배전계통에서 분산 기반 분산형전원의 실시간 전압 및 무효전력제어 방안

박학열¹ · 조건익² · 최준호^{3†}

¹한전KDN 송변전사업처, 차장

²전남대학교 전기공학과, 박사과정

³전남대학교 전기공학과, 교수

Decentralized Real-time Volt/Var Control of Distributed Generation in Distribution System

Park Hak-Yeol¹ · Jo Kun-Yik² · Choi Joon-Ho^{3†}

¹Managing Director, Transmission & Substation Business Department, KEPCO Knowledge Data & Network Co., Ltd

²Ph.D. Candidate, Department of Electrical Engineering, Chonnam National University

³Professor, Department of Electrical Engineering, Chonnam National University

[†]Corresponding author: joono@chonnam.ac.kr

Abstract

Renewable energy resource policies are being promoted to solve global resource depletion and environmental problems. Accordingly, as the connection between renewable energy resources and the distribution system has increased, various problems such as degradation in the quality of the power produced and voltage fluctuations have occurred. In this study, to solve the voltage problem, we propose a decentralized real-time volt/var control of the distributed generations (DGs) in a distribution system. The proposed control scheme aims to maintain the voltage for a point of common coupling (PCC) within a specified range, and the proposed control is applied in two stages. The proposed control scheme compensates for the disadvantages of a conventional control scheme and shows a new control structure. The proposed control scheme was applied to the test distribution system using MATLAB and was verified to be more effective than the conventional control scheme.

Keywords: 신재생에너지원(Renewable energy resource), 분산형전원(Distributed generator), 배전계통(Distribution system), 전압 및 무효전력제어(Volt/var control), 능동전압제어(Active voltage control), 역률 제어(Power factor control)

기호설명

$PF_{ref,k}$: k 번째 분산형전원의 운전 역률 지령 값

PF_k^0 : k 번째 분산형전원의 현재 역률

ΔPF : 설정된 제어 역률(역률 변화분)

ε : 설정된 제어 역률(정상상태에서 원래의 역률 크기로 이동하기 위한 제어량)

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.41, No.4, pp.131-146, August 2021
<https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.4.131>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 21 July 2021

Revised: 5 August 2021

Accepted: 5 August 2021

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- $V_{PCC,k}^0$: k 번째 분산형전원의 연계지점 전압 계측 값[p.u.]
 V_{MAX} : 분산형전원의 연계지점 최대 운영 전압[p.u.]
 V_{MIN} : 분산형전원의 연계지점 최저 운영 전압[p.u.]
 db : 분산형전원의 연계지점 불감대 영역[p.u.]
 V_{PCC}^{mean} : 관리대상 다수의 분산형전원의 연계지점 평균 전압[p.u.]
 N_{DG} : 관리대상 분산형전원의 총 설치 수
 V_{nom} : 공칭 전압[p.u.]
 $\Delta Q_{DG,k}$: k 번째 분산형전원의 무효전력 레퍼런스[p.u.]
 $\Delta Q_{DG,k}^{MIN}$: k 번째 분산형전원의 무효전력 하한[p.u.]
 $\Delta Q_{DG,k}^{MAX}$: k 번째 분산형전원의 무효전력 상한[p.u.]
 $Q_{DG,k}^0$: k 번째 분산형전원의 현재 무효전력 출력[p.u.]

