Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 12, No. 5 pp. 2279-2284, 2011

DOI: 10.5762/KAIS.2011.12.5.2279

분산전원이 도입된 배전계통의 보호협조 해석방법

김재언[1*], 김의환[2]
[1]충북대학교 전기공학부, [2]한전전력연구원

Protection Coordination Analysis for Distribution Systems Integrated with Distributed Generation

Jae-Eon Kim[1*] and Eui-Hwan Kim[2]
[1]**Department of Electrical Engineering, Chungbuk National University**
[2]**Korea Electrical Power Company, Research Institute**

요 약 기존의 수지상 배전계통은 사고 등에 대한 설비보호 및 전력공급 신뢰도 향상을 위하여 과전류보호협조방식을 채택하고 있다. 국내 배전계통의 경우, 그 보호방식 협조체계는 배전용변전소 동일 변압기 동일 모선에서 다수의 배전선이 각각 CB(변전소 차단기)를 통하여 인출되어 각 배전선로 이하에서 사고발생시 고장전류를 검출하여 해당 CB를 차단하도록 되어있다. 그러나, 이와 같은 보호방식을 채용하고 있는 배전계통에 분산전원이 도입될 경우 변전소 인출차단기의 차단용량은 영향을 받게 되므로 충분한 검토가 필요하다. 본 논문에서는 분산전원 도입시, 국내 배전용 변전소의 인출차단기에 대한 차단용량을 초과하지 않는 보호협조방법을 제시하고, 이를 PSCAD-EMTDC 계통해석 S/W Tool에 의하여 모의하여 검증하였다.

Abstract In most of radial distribution systems, the overcurrent protection coordination is adopted for the protection of apparatus and the improvement of electrical power system reliability. The protection coordination structure in distribution substation is composed of several circuit breakers(CB) with distribution lines originating from one substation bus under one transformer, which trip for their fault current. But sufficient analysis is necessary for the capacity of CB's in distribution systems with several distribution generations(DG). In this paper, a protection coordination method not to exceed the traditional capacity of CB's was proposed and certified through simulation by the PSCAD-EMTDC S/W.

Key Words : Protection Coordination, Distribution systems, Circuit Breaker, Distributed Generation

1. 서론

2009년도 스마트그리드 구축 및 개발과 관련된 국가사업이 활발히 전개되면서 태양광발전, 풍력발전 등의 분산전원이 단방향 전력조류와 과전류 보호방식의 특징을 갖는 기존 배전계통에 불특정 다수 도입될 것으로 예상된다. 기존 수지상 배전계통은 전력설비보호 및 인체안전 등을 위하여 선로상의 고장으로 인한 과전류를 검출하여 해당 선로상에 설치되어 있는 차단기를 개방하는 보호협조체제로 되어 있다. 특히 배전용변전소의 경우, 동일변압기 동일모선으로부터 다수의 배전선이 각각 차단기(CB)를 통하여 인출되어 배전선마다 독립적으로 해당선로의 사고발생시 고장전류를 검출하여 차단하도록 하는 보호방식이 적용되고 있다[1-3]. 그러나, 이와 같은 배전계통에 분산전원이 다수 도입되는 경우, 부하만을 고려하여 적용되고 있는 과전류방식의 보호협조체제에 여러 가지 문제점이 일어날 수 있다. 참고문헌[6-9]의 논문들에서는 주로 배전선로상에 설치되어 있는 보호기기들간의 협조문제에 대하여 주로 다루었고, 배전용변전소 인출차단기의 용량문제에 대하여는 구체적으로 논하고 있질 않

이 논문은 2009년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음
*교신저자 : 김재언(jekim@cbnu.ac.kr)
접수일 2011년 4월 19일 수정일 11년 05월 09일 게재확정일 11년 05월 12일

다.

