

부하전압 안정화 기능을 갖는 계통 연계형 분산전원시스템의 설계

이성룡, 전칠환, 이수원, 고성훈
 군산대학교 전자정보공학부

Design of Grid-Interactive Distributed Generation System with Voltage Stabilization

Seong-Ryong Lee, Chil-Hwan Jeon, Su-Won Lee, Sung-Hun Ko
 School of Electronic & Information Eng. Kunsan National University

Abstract - 본 논문은 우리나라와 같은 안정된 계통(Strong Grid)에서 계통전압이 한전배전계통 공급기준의 전압변동률 $\pm 6\%$ ($220V \pm 13V$) 이내에서 변화할 경우 계통 역률이 0.9 이상이고 부하전압의 변동이 거의 없도록 계통 연계형 전압제어형 전압원인버터(VCVSI)에 적합한 최대 전력제어각과 각각 최적의 시스템 용량(계통, 디커플링 인덕터, VCVSI)을 구하고, 유효전력을 100% 공급하기 위한 파라미터 설계 방법을 제시하였다.

1. 서 론

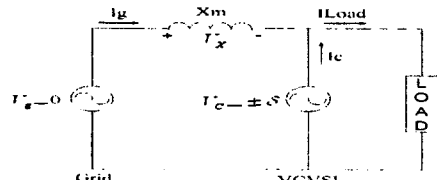
산업 및 정보통신의 발전과 소득수준의 향상으로 문화적 편리성에 대한 소비자들의 요구 증대에 따른 전형적인 비선형 부하의 대량적 확산은 전력수요의 증가와 계통의 전력품질(Power Quality)의 저하를 초래하였다. 이러한 계통의 급속한 변화는 새로운 발전시스템의 개발과 적용에 대한 기대효과를 가중케 하였으며, 계통의 전력품질 개선을 위한 보상 시스템의 개발 또한 촉진하게 되었다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안의 하나로 분산전원시스템(Distributed Generation System)의 관심이 국내외적으로 높아지고 있다.[1] 계통에서 요구되는 계통 연계형 분산전원 시스템의 주 기능은 부하 변동에 관계없이 항상 일정전압을 유지할 수 있는 전압 안정화 기능과 계통 전원의 고장 시에도 부하에 전력을 공급할 수 있는 UPS(Uninterruptible Power Supply) 기능, 신-재생 에너지를 이용하여 부하조건에 따라 전력을 분담 할 수 있는 DSM(Demand Side Management) 기능 그리고 계통의 역률 향상 및 고조파를 저감시킬 수 있는 전력품질 개선 기능 등을 들 수 있다. 이러한 기능을 수행하기 위해서는 양방향 인버터가 필수적이며, 전력 제어방법에 따라 전압제어형 인버터(VCVSI; Voltage Controlled Voltage Source Inverter)와 전류제어형 인버터(CCVSI; Current Controlled Voltage Source Inverter)로 분류할 수 있다. 일반적으로 VCVSI의 장점은 CCVSI의 단점이 되는 반면, CCVSI의 장점은 VCVSI의 단점이 되는 특징이 있다. 부하전압의 안정화와 무정전 전원공급을 위해서는 전압 제어형 전압원 인버터(VCVSI ; Voltage controlled Voltage Source Inverter)를 사용하여야 한다.

이들 경우 계통과 VCVSI의 과도한 전력 흐름을 억제하기 위해 디커플링 인덕터를 사용하여 계통전압과 VCVSI 전압을 분리해야 한다. 전력의 흐름은 VCVSI의 출력전압과 계통전압의 위상차를 제어함으로써 제어할 수 있다. 일반적으로 분산전원 시스템은 VCVSI의 전력제어각을 15° 에서 30° 로 제한하는 최대 전력제어각으로 제한한다. 계통과 VCVSI의 위상차인 전력제어각의 범위 및 계통 전압의 크기에 따라 각각의 시스템 용량(계통, 디커플링 인덕터, VCVSI)과 역률이 결정된다. 따라서 계통의 역률과 시스템의 용량을 모두 고려하여 최대전력제어각을 선정해야 한다. 본 논문은 우리나라와 같은 안정된 계통(Strong Grid)에서 계통전압이 한전 공급 기준치인 $220V \pm 13V$ 에서 변화할 경우 계통 역률이 0.9 이상이고 부하전압의 변동이 거의 없도록 계통연계형 VCVSI에 적합한 최대 전력제어각과 각각의 시스템 용량(계통, 디커플링 인덕터, VCVSI)을 구하고, 유효전력을 100% 공급하기 위한 파라미터 설계 방법을 제시하였다.