1. 서론

최근 국내 신재생에너지 보급이 증가함에 따라 배전계통에 다양한 형태로 연계되어 운영되고 있으며, 산업통상자원부에서 추진하는 재생에너지 3020정책으로 인해 앞으로 점차 늘어날 것이다¹⁾. 기존 배전계통은 전원측으로부터 부하로 단방향 조류형태를 가졌으나, 분산형전원으로 인해 양방향 조류 형태로 변화하여 계통운용 측면에서 여러 가지 문제점이 야기되었다²⁾. 이로 인해 대용량 분산형전원의 연계된다면 역조류가 발생될 우려가 있으며, 이로 인해 과전압 문제가 야기된다³⁾. 기존 배전계통에서 대부분의 전압제어는 변전소의 탭을 조정하여 수용가의 전압을 조정하였다. 변전소의 탭은 주로 전류 계측 기반 LDC (Line Drop Compensator) 방식을 적용하였다. 하지만, 분산형전원의 간헐적인 출력특성으로 인해 조류가 심하게 변동하게 되어 LDC 파라미터 산정에 어려움이 발생되었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다수 피더에서 전류를 계측하여 OLTC (On Load Tap Changer)의 최적의 탭 위치를 결정하는 MLDC (Multiple Line Drop Compensator) 방식이 개발되었다⁴⁾. 하지만 대용량, 다수의 분산형전원이 연계되면서 간헐적으로 계통의 조류를 변화시킴에 따라 OLTC의 탭 제어가 빈번하게 수행되고, 최적의 탭 위치를 찾는 데 어려움이 발생된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존 전압제어 설비인 OLTC와 SVR (Step Voltage Regulator) 및 커패시터 뱅크(Capacitor Bank) 등을 활용한 제어 방법들이 연구되었지만, 마찬가지로 분산형전원의 간헐적 특성으로 인하여 전압 조정의 성능이 저하된다⁵⁾. 이러한 문제를 해결하고자 최근에 분산형전원의 인버터를 활용한 무효전력제어를 통해 전압 조정 방안이 도입되었다. 분산형전원의 출력 제어를 통해 전압 문제를 해결하고자 국내 전력회사는 분산형전원 배전계통 연계기술기준 제 20조에 분산형전원의 연계로 인하여 적정 전압 유지범위를 이탈 할 우려가 있거나 유틸리티가 필요하다고 인정하는 경우 계통의 전압을 적정 전압 유지범위 이내로 능동적인 전압 조정이 제한된 범위 내에서 허용 가능하

고 명시하였다⁶⁾. 그리고 미국은 분산형전원 연계 가이드라인(IEEE 1547-2003)에서도 분산형전원의 무효전력 제어 요구사항을 제시하였다⁷⁾. 이처럼 국내외적으로 분산형전원으로 인한 전압 문제를 해결하기 위해 무효전력 제어 요구사항 제시 또는 제한된 범위 내에서 허용하고 있다. 따라서 국내 배전계통은 다수, 대용량의 분산형전원을 연계하기 위해 연계 가이드라인을 준수하면서 전압 문제를 해결하기 위한 무효전력제어 기술이 필요하다.

분산형전원의 인버터를 활용하여 전압 조정을 위한 무효전력제어 관련 연구로 분산 전압 및 무효전력제어 (Decentralized volt/var control)와 중앙 집중식 전압 및 무효전력제어(Centralized volt/var control) 방안의 연구가 활발히 진행되었다. 분산 전압 및 무효전력제어는 주로 지역적인 계측 정보를 활용하여 분산형전원의 연계 지점(PCC, Point of Common Coupling)의 전압을 규정 위 이내로 제어한다. 이러한 제어 방안은 계측 기반의 제어 방안으로써 순시로 변화하는 전압 변동에 대하여 빠르게 대처할 수 있는 장점이 있다⁸⁾. 하지만 지역적인 계측 정보를 활용하여 타 제어기를 고려하지 않으며, 제어기 간의 제어 간섭이 발생하여 제어 효과가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 반면에 중앙 집중식 전압 및 무효전력제어는 분산형전원 및 부하의 상태 정보를 파악하여 제어기 간의 협조 제어를 위한 최적의 솔루션을 제시한다⁹⁾. 중앙 집중식 전압 및 무효전력제어 방안을 실현하기 위해 먼저, 계통에서 각 요소의 정보를 받아야 하며, 높은 신뢰도를 가진 정보통신 기술이 필요하다. 하지만, 배전계통에서 모든 분산형전원 및 부하의 상태 정보를 파악하기 위해 많은 계측기를 설치해야 하지만, 이는 비용적인 측면에서 비효율적이다. 그리고 분산 전압 및 무효전력제어 방안과 달리 제어기 간의 통신 제약으로 인해 순시로 변화하는 전압 변동에 대하여 빠르게 대처할 수 없는 단점이 있다¹⁰⁾. 따라서 각 제어 방안의 단점을 보완하고 효과적인 전압제어를 수행하기 위해 분산 전압제어방안과 중앙 집중식 전압제어를 통합하기 위한 제어 방안이 필요하다.

