

신재생에너지 시스템이 연계된 22.9[kV] 배전계통의 개선된 보호협조 방안 연구

°최동만, 최준호, 노경수, 문승일, 김재철**

전남대학교, 동국대학교, 서울대학교, 송실대학교**

A Study on the Advanced Protective Coordination Schemes of 22.9[kV] Distribution System Interconnected New Renewable Energy System

° Dong-Man Choi, Joon-Ho Choi, Kyoung-Soo Ro, Seung-Il Moon, Jae-Chul Kim**
Chonnam National Univ., Dongguk Univ., Seoul National Univ., Soongsil Univ.**

Abstract - Recently, There has been growing interest in new renewable energy systems with high-energy efficiency due to the increasing energy consumption and environmental pollution problems. but an insertion of new renewable energy systems to existng power distribution systems can cause several problems such as voltage variations, harmonics, protective coordination, increasing fault current etc, because of reverse power. This paper was applied to Sukumar M, Brahma, A. Girgis[1] proposal schemes and identilys the faulted section performing short-circuit analysis by MATLAB programs to 22.9[kV] distribution system interconnected a large number of new renewable energy system and was analyzed on protective coordination between reclose and Sectionalizer

1. 서 론

최근의 경제 발전으로 에너지 소비 증가 그리고 환경오염등의 문제로 부지 확보나 환경문제등으로 인해 원자력 발전, 화력 같은 대형 발전 설비의 확충이 어려워지고 있다. 또한 국내의 경우 에너지원을 수입에 의존하고 있어 향후 에너지 수급도 어려워질 전망이다. 따라서 부지 확보 및 환경오염의 위험이 적은 신재생에너지 시스템에 대한 관심이 한층 더 고조 되고 있다. 미래에는 기존의 배전계통에 다수의 신재생에너지 시스템이 연계 될 것으로 예상된다. 그러나 이러한 신재생에너지 시스템을 배전계통과의 연계시 역조류로 인해 전압변동, 고조파, 보호협조, 고장전류 증가 등의 문제를 일으키므로 이에 대한 적절한 보호협조 연구가 필요하다.

현 우리나라 22.9[kV] 배전계통은 송전 시스템과는 달리 단방향 전원에 의해 방사상(Radial)으로 운전되고 있으며 보호 시스템 또한 단방향 조류에 기초하여 구성되어 있다. 그러나 배전계통에 신재생에너지 시스템 연계시 기존의 단방향 전원에서 양방향 전원으로 전환됨에 따라 고장전류의 증가에 따른 보호장치 설정치 정정 및 보호협조의 재구성 등과 같은 보호 협조에 있어서 발생할 수 있는 문제점과 현 배전계통 보호 시스템을 구성하고 있는 리클로저와 구분 개폐기와의 협조에 있어서 발생할 수 있는 문제점에 대한 충분한 연구가 필요하다.[2]

본 논문에서는 Sukumar M[1]이 제안한 방안을 적용해 현 우리나라 22.9[kV] 배전계통에 다수의 신재생에너지 시스템 연계를 가정하여 사고 감지 및 사고 지점을 찾고 MATLAB 프로그램으로 단락사고 해석과 조류계산을 실행하여 전압 전류 공급값과 각모선의 고장전류 테이블, 모선사이에서 고장 확인 테이블을 작성하여 고장 지점을 확인하고 리클로저와 섹셔널라이저 보호협조가 이루어짐을 보였다.

2. 본 론

기존 배전계통의 보호 시스템 및 신재생에너지 시스템 연계시 보호협조 상태를 분석하고 연계된 신재생에너지

시스템이 고장 시 고장전류에 미치는 영향 등을 분석하기 위해서는 우선 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 시스템 모델에 대한 정확한 이해가 필요하다면 그 모델은 다음과 같다.

