Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 23, No.2, pp. 53~61 February 2009

논문 23-2-7

다수 PV 시스템 배전계통 연계 시 개선된 전압조정 방법

(An Improved Voltage Regulation Method in Power Distribution System Interconnected Multiple PV Systems)

강 철* · 신희상 · 문종필 · 최규하 · 김재철**

(Chul Kang · Hee-Sang Shin · Jong-Fil Moon · Gyu-Ha Choe · Jae-Chul Kim)

요 약

현재의 배전계통의 전압은 변전소에서 단방향 조류를 고려하여 LDC에 의한 전압조정방법으로 ULTC 변압기의 탭을 변환하여 공급전압을 적정범위 내에서 유지되도록 운전하고 있다. 그러나 현재의 배전계통 운용은 소용량에서 대규모 용량에 이르기까지 다양한 용량의 PV 시스템이 배전계통에 연계되어 운전되는 것을 반영하지 못하고 있는 실정이다. 때문에 다수의 PV 시스템이 계통에 연계되어 양방향 조류가 발생하고 이로 인해 연계점의 전압변동이 발생하여도 이를 효과적으로 조정하지 못하여 계통의 전압이 적정범위 내에서 운용되지 못하는 경우가 발생할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 다수 PV 시스템의 연계에 따른 양방향 조류의 발생을 고려하고 연계점의 전압변동에 따른 계통의 전압을 효과적으로 제어할 수 있도록 실시간 감시가 이루어지는 PV 시스템의 특징을 이용하고 기존의 LDC 전압조정방법을 개선하여 PV 시스템 연계 시에도 변전소에서 계통의 전압을 적정범위 내에서 조정할 수 있는 개선된 전압조정방법을 제안하였다.

Abstract

This paper presents the improved voltage regulation method in power distribution system with multiple PV systems. At present, Line Drop Compensator (LDC) method has been used as voltage regulation method of power distribution system, which regulates the voltage using Under Load Tap Changer (ULTC), regarding the power flow of distribution system as one way. However, the method may be not able to regulate the voltage in a permissible range when the power flow is two ways. Thus, in this paper, we present the improved voltage regulation method of power distribution system using the voltage data of the point connected PV systems.

Key Words : PV Systems, LDC(Line Drop Compensator), ULTC(Under Load Tap Chager), Distribution System, Voltage Variation

---

* 주저자 : 숭실대학교 전기공학과 석사과정
** 교신저자 : 숭실대학교 전기공학부 교수
Tel : 02-817-7966, Fax : 02-817-0780
E-mail : marsdream@ssu.ac.kr
접수일자 : 2008년 7월 24일
1차심사 : 2008년 7월 28일
2차심사 : 2008년 12월 17일
심사완료 : 2009년 1월 5일

1. 서 론

산업 규모의 지속적인 성장과 더불어 생활수준의 향상으로 인해 매년 전력 수요가 크게 증가하고 있다. 이에 반해 유가상승 및 환경문제로 인하여 대규모의 발전소 건설이나 송배전선로의 확충 및 신설 등은 점점 어려워지고 있는 것이 현실이다. 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 하나로써 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.

현재 우리나라에서 운용되고 있는 특고압계통의 공급전압 변동범위는 20,800~23,800[V]이며[1] 변전소에서 LDC(Line Drop Compensator) 방식으로 ULTC(Uunder Load Tap Changing) 변압기의 탭을 조정하여 이를 유지시키고 있다. 이는 단방향 조류를 고려한 형태이므로 PV 시스템이 연계된 배전계통에서는 효과적으로 운용되지 않을 수 있다.

본 논문에서는 다수 PV 시스템이 여러 피더에 연계되어 운전될 경우 기존의 LDC 전압조정 방식이 배전계통의 전압을 안정적으로 유지할 수 있는지 사례 연구를 통해 알아보고 이와 함께 PV 시스템의 연계를 고려한 개선된 전압조정 기법을 적용하여 그 효과를 비교하였다. 이를 위해 먼저 기존의 LDC 전압조정 방법으로 PV 시스템이 연계된 배전계통에서의 전압조정 효과를 모의하여 기존 LDC 방식의 한계를 지적하고 개선된 전압조정 알고리즘을 적용하여 PV 시스템이 연계된 배전계통에서도 안정적으로 전압을 공급할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

