

분산형전원 연계용량 증가를 위한 배전계통 운영방식에 관한 연구

(A Study on the Operation of Distribution System for Increasing Grid-Connected Distributed Generation)

남궁원* · 장문중 · 이성우 · 서동완

(Won Nam-Koong · Moon-Jong Jang · Sung-Woo Lee · Dong-Wan Seo)

Abstract

When DG interconnection into network is examined, details of the review are overvoltage, protective device malfunction, etc. In the case of protective device malfunction, replacing protective device into bi-directional protective device and installation NGR are the solution. Overvoltage at interconnection point occurs because the load is relatively less than DG output. When overvoltage at interconnection point occurs, DG interconnection is not permitted because this overvoltage affect other customers. Interconnection by installation new distribution line is one solution but it costs much money. Without installation new investment, change of NOP(Normal Open Point) position is a possible solution about DG interconnection into network.

Key Words : Over Voltage, Normal Open Point, Network Reconfiguration, DG

1. 서 론

온실가스 저감, 환경보호 등의 이유로 신재생에너지의 적용이 빠르게 늘어나고 있다. 특히 신재생에너지 의무할당제(RPS, Renewable Portfolio Standards) 도입 등 많은 제도 시행으로 향후에도 이러한 움직임은 계속 유지될 것으로 보인다.

신재생에너지들 중 배전계통에 많이 연계되는 전원

은 태양광, 소수력, 풍력 등이다. 이런 종류의 신재생에너지는 대규모 집중형 전원과는 달리 소규모로 전력소비지역 부근에 분산하여 배치가 가능한 전원으로 분산형전원이라고 한다. 하지만 이런 분산형전원은 출력조정을 하지 않을 경우 신재생에너지 특성상 출력의 변동이 심하기 때문에 계통 연계 시 다른 수용가에 공급되는 전력품질에 악영향을 줄 수 있다. 따라서 계통 연계 검토 시에 몇 가지 기준을 충족시켜야 연계가 가능하다. 분산형전원 연계 시 과전압 발생여부, 보호기기 오동작, 보호기기 부동작 등 여러 가지 검토 사항이 있다. 보호기기의 오동작, 부동작은 중성점 접지 리액터(NGR, Neutral Ground Reactor)의 설치, 양방향 보호기기로의 교체로 해결이 가능하다. 하지만 연계 시 과전압이 발생하는 문제는 분산형전원의 최대

* 주저자 : 전력연구원 배전연구소 일반연구원
* Main author : KEPCO RESEARCH INSTITUTE, Researcher
Tel : 042-865-5937, Fax : 042-865-5944
E-mail : one2sori@kepco.co.kr
접수일자 : 2014년 7월 11일
1차심사 : 2014년 7월 15일
심사완료 : 2014년 7월 28일

출력과 연계계통의 최소부하, 계통 구성에 따라 정해지는 문제이므로 추가의 전력설비 도입 없이는 분산형전원의 용량 감소가 유일한 해결책이다.

현재 한국의 배전계통은 전원을 한 곳에서 공급받는 방사형으로 운영되고 있다. 하지만 실제 구성은 빠른 고장 복구 및 유지보수를 위하여 다수의 타 선로와 연계가 되어있고 연계지점에 개폐기가 있다. 개폐기 양단의 선로를 전기적으로 분리하여 운전하기 위해서 연계점에 설치된 개폐기를 개방하여 운영한다. 이렇게 선로들을 전기적으로 분리시켜 운전하기 위해 개방된 개폐기를 상시개방점(NOP, Normal Open Point)이라고 한다. 본 연구에서는 상시개방점의 위치를 변동시켜 전압, 부하 등의 제약조건을 만족시키며 분산형전원이 연계된 선로의 최소부하를 증가시켜 분산형전원의 용량을 감소시키지 않고 과전압을 발생하지 않게 하여 기존에는 불가능했던 용량의 분산형전원의 연계를 가능하게 할 것이다.