국내 배전계통은 분산형전원으로 인한 전압 문제를 해결하기 위해 분산형전원의 능동전압제어 기술을 도입하였다¹¹⁾. 능동전압제어 기술은 PCC의 전압 초과로 인하여 연계요건을 벗어나는 경우 능동적으로 발전출력의 역률을 제어함으로써 연계요건을 만족하고 배전선로의 전압을 안정적으로 운영하기 위한 목적을 가지고 있다¹²⁾. 하지만 국내에서 적용되는 능동전압제어기술은 PCC의 전압제어 이외에 다른 제어기 또는 계통의 상황을 전혀 고려하지 않아 제어 효과가 떨어진다. 그리고 특고압 배전선로는 선종 및 선로 데이터를 통해 선로의 임피던스를 파악할 수 있지만, 저압 배전선로는 특고압 배전선로와 달리 다양한 선종 및 복잡한 구조특성을 가지고 있어 정확한 선로 임피던스를 파악하기 어렵다. 이에 따라 기존 방식은 선로의 임피던스를 활용하여 제어하는 방식으로 정밀한 선로 임피던스 산정이 필요하다. 이러한 문제를 해결하고자 본 논문에서는 국내 계통에 적용 가능한 분산 전압 및 무효전력 제어 방안을 제안한다. 먼저 분산형전원의 PCC의 전압을 안정화하는 전압 및 무효전력제어 방안을 제안한다. 분산형전원의 저압 및 특고압 연계단말장치에 탑재되어 운전 역률을 제어하며, 선로의 임피던스를 고려하지 않고 효과적인 제어 방안을 제안한다. 그리고 기존 방식의 단점을 보완하기 위해 협조 제어 방안을 제안하였다. 제안 방안은 분산 기반의 협조 제어 방식이지만, 중앙 집중식 전압 및 무효전력제어방안과 유사하게 특정 지역에 하나의 관리단말장치가 설치되어 다수의 분산형전원을 감시하고 각 분산형전

원의 운전 역률을 제공한다. 그리고 전체 계통에 대하여 상태 정보를 계측하기에는 한계가 있으며, 기존에 PCC에 설치된 RTU를 활용하여 효과적인 제어를 수행하고자 한다. 제안 방안은 시뮬레이션을 통해 검증하였으며, 기존 방식보다 효과적인 제어 방안인 것을 확인하였다.

2. 본 론

본론에서는 배전계통에서 분산형전원의 기존 전압제어 방식과 본 논문에서 제안하는 전압제어 방안에 대하여 비교 및 설명한다. 먼저, 기존 전압제어 방식에 대하여 설명하고 본 논문에서 제안한 제어 방안의 전체적인 구조에 대하여 설명한다. 다음으로 본 논문에서 제안한 분산형전원 연계단말장치의 전압제어 알고리즘과 관리 단말장치의 전압제어 알고리즘에 대하여 자세하게 설명한다.

2.1 분산형전원의 기존 전압제어 및 제어 구조

기존 배전계통에 분산형전원을 관리하기 위해 연계단말장치(DER-FRTU)를 설치하여 데이터 취득 및 제어를 수행하였다. 분산형전원의 출력 및 감시를 위해 Fig. 1과 같이 주상 변압기 저압 또는 특고압에 설치되어 하위구역에 연계되어있는 다수의 분산형전원의 상태 감시, 상위 및 하위 시스템과 데이터 교환을 수행한다. 연계 단말장치의 궁극적인 목표는 데이터 취득을 통한 감시이지만, 능동전압제어알고리즘이 탑재되어 연계지점의 전압을 규정범위 이내 유지하기 위한 운전 무효전력 레퍼런스를 도출한다.

Fig. 1. Function of DER-FRTU

기존 국내 배전계통에서 적용되는 연계단말장치는 Fig. 2와 같이 PCC의 전압을 목표 전압으로 유지하기 위해 선로 임피던스를 활용하여 단순 연산을 통해 무효전력제어 레퍼런스를 도출한다. 이러한 방안은 선로의 토

폴로지정보를 활용하여 분산형전원의 유효전력 출력에 의한 전압 변동분을 무효전력제어를 통해 분산형전원으로 인한 전압 변동분을 완화하고자 하는 원리이다¹⁰⁾. 하지만 기존 방식은 정확한 선로 임피던스 산정에 따라 성능이 좌우되며, 정확한 임피던스 산정이 어려운 저압선로에 적용된다면 낮은 성능을 가지게 된다.

Fig. 2. Principle of Active voltage control

본 논문에서 제안한 방식은 기존 국내에서 개발된 능동전압제어기와 유사한 기능을 가지지만, 선로의 임피던스에 관계없이 능동적으로 역률 제어를 통해 PCC점의 전압을 규정범위 이내 유지시키는 기능을 가지고 있으며, 그 기능은 Table 1과 같다. 분산형전원의 연계단말장치에 탑재된 알고리즘은 상시에 전압일정범위제어모드(Voltage constant range control mode)가 수행되며, 상위 시스템 또는 운영자가 제어 역률을 지정하는 경우 설정된 제어 값을 유지하기 위해 일정역률제어모드(Constant power factor control mode)가 수행된다.