2. 다수 PV 시스템이 연계된 배전계통 모델

PV 시스템이 연계된 배전계통 모델은 송전선을 포함한 상위계통을 등가화한 무한모선과 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 소비할 수 있도록 구성하였고, 피더를 두 개의 그룹으로 묶어 경부하, 중부하 시 PV 시스템이 배전계통에 연계되었을 경우를 고려 다양한 형태의 배전계통을 모의하였다. PV 시스템은 시간대별, 계절별 출력되는 용량의 변동이 심하나 이 모의에서는 최대 출력으로 운전되는 경우를 모의하였으며 피더에 연계되는 PV 시스템의 용량은 각 노드당 2[MVA], 역률 1로써 운전되게 하였다.

변전소 전원은 154/22.9[kV]의 Δ-Y 결선으로 되어 있는 ULTC 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[2].

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

시스템 기준	100[MVA]	
전원측	영상분 임피던스 [Ω]	0.0135+j0.070
	정상, 역상분 임피던스 [Ω]	0.004+j0.04
	공급전압 [kV]	22.9
배전선로 ACSR	영상분 임피던스 [Ω/km]	0.12+j0.293

시스템 기준	100[MVA]	
160[㎟]	정상, 역상분 임피던스 [Ω/km]	0.182+j0.391
	고압 배전선로 적정유지전압 [V]	20,800~23,800
변전소 주 변압기 (MTR)	저압 수용가 허용 전압 [V]	220±13
	임피던스 [%]	j11
	정격용량	45/60 [MVA], 역률 0.9
	등가 임피던스 Z_{eq} [Ω]	0.066+j0.34
	기준 전압 V_r [kV]	22.9
	총 탭수	21 tap
	전압조정범위 [%]	±10
	db(Dead band) [V]	286
PV 전원	2 [MW], 역률 1	

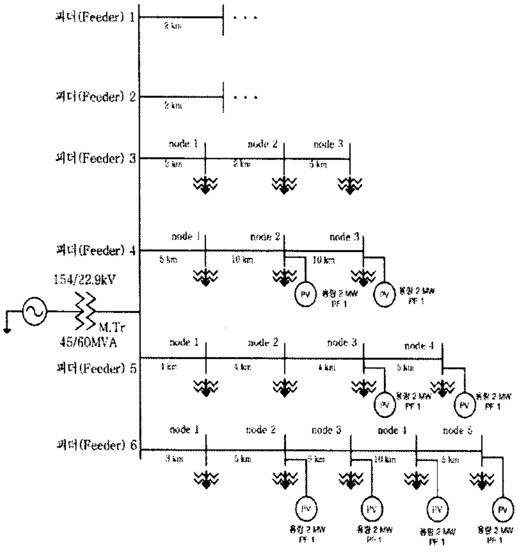

그림 1. PV 시스템이 연계된 모델 배전계통
Fig. 1. Distribution systems model with PV systems connected to a distribution systems

PV 시스템이 배전계통에 연계 시 이를 모의하기 위하여 CYMDIST를 사용하였다. 그림 1은 배전계통모델의 파라미터를 적용한 PV 시스템이 연계된 배전계통 모델을 보여주는 단선도이다. 각 피더의 node는 부하 지점에 따라 node 1부터 node 5까지 있으며 각 node의 거리는 피더에 따라 달리하였다.

3. 배전계통 전압조정방법

3.1 기존 LDC 및 ULTC를 고려한 전압 조정방법

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[6]. 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 ULCT의 탭 값을 증가 혹은 감소시킴으로써 배전계통의 적정전압을 유지하도록 전압조정을 하고 있다[3]. 식 (1)~(5) 이러한 LDC 방법에 의해 ULTC 변압기의 탭이 변환되어 전압이 조정되는 식을 나타낸다.

