무효전력 보상기를 이용한 저압 배전계통 전압 상승 억제 및 실증

김영록* · 차한주***

*헥스파워시스템(주), 부사장

**충남대학교 전기공학과, 교수

Voltage Rise Mitigation and Test Using the Reactive Power Compensator in LV Distribution Networks

Kim Young Roc* · Cha Han Ju***

*Vice President, Hex Power System Co., Ltd

**Professor, Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

†Corresponding author: hjcha@hex.co.kr

Abstract

The high penetration level of the generated photovoltaic (PV) power generation in low voltage (LV) networks induces the issue of voltage rise, particularly at the end of the feeders. Several solutions such as grid reinforcement, transformer tap change, demand-side management, active power curtailment, and the use of reactive power control methods have been proposed to address this issue. However, the practicability of these solutions is limited owing to high costs, low efficiencies and the conflicts of interest between network operator and the owners of solar farms. This paper proposed the use of a reactive power compensator (RPC) to mitigate the dual issues of voltage rise and voltage drop. The voltage rise is caused by the distributed generation systems while the voltage drop is caused by the heavy loads at the end of the feeder of the weak LV distribution networks. The RPC was utilized to inject the lagging or leading reactive current during the voltage drop or voltage rise condition. The proposed RPC was developed as a part of the Kepco Open R&D project. The aim of this project is to investigate the techniques to mitigate the issues for the voltage rise and drop in the distribution networks, without either changing the service transformer tap or installing an additional distribution line and service transformer. The performance of the proposed RPC was verified via simulation and experiments.

Keywords: 무효전력제어(Reactive Power Control), 전압상승(Voltage Rise), 저압 배전 선로(LV Distribution Network), 분산전원(Distribution Energy Resource)

1. 서론

전통적으로 배전계통의 전압 조정은 변전소 주변압기의 OLTC(On Load Tap Changer)와 전압강하가 큰 선로 중간에 설치되는 SVR(Step Voltage Regulator), 저압용 배전변압

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.40, No.6, pp.23-33, December 2020
<https://doi.org/10.7836/kjes.2020.40.6.023>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 16 October 2020

Revised: 04 November 2020

Accepted: 06 November 2020

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.

기의 탭 선정 그리고 변전소에서 무효전력의 공급을 조절함으로써 이루어진다. 무효전력의 공급 조절은 모든 부하 조건에서 제한된 범위내로 전압을 제어하기 위하여 STATCOM (Static Synchronous Compensator)과 SVC (Static Var Compensator)가 이용된다. SVC는 가변 인덕터와 가변 커패시터를 병렬로 구성하여 사이리스터와 연결된 구조로써 대용량화와 가격에서 장점이 있다¹⁾. STATCOM은 다른 보상장치보다 빠른 응답특성을 얻을 수 있는 전력 설비이며, 연속적인 무효전력 보상이 가능하다. 그러나 변전소에서 이루어지는 중앙 집중식 제어 방식은 저압 배전선로 말단에서 발생하는 전압 변동을 신속하게 대응 할 수 있는 기본적인 능력이 부족하고, 변압기는 부하에 전력을 공급하면서 탭을 절체 하여 전압 조절이 가능하나 응답성이 매우 떨어진다²⁻⁵⁾.

2019년부터 2024년까지 신규 재생에너지 설비는 세계적으로 1 TW가 넘는 용량인 1,220 GW가 설치되고 2024년 누적 3,722 GW에 도달할 것으로 전망되고 있으며, 태양광 발전 시스템의 경우 발전단가의 하락과 각 나라의 효과적인 정책에 힘입어 예측기간 동안 2.5배 증가하여 2024년에 1.2 TW가 설치 될 것으로 전망되며, 국내에서도 정부의 3020 신재생 에너지 보급정책에 따라 저압 배전 계통에 연계되는 분산 전원의 용량이 크게 증가하고 있는 상황이다. 저압 배전 계통의 분산 전원의 수용 증가는 전압상승, 배전기기의 과부하, 고조파 전류의 증가, 선로 공진, 단독운전 검출의 오류 그리고 직류 전류 주입등과 같은 여러 가지 문제들이 대두 되고 있다⁶⁻⁸⁾. 특히 분산 전원의 설치 용량은 저압 배전 계통의 태양광 발전 시스템 고밀도에 의한 전압 상승 문제로 인해서 제한이 되어 있다. 태양광과 같은 분산 전원은 확률적 전력의 생산으로 인한 생산과 수요 간의 불일치되는 현상이 많이 발생하게 되고 Fig. 1과 같이 배전계통으로 양방향의 전력 흐름이 발생하여 순조류의 경우 전압 강하, 역조류의 경우 전압 상승으로 이루어지는 전압 변동이 발생하게 된다.

