

PV 시스템 배전계통 연계 시 전압 조정 기법에 관한 연구

(A Study on Voltage Control Method at Distribution System Connected PV Systems)

강철* · 신희상* · 신동우* · 문종필* · 김재철*

(Chul Kang · Hee-Sang Shin · Dong-Woo Shin · Jong-Fil Moon · Jae-Chul Kim)

* 숭실대학교

Abstract

Recently, the concern of PV systems has increased because of an environmental problem and limitation of fossil fuel. In this paper, we assume and simulate the cases that the voltage of distribution system exceed the bound of voltage regulation because of the connected PV system. Also, we compare the typical method, LDC(Line Drop Compensator), with the suggested method and verify propriety of suggested method.

1. 서론

우리나라는 매년 전력수요가 크게 증가하고 있다. 그러나 계속되는 유가상승과 환경문제, 발전소 부지 선정의 어려움 등으로 인하여 대규모의 발전소 건설, 송배전선로의 확충·신설 등이 점점 어려워지고 있는 실정이다. 이에 따라 새롭고 다양한 에너지 자원의 활용에 대한 관심이 그 어느 때보다 고조되고 있다.

PV(Photovoltaic power generation, 태양광발전) 시스템은 새로운 에너지원으로 크게 주목받고 있는 신재생 에너지 중 하나로서 발전규모의 선택이 자유롭고 환경문제도 야기 시키지 않는 등 여러 가지 장점을 가지고 있다. 그러나 배전계통은 기본적으로 송전계통에서 전력을 수전하여 이를 부하에 공급하는 역할을 하므로 단방향 조류를 고려한 운용형태인데 반해 PV 시스템이 연계된 배전계통은 PV 시스템에서도 전력이 공급되기 때문에 양방향 조류 형태로 운용하게 된다. 그 결과 PV 시스템이 연계된 지점에서는 기존의 단방향 조류에서는 나타나지 않던 고조파, 전압변동, 보호협조 등의 문제점들이 발생할 수 있다. 특히 배전계통에 PV 시스템이 연계된 피더(Feeder)에서는 PV 시스템으로 인해 피더의 부하용량의 변화로 인한 전압변동 때문에 전압상승 및 강하가 발생하는 문제점이 발생할 수 있다.

본 논문에서는 이와 같이 PV 시스템이 연계된 배전계통에서 기존의 단방향 조류를 고려한 전압조정 방법이 배전계통의 전압을 안정적으로 유지할 수 있는지 사례 연구를 통해 알아보고 PV 시스템의 연계를 고려

한 제안된 전압조정 기법의 타당성을 비교하였다. 즉, PV 시스템과 같은 분산전원을 고려하지 않은 단방향 조류에서 전압의 단조감소를 고려한 기존의 LDC(Line Drop Compensator) 전압조정 방법의 한계를 지적하고 PV 시스템 연계와 같은 양방향 조류를 고려한 개선된 LDC 전압조정 기법을 제안하고자 한다.

2. PV 시스템이 연계된 배전계통 모델

PV 시스템이 연계된 배전계통 모델은 송전선을 포함한 상위계통을 등가화한 무한전원과 변압기, 모선, 선로, 부하 등으로 구성하였으며 우리나라 배전계통은 22.9[kV]의 중성점 다중접지 방식을 채택하고 있으므로 선로는 일반 고압배전선인 22.9[kV] 계통으로 구성하였다. 부하는 6개의 피더에 각 피더당 10[MVA]씩 최대 부하 60[MVA]까지 소비하도록 구성하였고, 피더를 두 개의 그룹으로 묶어 경부하, 중부하 시 PV 시스템이 배전계통에 연계 되었을 경우를 고려 다양한 형태의 배전계통을 모의하였다. PV 시스템은 시간대별, 계절별 출력되는 용량의 변동이 심하나 이 모의에서는 최대 출력으로 운전되는 경우를 모의하였다.

