

전압변동과 부하량을 고려한 저압배전계통의 분산전원 설치용량 분석

논문

59P-1-17

The Study on Permissible Capacity of Distributed Generation Considering Voltage Variation and Load Capacity at the LV Distribution Power System

문원식* · 조성민** · 신희상** · 이희태** · 한운기*** · 추동욱§ · 김재철†

(Won-Sik Moon · Sung-Min Cho · Hee-Sang Shin · Hee-Tae Lee · Woon-Ki Han · Dong-Wook Choo · Jae-Chul Kim)

Abstract - This paper describes a capacity of distributed generation which will be interconnected at low voltage distribution systems. In order to set the capacity of distributed generation, a voltage variation of distribution system is considered. Besides, the capacity of distributed generation is classified according to a capacity of pole transformer and loads. The system constructions in this paper are analyzed by using PSCAD/EMTDC. In the immediate future, it is expected to increase the installation of New and renewable energy systems which are generally interconnected to distribution power systems in the form of distributed generations like photovoltaic system, wind power and fuel cell. So the study of this kind would be needed to limit the capacity of distributed generation.

Key Words : DG Capacity, Voltage Variation, Pole Transformer Capacity, Load Capacity

1. 서 론

태양광발전, 풍력발전, 연료전지발전 등의 신·재생에너지원의 도입은 석유 의존도를 해소하는 것뿐만 아니라 에너지원의 다양화와 에너지 절약의 차원에서 필수적인 것으로 판단된다. 특히 최근 화두가 되고 있는 스마트 그리드에서도 신·재생에너지원을 이용한 분산전원의 중요성은 증대되고 있으며 이러한 신재생에너지원은 보통 분산전원의 형태로 연계된다[1].

이미 미국, 일본, 유럽과 같은 대체에너지전원 개발 선진국에서는 태양광, 풍력, 연료전지, 소수력, 열병합 등을 계통연계의 대상전원으로 고려하여 이에 대한 계통연계 관련 기술지침 및 기준, 규정, 인허가 절차를 마련해 두고 있다[2]. 우리나라 역시 2005년 분산형전원 배전계통 연계기술 지침을 마련하여 신재생에너지의 보급을 위해 노력하고 있으며 2011년까지 총 발전량 기준 7.0[%] 목표를 설정하고 발전차액 지원제도, 태양광주택 10만호 보급사업 등 다양한 지원정책을 추진하고 있다[3].

분산전원이 배전계통에 도입되면 변동비용감소 및 송배전설비의 투자지연 효과, 에너지원의 효율적 이용 등과 같은 효과를 얻을 수 있지만 배전선로에서의 전압조정문제, 역조류의 문제, 배전계통의 단락용량이 증가하여 단락사고 시 고장전류가 증가하는 문제가 있을 수 있다. 뿐만 아니라 차단기 재폐로 기간의 문제, 배전선로의 과전류 보호계전기의 동

작 방해 등과 같은 문제로 인해 계통에 심각한 영향을 미치게 된다[4]. 따라서 계통의 보호방식 및 보호협조에 관한 합리적인 분산전원 연계기준은 매우 중요하다.

전력설비는 일정한 범위의 전압을 공급받아 동작하며 배전계통과 분산전원의 연계점에서 수용가에게 공급하는 전압은 전력품질 측정의 중요한 요소가 된다. 그러나 계통의 전압이 정격을 벗어나 과전압이나 저전압으로 수용가에게 전력을 공급하면 수용가 전력설비의 효율을 떨어뜨리며 수명을 단축시키는 역할을 한다[5]. 현재 발전기로부터 생산된 전력이 배전용 변전소로부터 수용가 쪽으로 일정하게 흐르도록 설계되어 있는 배전계통에 분산전원이 설치되면 역조류가 발생되고 이는 전력회사의 전압조정을 방해할 뿐 아니라 연계점의 전압을 상승시키는 원인이 된다. 연계점의 전압상승은 인근 수용가의 과전압을 일으키며 분산전원의 발전량에 따라 수용가 전력설비에 악영향을 미친다[6][7]. 그렇기 때문에 한국전력공사에서는 연계점에서 분산전원의 최대 설치 가능 용량을 제한하고 있다[3].