2. 본 론

2.1 과전압 기술검토 방식

분산형전원에 의해 연계지점에 규정된 전압 이상의 전압이 인가될 경우 다른 수용가에 과전압이 공급된다. 따라서 분산형전원 연계 기술 검토 시 과전압이 발생하는 지를 검토한다. 검토조건은 부하는 일정기간 중의 최소부하, 분산형전원의 출력은 최대출력이다. 과전압 발생의 주원인은 연계지점과 최소부하에 비해 분산형전원의 최대출력이 클 경우이다.

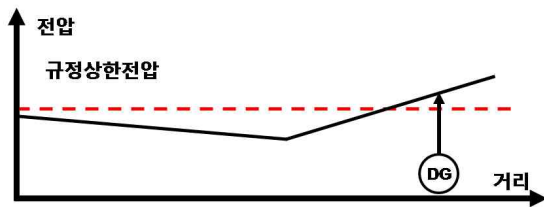


그림 1. 분산형전원 연계로 인한 과전압 발생
Fig. 1. Overvoltage occurrence because of DG interconnection

그림 1은 분산형전원이 연계될 경우 연계점에서 전압이 규정상한전압을 위반하는 경우를 보여준다. 그림의 X 축은 연계점에서의 전압이고 점선은 연계점에서의 허용되는 규정상한전압이다. Y축은 DB로 부터의 거리를 의미한다.

2.2 과전압 해소 계통재구성 알고리즘

한국의 배전계통은 하나의 선로에 하나의 전원만 존재하는 방사형으로 운영되지만 실제 선로들은 빠른 고장복구, 유지보수 등의 이유로 다수의 선로들과 연계되어있다. 하지만 전기적으로 분리되어 운영되어야 하기 때문에 선로와 선로 사이에는 개폐기를 설치하고 그 개폐기를 개방한 상태로 운영한다.

그림 2의 #1, 2, 3, 4 선로들은 각각 하나의 CB로부터 전원을 공급받고 있고 상시개방점들은 개방이 되어 각각의 선로를 다른 선로들과 전기적으로 분리해준다. 이런 상시개방점들은 고장처리, 유지보수, 계통변경 등의 이유로 이동된다. 상시개방점이 이동한다는 의미는 현재 상시개방점을 닫고 다른 개폐기를 개방한다는 것이다. 상시개방점의 이동이 완료된 후 모든 선로는 하나의 전원으로부터 전력을 공급받고 정전지역이 없도록 하여야 한다.

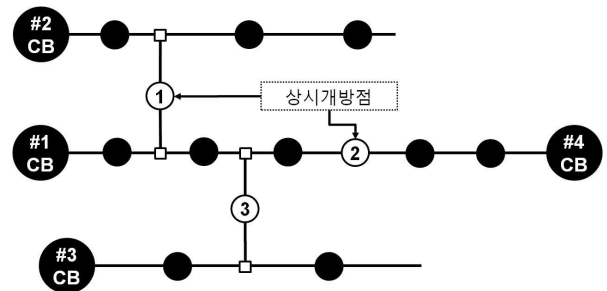


그림 2. 배전계통 구성
Fig. 2. Configuration of Distribution Network

상시개방점을 이동할 경우 계통구성이 변하기 때문에 전원이 공급해야 할 부하크기가 변한다. 공급해야 할 부하가 늘어날 경우 기존보다 전압강하가 더 발생하게 된다. CB로부터 특정지점까지의 임피던스가 Z_{eq} , 전류가 I일 경우 전압강하는 $V_{drop,old} = Z_{eq} \times I$ 이고, 같은

지점까지 전류가 I_{add} 만큼 더 흐를 경우 새로운 전압 강하는 $V_{drop_new} = Z_{cq} \times (I + I_{add})$ 가 된다.