배전용변전소의 인출차단기 용량에 대하여는 국내의 경우 22.9 kV 배전계통에 대하여 25.8 kV 12.5 kA(실효치)로 정하고 있다[4,5]. 이 차단용량은 분산전원이 도입되지 않은 배전계통을 대상으로 하여 CB직하 사고에 대하여 계산된 대칭고장전류의 1.6배를 고려하여 선정된 값이다[5]. 그러나, 동일뱅크 동일모선이하에 인출된 다수의 배전선에 분산전원이 도입될 경우, CB 직하 사고시 차단용량은 12.5 kA를 초과하게 될 가능성이 있다.

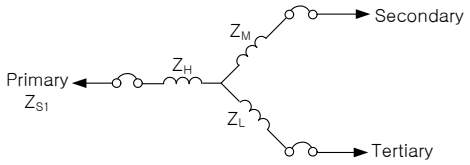
따라서, 본 논문에서는 분산전원이 도입된 배전계통의 변전소 인출차단기 직하사고시 차단용량을 초과하지 않도록 하는 보호협조방안을 제안하고자 한다. 먼저, 배전용변전소의 상위계통에 대한 등가 전원임피던스, 3권선 변압기 등가회로를 구성하고, 연계되는 분산전원의 연계변압기 결선방식 등을 고려한 차단용량 해석 모델을 제안하고, 도입된 분산전원 연계용량에 대한 3상단락 및 1선지락 고장전류를 해석하여 차단용량을 협조하는 방법을 제안한다. 그리고 154 kV/22.9kV 배전용 변전소를 대상으로 하여 적용한 결과를 통하여 변전소 인출구 차단용량(12.5kA)을 초과하지 않는 보호협조방법에 대하여 기술하기로 한다.

2. 차단용량 해석 모델

국내 154kV 배전용변전소에 설치되어 있는 변압기는 3권선 변압기로서 대부분 Y접지(1차측:154kV)-Y접지(2차측:22.9kV측)-Delta(3차측)로 되어 있다. 따라서, 상위전원계통-3권선변압기-모선 으로 구성되는 차단용량 해석 정상분 및 영상분 모델을 하기와 같이 제안하기로 한다.

2.1 154 kV 변전소 3권선 변압기 임피던스

배전계통의 고장전류를 계산하기 위해서는 해석하고자 하는 계통의 전원측 임피던스, 주변압기 임피던스, 배전선로 임피던스에 대한 기초 자료의 확보가 선행되어야 한다. 154 kV 변전소의 주변압기는 주로 Y-Y-D 결선의 3권선 변압기를 사용하고 있고, 3차 권선은 제3고조파를 제거할 목적으로 델타 결선방식을 사용하고 있으며, 안정권선이라고도 불린다. 주변압기 2차측(22.9 kV)은 배전계통의 지락고장전류를 제한할 목적으로 0.6Ω의 NGR(중성점 리액터)을 사용하고 있다. 하기 표는 3권선 변압기의 %임피던스 환산 값이다.



[그림 1] 3권선 변압기 정상분 등가회로

[표 1] 154변전소 3권선 변압기 %임피던스 환산 값[3]

권선 관계	%Imp 표기[3]	자기용량 기준 %Z		100 MVA환산		비고
				MTR[1]	NGR[2]	
		MVA	$\%Z_{TR}$	$\%Z_{TR}$	$\%Z_{NGR}$	
1차-2차	$\%Z_{HM}$	45	15.97	35.49	11.441	실제 대표 값
2차-3차	$\%Z_{ML}$	15	2.23	14.87		
3차-1차	$\%Z_{HL}$	15	8.46	56.40		

주1) %Z을 자기기준용량에서 100MVA로 환산함.

주2) 2차측 중성점에 사용되는 NGR 0.6 Ω을 100 MVA 기준 %임피던스로 환산함.

주3) $\%Z_{HM}$: 1-2차간 권선 %임피던스, $\%Z_{ML}$: 2-3차간 권선 %임피던스, $\%Z_{HL}$: 3-1차간 권선 %임피던스

2.2 154 kV 변전소 3권선 변압기 2차측에서 전원측을 바라본 정상분 임피던스

154kV 변전소 3권선 변압기 2차측에서 전원측을 바라본 정상분 임피던스 $\%Z_{B1}$ (정상분 22.9kV 모선 임피던스)는 정상분 전원측 임피던스 $\%Z_{S1}$ 와 변압기의 1-2차간 임피던스 $\%Z_{HM}$ 의 합으로 다음과 같이 구할 수 있다.