Table 1 Function for reactive power control of DER-FRTU

Function	Description
Constant power factor control Mode	The function to maintain the power factor reference commanded by the host system
Voltage constant range control Mode	The function to maintain the voltage magnitude of PCC within a voltage range (The control power factor reference is derived regardless of the line impedance)

분산형전원의 연계단말장치에 탑재된 알고리즘은 PCC 전압을 규정범위 이내 유지시키기 위한 목적을 가지고 있다. 하지만 이러한 로컬기반의 전압제어방식은 타 제어기기의 제어를 고려하지 않아 계통의 전압 운영 측면에서 효과가 떨어지게 된다. 이러한 점을 보완하기 위해 본 논문에서는 다수 분산형전원 연계단말장치를 관리하기 위한 분산형전원의 관리단말장치(dERMS, small DERMS)를 활용하여 보다 효과적인 솔루션을 제공한다. 분산형전원의 관리단말장치는 다수의 분산형전원의 연계단말장치로부터 각 계측전압데이터를 받아 보다 효과적인 제어 지령치를 도출하기 위한 협조 제어 알고리즘이 수행되며, 분산형전원의 관리단말장치에 탑재된 알고리즘은 Table 2와 같다.

Table 2 Function for reactive power control of dERMS

Function	Description
The coordinated voltage control Mode	The function to maintain the voltage magnitude of PCCs close to nominal voltage

Fig. 3은 본 논문에서 제안한 제어 구성도이며, 관리단말장치와 연계단말장치의 제어 구조를 보여준다. 관리단말장치에 탑재된 알고리즘은 연계단말장치에서 전압 문제가 발생하였을 때 제약조건의 한계로 인하여 더 이상 제어를 수행하지 못하는 경우 인접 분산형전원의 추가적인 제어 명령을 통해 문제를 해결할 수 있도록 협조 제어를 수행한다. 관리단말장치는 효과적인 협조 제어 지령치를 도출하지만, 만약 이를 실시간으로 수행한다면 중앙 집중식 전압제어와 유사하여 문제에 대한 빠른 대처가 어려우며, 수행할 때마다 좋은 솔루션을 도출하기 위한 빈번한 제어가 수행된다. 따라서 본 논문에서는 제안한 방안은 상시에 분산형전원의 연계단말장치에서 PCC 전압을 능동적으로 제어하고 제어 한계 또는 타 제어기 간의 간섭으로 인해 문제가 발생하였을 때, 관리단말장치에서 제안한 알고리즘을 수행하여 문제를 해결한다.

Fig. 3 Proposed control scheme structure

2.2 분산형전원의 연계단말장치 전압제어

분산형전원의 연계단말장치에 탑재된 전압제어 알고리즘의 주목적은 로컬에서 PCC의 전압을 안정하게 운영하기 위한 목적을 가지고 있으며, 계측 전압에 따라 능동적으로 역률 제어를 통해 규정범위 이내 전압 크기를 유지하는 2가지 제어 모드가 탑재 되어있다. 일정역률제어모드는 상위 시스템으로부터 지령받은 역률 크기를 일정하게 유지하는 제어모드이며, 연계단말장치에서는 제어 가능한 역률 값인지 검토를 해야 할 필요가 있다. Fig. 4는 일정역률제어모드의 제어 흐름도를 보여주며, 크게 진상 역률제어 부분과 지상 역률제어 부분으로 나뉘어 제어 가능 여부를 검토한다.

Fig. 4 Flow chart of constant power factor mode

전압일정범위제어모드는 설정된 전압 일정 범위를 벗어난 경우, 일정 역률의 크기만큼 제어하여 설정된 전압 범위로 유지하는 기능이다. 이러한 제어기능은 외부 입력과 관계없이 능동적으로 역률 제어 크기를 결정하고 선로의 임피던스와 관계없이 전압을 효과적으로 제어할 수 있는 특징을 가지고 있다. Fig. 5는 전압일정범위제어모드의 제어 구조를 보여주고 있으며, Fig. 6 및 식(1)과 같이 PCC의 계측 전압을 3가지 영역으로 나뉘어 역률 제어를 달리 수행하게 된다. 전압 위반 영역에서는 이전에 설명한 일정 역률 크기만큼 제어가 수행된다. 불감대 영역에서는 설정된 전압 운영 범위 내에 운전되지만 빈번한 제어 동작을 방지하기 위해 설정하며 추가적인 역률제어를 수행하지 않고 현재 역률을 유지하게 된다. 안정화 영역에서는 원래의 역률 크기로 제어하기 점진적으로 역률 1의 크기로 이동하기 위한 제어가 수행된다.