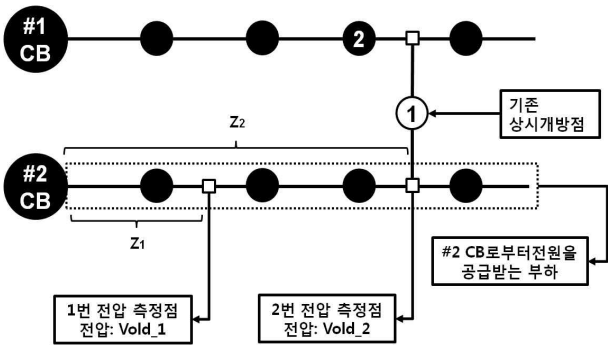


그림 3. 변경 전 계통 구성
Fig. 3. Network Configuration before Change

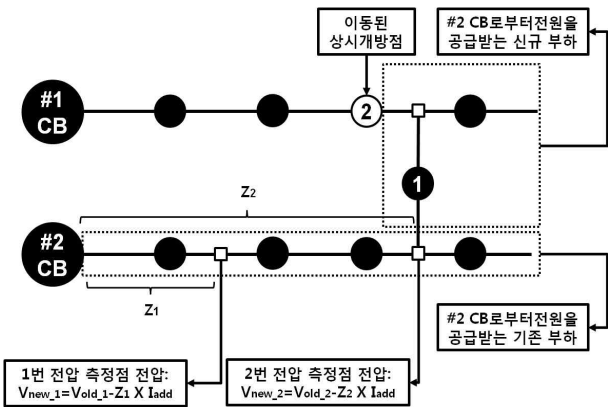


그림 4. 변경 후 계통 구성
Fig. 4. Network Configuration after Change

그림 3은 변경 전 계통 구성이다. 1번 전압 측정점의 전압은 $V_{old,1}$, CB로부터의 이 지점까지의 임피던스는 Z_1 이며 2번 전압 측정점의 전압은 $V_{old,2}$, CB로부터의 이 지점까지의 임피던스는 Z_2 이다. 상시개방점을 1번에서 2번으로 바꿀 경우 계통은 그림 4와 같다. 이 경우 #2 CB로부터 전원을 공급받는 부하가 늘어나고 이 부하에 공급해야 할 전류의 크기가 I_{add} A일 경우 1번 전압 측정점 전압은 기존보다 $Z_1 \times I_{add}$ 만큼 하강하며, 2번 전압 측정점 전압은 기존보다 $Z_2 \times I_{add}$ 만큼 하강한다. $Z_2=1\Omega$, 역률은 1, 계통 변경 후 추가 공급되는 전류되는 전류 I_{add} 가 50A라고 가정하면 계통 변경 후에는 기존에 없던 50A의 전류가 2번 전압 측정점까지

흐른 것이며 이는 $50A \times 1\Omega = 50V$ 의 전압 강하가 발생한 것이다.

이런 방식으로 특정 지점에서 규정전압범위 안으로 들어오게 하기 위해서 필요한 전압 강하 크기를 알 경우 필요한 전류량을 계산할 수 있게 된다. 그림 3의 계통 구성에서 2번 전압 측정 점에 분산형전원이 연계될 경우 전압이 기존보다 50V 이하로 높을 경우 그림 4와 같이 계통을 재구성 하면 2번 전압 측정 점에서의 전압이 50V 낮아져 분산형전원을 연계하여도 과전압이 발생되지 않아 연계가 가능해진다.