[표 2] 정상분 임피던스 (100 MVA기준)

전원측 임피던스[1]			주변압기 임피던스		22.9kV 모선 임피던스		
%R	%X	$\%Z_{S1}$	MVA	$\%Z_{HM}$	%R	%X	$\%Z_{B1}$
0.13	1.314	1.32	45	35.49	0.13	36.80	36.80

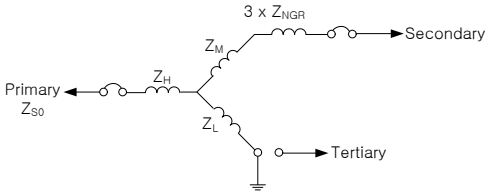
주1) 변전소 전원측 %임피던스 $\%Z_{S1}$계산방법[2][3]

정상분 $\%Z_{S1} = 0.131+j1.314 = 1.32\angle 84.35°$

2.3 154 kV 변전소 3권선 변압기 2차측에서 전원측을 바라본 영상분 임피던스

Y접지(1차측, H : 154kV) - Y접지(2차측, M : 22.9kV측) - Delta(3차측, L) 결선방식은 변압기 1차측 중성점이 접지되므로 영상분 등가회로는 전원측 영상임피던스 $\%Z_{S0}$ 가 1차권선 임피던스 $\%Z_H$ 와 직렬되고, 이것이 3차권선 임피던스 $\%Z_L$ 과 병렬로 놓이게 되며, 여기에 2차권선 임피던스 $\%Z_M$ 와 NGR 임피던스 $3x\%Z_{NGR}$ 이 직렬

로 연결되어 결국 3권선 변압기 2차측 모선에서 계통측을 바라본 영상분 모선임피던스 $\%Z_{B0}$ 는 $(\%Z_{S0}+\%Z_H) \parallel \%Z_L + \%Z_M + 3 \times \%Z_{NGR}$ 로 계산된다. 산출된 결과를 표 3에 제시한다.



$$Z_H = \frac{1}{2}(Z_{HM} + Z_{HL} - Z_{ML})$$

$$Z_M = \frac{1}{2}(Z_{ML} + Z_{HM} - Z_{HL})$$

$$Z_L = \frac{1}{2}(Z_{HL} + Z_{ML} - Z_{HM})$$

[그림 2] 3권선 Yg-Yg-D 결선의 변압기 영상분 등가회로도

[표 3] 영상분 임피던스 (100 MVA기준, Yg-Yg-D 결선)

전원측 [2][3]	3권선 변압기			NGR	$(\%Z_{S0}+\%Z_H) \parallel \%Z_L$	$\%Z_M+3x\%Z_{NGR}$	2차측 모선
$\%Z_{S0}$	$\%Z_H$	$\%Z_L$	$\%Z_M$	$3x\%Z_{NGR}$			$\%Z_{B0}$
0.361 +j1.896	j38.51	j17.89	-j3.02	j34.323	j12.41	j31.303	j43.713

2.4 분산전원 연계임피던스

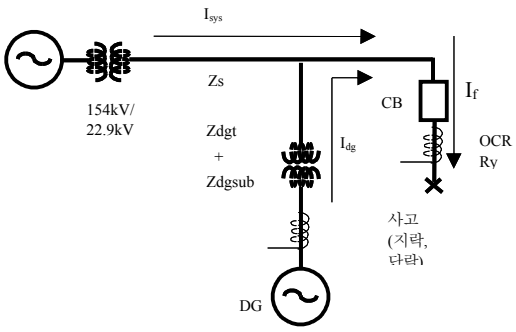
분산전원 연계임피던스는 기존의 연계변압기가 Y접지-델타로 규정되어 있는 점을 고려하여 적용한다.