Fig. 1 Bidirectional power flow and voltage fluctuations in LV networks with PV integration⁹⁾

배전 계통에서의 전압상승은 태양광 발전 시스템의 고밀도 연계 시에 발생하는 주요한 이슈들 중의 하나이다. 유도성 리액턴스(X)와 저항(R)의 X/R비율이 작은 배전선로와 유효전력의 역조류에 기인하는 전압상승은 배전선로로 주입되는 유효 전력의 양을 제한하여야 한다. 결과적으로 배전선로의 말단에 있는 수용가들은 배전 계통 연계 기준을 초과하는 과전압(+10%)으로 인해서 태양광 발전 시스템용 PCS(Power Conditioning System)의 정지를 초래 하게 된다. 그러므로 선로 운영자는 태양광 발전 시스템의 고밀도 레벨을 해소하여 태

양광 발전 시스템 PCS가 정지하지 않고 원활히 운영될 수 있는 대책을 마련해야 한다.

배전 계통에서 태양광 발전 시스템의 수용능력 증가 및 시간에 따라 변화하는 부하에 의한 전압 변동을 관리하고 분산 전원에 의해서 발생하는 전압 변동을 흡수하기 위한 대책은 아래와 같다^{9,10)}.

- 배전선로의 증설
- 연계점에서 전압 변동 억제를 위한 무효전력 공급
- 분산전원 발전주와 수용가에게 유효한 유효전력의 억제(Active Power Curtailment, APC)
- 주상변압기의 탭 조정에 의한 전압조정
- 전력의 공급과 수용을 일치 시키기 위한 부하 관리
- 에너지 저장 장치를 이용한 유효전력의 저장

배전선로의 증설과 탭 조정은 고비용으로 인해서 효율적이지 않고 에너지 저장 장치 또한 설치 장소에 많은 제약을 받게 된다. 저압배전의 부하 관리는 사실상 불가능하고 무효전력을 이용한 방법과 유효전력 억제가(APC)가 현실적인 대안이 된다. 그러나 유효전력 억제의 경우 발전 손실에 대한 보전 문제가 이슈화 될 수 있고, 전압 변동 억제를 위한 무효전력 공급의 경우, 태양광PCS는 무효전력을 공급가능하나 유효전력 발전량에 따른 무효전력 공급용량의 제약¹¹⁾이 있고 현재 국내에 기 설치된 태양광 PCS는 무효전력을 공급하여 전압 변동 억제 기능이 탑재되어 있지 않은 상황이다.

본 논문에서는 기존 배전 선로에 병렬로 설치하여, 태양광 PCS가 정상적으로 동작할 수 있는 범위로 억제하여 발전손실이 발생하지 않도록 하고, 수용가 인근의 부하에 의한 저전압 현상도 개선할 수 있는 무효 전력 보상기를 적용하고 이를 실증 하였다. 2절에서는 저압 배전 계통의 전압 변동 특성을 분석하고 3절에서는 무효 전력 보상기의 하드웨어 구성과 그 제어 방법을 설명하였다. 그리고 4절에서 전력전자용 시뮬레이션 소프트웨어 PSIM을 이용하여 순조류 부하에 의한 저전압 현상과 태양광 발전 시스템과 같은 역조류 부하에 의한 과전압 현상을 시뮬레이션하고 무효전력 보상기의 전압 상승 억제 동작을 시뮬레이션 결과로 제시하였다. 5절에서 배전 선로에서 컴퓨터 시뮬레이션과 동일하게 전압 변동 억제 성능을 시험하고 결과를 제시하였고, 마지막으로 6절에서 무효 전력 보상기에 대한 결론을 제시한다.

