

Combined Volt-VAR and Volt-Watt Control for PCC Voltage stabilization in Smart Inverters

스마트 인버터의 연계점 전압 안정화를 위한 Volt-VAR 및 Volt-Watt 결합 제어

Dong-Ho Won · Kyo-Beum Lee

원동호* · 이교범†

Abstract

This paper proposes the combined Volt-VAR and Volt-Watt control method of smart inverters to stabilize the point of common coupling (PCC) voltage. The distributed energy sources (DER) using renewable energy such as solar and wind power are increasing because of environmental issues worldwide. When the DER increases, the PCC voltage fluctuates, which causes a decrease in grid stability and power quality. Smart inverter provides grid support function such as Volt-VAR and Volt-Watt control method to eliminate these problems. The Volt-VAR control method adjusts capacitive/inductive reactive power based on the PCC voltage. The Volt-Watt control method stabilizes the PCC voltage by reducing active power. The combined Volt-VAR and Volt-Watt control method reduces the active power while it controls the inductive reactive power to the maximum. This paper proposes the combined Volt-VAR and Volt-Watt control method to improve the stabilization effect of PCC voltage. The effectiveness of proposed method is verified by the simulation and experiment results.

Key Words

Smart Inverter, Distributed Energy Resource, Volt-VAR Control, Volt-Watt Control, Grid-Connected Inverter

1. 서론

전 세계적으로 환경 문제가 발생함에 따라 태양광 및 풍력 등의 재생 에너지를 활용하는 분산 전원(Distributed Energy Resources, DER)에 대한 관심이 증가하고 있다[1]. 이러한 관심은 분산 전원 보급의 확대를 위한 노력으로 이어지고 있다. 국내 정부에서는 분산 전원의 보급률 증가를 위해 '재생 에너지 3020 이행계획', '2050 탄소중립 추진 전략'을 실행하며 2030년까지 재생 에너지 발전 비중을 20%로 확대하는 것을 목표로 하고 있다[2]. 태양광 발전 시스템의 경우 다른 분산 전원 시스템에 비해 설치 및 운영 유지보수 비용이 적은 장점이 있다. 따라서 지자체 및 발전 사업자를 중심으로 태양광 발전 형태의 분산 전원이 지속적으로 증가하는 추세이다. 그러나, 태양광 발전 시스템은 기후적 요인에 의존하기 때문에 계절 및 날씨에 직접적인 영향을 받는다. 배전계통에 연계된 분산 전원의 급증은 연계점(Point of Common Coupling, PCC) 전압의 변동을 유발하며 계통 역조류 현상 및 전력 품질 저하 등의 문제를 초래한다. 이와 같은

계통 안정성의 저하 문제로 인해 배전계통 분산 전원의 수용 용량에 한계가 존재하며, 수용 용량을 증가시키기 위해 과전압 상황으로부터 연계점 전압을 적절히 조정하는 전압 제어가 요구된다[3]-[5].

기존에는 탭 변환장치(On Load Tap Changer), 선로 전압 조정장치(Step Voltage Regulator), STATCOM 등의 전압 제어 방식을 사용하여 연계점 전압을 조정하였다. 그러나 기존의 전압 제어 방식은 역조류 문제에 대한 효과를 기대하기 어려우며, 잦은 유지보수와 추가적인 설비가 요구되어 지속적으로 비용이 발생하는 단점이 존재한다[6], [7]. 최근에는 분산 전원에서 사용하는 인버터의 기능을 활용하여 연계점 전압을 조절하는 방안을 사용하고 있다. 인버터의 유효전력 및 무효전력 제어를 통한 연계점 전압 제어 방법은 추가적인 설비가 요구되지 않아 경제적으로 유리하다는 장점이 있다.

스마트 인버터란 배전계통에 연계되는 분산 전원의 증가로 인한 연계점 전압 및 주파수의 변동을 방지하기 위해 능동적으로 대응할 수 있는 전력 변환 장치를 의미한다. 스마트 인버터

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Ajou University, Korea.

E-mail: kyl@ajou.ac.kr

<https://orcid.org/0000-0002-2125-9500>

* Dept. of Electrical Computer Engineering, Ajou University, Korea.

<https://orcid.org/0009-0008-8136-7096>

Received: May. 04, 2023 Revised: May. 25, 2023 Accepted: May. 27, 2023

표 1 스마트 인버터의 계통 지원 기능

Table 1 Grid support function of smart inverter

No.	Function
1	Volt-VAR
2	Fixed PF
3	Volt-Watt
4	L/HVRT
5	L/HFRT
6	Frequency-Watt
7	Watt-VAR
8	P Limit
9	Q Set Point
10	Disconnection and Reconnection
11	Power Stop
12	N-Ramp
13	SS-RAMP
14	Anti-Islanding

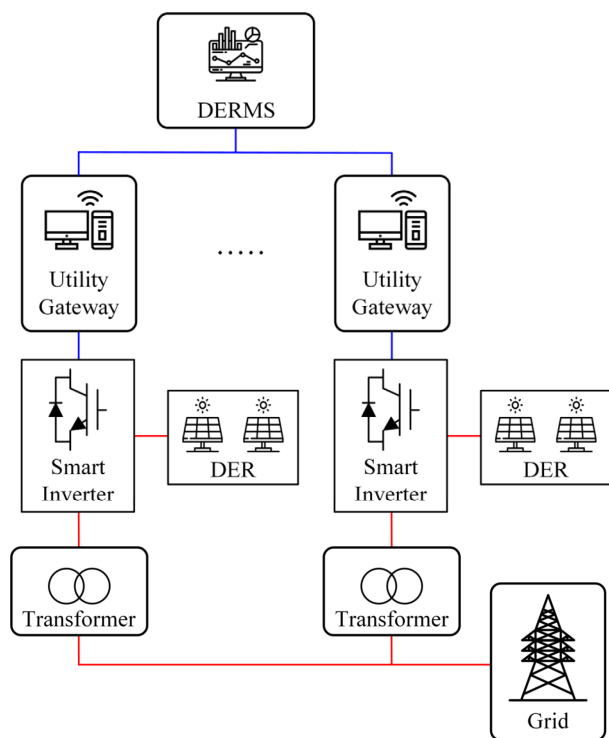


그림 1 분산전원 관리 시스템과 스마트 인버터가 연계된 계통연계형 시스템
Fig. 1 Grid-Connected System using DERMS and smart inverter