2. 계통연계형 분산전원 시스템

2.1 전압제어형 전압원 인버터(VCVSI)

그림 1은 계통연계형 VCVSI의 등가회로이며, VCVSI의 출력전압은 출력 필터에 의해 이상적인 정현파로 가정하고 해석한다. 부하와 병렬 연결된 VCVSI의 경우, 스스로 정현전압을 출력할 수 있는 PWM 제어가 가능하기



<그림 1> VCVSI를 적용한 분산전원시스템의 등가회로

때문에 원하는 전압의 크기와 위상을 부하에 공급할 수 있다. VCVSI는 계통과의 과도한 전력흐름을 방지하기 위해 디커플링 인덕터(Xm)로 분리되어 있다. 부하의 전압은 VCVSI 전압(Vc)에 의해 결정되어지며, 계통, 부하 및 인버터의 전력흐름은 계통 전압과 VCVSI 전압과의 위상차에 의해 결정되어 진다. 즉, 위상차에 따라서 전력흐름은 계통에서 부하 또는 인버터로, 인버터에서 부하 또는 계통으로 전달되게 된다. 따라서 시스템은 전압 안정화를 위해 VCVSI 전압을 항상 일정전압으로 유지하면서 부하조건 및 계통의 상태에 따라 위상차를 제어한다. VCVSI에서 부하 또는 계통으로 전력이 공급되는 경우를 정방향이고, 디커플링 인덕터가 순수 인덕턴스 성분이라고 가정하면, 계통 전류(Ig)는 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

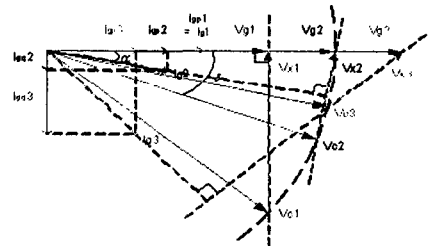
$$I_g = \frac{V_g \angle 0 - V_c \angle \delta}{jX_m} = -j \frac{V_c \sin \delta}{X_m} - j \frac{V_g - V_c \cos \delta}{X_m} \quad (1)$$

또한, 계통 전압은 수시로 변동하게 된다. 우리나라의 경우, 한전 배전계통 공급기준에 따르면 전압변동율은 $\pm 6\%$ ($220 \pm 13V$) 이내로 제한하고 있다. 따라서 VCVSI의 전압이 1.0pu 로 일정하게 유지한다고 가정하면 다음과 같이 세 가지 경우로 해석할 수 있다.

- Mode I : $V_g < V_c$ (V_g 는 0.94pu 로 최소 전압)
- Mode II : $V_g = V_c$ (V_g 는 1.0 pu)
- Mode III : $V_g > V_c$ (V_g 는 1.06pu 로 최대 전압)

2.2 시스템 설계시 고려사항

그림 2에서 V_{g1} 는 계통전압이 0.94pu, V_{g2} 는 계통전압이 1.0pu 그리고 V_{g3} 는 계통전압이 1.06pu 로 변동할 때의 시스템 파라미터의 벡터도이다.