2. 저압 배전 계통의 전압 변동 특성

배전계통에서 전압변동에 대한 주원인은 전압제어 원칙에 의해서 가장 쉽게 이해 할 수가 있다. Fig. 2은 배전 선로의 말단에 분산전원이 연결되어 있는 단선도를 도시하고 있다. 송전단과 수전단 유효 전력과 무효 전력 계산을 단순화 하여 송전단전압(V_s)과 수전단 전압(V_m)의 차이를 다음 식(1)과 같이 표시할 수 있다.

$$Vm - Vs \cong \frac{R(P_m - P_l) + X(Q_m - Q_l)}{Vm} \quad (1)$$

Fig. 2 Simplified connection of PV, RPC and Load to distribution network

여기서 P_m 과 Q_m 은 분산전원의 유효전력과 무효전력을 표시하고, P_l 과 Q_l 은 분산 전원에 병렬로 연결되어 있는 부하의 유효전력과 무효전력이다. 그리고 $R + jX$ 은 송전단과 수전단, 즉 송전단과 분산전원 사이의 배전 선로 임피던스 이다. 식(1)에서 알 수 있듯이 만일 분산전원의 발전 출력이 부하의 소비전력 보다 많다면 $P(=P_m - P_l)$ 와 $Q(=Q_m - Q_l)$ 는 양의 값이 되어서 수전단 전압(V_m)의 상승을 일으키게 되고 태양광 발전이 없는 야간의 경우는 부하 소비전력이 많아지면서 음의 값이 되어 전압의 하강이 일어난다.

식(1)로부터 전압 변동에 대한 부하의 양에 의한 영향과 분산전원의 출력량에 의한 영향을 각각 고려하기 위하여 아래의 식(2)로 정리 할 수 있다.

$$Vm \cong \left[Vs - \frac{RP_l + XQ_l}{Vm} \right] + \left[\frac{RP_m + XQ_m}{Vm} \right] \quad (2)$$

식(2)에서 전압 강하의 경우, 분산전원이 없을 경우($P_m = Q_m = 0$)에 해당하므로 부하에 인가되는 전압은 부하의 소비 전력, 특고압의 배전 전압과 주상변압기의 탭 설정에 의해서 공급되는 전압에 의해서 결정된다.

전압 상승의 경우, 부하의 소비 전력보다 분산전원의 공급전력이 많은 경우 발생하므로 부하의 소비 전력이 잉여라고 하면 식(2)를 다음과 같이 단순화 할 수 있다.

$$Vm \cong Vs + \frac{RP_m + XQ_m}{Vm} \quad (3)$$

그러므로 분산 전원이 접속된 연계점에서 P_m 에 의해서 발생하는 전압 상승을 보상하기 위하여 필요한 무효 전력(Q_m)은 식(4)와 같이 정리할 수 있다.

$$Q_m \cong -\frac{R}{X}P_m + \frac{\Delta V_{tl} V_d}{X} \quad (4)$$

여기에서 V_d 는 연계점에서 유지하고자 하는 목표 전압 즉 과전압 보호 한계값을 넘지 않는 값이고, $\Delta V_{tl} = V_d - V_s$ 로 정의하고 최대치는 주상 변압기의 2차측 전압과 과전압 보호 한계 값의 차이가 된다. 기 설치된 태양광PCS는 무효전력 공급기능이 없으므로 무효전력 보상기가 무효전력을 공급한다면 $Q_m = Q_{RPC}$ 된다. 분산전원의 연계점 전압을 주상 변압기 2차측 전압(V_s)과 동일($\Delta V_{tl} = 0$)하게 유지하기 위한 무효전력의 최대치는 식(5)와 같이 된다.

$$Q_{RPC} \approx -RP_m/X \quad (5)$$

전압 상승 억제에 필요한 무효전력의 크기는 분산전원 연계점의 지리적인 위치에 따른 배전 선로 임피던스와 분산전원의 발전 전력에 의해서 변동된다고 할 수 있다^{10,12)}.