본 논문에서는 분산전원의 저압배전선로 연계 시 나타날 수 있는 전압상승을 고려하여 한국전력공사에서 정한 공급전압범위 220±13[V]를 벗어나지 않는 적절한 분산전원 용량을 검토하였다. 이를 위해 저압배전계통의 구성요소인 주상변압기와 부하의 용량, 그리고 배전선로의 길이 및 종류를 고려하여 저압배전선로를 모델링 하였으며, PSCAD/EMTDC를 사용해 분석하였다.

2. 본 론

2.1 한국전력 분산전원 연계기술 기준

한국전력공사의 분산형전원 배전계통 연계기술서에서는 다음과 같이 연계설비용량을 구분하고 있다. 일반선로를 이용하여 저압 배전선로에 연계할 경우 20[KW] 이하, 전용선로를 이용할 경우 100[KW]미만으로 제한한다. 특고압 배전

* 준 회원 : 숭실대 공대 전기공학부 석사과정

** 정 회원 : 숭실대 공대 전기공학부 박사과정

*** 정 회원 : 전기안전연구원 선임연구원

§ 정 회원 : 국제대학 철도전기과 교수 · 공박

† 교신저자, 정회원 : 숭실대 공대 전기공학과 교수 · 공박

E-mail : jckim@ssu.ac.kr

접수일자 : 2009년 11월 19일

최종완료 : 2009년 12월 13일

선로의 경우 일반선로를 이용하면 3,000[KW] 이하, 전용선로를 이용하면 10,000[KW] 미만을 원칙으로 한다. 분산전원을 연계하더라도 전력품질 면에서 공급전압은 적정범위로 유지되어야 하기 때문에 분산전원 연계로 인한 저압배전계통의 상시 전압변동(10분 평균값)은 3[%] 이하, 순시 전압변동(2초 이하)은 4[%] 이하로 제한한다. 표 1을 통해 저압배전계통의 연계용량과 전압변동을 정리하였다.

표 1 저압배전선로 연계구분

Table 1 Interconnection standard at LV distribution line

연계설비용량		전압변동	
일반선로	전용선로	상시변동 (10분 평균)	순시변동 (2초 이하)
20[KW] 이하	100[KW] 이하	3[%]이하	4[%]이하

저압 단상 배전선로 연계 시 용량을 원칙적으로 20[KW]로 제한한 근거는 한국전력공사 배전계통 연계기술 기준에 준한다.

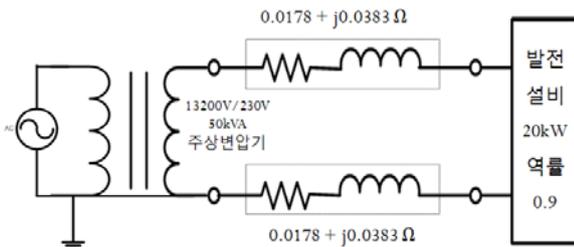


그림 1 저압 배전선로 등가회로

Fig. 1 Equivalent circuit of LV distribution line

그림 1과 같이 주상변압기에서 분산전원 발전설비까지를 Cu 100[mm²] 도체의 저압배전선로 100[m] 길이로 적용하여 진상역률 0.9인 분산전원 발전설비 20[KW]가 연계될 경우를 계산하였다.

13200/230[V], 50[KVA] 주상변압기 내부 임피던스는 3.2[%]이므로 변압기 리액턴스 X_t 는 0.034[Ω]이며, 변압기 임피던스 R_t 값은 무시한다. 그림 1은 단상 배전선로를 나타내므로 선로 저항 R_d 와 선로 리액턴스 X_d 는 각각 0.0356[Ω], 0.0766[Ω]이 된다. 발전전류 I는 분산전원의 발전전력이 20[KW]이며 발전전압이 220[V], 역률 0.9로 운전함을 가정하여 식(1)에 의해 101[A]가 된다.

$$I = \frac{P}{V \cos \theta} \quad (1)$$

$$\Delta V = I \times [(R_t + R_d) \times \cos \theta + (X_t + X_d) \times \sin \theta] \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta V}{220} \times 100 \quad (3)$$

따라서 분산전원의 연계로 인한 전압변동은 식 (2)를 통해 8.1[V]를 얻을 수 있으며, 식 (3)과 같이 기준 전압

220[V]에 대한 비로 나타낸 전압변동률은 3.7[%]가 된다.

