

협조 제어를 이용한 분산전원 연계 배전계통의 전압조정 방식 개발

Development of a Coordinated Voltage Regulation Scheme in Distribution Networks with Multiple Distributed Generations

오 윤 식* · 조 규 정* · 김 민 성* · 김 지 수* · 김 철 환†
(Yun-Sik Oh · Kyu-Jung Cho · Min-Sung Kim · Ji-Soo Kim · Chul-Hwan Kim)

Abstract - As penetration level of Distributed Generations (DGs) on weak distribution networks gets higher, voltage rise problem can often occur due to reverse power which is not expected in conventional distribution networks. It, however, cannot be effectively solved by using conventional voltage regulating devices such as On-Load Tap Changers (OLTCs), Step Voltage Regulators (SVRs) because those do not consider the presence of DGs when determining relevant setting parameter for voltage regulation. This paper presents a scheme for voltage regulation using coordinated control between OLTC and DGs which can actively participate in the regulation. The scheme decides which device should be operated first based on the characteristics of regulating devices, in order to prevent unnecessary operation of output changes of DG and excessive tap changing operation of OLTC. Computer simulations considering daily irradiation of PV and load curve are performed by using MATLAB Simulink and performance comparison between the presented scheme and conventional ones is also made. It can be concluded from simulation results that the scheme presented is very effective to regulate voltages in distribution networks with multiple DGs.

Key Words : Coordinated control, Distributed generation, Distribution system, Voltage regulation

1. 서 론

화석연료의 높은 사용량으로 인해 기후 변화 및 지구온난화의 영향이 직접적으로 인류에게 미치기 시작함에 따라 화석연료의 사용량을 줄임과 동시에 신재생에너지를 이용한 분산전원(Distributed Generation, DG)의 설치 및 이용에 대한 관심이 전 세계적으로 고조되고 있으며, 특히 배전계통에 신재생에너지인 풍력 발전, 태양광 발전 및 소형 열병합 발전 등 중소규모 전원을 분산 배치하는 분산전원 도입이 점점 증가하고 있는 추세이다 [1-2]. 이러한 분산전원의 배전계통 연계는 계속해서 증가할 것으로 예상되지만 현재의 배전계통 인프라와 운영방식에서 대용량 분산전원을 수용하기 위해서는 한계가 존재하며, 발생 가능한 기술적 문제로는 규정전압 이탈, 보호협조 저해, 단락용량 증대, 전기품질 저하, 단독운전에 의한 계통운영의 안전성 저하 등을 예로 들 수 있다 [3-4].

배전계통에 대한 분산전원의 침투율 증가로 인해 종래의 배전계통에서는 경험하지 못했던 역조류 현상이 발생할 수 있으며, 이는 전압상승 문제로 이어진다. 하지만 기상 조건에 의해 쉽게 영향을 받을 수 있는 풍력 발전 및 태양광 발전의 간헐적인 출

력 특성으로 인해 On-load Tap Changer (OLTC), Step Voltage Regulator (SVR), 커패시터 뱅크 등과 같은 종래의 전압조정 기기의 효율적인 동작을 더 이상 기대하기 어려운 실정이다 [5-6]. 계통 연계용 인버터의 출력 제어를 통한 분산전원의 전압조정 참여가 하나의 대안이 될 수 있지만, 기존 전압조정 기기들과의 협조 제어가 수립되지 않는다면 과도한 조정 동작 등의 문제를 야기할 수 있다. 따라서 기존기기들과의 협조 제어를 이용한 새로운 전압조정 방식 개발이 필요하다.

본 논문에서는 종래 및 분산전원 연계 배전계통의 전압변동 및 조정 방식이 분석되었으며, 전압조정 기기들의 특성을 고려한 분산전원과 OLTC 간의 협조 제어 기법이 제안되었다. 제안된 협조 제어 기법은 배전계통의 전압위반 노드의 수에 기초하여 전압조정 참여 우선순위를 결정하며, 이를 통해 조정 기기들의 동시 동작을 방지함으로써 분산전원의 불필요한 출력 조정 및 OLTC의 과도한 탭 동작을 방지한다. 제안된 기법은 실제 한전에서 운영 중인 국내 배전계통을 대상으로 검증되었으며, 기존의 전압조정 방식들과의 비교 분석을 통해 제안된 방식의 우수성을 확인하였다.

2. 배전계통의 전압변동 및 조정

2.1 종래 배전계통의 전압변동 및 조정

종래의 배전계통에서 발생하는 전압변동을 분석하기 위해 간

† Corresponding Author : Dept. of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Korea.
E-mail: hmwkim@hanmail.net

* Dept. of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Korea.

Received : March 3, 2017; Accepted : August 21, 2017

략화 된 2-모선 배전계통을 이용할 수 있다. 분산전원이 연계되지 않은 종래의 배전계통은 그림 1과 같이 단방향 조류 특성을 갖는 2-모선 배전계통으로 간략화 될 수 있으며, 송전단과 수전단의 전압 차 ΔV 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$\Delta V \approx \frac{RP + XQ}{V_S} \quad (1)$$

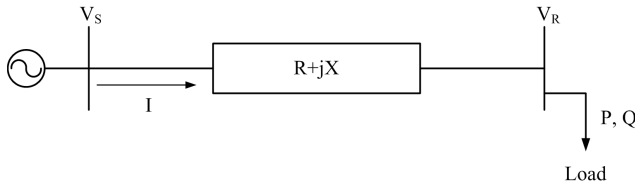


그림 1 간략화 된 종래 배전계통 모델
Fig. 1 Simplified conventional distribution system model

식 (1)을 통해 알 수 있듯이, 종래의 배전계통의 전압변동은 단방향 조류 특성으로 인해 항상 전압강하(ΔV 는 +의 값을 가짐)의 형태로 나타난다. 또한, 전압변동은 선로의 등가임피던스(R, X) 및 선로를 통해 공급되는 부하의 유효(P) 및 무효전력(Q)에 의해 크게 영향을 받는다. 즉, 선로가 길어지고 수전단에 위치한 부하의 크기가 증가할수록 배전계통의 전압강하 현상이 크게 발생한다.