2.5 차단용량 해석 모델

분산전원이 연계된 배전계통의 변전소 인출구 차단기의 차단용량을 해석하기위한 모델을 하기와 같이 제시한다. 그림에서의 분산전원 DG는 동일뱅크 인접배전선에 연계되어 있는 분산전원으로 간주한다.

3. 차단용량 해석 및 보호협조방법

차단용량 해석 모델인 그림 3에서 3상단락과 1선지락을 대상으로 하여 고장전류를 산출하는 방법과 차단용량을 초과하지 않는 보호협조방법을 제안하기로 한다.



I_f: 고장전류, I_{sys} 및 I_{dg}: 계통측 및 DG측 고장전류
CB: 차단기, OCR Ry: 과전류릴레이
Z_s: 변전소 22.9kV 모선측 임피던스
Z_{dgt}: 분산전원 연계변압기의 임피던스
Z_{dgsub}: 분산전원의 차과도 리액턴스

[그림 3] 분산전원이 도입된 배전계통의 차단용량 해석 모델

3.1 차단용량 해석 방법

3.1.1 3상단락사고의 경우

그림 3에서 3상단락시 차단기를 통과하는 3상단락전류 $I_{f,3s}$ 는 다음 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$I_{f,3s} = \frac{V_f}{\frac{Z_{s1}(Z_{dgt}+Z_{dgsub})}{Z_{s1}+(Z_{dgt}+Z_{dgsub})}} \quad (1)$$

여기서, Vf는 사고직전 사고점에서의 전압, Z_{s1}은 변전소 22.9kV 모선측 정상분 임피던스이다.

3.1.2 1선지락사고의 경우

그림 3에서 1선지락시 차단기를 통과하는 1선지락전류 $I_{f,SLG}$ 는 다음 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$I_{f,SLG} = \frac{3V_f}{2\frac{Z_{s1}(Z_{dgt}+Z_{dgsub})}{Z_{s1}+(Z_{dgt}+Z_{dgsub})} + \frac{Z_{s0}(Z_{dgt}+3Z_n)}{Z_{s0}+(Z_{dgt}+3Z_n)}} \quad (2)$$

여기서, Z_{s0}는 22.9kV 변전소 모선측 영상분 임피던스, Z_n은 분산전원 연계변압기의 중성점 접지 임피던스이다.

3.2 차단용량 보호협조 방법

분산전원 도입시, 차단용량을 초과하지 않도록 할 수 있는 기본적인 보호협조방법으로서는 상기의 제시된 3상

단락 고장전류 또는 1선지락 고장전류(대칭분)중에서 큰 값에 X/R비를 곱하여 계산된 값을 비교하여 큰 값이 12.5 kA를 넘지 않도록 하는 방법을 생각할 수 있다. 식 (1) 및 (2)로부터 고장전류값을 제한하는 요소는 3상단락전류의 경우에는 분산전원 연계변압기 임피던스가, 1선지락전류의 경우에는 분산전원 연계변압기의 임피던스와 1차측 변압기 중성점 임피던스가 각각 관여함을 알 수 있다. 따라서 분산전원의 도입으로 인한 변전소 인출구에 위치하고 있는 차단기의 기 설정된 차단용량을 초과하지 않기 위해서는 연계변압기의 임피던스, 연계변압기 1차측 Y결선 중성점 임피던스 및 분산전원 도입용량의 3가지 요소간에 적정한 협조가 필요하다.

연계변압기 1차측 Y결선 중성점 임피던스의 추가는 분산전원설치시 공사 및 설비비용의 추가로 어려움이 있고, 다수의 분산전원이 도입될 경우는 설치된 다수의 중성점 임피던스가 병렬 로 되어 다시 차단용량이 증가하게 되므로 실제 적용상에는 어려움이 있다. 따라서, 분산전원 도입용량을 최대로 하면서 기 설정된 차단용량을 초과하지 않는 방법으로서는 분산전원 연계변압기의 임피던스를 증가시키는 방법이다. 현재 설치되고 있는 분산전원연계변압기 또는 기존 계약전력수용가의 수전변압기의 대부분이 5~6% 정도(X/R비=5~10)로 알려져 있는데, 이를 10~15% 정도로 하여 차단용량이 초과되지 않도록 하는 것이 바람직하다.