변전소 전원은 154/22.9[kV]의 Δ -Y 결선으로 되어 있는 ULTC(Under Load Tap Changing) 변압기를 통해서 배전계통에 공급이 되고 PV 시스템은 22.9[kV]인 배전계통에 연계되어 공급된다고 가정하였다. PV 시스템의 배전계통 연계는 한전의 분산전원의 배전계통 연계 기술기준을 만족한다는 가정 하에 모의하였다. PV 시스템이 연계된 배전계통에 사용된 파라미터는 표 1과 같다[1].

표 1. 배전계통 모델의 파라미터
Table 1. Parameters of distribution systems

전원측	영상분 임피던스 [Ω]	0.0135+j0.070
	정상, 역상분 임피던스 [Ω]	0.004+j0.04
	공급전압 [kV]	22.9
배전선로 ACSR 160[mm ²]	영상분 임피던스 [Ω /km]	0.12+j0.293
	정상, 역상분 임피던스 [Ω /km]	0.182+j0.391
	고압 배전선로 적정유지전압 [V]	20,800 ~ 23,800
	저압 수용가 허용 전압 [V]	220±13
변전소 주 변압기 (MTR)	임피던스 [%]	j11
	정격용량	45/60 [MVA], 역률 0.9
	등가 임피던스 Z_{eq} [Ω]	0.65+j0.336
	기준 전압 V_{ce} [kV]	22.9
	총 탭수	21 tap
	전압조정범위 [%]	±10
db(Dead band) [V]	286	
PV 전원	2 [MW], 역률 1	

PV 시스템이 배전계통에 연계 시 이를 모의하기 위하여 CYMDIST를 사용하였다. 그림 1은 배전계통모델의 파라미터를 적용한 PV 시스템이 연계된 배전계통 모델을 보여주는 단선도이다.

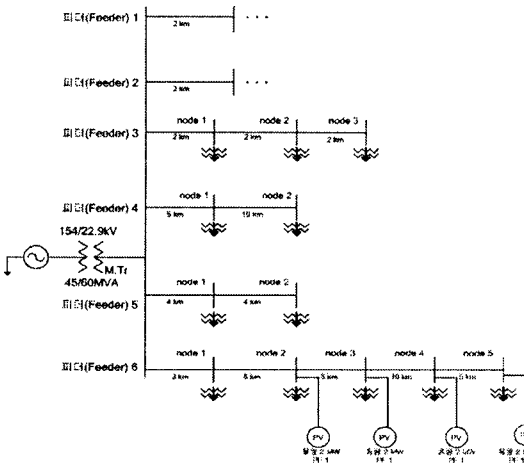


그림 1. PV 시스템이 연계된 배전계통 모델
Fig. 1. Distribution systems model with PV systems connected to a distribution systems

3. 배전계통 전압조정 방법

3.1 LDC 및 ULTC를 고려한 전압조정방법

우리나라 배전계통에서는 ULTC 및 LDC 전압조정방법이 주로 사용되고 있다. 변전소는 LDC 방식에 따른 ULTC 변압기의 1차측 탭 조정을 통해 배전전압을 송출한다. 그림 2는 ULTC 변압기 및 LDC 전압조정 개념도를 나타낸다. 그림 2에서 주변압기를 고려한 ULTC 및 LDC의 전압조정 방법은 주변압기 2차측에 흐르는 전압과 전류를 이용하여 송출기준전압과 송출전압사이의 오차를 계산하고 오차가 db(Dead band) 범위를 벗어나면 ULTC의 탭 값을 증가 또는 감소시킴으로써 배전계통의 적정전압을 유지하도록 전압조정을 하고 있다.[2]

