

계통 전압 보조를 위한 분산전원용 인버터의 Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어

전성수*, 이영재*, 조성준*, 이교범*
아주대학교*

Distributed Energy Resources Inverters Volt/VAR and Volt/Watt Control for Grid Voltage Support

Sung-Soo Jeon*, Young Jae Lee*, Sungjoon Cho*, Kyo-Beum Lee*
Ajou University*

ABSTRACT

본 논문은 계통 전압 보조를 위한 분산전원용 인버터의 Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어 방법을 소개한다. 태양광 발전(Photovoltaics, PV), 소수력 발전과 같은 분산전원이 증가함에 따라 양방향 전력 흐름이 일반화 되며, 양방향 전력 흐름으로 인한 PCC (Point of common coupling) 전압 변동이 발생하여 계통에 악영향을 줄 수 있다. 본 논문에서는 전압 변동을 줄여 계통을 보조할 수 있는 분산전원용 인버터의 Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어를 소개하며, 관련 규정 및 제어 조건을 명시하고 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서 론

세계적으로 신재생에너지를 이용한 분산전원의 설치 및 이용에 대한 관심이 증대되며, 국내도 재생에너지 발전을 위한 분산전원 비중이 증가하고 있다. 분산전원은 투자 규모 대비 건설 기간이 짧은 장점이 존재하지만, 태양광 및 소수력 발전과 같은 변동성이 존재하는 분산전원의 경우, 일사량이나 유량과 같은 에너지원에 의해 발전량이 결정된다. 부하의 전력 수요가 급증하거나 발전량이 낮은 시간대에 전력 소비량 보다 높게 생산된 발전전력에 의해 역조류가 발생할 수 있으며, 계통과 분산전원용 인버터가 연계된 PCC (Point of common coupling)의 전압 상승을 야기한다. 이러한, PCC 전압의 상승은 분산전원 발전 용량 제약 및 수용가 전기기기 오작동의 원인이 되며, 계통에 악영향을 준다[1].

일반적으로 PCC 전압 상승 문제를 해결하기 위해 선로전압조정장치(Step Voltage Regulator, SVR), 배전용 변전소 ULTC(Under Load Tap Changer)같은 추가 설비를 사용하지만, 추가 설비의 설치가 필요하다. 분산전원의 Volt/VAR 및 Volt/Watt과 같은 무효 및 유효전력 제어 방법은 출력 전력을 직접적으로 제어하여 PCC 전압 전압 조정 및 배전 계통의 전력 용량을 증가시킬 수 있다. 또한, 분산전원과 연계된 인버터에서 전력 제어를 수행하므로 응답속도가 빠르고 비용적인 측면에서 유리하다. 현재 대부분의 계통연계규정에서는 분산전원용 인버터에 능동적인 무효 및 유효전력 공급 능력을 요구하고 있으며, 분산전원들은 요구사항을 반영하여 설계되고 있다.

본 논문에서는 계통 전압 변동 완화를 위한 분산전원용 인버터의 Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어 곡선 및 제어 방법을 소개한다. 본 논문에서 소개하는 Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어

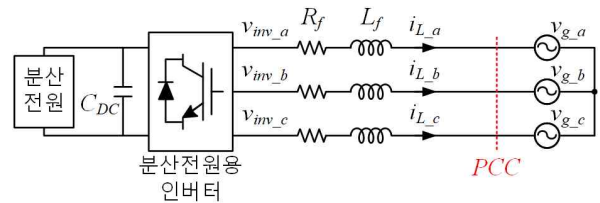


그림 1 분산전원용 인버터 모델
Fig. 1 Distributed Energy Resources Inverters model

기능을 통한 유효전력 제어 조건은 Common Functions for Smart Inverters[2]에 명시되어 있으며, Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어 결과는 PSIM 시뮬레이션을 사용하여 검증하였다.