기존의 배전계통에서는 전압강하를 보상하기 위해 그림 2와 같이 Line Drop Compensator(LDC) 방식을 이용한 OLTC를 사용하여 배전계통의 전압을 적정범위 이내로 유지시키고 있다 [8-9]. LDC는 미리 정해진 전압조정 요소인 등가 임피던스와 부하중심점 전압을 이용하며, 시간에 따라 변화하는 부하전류의 크기를 고려하여 고압선로의 전압강하를 보상하는 방식이다.

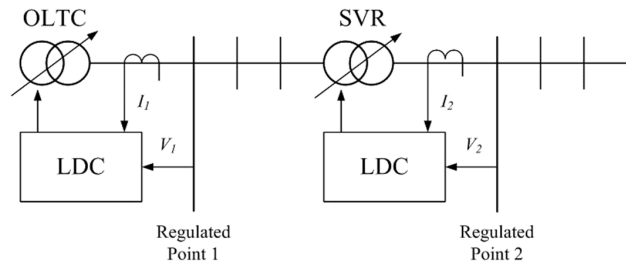


그림 2 다수의 전압조정 기기들을 갖는 배전계통
Fig. 2 Distribution network with multiple voltage regulating devices

2.2 분산전원 연계 배전계통의 전압변동

종래의 배전계통과는 달리 분산전원이 연계된 배전계통은 더 이상 단방향 조류 특성을 기대하기 힘들다. 분산전원의 용량 및 출력 특성에 따라 계통에는 역조류가 흐르게 되며, 이로 인해 전압변동 또한 다른 특성을 가지게 된다.

본 논문에서는 분산전원이 연계된 배전계통의 전압변동을 분석하기 위해 그림 3과 같이 간략화 된 배전계통이 고려되었다. 분산전원의 계통 연계로 인해 수전단에도 전원이 존재하며, 역조류가 발생한다고 가정할 경우 전압변동은 식 (2)에 의해 표현될 수 있다[7].

$$\Delta V = V_{GEN} - V_S \approx R(P_G - P_L) + X(\pm Q_C - Q_L \pm Q_G) \quad (2)$$

여기서, V_{GEN} : 분산전원 연계점 전압 (V_R)
 P_G : 분산전원의 유효전력 출력
 Q_G : 분산전원의 무효전력 출력
 Q_C : 커패시터 보상 무효전력량

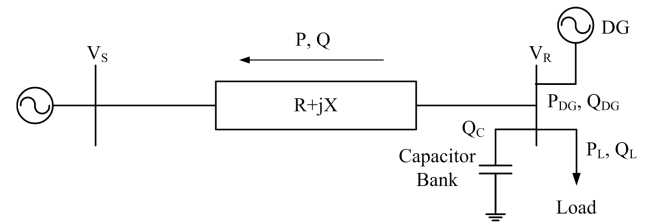


그림 3 간략화 된 분산전원 연계 배전계통 모델
Fig. 3 Simplified distribution system model with DGs

식 (2)를 통해 알 수 있듯이, 분산전원이 연계된 배전계통의 전압변동은 기존 네트워크의 부하량 및 임피던스뿐만 아니라 분산전원의 발전량에도 큰 영향을 받으며, 분산전원의 발전량이 매우 클 경우 역조류 발생으로 인해 기존의 전압강하가 아닌 전압상승 현상이 발생할 수 있다.

2.3 분산전원의 전압조정 참여

IEEE Standard 1547.2-2008에 따르면, 배전계통 운영자가 배전계통의 전압 조정을 위해 분산전원의 출력을 변경하도록 요청하지 않을 경우, 분산전원들은 배전계통의 전압조정에 능동적으로 참여할 수 없다[10]. 하지만 이는 분산전원의 침투율이 낮았던 과거에 정해진 권고사항으로 최근 들어 급증하고 있는 분산전원 수요에 따른 전압변동 문제들을 해결하기 위해서는 분산전원의 적극적인 참여가 필요하다. 현재 많은 국가들에서 분산전원의 출력 및 역률을 제어하기 위한 장치와 시스템을 개발 중이며, 프로토타입 혹은 현장 테스트를 완료한 제품들 또한 쉽게 찾아볼 수 있다[11].

그림 4는 분산전원 계통 연계용 인버터의 유효 및 무효전력 제어 원리를 나타낸다. 인버터의 정격 용량은 반원으로 표현되며 정상 조건하의 인버터는 고정된 역률을 가지고 운전된다. 하지만 연계점 전압이 규정범위를 벗어날 경우, 인버터는 무효전력 혹은 유효전력, 역률 등을 제어하여 능동적으로 연계점 전압을 제어할 수 있다. 그림 4의 좌측은 고정된 역률로 제어됨을 보여주며, 우

측에 나타난 제어 가능한 인버터의 경우, 운영자가 낮은 역률에서 계통을 운전하고자 한다면 무효전력 생산을 위하여 유효전력의 일부를 감소시킬 수 있다.