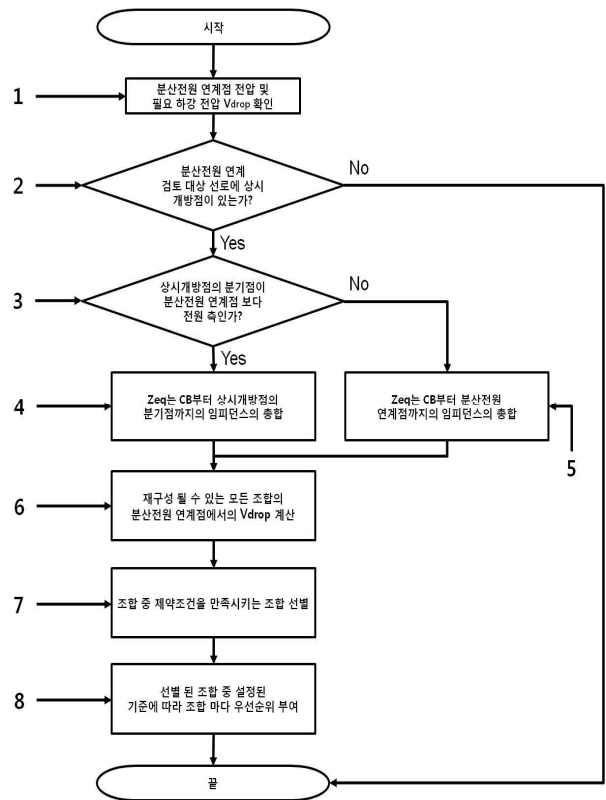


그림 5. 알고리즘 플로우차트
Fig. 5. Algorithm Flowchart

그림 5는 분산형전원의 연계로 인해 연계점의 전압이 규정전압이상일 경우 이를 해소하기 위한 상시개방점 이동 알고리즘이다. 그림 5의 1(분산전원 연계점 전압 및 필요 하강 전압 V_{drop} 확인) 부분은 분산형전원이 연계된 지점이 초과한 규정전압을 확인하는 부분이다. 예를 들어 규정전압 상한이 13486V인데 분산

형전원 연계점에서 전압이 13500V 이면 필요 하강 전압 V_{drop} 은 14V이다. 그림 5의 2 부분은 상시 개방점이 있는 경우 다음 단계로 진행하고 상시 개방점이 없는 경우 계통 재구성이 불가능하기 때문에 연산을 종료하는 부분이다. 그림 5의 3, 4, 5부분은 CB부터 상시개방점의 분기점까지의 임피던스 Z_{eq} 를 정하기 위한 부분이다. 그림 6에서 1번 상시 개방점의 분기점은 분산형전원의 연계점보다 전원 측에 있으며 2번 상시 개방점의 분기점은 분산형전원의 연계점보다 부하 측에 있다. 따라서 1번 상시개방점의 Z_{eq} 는 $Z_{eq,1}=Z_1+Z_2$ 이고 2번 상시개방점의 Z_{eq} 는 CB로부터 분산형전원 연계점까지의 임피던스의 총합인 $Z_{eq,2}=Z_1+Z_2+Z_3+Z_4$ 이다.

알고리즘 순서도에서 6은 4, 5번에서 구해진 각 상시개방점 마다의 Z_{eq} 와 상시개방점 이동을 통해 발생하는 조합을 통해 계산할 수 있다. 알고리즘 순서도에서 7은 선정된 조합 중에서 제약조건을 만족시키는 조합을 선별하는 부분이고 8은 선정된 조합 중 기준에 따라 우선순위를 부여하는 부분이다.

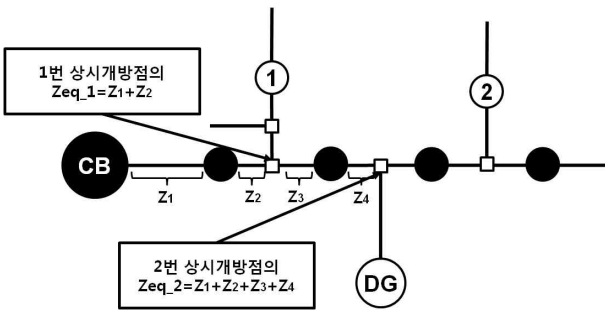


그림 6. 상시개방점마다의 Z_{eq} 계산
Fig. 6. Z_{eq} Calculation at NOPs(Normal Open Point)

그림 7은 알고리즘을 적용을 위한 예시 계통이다. CB로부터 각 상시개방점 연계점까지의 임피던스 Z_{eq} 는 $Z_{eq,1}=0.4\Omega$, $Z_{eq,3}=0.8\Omega$, $Z_{eq,6}=1.2\Omega$ 이다. 표 1은 CB로부터 각 상시개방점 연계점까지의 Z_{eq} , 개방점 이동 가능 경우, 각 경우의 증가되는 최소 전류이다. 필요 전압 강하는 8V, 최대전류를 최소전류의 4배, #1 선로에서 추가로 공급 가능한 전류가 80A라고 가정한다. 표 2는 가능한 재구성 조합 및 각 경우의 전압 강하 $V_{add,drop}$ 이다. 필요 전압강하 8V 이상의 $V_{add,drop}$ 이 발