2.1 배전계통 보호기기

2.1.1 리클로저

리클로저는 배전계통 보호기기 중 전위와 후위 보호장치 사이의 보호협조를 하는데 중추적 역할을 담당하며 순간 사고 시 선로를 순시로 차단한 후 자동으로 재폐로함으로써 전력공급의 신뢰도를 향상시키며 영구사고가 일어났을 경우 설정된 동작에 의해서 선로를 차단함으로써 고장구간을 배전계통으로부터 분리시키는 기능을 갖는다. 동작 특성을 위해서 순시동작곡선과 지연동작곡선을 가지며 총 4회까지 정정이 가능하다. 순시동작곡선은 영구사고가 아닌 경우 동작하며 지연동작곡선은 전위에 퓨즈갈고니 보호기들이 작동하기 위하여 동작한다. 그림 1의 2F1D(2번 순시동작과 1번 지연동작)는 가장 많이 적용하는 리클로저의 동작 특성으로 타 보호장치와 일반적으로 보호협조가 잘 이루어진다.[4]

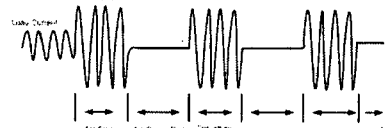


그림 1. 리클로저 동작

Fig. 1 Fault current waveform by reclosing operation

2.1.2 섹셔널라이저

섹셔널라이저는 후비 보호장치인 리클로저의 동작횟수를 카운트하여 동작하며 리클로저 트립 동작에 의해 선로가 무전압 상태가 되었을 때 고장구간을 분리하므로 일반적으로 후비 보호장치와 직렬로 연결하여 사용한다. 즉 섹셔널라이저는 자동으로 제어되는 배전선로의 개폐기이며 고장전류를 차단할 수 있는 능력은 없으므로 T-C특성이 불필요하고 다른 보호장치와 협조를 이루기가 용이하다. 그 동작에 있어서는 최소동작 전류 이상의 전류가 흐르면 리클로저의 동작을 카운트 할 준비를하며 후비 보호장치인 리클로저가 동작을 시작하면 그 동작 횟수를 카운트하여 동작하게 된다. 예를 들어 섹셔널라이저의 동작 셋팅치를 2회를 가정하였을 경우 위의 그림 1의 리클로저 동작에 따라 2nd Dead time에서 섹셔널라이저가 동작하게 된다.[4]

2.2 신재생에너지 시스템의 배전계통 연계시 사고 지점 확인 방법 제시

신재생에너지 시스템의 배전계통 연계 운전 중 고장시 고장지점을 확인하는 것은 고장 복구와 제거 차원에서 매우 중요하다. 본 절에서는 각 발전기의 고장전류 기여율 이용하여 고장 지점을 확인하고자 한다.[1]

2.2.1 Off line 조류계산과 단락사고계산

이 방법은 다른 상을 포함한 모든 고장에 대한 조류계산과 단락사고 해석이 필요하다. 이 해석은 고장 전류뿐만 아니라 주전원과 각 신재생에너지 시스템으로부터 고장전류 기여를 확인 할 수 있다. 조류계산과 단락사고 해석은 신재생에너지, 부하, 시스템 구성의 변동등이 있을 경우에는 갱신 해야 한다. 단락 사고해석은 1선지락 고장 및 3상 단락사고를 행하였다.[1]

2.2.2 고장감지와 고장종류 결정

주전원과 모든 신재생에너지 시스템의 전류페이저는 항상 이용 가능하기에 이로써 고장을 감지하고 고장 종류를 결정하고자 한다. 정상상태 동작 조건에서 이 전류페이저의 합은 시스템의 전체부하와 같으나 고장 시 이 합은 전체부하를 초과하게 될것이다. 또한 고장 전류는 모든 전원에서 전류기여의 합과 같다. 일단 시스템에서 고장을 감지하면, 각 상의 전체 고장 전류는 다음 간단한 방정식을 사용하여 결정 할 수 있다.[1]

$$[I_{fabc}] = \sum_{i=1}^n [I_{fabc}]_{sourcei} \quad (1)$$

2.2.3 on line에서 고장 지점 확인

Off line 조류계산과 단락사고 해석에 의해 각 전원의 고장 전류를 이미 알고 있으므로 이를 이용하여 고장 지점을 알 수 있다. 고장 지점이 모선 i-j 사이에 있다면 전원으로부터 고장 전류 기여는 전원에 의해 계속적으로 증가 할 수도 있고, 감소 할 수도 있다. 이는 각 전원에서 고장 기여는 각 전원에 항상 있다는 의미이다. 이 방법은 다수의 분산전원이 배전계통에 연결 되었을 경우 매우 효율적이다.[1]