<그림 2> VCVSI를 적용한 계통연계형 DG의 벡터도

여기서, VCVSI의 전압은 항상 일정하게 유지되어야 함으로 $V_{c1} = V_{c2} = V_{c3} = 1.0pu$ 이고, $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ 는 각각의 계통전압(V_{g1}, V_{g2}, V_{g3})과 VCVSI의 위상차로 앞으로 전력 제어각(Power angle)으로 표현한다. 디커플링 인덕터 전압(V_{x1}, V_{x2}, V_{x3})은 각각의 계통전압과 VCVSI의 전압차이며, 계통전류(I_{g1}, I_{g2}, I_{g3})와는 90° 의 위상차를 가진다. 계통전압과 계통전류의 위상차 (θ_2, θ_3)는 역률이며, V_{g1} 과 V_{x1} 의 위상차가 90° 인 경우 $\theta_1 = 0$ 으로 역률 1 제어가 가능함을 알 수 있다. 그러나 이런 특수한 경우를 제외하고는 기본적으로 VCVSI를 이용하는 시스템은 역률이 발생되므로 특성을 고려하여 각각의 시스템을 설계해야 하며, 이는 계통 전압의 크기와 전력 제어각(θ)에 의해 결정됨을 알 수 있다. 각각의 시스템 파라미터는 유효전력 성분과 무효전력성분으로 크게 구분할 수 있으며, 계통, 인버터 및 디커플링 인덕터의 피상전력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S_{gpu} = P_{gpu} + jQ_{gpu} = -V_{gpu} \sin \delta + j(V_{gpu}^2 - V_{gpu} \cos \delta) \quad (2)$$

$$S_{cpu} = P_{cpu} + jQ_{cpu} = -V_{gpu} \sin \delta + j(V_{gpu} \cos \delta - 1) \quad (3)$$

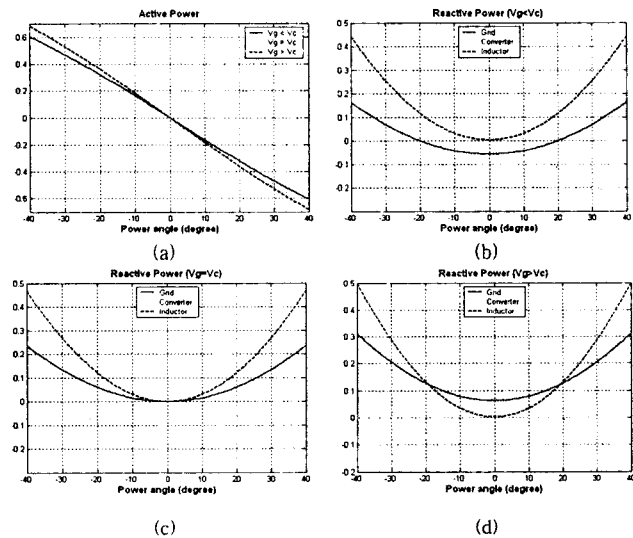
$$S_{xpu} = jQ_{xpu} = j(V_{gpu}^2 - 2V_{gpu} \cos \delta + 1) \quad (4)$$

여기서, $S_{gpu}, S_{cpu}, S_{xpu}$ 는 각각 계통과 VCVSI 그리고 디커플링 인덕터의 피상전력을 per unit로 표현한 값이며, V_{gpu} 는 계통전압의 per unit 값이다.

그림 3은 식 (2)~(4)를 Matlab 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 한 결과이며, 전력 제어각의 변화에 따른 각각의 Mode별 유효전력 및 무효전력 특성을 나타낸다. 그림 3(a)의 유효전력은 모든 Mode에서 선형적으로 증가 또는 감소함을 알 수 있으며, 전력 제어각이 부(-)인 경우에는 계통에서 인버터로, 정(+)인 경우에는 인버터에서 계통으로 전력을 공급함을 알 수 있다. 그러나 무효전력 성분은 각각의 Mode와 전력 제어각에 따라 무효전력의 크기 및 부담하는 시스템 파라미터가 서로 다를 수 있는데 다음과 같다.

- Mode I : 계통의 무효전력(Q_g)과 디커플링 인덕터의 무효전력(Q_c)을 VCVSI에서 공급(그림 3(b))
- Mode II : 디커플링 인덕터의 무효전력(Q_c)을 계통과 VCVSI에서 절반씩 공급(그림 3(c))
- Mode III : VCVSI의 무효전력(Q_g)과 디커플링 인덕터의 무효전력(Q_c)을 계통에서 공급(그림 3(d))

무효전력 성분은 전력제어각의 크기에 따라 비선형적으로 증가함을 알 수 있는데, 이는 계통 및 디커플링 인덕터의 피상전력을 증가시키고 무효전력을 보상해야 하는 인버터의 피상전력도 따라서 증가하게 되어 전체 시스템의 용량을 증가시키는 원인으로 작용한다.