3. 무효전력 보상기의 구성과 제어기

Fig. 3은 본 논문에서 제안한 무효전력 보상기의 구성과 제어 블록도이다. DC링크 커패시터, 풀 브리지 인버터, LCL필터로 구성 되어 있다. DC링크 커패시터는 에너지 저장 장치로 사용하였으며, 풀 브리지 인버터는 고속 스위칭 전력소자인 IGBT와 이를 구동하기 위한 게이트 드라이버로 구성되어 있다. LCL필터를 사용하여 계통에 공급되는 무효전류의 리플 성분을 제거한다. 인버터는 4상한 운전이 가능하나 여기는 유효 전력공급원이 없으므로 진상 또는 지상 무효 전력만 공급한다¹³⁾.

무효전력 보상기는 연계점 전압을 측정하고 Fig. 4의 특성 곡선과 같이 움직이며 식(6)에 따른 Q(U) 방법에 의하여 무효 전력의 공급량을 결정한다¹⁴⁾. 연계점 전압이 $\pm 6\%$ 이내의 안정영역에서 유지 된다면 무효전력의

Fig. 3 Configuration and control block diagram of reactive power compensator

Fig. 4 Q(U) Reactive power curve^{9,14)}

출력 없이 무효전력 보상기는 대기 운전을 하고 연계점 전압이 하강한다면, 전류의 위상이 지상인 +무효전류가 무효전력 보상기를 통해 주입이 된다. 연계점 전압이 상승한다면, 전류의 위상이 진상인 -무효전력이 무효전력 보상기를 통해 주입이 된다.

식(6)에서 공급해야 할 무효전력을 결정하고 연계점 전압으로 나누어 무효전류 지령치를 계산하는 AC전압 제어기와 무효전류를 제어하는 회전좌표계 q축 전류제어기로 구성 되어 있다. DC 전압원이 존재하지 않는 시스템 특성상 DC 링크 전압을 일정하게 유지하도록 충전하기 위해 DC 전압제어기와 유효전류를 제어하는 회전좌표계 d축 전류제어기로 구성되어 있다. 계통 전류(I_g)를 측정하여 q축 회전좌표계의 피드백 성분으로 사용하고, 90° 위상 지연특성을 가지고 있는 전역 통과 필터로 계통 전류(I_g)를 계산하여서 d축 회전좌표계 피드백 성분으로 사용하는 회전 좌표계 전류 제어를 구현 하였다. 회전좌표계 전류제어기에서 나온 출력은 정지 좌표계로 변환되어 최종적으로 PWM 지령치를 생성한다¹⁵⁾.

$$Q(U) = \begin{cases} Q_{\max} & , U < U_{\min} \\ \frac{U_1 - U}{U_1 - U_{\min}} Q_{\max} & , U_{\min} \leq U < U_1 \\ 0 & , U_1 \leq U < U_2 \\ -\frac{U - U_2}{U_{\max} - U_2} Q_{\max} & , U_2 \leq U < U_{\max} \\ -Q_{\max} & , U_{\max} < U \end{cases} \quad (6)^9$$

4. 시뮬레이션

20 kVA 주상 변압기에서 230 m 떨어진 배전선로의 말단에 4 kW의 부하(역률 1)와 4 kW의 태양광 발전시스템이 설치되었다고 가정하고 주상변압기의 2차측 전압과 수전단의 전압차이 그리고 무효전력 보상기의 동작에 따른 전압의 변동을 PSIM을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 여기에서 주상변압기의 직렬임피던스는 5%로 이고 배전선로 임피던스는 각각 $R = 0.727 \, \Omega/km$, $X = 0.0929 \, \Omega/km$ 이다.