생하고 최대전류 기준으로 증가하는 전류가 80A 이하인 조합은 2, 3, 4, 5이다. 이 조합 중 사용자 선택에 따라 우선순위를 정한다. 대상선로의 분산 또는 증가하는 전류 등이 가능하다. 표 3에서는 증가하는 최대전류의 증가량이 작을수록 높은 우선순위를 부여하였다.

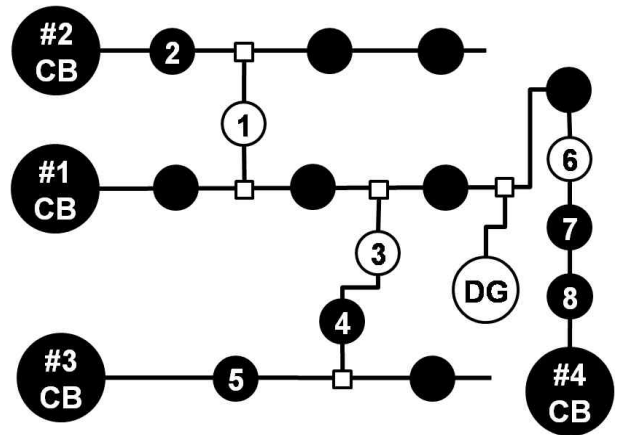


그림 7. 분산형전원이 연계된 계통
Fig. 7. DG interconnected Network

표 1. Z_{eq} , 계통재구성 경우 및 각 경우 전류 증가량
Table 1. Z_{eq} , Current Change at each case

	#2번 선로	#3번 선로	#4번 선로	
Z_{eq}	0.4Ω	0.8Ω	1.2Ω	
상시개방점 이동	1->2	3->4	3->5	6->7, 6->8
최소전류 증가량	25A	10A	30A	5A, 10A

표 2. 상시개방점 이동조합별 $V_{add,drop}$
Table 2. $V_{add,drop}$ at NOP Combination

순서	상시개방점 이동조합	$V_{add,drop}$ 계산식	$V_{add,drop}(V)$
1	1->1, 3->3, 6->7	0 X $Z_{eq,2}$ + 0 X $Z_{eq,3}$ + 5 X $Z_{eq,6}$	6
2	1->1, 3->3, 6->8	0 X $Z_{eq,2}$ + 0 X $Z_{eq,3}$ + 10 X $Z_{eq,6}$	12
3	1->1, 3->4, 6->6	0 X $Z_{eq,2}$ + 10 X $Z_{eq,3}$ + 0 X $Z_{eq,6}$	8
4	1->1, 3->4, 6->7	0 X $Z_{eq,2}$ + 10 X $Z_{eq,3}$ + 5 X $Z_{eq,6}$	14
5	1->1, 3->4, 6->8	0 X $Z_{eq,2}$ + 10 X $Z_{eq,3}$ + 10 X $Z_{eq,6}$	20
6	1->1, 3->5, 6->6	0 X $Z_{eq,2}$ + 30 X $Z_{eq,3}$ + 0 X $Z_{eq,6}$	24
7	1->1, 3->5, 6->7	0 X $Z_{eq,2}$ + 30 X $Z_{eq,3}$ + 5 X $Z_{eq,6}$	30