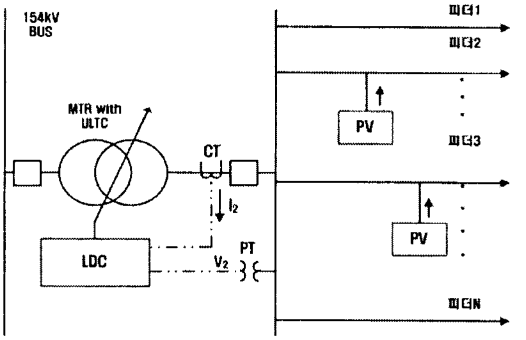

그림 2. ULTC 변압기 및 LDC 전압조정 개념도
Fig. 2. Concept of ULTC Transformer and LDC voltage regulation

기존 ULTC 및 LDC를 고려한 전압조정 방법은 다음과 같다[3-6].

$$n(t+1) = n(t) - a \cdot f(e(t), b(t)) \tag{1}$$

$$b(t+1) = g(e(t), b(t)) \tag{2}$$

$$f(e,b) = \begin{cases} 1 & \text{if } e=1 \text{ and } b > T_d \\ -1 & \text{if } e=-1 \text{ and } b < -T_d \\ 0 & otherwise \end{cases} \tag{3}$$

$$g(e,b) = \begin{cases} b+1 & \text{if } e=1 \text{ and } b \geq 0 \\ b-1 & \text{if } e=-1 \text{ and } b \leq 0 \\ 0 & otherwise \end{cases} \tag{4}$$

$$e(\Delta V, db) = \begin{cases} e=1 & \text{if } \Delta V > db \\ e=-1 & \text{if } \Delta V < db \\ 0 & otherwise \end{cases} \tag{5}$$

여기서,

n : ULTC 변압기의 탭 위치(값)
a : ULTC 변압기의 탭 간격
e : LDC의 measuring element
b : LDC의 time-delay element
T_d : 시간지연
ΔV : 전압오차
db : dead-band의 크기
$f(t)$: LDC의 tapchanging element

배전 변전소의 ULTC 변압기를 통한 송출전압 조정은 식 (1)~(5)로부터 시간 t에 대해서 전압오차가 db를 벗어나고 T_d를 초과할 경우 ULTC 변압기의 탭의 위치가 바뀌게 됨으로써 송출전압이 조정되어 결정된다. 즉, V_r(기준전압)에서 그림 2와 같이 계측 된 전압과의 차인 ΔV 와 db(dead-band)의 크기를 비교하여 e를 결정하고 e가 1 혹은 -1의 값을 가질 때 시간 지연 즉, b가 설정 값인 T_d를 넘을 때 $f(t)$ 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 조류로 인해 기존의 LDC 방식에 의한 전압조정으로는 배전계통의 전압을 적정유지전압 범위 내에서 유지하지 못하는 문제가 발생할 수 있다.

3.2 개선된 전압조정 방법

기존의 LDC 전압조정방법은 ULTC 변압기의 2차측에 CT(Current Transformer), PT(Potential Transformer)를 통해 모선 전압인 V_2와 전류 I_2를 계측하여 이를 식 (6)에 적용 measuring voltage V_m을 얻고 이를 식 (7)에 대입하여 전압오차인 ΔV를 구하여 이를 db(dead-band) 범위와 비교하여 식 (5)를 결정하였다[5].

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

$$\Delta V = V_r - V_m \tag{7}$$

여기서,

V_r : 기준 전압
V_m : measuring voltage
Z_{eq} : 등가 임피던스(=보상임피던스)
V_c : compensator voltage

그러나 이러한 전압 조정 방법은 배전계통을 단방향 조류의 단조 감소하는 수지상구조로 보고 운용되기 때문에 다수의 PV 시스템이 연계된 배전계통에서는 해당 연계지점의 전압변동을 제대로 반영하지 못하며 그 결과 전압조정 또한 어렵게 된다.

따라서 본 논문에서는 ULTC 변압기의 2차측 버스 전압인 V_2뿐만 아니라 PV 시스템의 연계점 전압인 V_{ij}를 계측하여 각기 계측된 전압의 크기를 상호 비교하여 전압오차인 ΔV를 구하여 식 (5)를 결정하는 개선된 전압조정방법을 제안하였다. 즉, 여러 대의 PV 시스템이 연계된 각 피더의 연계점 전압 V_{ij} 중 가장 큰 전압 V_n을 선정하여 V_2와 비교하여 식 (6)의 V_m을 결정하는 것이다.

식 (8)은 제안된 방법을 나타낸 식이다.

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

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

그림 3은 개선된 전압조정 방법을 나타내는 개념도이며, 그림 4는 개선된 전압조정 방법 알고리즘을 나타내는 순서도이다.

