

분산전원의 무효전력 보상을 통한 PCC 전압 변동 제어

한상훈, 임종웅, 한유, 조영훈, 최규하
건국대학교 전력전자연구소

Control of PCC Voltage Variation by Reactive Power Compensation of Distributed Source

Sanghun Han, Jong ung Lim, Yu Han, Younghoon Cho, Gyu ha Choe
Power Electronics Lab. Konkuk Univ.

ABSTRACT

Recently as distributed source has increased, the distribution system has changed from unidirectional power flow to bi directional power flow. This power flow causes the PCC voltage variation, which can adversely affect voltage sensitive loads. In this paper, the relation between the active power, reactive power and PCC voltage of the distributed source is analyzed, and the PCC voltage control scheme by reactive power compensation is proposed in the distributed source itself. In addition, limitations and conditions according to the standard for interconnecting distributed resources are specified and verified through simulation.

1. 서론

한전에서 발표한 전력 통계^[1]에 따르면 신재생에너지의 발전 설비 용량 및 발전 전력량은 꾸준히 증가하고 있다. 신재생 에너지는 분산전원의 형태로 계통에 연계되어 양방향 전력교류를 만들며, 과거에 만들어진 장비의 안전 문제와 전력 품질에 악영향을 야기한다. 그 중 하나의 예로 과거에는 변전소로부터 선로말단까지 전압 강하만 나타났지만, 분산전원 하에서는 각 계통 연계점(PCC, Point of Common Coupling)에서 전압 상승이 발생할 수 있다. 전압 변동을 제어하기 위한 방법으로는 중앙에서 계통을 분석하여 연계된 각각의 분산전원으로 지령을 하달하는 중앙 제어 방법과 각 분산전원이 직접 문제를 제어하는 분산 제어 방법이 있으며^[2], 본 논문에서는 후자를 다루고자 한다. 본 논문에서는 IoT를 통해 PCC에서의 전압, 부하 등의 정보를 분산전원이 전달받을 수 있음을 가정하였다.

2. 제안된 PCC 전압 변동 제어 방법

2.1. 분산전원 모델링

분산전원을 포함한 배전 계통을 간략히 나타내면 그림 1과 같다. 그림 1의 V_{grid} 는 실효값 220V의 안정된 전압으로 고정되어 있음을 가정한다. 그림의 y_i 는 계통과 PCC 사이 선로 어드미턴스이며, PCC에서 부하로의 선로 임피던스는 부하에 포함시켜 하나의 부하로 간주하였다. 분산전원과 PCC 사이 선로 임피던스는 계산과정에서 고려하지 않으므로 생략하였다. 분산전원에서 출력되는 전력 S_D 와 부하 S_L 의 차이만큼 계통과 PCC 사이 S_G 의 전력이 전달되며, 이러한 전력의 흐름과 선로 임피던스로 인해 PCC 전압이 변동하게 된다. 이를 해석하고자 수식으로 전개하면 식 (1)~(3)과 같다^[3]. 이 때 분산전원이 PCC 전압을 PLL한다고 가정하여 PCC 전압의 위상을 기준으로 식을 전개하였다.

$$\begin{aligned} \bar{S}_G = \bar{S}_D - \bar{S}_L &= \frac{1}{2} \times \bar{V}_{PCC} \times \{(\bar{V}_{PCC} - \bar{V}_{grid})\bar{y}_i\}^* \\ (\bar{V}_{PCC} = mV_{PCC}, \bar{V}_{grid} = V_{grid} \angle \delta, \bar{y}_i = y_i \angle \gamma) \end{aligned} \quad (1)$$

$$P_G = P_D - P_L = \frac{1}{2} \{m^2 V_{grid}^2 y_i \cos \gamma - m V_{grid}^2 y_i \cos(\delta + \gamma)\} \quad (2)$$

$$Q_G = Q_D - Q_L = \frac{1}{2} \{-m^2 V_{grid}^2 y_i \sin \gamma + m V_{grid}^2 y_i \sin(\delta + \gamma)\} \quad (3)$$