분산전원의 용량이 20[KW] 일 때 상시 전압변동률이 기준치 3[%]를 초과하므로 저압 단상 배전선로에 연계할 수 있는 분산전원의 용량은 원칙적으로 20[KW] 이하로 한다[3].

분산형전원 배전계통 연계기술서에 명시된 계산은 분산전원으로 인한 전압변동이보다 배전선로와 변압기 임피던스로 인한 전압강하로 여기는 것이 더 타당하다. 또한 분산전원의 연계점에서 발생한 전압변동은 인근 수용가에게도 전압변동을 일으키게 되어 전력품질 면에서 악영향을 미치게 된다. 따라서 본 논문에서는 앞서 언급한 내용을 보완하여 분산전원 용량을 분석하였다.

2.2 분산전원 설치로 인한 저압배전계통의 영향

저압 배전계통은 주상변압기 이후의 전력계통으로서 그림 2는 분산전원 연계로 인해 나타나는 전압변동을 보이기 위한 저압 배전계통을 모델링한 것이다[8].

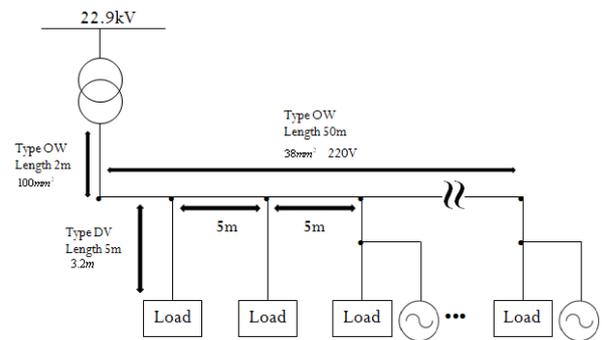


그림 2 저압배전계통 모델링

Fig. 2 Modeling of LV distribution power system

표 2 선로의 저항 및 리액턴스

Table 2 Resistance and reactance of distribution line

선로종류	공칭단면적 [mm ²]	R값 [Ω/km]	X값 [Ω/km]
OW	38	0.502	0.3431
OW	100	0.185	0.3116
DV	3.1416	5.89	0.1677

주상변압기 용량을 고려하기 위해 30, 50, 75, 100 [KVA] 변압기를 고려하였다. 배전선로는 38[mm²]의 OW(옥외용절연전선) 50[m], 인입선은 DV(인입용비닐전선) 5[m]로 구성하였다. 배전선 OW와 DV의 저항 및 리액턴스는 각각 표 2를 통해 제시하였다[6][9][10]. 배전계통의 각 부하는 50[m]인 배전선로에 5[m] 간격으로 균일한 부하가 달린 것으로 가정하였다. 그림 3은 PSCAD/EMTDC를 이용하여 그림 2의 저압배전계통을 모델링한 것이다.

분산전원은 고정 유효전력 출력과 고정 역률로 동작하도록 구성하였다. 계통 전압의 위상을 PLL(Phase Locked Loop)로 검출한 후 유효 성분과 무효 성분으로 분리하여 각각 PI제어기를 통해 안정적인 출력을 발생하도록 하였다. 그림 4는 계통 전압과 출력 전류의 위상을 검출하여 유효 성분과 무효성분으로 분리하는 block이다.