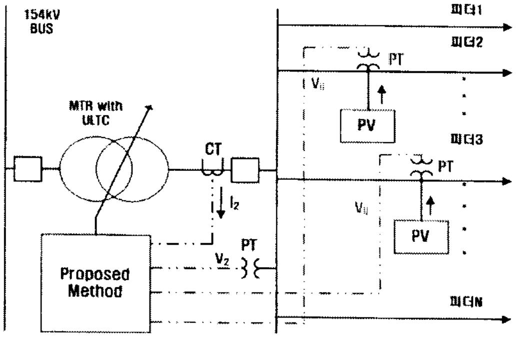

그림 3. 제안된 LDC 전압조정 방법 개념도
Fig. 3. Concept of proposed voltage regulation method

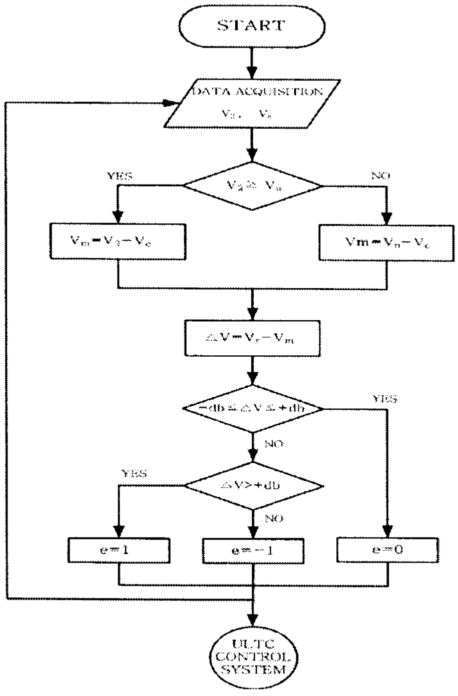

그림 4. 개선된 전압조정 방법의 순서도
Fig. 4. Flowchart of Improved voltage regulation method

그림 4에 나타낸 개선된 전압조정 방법에 대한 설명은 아래 과정과 같다.

개선된 전압조정방법 알고리즘

Step 1) 각 피더의 PV 시스템의 연계점 전압인 V_{ij}를 계측하여 가장 큰 전압인 V_n(= $\max V_{ij}$)을 선정하고, 동시에 ULTC 2차 측 전압 즉, 모선 전압 V_2를 계측한다.

Step 2) 계측 된 V_2와 V_n의 크기를 비교하여 식 (8)을 결정한다.

Step 3) V_r과 식 (8)에서 결정된 V_m을 가지고 식 (7)의 ΔV를 구한다.

Step 4) ΔV의 값을 db와 비교하여 e를 구하고 ULTC 탭을 조정하여 배전계통의 전압을 허용범위 안에서 유지시킨다.

4. 모델 배전계통에 대한 전압조정 분석

PV 시스템이 연계되었을 때의 배전계통의 전압변동을 모의하기 위하여 사례 연구를 하였다. 각 피더의 부하의 변화에 따라 변전소에서 적정유지전압을 유지하는 방법을 모의하고 PV 시스템이 연계되었을 때를 모델링하여 기존 LDC 전압조정방식의 문제점을 발견하고 제안된 방법을 통해 개선된 전압조정방법의 효과를 증명하였다. 표 2와 표 3은 PV 시스템 연계 시 배전계통 모델을 통해 전압변동을 모의하기 위한 사례 연구를 나타낸다.

송출전압과 송출기준전압에서 LDC 전압조정방법의 상수가 되는 Z_{eq}와 V_r의 값의 결정은 다양한 불평등 부하가 연계된 많은 피더와 주기적인 부하 변동이 발생하므로 매우 복잡하게 된다. 따라서 한전의 배전보호 기술서를 참고하여 등가임피던스 Z_{eq}는 100[MVA] 기준으로 0.66+j0.34[Ω]으로 기준전압 V_r은 22.9[kV]로 하였다.

