

분산형전원의 배전계통 연계 해석 알고리즘 개발에 관한 연구

박 현석, 노 대석
한국기술교육대학교

e-mail: kkjs2885@hanmail.net, dsrho@kut.ac.kr

Development of Interconnection Analysis Algorithm for Dispersed Sources in Distribution Systems

Hyeonseok Park, Daeseok Rho
Korea University of Technology and Education

요 약

최근, 국가적인 차원에서 추진되고 있는 대체에너지 전원은 배전계통에 연계되어 운용되는 특성을 가지고 있다. 태양광과 풍력 등의 자연에너지를 이용한 신·재생에너지전원은 일정한 출력을 내는 기존의 전원보다 기후나 온도, 지형적인 영향을 많이 받는 간헐적인 전원이므로, 이들이 도입된 배전계통은 기존의 단 방향 공급형태의 배전계통과는 달리 부하와 전원이 혼재되어 운용되는 형태로 되기 때문에 배전계통의 전압품질에도 좋지 않은 영향을 미치는 것이 사실이다. 따라서 분산전원이 도입된 배전계통은 기존의 부하만이 존재하는 배전계통과는 달리, 부하와 전원이 혼재되어 운용되는 형태로 되기 때문에 분산전원의 연계에 따라 발생이 예상되는 문제점을 검토, 분석할 수 있는 분산전원 배전계통연계용 해석 프로그램이 요구되고 있다. 따라서 본 논문에서는 분산전원이 배전계통에 연계되는 경우, 계통연계 기술요건 가이드라인 및 기술지침에 근거하여, 비전문가라도 쉽게 사용할 수 있는 종합적인 분산전원의 배전계통 연계용 해석 알고리즘을 제시하였다.

1. 서 론

우리나라에서는 분산전원의 도입 시 배전계통에 끼치는 영향과 문제점에 대한 구체적인 분석과 평가 없이, 분산전원의 배전계통 도입과 운용이 이루어지고 있어서 배전계통의 전압관리나 전력품질 등의 계통 운용상의 문제점이 야기될 가능성이 높아지고 있다. 또한, 대규모 분산형전원의 단지가 연계되는 배전계통에서는 이들 문제점으로 인하여 일반수용가의 민원이 일어날 소지가 높다. 일반적으로 분산전원이 계통에 연계되는 경우, 공급신뢰도 및 전력품질의 면에서 다른 수용가에 악영향을 끼치지 않도록 기술요건의 검토를 실시하여야 하는 데, 이들에 대한 검토는 지금까지 배전계통과 분산전원에 대한 전문가만이 수행할 수 있었다. 또한, 전문가라 할지라도 구체적인 분석과 평가를 위해서는 각종 데이터의 수집이나 전문적인 S/W의 사용법을 숙지해야하는 한계성이 존재하였다. 따라서 본 논문에서는 분산전원이 배전계통에 연계되는 경우, 계통연계 기술요건 가이드라인 및 기술지침에 근거하여, 비전문가라도 쉽게 사용할 수 있는 종합적인 분산전원의 배전계통 연계용 해석시스템을 개발하였다.

2. 분산전원 계통연계 해석 알고리즘

분산전원이 배전계통에 연계되는 경우, 도입 적부의 판단은 평가하는 사람이나 자료에 따라 달라질 수 있다. 이를 개선하기 위하여 본 연구에서는 주어진 입력데이터와 대상 계통에 대하여 누구나 동일한 판단 결과를 얻을 수 있는 표준 계통에 근거한 평가기준을 개발하였다. 이 기준은 크게 정상운전시의 상시 전압변동과 비상운전 시(기동과 탈락, 사고 등)의 순시 전압변동으로 나누어진다.