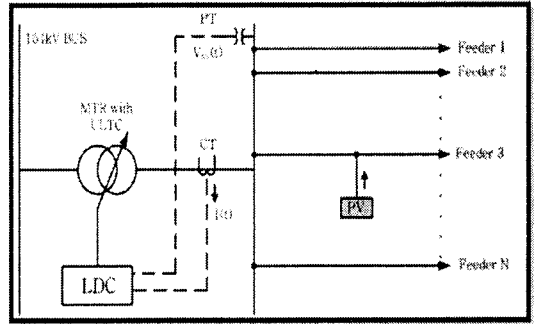


그림 2. ULTC 변압기 및 LDC 전압조정 개념도
Fig. 2. Concept of ULTC Transformer and LDC voltage regulation

ULTC 및 LDC를 고려한 전압조정 방법은 다음과 같다 [2,3].

$$T_k(t+1) = T_k(t) - a_k f_k(e_k(t), c_k(t)) \quad (1)$$

$$c_k(t+1) = g_k(e_k(t), c_k(t)) \quad (2)$$

$$f_k(e_k, c_k) = \begin{cases} 1 & \text{if } e_k = 1 \text{ and } c_k > dt \\ -1 & \text{if } e_k = -1 \text{ and } c_k < -dt \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$g_k(e_k, c_k) = \begin{cases} c_k + 1 & \text{if } e_k = 1 \text{ and } c_k \geq 0 \\ c_k - 1 & \text{if } e_k = -1 \text{ and } c_k \leq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$$e_k(\Delta V_k, db) = \begin{cases} e_k = 1 & \text{if } \Delta V_k > db \\ e_k = -1 & \text{if } \Delta V_k < db \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

여기서,

k : ULTC 변압기의 k 번째 탭 ($k=1, 2, \dots, K$)

K : ULTC 변압기의 전체 탭수

- ΔV_k : 전압오차(voltage error)
- a_k : ULTC 변압기의 탭 간격
- db : ULTC 변압기의 Dead Band
- dt : ULTC 변압기의 시간지연(time delay)
- $c_k(t)$: LDC의 time delay element
- $f_k(t)$: LDC의 tap changing element
- $e_k(t)$: LDC의 measuring element

기준 전압에서 그림 2와 같이 계측된 전압과의 차이 ΔV_k 와 db (Dead band)의 크기를 비교하여 e_k 를 결정하고 e_k 가 1 혹은 -1의 값을 가질 때 시간 지연 즉, c_k 가 설정 값인 dt 를 넘을 때 f_k 값을 적용 ULTC의 탭을 변경하여 배전계통의 전압을 조정한다. 그러나 이러한 LDC 전압조정 방법은 PV 시스템이 연계되었을 때의 배전계통을 고려하지 않았기 때문에 PV 시스템이 연계된 배전계통에서는 양방향 조류를 인해 기존의 LDC 방식에 의한 전압조정으로는 배전계통의 전압을 적정유지전압 범위 내에서 유지하지 못하는 문제가 발생할 수 있다.

3.2 제안된 전압조정 기법

기존의 LDC 전압조정방법은 ULTC 변압기의 2차측에서 CT(Current Transformer), PT(Potential Transformer)를 이용해 버스 전압인 V_2 와 전류 I_2 계측하여 이를 식(6)에 적용 measuring voltage V_m 을 얻고 이를 식(7)에 대입하여 전압오차인 ΔV_k 를 구하여 이를 db (Dead band)와 비교하여 식(5)를 결정하였다 [4].

$$\begin{aligned} V_m &= V_2 - Z_{eq} \cdot I_2 \\ &= V_2 - V_c \end{aligned} \quad (6)$$

$$\Delta V_k = V_r - V_m \quad (7)$$

여기서,

V_r : reference voltage, V_m : measuring voltage,

Z_{eq} : 등가 임피던스(=보상임피던스),

V_c : compensator voltage

제안된 전압조정방법은 ULTC 변압기의 2차측 버스 전압인 V_2 뿐만 아니라 PV 시스템의 연계점 전압인 V_{ij} 를 계측하여 각각 계측된 전압의 크기를 상호 비교하여 전압오차인 ΔV_k 를 구하여 식(5)를 결정하는 것이다. 즉, 여러 대의 PV 시스템이 연계된 각 피더의

연계점 전압 V_{ij} 중 가장 큰 전압 V_n 을 선정하여 V_2 와 비교하여 식(8)의 V_m 을 결정하는 것으로 PV 시스템의 배전계통 연계 시 양방향 조류를 고려한 전압조정 방법이다.