4. 모델계통에의 적용 및 고찰

4.1 모델계통에의 적용

제안된 차단용량 해석방법에 의거하여 2항의 기존 배전계통 모델에 대하여 적용한 결과는 다음과 같다. 여기서는 정격용량 10MW 및 15MW인 동기발전기가 %Z = 6%의 Y직접접지(Zn=0)-델타연결방식의 변압기를 통하여 인접배전선 CB직하에 연계된 것으로 가정하였다.

10MW 동기발전기의 경우, 3상 및 1선지락전류는 제안된 방법에 의하여 구하면 다음과 같다.

$$I_{f,3s} = \frac{1.0}{\frac{0.368(0.6+1.0)}{0.368+(0.6+1.0)}} = 3.34\,pu = 8{,}420\,[A]$$

$$I_{f,SLG} = \frac{3\times 1.0}{2\frac{0.368(0.6+1.0)}{0.368+(0.6+1.0)} + \frac{0.492(0.6+3\times 0)}{0.492+(0.6+3\times 0)}} = 3.45\,[pu] = 8{,}706\,[A]$$

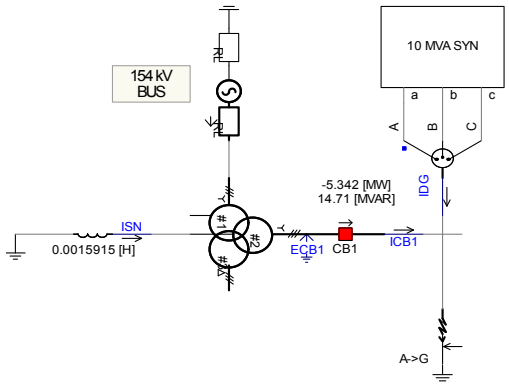
또한, 15MW 동기발전기의 경우, 3상 및 1선지락전류는 제안된 방법에 의하여 구하면 다음과 같다.

$$I_{f,3s} = \frac{1.0}{\frac{0.368(0.4+0.67)}{0.368+(0.4+0.67)}} = 3.65\,pu = 9{,}207\,[A]$$

$$I_{f,SLG} = \frac{3\times 1.0}{2\frac{0.368(0.4+0.67)}{0.368+(0.4+0.67)} + \frac{0.492(0.4+3\times 0)}{0.492+(0.4+3\times 0)}} = 3.9\,[pu] = 9{,}844\,[A]$$

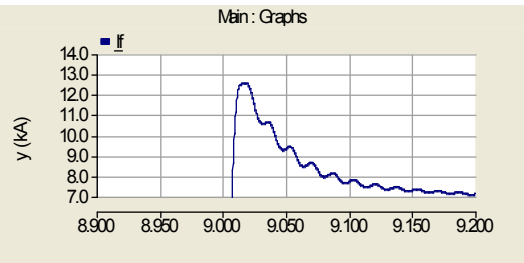
4.2 PSCAD-EMTDC에 의한 시뮬레이션 결과

2항의 차단용량 해석모델을 대하여 PSCAD- EMTDC에 의하여 모델링된 결과는 그림 4와 같다.

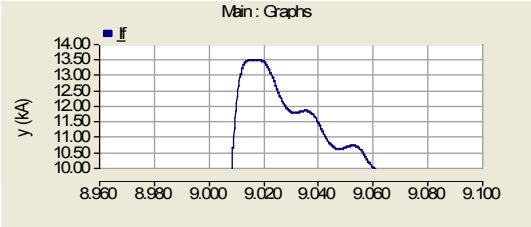


[그림 4] PSCAD-EMTDC에 의하여 모델링된 차단용량 해석모델

그림 4의 차단해석 모델에 대하여 10MW 동기발전기가 Y접지-델타 변압기로 연계된 경우에 대하여 3상단락 및 1선지락 사고를 모의한 결과를 그림 5 및 6에 제시한다.