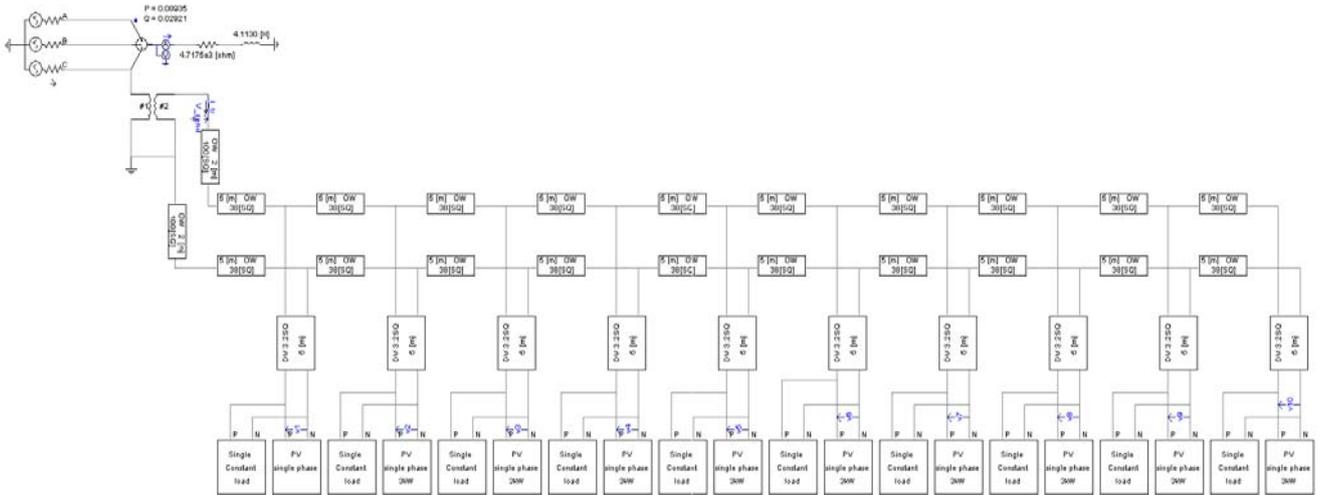


그림 3 PSCAD를 이용한 저압배전계통 모델링
Fig. 3 Modeling of LV distribution power system by PSCAD

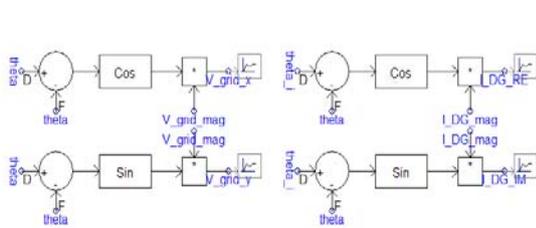


그림 4 전압과 전류의 유·무효성분 분리 블록도
Fig. 4 Block diagram of separating active and reactive component from voltage and current

그림 5는 분산전원의 출력 전류의 PI제어 블록도이며 그림 6은 분산전원의 출력 전압 변환 블록도이다. 그림 7은 앞의 제어 블록도를 통해 얻어진 전압으로 제어되는 분산전원의 회로 모델이다[11].