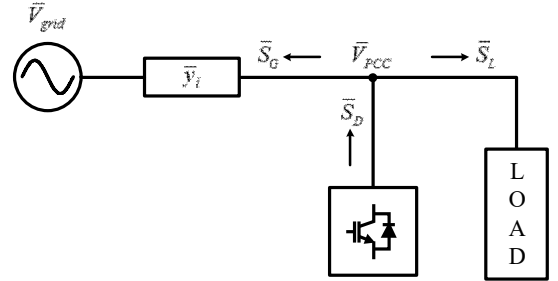


그림 1 분산전원과 부하를 포함한 배전계통
Fig. 1 Distribution system including distributed source and load

2.2. PCC 전압 변동 제어를 위한 무효전력 계산

분산형전원 배전계통 연계기술 기준^[4]에서는 500kW 미만의 분산전원을 계통에 연계 시 전압의 위상각 차를 20° 미만으로 제한하였다. 이러한 제한 내에서 $\cos \delta \approx 1, \sin \delta \approx \delta(rad)$ 를 이용하여 식 (2), (3)을 식 (4), (5)와 같이 간략화 할 수 있다. V_{PCC} 와 V_{grid} 의 크기가 같다면 $m = 1$ 이며, $S_D^2 = P_D^2 + Q_D^2$ 을 이용하여 δ 를 구하면 식 (6)~(8)과 같다. S_D 는 선로 임피던스와 무관하게 분산전원의 출력전류와 V_{PCC} 를 통해 계산할 수 있다.

$$P_D = \frac{1}{2} \{m^2 V_{grid}^2 y_i \cos \gamma - m V_{grid}^2 y_i (\cos \gamma - \delta \sin \gamma)\} + P_L \quad (4)$$

$$Q_D = \frac{1}{2} \{-m^2 V_{grid}^2 y_i \sin \gamma + m V_{grid}^2 y_i (\delta \cos \gamma + \sin \gamma)\} + Q_L \quad (5)$$

$$P_D = p_1 \delta + P_L \quad (p_1 = 0.5 V_{grid}^2 y_i \sin \gamma) \quad (6)$$

$$Q_D = q_1 \delta + Q_L \quad (q_1 = 0.5 V_{grid}^2 y_i \cos \gamma) \quad (7)$$

$$\delta = \frac{-b_1 \pm \sqrt{b_1^2 - a_1 c_1}}{a_1} \quad (8)$$

$$(a_1 = p_1^2 + q_1^2, b_1 = p_1 P_L + q_1 Q_L, c_1 = P_L^2 + Q_L^2 - S_D^2)$$

S_D 가 S_L 보다 큰 경우 c_1 는 음수가 되고, δ 는 음과 양의 실수 근을 가진다. γ 는 저항과 인덕터로 이루어진 어드미턴스의 위상이므로 $-\pi/2 \leq \gamma \leq 0$ 이며, $\sin \gamma$ 는 음수가 된다. S_D 가 S_L 보다 크고, $S_G > 0$ 인 경우라면 P_G 는 양의 값이 되어야하므로 δ 는 2개의 근 중 음이 되는 하나의 근으로 결정된다. δ 가 결정된다면 V_{PCC} 와 V_{grid} 의 크기가 같도록 하는 P_D 와 Q_D 를 계산

할 수 있다. 만약 S_G 의 부호를 확신할 수 없는 경우라면, 2개의 δ 로 각각 식을 전개하여 계산된 역률을 비교하여 더 큰 값의 역률을 가지는 δ 를 선정하면 된다.