Fig. 5 Proposed control structure of DER-FRTU

Fig. 6 Proposed control scheme of DER-FRTU

$$PF_{ref,k} = \begin{cases} PF_k^0 + \Delta PF & (\text{if } V_{PCC,k}^0 > V_{MAX}) \\ PF_k^0 - \Delta PF & (\text{if } V_{PCC,k}^0 < V_{MIN}) \\ PF_k^0 & (\text{if } V_{MAX} - db \leq V_{PCC,k}^0 \leq V_{MAX}, V_{MIN} \leq V_{PCC,k}^0 \leq V_{MIN} + db) \\ PF_k^0 + \varepsilon & (\text{if } V_{MIN} + db < V_{PCC,k}^0 < V_{MAX} - db, PF_k^0 > 0) \\ PF_k^0 - \varepsilon & (\text{if } V_{MIN} + db < V_{PCC,k}^0 < V_{MAX} - db, PF_k^0 < 0) \end{cases} \quad (1)$$

2.3 분산형전원의 관리단말장치 전압제어

분산형전원의 관리단말장치에 탑재된 전압제어 알고리즘은 다수 분산형전원 연계지점의 전압을 관리하기 위한 목적을 가지고 있으며, 각 분산형전원의 협조 제어알고리즘을 수행한다. 주로 협조 제어 알고리즘은 로컬에서 제어 한계로 인해 더 이상 전압 문제를 해결하지 못하는 경우 수행하게 되며, 제어가 가능한 인접 분산형전원의 역률 제어를 통해 문제를 해결하게 된다. 분산형전원의 관리 단말장치는 특고압계통에 설치되어 운용되며, 특고압 계통은 저압과 다르게 선로의 임피던스를 파악할 수있다. 따라서 본 논문에서 제안한 협조 제어 방안은 선로의 임피던스를 활용하여 각 분산형전원의 운전 역률 값을 도출한다. 그리고 전압 문제를 해결하는 것과 동시에 전력 품질 향상을 위한 분산형전원의 연계지점 전압을 공칭 전압(안정화 범위)에 가까운 크기로 제어하도록 목적을 갖는다.

협조 제어알고리즘을 수행하기 위해 먼저, 관리하고자하는 분산형전원의 PCC전압을 공칭 전압에 가까운 크기로 제어하도록 각 분산형전원의 PCC전압의 분 단위 평균 전압을 활용하였다. 평균 전압을 연산하는 수식은 식(2)로 표현하며, 제어할 전압 크기는 식(3)으로 표현하였다.

$$V_{PCC}^{mean} = \text{mean}(V_{PCC,k}^0) = \frac{1}{N_{DG}} \sum_{k=1}^{N_{DG}} (V_{PCC,k}^0) \quad (2)$$

$$\Delta V = V_{nom} - V_{PCC}^{mean} \quad (3)$$

여기서, V_k^0 은 k 번째 분산형전원의 계측 전압, N_{DG} 는 관리하고자 하는 분산형전원의 수를 의미하고, V_{nom} 은

공칭전압을 의미한다. 제어할 전압 크기에 대한 무효전력제어량은 다음 식(4)를 통해 도출할 수 있으며, 식(5)와 같이 제어 이후의 전압 크기를 추정할 수 있다. 결정된 무효전력제어량은 식(6)과 같이 제어 가능 범위를 검토하고 제약조건에 맞게 최종 무효전력제어량을 결정한다.

$$\Delta Q_{DG,k} = \Delta V / \left(\frac{\partial V_{PCC,k}}{\partial Q_{DG,k}} \right) \quad (4)$$

$$V_{PCC,k} = V_{PCC,k}^0 + \left[\frac{\partial V_{PCC,k}}{\partial Q_{DG,k}} \right] \times \Delta Q_{DG,k} \quad (5)$$

$$\Delta Q_{DG,k}^{MIN} \leq Q_{DG,k}^0 + \Delta Q_{DG,k} \leq \Delta Q_{DG,k}^{MAX} \quad (6)$$

여기서, $[\partial V_{PCC,k} / \partial Q_{PCC,k}]$ 는 전압에 대한 무효전력 민감도를 의미하며, 변전소로부터 제어 가능한 분산형전원이 설치된 k 번째 모선 사이의 등가 리액턴스 크기를 의미한다. 협조 제어 방안은 Fig. 7과 같이 식(2) ~ (6)을 반복 연산을 통해 각 분산형전원의 무효전력 제어 값을 결정하고, 이를 역물로 환산하여 최종 인버터의 역률 지령 값을 결정한다.