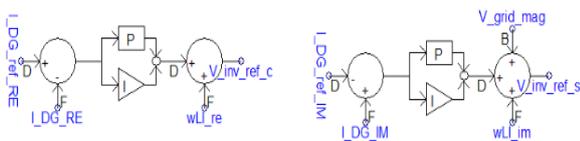


그림 5 전류 PI 제어 블록도
Fig. 5 Block diagram of current PI control

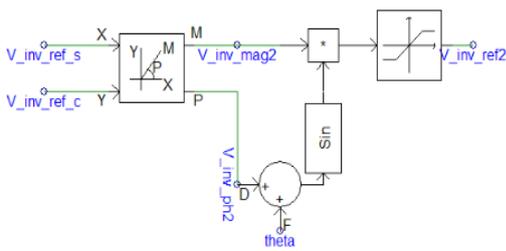


그림 6 분산전원 전압 제어기
Fig. 6 Block diagram of voltage controller

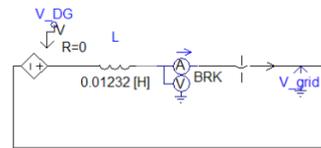


그림 7 분산전원 출력 회로
Fig. 7 Output circuit of DG

3. 결과 및 해석

3.1 분산전원으로 인한 저압배전계통의 전압변동

본 절에서는 분산전원의 연계 위치에 따른 배전계통의 전압변동을 알아보려고 한다. 모의를 위해 그림 2와 동일한 모델을 사용하였다. 75[KVA]의 주상변압기를 사용하였으며 계통의 총 부하는 변압기 용량 10[%](15[KVA])의 부하가 균등하게 분포된 것으로 하였다. 또한 분산전원의 발전 용량은 10[KW]로 가정하였고 분산전원이 연계될 지점은 변압기로부터 10[m], 30[m], 50[m]인 지점이다. 수용가 전압은 변압기로부터 5[m] 간격으로 측정하였으며 계통 전압은 분산전원 연계 전 기준 전압 범위 내에서 유지됨을 가정하여 모의하였다.

그림 8은 변압기로부터의 거리에 따른 전압을 나타낸 것이다. 분산전원이 없을 때의 선로전압과 변압기로부터 각각 10[m], 30[m], 50[m] 떨어진 지점에 분산전원이 연계되었을 때 나타나는 선로의 전압변동을 함께 나타내었다. 이로써 배전선로에 연계된 분산전원은 인근 수용가의 전압상승을 일으킨다는 것과 발전량이 같은 분산전원이 변압기로부터 멀리 떨어진 지점에 연계될수록 전압 상승은 더욱 크게 나타난다는 것을 확인하였다. 또한 현재 기준 용량인 20[KW] 보다 적은 10[KW]발전량에서도 배전선로 말단 연계 시 과전압이 일어남을 보였다. 표 3은 연계 전후의 전압상승을 정리한 것이다. 이 모의 결과를 통해 실제 배전계통에서 분산전원 연계 위치가 다양한 만큼 배전계통 전압변동에 주는 영향도 다양할 뿐 아니라 선로 말단에 분산전원이 연계되었을 경우, 계통의 전압상승에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

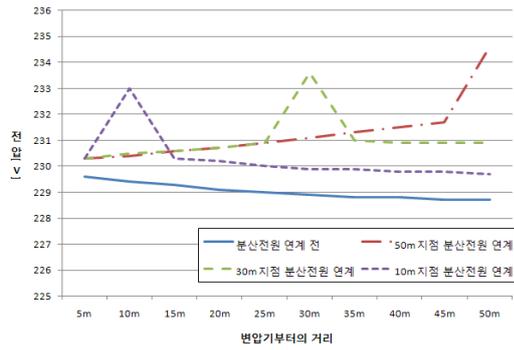


그림 8 분산전원 계통연계 지점에 따른 전압변동 비교
Fig. 8 Comparison of voltage variation by DG interconnection

표 3 연계 위치에 따른 전압변동

Table 3 Voltage variation by interconnection position

분산전원 연계위치	연계 전 전압 [V]	연계 후 전압 [V]	전압 차 [V]
10m	229.4	233.0	3.6
30m	229.0	233.6	4.6
50m	228.7	234.6	5.9

3.2 분산전원 설치용량을 위한 사례연구

분산전원이 배전계통의 말단에 연계될 경우 전압상승에 가장 큰 영향을 준다는 것을 앞선 결과를 통해 알았다.

본 논문에서는 분산전원의 저압 배전계통 연계 시 표준전압 유지범위(220±13[V])를 넘지 않는 분산전원의 용량을 산정하기 위하여 배전계통의 전압에 큰 영향을 미치는 주상변압기의 용량과 배전선로의 부하량을 고려하였다. 이때 분산전원의 위치는 앞선 모의 결과를 토대로 하여 전압상승에 가장 큰 영향을 미치는 선로 말단에 연계한 경우를 가정하여 모의하였다.

모의 조건은 다음과 같다. 일반적으로 많이 사용하는 변압기 용량인 30[KVA], 50[KVA], 75[KVA], 100[KVA] 네 가지로 나눠 사례연구를 하였다[12]. 변압기 용량의 20[%], 50[%], 90[%]에 해당하는 부하량에 대해 선로 말단에 설치된 분산전원 용량에 따라 연계점에서의 전압을 측정하였다. 부하와 분산전원의 역률은 각각 0.9로 가정하였으며 각 모의를 구분하기 위하여 표 4와 같이 정리하였다.