2.2.4 예러 원인

Sukumar M[1]은 예러는 고장 저항일 수도 있다고 하였다. 왜냐하면 단락고장 해석에서 고장저항을 이상적인 저항인 "0"으로 계산 했기 때문에 저항 고장일 경우에는 고장 위치가 인접해 있는 구간으로 확인 될 수도 있다. 그러나 예러의 원인인 고장저항은 대부분 무시 할 수 있다. Burkel[3]의 4년간의 고장 연구 보고서에 의하면 기록된 고장에서 관측된 고장 저항은 무시할수 있을 만큼 실제 값과 계산된 값이 근사하다는 결론을 내렸다.

2.3 사례연구

2.3.1 신재생에너지 시스템이 연계된 배전계통 모델

배전계통 모델은 먼저 상위계통인 송전계통을 등가화한 무한 모선과 배전용 변압기, 모선, 선로, 부하 등으로 구성하였고 그림2는 배전계통 모델의 단선도를 나타내었으며 표1는 시뮬레이션을 위해 사용된 배전계통 모델의 입력 파라미터를 나타낸다.

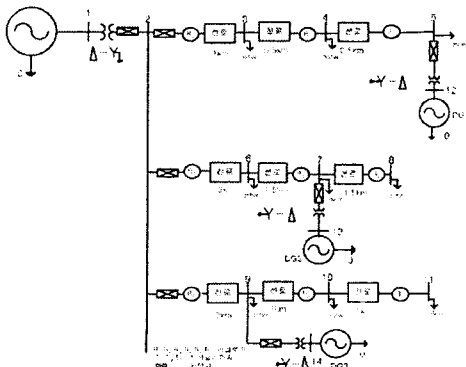


그림 2 신재생에너지시스템이 연계된 배전계통 단선도

Fig.2 One-line diagram of the power distribution system interconnected Renewable Systems

표1 배전계통 모델 입력 파라미터

Table1. Input parameters of the power distribution system model

전원측	영상분 임피던스(Z_0 [%])	0.257+j1.336	
	정상,역상분 임피던스 (Z_1, Z_2 [%])	0.072+j0.757	
	공급전압[kV]	154	
배전용변전소 주변합기	정격용량[MVA]	45/60	
	임피던스(Z_0 [%])	j1	
배전선로 (ACSR 1600[mm]²)	영상분 임피던스(Z_0 [%/km])	11.99+j29.26	
	정상, 역상분 임피던스 (Z_1, Z_2 [%/km])	3.47+j7.46	
신재생에너지 시스템	발전기종류	동시발전기	
	정격용량[MVA]	2	
	정격전압[V]	480	
	X_d [p.u.]	0.2	
	변압기		480(V)
			480V/22.9kV
			2MVA
		j2	

2.3.2 고장 지점 확인

Sukumar M[1]이 제안한 방안을 현 우리나라 계통에 평가하기 위하여 그림 2의 등가 모델에 MATLAB 프로그램 사용하여 각 전원과 모선에서의 1선지락과 3상 단락고장 해석 및 조류계산을 실행하였다. 표2는 조류계산에 의해 계산된 전원 전류 공급 값이다. 표3은 1선 지락 고장계산과 3상 고장계산으로 얻어진 각 모선의 고장 전류값이다. 표4와5는 각 모선과 모선 중앙에서 3상단락 고장과 1선지락고장 확인 테이블이며, 팔호안의 전류값은 모선과 모선사이의 전류값으로 이 지점에서 고장이 발생했을 것을 보여주기 위한 것이다. 표 아래 고장 지점 부분은 이 모선과 모선사이에서 고장 지점이 확인 되었음을 나타내고 있다. 표2와 표3의 각 전원의 고장 전류 값과 전원 전류 공급값을 비교하면 고장 전류값이 총 부하 전류값보다 크다는 것을 알 수 있다. 위 2.3.2절에 설명된 것처럼 고장 전류값이 총 부하 전류값보다 크므로 고장으로 판단하였다. 고장이 감지 되었으므로 고장 지점을 확인하기 위해 각 전원의 고장전류 기여도 테이블을 가지고 고장 지점을 확인할 수 있다. 예로서 모선4~5 중앙에서 3상단락고장 및 1선지락고장이 발생했다고 가정해보자. 전류값을 확인한 후 표3을 통해 고장 지점을 확인 할 수 있다. 표4,5는 고장지점이 확인된 모선을 정리한 테이블이다. 주전원과 신재생에너지1,2,3 모두에서 4~5모선 사이에 고장 지점이 있음을 정확히 확인 할 수 있다. 1선지락 고장에서도 4~5모선으로 확인 되었다.