무효전력 주입에 대한 효과를 알아보기 위해 무부하시에 송전단의 전압은 220 V이고 부하변동에 따른 수전단 전압을 220 V로 일정하게 유지하는 기능으로 시뮬레이션 하였다.

4.1 순조류 부하에 의한 전압 강하와 보상

약 4 kW (18.2 A)의 라디에이터(순조류 부하)에 의해서 보상전에 수전단 전압(PCC V)은 219.5 V에서 216.5 V로 강하하였고 무효전력 보상기에 의해서 지상 무효 전류를 29.4 A 주입하여 보상하면 수전단 전압은 220 V

로 회복하였고, 주상변압기 2차측 전압(Grid V)은 223 V로 상승하였다. Fig. 5과 같이 무효전력 보상기(RPC I)에서는 전압강하에 대한 보상을 하기 위하여 지상전류(지상 무효전력)를 주입하였고 주상 변압기 2차측에 유입되는 전류(Grid I)는 진상전류(진상 무효전력)가 유입되고 흐르게 되어 18.2 A에서 34.8 A로 증가하고 역률이 진상으로 변하게 된다.

Fig. 5 Voltage and current waveform of load compensation

4.2 역조류 부하에 의한 전압 강하와 보상

동일 조건에서 약 4 kW의 태양광 발전시스템의 발전에 의해서 역조류가 발생 하였을 경우에 수전단 전압(PCC V)은 224 V로 약 4 V정도 상승하였고 주상변압기의 2차측 전압(Grid V)은 약 220.6 V가 되었다 주상변압기에 역으로 전류가 유입되므로 수전단의 전압이 주상변압기 2차측 전압보다 상승하는 현상이 발생하였다. Fig. 6과 같이 무효전력 보상기에서 전압 상승에 대한 보상을 하기 위하여 진상전류(진상 무효전력) 29 A를 주입하면 수전단 전압은 220 V로 복귀 되고 주상변압기 2차측 전압은 217 V로 유지된다. 무효전력보상기 전류(RPC I)는 전압상승에 대한 보상을 하기 위하여 진상전류(진상 무효전력)를 주입하였고 주상 변압기 2차측에 유입되는 전류(Grid I)는 지상전류(지상 무효전력)가 유입되고 흐르게 되어 18 A에서 33 A로 증가하고 역률이 지상으로 변하게 된다.

Fig. 6 Voltage and current waveform of reverse power flow compensation

5. 배전 선로 적용 시험 결과

고창 한국전력 실증시험장에 설치되는 태양광 실증 시험장의 배전 선로에서 실증시험을 진행하였다. Fig. 7과 같이 10 kVar무효전력 보상기와 순조류 부하기로 3 kW급 라디에이터 3대를 사용하였고, 3 kW 태양광 발전 시스템 3세트를 역조류원으로 구성하여 실험하였다.

Fig. 7 RPC, test equipment and PV pcs

Fig. 7의 좌측 사진은 전주에 설치된 무효 전력 보상기이고 중앙 사진은 라디에이터 부하와 계측 설비, 그리고 우측 사진은 3 kW 태양광 PCS이다.

주상변압기와 수전단측 부하와의 거리는 230 m이고 22 mm² 배전선로의 임피던스는 시뮬레이션과 비슷하게 존재하였다. 다만 주상변압기의 1차측 특고압 전압의 변동과 주변 부하의 변동에 의해서 발생한 전압 변동을 고려하여 1분 간격으로 전압 변동을 레코더로 측정하였다. 무효전력 보상기는 시뮬레이션과 마찬가지로 부하 전압, 즉 연계점 전압을 변압기 2차측 전압과 무관하게 공칭전압(220 V)을 유지 하도록 설정하였다¹³⁾.

5.1 순조류 부하에 의한 전압 강하와 보상

라디에이터 부하 3대를 병렬로 연결하고 부하의 양을 변동하면서 보상 전과 후의 주상변압기 2차측 전압(V_g)와 수전단 전압(V_{pcc}), 부하전력, RPC 주입 무효전력을 기록하였다.