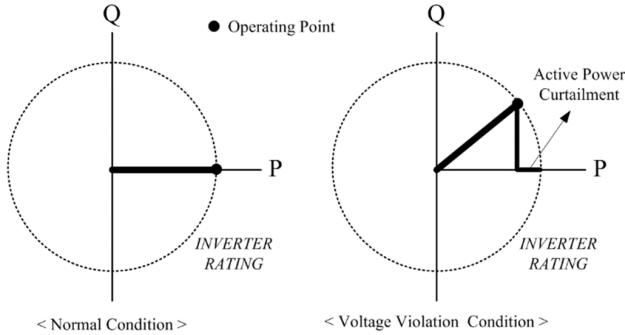


그림 4 인버터의 유효 및 무효전력 제어 원리
 Fig. 4 Principle of active and reactive power control of inverter

3. 협조 제어를 이용한 전압조정 방식

3.1 전류원 기반 인버터 모델

중래의 배전계통은 LDC 방식을 이용한 OLTC 제어를 통해 전압을 조정해왔다. 하지만 보상 임피던스를 이용한 LDC 전압제어 방식은 배전계통을 단방향 조류의 단조 감소하는 수직상 구조로 고려하여 운용되기 때문에 역조류 현상에 의한 양방향 조류 특성을 갖는 분산전원 연계 배전계통에서는 전압변동을 적절히 반영하지 못하며, 전압제어 또한 매우 어렵다[12]. 게다가 분산전원에 의한 유효전력 및 무효전력의 주입으로 인해 OLTC와 부하중심점 사이의 조류들이 끊임없이 변화하므로 OLTC의 LDC 파라미터 선정이 매우 힘들다.

OLTC는 탭 조정(일반적으로 16개의 탭이며, 탭 간격은 1.25%)에 의해 일정 크기의 전압을 증가 혹은 감소시킴으로써 동작한다. 따라서 그림 5와 같이 분산전원 침투율 증가로 인해 배전계통의 전압이 상승할 경우, 탭의 위치를 하강시켜 배전계통의 전압을 규정범위 이내로 유지한다.

그림 6은 다수의 전압 위반 노드 존재 시 OLTC와 분산전원의 전압조정 차이를 나타낸다. 분산전원의 경우 연계된 노드의 전압에 가장 큰 영향을 미치는 국부적 조정 특성을 갖는 반면, OLTC의 경우 배전용 변전소 내에 있는 주변압기에 의해 수행되므로 변압기 2차 측에 위치한 모든 노드의 전압에 영향을 미치는 전역적 조정 특성을 갖는다. 따라서 전압 위반 노드의 수가 많다면, 많은 수의 분산전원이 전압조정에 참여하는 것보다 OLTC의 탭 조정이 넓은 범위에 걸친 전압조정에 큰 효과를 볼 수 있다. 그러므로 일정한 수 이상의 노드에서 전압 상승 문제가 발생할 경우, OLTC가 먼저 동작하여 전압 위반 노드의 수를 줄인 후 분산전원이 출력 제어를 통해 남은 노드에 대한 세밀한 전압조정을 수행하는 것이 바람직하다. 더욱이 매우 사소한 전압 위반에도 불구하고 OLTC가 매번 동작한다면, 잦은 탭 조정으로 인해 기기의 수명이 매우 감소될 것이다.

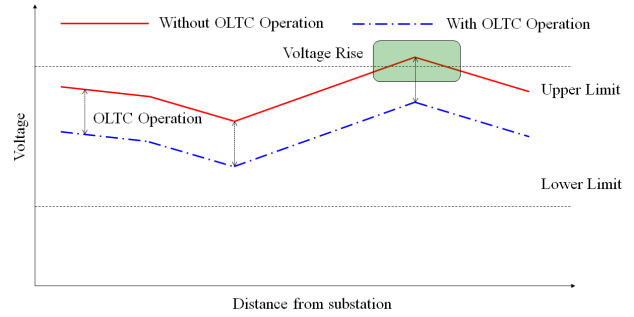


그림 5 OLTC 동작에 의한 전압조정 원리
 Fig. 5 Principle of voltage regulation by operation of OLTC

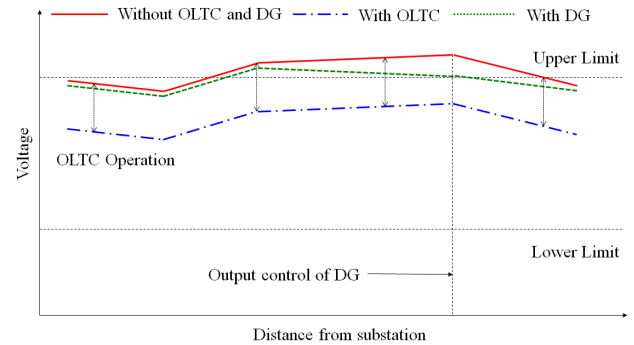


그림 6 OLTC와 분산전원의 전압조정 차이
 Fig. 6 Difference of voltage regulation between OLTC and DG

전류원 기반 인버터는 구동 시 필요한 토크에 대한 매우 빠른 응답을 제공할 뿐만 아니라 계통 연계용 인버터의 경우 유효 및 무효전력 수요에 대한 빠른 응답을 제공할 수 있다[7]. 특히, 태양광 발전 시스템에 사용되는 인버터는 출력 전류의 P, Q 성분들을 제어하여 배전계통 및 연계점 전압을 허용범위내로 유지하는 것이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 P, Q 및 역률 제어 가능한 전류원 인버터를 모델링하였으며, 인버터는 3상 정현파 전류원으로 동작하여 발전량에 따라 계통으로 적절한 전류를 공급한다. 본 논문에서 제시한 전류원 기반의 인버터는 인버터 자체 혹은 시스템 파라미터 변경에 매우 강한 특성을 가질 뿐만 아니라 매우 높은 제어 정확도를 보장한다. 또한 실제 스위칭 동작을 제거함으로써 시뮬레이션 시간을 크게 줄일 수 있다는 장점을 갖는다.