표2 조류계산 결과 전원 전류공급값

Table2 Source Current Supply from Load Flow Result

(기준 전류 I_B : 2.521[kA])

주전원	0.221
신재생에너지 시스템1	0.0278
신재생에너지 시스템2	0.0233
신재생에너지 시스템3	0.0269
전체부하 고장전류	0.299

표3 각 모선의 고장 전류

Table3 Fault Current of each Bus (기준 전류 I_b: 2.521kA)

모선번호		3	4	5	6	7	8	9	10	11	
주전원	조류 계산	0.221[p.u.]									
	1선 지락	2.849	2.499	2.269	1.776	1.582	1.105	2.272	1.639	1.279	
	3상 단락	3.016	2.682	2.413	2.009	1.601	1.318	2.416	1.998	1.702	
신재생 에너지 시스템1	조류 계산	0.0278[p.u.]									
	1선 지락	0.085	0.084	0.085	0.040	0.035	0.025	0.051	0.037	0.028	
	3상 단락	0.090	0.091	0.091	0.045	0.036	0.029	0.055	0.045	0.039	
신재생 에너지 시스템2	조류 계산	0.0233[p.u.]									
	1선 지락	0.067	0.056	0.050	0.079	0.089	0.063	0.050	0.036	0.029	
	고장 해석	0.067	0.059	0.054	0.09	0.091	0.075	0.054	0.044	0.038	
신재생 에너지 시스템3	조류 계산	0.0269[p.u.]									
	1선 지락	0.063	0.056	0.051	0.040	0.035	0.025	0.066	0.062	0.048	
	고장 해석	0.068	0.06	0.054	0.045	0.036	0.029	0.091	0.075	0.064	
전체 고장전류	조류 계산	0.290[p.u.]									
	1선 지락	3.061	2.694	2.456	1.934	1.707	1.215	2.458	1.773	1.384	
	고장 해석	3.241	2.892	2.611	2.188	1.761	1.45	2.613	2.162	1.841	

표4 각 모선 사이에서 3상단락고장 확인
Table4 Three Phase Fault Identification between each Bus

(기준 전류 I_b: 2.521kA)

	3-4 모선 (2.849p.u.)	4-5 모선 (2.576p.u.)	6-7 모선 (1.863p.u.)	7-8 모선 (1.457p.u.)	9-10 모선 (2.208p.u.)	10-11 모선 (1.849p.u.)
주전원	3-4	4-5	6-7, 10-11	7-8	9-10	6-7, 10-11
신재생 에너지 시스템1	3-4	4-5	6-7, 10-11	7-8	9-10	6-7, 10-11
신재생 에너지 시스템2	3-4	4-5	6-7, 7-8	7-8	9-10	10-11
신재생 에너지 시스템3	3-4, 10-11	4-5	6-7	7-8	9-10	10-11
고장 지점	3-4	4-5	6-7	7-8	9-10	10-11

표5 각 모선 사이에서 1선지락고장 확인
Table4 Single line Ground Fault Identification between each Bus

(기준 전류 I_b: 2.521kA)

	3-4 모선 (2.674p.u.)	4-5 모선 (2.293p.u.)	6-7 모선 (1.664p.u.)	7-8 모선 (1.329p.u.)	9-10 모선 (1.956p.u.)	10-11 모선 (1.456p.u.)
주전원	3-4	4-5, 9-10	6-7, 9-10	7-8, 10-11	9-10	7-8, 10-11
신재생 에너지 시스템1	3-4, 4-5	3-4, 4-5	6-7, 9-10	7-8	9-10	7-8, 10-11
신재생 에너지 시스템2	3-4	4-5	6-7, 7-8	7-8	9-10	10-11
신재생 에너지 시스템3	3-4, 10-11	4-5, 10-11	6-7	7-8	9-10	4-5, 10-11
고장 지점	3-4	4-5	6-7	7-8	9-10	10-11

2.3.3 고장 발생시 리클로저와 섹셔널라이저의 보호협조

이 절에서는 존(구역) 개념을 도입하여[1] 현 우리나라 배전계통에 신재생에너지 시스템을 연계시 리클로저와 섹셔널라이저 보호협조를 살펴 보겠다. 리클로저와 섹셔널라이저를 기준으로 존을 다음과 같이 구분하겠다.