Fig. 8의 ④지점에서 약 8.59 kW의 부하가 인가되면 V_g 는 217 V이고 V_{pcc} 는 210.2 V되어 약 7 V정도 강하하였고 ⑥지점에서, 부하가 3.68 kW일 경우 2.8 V차이가 발생하고 V_{pcc} 는 215.9 V가 되었다. ⑩지점에서 7.2 kVar의 무효전력으로 보상하면 V_g 는 221.7 V, V_{pcc} 는 221.4 V로 유지되고 ④지점에서, 부하가 5 kW일 경우 10 kVar의 무효전력으로 보상하면 V_g 는 222.4 V, V_{pcc} 는 221.3 V로 유지된다. 무효전력을 보상함으로써 라디에이터 부하의 변동에도 부하전압을 일정하게 혹은 $\pm 6\%$ 이내의 안정영역으로 유지 할 수 있다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8 Voltage measurements of Load variations

5.2 역조류 부하에 의한 전압 강하와 보상

역조류 부하시도 시뮬레이션과 동일한 결과를 보여주었다. Fig. 9의 ②지점에서 약 8.16 kW의 발전이 이루어지면 순조류 부하와 반대로 V_{pcc} 는 228.36 V이고 V_g 보다 6.4 V정도 상승하였고 ⑤지점에서 4.45 kW의 발전을 하면 V_g 는 222.36 V, V_{pcc} 는 225.62 V로 상승 하였다. 7.82 kW의 발전이 이루어지는 ⑩지점에서 7.82 kVar의 무효전력이 공급되면 V_g 는 218.3 V, V_{pcc} 는 221.71 V로 유지되고 ⑫지점에서, 순시발전 4.2 kW, 무효 전력 보상 전력 10 kVar, V_g 220.61 V, V_{pcc} 221.63 V이 계측 되었다.

Fig. 9 Voltage measurements of reverse power flow load variations

순조류 부하의 경우 V_{pcc} 는 V_g 보다 작게되는 전압 강하가 발생하고 역조류 부하의 경우 반대로 전압 상승이 발생한다는 것을 실험을 통하여 검증하였고 무효전력 보상기를 통하여 V_{pcc} 의 제어가 가능하고 V_g 또한 부하

에 관계없이 전압의 변동 범위를 축소하는 효과가 있다는 것을 확인 할 수 있다.

6. 결론

주상변압기에서 멀리 떨어진 말단에 순조류 부하 또는 역조류부하가 연계될 경우 저압 배전선로의 저항성 임피던스에 의해서 전압 변동이 발생한다. 특히 태양광 발전 시스템의 경우, 과전압이 발생하여 PCS가 정지와 기동을 반복하는 현상이 발생하고, 이로 인한 발전 손실이 이슈화 되고 있는 상황이다. 순조류 부하의 경우 저전압 현상에 의해서 전원 품질 문제가 민원으로 제기 될 수 있다.

본 논문에서는 태양광 발전 시스템과 같은 역조류 부하와, 저항성 부하 같은 순조류 부하에 관계없이 배전계통의 전압을 $\pm 6\%$ 이내로 유지하도록 진상/지상 무효전력을 발생하는 무효전력 보상기를 새롭게 적용하여 실증하였다. 컴퓨터 시뮬레이션과 현장 실험을 통하여 지상 무효 전류의 주입시 전압 강하를 억제하고 진상 무효 전류를 주입시 전압 상승을 억제하여 연계점의 전압이 안정적인 전압으로 억제 및 제어할 수 있는 것을 확인하였다.