(1) 상시 전압변동

분산전원의 출력이 배전계통으로 방출되는 역 조류가 발생하는 경우, 고압배전선에 있어서 정상시의 허용전압 변동 폭에 대한 개념은 그림 1과 같고, 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

- (가) 저압 측의 허용전압 변동 폭 = $236V - 221V = 15V$
- (나) 저압 측의 주상변압기의 탭 운용 폭
= $600V \times (230V / 12,600V) = 10.96V$

- (다) 나머지 허용 변동 폭 = $(15V - 10.96V) / 2 = 2.02V$
- (라) 정상시의 고압 측 전압변동 허용범위 = $2.02V \times (12,600V / 230V) = 111V$

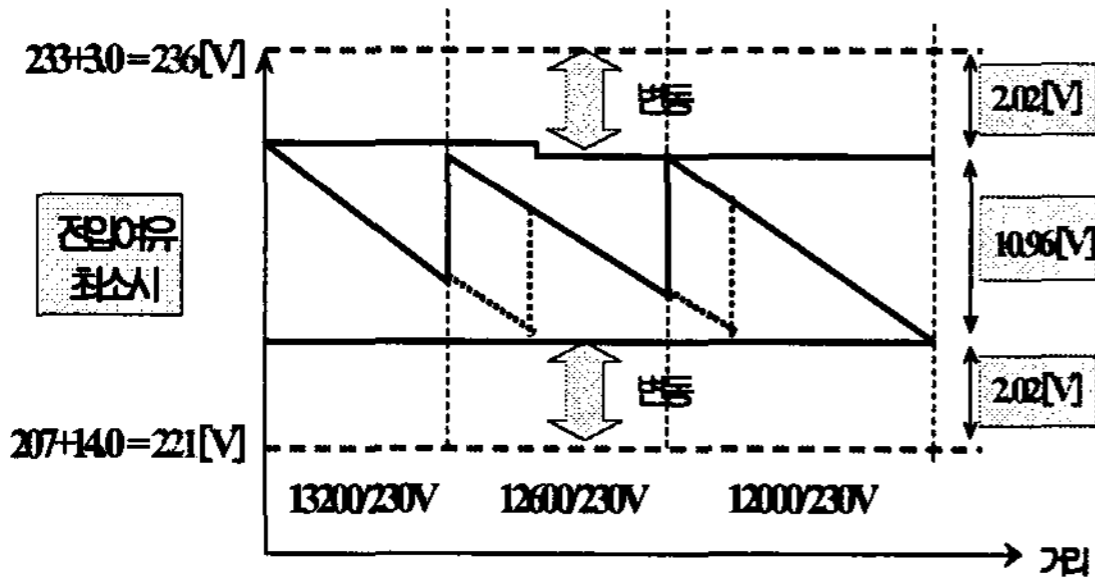


그림 1. 상시전압변동 허용 기준

여기서, 111V는 고압배전선 측의 상시의 전압변동 허용 폭으로 분산전원이 도입되는 경우, 이 값 이내에 전압변동 폭을 유지하면 연계 피더의 모든 수용가가 허용 전압범위 내에 유지될 수 있다는 것을 의미한다. 이 값은 정상상태에 있어서 분산전원 연계 시에 적합여부를 판단하는 기준 값으로 매우 중요한 수치이다. 이 값을 초과하면 분산전원 연계가 부적합하다는 결과를 나타낸다.

그림 1에서 점선으로 표시된 저압 측(수용가)의 허용전압 범위는 전력회사의 전압관리 지침을 근거로 하여 수용가의 허용전압($\pm 6\%$, 207V ~ 233V)을 주상변압기 2차 측 직하전압으로 환산한 것이다. 여기서, 221V는 207V에 14V(주상변압기 자체전압 강하 분 + 저압선 전압강하 분 + 인입선 전압강하 분)를 합산한 값으로, 저압 측의 전체 전압강하 한도를 약 7% 정도(전압관리지침은 8%로서 부동률을 고려한 값과 동일함)로 고려한 것이다. 이것은 주상변압기 2차 측에서 221V 정도를 유지하면 저압선의 최말단의 수용가의 전압이 하한치를 벗어나지 않음을 의미한다. 또한, 236V는 233V에 3V(주상변압기 자체전압 강하 분 + 인입선 전압강하 분)를 더한 값으로, 저압 측 전압강하 한도로 1.5% 정도를 고려한 값이다. 이것은 주상변압기 2차 측에서 236V 정도를 유지하면 직하에 존재하는 어떠한 수용가의 전압도 상한치를 벗어나지 않음을 의미한다. 예를 들어, 전력회사 전압관리지침상의 주상변압기 직하의 한도치인 4%를 기준으로 하게 되면, $233V + 8V = 241V$ 가 된다. 이 경우, 인입선의 길이가 짧거나 주상변압기의 내부 전압강하가 작게 되어, 약 3V의 전압강하만 일어나는 최악의 상태가 발생하면 수용가전압은 허용전압 상한치를 벗어나게 된다. 따라서 본 논문에서 제시한 한도치 1.5%는 최악의 경우를 상정한 값이다. 한편, 주상변압기 탭 운용 폭인 600V는 주상변압기의 탭 운용 가능영역에서 산출된 값(고압선 피크 기준의 5%)에 근거하여 가중치(여유분)를 두어 도출한 값이다.