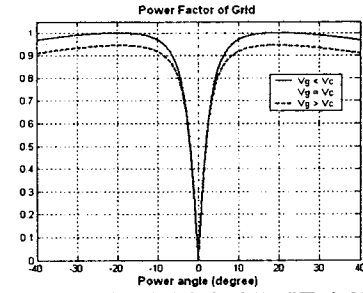
〈그림 3〉 전력제어각에 따른 Mode별 시스템 전력흐름도

따라서 시스템의 소형경량화를 위해서는 전력 제어각을 제어하는 최대 범위를 제한시켜야 한다. 하지만, 그림 3(a)의 유효전력 성분을 분석하면, $V_{g1}=0.94pu$ 인 경우 전력 제어각이 -40° 일 때 0.6pu로 유효전력을 60% 정도밖에 공급을 할 수 없음을 알 수 있다. 이는 전력 제어각의 제어 범위를 -90° 미만으로 제어 할 시 100%의 유효전력 공급이 불가능함을 의미한다. 따라서 시스템의 소형·경량화를 위한 최대전력 제어각 제어범위를 선정하기 위해서는 유효전력을 100%로 공급하면서 무효전력을 최소로 할 수 있도록 각각의 Mode별 동작특성을 분석하고 그에 따른 적절한 설계방법이 매우 중요하다. 한편, 부하가 역률 부하 또는 비선형 부하일 경우에 발생하는 무효전력 성분은 VCVSI에서 전부 공급해야 한다. 인덕턴스 부하가 발생하게 되면 그림 2의 역할각에 따른 무효전력 성분 외에 부하에서 요구되는 무효전력 성분이 발생하게 되는데 이때 VCVSI에서 부하의 무효전력성분을 공급해야 하며 식 (5)과 같이 표현할 수 있다. 이는 시스템 설계시 VCVSI의 정격 산정에 반드시 고려해야 한다.

$$Q_{cpu} = \begin{cases} Q_{loadpu} + Q_{gpu} + Q_{xpu} & \text{when } V_g < V_c \\ Q_{loadpu} + \frac{1}{2} Q_{xpu} & \text{when } V_g = V_c \\ Q_{loadpu} - (Q_{gpu} - Q_{xpu}) & \text{when } V_g > V_c \end{cases} \quad (5)$$

여기서, Q_{cpu} 는 인버터 무효전력, Q_{gpu} 는 계통 무효전력, Q_{xpu} 는 디커플링 인덕터 무효전력, Q_{loadpu} 는 부하 무효전력의 per unit 값이다.

그림 4는 제한한 시스템의 전력 제어각에 따른 동작 Mode별 역할이다. 시스템의 전력 제어각에 따른 역할을 분석하면, 계통의 전압이 VCVSI 전압보다 높을 때(Mode 3) 역할이 가장 좋지 않으며, 전력 제어각이 $\pm 8^\circ$ 이하는 역률이 현저하게 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 3(a)에서 전력 제어각이 작다는 의미는 유효전력 흐름이 적다는 것을 나타낸다. 즉, 제한된 시스템의 특성은 낮은 부하일 경우 역률이 악화될 수 있음을 알 수 있다. 그와 반대로 $+8^\circ$ 이상(최대 전력 제어각 범위를 20° 로 산정했을 때 약 40% 이상 부하)은 역률 0.9 이상을 항상 유지할 수 있음을 보여준다.