표 2. 사례 연구
Table 2. Case Study

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

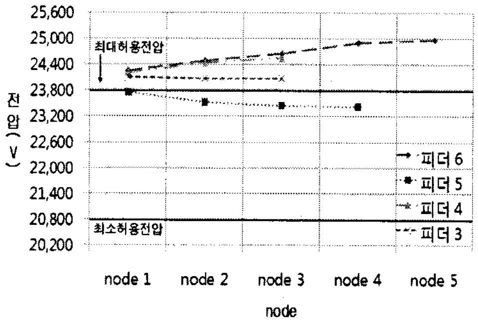

그림 5. LDC 전압조정방법 적용 전의 배전계통 전압 (Case Study 1)
Fig. 5. Distribution systems voltage without LDC voltage regulation method(Case Study 1)

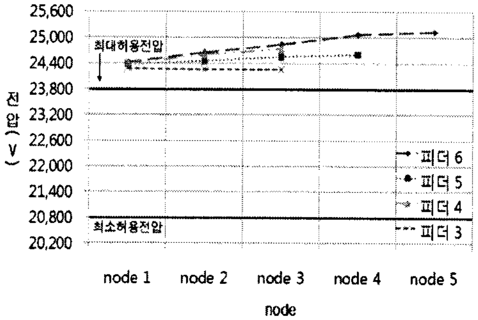

그림 6. LDC 전압조정방법 적용 전의 배전계통 전압 (Case Study 2)
Fig. 6. Distribution systems voltage without LDC voltage regulation method(Case Study 2)

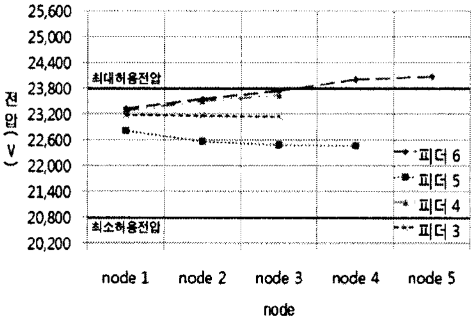

그림 7. LDC 전압조정방법 적용 후의 배전계통 전압 (Case Study 1)
Fig. 7. Distribution systems voltage by LDC voltage regulation method(Case Study 1)

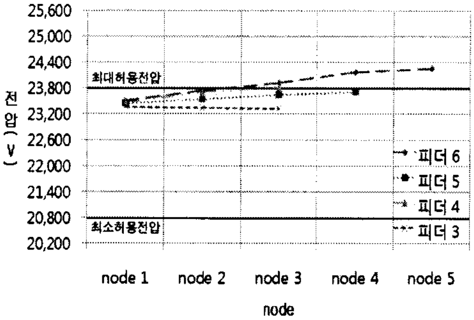

그림 8. LDC 전압조정방법 적용 후의 배전계통 전압 (Case Study 2)
Fig. 8. Distribution systems voltage by LDC voltage regulation method(Case Study 2)

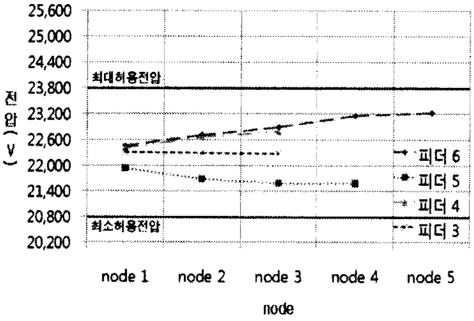

그림 9. 제안된 전압조정방법에 의한 배전계통 전압 (Case Study 1)
Fig. 9. Distribution systems voltage by proposed voltage regulation method(Case Study 1)

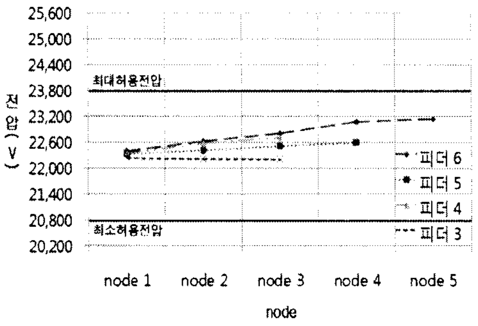

그림 10. 제안된 전압조정방식에 의한 배전계통 전압 (Case Study2)
Fig. 10. Distribution systems voltage by proposed voltage regulation method(Case Study 2)

표 3. 사례 연구
Table 3. Case Study

	Case Study 3	
V_m	$V_2 \geq V_n$	$V_2 < V_n$
피더 1,2	중부하 (20[MVA],역률0.9)	중부하 (20[MVA],역률0.9)
피더 3	경부하 (1[MVA],역률0.9)	경부하 (1[MVA],역률0.9)
피더 4	경부하 (1[MVA],역률0.9)	경부하 (1[MVA],역률0.9)
피더 5	중부하 (10[MVA],역률0.9) node 5에 PV 연계	중부하 (10[MVA],역률0.9) node 5에 PV 연계
피더 6	경부하 (1[MVA],역률0.9)	경부하 (1[MVA],역률0.9) node 4와 5에 PV 연계

그림 5와 그림 6은 LDC가 적용되지 않은 상태에서 다수 PV 시스템이 연계된 배전계통 전압을 나타내며 이때 ULTC 변압기의 탭의 위치는 11 tap으로써 154,000/22,900[V]이다.