무효전력 보상기는 고속 스위칭 소자인 IGBT로 구성되어 소형, 경량이고 가격이 저렴하므로 주상변압기와 배전선로의 증설없이 저비용으로 저압 배전망에 태양광 발전 고객 및 일반 고객에게 개선된 품질의 전압을 공급할 수 있다는 것이 장점으로 작용할 수 있으며, 단점으로는 진상 및 지상 무효전력을 주입하여 전압 상승 및 강하를 억제하므로 주상변압기에 흐르는 전류가 증가하고 역율이 떨어지는 현상이 발생한다. 그러나 무효전력 보상기가 다수 설치된다고 하면 전체적으로 배전선로의 전압의 변동성이 억제되고 무효전력에 대한 발전설비의 용량 축소가 예상된다.

향후, 무효전력 보상기의 다수 설치에 따른 배전선로에 미치는 영향, 손실, 경제성에 대한 분석, 효과에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 한국전력공사 Open R&D 프로그램(No. R18DO02)의 지원에 의하여 이루어진 연구입니다.

REFERENCES

1. Yoon, J., Kim, Y., and Kim, S., Evaluation of Influence of System on SVC Installation Operation, in Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 59, No. 7, pp. 1187-1193, 2010.
2. Lee, S. M., Kim, I., Oh, H. M., Oh, S., and Lee, D. H., Comparison of SVC and STATCOM Operating Characteristics for the Reactive Power Compensation of the Jeju System, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 35, No. 3, pp. 49-56, 2015.
3. Kumar, C., Operation and Control of an Improved Performance Interactive DSTATCOM, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 62, No. 10, pp. 6024-6034, 2015.
4. Cetin, A. and Ermis, M., VSC-Based D-STATCOM with Selective Harmonic Elimination, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 45, No. 3, 2009.

5. Ota, J. I. Y., Shibano, Y. Niimura, N., and Akagi, H., A Phase-Shifted-PWM D-STATCOM using a Modular Multilevel Cascade Converter (SSBC)—Part I: Modeling, Analysis, and Design of Current Control, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 51, No. 1, 2015.
6. Majumder, R., Reactive Power Compensation in Single-Phase Operation of Microgrid, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 60, No. 4, pp. 1403-1416, 2013.
7. Wang, Q., Cheng, M., Jiang, Y., Zuo, W., and Buja, G., A Simple Active and Reactive Power Control for Applications of Single-phase Electric Springs, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, No. 8, 2018.
8. Kim, H. S., Sun, Q., and Zhou, J., Distributed Adaptive Virtual Impedance Control for Accurate Reactive Power Sharing Based on Consensus Control in Microgrids, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 8, No. 4, 2017.
9. Juamperiz, M., Yang, G., Kjaer, S. B., Voltage Regulation in LV Grids by Coordinated Volt-Var Control Strategies J. Mod. Power Syst. Clean Energy Sept, 2014.
10. Tonkoski, R., Lopes, L. A. C., and El-Fouly, T. H. M., Coordinated Active Power Curtailment of Grid Connected PV Inverters for Overvoltage Prevention, IEEE Trans. Sustain. Energy, Vol. 2, No. 2, pp. 139-147, Apr. 2011.
11. Liu, Y., Bebic, J., Kropsoki, B., Bedout, J. de., and W. Ren, Distribution System Voltage Performance Analysis for High-Penetration, IEEE Energy 2030, USA, Nov. 2008.
12. Zeraati, M., Golshan, M. E., Guerrero, J., Voltage Quality Improvement in Low Voltage Networks Using Reactive Power Capability of Single-Phase PV Inverters, IEEE Trans. on Smart Grid, Vol. 10, No. 5, pp. 5057-5065, 2019.
13. Kim, Y. R., Trung, K. V., and Cha, H. J., Voltage Control of Distribution Networks by Reactive Power Compensator, KIEE Conference, pp. 650-651, 2020.
14. Safayet, A., Fajri, P., and Husain, I., Reactive Power Management for Overvoltage Prevention at High PVpenetration in a Low-Voltage Distribution System, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 53, No. 6, pp. 5786-5794, 2017.
15. Sim, W. S., Jo, J. M., Kim, Y. R., and Cha, H. J., Reactive Power Control of Single Phase Rective Power Compensator for Distribution Line, The Trans. of the KIPE, Vol. 25, No. 2, pp. 73-78, 2020.