Fig. 7 Flow chart of coordinated control algorithm

3. 사례 연구 및 결과 분석

이 장에서는 본 논문에서 제안한 방안의 검증에 위한 사례 연구를 보여준다. 먼저, 사례 연구를 위한 테스트 배전계통 및 시뮬레이션 환경에 대하여 설명한다. 사례 연구는 MATLAB을 활용하여 수행하였으며, 알고리즘 검증을 위해 부하 용량보다 많은 분산형전원이 연계된 계통으로 가정하였다. 다음으로 사례 연구에 대한 결과 및 분석에 대하여 설명한다. 사례 연구는 기존 방안과 본 논문에서 제안한 방안을 수행하였으며, 성능 비교를 통해 결과를 도출하였다.

3.1 사례 연구 환경

본 논문에서 제안한 제어 방안을 검증하기 위해 Fig. 8과 같은 배전계통에서 검증하였다. 테스트 65모선 배전계통은 한국 배전선로를 기반으로 설계되어있으며, 계통 파라미터는 Table 3과 같으며, 부하는 균등 부하로 개별용량 300 [kVA]로 가정하였다. 또한, 변전소의 탭은 고정탭(1탭에 위치)으로 운전하는 것으로 가정하였으며, 탭 제어 메커니즘은 본 논문에서 제안한 알고리즘 검증에서 고려대상이 아니기 때문에 반영하지 않았다. 분산형전원은 크게 4가지 구역으로 설치되어있으며, 부하는 주거용과 상업용으로 분류하였다.

Fig. 8 Test 65-bus distribution system

Table 3 System parameter

Category	Value
System rated information	10 [MVA] / 22.9 [kV]
Substation information	45 [MVA] / 60 [MVA]
	$X_T = 0.26 [p.u.]$ (BASEMVA : 100 [MVA])
Load capacity	Total rated capacity 5.7 [MVA] / pf : 0.9 (lag)
DG capacity	Total rated capacity : 10 [MVA]
Line impedance	Primary voltage level ACSR 160 mm ² (0.0347 + j0.0746 [<i>p.u./km</i>])
	Secondary voltage level OW 60 mm ² (0.05969 + j0.06241 [<i>p.u./km</i>])

분산형전원의 각 개별 용량은 Table 4와 같다. 분산형전원은 특고압 연계 분산형전원, 저압 연계 분산형전원으로 구분하였으며, 각 개별 인버터 용량은 정격대비 120%로 가정하였다. 그리고 알고리즘 검증을 위해 Fig. 8의 계통에서 3번 구역에 설치된 분산형전원을 제어가능한 분산형전원으로 가정하였으며, 이외의 분산형전원은 제어 불가능한 것으로 가정하였다. 알고리즘 검증을 위한 부하 및 분산형전원의 프로파일은 Fig. 9와 같으며, 부하는 상업용 및 주거용 분 단위 프로파일로 가정하였다. 부하 곡선은 한국에너지공단에서 조사한 시간 단위 여름철 상업용 및 주거용 대표 프로파일을 기반으로 시뮬레이션을 위해 분 단위 프로파일을 생성하여 적용하였다¹³⁾. 분산형전원은 실제 전남대학교에 설치된 실제 4곳의 태양광발전의 분 단위 출력 프로파일을 적용하였으며, 같은 구역 내의 분산형전원은 동일한 프로파일로 가정하였다.

Table 4 Parameter of Photovoltaic generators (PVs)

Bus no	DG Name	Rated capacity [kW]	Inverter rated capacity [kW]
14	DG 1	240	200
17	DG 2	240	200
20	DG 3	1200	1000
28	DG 4	240	200
32	DG 5	240	200
35	DG 6	240	200
38	DG 7	240	200
41	DG 8	240	200
44	DG 9	240	200
50	DG 10	480	400
53	DG 11	600	500
56	DG 12	2400	2000
58	DG 13	1800	1500
61	DG 14	1800	1500
63	DG 15	1800	1500

Fig. 9 Load and PV profile

알고리즘 검증하기 위한 설정값은 Table 5와 같다. 설정된 전압 운영 범위는 한국 배전계통 전압 운영 범위를 기반으로 설정하였으며¹⁴⁾, 계측기의 오차(ϵ)를 고려하여 설정하였다. 그리고 전압 문제가 발생하는 경우, 이를 해결하기 위한 제어 역률 설정값은 1 [%]로 하였으며, 전압 안정 범위 내 점진적 역률 1로 이동하기 위한 제어 역률은 0.5 [%]로 설정하였다.