2. 분산전원용 인버터 모델링 및 PQ 제어

2.1 분산전원용 인버터 모델링

그림 1은 분산전원용 인버터 모델을 나타낸다. 분산전원용 인버터 모델은 분산전원, 직류단 커패시터(C_{DC}) 출력 측 필터 L_f, R_f, 3상 계통으로 구성된다. 유효 및 무효전력은 abc축 계통 전류(i_{L,abc})에 비례하며, PCC 전압은 분산전원용 인버터에 의해 출력되는 abc축 전압(v_{inv,abc})에 의해 변동됨

2.2 분산전원용 인버터 PQ 제어

그림 2는 분산전원용 인버터의 PQ 제어 블록도를 나타낸다. PQ 제어 블록도는 유효 전력 및 무효 전력을 제어하기 위한 PQ 제어기와 하위 제어기인 전류 제어기로 구성되며, 전류제

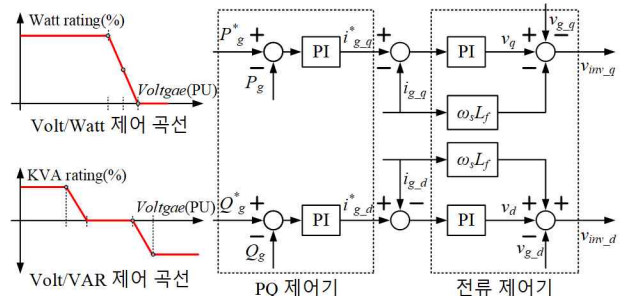


그림 2 분산전원용 인버터 PQ 제어 블록도
Fig. 2 Distributed Energy Resources Inverters PQ control block diagram

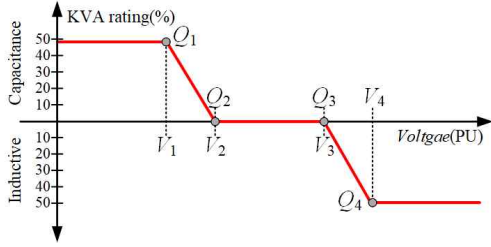


그림 3 Volt/VAR 제어 곡선
Fig. 3 Volt/VAR control curve

여기의 출력 전압($v_{inv,d}$, $v_{inv,q}$)을 통해 분산전원용 인버터를 동작시킨다^[3]. PQ 제어기 및 전류 제어기는 모두 비례-적분(Proportional Integral, PI)를 사용하여 유효 및 무효전력 오차, d - q 축 전류의 오차를 0으로 제어하며, 유효 및 무효전력 지령에 맞게 출력을 제어한다. 분산전원용 인버터의 Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어 시, PCC 전압에 따라 유효 및 무효전력 지령이 Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어 곡선에 따라 변하게 되며, PQ 제어를 수행한다.

3. 분산전원용 인버터 Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어

3.1 Volt/VAR 제어

Volt/VAR 제어는 PCC 전압을 측정하여 PCC 전압에 따라 무효전력을 출력한다. 그림 3은 Volt/VAR 제어 곡선을 나타내며, Volt/VAR 제어를 통해 출력하는 무효전력은 식 (1)과 같이 나타낸다. PCC 전압이 규정전압보다 큰 경우, 유도성 무효전력을 출력할 수 있도록 인버터를 제어하며, PCC 전압이 규정전압 범위 내에 위치하면 무효전력은 출력되지 않는다. PCC 전압이 규정전압보다 작은 경우, 용량성 무효전력을 출력하여 PCC 전압을 상승시킨다. 곡선의 제어 범위 및 무효전력 출력량은 인버터 제작사 및 관련 표준에 의해 변경 될 수 있다.

표 1은 시뮬레이션에 사용한 Volt/VAR 제어 곡선 설정 값을 나타낸다.

$$Q_{ref} = \begin{cases} Q & V < V_1 \\ \frac{Q_1 - Q_2}{V_2 - V_1} (V - V_2) & V_1 \leq V < V_2 \\ 0 & V_2 \leq V < V_3 \\ \frac{Q_3 - Q_4}{V_3 - V_4} (V - V_3) & V_3 \leq V < V_4 \\ -Q & V_4 \leq V \end{cases} \quad (1)$$

3.2 Volt/Watt 제어

Volt/Watt 제어 또한 PCC 전압을 측정하여 PCC 전압 크기에 따라 유효전력 출력을 제어한다. 그림 4는 Volt/Watt 제어 곡선을 나타낸다. 식 (2)는 전압에 따른 유효전력 제어량을 나타낸다. 역조류로 인한 PCC 전압 상승이 매우 큰 경우, 인버터의 유효전력 출력을 감소시킴으로써 PCC 전압 상승을 감소시킨다. Volt/VAR 제어 기능과 동일하게 Volt/Watt 제어 곡선의 제어 범위 및 유효전력 제어량은 인버터 제작사 및 관련 표준에 의해 변경될 수 있다.

표 2는 시뮬레이션에 사용된 Volt/Watt 제어 곡선 설정 값을 나타낸다.