(2) 순시 전압변동 평가 알고리즘

분산전원이 기동하거나 탈락하는 경우, 고압배전선에 있어서 비상시의 허용전압 변동 폭에 대한 개념은 그림 4와 같고, 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다.

- (가) 저압 측의 허용전압 변동 폭 = $236V - 221V = 15V$
- (나) 저압 측의 주상변압기 탭 운용 폭 = $600V \times (230V / 12,600V) = 10.96V$

- (다) 나머지 허용 변동 폭 = $(15V - 10.96V) / 2 = 2.02V$
- (라) 정상시의 고압 측 전압변동 허용범위 = $2.02V \times (12,600V / 230V) = 111V$
- (마) 저압 측 기기동작 최소전압 = $220V \times 8\% = 202 [V]$ (2% : 옥내 전압강하)
- (바) 저압 측 허용전압 변동 폭 = $207V - 202V = 5V$
- (사) 고압 측 허용전압 환산전압 = $5V \times (12,600 / 230) = 274V$
- (아) 비상시의 고압 측 전압변동 허용 범위 = $111V + 274V = 385V$ (1.8%)

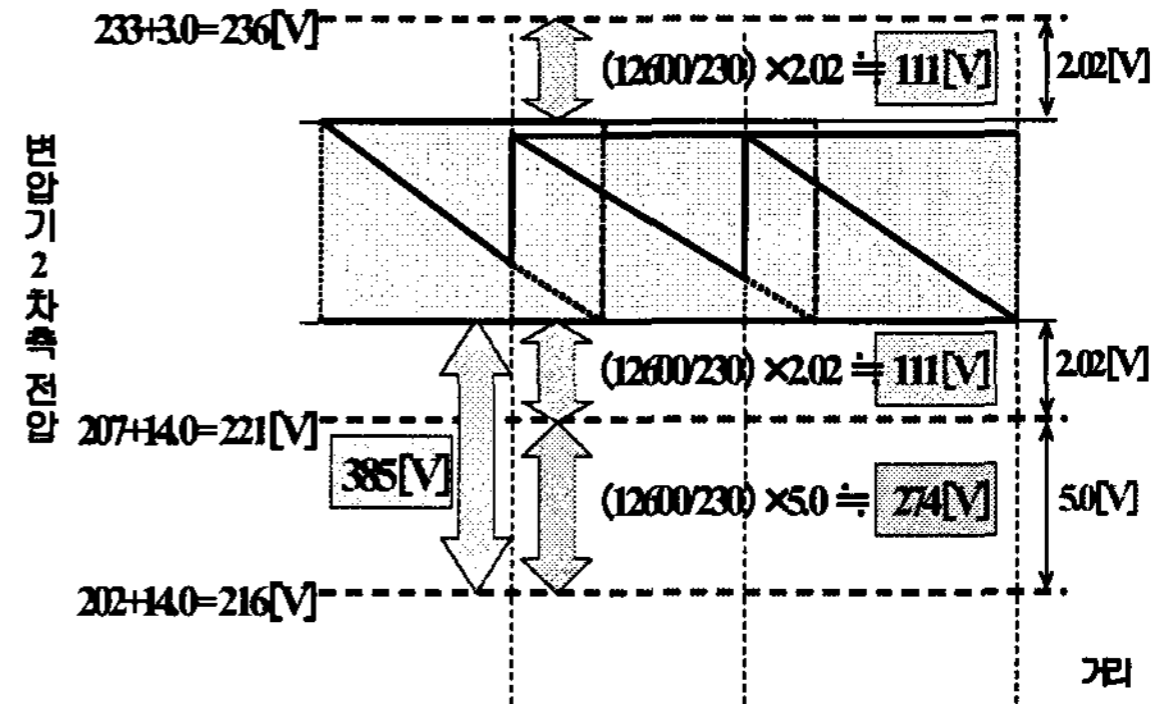


그림 2. 순시전압변동 허용 기준

여기서, 385V는 배전계통에 연계되어 운용 중인 분산전원이 기동하거나 탈락하는 과도적(비상시)인 경우에 대한 고압배전선 측의 전압변동 허용 폭이다. 즉, 분산전원의 연계 시에 이 값 이내에 전압변동 폭을 유지하면 연계 피더의 모든 수용가에게 허용 전압을 유지할 수 있다는 것을 의미한다. 이 값은 분산전원의 기동이나 탈락 등의 비상시에 연계 적합여부를 판단하는 기준이 되는 매우 중요한 수치이다. 그림 4는 이에 대한 개념을 나타낸 것이다.