순서	상시개방점 이동조합	V_{add_drop} 계산식	$V_{add_drop}(V)$
8	1->1, 3->5, 6->8	$0 \times Z_{eq_2} + 30 \times Z_{eq_3} + 10 \times Z_{eq_6}$	36
9	1->2, 3->3, 6->6	$25 \times Z_{eq_2} + 0 \times Z_{eq_3} + 0 \times Z_{eq_6}$	10
10	1->2, 3->3, 6->7	$25 \times Z_{eq_2} + 0 \times Z_{eq_3} + 5 \times Z_{eq_6}$	16
11	1->2, 3->3, 6->8	$25 \times Z_{eq_2} + 0 \times Z_{eq_3} + 10 \times Z_{eq_6}$	22
12	1->2, 3->4, 6->6	$25 \times Z_{eq_2} + 10 \times Z_{eq_3} + 0 \times Z_{eq_6}$	18
13	1->2, 3->4, 6->7	$25 \times Z_{eq_2} + 10 \times Z_{eq_3} + 5 \times Z_{eq_6}$	24
14	1->2, 3->4, 6->8	$25 \times Z_{eq_2} + 10 \times Z_{eq_3} + 10 \times Z_{eq_6}$	30
15	1->2, 3->5, 6->6	$25 \times Z_{eq_2} + 30 \times Z_{eq_3} + 0 \times Z_{eq_6}$	34
16	1->2, 3->5, 6->7	$25 \times Z_{eq_2} + 30 \times Z_{eq_3} + 5 \times Z_{eq_6}$	40
17	1->2, 3->5, 6->8	$25 \times Z_{eq_2} + 30 \times Z_{eq_3} + 10 \times Z_{eq_6}$	46

표 3. 선정된 조합의 우선순위 부여
Table 3. Priority Selection based on the Current Increase

순서	상시개방점 이동 조합	전류증가량 (최대전류기준)	우선 순위
2	1->1, 3->3, 6->8	40A	1
3	1->1, 3->4, 6->6	40A	1
4	1->1, 3->4, 6->7	60A	2
5	1->1, 3->4, 6->8	80A	3

2.3 시뮬레이션 결과 및 분석

분산형전원이 배전계통에 연계되어 과전압이 발생될 경우 이를 해소시키기 위한 재구성안을 모의하기 위한 시뮬레이션을 하였다.

시뮬레이션에 사용된 계통의 실제 운영 중인 배전계통이며 자동화 개폐기 기준의 단선도는 그림 8과 같다. 중부하, 경부하 산정을 위해 적용된 부하는 2014년 3월 1일부터 31일까지의 부하를 적용하였다. 과전압 발생 지점은 분산형전원(DG)이 연계된 그림 8의 A-10, A-11 사이이며 발생한 과전압은 20V로 가정하였다. A 선로와 연계된 선로는 B, C, D 선로이며 각각 A-3, A-11, A-15가 상시개방점이다.

본 시뮬레이션에서 적용된 제약조건은 선로용량 10MVA이고 선로의 부하는 해당기간 중 상위 5%에 속하는 부하를 검토 대상으로 선정하였다. 과전압 해

소가 되는 재구성 안이 다수 일 경우 선로간 분산이 최소인 경우를 재구성안으로 선정한다.

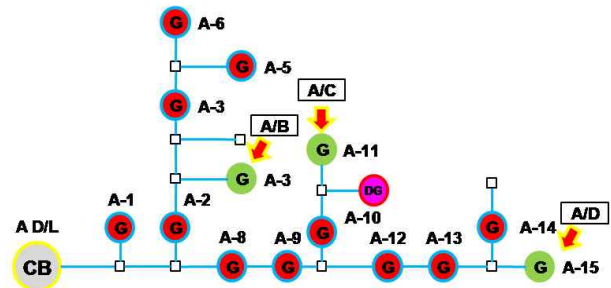


그림 8. 시뮬레이션에 사용된 계통
Fig. 8. Network Used in Simulation

과부하 제약조건을 만족시키는 조합을 기준으로 각 경우의 중부하 기준의 선로전류(A), 연계점에서의 감소 전압 크기(V), 분산은 표 4와 같고 D D/L은 분산전원이 이미 연계되어 있기 때문에 재구성 대상에서 제외하였다.