표 4 모의 조건

Table 4 Condition of Simulation

Case 분류	주상변압기 용량	부하량 [KVA(%)]	부하역률	분산전원 역률
1	30[KVA]	6 (20)	0.9	0.9
2		15 (50)		
3		27 (90)		
4	50[KVA]	10 (20)		
5		25 (50)		
6		45 (90)		
7	75[KVA]	15 (20)		
8		37.5 (50)		
9		67.5 (90)		
10	100[KVA]	20 (20)		
11		50 (50)		
12		90 (90)		

주상변압기의 용량과 부하량에 따라 경우를 나눠 분산전원 용량에 따른 전압변동을 모의하였으며 그 결과를 그림 9-12에 제시하였다. 모든 그래프에서, 연계 전 선로 말단의 전압은 부하량이 클수록 낮아지며, 분산전원의 용량이 일정하게 증가함에 따라 연계점에서의 전압이 선형적으로 증가했다. 그에 따라 연계점에서의 전압이 233[V]가 되는 분산전원 적정용량을 표 5를 통해 나타냈다.

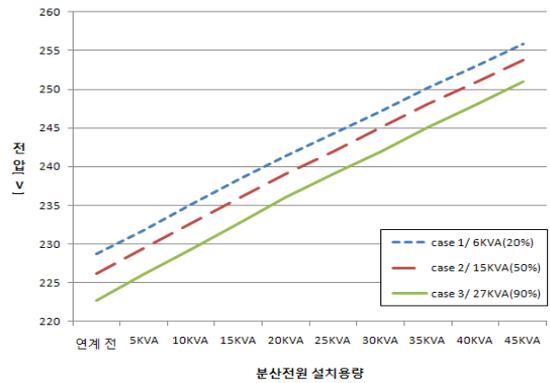


그림 9 30[KVA] 주상변압기에 대한 부하별 전압변동
Fig. 9 Voltage variation according to 30[KVA] pole tr.

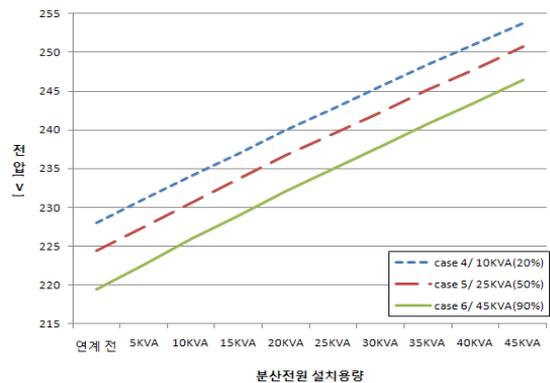


그림 10 50[KVA] 주상변압기에 대한 부하별 전압변동
Fig. 10 Voltage variation according to 50[KVA] pole tr.

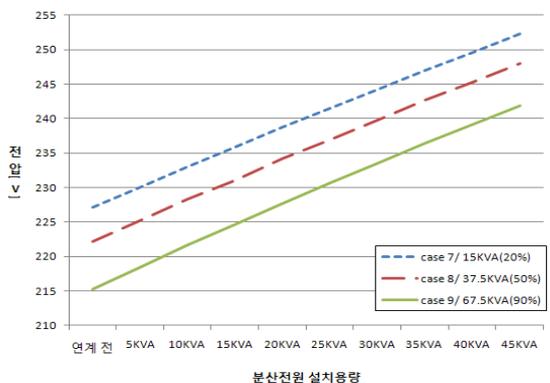


그림 11 75[KVA] 주상변압기에 대한 부하별 전압변동
Fig. 11 Voltage variation according to 75[KVA] pole tr.