그림 2에서 385V는 정상시의 허용변동 폭(111V)에 기기동작 최소 전압치(274V)를 더한 값으로 후자는 정격전압(220V)의 약 8%를 고려하였다. 이것은 건물 옥내의 전압강하분이 약 2%이므로 기기동작 최소 전압변동분의 10%에서 뺀 값이다. 이것은 2초 이내의 순시적(기동, 탈락 등)인 기간 동안에는 10%의 전압강하분에도 수용가 기기가 동작을 할 수 있다는 점에서 착안한 것이다.

3. 시뮬레이션 및 분석 결과

3.1 모델계통 및 입력 데이터

(1) 배전계통 입력데이터

적용선로는 그림 3과 같이 간선의 총 길이가 26.7km이고, 28개의 노드와 5개의 분기선을 가진 중장거리 배전계통으로 선정하여 최대한 가혹한 조건을 상정할 수 있도록 하였다. 그림 4의 적용선로는 해석 프로그램에 의해 11개의 노드를 가진 축약계통으로 변경된다.

(2) 분산전원 입력데이터

분산전원의 계통연계에 필수적인 11개 항목의 연계 가능여부를 검토하기 위하여 표 1과 같은 관련 데이터를 입력한다. 분산전원 발전기의 정격용량은 1,000kW(역률

90%)이며 전기방식은 3상 4선식이다. 또한 변전소의 뱅크 역조류를 검토하기 위해 변전소 년 중 최소 부하용량을 입력한다. 분산전원 도입에 의한 배전계통 상시전압변동에 대한 적합여부는 분산전원 역조류에 의한 배전선로의 전압변동의 적정여부와 분산전원 발전기가 운전 중에 탈락하는 경우 모두 고려해야한다. 분산전원 역조류에 의한 영향은 역조류의 양을 변화시켜 영향을 검토하였고, 발전기 탈락에 의한 영향은 분산전원 설치 지점의 '계약 외 최소 부하 용량'에 의해 검토되어 계약 외 최소부하 용량을 300kW(역률 90%), 400kW(역률 90%), 500kW(역률 90%)로 가정하여 검토하였다. 분산전원 도입에 의한 배전계통 순시 전압변동은 유도 발전기 기동시 주로 발생하므로 이를 충분히 고려한 기동전류를 이용하여 검토하였다. 또한, 분산전원 도입에 의한 단락용량 변화를 알아보기 위해 설치지점의 연계 변압기 용량, 분산전원 발전기 정격용량, 발전기 정격전압 그리고 유도발전기 과도리액턴스 등을 입력하였다.