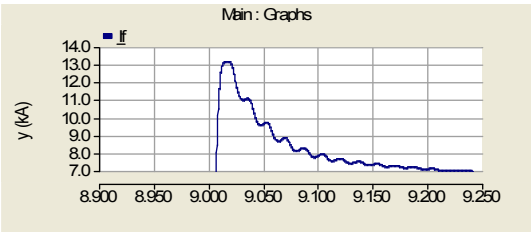


[그림 5] 10MW동기발전기 연계시 3상단락전류

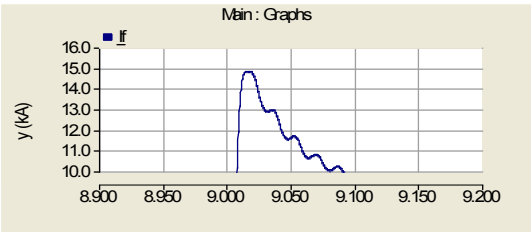


[그림 6] 10MW동기발전기 연계시 1선지락전류

그림 4의 차단해석 모델에 대하여 15MW 동기발전기가 Y접지-델타 변압기로 연계된 경우에 대하여 3상단락 및 1선지락 사고를 모의한 결과를 그림 7 및 8에 제시한다.



[그림 7] 15MW 동기발전기 연계의 경우 3상단락 고장전류



[그림 8] 15MW 동기발전기 연계의 경우 1선지락 고장전류

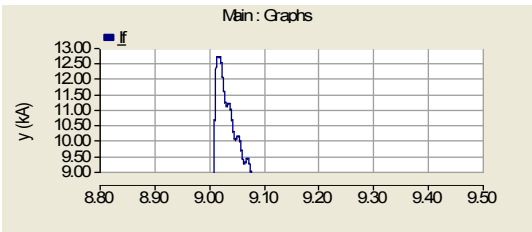
4.3 차단용량 해석결과에 대한 고찰

제안된 방법으로 산출된 차단용량은 1선지락고장의 경우가 3상단락고장의 경우보다 더 크게 나타났다. 이것은 배전용변전소의 3권선변압기의 결선이 Y접지-Y접지(NGR)-델타로 되어 있다는 점과 분산전원 연계변압기의 결선이 Y접지-델타로 되어 있다는 점에 기인하며, 결국 변전소 인출구에 위치하여 있는 차단기(CB)의 용량은 CB직하 지락사고시의 고장전류에 의하여 결정된다는 결론을 얻을 수 있다. 이 사실은 PSCAD- EMTDC 계통해석 S/W에 의한 시뮬레이션결과와도 일치하였다. 한편, 분산전원이 도입된 경우 산출된 대칭분 고장전류와 시뮬레이션에 의한 결과에 대한 비교를 표 4에 제시한다.

[표 4] 분산전원이 도입된 경우 차단용량 해석방법에 의하여 산출된 대칭분 고장전류와 PSCAD-EMTDC에 의한 시뮬레이션 결과와의 비교

구 분		해석결과 (단위: A)	시뮬레이션 결과(단위: A)
10 MW DG 도입시	3상단락전류	8,420	12,537
	1선지락전류	8,706	13,480
15 MW DG 도입시	3상단락전류	9,207	13,160
	1선지락전류	9,844	14,816

표 4에서와 보는 바와 같이 차단용량해석방법에 의하여 산출된 결과는 대칭분 고장전류로서 이것의 약 1.5배 정도한 것이 PSCAD-EMTDC 계통해석 S/W에 의한 시뮬레이션결과와 거의 일치한다다. 결국 차단용량을 초과하지 않는 범위내에서 분산전원 도입용량을 가능한 많이 도입되기 위한 방법으로서는 중성점 임피이던스를 연계변압기의 1차측에 연결하거나 연계변압기 임피던스를 증가시켜야 한다. 그러나, 전자의 경우는 공사와 관련한 제반경비를 수반하므로 가능한 후자의 방법으로 차단용량이 초과하지 않도록 하는 것이 바람직하다. 하기 그림 9에 그 예로서 15MW 분산전원의 도입의 경우 연계변압기 %임피던스를 15%로 한 경우의 1선지락 고장전류를 보인다. 1선지락고장전류가 약 12,700 A 로 현격하게 줄었음을 알 수 있다.(차단용량 해석방법에 의한 대칭분 고장전류: 8,108A)