그림 7과 그림 8은 현재 운용되고 있는 LDC 및 ULTC를 고려한 전압조정 방법을 적용했을 때의 배전계통 전압을 나타내며 그림 7의 ULTC 변압기의 탭의 위치는 8 tap이며 그림 8의 ULTC 변압기의 탭의 위치는 8 tap이다. PV 시스템이 연계된 경우에도 22.9[kV] 배전계통에서는 적정유지전압이 20,800~23,800[V] 으로 유지되어야 하지만 기존의 LDC 방식에 의한 ULTC 변압기의 탭 조정에도 불구하고 다수 대의 PV 시스템이 연계된 피더 6에서 이를 벗어나는 전압상승이 발생하였다. 이는 현재의 LDC 방식이 단방향 조류를 고려하여 운용되고 전압이 단조 감소한다는 가정 하에 전압조정을 하기 때문이다.

그림 9와 그림 10은 제안된 방법에 의해 PV 시스템의 연계를 고려하여 변전소의 ULTC 변압기의 탭을 조정하여 전압을 송출할 경우 계통전압이 적정유지범위 내에서 유지되는 것을 보여준다. 이 때, 그림 8의 ULTC 변압기의 탭의 위치는 4 tap이며 그림 9의 ULTC 변압기의 탭의 위치는 5 tap이다. 이때, 제안된 방법에 의해 전압이 적정범위 내에서 유지되는 것을 확인할 수 있다.

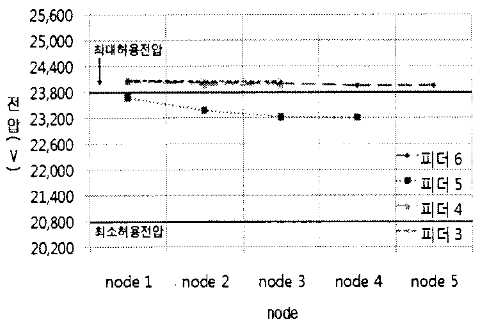

그림 11. 제안된 전압조정방법에 적용 전의 배전계통 전압(Case Study 3, $V_2 \geq V_n$)
Fig. 11. Distribution systems voltage without proposed voltage regulation method(Case Study 3, $V_2 \geq V_n$)

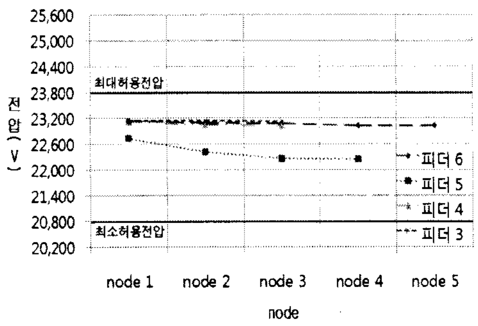

그림 12. 제안된 전압조정방법에 적용 후의 배전계통 전압(Case Study 3, $V_2 \geq V_n$)
Fig. 12. Distribution systems voltage by proposed voltage regulation method(Case Study 3, $V_2 \geq V_n$)

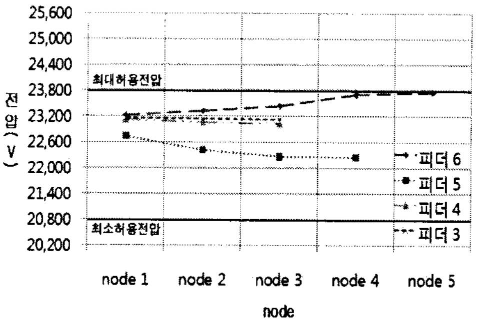

그림 13. 제안된 전압조정방법에 적용 전의 배전계통 전압(Case Study 3, $V_2 \geq V_n$)

Fig. 13. Distribution systems voltage without proposed voltage regulation method(Case Study 3, $V_2 \geq V_n$)