는 배전계통 분산 전원의 수용력을 확대하기 위해 계통 지원 기능을 탑재하고 있다. 표 1은 한국 스마트 그리드 협회에서 정의한 스마트 인버터의 계통 지원 기능을 나타낸다. 스마트 인버터는 14가지의 계통 지원 기능을 탑재하고, Utility Gateway로부터 정보를 전달받아 분산 전원을 모니터링한다. 전력 공급 및 수요에 불균형이 발생하거나 번개, 천둥 등의 자연재해와 같은 이유로 연계점에 과전압이 발생하는 경우 스마트 인버터는 분산 전원의 제어를 수행한다[11].

최근 스마트 인버터를 이용하여 과전압 및 저전압 상황에서 연계점 전압을 안정화하는 방법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다[12]-[14]. [12]에서는 배전계통의 상황에 따라 스마트 인버터의 제어 곡선의 파라미터를 선정하여 연계점 전압의 안정화 효과를 향상시키는 연구가 진행되었다. [13]에서는 계통 연계점 평균 전압과 Volt-VAR 제어 곡선의 기준 전압 차를 이용하여 인버터의 무효전력을 보상하는 방법을 제안하였다. 또한 [14]에서는 스마트 인버터의 Volt-VAR 및 Volt-Watt 제어를 소개한다. 록업 테이블을 이용하여 연계점 전압의 변동을 모의하고, 연계점의 과전압 및 저전압 상황에 따라 스마트 인버터의 유효 및 무효전력 제어 동작을 확인할 수 있다. 연계점 전압의 변동을 선로 임피던스 변경이 아닌 록업 테이블로 모의하였기 때문에 유효 및 무효전력 제어에 의한 연계점 전압의 안정화 효과는 확인할 수 없다. 배전계통에서의 전압 제어의 안정화 효과는 선로 임피던스의 X/R 비에 영향을 받는다. X/R 비가 높은 경우 무효전력 제어에 의한 전압 안정화 효과가 크지만, 유효전력 제어에 의한 전압 안정화 효과가 낮아진다. 반면에 X/R 비가 낮은 경우에는 전압 안정화 효과가 반대로 나타난다. 따라서 과전압 상황에서 스마트 인버터가 Volt-VAR 제어 및 Volt-Watt 제어를 수행함에도 각 연계점의 X/R 비에 따라 충분한 전압 안정화 효과를 얻지 못하는 경우가 발생한다 [15].

본 논문에서는 스마트 인버터의 Volt-VAR 제어 및 Volt-Watt 제어를 결합하여 연계점 전압을 효과적으로 안정시키는 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 두 가지 제어 기능의 결합을 통해 유도성 무효전력을 최대로 출력함과 동시에 유효전력을 감소시킨다. 본 논문에서는 연계점 전압의 안정화 효과를 확인하기 위해 선로 임피던스를 변경하여 연계점의 과전압 환경을 모의하였다. 제안하는 결합 제어 기능은 시뮬레이션 및 실험을 통해 Volt-VAR 제어 및 Volt-Watt 제어와 비교하여 연계점 전압의 안정화 효과를 검증한다.

2. 스마트 인버터의 전압 제어 기능

2.1 Volt-VAR 제어

스마트 인버터의 Volt-VAR 제어란 능동적으로 무효전력을 조절하여 연계점 전압을 조절하는 계통 지원 기능이다. 그림 2는 Volt-VAR 제어 곡선을 나타내며, 식 (1)은 지령 무효전력(Q_{ref})을 나타낸다. 스마트 인버터는 Volt-VAR 제어 곡선에 따라 지령 무효전력을 제어하여 연계점 전압을 안정화한다. 또한, Volt-VAR 제어에는 무효전력 우선순위 모드와 유효전력 우선순위 모드가 존재한다. 무효전력 우선순위 모드를 적용할 경우 스마트 인버터는 Volt-VAR 제어 곡선에 따라 요구되는 무효전력을 출력하기 위해 유효전력을 조절한다. 유효전력 우선순위 모드를 적용할 경우 스마트 인버터는 유효전력을 감소시키지 않고 무효전력의 최댓값을 조절하여 연계점 전압을 안정화한다.

스마트 인버터는 지령 유효전력이 정격전력의 20% 이상인 조건에서 Volt-VAR 제어를 수행하며, Volt-VAR 제어에 따른 응답 시간은 5초 이내이어야 한다. 표 2는 한국 스마트 그리드 협회에서 정의한 Volt-VAR 제어 곡선의 기본값을 나타낸다.

Volt-VAR 제어 곡선에서 연계점 전압이 V_1 보다 낮은 경우 스마트 인버터는 용량성 무효전력을 최대 무효전력 값인 Q_1 으로 제어하여 연계점 전압을 상승시킨다. 연계점 전압이 V_1 과

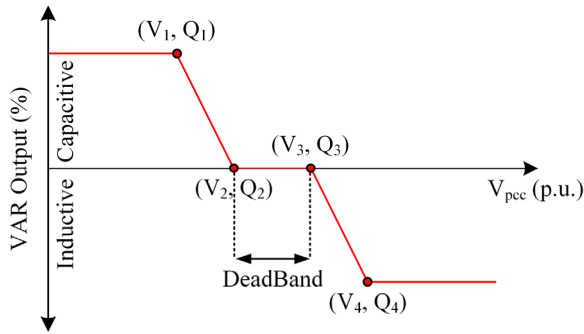


그림 2 Volt-VAR 제어 곡선
Fig. 2 Volt-VAR Curve

$$Q_{ref} = \begin{cases} Q_1 & (V_{pcc} < V_1) \\ \frac{Q_1 - Q_2}{V_1 - V_2} (V_{pcc} - V_2) & (V_1 \leq V_{pcc} < V_2) \\ 0 & (V_2 \leq V_{pcc} < V_3) \\ \frac{Q_1 - Q_2}{V_1 - V_2} (V_{pcc} - V_2) & (V_3 \leq V_{pcc} < V_4) \\ -Q_4 & (V_4 \leq V_{pcc}) \end{cases} \quad (1)$$