존1: 주전원과 DG1, 존2: DG2, 존3: DG3.

다음은 고장 지점을 확인하는 절차이다.

- 1) off line 조류계산과 단락고장해석 실행
- 2) 조류계산 결과 전원전류공급값과 각 모선의 고장전류 테이블 작성
- 3) 각 모선 사이에서 1선지락고장 및 3상단락고장 확인 테이블 작성하여 고장 지점 확인
- 4) 고장발생시 신재생에너지 시스템 분리
 - 존1의 5번 모선에서 고장이 발생하였을 경우
 - 보호협조해야 하는 기기들은 R1과 S2이다. 신재생에너지 시스템이 분리되면 R1이 재폐로하여 순간고장과 영구고장을 판별하게 된다 순간고장시는 동기화 검사를 통해 정상상태로 운전하게 된다. 영구고장시 리클로저 R1이 트립되기전에 섹셔널라이저가 동작하여 고장을 제거하게 된다.
 - 존2의 7번 모선에서 고장이 발생하였을 경우
 - 보호기기는 R4이다. 존1과 마찬가지로 신재생에너지 시스템이 분리되면 리클로저 R4가 재폐로 하여 순간고장과 영구고장을 판별한다. 순간고장시는 존1 5모선 고장 경우와 같고 영구고장시에는 리클로저 R4가 트립하여 고장을 제거하게 된다.
 - 존3의 9번 모선에서 고장이 발생하였을 경우
 - 이 경우도 존1과 존2와 마찬가지로 신재생에너지 시스템이 분리되면 리클로저 R5가 재폐로 하여 순간고장과 영구고장을 판별한다. 순간고장시에는 위 두 경우와 같고 영구고장시에는 리클로저 R5가 트립하여 고장을 제거하게 된다.

3. 결 론

신속한 고장지점 확인은 고장전류가 고장 선로뿐만 아니라 인접 선로에 영향을 끼치는 것을 방지 할 수 있고 인접선로 고장에 대해 분산전원이 불필요하게 계통으로부터 분리되는 것을 예방 할 수 있다. 본 논문에서는 Sukumar M[1] 제안한 방안인 각 전원의 전류기여를 이용하여 고장 지점을 확인하기 위해 다수의 신재생에너지 시스템을 현 우리나라 배전계통에 연계하여 MATLAB 프로그램으로 조류계산과 3상 단락 및 1선지락 고장계산을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과인 각 전원전류 공급값과 3상 단락과 1선지락 고장 전류값을 이용 고장 지점 확인에 사용하여 각 모선과 모선 중앙에서 고장을 모의하여 결과 테이블인 표4,5를 작성 하였다. 표4,5에서 모든 모선에서의 고장 지점을 확인 할 수 있었다. 또한 존(구역) 개념 도입으로 각 존의 어느 모선에서의 고장일지라도 신재생에너지 시스템의 손상 없이 보호기기 상호간의 보호 협조가 이루어짐을 알 수 있었다.

본 연구는 전력선행기술의 재원을 받아 (재) 기초 전력연구원(R-2004-B-125) 주관으로 수행된 과제임

[참 고 문 헌]

[1] Sukumar M. Brahma, A. Girgis, "Development of Adaptive Protection Scheme for Distribution System With High Penetration of Distributed Generation" IEEE Trans. ,vol.19,No.1,January,2004.
 [2] 최준호,정성교외, "배전계통에 연계된 열병합발전 시스템의 개선된 보호협조 방안에 관한 연구", 대한 전기학회지, Vol 49A, No6, pp 280-288, Jun.2000년.
 [3] J.J.Burke, "Power Distribution Engineering", New York: Marcel Dekker.
 [4] 한국전력공사 배전처, 배전보호기술서, 1995