3.2 제안된 협조 제어 알고리즘

3.1절에서 기술된 원리를 이용한 OLTC와 분산전원의 협조 제어는 그림 7에 나타난다. 우측에서 좌측으로 갈수록 전압상승의 정도가 심각함을 의미하며, 총 m 개의 전압 위반 노드를 가정한다. OLTC는 큰 전압조정 효과를 보장하기 위해 n 개 이상의 전압 위반 노드 발생 시에만 동작하며, OLTC는 전압 위반 노드의 수를 n

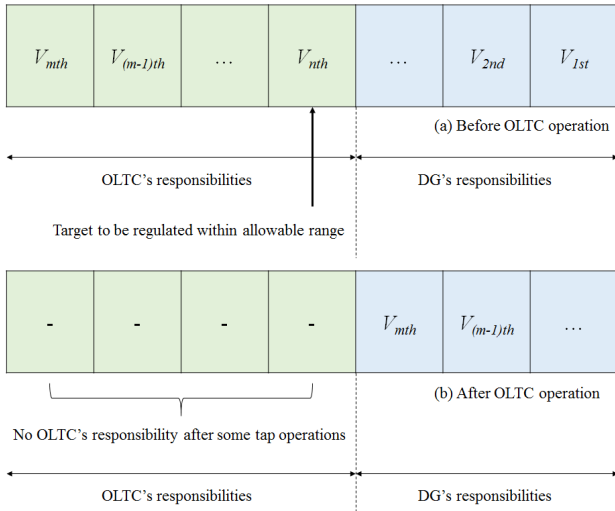


그림 7 협조 제어가 적용된 OLTC의 동작 원리
Fig. 7 Principle of operation of OLTC with the coordinated control

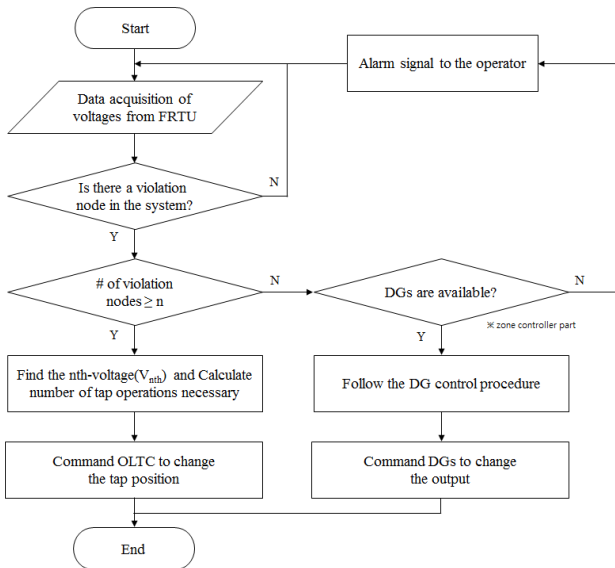


그림 8 제안된 협조 제어 알고리즘
Fig. 8 Algorithm of the proposed coordinated control

개 미만으로 줄이기 위해 탭 동작을 수행할 것이다. 따라서 V_{nth} 가 허용범위내로 조정되어야 하며 이를 위해 OLTC는 탭의 위치를 낮춤으로써 전체적인 전압 레벨을 감소시킬 것이다. 이에 필요한 최소한의 탭 변경 수(Δn)는 식 (3)에 의해 표현될 수 있으며, 이를 만족하는 최소 Δn 만큼의 탭 조정은 V_{nth} 을 OLTC 동작범위 밖으로 이동시킴을 보장한다. 따라서 이후에는 그림 8에 나타난 제어 알고리즘에 따라 분산전원의 전압조정 참여를 통해 남은 전압 위반 노드에 대한 전압 문제를 해결할 것이다.

$$\Delta n \geq \frac{V_{nth} - V_{UL}}{\Delta T} \quad (3)$$

여기서, Δn : OLTC의 탭 조정 수
 V_{UL} : 전압 상단 제한치
 ΔT : 탭 간격(정격전압의 1.25%)

3.3 분산전원의 전압조정 알고리즘

앞선 3.2절에서 기술된 것과 같이, 일정 수 미만의 전압위반 노드에 대해서는 분산전원의 출력 제어를 통해 전압조정을 수행한다. 전압민감도 분석 결과에 따르면, 특정한 모선의 전압은 인근 모선의 전력변화 및 모선 간 임피던스에 큰 영향을 받는다 [13]. 따라서 본 연구에서는 임피던스 특성이 유사한 모선들을 하나의 지역으로 분류하여 특정 모선의 전압위반 현상에 대해 해당 모선을 포함하는 지역에 위치한 분산전원들이 동시에 출력 제어에 참여하는 지역적 기반의 분산전원 출력 제어 방식을 이용한다. 그림 9는 적용된 분산전원의 출력 제어 알고리즘을 나타내며, 유효전력의 감축은 발전사업자의 경제적 손실로 이어지므로 이용 가능한 무효전력 제어를 우선적으로 수행한다. 또한 전압조정에 더 큰 영향을 미치는 분산전원의 참여 비율을 높이기 위해 출력 제어량은 노드 간 임피던스에 반비례한다.