표 2 Volt-VAR 제어 곡선 기본값

Table 2 Default value for Volt-VAR Curve

V_{pcc} [p.u.]		Q_{ref} [%]	
V_1	0.92	Q_1	44
V_2	0.98	Q_2	0
V_3	1.02	Q_3	0
V_4	1.08	Q_4	- 44

V_2 사이 영역에 위치할 때 스마트 인버터는 용량성 무효전력을 선형적으로 제어하여 연계점 전압을 상승시킨다. V_2 와 V_3 사이의 영역은 DeadBand라고 한다. 연계점 전압이 DeadBand 영역 내에 위치할 때 스마트 인버터는 무효전력을 0으로 제어한다. 연계점 전압이 상승하여 V_3 와 V_4 사이에 위치할 때, 스마트 인버터는 유도성 무효전력을 선형적으로 제어하여 연계점 전압을 하강시킨다. V_4 이상으로 연계점 전압이 증가할 경우 스마트 인버터는 유도성 무효전력을 $-Q_4$ 로 제어하여 연계점 전압을 감소시킨다. Volt-VAR 제어 곡선의 전압 제어 범위 및 무효전력의 출력량은 인버터 제작사 및 관련 표준에 따라 변경될 수 있다.

2.2 Volt-Watt 제어

스마트 인버터의 Volt-Watt 제어란 연계점 전압에 따라 능동적으로 계통에 공급하는 유효전력을 제어하여 과전압 상황으로부터 연계점 전압을 안정시키는 기능이다. 그림 3은 Volt-Watt 제어 곡선을 나타내며, 식 (2)은 지령 유효전력(P_{ref})을 나타낸다. 스마트 인버터는 Volt-Watt 제어 곡선에 따라 지령 유효전력을 제어한다. 계통 운영자가 설정한 연계점 전압을 초과하면 유효전력의 출력량을 감소시켜 연계점 전압의 상승을 억제할 수 있다. 표 3은 한국 스마트 그리드 협회에서 정의한 Volt-Watt 제어 곡선의 기본값을 나타내며, Volt-Watt 제어의 응답은 5초 이내이어야 한다.

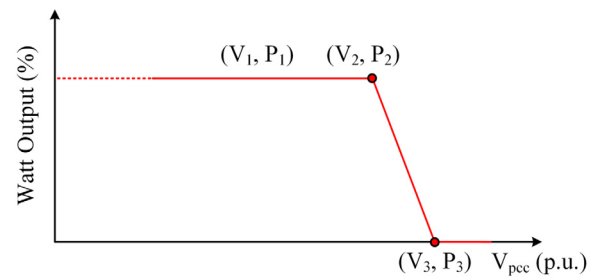


그림 3 Volt-Watt 제어 곡선
Fig. 3 Volt-Watt Curve

$$P_{ref} = \begin{cases} P_1 & (V_{pcc} < V_2) \\ \frac{P_2 - P_3}{V_2 - V_3} (V_{pcc} - V_3) & (V_2 \leq V_{pcc} < V_3) \\ P_3 & (V_3 \leq V_{pcc}) \end{cases} \quad (2)$$

표 3 Volt-Watt 제어 곡선 기본값

Table 3 Default value for Volt-Watt Curve

V_{pcc} [p.u.]		P_{ref} [%]	
V_1	1.0	P_1	P_{rated}
V_2	1.06	P_2	P_{rated}
V_3	1.10	P_3	0

Volt-Watt 제어 곡선에서 연계점 전압이 V_2 이하일 때, 계통 운영자가 초기에 설정한 P_1 값으로 지령 유효전력을 유지한다. 연계점 전압이 증가하여 V_2 와 V_3 의 사이에 위치할 때 스마트 인버터는 지령 유효전력을 선형적으로 감소시켜 연계점 전압을 안정화한다. 연계점 전압이 V_3 이상으로 증가하는 경우 스마트 인버터는 지령 유효전력을 최소 유효전력 값인 P_3 까지 감소시킨다. Volt-VAR 제어와 마찬가지로 Volt-Watt 제어 곡선의 전압 제어 범위 및 지령 유효전력의 출력량은 인버터 제작사 및 관련 표준에 의해 변경될 수 있다.

3. 제안하는 Volt-VAR 및 Volt-Watt 결합 제어

그림 4는 제안하는 Volt-VAR 제어와 Volt-Watt 제어가 결합

된 제어 곡선을 나타낸다. 연계점에 높은 과전압이 발생했을 때, 스마트 인버터는 그림 4의 제어 곡선과 식 (3)에 따라 지령 유효전력 및 무효전력을 제어하여 과전압으로부터 연계점 전압을 안정화한다.

그림 4의 결합 제어 곡선에서 연계점 전압이 V_4 보다 낮을 때 스마트 인버터는 Volt-VAR 제어만을 수행하여 연계점 전압을 안정화한다. 연계점 전압이 V_4 보다 높아지는 경우 스마트 인버터는 Volt-VAR 제어 및 Volt-Watt 결합 제어를 수행한다. 스마트 인버터는 유도성 무효전력을 최대 출력함과 동시에 결합 제어 곡선에 따라 지령 유효전력을 선형적으로 감소시킨다. 연계점 전압이 V_5 이상으로 증가하면 지령 유효전력의 출력량을 최소 출력량까지 감소시킨다. 해당 제어 곡선을 적용하여 연계점 전압에 따라 지령 유효전력 및 무효전력을 제어하여 과전압 상황에서 연계점 전압을 효과적으로 안정화한다.