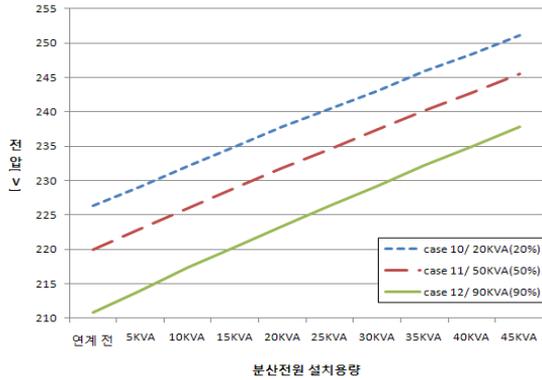


그림 12 100[KVA] 주상변압기에 대한 부하별 전압변동
Fig. 12 Voltage variation according to 100[KVA] pole tr.

표 5 분산전원의 적정설치용량
Table 5 Proper Installable DG Capacity

부하량	30[KVA]	50[KVA]	75[KVA]	100[KVA]
20[%]	6.6[KW]	8.4[KW]	10.0[KW]	11.6[KW]
50[%]	10.3[KW]	13.7[KW]	17.8[KW]	22.4[KW]
90[%]	15.5[KW]	21.9[KW]	29.4[KW]	36.5[KW]

표 5와 같이 사례 연구를 통해 적정전압범위를 초과하지 않는 범위 내에서 변압기 용량과 부하량에 따른 분산전원 설치가능용량을 제시하였다. 주목해야할 점은 주상변압기 용량별 분산전원 발전용량에 따른 각 사례의 그래프가 선형성을 띠고 있다는 것이다. 그래서 표 5의 데이터를 MATLAB의 Curve Fitting Tool을 이용하여 분산전원의 발전용량과 배전선로의 부하 및 변압기 용량과의 관계를 선형 그래프로 나타내어 그림 13과 식(4)를 얻었다.

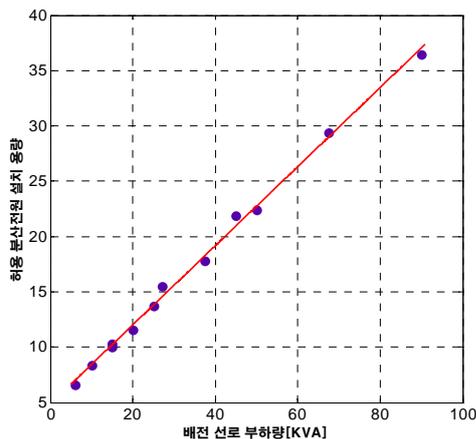


그림 13 부하량에 따른 분산전원 설치가능용량
Fig. 13 Installable DG Capacity by Load Capacity

$$f(x) = p_1x + p_2 \quad (4)$$

식 (4)의 계수 p_1 과 p_2 는 각각 0.3578, 4.844이다. x 는 표 5의 부하량과 변압기 용량을 곱한 값이다. 따라서 x 는 실제 [KVA] 단위의 부하량이며, $f(x)$ 는 부하량에 따른 설치 가

능한 분산전원 용량이 된다. 위 수식을 이용하면 배전계통의 부하량에 따라 설치할 수 있는 분산전원의 용량을 정하는데 있어서 효율성을 높일 수 있을 것이다.

4. 결 론

현재 분산전원의 설치용량을 한국전력 분산전원 연계기술 기준에 의하여 20[KW]이하로 제한하고 있다. 하지만 본 논문에서는 분산전원의 연계 위치에 따라 20[KW]이하의 분산전원 발전용량에서도 과전압이 발생함을 확인하였다. 스마트그리드와 저탄소 녹색성장 정책으로 인해 분산전원을 설치할 일반 수용가가 증가할 것으로 예상되는데 기존의 연계 기준은 분산전원 연계로 인한 전압상승이 인근 수용가에 미치는 영향도 고려하지 못 하는 등 미흡한 부분이 있었다. 따라서 본 논문에서는 분산전원으로 인한 전압상승이 인근 수용가에 미치는 영향을 알아보고 배전계통의 부하 사용량에 따른 분산전원 설치가능 용량을 제시하였다. 앞으로 배전선로와 부하 및 분산전원의 연계 형태에 따른 영향도 향후 연구에 반영하겠다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 전력산업기반기금 지원에 의하여 한국전기안전공사 주관으로 수행된 과제입니다.