S_L 이 S_D 보다 큰 경우에는 c_1 가 양수이므로 δ 가 복소수가 될 수 있다. 위상은 복소수일 수 없으므로 이는 사용할 수 없는 근이며, 주어진 조건에서는 V_{PCC} 와 V_{grid} 의 크기를 같게 할 수 없다. 만약 δ 가 복소수가 아니라면 S_D 가 S_L 보다 큰 경우와 동일하게 역률 비교를 통하여 δ 를 결정한다.

계산을 통해 구한 값들은 분산전원 연계기술 기준과 비교 검증이 필요하다. δ 의 크기가 20° 보다 크거나, 역률이 0.9보다 작다면 식 (6)~(8)을 통해 구한 값을 그대로 사용할 수 없다. 이러한 경우에는 V_{PCC} 와 V_{grid} 의 크기 차이를 허용하여 새로운 값을 구한다. m 이 1이 아닐 경우에는 식 (9)~(11)과 같이 δ 를 구할 수 있으며, 모든 기준을 만족할 때까지 m 을 증가 혹은 감소시켜 δ 를 구한다. 이는 δ 가 복소수인 경우에도 적용된다. m 또한 연계기술 기준을 따라 분산전원의 용량이 500kW 미만일 경우 10%의 전압차 이내에서 증가 혹은 감소시켜야 한다.

$$P_D = mp_1\delta + p_m \quad (p_m = m^2q_1 - mq_1 + P_L) \quad (9)$$

$$Q_D = mq_1\delta + q_m \quad (q_m = -m^2p_1 + mp_1 + Q_L) \quad (10)$$

$$\delta = \frac{-b_m \pm \sqrt{b_m^2 - a_m c_m}}{a_m} \quad (11)$$

$$(a_m = m^2(p_m^2 + q_m^2), b_m = m(p_1 p_m + q_1 q_m), c_m = p_m^2 + q_m^2 - S_D^2)$$

3. 시뮬레이션

3.1. 시뮬레이션 구성

시뮬레이션은 태양광 인버터를 예로 들어 진행하였으며, 그림 2와 같이 제어기를 구현하였다. DC link 전압 제어기의 출력은 전류 최댓값 지령이며, 제어기와 인버터가 이상적이라면 이는 실제 출력 전류의 최댓값과 같다. 따라서 무효전력 계산 블록에서는 전압 제어기의 출력과 V_{PCC} 의 값을 통해 S_D 를 계산할 수 있으며, 최종적으로는 계산된 P_D 와 Q_D 를 출력하도록 전류 지령의 위상을 조절한다.

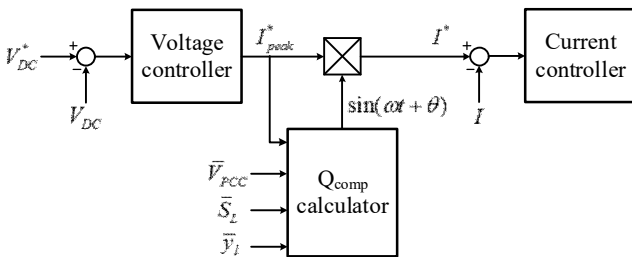


그림 2 무효전력 계산 블록을 포함한 제어기
Fig. 2 Controller with reactive power calculation block

3.2. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 S_D 가 일정할 때 부하를 변동하여 S_D 가 S_L 보다 큰 경우(Load 1)와 S_D 가 S_L 보다 작은 경우(Load 2)의 보상 전후 PCC 전압을 비교하였으며, 보상을 위한 무효전력을 확인하였다. 그림 3은 시뮬레이션 결과이며, 시뮬레이션의 제정수는 표 1에 정리하였다. 0.5s~1.5s 구간은 S_D 가 S_L 보다 큰 경우에 해당하며, 1.0s 이전에는 보상을 하지 않아 V_{PCC} 의 실효값은 224.74V까지 상승한다. 1.0s부터 보상을 진행하였을 때 V_{PCC} 의 실효값은 219.59V로 계통 전압에 근사하고, δ 는 4.74° , 역률은 0.91이므로 분산전원 연계기술 기준을 모두 만족한다. 1.5s~2.5s 구간을 살펴보면 S_D 가 S_L 보다 작은 경우에 해당하며, 2.0s 이전의 보상 전 구간에서 V_{PCC} 의 실효값은 213.88V이다. 2.0s부터 보상을 진행할 경우 Load 2 조건에서는 V_{PCC} 와 V_{grid} 의 크기를 같게 할 수 없기 때문에 m 을 감소시켜 보상이었다. 보상 후 V_{PCC} 의 실효값은 218.25V 이며, δ 는 0.19° , 역률은