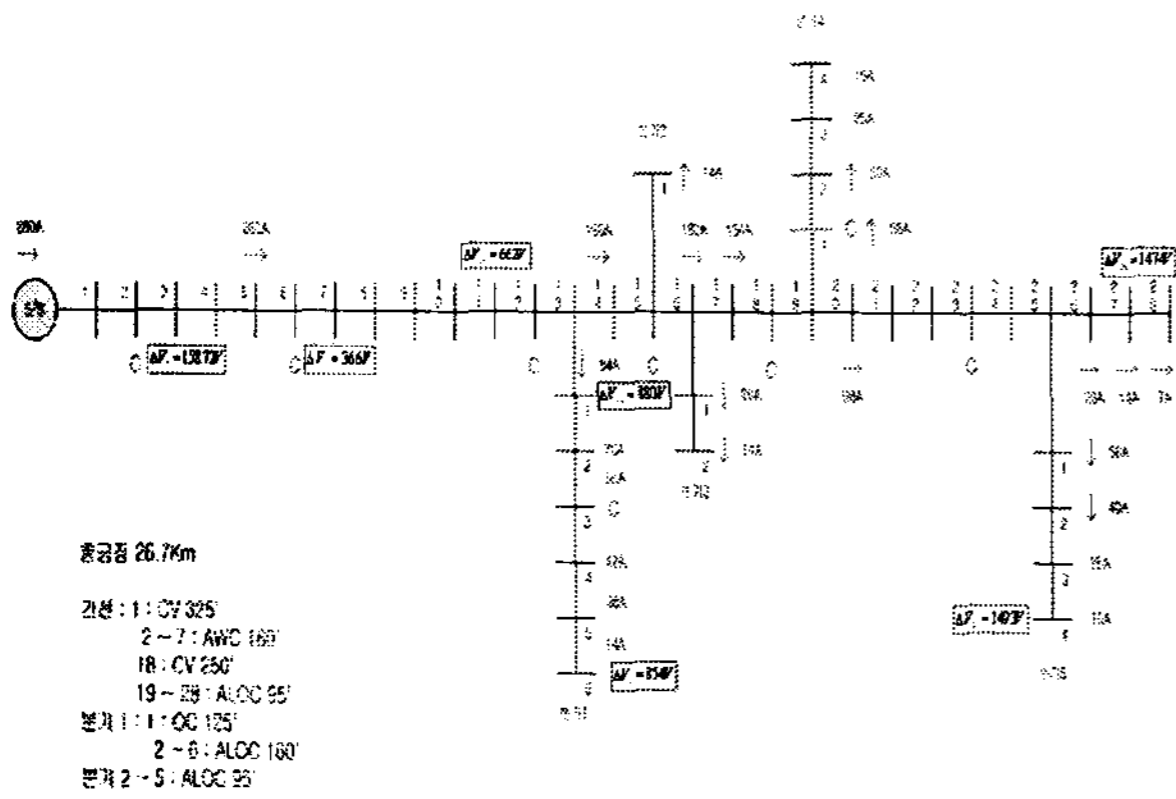


그림 3. 대상 배전 계통

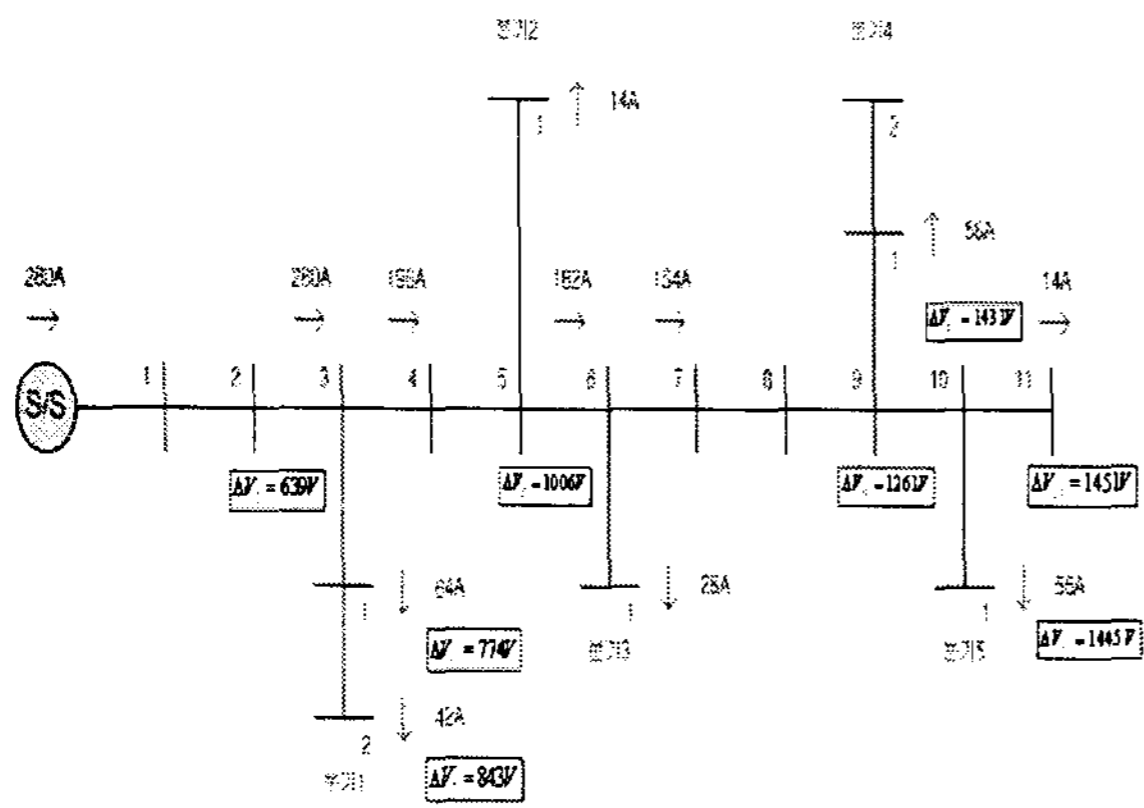


그림 4. 축약 배전 계통

표 1. 분산전원의 입력데이터 상세내역

평가항목	입력 데이터 상세 내역	참고
정격용량	- 분산전원 발전기 정격용량 (1200KW, 역률 90%)	출력용량 변화 (1, 0.8, 0.6 MW)
전기방식	- 3상 4선식	-
뱅크 역조류	- 변전소 최소 부하용량 (10MW) - 역 조류 량(최소부하용량)과 비교	-

역률 (역 조류)		- 최소부하용량 (500KW, 역률 80%)	최소부하용량 변화 (정격용량의 30-70%)
상시 전압 변동	역 조류	- 최소부하용량 (500KW, 역률 80%)	
	발전기 탈락	- 계약 외 부하용량 (300KW, 역률 90%)	계약 외 부하용량 (400, 500 KW)
순시전압변동 (기동 / 사고 시)		- 기동전류 (발전기 정격용량 150%) (42A, 역률 15%)	기동전류 변화 (정격용량의 80-120%)
플리커		- 발전기 출력변동 (500KW, 역률 70%)	출력변동 변화 (정격용량의 50-90%)
단락용량		- 변전소 M.Tr (60MVA, 12.5%) - 연계 Tr 용량 (2000KW, 5%Z) - 발전기 정격용량 (1200KW) - 발전기 정격전압 (6,000V) - 유도기 과도리액턴스 (15%Z)	
고조파		- 고조파 발생기가 합계용량 - 회로분류(6펄스 환산계수) - 고조파 유출전류 상한치 - 대책(콘덴서 용량, %임피던스 등)	
보 호 협 조	돌입전류	- 선로 %임피던스(단락용량) - 발전기 정격용량, 내부 임피던스 - 연계 변압기 용량과 임피던스 - 유도발전기 계수	
	공진현상	- 변전소 및 역률보상용 커패시터 용량 - 계통측 단락용량	
	자기여자현상	- 역률 보상용량 - 포화계수 및 단락비 - 발전기 정격전압 - 무부하시 여자전류	
	분류효과	- 선로 임피던스 - 연계 변압기 임피던스 - 연계 전 고장전류 (Iocr, 릴레이 정정치)	