표 4. 시뮬레이션 결과
Table 4. Simulation Result

	변경전	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5
A D/L	101.6	107	113.7	112.9	118.3	125
B D/L	90.2	90.2	90.2	78.9	78.9	78.9
C D/L	127	121.6	114.9	127	121.6	114.9
D D/L	135.1	135.1	135.1	135.1	135.1	135.1
분산	333.3	279.3	252.9	461.6	438.1	449.5
감소전압	-	17	39	2	20	41

발생한 과전압 20V를 해소가 가능한 경우는 CASE2, CASE4, CASE5 가 가능하며 A, B, C, D 선로의 분산은 CASE2의 252.9가 가장 작으므로 CASE2를 재구성 안으로 선택한다.

3. 결론

본 연구는 분산전원 연계로 인해 발생하는 과전압을 추가의 시설투자 없이 현재 배전계통에서 운영 중인 상시개방점을 이동하여 해결하는 방법을 제안하였다.

부하가 증가하는 방향으로 상시개방점의 이동시켜 과전압이 발생한 선로의 전압을 감소시켜 과전압을 해소시키는 방식이다. 제약조건은 과부하를 방지하기 위하여 해당 계통의 중부하를 선정하여 최대 허용 공급용량(10MVA)을 만족시키는 조합만 선택하였다. 선택된 조합 중에 과전압의 해소가 가능한 조합들을 선택하고 선택된 조합을 대상으로 선로간 분산을 계산하여 가장 작은 값을 가지는 조합을 재구성 안으로 선택한다. 실제 배전계통의 특고압변압기의 경우 13200/230, 12600/230 두 개의 탭 권선비를 가진 변압기로 전력을 공급한다. 따라서 특고압 계통의 상하한 전압 범위도 다르다. 또한 연계 선로에 분산형전원이 있을 경우 본 연구에서 제한한 방식에서는 계산 대상에서 제외를 하는데 모든 연계선로에 분산형전원이 연계될 경우 해를 구할 수 없는 경우가 발생한다. 따라서 추후 진행되는 연구에서는 변압기 권선비에 따른 전압 제한범위 고려와 연계선로에 분산형전원이 연계될 경우에도 과전압 해소가 가능한 재구성안 개발을 진행할 것이다.

References

- [1] R.S. Rao, K. Satish, S.V.L. Narasimham, Power Loss Minimization in Distribution System Using Network Reconfiguration in the Presence of Distributed Generation, IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEM, VOL. 28, NO. 1, Feb. 2013.
- [2] Yuan-Kang Wu, Ching-Yin Lee, Le-Chang Liu, Shao-Hong Tsai, Study of Reconfiguration for the Distribution System With Distributed Generators, IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 25, NO. 3, July 2010.
- [3] B. Radha, R.T.F. Ah King, H.C.S. Rughooputh, Optimal network reconfiguration of electrical distribution systems, Industrial Technology, 2003 IEEE International Conference on Industrial Technology, IEEE, VOL. 1, Dec. 2003.

◆ 저자소개 ◆



남궁원(南宮源)

1982년 1월 18일생. 2010년 한양대학교 졸업(석사). 2010년~현재 한국전력공사 근무. 현재 전력연구원 배전연구소. 분산전원과 스마트그리드분야 연구.



장문종(蔣汶宗)

1970년 4월 24일생. 1997년 KAIST 컴퓨터공학과 졸업(석사). 1997년~현재 한국전력공사 근무. 현재 전력연구원 배전연구소 선임 연구원. 배전지능화시스템, 전력정보 통신 기술개발, 스마트파워그리드 기술개발 및 응용분야.



이성우(李聖雨)

1960년 3월 1일생. 1999년 건국대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년 전력연구원. 1992년~현재 한국전력공사 근무. 현재 전력연구원 배전연구소 스마트그리드 그룹장. 배전지능화 및 배전IT 시스템 분야연구.



서동완(徐東完)

1981년 12월 23일생. 2006년 목포해양대학교 졸업. 2007~현재 한국전력공사 근무. 현재 전력연구원 배전연구소. 배전지능화 및 배전IT시스템 분야연구.