0.92로 기준을 모두 만족한다. 경우에 따른 무효전력 Q_D 는 그림 3(b)와 같다.

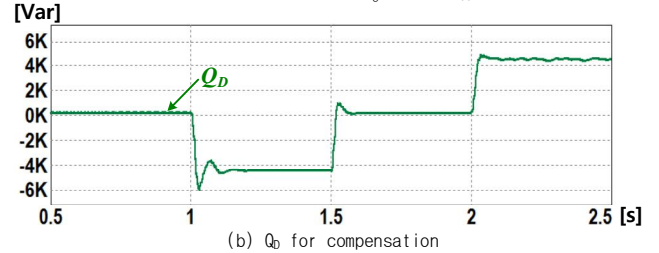
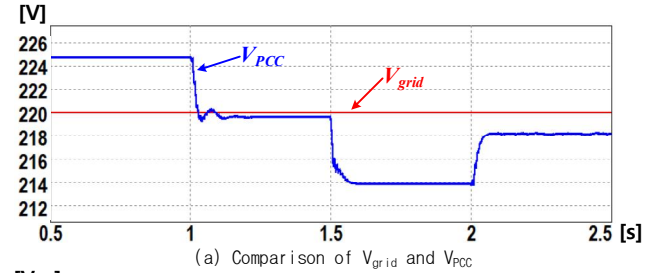


그림 3 제안된 무효전력 보상 방법을 적용한 시뮬레이션 결과
Fig. 3 Simulation result using the proposed reactive power compensation method

표 1 시뮬레이션 제정수
Table 1 Simulation parameters

V_{grid}	220 V
y_i	$1.06 \angle -32^\circ S$
S_D	10kVA
Load1 (0.5s ~ 1.5s)	$8.07 \angle 25.84^\circ \Omega$
Load2 (1.5s ~ 2.5s)	$4.03 \angle 25.84^\circ \Omega$

4. 결론

본 논문에서는 분산전원의 출력과 PCC 전압을 수식적으로 분석하여 무효전력 보상을 통한 PCC 전압 변동 제어 방법을 제안하였으며, 이를 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 제안한 무효전력 보상법은 PCC 전압의 크기를 가능한 조건 내에서 항상 계통과 같도록 유지할 수 있으며, 역률뿐만 아닌 위상차까지 고려한다는 점에서 기존의 무효전력 보상법과 차이점을 가진다. 제안된 제어법은 전압 변동에 민감한 부하가 연결된 분산전원에 적용하면 신뢰성을 확보할 수 있고, 기존의 분산전원들의 위상을 고려하지 않은 제어에 의한 악영향을 감소시킬 수 있을 것이다.

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No.20162220200010) 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20174030201660)

참고 문헌

- [1] 한국전력공사, "전력통계속보(제461호)", 2017.
- [2] K. Turitsyn, P. Sulc, S. Backhaus, and M. Chertkov, "Options for Control of Reactive Power by Distributed Photovoltaic Generators", Proceedings of the IEEE, 2011.
- [3] Charles A. Gross, "Power System Analysis: Second Edition", John Wiley & Sons, Inc., pp 255-267, 1986.
- [4] 한국전력공사, "분산형전원 배전계통 연계기술 기준", 2017.