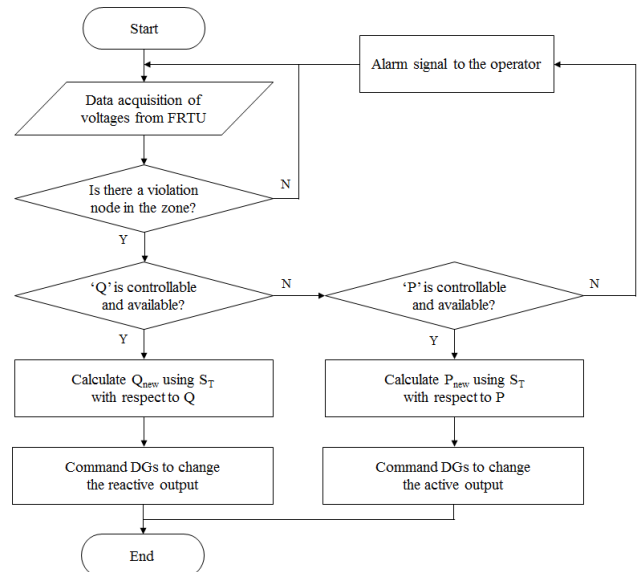


그림 9 제안된 분산전원 출력 제어 알고리즘
Fig. 9 Proposed output control algorithm of DG

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 계통 및 조건

본 논문에서는 제안된 협조 제어 방식의 성능을 검증하기 위해

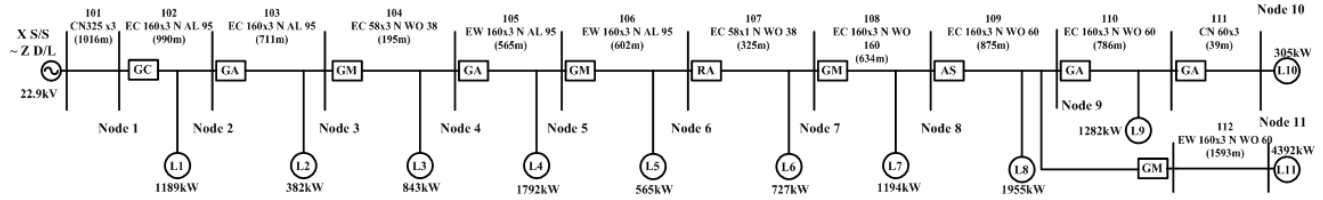


그림 10 시뮬레이션 계통
Fig. 10 Simulation system

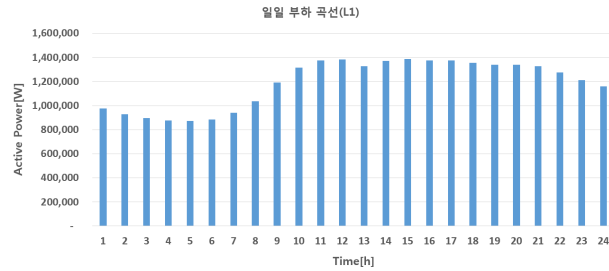


그림 11 일일 부하 곡선 - L1
Fig. 11 Daily load curve - L1

표 1 모의 계통의 임피던스 데이터

Table 1 Impedance data of the simulation system

구간/노드번호	R/km[Ω]	X/km[H]	길이[km]
101/1	0.0869	0.00025	1.016
102/2	0.1823	0.00103	0.990
103/3	0.1823	0.00103	0.711
104/4	0.4842	0.00115	0.195
105/5	0.1823	0.00103	0.565
106/6	0.1823	0.00103	0.602
107/7	0.4842	0.00115	0.325
108/8	0.1823	0.00103	0.634
109/9	0.1823	0.00103	0.875
(110,111)/10	0.1823	0.00103	0.786+0.039
112/11	0.1823	0.00103	1.593

MATLAB Simulink를 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 제안된 전압조정 방식을 테스트하기 위해 선정된 모델 계통은 그림 10과 같으며, 모델 계통은 한전에서 운영 중인 서울 S지역의 방사상 배전계통으로 계통의 임피던스 데이터가 표 1에 제시되었다.

시뮬레이션에 이용된 태양광 발전 시스템은 [14]에 제시된 모델이며, 분산전원의 출력 제어 시 제안된 알고리즘에 따라 유효 및 무효전력을 제어한다. 역조류에 의한 전압상승 문제를 야기하기 위해 계통 말단에 위치한 10번, 11번 노드에 연계된 태양광 발전의 용량을 6.5[MW]로 선정하였으며, 나머지 노드에 연계된 태양광 발전의 용량은 각각 0.5[MW]이다. 또한, 본 연구에서는 하루 동안의 계통 시뮬레이션을 위해 표 2 및 그림 11에 제시된 일일 일사량 데이터 및 부하 곡선이 이용되었다. 시뮬레이션 시간의 단축을 위해, 이용된 일일 데이터에서 1시간은 시뮬레이션

표 2 서울지역 7월 일일 일사량

Table 2 Daily solar irradiation amount on July in Seoul region

시간[시]	5~6	6~7	7~8	8~9	9~10
일사량 [kWh/m ²]	0.03	0.08	0.13	0.18	0.21
시간[시]	10~11	11~12	12~13	13~14	14~15
일사량 [kWh/m ²]	0.24	0.25	0.25	0.24	0.21
시간[시]	15~16	16~17	17~18	18~19	19~20
일사량 [kWh/m ²]	0.18	0.13	0.08	0.03	0.00

상의 0.1[s]로 환산되며, 따라서 시뮬레이션은 2.5초(0시~24시) 동안 수행되었다.