표 1 Volt/VAR 제어 곡선 설정 값

Table 1 Volt/VAR control curve setting value

전압 목표점	전압	무효전력 목표점	무효전력
V1	94.0%	Q1	48.4%
V2	98.0%	Q2	0
V3	102.0%	Q3	0
V4	106.0%	Q4	-48.4%

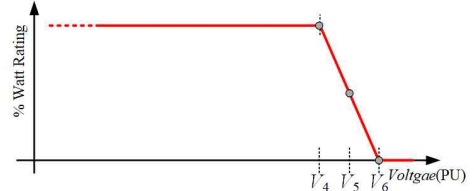


그림 4 Volt/VAR 제어 곡선
Fig. 4 Volt/VAR control curve

$$P_{ref} = \begin{cases} P & V < V_4 \\ \frac{P_1 - P_3}{V_4 - V_6} (V - V_6) & V_4 \leq V < V_6 \\ 0 & V_6 \leq V \end{cases} \quad (2)$$

표 2 Volt/Watt 제어 곡선 설정 값

Table 2 Volt/Watt control curve setting value

전압 목표점	전압	유효전력 목표점	유효전력
V4	106.0%	P1	100.0%
V5	108.0%	P2	50.0%
V6	110.0%	P3	0.0%

그림 5는 Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어 곡선을 나타낸다. Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어는 상호작용을 하며, 유효전력 100%를 출력하는 경우, Volt/VAR 제어 시 무효전력을 출력할 수 없다. Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어는 인버터의 정격을 고려하여 수행되며, 전압에 관계없이 유효전력 출력이 무효전력 출력보다 우선시 된다. 각 제어 곡선의 전압 범위에 따라 PCC 전압 106% 전까지는 Volt/VAR 제어를 수행하고 PCC 전압 106% 이후에는 추가적으로 Volt/Watt 제어를 수행한다.

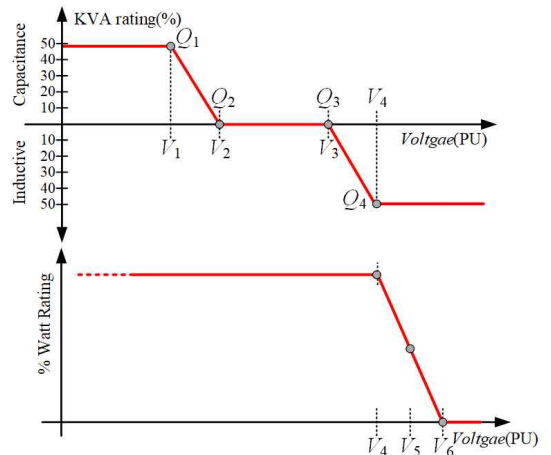


그림 5 Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어 곡선
Fig. 5 Volt/VAR and Volt/Watt control curve