식(8)은 제안된 방법을 나타낸 식이다.

$$V_m = \begin{cases} V_m = V_2 - V_c & \text{if } V_2 \geq V_n \\ V_m = V_n - V_c & \text{if } V_2 < V_n \end{cases} \quad (8)$$

여기서, $V_n : \max V_{ij}$
(i : 피더, j : PV시스템 번호)

4. 사례 연구

PV 시스템이 연계되었을 때의 배전계통의 전압변동을 모의하기 위하여 사례 연구를 하였다. 각 피더의 부하의 변화에 따라 변전소에서 적정유지전압을 유지하는 방법을 모의하고 PV 시스템이 연계 되었을 때를 모델링하여 기존 LDC 전압조정방식의 문제점을 발견하고 제안된 방법을 통해 개선된 전압조정방법의 효과를 증명하였다. 표 2는 PV 시스템 연계 시 배전계통 모델을 통해 전압변동을 모의하기 위한 사례 연구를 나타낸다.

표 2. 사례 연구
Table 2. Case Study

	Case Study 1	Case Study 2
피더 1,2	경부하 (2[MVA],역률0.9)	중부하 (20[MVA],역률0.9)
피더 3,4	경부하 (2[MVA],역률0.9)	중부하 (20[MVA],역률0.9)
피더 5	경부하 (1[MVA],역률0.9)	중부하 (10[MVA],역률0.9)
피더 6 (PV 연계)	경부하 (1[MVA],역률0.9)	경부하 (1[MVA],역률0.9)

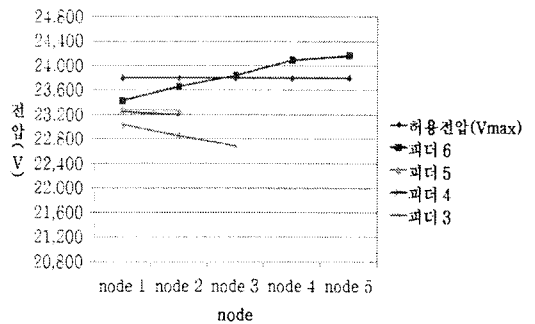


그림 3. LDC 전압조정방법에 의한 배전계통 전압 (Case Study 1)

Fig. 3. Distribution systems voltage by LDC voltage regulation method (Case Study 1)

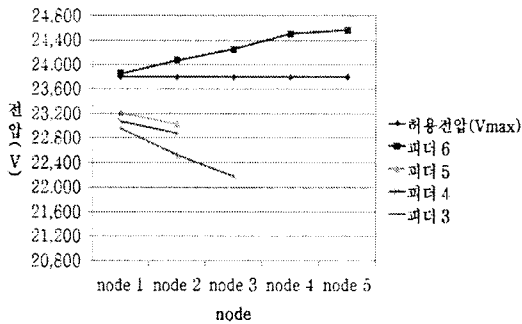


그림 4. LDC 전압조정방법에 의한 배전계통 전압 (Case Study 2)

Fig. 4. Distribution systems voltage by LDC voltage regulation method (Case Study 2)

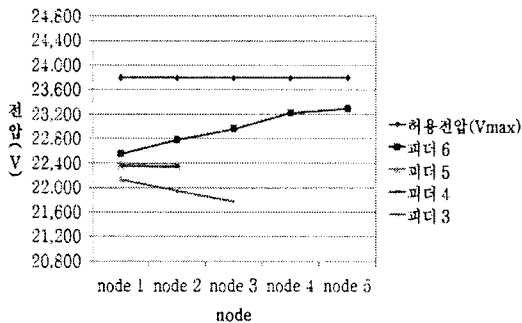


그림 5. 제안된 전압조정방법에 의한 배전계통 전압 (Case Study1)