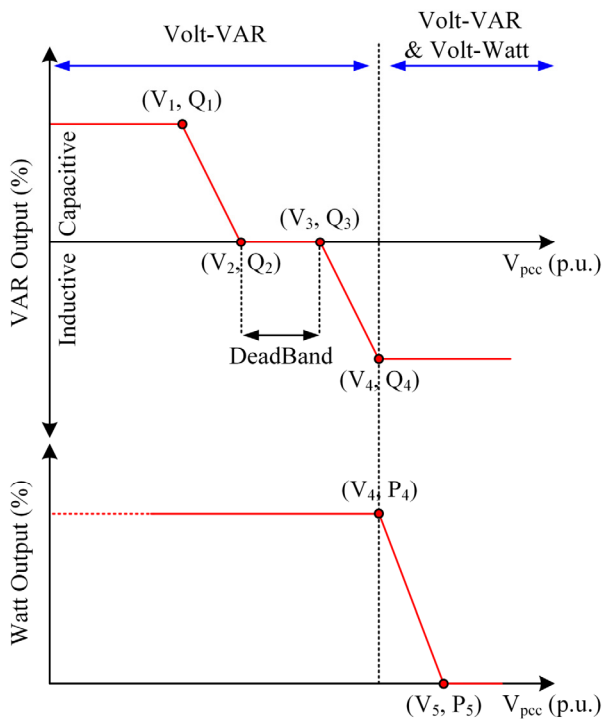


그림 4 Volt-VAR 및 Volt-Watt 결합 제어 곡선
Fig. 4 Combined Volt-VAR and Volt-Watt Curve

$$Q_{ref}, P_{ref} = \begin{cases} Q_1, P_4 & (V_{pcc} < V_1) \\ \frac{Q_1 - Q_2}{V_1 - V_2} (V_{pcc} - V_2), P_4 & (V_1 \leq V_{pcc} < V_2) \\ 0, P_4 & (V_2 \leq V_{pcc} < V_3) \\ \frac{Q_1 - Q_2}{V_1 - V_2} (V_{pcc} - V_2), P_4 & (V_3 \leq V_{pcc} < V_4) \\ -Q_4, \frac{P_4 - P_5}{V_4 - V_5} (V_{pcc} - V_5) & (V_4 \leq V_{pcc} < V_5) \\ -Q_4, P_5 & (V_5 \leq V_{pcc}) \end{cases} \quad (3)$$

Volt-VAR 및 Volt-Watt 결합 제어 기능의 제어 블록도는 그림 5와 같다. 제어 블록도는 Volt-VAR 및 Volt-Watt 결합 제어

곡선을 적용한 계통 지원 기능, PQ 제어기, 전류 제어기로 구성된다. 이때 PQ 제어기 및 전류 제어기에서 사용된 제어기는 PI (Proportional-Integral) 제어기이다. 스마트 인버터는 연계점 전압을 측정하며, 제어 곡선을 기반으로 연계점 전압을 안정화하기 위한 지령 유효전력과 무효전력을 계산한다.

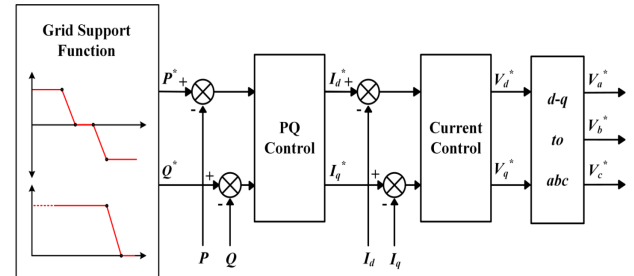


그림 5 Volt-VAR 및 Volt-Watt 결합 제어 기능의 제어 블록도
Fig. 5 Block diagram for combined Volt-VAR and Volt-Watt Curve

계산된 지령 전력과 현재의 전력의 오차는 PQ 제어기의 입력으로 사용되며, 출력은 dq축 지령 전류로 나타난다. 또한, 계통 위상각을 기반으로 좌표 변환한 현재 dq축 전류와 dq축 지령 전류의 오차가 전류 제어기의 입력이 되며, 전류 제어기에서 사용된 PI 제어기는 오차를 0으로 제어한다. 이를 통해 Volt-VAR 및 Volt-Watt 결합 제어 곡선에서 계산한 지령 유효, 무효전력으로 스마트 인버터의 유효, 무효전력과 전류의 출력량을 제어하여 연계점 전압을 안정화한다.

4. 시뮬레이션

제안하는 기능의 전압 안정화 효과를 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 툴은 PSIM을 사용하였으며, 기존 스마트 인버터의 제어 기능인 Volt-VAR 및 Volt-Watt 제어와 두 기능의 결합 제어에 대한 시뮬레이션을 통해 각 제어 기능의 전압 안정화 효과를 비교하였다. 그림 6은 시뮬레이션에 사용한 회로도를 나타낸다. 스마트 인버터의 정격전력은 15 kW, 초기 지령 유효전력은 정격전력의 50 %가 출력되는 상황을 모의하였다. 스마트 인버터의 직류단 전압(V_{DC})은 600 V, 필터 인덕턴스(L_f) 2.5 mH, 계통 선간 전압은 380 Vrms, 계통 주파수는 60 Hz로 설정하였다. 스마트 인버터의 Volt-VAR 제어, Volt-Watt 제어, 그리고, 본 논문에서 제안하는 결합 제어 기능의 전압 안정화 효과를 비교하기 위해 선로 임피던스(Z_L)를 ACSR-160SQ 선종의 X/R 비로 변경하여 연계점 전압의 과전압 환경을 모의하였다. 해당 선종은 한국전력공사의 배전설계 기준 DS-3001에 따라 국내 배전계통에서 사용하는 선종이다. 해당 선종의 X/R 비율은 2.14로 유효전력에 의한 전압 안정화 효과보다 무효전력에 의한 전압 안정화 효과보다 높은 선종에 해당한다.