참 고 문 헌

- [1] 최준호, 노경수, 박성준, 송경빈, 윤상윤, “배전계통의 보호협조측면에서 본 분산전원 연계용량 검토”, 한국조명·전기설비학회논문지 Vol. 21 No.3 pp. 107-116, 2007
- [2] 지식경제부, MW급 분산배치형 PV 시스템 계통연계 및 구성요소 기술개발(최종보고서), 2007
- [3] 한국전력공사 배전처, 분산형전원 배전계통 연계기술 해설서, 한국전력공사, 2006
- [4] 과학기술부, 태양광발전시스템 연계운전 보호협조 알고리즘 개발, 2006
- [5] Roger C. Dugan, Mark F. McGranaghan, Surya Santoso, H. Wayne Beaty, “Electrical Power Systems Quality”, McGraw-Hill, 2002
- [6] 산업자원부, 대체에너지 발전시스템 계통연계를 위한 기술지침 수립(최종보고서), 2004
- [7] IEEE Standards Coordinating Committee 21, IEEE Application Guide for IEEE Std 1547, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, 2009
- [8] Young-Sung Kim, Jae-Chul Kim, “Characteristic Impedances in Low-Voltage Distribution Systems for Power Line Communication”, Journal of Electrical Engineering and Technology, v.2, no. 1, pp.29-34, 2007
- [9] 대한전기학회, 최신배전시스템공학, 북스힐, 2006
- [10] 마동환, 권훈, 박윤철, 김재연, “분산전원이 도입된 저압배전계통의 전압해석방법”, 대한전기학회 하계 학술대회 논문집 pp. 230-232, 2004

- [11] 최시영, 김래영, 권형남, 송중환, “DQ 모델을 이용한 단상 계통연계 인버터의 제어”, 전력전자학술대회 논문집 pp. 602-605, 2003
- [12] 윤상윤, 김재철, “수용가 전력 소비 패턴을 고려한 배전용 변압기 과부하 판정기준”, 대한전기학회논문지 v.53 no.9 pp.513-520, 2004

저 자 소 개



문 원 식 (文 原 植)
 1982년 2월 15일생. 2009년 숭실대 전기공학과 졸업, 현재 숭실대 대학원 전기공학과 석사과정
 Tel : 02-824-2416
 Fax : 02-817-0780
 E-mail : onesmoon@ssu.ac.kr



조 성 민 (趙 成 旻)
 1980년 10월 3일생. 2003년 숭실대 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 숭실대 대학원 박사과정
 Tel : 02-824-2416
 Fax : 02-817-0870
 E-mail : dannyone@ssu.ac.kr



신 희 상 (申 文 壽)
 1980년 9월 18일생. 2007년 숭실대 전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 숭실대 대학원 박사과정.
 Tel : 02-817-7966
 Fax : 02-817-0870
 E-mail : shs8828@nate.com



이 희 태 (朴 文 壽)
 1976년 4월 2일생. 2002년 숭실대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 숭실대 대학원 박사수료.
 Tel : 02-824-2416
 Fax : 02-817-0870
 E-mail : visir@ssu.ac.kr



한 운 기 (朴 文 壽)
 1973년 6월 20일생. 1997년 목포대학교 전기공학과 졸업, 2001년 성균관대학교 전기공학과 졸업(석사). 현재 숭실대 대학원 박사수료. 1998년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 설비안전연구그룹 선임연구원
 Tel : 031-580-3078
 Fax : 031-580-3111
 E-mail : power@kesco.or.kr



추 동 옥 (秋 東 旭)
 1960년 1월 29일생. 1984년 충남대 전기과 졸업. 2001년 8월 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사) 현재 국제대학 철도전기와 교수
 Tel : 031-610-8032
 Fax : 031-610-8030
 E-mail : choodw@kmc.ac.kr



김 재 철 (金 載 哲)
 1955년 7월 22일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 숭실대 전기공학과 교수.
 Tel : 02-817-0647
 Fax : 02-817-0870
 E-mail : jckim@ssu.ac.kr