〈그림 4〉 전력제어각에 따른 계통의 역률

2.3 시스템의 최적설계

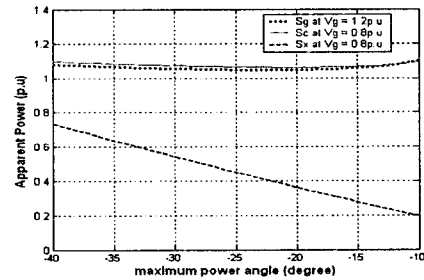
앞 절에서 언급한 바와 같이 VCVSI를 적용한 계통연계형 분산전원시스템은 디커플링 인덕터, VCVSI, 계통의 용량 설정에서 가장 중요한 파라미터가 전력제어각(δ)임을 알 수 있었다. 따라서 시스템의 소형·경량화를 위한 최대전력 제어각 제어범위를 선정하고, 유효전력을 100%로 공급하면서 무효전력을 최소로 할 수 있도록 디커플링 인덕터를 다시 선정해야 하며 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$S_{basepu} = P_{basepu} = 1pu = D \times P_{gfu} \quad (6)$$

여기서 D 는 스케일 팩터이며, S_{basepu} 는 피상전력의 per unit 값이며, P_{basepu} 는 유효전력의 per unit 값이다. 식 (6)의 D 는 $V_g=0.94pu$ 일 때 최대값이며, 식(2)를 통해 식 (7)을 얻을 수 있다.

$$D = 1 / (-0.8 \times \sin \delta_{max}) \quad (7)$$

일예로 시스템의 부하조건이 1[kVA]이고, 계통전압이 200[V]/60[Hz]인 경우 100[%] 유효전력을 공급하기 위한 디커플링 인덕터(X_m)은 40[Ω]이다. 최대전력각(δ_{max})을 20° 로 제어하는 경우 $X_m=12.86[\Omega]$ 이며, $\delta_{max}=30^\circ$ 인 경우 $X_m=18.78[\Omega]$ 이다. 계통연계형 VCVSI 시스템에 적합한 최대전력각을 찾기 위해서는 식(2)~식(4)를 통해 계통, VCVSI, 디커플링인덕터가 요구하는 최대용량을 알아야 한다. 계통의 최대용량은 $V_g=1.06$ (ModeIII)인 경우이며, VCVSI의 최대용량은 $V_g=0.94$ (ModeI)인 경우이다. 그림 5에 최대전력제어각에 따른 VCVSI, 계통 그리고 디커플링 인덕터의 피상전력을 나타냈다.



〈그림 5〉 최대전력제어각에 따른 요구 피상전력

그림 5에서 VCVSI와 계통의 피상전력은 최대전력제어각의 변화에 민감하지 않은 반면, 디커플링 인덕터의 요구 피상전력은 최대전력제어각이 증가할수록 커짐을 알 수 있다. 따라서 안정된 계통에서는 시스템의 소형경량화를 위해 디커플링 인덕터의 용량에 초점을 맞춰 설계하여야 한다. 그러므로 최대전력제어각은 20° 가 적합하다. 이 경우 계통의 용량은 1.05pu 이상, VCVSI의 용량은 1.064pu 이상 그리고 디커플링 인덕터의 용량은 0.364pu 이상의 용량을 가지도록 설계하여야 한다.

3. 결 론

본 논문에서는 안정된 계통(Strong Grid)에서 계통전압이 한전배전계통 공급기준의 전압변동률 $\pm 6\%$ (220V \pm 13V)에서 변화할 경우 부하전압의 변동이 거의 없도록 계통 연계형 전압제어형 전압원인버터(VCVSI)를 적용하였다. 이를 위한 VCVSI의 해석과 계통 역률이 0.9 이상이 되도록 적합한 최대 전력제어각과 각각의 시스템 용량(계통, 디커플링 인덕터, VCVSI)을 구하고, 유효전력을 100% 공급하기 위한 파라미터 설계 방법을 제시하였다.

[참 고 문 헌]

[1] 고성훈,인영찬,이성룡, "전력품질개선 및 부하분담 기능을 갖는 계통연계형 소규모 에너지 저장시스템", 대한전기학회 논문지, 54B, No.8 pp.387-394 2005.8
 [2] Ashari,M.Nayar,C.V.Islam,S, "Steady-state Performance of a Grid Interactive Voltage Source Inverter", Power Engineering Society Summer Meeting 2001,IEEE Vol.1,pp.15-19,July 2001