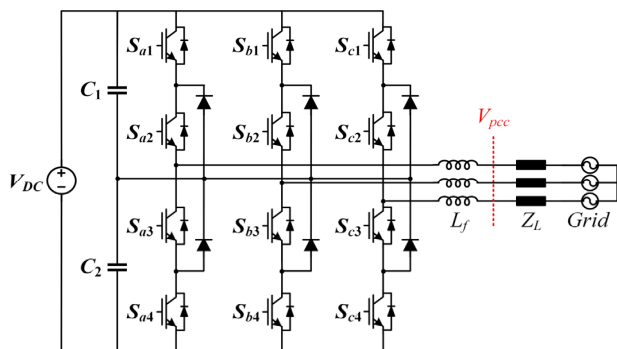


그림 6 제안하는 Volt- VAR 및 Volt- Watt 결합 제어 기능의 검증용 시뮬레이션 회로도

Fig. 6 Simulation circuit to verify the proposed combined Volt- VAR and Volt- Watt control

표 4는 시뮬레이션의 시나리오에 따른 제어 곡선의 파라미터를 나타낸다. 해당 표에서 P_{set} 은 초기 지령 유효전력을 나타낸다. 시뮬레이션에서 초기 지령 유효전력이 50 %인 상황을 모의하였으므로 P_{set} 의 값은 50으로 설정하였다. Case 0에서는 제어 기능을 적용하지 않았으며, Case 1과 Case 2에서는 각각 Volt- VAR 제어 및 Volt- Watt 제어를 적용하였다. Case 1 및 Case 2의 제어 곡선 파라미터는 한국 스마트 그리드 협회에서 정의한 표 2, 표 3의 제어 곡선 기본값을 적용하였다. Case 3부터 Case 5에는 결합 제어 기능을 적용하였으며, 제어 곡선의 기울기의 경사를 변경하여 과전압으로부터 연계점 전압의 안정화 효과를 확인하였다. Case 3에서 Case 5로 변경될수록 제

표 4 시나리오에 따른 제어 곡선 파라미터

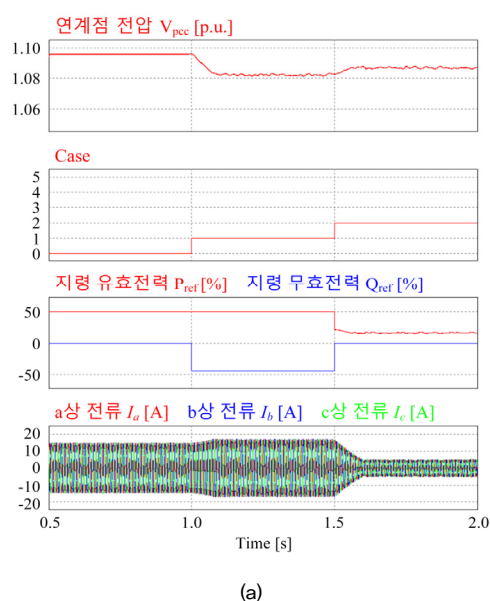
Table 4 Control Curves Parameter for each scenario

Scenario	Function	Control Curve Parameter			
		V_{pcc} [p.u.]		Q_{ref} [%], P_{ref} [%]	
Case 0	미적용	-	-	Q_{ref}	0
Case 1	Volt- VAR Control	V_1	0.92	Q_1	44
		V_2	0.98	Q_2	0
		V_3	1.02	Q_3	0
		V_4	1.08	Q_4	-44
Case 2	Volt- Watt Control	V_1	0.9	P_1	P_{set}
		V_2	1.06	P_2	P_{set}
		V_3	1.10	P_3	0
Case 3	Curve 1	V_1	0.92	Q_1	44
		V_2	0.98		
		V_3	1.02	Q_2	0
		V_4	1.08		
		V_5	1.10		
Case 4	Combined Volt- VAR & Volt- Watt Control	V_1	0.94	Q_3	0
		V_2	0.98		
		V_3	1.02	Q_4	-44
		V_4	1.06		
		V_5	1.08		
Case 5	Curve 3	V_1	0.96	P_4	P_{set}
		V_2	0.98		
		V_3	1.02	P_5	0
		V_4	1.04		
		V_5	1.06		

어 곡선의 기울기가 가파르며, 연계점 전압 값에 따른 지령 유효전력의 감소량이 증가한다. Case 3부터 Case 5까지의 제어 곡선은 각각 Curve 1, 2, 3으로 나타내었다.

그림 7(a)는 스마트 인버터의 기존 전압 제어가 적용되었을 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 선로 임피던스를 조절하여 구축한 과전압 환경에 따라 Case 0에서의 연계점 전압은 1.095 p.u.이다. Case 1에서 Volt- VAR 제어가 적용됨에 따라 스마트 인버터는 -44 %의 유도성 무효전력을 출력하여 연계점 전압은 1.082 p.u.로 감소하였다. Case 2에서는 Volt- Watt 제어가 적용되며 Volt- VAR 제어는 비활성화된다. 스마트 인버터는 지령 무효전력을 0 %로 제어하고, 지령 유효전력을 50 %에서 16.25 %로 감소시킨다. 이에 따라 연계점 전압은 1.087 p.u.로 상승한다. Case 2에서의 연계점 전압은 Case 0에 비해 감소했다. 그러나 ACSR-160SQ 선종의 X/R 비 특성으로 인해 Case 1에서의 전압 안정화 효과보다 Case 2에서의 전압 안정화 효과가 저조하므로 전압이 상승하는 것을 확인할 수 있다.