Table 5 Setting value for proposed control algorithm

Category	Bounds
Voltage operation constraint	$0.96 + \epsilon \leq V \leq 1.02 - \epsilon (\epsilon = 5\%)$
Deadband	$\pm 0.5\%$

3.2 사례 연구에 대한 결과 분석

알고리즘 적용 결과, 3번 구역의 분산형전원의 전압 프로파일 및 역률 운전 그래프는 Figs. 10, 11과 같으며, 다수 구간에서 과전압이 발생하였지만, 제안한 알고리즘을 통해 전압 문제를 해결하였으며, 분산형전원의 출력이 점차 줄어드는 구간에서 분산형전원의 운전역률의 크기가 원래의 운전 역률 1로 제어 하는 것을 볼 수 있다. 그리고 오전 11:21분 경에 각 분산형전원의 운전 역률이 급격하게 변화한 것을 볼 수 있으며, 이는 12번 분산형전원의 제어 한계로 인한 관리단말장치에서 협조 제어알고리즘을 통해 수행된 결과이다.

Fig. 12는 결과 프로파일에 대하여 분산형전원이 출력이 많은 구간의 상세 프로파일이다. 대부분 말단에 설치된 분산형전원(12번)에서 과전압이 발생하였다. 그래프에서 빨간 점선으로 표시된 부분은 과전압 발생 시간이며, 이에 따라 로컬에서 역률 제어가 수행된 것을 볼 수 있으며, 10번과 11번 분산형전원의 전압의 크기가 유사하여 대부분 같은 운전 역률로 제어된 것을 볼 수 있다. 또한, 설정된 불감대 영역(1.01 ~ 1.015 [p.u.])에서는 추가적인 역률 제어 없이 현재 역률을 유지하였으며, 안정영역(0.97 ~ 1.01 [p.u.])에서는 원래의 운전 역률(1 [p.u.])로 돌아가기 위한 제어가 수행된 것을 볼 수 있다. Fig. 13은 협조 제어 수행 시간대의 상세 전압 및 운전 역률 프

Fig. 10 Voltage profile with proposed control scheme

Fig. 11 Power factor profile with proposed control scheme

Fig. 12 Detail profile of voltage and power factor

Fig. 13 Detail profile of coordinated control

로필을 보여준다. Fig. 13에서 11시 21분 경에 12번 분산형전원의 역률 제약 한계로 인해 관리단말장치에서 휴리스틱 기반의 협조 제어알고리즘을 수행하였으며, 이를 각 연계단말장치에서 수행하여 모두 안정적인 전압 범위 내에서 운영되었다.

Table 6은 기존 전압제어 방식과 본 논문에서 제안한 제어 방식을 통해 각 분산형전원의 제어 횟수를 비교결과를 보여준다. 기존 방식은 본 논문에서 제안한 알고리즘과 동일한 환경 및 설정값을 가지며, Fig. 8의 계통과 동일하게 적용하였다. 제어 횟수는 과전압으로 인해 각 연계단말장치에서 제어가 수행된 횟수를 의미하며, 원래의 기존 방식에 비교하였을 때 본 논문에서 제안한 제어 방식이 제어 횟수가 더 감소하였다. 기존 방식의 경우 과전압이 발생한 경우, 목표 전압의 크기(전압 운영범위의 상한)를 유지하기 위해 제어하여 제어 이후의 전압 분포는 전압 운영제약의 한계지점에 머물러 있게 된다. 이처럼 전압 분포가 운영제약의 한계지점에 머물러 있다면, 과전압이 발생 될 가능성이 증가하게 된다. 반면에 본 논문에서 제안한 방식은 과전압 발생 시, 전압의 크기와 관계없이 일정 크기의 역률을 제어하여 PCC의 전압 크기는 제약조건을 만족하고, 제어 한계로 인해 협조 제어가수행되는 경우, 전압 안정화 범위에 가깝도록 제어하기 때문에 협조 제어 시 이후의 전압 문제가 기존 방식보다 적게 발생하여 기존 제어 방안보다 제어 횟수가 적은 결과를 보였다.