3.2 해석결과 및 분석

분산전원의 연계지점을 그림 4의 11번 구간(최말단 지점)으로 가정하여 분산전원 연계시의 영향을 평가하였고 그 결과는 표 2와 같다. 평가항목 가운데 전력용량이나 전기방식, 뱅크 역조류 등은 분산전원의 도입 용량이 1MW로 작기 때문에 별다른 문제점이 발생되지 않으나 수 MW 이상의 분산전원이 도입되는 경우 더 자세한 검토가 요구될 것이다. 분산전원의 용량이 1MW와 0.8MW의 경우에는 분산전원의 도입에 의하여 역률문제와 순시전압변동에서 문제가 발생하여 계통연계가 불가능한 것으로 판정되었다. 역률문제의 경우 적절한 역률보상장치를 설치하여 역률을 보상하면 문제를 해결할 수 있다. 순시전압변동은 분산전원의 0.6MW 정도로 용량을 줄여 기동전류의 크기를 작게 하여 기준값을 넘지 않도록 해야 한다. 따라서 분산전원이 선로 말단에 연계되는 경우 용량은 0.6MW 이내로 하고 적절한 용량을 갖는 역률보상장치를 설치하여야 특별한 문제가 없이 연계할 수 있음을 알 수 있다.

표 2. 분산전원 도입 용량을 파라미터로 분석한 경우

평가 항목	Case I (11번 구간에 1 MW의 용력이 도입되어, 역 조류가 50%, 계약 외 부하전력 30%인 경우)		Case II (11번 구간에 0.8 MW의 용력이 도입되어, 역 조류가 50%, 계약 외 부하전력 30%인 경우)		Case III (11번 구간에 0.6 MW의 용력이 도입되어 역 조류가 50%, 계약 외 부하전력 30%인 경우)		비고 (연계 기준)
	대책 전	대책 후	대책 전	대책 후	대책 전	대책 후	
전력 용량	양호 (1,200kw)	양호 (1,200kw)	양호 (1,200kw)	양호 (1,200kw)	양호 (1,200kw)	양호 (1,200kw)	3,000kW 이하
전기	양호	양호	양호	양호	양호	양호	동일방식

방식	(3상4선식)	(3상4선식)	(3상4선식)	(3상4선식)	(3상4선식)	(3상4선식)	(3상4선식)
백크 역조류	양호 (-500kW)	양호 (-500kW)	양호 (-300kW)	양호 (-300kW)	양호 (-100kW)	양호 (-100kW)	10MW 미만
역률 (역 조류)	불량 (-500kW, 578kVar, 65%)	양호 (-500kW, 0kVar, 100%)	불량 (-300kW, 537kVar, 49%)	양호 (-300kW, 0kVar, 100%)	불량 (-100kW, 497kVar, 20%)	양호 (-100kW, 0kVar, 100%)	지상이고 90%이상
상시 전압 변동	역 조류	양호 (80V)	양호 (-78V)	양호 (100V)	양호 (-47V)	불량 (120V)	111V 미만
	발전 기 탈락	양호 (86V)	양호 (86V)	양호 (86V)	양호 (86V)	양호 (86V)	
순시전압변 동 (기동/사고시)	불량 (534V)	불량 (534V)	불량 (412V)	불량 (412V)	양호 (309V)	양호 (309V)	385V 미만
플리커 (500kW 변동, 역률 70%)	양호 (0.29)	양호 (0.29)	양호 (0.29)	양호 (0.29)	양호 (0.29)	양호 (0.29)	0.45V 미만
단락용량 (연계 후)	양호 (503MVA)	양호 (503MVA)	양호 (503MVA)	양호 (503MVA)	양호 (503MVA)	양호 (503MVA)	1000MVA 미만
연계적합 여부	연계불가 능	연계불가 능 (기동전류 억제대책 필요)	연계불가 능	연계불가 능 (기동전류 억제대책 필요)	연계불가 능	연계가능	

4. 결 론

본 논문에서는 분산전원 배전계통연계 해석 알고리즘을 제시하여 분산전원 연계 시 예상되는 문제점을 검토하였다. 주요 특징은 다음과 같다.