그림 7(b)는 결합 제어가 적용되었을 때의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Case 3에서 결합 제어가 적용됨에 따라 연계점 전압이 1.095 p.u.에서 1.079 p.u.까지 감소하였다. 결합 제어 곡선에서 전압 목표점인 V_4 이상으로 높아지는 경우 Volt- VAR 제어 및 Volt- Watt 제어가 동시에 적용된다. 그러나 연계점 전압이 Curve 1의 V_4 값인 1.08 p.u.의 경계에 위치함에 따라 결합 제어가 효과적으로 적용되지 않았음을 확인하였다. Case 4에서는 제어 곡선을 Curve 2로 변경시켜 V_4 전압 목표점이 1.06 p.u.로 변경된다. 스마트 인버터는 유도성 무효전력을 최댓값으로 유지하며 지령 유효전력을 감소시킨다. Case 3에서보다 지령 유효전력의 감소량이 더 높아져 41.85 %까지 감소하였으며, 연계점 전압은 1.063 p.u.까지 감소한다. Case 5에서는 Curve 3로 제어 곡선을 변경시켜 V_4 전압 목표점이 1.04 p.u.로 변경된다. 지령 유효전력이 14.89 %로 감소함에 따라 연계점



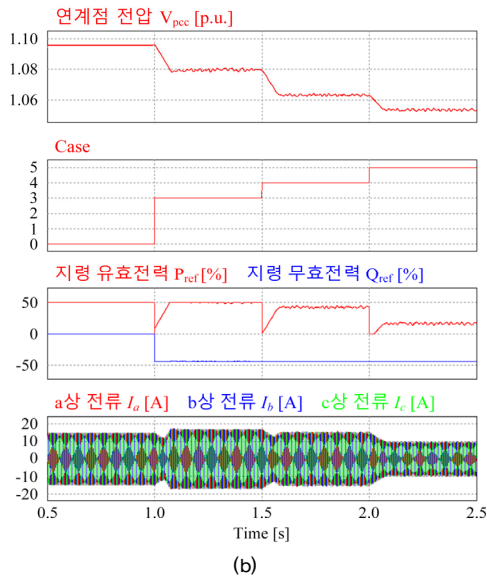


그림 7 시뮬레이션 결과 (a) 스마트 인버터의 기존 전압 제어 (b) Volt-VAR 및 Volt-Watt 결합 제어

Fig. 7 Simulation Results (a) Conventional voltage control of smart inverter (b) The proposed combined Volt-VAR and Volt-Watt control

전압은 1.054 p.u.까지 감소한다. 이를 통해 스마트 인버터의 기존 기능인 Volt-VAR 제어 및 Volt-Watt 제어에 비해 두 기능의 결합 제어를 적용했을 때 연계점 전압이 가장 효과적으로 안정되는 것을 확인하였다. Case 4에서는 제어 곡선을 Curve 2로 변경시켜 V_4 전압 목표점이 1.06 p.u.로 변경된다. 스마트 인버터는 유도성 무효전력을 최댓값으로 유지하며 지령 유효전력을 감소시킨다. Case 3에서보다 지령 유효전력의 감소량이 더 높아져 41.85 %까지 감소하였으며, 연계점 전압은 1.063 p.u.까지 감소한다. Case 5에서는 Curve 3로 제어 곡선을 변경시켜 V_4 전압 목표점이 1.04 p.u.로 변경된다. 지령 유효전력이 14.89 %로 감소함에 따라 연계점 전압은 1.054 p.u.까지 감소한다. 이를 통해 스마트 인버터의 기존 기능인 Volt-VAR 제어 및 Volt-Watt 제어에 비해 두 기능의 결합 제어를 적용했을 때 연계점 전압이 가장 효과적으로 안정되는 것을 확인하였다.

5. 실험 결과

제안하는 Volt-VAR 및 Volt-Watt 결합 제어 방법의 전압 안정화 성능을 검증하기 위하여 그림 8과 같이 실험 환경을 구성하였다. 실험 환경은 정격전력 15 kW의 스마트 인버터, 계통 시뮬레이터, DC 시뮬레이터, 오실로스코프로 구성된다. 스마트 인버터의 DSP는 Texas Instruments社の의 TMS320F28335를 사용하였으며, 스위치 모듈은 3-Level 전용 제품인 SEMIKON社の의 SEMIX305-MLI12E4를 사용하였다. 연계점 전압의 안정화 효과를 비교하기 위해 ACSR-160SQ 선종의 X/R 비율로 선로 임피던스를 조정하여 연계점의 과전압 환경을 구축하였다. 실험의 제어 곡선 파라미터는 표 4에서 초기 지령 유효전력(P_{set})이 50 %인 경우와, 30 % 및 70 %인 경우에 대한 실험을 진행

하였으며, 그 이외의 제어 곡선 파라미터는 표 4의 값과 동일하게 적용하였다.



그림 8 제안하는 Volt-VAR 및 Volt-Watt 결합 제어의 검증을 위한 실험 환경
Fig. 8 Experimental set-up to verify the proposed combined Volt-VAR and Volt-Watt control

그림 9는 초기 지령 유효전력이 50 %일 때의 실험 결과이다. 그림 9(a)는 스마트 인버터의 기존 전압 제어가 적용되었을 때의 실험 결과를 나타낸다. Case 0에서는 제어 기능이 적용되지 않으며, 선로 임피던스 조정을 통해 구축한 과전압 환경으로 인해 연계점 전압은 1.093 p.u.이다. Case 1에서 연계점 전압에 따라 스마트 인버터는 유도성 무효전력을 0 %에서 -44 %로 조정하여 연계점 전압은 1.080 p.u.까지 감소한다. Case 2에서는 Volt-VAR 제어가 해제되고 Volt-Watt 제어가 적용되므로 유도성 무효전력이 0 %로 조정되며, 지령 유효전력은 50 %에서 18.75 %까지 감소한다. 시뮬레이션 상황과 동일하게 ACSR-160SQ 선종 X/R 비의 특성으로 인해 Volt-VAR 제어보다 Volt-Watt 제어의 전압 안정화 효과가 저조하여 연계점 전압이 1.085 p.u.로 상승한다.