[그림 9] 15MW 동기발전기 연계(연계변압기 %Z=15%)의 경우 1선지락 고장전류

5. 결 론

본 논문은 배전용변전소 동일 변압기 동일 모선에서 다수의 배전선이 각각 CB(변전소 차단기)를 통하여 인출되어 각 배전선로 이하에서 사고발생시 고장전류를 검출하여 해당 CB를 차단하도록 되어있으며, 단방향 전력조류와 과전류 보호방식의 특징을 갖는 기존 배전계통에 불특정 다수의 분산전원이 도입되는 경우에 대하여 배전용 변전소의 인출구에 위치하고 있는 차단기(CB)의 차단

용량 해석 모델, 해석 방법 및 차단용량을 초과하지 않는 보호협조방법을 동시에 제안하였다. 제안된 방법은 시뮬레이션에 의한 결과로 입증되었다. 특히 차단용량의 보호협조방법에는 분산전원용량, 분산전원 연계변압기의 %Z, 분산전원 연계변압기의 1차측 중성점 임피던스의 3요소 간의 협조가 필요하나 공사비 및 분산전원 다수 연결시 간섭 등을 감안할 때, 분산전원용량을 최대로 도입할 수 있는 연계변압기의 %Z의 증가방법이 현실적임을 제시하였다. 본 연구의 결과가 태양광, 풍력 등의 분산전원이 도입되는 국내 전력계통에 차단기용량 검토시 실무자에게 유용하게 활용되고, 또한 분산전원과 같은 능동적 요소가 필수적인 스마트그리드 및 마이크로그리드의 설계 및 운용에도 적용되기를 기대한다.

참고문헌

[1] Electrical Distribution System Protection, Cooper Power Systems, 1990.

[2] T. A. Short, Electric Power Distribution hand- book, CRC Press, 2004.

[3] 한국전력공사, 배전보호기술서, 2008년 10월.

[4] 한국전력표준규격 ESB 150, 교류차단기

[5] 한국전력공사, 변전건설설계, 1996.

[6] R. C. Dugan, et. al., Electrical Power Systems Quality: 2nd Edition, McGraw-Hill, 2002.

[7] Dugan, R.C., McDermott, T.E., "Operating C -onflicts for Distributed Generation on Dis -tribution systems", Industry Applications Maga -zine, IEEE Volume 8, No. 2, March-April 2002 Page(s): 19 - 25.

[8] Mukesh Nagpal, et. al, “Dispersed Generation Interconnection-Utility Perspective“, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, No. 3, May/June 2006.

[9] R. A. Walling, et. al, Working Group on Distributed Generation Integration, “Summary of Distributed Resources Impact on Power Delivery Systems“, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 3, July 2008.

김 재 언(Jae-Eon Kim) [정회원]

- 1982년 2월 : 한양대학교 전기공학과 (공학사)
- 1984년 2월 : 한양대학교대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1996년 3월 : 일본 쿄토대학교대학원 전기공학과(공학박사)
- 1984년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국전기연구소 연구원/배전연구팀장
- 1998년 9월 ~ 현재 : 충북대학교 전자정보대학 전기공학부 교수

<관심분야>
전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석

김 의 환(Eui-Hwan Kim) [정회원]

- 1996년 2월 : 충남대학교 대학원 기계공학과(공학석사)
- 2001년 2월 : 충남대학교 대학원 기계공학과(공학박사)
- 1995년 2월 : 한전전력연구원 선임연구원
- 2006년 ~ 현재 : 한전전력연구원 책임연구원

<관심분야>
신재생에너지, 태양광