본 논문에서는 제안된 방식과 기존 방식의 비교 분석이 수행되었다. 비교 분석을 위해 선정된 기존 방식은 1번 노드 전압을 기준으로 한 기본적인 LDC 방식과 [8]에 제시된 진보된 LDC 방식이다. [8]에 제시된 방식은 시뮬레이션을 통해 선정된 전압조 요소를 이용하여 식 (4)에 나타난 것과 같이 시간 별 부하전류 $i(t)$ 에 따라 최적 송출전압 V_{OPT} 를 계산하며 실제 전압과 최적 전압의 차이가 일정 이상일 경우 OLTC의 탭 조정을 수행하여 송출전압을 제어한다.

$$V_{OPT}(t) = 13209 + 0.7454 \cdot i(t) \quad (4)$$

4.2 시뮬레이션 결과 및 분석

그림 12는 전압조정 기기의 미적용 시, 일부 노드에서 발생하는 과전압 현상을 보여준다. 태양광 발전량이 최대에 이르는 주간 시간대에 전압 허용치(1.05[p.u.], 단상상전압 기준 약 13882[V])를 초과하는 노드가 다수 발생하며, 전압조정 동작이 수행되지 않음에 따라 주간 시간대에는 과전압이 지속되는 것을 알 수 있다. 이러한 과전압 현상은 대용량 분산전원이 연계된 선로 말단 쪽에서 주로 발생하며, 이에 따라 전압조정 기기들의 동작을 통해 배전계통의 전압을 허용범위 이내로 조정하는 것이 필수적이다.

그림 13은 기존의 LDC 방식의 적용(1번 노드 전압을 기준 전압으로 선정)에 따른 전압 프로파일 및 OLTC의 탭 위치를 나타낸다. 분산전원이 연계되지 않을 경우, 주간 시간대에 증가하는

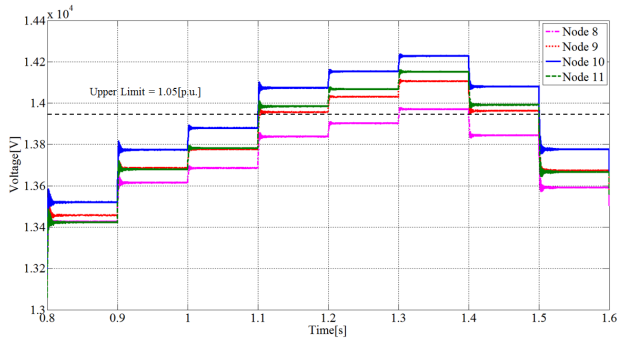


그림 12 주간 시간대 전압 프로파일
Fig. 12 Voltage profile in daytime

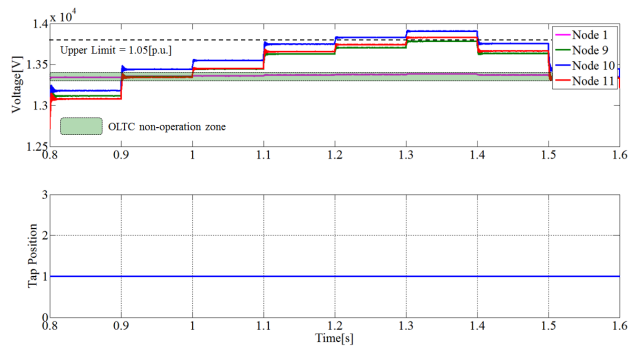


그림 13 주간 시간대 전압 프로파일 - 기본 LDC
Fig. 13 Voltage profile in daytime - Normal LDC

부하 곡선에 따라 부하 전류 또한 증가하여 OLTC가 이를 고려한 탭 조정을 실시한다. 하지만 그림 13과 같이 분산전원 연계로 인해 선로 말단에 위치하는 노드들의 전압 상승 현상이 크게 발생함에도 불구하고, 분산전원의 부하 분담으로 인해 주간 시간대에도 변전소 측의 전압이 OLTC의 비동작 지역에 위치한다. 이에 따라 OLTC는 탭 변환을 수행하지 않으며, 배전계통의 전압위반 현상이 계속해서 지속되는 문제점을 가지게 된다. 따라서 주간 시간대에 발생하는 전압상승 현상으로 인해 고객에게 전달되는 전력의 품질 또한 매우 악화될 것이며, 이를 통해 기존의 LDC 방식은 분산전원이 연계된 배전계통의 전압조정에 적합하지 않다는 결론을 내릴 수 있다.