그림 9(b)는 결합 제어가 적용되었을 때의 실험 결과를 나타낸다. Volt-VAR 및 Volt-Watt 결합 제어가 적용됨에 따라 스마트 인버터는 유도성 무효전력을 최대로 출력하며 지령 유효전력을 감소시킨다. 연계점 전압이 1.093 p.u.에서 1.079 p.u.까지 감소한다. 시뮬레이션 상황과 동일하게 연계점 전압이 Curve 1의 V_4 의 경계면에 위치한다. Curve 1의 V_4 인 1.08 p.u.보다 낮은 연계점 전압에서는 Volt-VAR 제어만 동작하여 결합 제어가 효과적으로 적용되지 않았음을 확인하였다. Case 4에서는 제어 곡선이 Curve 1에서 Curve 2로 변경됨에 따라 유도성 무효전력은 최대 출력량인 -44 %로 유지하며 지령 유효전력의 감소량이 증가한다. 지령 유효전력은 46.73 %까지 감소하며 연계점 전압은 1.061 p.u.까지 감소한다. Case 5에서는 Curve 3가 적용되며 지령 유효전력은 19.43 %로 감소하여 연계점 전압이 1.052 p.u.까지 감소한다.

결과는 그림 10 및 그림 11과 같다. 또한, 각 시나리오에 따른 연계점 전압 값을 표 5에 나타내었다. Case 0과 같이 초기에 설정한 지령 유효전력이 높을수록 더 높은 과전압 환경이 모의된다. 또한, 초기 지령 유효전력을 30 % 및 70 %으로 설

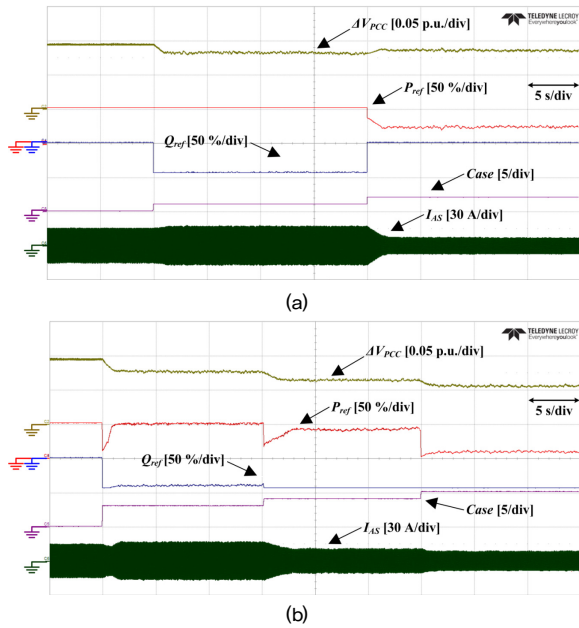


그림 9 P_{set} 이 50 %일 때의 실험 결과 (a) 스마트 인버터의 기존 전압 제어 (b) Volt-VAR 및 Volt-Watt 결합 제어
Fig. 9 Experiment Results of P_{set} at 50 % (a) Conventional voltage control of smart inverter (b) The combined Volt-VAR and Volt-Watt Control

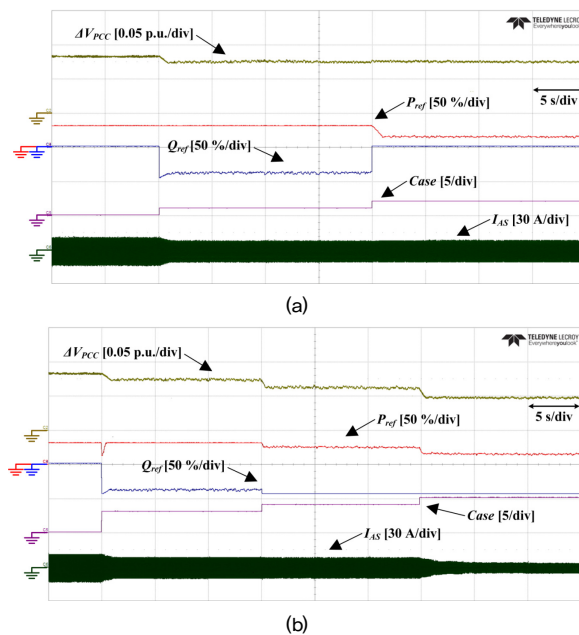


그림 10 P_{set} 이 30 %일 때의 실험 결과 (a) 스마트 인버터의 기존 전압 제어 (b) Volt-VAR 및 Volt-Watt 결합 제어
Fig. 10 Experiment Results of P_{set} at 30 % (a) Conventional voltage control of smart inverter (b) The combined Volt-VAR and Volt-Watt Control

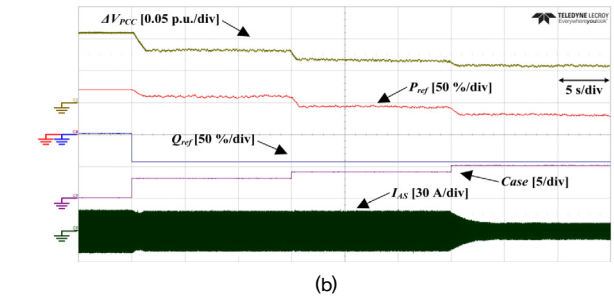
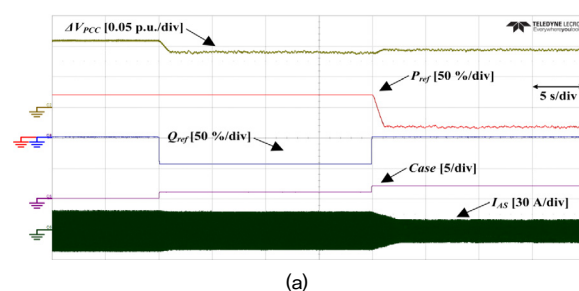


그림 11 P_{set} 이 70 %일 때의 실험 결과 (a) 스마트 인버터의 기존 전압 제어 (b) Volt-VAR 및 Volt-Watt 결합 제어

Fig. 11 Experiment Results of P_{set} at 70 % (a) Conventional voltage control of smart inverter (b) The combined Volt-VAR and Volt-Watt Control

초기 지령 유효전력이 30 %인 경우와 70 %인 경우의 실험

표 5 시나리오에 따른 연계점 전압

Table 5 PCC Voltage for each scenario

P_{set} [%]	Scenario	V_{pcc} [p.u.]
30	Case 0	1.082
	Case 1	1.074
	Case 2	1.076
	Case 3	1.073
	Case 4	1.063
	Case 5	1.049
50	Case 0	1.093
	Case 1	1.080
	Case 2	1.085
	Case 3	1.079
	Case 4	1.061
	Case 5	1.052
70	Case 0	1.105
	Case 1	1.092
	Case 2	1.095
	Case 3	1.084
	Case 4	1.067
	Case 5	1.059

정한 실험에서도 50 %로 설정한 실험 결과와 동일한 경향을 보인다. 그림 9, 10, 11의 실험 결과를 통해 스마트 인버터의 기존 전압 제어 기능을 적용한 Case 1, 2보다, 본 논문에서 제안하는 Volt-VAR 및 Volt-Watt 결합 제어 기능을 적용한 Case 3, 4, 5에서 연계점의 전압 안정화 효과가 향상되는 것을 확인하였다.