(1) 본 논문에서 개발한 해석시스템은 배전계통이나 분산전원을 잘 모르는 비전문가라 할지라도 분산전원의 도입에 대한 평가와 분석 결과를 산출할 수 있는 표준 계통과 판정 알고리즘을 근거로 한 시스템이다. 즉, 정상 시에 분산전원의 도입에 의한 전압변동이 고압선에서 111V 이내로 유지하고, 비상(기동 시나 탈락 시)시에는 385V를 유지하면 수용가의 전압을 항상 허용전압 이내로 유지할 수 있다는 알고리즘을 제시하였다. 이것은 기존의 평가방법이 평가자의 개인 능력과 취득할 수 있는 자료에 따라 상이한 평가와 결과를 산출하는데 비하여, 분산전원 도입에 따른 공평한 평가를 내릴 수 있다는 큰 장점을 가진다.

(2) 기존의 4상한만 이용한 간략 전압강하계산식의 단점을 보완하여, 역 조류를 고려할 수 있는 전압강하 계산 알고리즘을 제시하였다. 분산전원 연계지점을 기준으로 역률과 조류방향에 따라 4개의 상한을 이용하여 전압강하와 전압상승을 계산할 수 있도록 알고리즘을 개발하여 계산정도를 향상시켰다.

(3) 본 논문에서 개발한 시스템은 4가지의 계통상태에 대한 분석과 평가를 수행할 수 있다는 점이다. 즉, 분산전원이 연계되기 전의 배전계통 상태를 해석할 수 있고, 분산전원 연계 전의 배전계통이 적절하지 못한 경우 이에 대한 대책을 제시할 수 있으며, 또한 분산전원이 연계된 배전계통의 상태를 해석할 수 있으며, 연계된 후의 배전계통이 문제가 있는 경우에 이에 대한 대책을 제시할 수 있어서 발생 가능한 4종의 계통상태를 모두 해석 및 평가를 수행할 수 있다는 점이 우수한 점이다.

본 논문에서 대상으로 한 적용 선로는 최대한 가혹한 조건을 상정할 수 있도록 선정하였다. 분석결과 선로 말단에 분산전원을 연계하는 경우 분산전원의 용량을 0.6 MW 이내로 도입하고 적절한 용량(497kVAR)을 갖는 역률보상장치를 설치하면 연계조건을 만족한다는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문에서 개발한 해석 알고리즘의 사전 검토에 의하여, 분산전원 설치자와 운용자는 도입 후에 발생하는 문제점을 사전에 미리 예방할 수 있을 뿐만 아니라 설계 변경이나 출력감소 등에 의한 경제적인 메리트도 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서 개발한 해석시스템은 분산전원을 제조하는 메이커나 운용하는 전기사업자의 업무의 효율성을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라 수용가의 전력품질 향상에도 기여할 수 있다.

참고문헌

- [1] "분산전원 계통연계가이드라인", JEC4201, 일본, 2002.4
- [2] "풍력발전 계통연계 기술지침 및 연계선로 운영기준 제정에 관한 연구", 한전 전력연구원, 2004
- [3] "배전전압관리 개선에 관한 연구", 한전 전력연구원, 2003.10
- [4] "배전전압관리 매뉴얼", 일본 북해도전력, 2003.1
- [5] "태양광발전의 배전계통 연계 알고리즘 개발에 관한 연구", 2005 한국산학기술학회, 춘계 학술발표논문집, 노대석 외 3인, 2005. 5.
- [6] "분산형전원 배전계통 연계 평가시스템 알고리즘 개발", 2005 한국산학기술학회, 춘계 학술발표논문집, 노대석 외 3인, 2005. 5.
- [7] "분산형전원 계통연계 기술평가시스템 알고리즘에 관한 연구", 대한전기학회 대전지부 워크샵, 노대석 외 2인, 2005. 6.