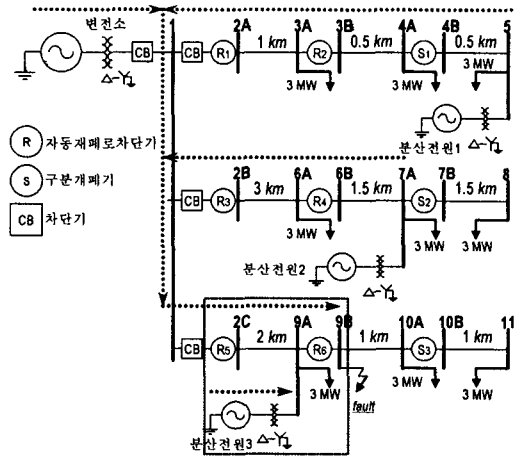


그림 7. 모선 9B에서 고장 발생 시 고장전류 흐름
Fig. 7. Fault current flows when a fault occurs node 9B

9B 모선에서 삼상 순간사고가 발생한 경우 고장구간 판별 및 보호협조 절차는 다음과 같다.

- 1) 고장 전류의 흐름을 그림 7에 나타내었다. 계전기 감지전류를 바탕으로 표 3을 통해 고장구간을 판별하면 표 6과 같이 9B모선이 선택이 된다.
- 2) 고장구간이 9B 모선으로 판별되면 고장 보호구간의 보호협조기기는 R₆가 선택되고 R₆가 후비 보호장치로 선택된다.
- 3) 모든 분산전원에 계통 분리신호를 전달한다.
- 4) R₆는 순간사고와 영구사고를 판별하기 위한 재폐로 동작을 수행한다.
- 5) 재폐로 성공을 확인한다.
- 6) 연계된 분산전원에 계통 연계신호를 전달한다.
- 7) 변경된 분산전원의 정보를 통해 데이터베이스를 갱신한다.

5. 결 론

본 논문에서는 분산전원이 연계된 배전계통에서 기존 보호기기 보호협조 문제점에 대해 살펴보았으며, 신속한 고장 제거 및 고장복구를 위해 계전기가 감지하는 고장전류의 크기 및 방향성을 이용하여 고장 지점을 찾는 방법 및 보호협조 알고리즘을 제안하였다. 전형적인 국내 배전계통 모델에 분산전원의 연계를 가정한 사례연구를 통해 제안한 보호협조 알고리즘의 유용성을 확인하였다. 제안한 온라인 보호협조를 구축하기 위해서는 다음과 같은 전제 조건이 필요하다.

- 1) 배전계통의 자동재폐로 차단기와 재폐로계전기는 디지털 계전기능이 있어야 하고 원격 데이터 송수신 및 제어가 가능하여야 한다.
- 2) 분산전원의 원격 감시제어 기능이 필요하다
- 3) 계전기와 분산전원의 원격 통신이 가능한 고속 네트워크 구축이 필요하다

최근 전력IT분야의 중요한 분야인 IEC61850에 의한 변전소 자동화 연구가 활발하게 진행되고 있어 제안한 알고리즘이 분산전원이 연계된 자동화 배전계통의 보호협조 알고리즘으로 유용한 자료가 될 것으로 믿는다.

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성·지원사업에 의해 작성되었습니다.

References

- [1] 최준호, 김재철, 김재연, "열병합발전시스템 배전계통 도입전망 및 운용대책", 대한전기학회 제48권 3호, pp. 16-23, 1999. 3.
- [2] Sukumar M. Brahma; Adly A. Girgis, "Effect of Distributed Generation on Protective Device Coordination in Distribution System", Power Engineering, LESCOPE '01, Page(s):115-119, 2001.
- [3] Sukumar M. Brahma; Adly A. Girgis, "Development of Adaptive Protection Scheme for Distribution Systems With High Penetration of Distributed Generation", IEEE Trns. on PWRD, Vol. 19, No. 1, pp. 56-63, Jan. 2004.
- [4] 한국전력공사 배전처, 배전보호 기술서, 1995.
- [5] 최준호 외, "배전계통에 연계 시 열병합 발전시스템의 개선된 보호협조 방안에 관한 연구", 대한전기학회 Vol.49A, No.6, JUN.2000.
- [6] 최준호, 분산전원의 배전계통 분산전원의 운용 및 통합화 전략, 숭실대학교, 2001.

◇ 저자소개 ◇

최준호 (崔峻豪)

1970년 7월 30일생. 1996년 숭실대학교 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2002년 서울대학교 전기공학과 BK21 박사후 연구원. 현재 전남대학교 전기공학과 조교수

노경수 (盧景洙)

1963년 3월 27일생. 1985년 서울대학교 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1997년 미국 Virginia Tech 전기공학과 졸업(박사). 2005년 미국 Arizona State University 방문교수. 현재 동국대학교 전기공학과 부교수.

김재철 (金載哲)

1965년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 공대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기제어시스템공학부 교수.