그림 14는 [8]에 제시된 진보된 LDC 방식을 이용한 OLTC 동작 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 시간에 따른 부하량 및 송출 전류의 변화로 인해 최적 송출전압이 달라지며, 실제 송출전압과 최적 송출전압의 차이가 일정 크기 이상일 경우 OLTC의 탭 변환 동작을 통해 전압을 조정한다. 하지만 이 방식 또한 분산전원의 존재를 고려하지 않기 때문에 태양광 발전량이 최대에 달하는 주간 시간대에는 많은 오차를 발생시킬 가능성이 존재한다. 또한 OLTC의 탭 조정이 송출전류에만 의존하므로 전압허용 범위를 초과하는 개소들이 발생하더라도 이를 능동적으로 조절할 수 있는 기능이 없다. 따라서 그림 15와 같이 일부 노드에 발생하는 전압 위반을 조정할 수 없다는 단점이 있으며, 오차로 인한 불필

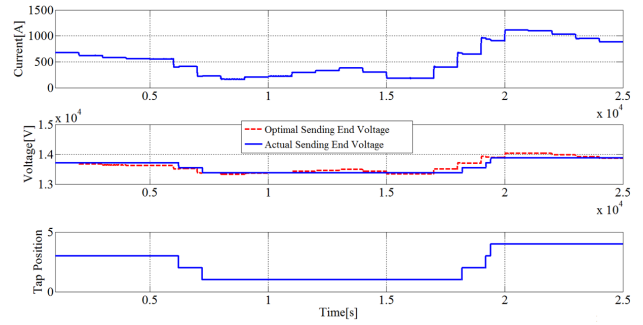


그림 14 OLTC 동작 시뮬레이션 결과 - 진보된 LDC
Fig. 14 Simulation result of OLTC operation - Advanced LDC

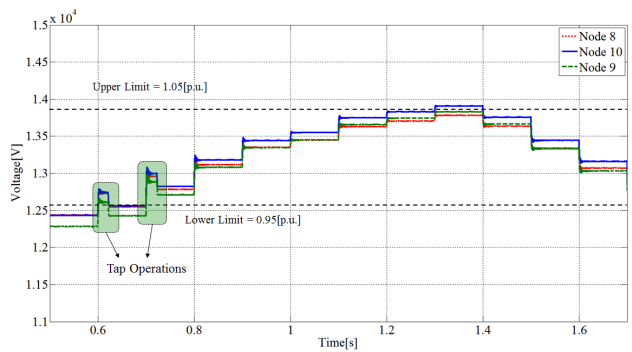


그림 15 주간 시간대 전압 프로파일 - 진보된 LDC
Fig. 15 Voltage profile in daytime - Advanced LDC

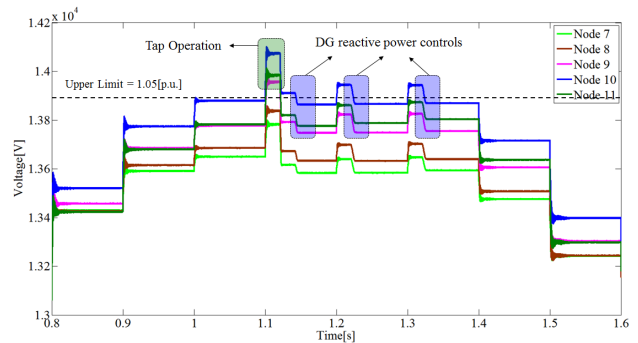


그림 16 주간 시간대 전압 프로파일 - 제안된 방식
Fig. 16 Voltage profile in daytime - Proposed scheme

요한 탭 변경 혹은 송출전류에 따른 잦은 탭 변경으로 인해 OLTC의 수명 단축을 야기할 수 있다.

그림 16은 제안된 전압조정 방식 적용 시, 배전계통의 주간 시간대 전압 프로파일을 보여준다. 대용량 분산전원으로 인해 발생하는 주간 시간대의 과전압 현상을 해결하기 위해 OLTC와 분산전원이 협조된 방식으로 동작한다. 1.1[s] 이후 9, 10, 11번 노드가 전압 허용범위를 초과함에 따라 그림 17의 전압위반 노드 수(NVN)가 3이 되며, OLTC가 먼저 위반 노드의 수를 3개 미만

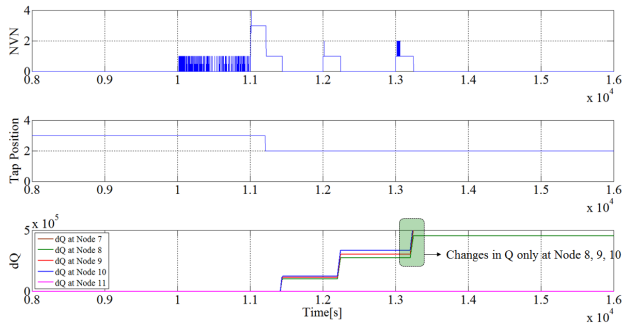


그림 17 전압위반 노드 수(NVN), 탭 위치, 출력 제어량(dQ) - 제안된 방식

Fig. 17 Number of violation node, tap position and amount of output controlled - Proposed scheme

으로 줄이기 위해 탭 변경을 수행한다. 탭 변경 이후 위반 노드의 수는 1개(Node 10)로 감소되며, 이 노드의 전압을 허용 범위 이내로 감소시키기 위해 10번 노드가 포함된 지역(8, 9, 10번 노드)의 분산전원들이 무효전력 출력을 감소시킴으로써 모든 노드가 정상 범위의 전압을 가진다. 이후 1.2[s] 및 1.3[s]에서는 전압 위반 노드의 수가 3개 미만이기 때문에 OLTC는 동작하지 않으며, 일정한 지연 시간 이후 분산전원의 출력 제어로 전압을 조정하는 것을 알 수 있다. 이는 효율적인 전압조정이 어려운 기존 방식들과는 달리 제안된 방식의 우수한 성능을 잘 나타낸다.