Fig. 5. Distribution systems voltage by proposed voltage regulation method (Case Study 1)

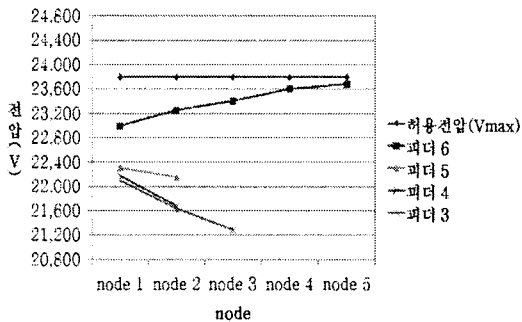


그림 6. 제안된 전압조정방법에 의한 배전계통 전압 (Case Study2)

Fig. 6. Distribution systems voltage by proposed voltage regulation method (Case Study 2)

그림 3과 그림 4는 현재 운용되고 있는 LDC 및 ULTC를 고려한 전압조정 방법을 적용했을 때의 배전계통 전압을 나타낸다. PV 시스템이 연계된 경우에도 22.9[kV] 배전계통에서는 적정유지전압이 20800 ~ 23800[V] 으로 유지되어야하지만 기존의 LDC 방식에 의한 ULTC 변압기의 탭 조정에도 불구하고 PV 시스템이 연계된 피더 6에서 이를 벗어나는 전압상승이 발

생하였다. 이는 현재의 LDC 방식이 단방향 조류를 고려하여 운용되고 전압이 단조 감소하는 것만을 고려하기 때문이다.

그림 5와 그림 6은 제안된 방법에 의해 PV 시스템의 연계를 고려하여 변전소의 ULTC 변압기의 탭을 조정하여 전압을 송출할 경우 계통전압이 적정유지범위 내에서 유지되는 것을 보여준다.

3. 결론

본 논문에서는 기존의 ULTC 및 LDC 방식을 고려한 전압조정이 PV 시스템의 연계 시에는 계통의 전압을 적절하게 제어하지 못하는 문제점을 지적하고 이를 개선하기 위한 기법을 제안하였다. 실제로 배전계통은 부하의 상태에 따라 피더의 부하가 경부하에서 중부하로, 중부하에서 경부하로의 변동이 발생하며 PV 시스템은 실시간으로 계통에 연계되어 운전됨으로 이 역시 피더의 부하변동으로 이어진다. 따라서 계통의 다양한 부하 형태에 따른 전압변동을 모의하고 각각의 사례 연구에 기존의 LDC 전압조정방식과 제안된 LDC 전압조정방식의 비교를 통해 제안된 방법의 효과를 증명하였다. 제안된 전압조방식은 PV 연계점 전압 V_{ij} 를 추가적으로 계측하여 LDC 및 ULTC 변압기를 운용하는 것이다. 이를 위해서는 PV 시스템 내의 통신망을 설치 PV 연계점의 계통 전압을 온라인 방식으로 변전소에 전송하여야 한다. 실시간감시가 이루어지는 PV의 시스템이므로 이 제안된 방법은 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제임.

참고 문헌

- (1) 한국전력공사 배전처, 배전보호 기술서, 1995
- (2) 김태음, 김재연, "분산전원이 도입된 배전계통의 전압해석 방법에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 52A-2-1, pp 69-78, 2003
- (3) Joon-Ho Choi and Jae-Chul Kim, "Advanced Voltage Regulation Method at the Power Distribution Systems Interconnected with Dispersed Storage and Generation Systems", IEEE Trans. on PWRD, Vol.15, No.2, pp 691-696, Apr.2000
- (4) Milan S. Calovic, "Modeling and Analysis of Under-Load Tap-Changing Transformer Control Systems", IEEE Trans. on PWRD, Vol. PAS-103, No. 7, pp 1909-1915, July 1984