6. 결론

본 논문에서는 스마트 인버터의 Volt-VAR 제어와 Volt-Watt 제어를 결합하여 연계점 전압을 안정시키는 방법을 제안하였

다. Volt-VAR 제어는 무효전력을 제어하며, Volt-Watt 제어는 유효전력을 제어한다. Volt-VAR 및 Volt-Watt의 결합 제어는 유도성 무효전력을 최대로 제어함과 동시에 유효전력을 감소시킨다. 두 기법을 결합한 제어 방법은 연계점 전압을 효과적으로 안정화하였다. 제안하는 방법의 성능은 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증되었다.

Acknowledgements

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20206910100160). This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. 20225500000110).

References

- [1] K.-B. Lee, Advanced Power Electronics, munundang, 2019, ISBN 979-11-5692-402-9.
- [2] Ministry of Trade Industry and Energy (MOTIE), "Renewable Energy 3020 Implement Plan," Ministry of Trade Industry and Energy (MOTIE), Dec. 2017.
- [3] S.-H. Lee, J.-Y. Cha, S. Cho., S.-S. Cho, and K.-B. Lee, Smart Inverter, munundang, 2021, ISBN 979-11-5692-584-2.
- [4] T. Gush, C.-H. Kim, S. Admasie, J.-S. Kim, and J.-S. Song, "Optimal Smart Inverter Control for PV and BESS to Improve PV Hosting Capacity of Distribution Networks Using Slime Mould Algorithm," IEEE Access, vol. 9, pp. 52164-52176, 2021.
- [5] D.-Y. Gwon, Y.-H. Choi, and J.-B. Sim, "A Study on Selecting Optimal Volt-VAR Control Curve of Smart Inverter Considering Hosting Capacity and System Loss," Trans. Korean. Inst. Elect. Eng., vol. 71, no. 4, pp. 566-573, Apr. 2022.
- [6] K.-Y. Song, Power System Engineering, Dongilbook, 2020, ISBN 978-89-381-1334-4.
- [7] C.-Y. Maeng, J.-M. Jo, N.-G. Myoung, H.-J. Kim, and S.-S. Cho, "Effect of Volt-Var Characteristic Curve Slope on Voltage Oscillation," Trans. Korean. Inst. Elect. Eng., vol. 71, no. 1, pp. 105-113, Jan. 2022.
- [8] B. Seal, "Common Functions for Smart Inverters," 4th ed., EPRI Palo Alto, CA, USA, EPRI Report 3002008217, Dec. 2016.
- [9] IEEE Standards Association, "IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces," IEEE Standard 1547-2018, 2018.
- [10] Korea Smart Grid Association, "Functions of Smart Inverter for Photovoltaic to Support the Power Grid - Part 1: Requirements and Test Methods for Distribution System," KSGA-025-15-1, 2021.
- [11] S.-H. Lee, S. Cho, and K.-B. Lee, "Hardware Simulator for Frequency-Watt Control in Smart Inverters," Trans. Korean. Inst. Elect. Eng., vol. 70, no. 7, pp. 999-1007, Jul. 2021.
- [12] T. Olowu, A. Inaolaji, A. Sarwat, and S. Paudyal, "Optimal Volt-VAR and Volt-Watt Droop Settings of Smart Inverters," in Proc. IEEE Green Technologies Conf., pp. 1-8, Apr. 2021.
- [13] D.-Y. Gwon, Y.-H. Choi, and J.-B. Sim, "A Study on Voltage Control Method of Smart Inverter using Matlab-OpenDSS Co-Simulation on Distribution Networks," Trans. Korean. Inst. Elect. Eng., vol. 71, no. 4, pp. 566-573, Apr. 2022.
- [14] S.-S. Jeon, Y.-J. Lee, S. Cho, and K.-B. Lee "Distributed Energy Resources Inverters Volt/VAR and Volt/Watt Control for Grid Voltage Support," Trans. Korean Inst. Power Electron. pp.16-18. Aug. 2020.
- [15] Jeff Smith, Matthew J. Reno, "Analysis to Inform CA Grid Integration Rules for PV," EPRI Report #3002008300, Sep 2016.

저자소개

원동호 (Dong-Ho Won)



He received the B.S. degree in Electrical Engineering from Anyang University, Anyang, South Korea, in 2021. He is currently working toward the M.S. degree in Electrical and Computer Engineering from Ajou University, Suwon, South Korea. His research interests include grid-connected systems, and multilevel inverters.

이교범 (Kyo-Beum Lee)



He received the B.S. and M.S. degrees in electrical and electronic engineering from the Ajou University, Suwon, Korea, in 1997 and 1999, respectively. He received the Ph.D. degree in electrical engineering from the Korea University, Seoul, Korea, in 2003. From 2003 to 2006, he was with the Institute of Energy Technology, Aalborg University, Aalborg, Denmark. From 2006 to 2007, he was with the Division of Electronics and Information Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea. In 2007, he joined the Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou University, Suwon, Korea. He is an Editor-in-Chief of the Journal of Power Electronics. He is an associated editor of the IEEE Transactions on Power Electronics. His research interests include electric machine drives, renewable power generations, and electric vehicle applications.