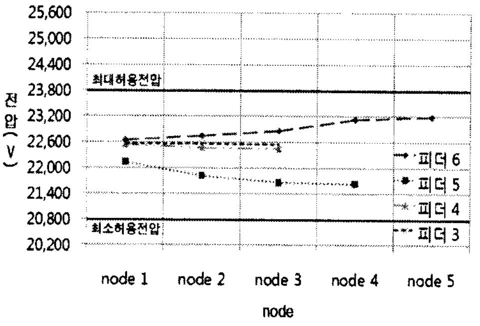

그림 14. 제안된 전압조정방법에 적용 후의 배전계통 전압(Case Study 3, $V_2 < V_n$)

Fig. 14. Distribution systems voltage by proposed voltage regulation method(Case Study 3, $V_2 < V_n$)

PV 시스템의 연계 형태에 따라 제안된 식 (8)의 $V_2 \geq V_n$ 와 $V_2 < V_n$이 발생하는 경우를 모의하기 위하여 표 3에서와 같이 피더 5의 node 5에만 PV를 연계하여 $V_2 \geq V_n$가 되는 경우 제안된 전압조정방법을 적용하였으며 그 이후에 피더 6의 node 4와 5에 PV를 추가 연계하여 $V_2 < V_n$으로 V_m이 바뀐 후에도 제안된 전압조정방법을 적용하여 사례연구하였다. 그림 11은 제안된 방법 적용 전의 계통 전압을 나타내며 그림 12는 그림 11의 $V_2 \geq V_n$인 경우의 제안된 식 (8)에 의한 전압조정 결과이다. 또한 그림 13은 그림 12에서의 계통 상태에서 피더 6의 node 4와 5에 PV 시스템을 연계했을 때의 계통 전압을 나타내며 이때, 계통 전압은 $V_2 < V_n$으로 V_m이 바뀌게 되므로 식 (8)을 적용하여 그림 14에 그 결과를 나타내었다. 그림 12와 그림 14의 결과에서도 볼 수 있듯이 제안된 전압조정방법을 적용하였을 때 Case Study 3의 두 경우에서 모두 적정유지범위 내에서 계통전압이 유지되는 것을 알 수 있으며, 이때, 그림 12의 ULTC 변압기의 탭의 위치는 8 tap이며 그림 14의 ULTC 변압기의 탭의 위치는 6 tap이다.

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 ULTC 및 LDC 방식을 고려한 전압조정이 다수 대의 PV 시스템의 연계되어 많은 전력을 발전할 때는 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 부하형태에 따른 전압변동을 모의하고 각각의 사례 연구에 기존의 LDC 전압조정방식과 제안된 LDC 전압조정방식의 비교를 통해 제안된 방법의 효과를 증명하였다. 개선된 전압조정방법은 PV 연계점 전압 V_{ij}를 추가적으로 계측하여 LDC 및 ULTC 변압기를 운용하는 것이다. 이를 위해서는 PV 시스템 내의 통신망을 이용하거나 별도의 설치를 통해 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.

References

[1] 분산형전원 배전계통 연계 기술 기준, 한전 배전처, 2005.
[2] 한국전력공사 배전처, 배전보호 기술서, 1995.
[3] 김태응, 김재인, "분산전원이 도입된 배전계통의 전압해석 방법에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 52A-2-1, pp69-78, 2003.
[4] Joon-Ho Choi and Jae-Chul Kim, "Advaced 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.
[5] 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.
[6] J.-H. Choi, J.-C. Kim, "The online voltage control of ULTC transformer for distribution voltage regulation", Electrical Power and Energy Systems 23(2001), pp91-98.

◇ 저자소개 ◇

강 철(姜 鐵)
1980년 3월 11일생. 2007년 숭실대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 석사과정.

신희상(申熙尙)
1980년 9월 18일생. 2007년 숭실대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 석사과정.

문종필(文鍾必)
1977년 5월 27일생. 2000년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003~2008년 기초전력연구원 전력시스템연구실 선임연구원. 현재 숭실대학교 전기공학부 전임강사.

최규하(崔圭夏)
1955년 7월 24일생. 1978년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1987~1988년 미국 오렌곤 주립대학 전기공학과 Post-Doc이수. 현재 건국대학교 전기공학과 교수.

김재철(金載哲)
1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~현재 숭실대학교 전기공학부 교수.