5. 결 론

본 논문은 대용량 분산전원의 연계로 인해 발생 가능한 배전계통의 전압상승 문제를 효과적으로 해결하기 위해 OLTC와 분산전원의 협조 제어에 기반한 전압조정 방식을 제안하였다. 제안된 협조 제어 기법은 전압조정 기기들의 특성에 기초하여 전압조정 참여 우선순위를 결정하며, 이를 통해 조정 기기들의 동시 동작을 방지함으로써 분산전원의 불필요한 출력 조정 및 OLTC의 과도한 탭 동작을 방지할 수 있다. 제안된 기법은 실제 한전에서 운영 중인 국내 배전계통을 대상으로 검증되었으며, 기존의 전압조정 방식들과의 비교 분석을 통해 제안된 방식의 우수성을 확인하였다.

제안된 전압조정 방식을 통해 분산전원이 연계된 배전계통일 지라도 능동적인 전압조정이 가능하며, 배전계통의 전압을 허용 범위 이내로 유지시킴에 따라 안정된 전압을 수용가에 공급할 수 있으므로 전력품질 개선의 효과를 기대할 수 있다. 또한 분산전원 도입의 큰 장벽이었던 배전계통의 전압조정 문제를 효율적으로 해결함에 따라 더 많은 용량의 분산전원을 도입할 수 있으며, 친환경적이고 대체 가능한 에너지원인 분산전원의 장점을 적극 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 성과는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2015R1A2A1A10052459).

References

- [1] CIGRE WG B5.34, The Impact of Renewable Energy Sources and Distributed Generation on Substation Protection and Automation, August 2010
- [2] Brahma S, Girgis A., "Microprocessor-based reclosing to coordinate fuse and recloser in a system with high penetration of distributed generation," IEEE power engineering society winter meeting, 2002
- [3] CIGRE WG B5/C6.26/CIREC, Protection of Distribution Systems with Distributed Energy Resources, March 2015.
- [4] I. Xyngi, A. Ishchenko, M. Popov, L. Van der Sluis, "Transient Stability Analysis of a Distribution Network With Distributed Generators," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 2, pp.1102-1104, May 2009.
- [5] D. Ranamuka, A. P. Agalgaonkar, K. M. Muttaqi, "Online Voltage Control in Distribution Systems with Multiple Voltage Regulating Devices," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, no. 2, pp. 617-628, 2014.
- [6] Xiaohu Liu, A. Aichhorn, L. Liu, H. Li, "Coordinated Control of Distributed Energy Storage System with Tap Changer Transformers for Voltage Rise Mitigation under High Photovoltaic Penetration," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 2, pp. 897-906, 2012.
- [7] M. A. Mahmud, M. J. Hossain, H. R. Pota, "Analysis of Voltage Rise Effect on Distribution Network with Distributed Generation," The 18th IFAC World Congress, vol. 44, iss. 1, pp. 14796-14801, 2011.
- [8] E. M. Lee et al., "A Study on the Optimal Introduction of Step Voltage Regulator(SVR) in Distribution Feeders" The Transactions of the KIEE, vol. 53A, no. 11, pp. 610-618, 2004.
- [9] Yasuhiro hayashi, "Determination of Optimal Sending Voltage Profile in Distribution Systems with Distributed Generators", Electrical Engineering in Japan, Vol. 161, No. 2, 2007
- [10] IEEE Std. 1547.2, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, 2008.
- [11] EPRI, Common Functions for Smart Inverters, Version 3, Feb. 2014.

- [12] C. Kang, H. S. Shin, J. F. Moon, G. H. Choe, J. C. Kim, "An Improved Voltage Regulation Method in Power Distribution System Interconnected Multiple PV Systems," Journal of KIEE, vol. 23, no. 2, pp. 53-61, 2009.
- [13] S. Conti, S. Raiti, G. Vagliasindi, "Voltage Sensitivity Analysis in Radial MV Distribution Networks using Constant Current Models," in Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron, 2010.
- [14] Y. S. Oh et al., "Modeling of Practical Photovoltaic Generation System using Controllable Current Source based Inverter", The Transactions of the KIEE, vol. 65, no. 8, pp. 1340-1346, 2016.

저 자 소 개



오 윤 식 (Yun-Sik Oh)

1987년 7월 10일생. 2011년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2013년 성균관대 정보통신대학 졸업(석사). 2013년~현재 동 대학원 정보통신대학 박사과정
Tel : 031-290-7166
Fax : 031-299-4137
E-mail : fivebal2@naver.com



조 규 정 (Gyu-Jung Cho)

1986년 12월 20일생. 2012년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2014년 성균관대 정보통신대학 졸업(석사). 2014년~현재 동 대학원 정보통신대학 박사과정
Tel : 031-290-7166
Fax : 031-299-4137
E-mail : thug1220@naver.com



김 민 성 (Min-Sung Kim)

1991년 5월 2일생. 2015년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2015년~현재 성균관대학교 대학원 정보통신공학부 석박통합과정
Tel : 031-290-7166
Fax : 031-299-4137
E-mail : lovelykiku25@naver.com



김 지 수 (Ji-Soo Kim)

1992년 6월 21일생. 2016년 성균관대학교 정보통신공학부 졸업. 2016년~현재 동 대학원 정보통신공학부 석박통합과정
Tel : 031-290-7166
Fax : 031-299-4137
E-mail : kjs7107@naver.com



김 철 환 (Chul-Hwan Kim)

1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 성균관대 정보통신대학 교수, 전력IT인력양성센터 센터장
Tel : 031-290-7124
Fax : 031-299-4137
E-mail : hmwkim@hanmail.net