Table 6 The number of control for conventional control scheme and proposed control scheme

Applied method	No. 10 PV	No. 11 PV	No. 12 PV
Conventional voltage control method	85	95	94
Proposed voltage control method	67	72	90

4. 결론

최근 신재생에너지원이 널리 보급되고 있으며, 다양한 형태로 배전계통에 연계되고 있다. 이에 따라 연계기술이 필요하며, 신재생에너지로 인한 계통에 발생 되는 문제를 해결할 수 있는 제어기술이 필요하다.

본 논문에서는 분산형전원으로 인한 발생 되는 전압 문제를 해결하고자 로컬기반의 전압제어 방안을 제안하였다. 먼저, 분산형전원의 연계지점의 전압을 안정화할 수 있도록 기존에 설치되어있는 연계단말장치에 알고리즘을 탑재하여 능동전압제어를 통해 문제를 해결하고자 하였다. 다음으로 제어기 간의 제어 간섭과 제어 한계로 인한 문제를 해결하고자 관리단말장치를 설치하여 연계단말장치 간의 협조 제어 방안을 제안하였다. 제안한 방식은 시뮬레이션을 통해 효과적임을 검증하였으며, 기존 제어 방식보다 제어 효과가 향상되고, 제어 횟수가 적은 결론을 도출하였다.

따라서 본 논문에서 제안한 방식은 국내 배전계통에서 분산형전원으로 인한 전압 문제를 해결하기 위한 좋은 대안이라 할 수 있으며, 기존 통신 설비를 활용한 방안으로써 새로운 설비를 활용하지 않아 비용 측면에서 효과적인 방안이다. 또한, 전압 문제를 해결함으로써 배전계통에서 분산형전원의 수용률을 높일 수 있으며, 이에 따라 본 논문에서 제안한 방식은 국내외적으로 추진하는 신재생에너지 보급 정책달성을 위한 기술이다.

REFERENCES

1. Ministry of Trade, Industry, and Energy. Renewable Energy 3020 Implementaion Plan, Ministry of Trade, Industry and Energy, 2017.
2. No, D. S., Operation Plan for Bidirectional Protection and Cooperation of Smart Grid connected with New Energy Power Source, The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 5, No. 9, pp. 39-34, 2010.
3. Comfort, R., Mansoor, A., and Sundaram, A., Power Quality Impact of Distributed Generation: Effect on Steady State Voltage Regulation, PQA 2001 North America Conference, Pittsburgh, Pennsylvania, 2001.
4. Choi, J-H. and Kim. J-C., The Online Voltage Control of ULTC Transformer for Distribution Voltage Regulation, International Journal of Electrical Power &Energy Systems, Vol. 23, No. 2, pp. 91-98, 2001.
5. Liu, X., Aichhorn, A., Liu, L., Li, H., 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.
6. Distribution Planning Department of KEPCO, Technical Standards for Connecting Distribution Systems to Distributed Power, Korea Electric Power Corporation, 2021.
7. IEEE 1547, IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, The IEEE Standard Association, 2003.
8. Toma, S., Senjyu, T., Miyazato, Y., Yona, A., Tanaka, K., and Kim, C. H., Decentralized Voltage Control in Distribution System Using Neural Network, 2008 IEEE 2nd International Power and Energy Conference, IEEE, 2008.
9. Go, S. I., Yun, S. Y., Ahn, S. J., and Choi, J. H., Voltage and Reactive Power Optimization Using a Simplified Linear Equations at Distribution Networks with DG, Energies, Vol. 13, No. 13, 3334, 2020.
10. Barr, J. and Majumder, R., Integration of Distributed Generation in the Volt/var Management System for

Active Distribution Networks, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 6, No. 2, pp. 576-586, 2014.

11. Park, D. H., The status of the Expansion of the Linkage period of the Distributed Power in Distribution System, Journal of Electrical World Monthly Magazine. Korea Electric Association, pp. 26-31, 2015.
12. Ahn, S. J., Choi, J. H. Kang, H. K., and Cho, S. S., Development of DG Reactive Power Controller for Distribution System Voltage Control, Installation Engineers Proceedings of KIIEE Annual Conference, The Korean Institute of Illuminating and Electrical Engineers, pp. 319-320, 2014.
13. Korea Energy Management Corporation, Analysis of Power usage Patterns using Consumer Load Curves, Korea Energy Management Corporation, 2005.
14. An, H. S., Choi, M. H., Bae, S. H., and Ryoo, J. S., Improvement of Connection Method between Distributed Energy Source and 22.9kV Distribution Line. Proceedings of the KIEE Conference. The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 263-265, 2015.