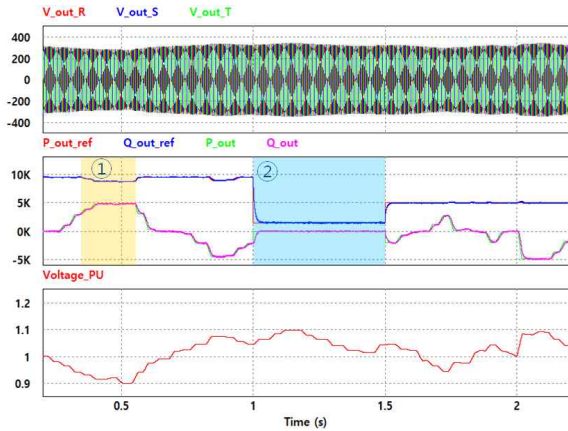


그림 6 Volt/VAR 제어 시뮬레이션 결과
Fig. 6 Volt/VAR control simulation results

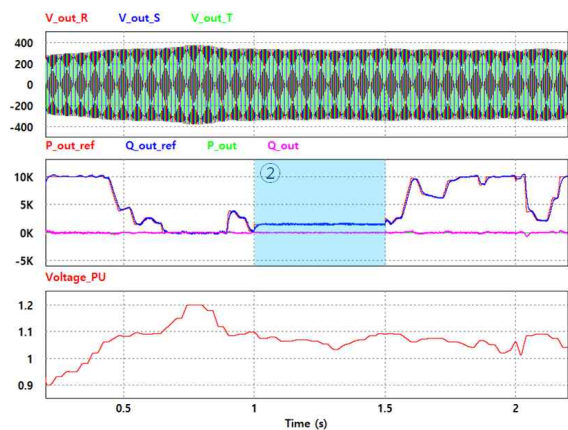


그림 7 Volt/Watt 제어 시뮬레이션 결과
Fig. 7 Volt/Watt control simulation results

4. 시뮬레이션 결과

PSIM 시뮬레이션을 통해 Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 파라미터는 표 3과 같다. 계통 PCC 전압의 변동을 모의하기 위해 록업 테이블을 통해 계통 전압을 변경하였다. 계통 선간전압 380 Vrms, 계통 주파수 60 Hz 조건에서 분산전원의 유효 및 무효전력을 Volt/VAR 제어 곡선에 따라 제어하였으며, 분산전원용 인버터의 유효전력 출력이 2 kW 이상인 경우에만 Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어를 활성화 하였다.

그림 6은 Volt/VAR 제어 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 유효전력 지령은 9.5 kW에서 1.5 kW, 1.5 kW에서 5 kW로 각각 1초, 1.5초에 변경하였다. 유효전력 및 무효전력 지령을 추종하여 인버터의 출력을 제어한다. ①의 경우, 인버터의 정격을 고려한 Volt/VAR 제어를 위해 유효전력 출력을 감소시켜 무효전력을 제어 곡선대로 출력하였다. ②의 경우, 유효전력 출력이 충분하지 않으므로 Volt/VAR 제어는 비활성화 되었다. 그림 7은 Volt/Watt 제어 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 유효전력 지령은 10 kW에서 1.5 kW, 1.5 kW에서 5 kW로 각각 1초, 1.5초에 변경하였다. 마찬가지로, 유효전력 지령을 추종하여 인버터의 출력을 제어한다. ②의 경우, 유효전력 출력이 충분하지 않으므로 Volt/Watt 제어는 비활성화 되었다.

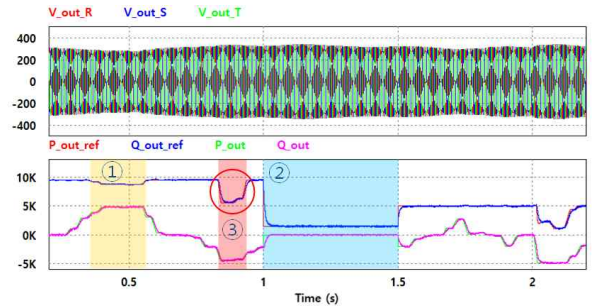


그림 8 Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어 시뮬레이션 결과
Fig. 8 Volt/VAR and Volt/Watt control simulation results

표 3 시뮬레이션 파라미터
Table 3 Simulation Parameters

계통 선간전압	380 V	정격 출력	10 kW
계통 주파수	60 Hz	스위칭 주파수	10 kHz
선로 저항	0.03 Ω	제어 주기	100 μs
선로 임피던스	0.004 mH	직류단 커패시터	2000 μF

그림 8은 Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 계통 전압 변동 시나리오와 유효전력 지령 변동 조건은 그림 6과 동일하다. ①과 ②의 경우, 각각 정격을 고려한 Volt/VAR 제어, Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어의 비활성화 상태를 나타낸다. PCC 전압이 Volt/Watt 제어 범위인 106%를 넘은 경우, 유효전력 지령은 Volt/Watt 제어 곡선에 의해 추가적으로 감소하며, 전압 변동이 큰 범위에서의 계통 전압을 보조할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 계통과 인버터가 연계된 PCC 전압을 보조하기 위한 분산전원용 인버터의 Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어 시뮬레이션을 수행하였다. 각 제어 기능의 조건은 관련 규정을 참고하였으며, 분산전원의 유효전력 출력 상황을 고려하였다. 또한, Volt/VAR 및 Volt/Watt 제어 기능의 상호관계에 대해서 분석하고 시뮬레이션을 통해서 타당성을 검증하였다.

이 논문은 2020년도 한국전력공사의 재원으로 전력연구원의 연구비지원(R19DA09)에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

- [1] R. Tonkoski, L. Lopes, and T. El-Fouly, "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.
- [2] B. Seal, *Common Functions for Smart Inverters: Fourth Edition*, EPRI, Inc. pp. 61-76, Dec. 2016.
- [3] Y. Cho and K.-B Lee, "Virtual-Flux-Based Predictive Direct Power Control of Three-Phase PWM Rectifiers With Fast Dynamic Response," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, No. 4, pp. 3348-3359, Apr. 2016.