전압제어형 VSI를 적용한 계통연계형 분산전원시스템의 설계

박천성*, 조성필*, 고성훈**, 이수원***, 전칠환*, 이성룡*
군산대학교*, 전북대학교**, 연세대학교***

Design of Grid-interactive Distributed Generation System using by Voltage-Controlled VSI

Chun-Sung Park*, sung-Phil Cho*, Sung-Hun Ko**, Su-Won Lee***, Chil-Hwan Jeon*, Seong-Ryong Lee*
Kunsan National University*, Chonbuk National University**, Yonsei University***

Abstract - 본 논문에서는 산간벽지 또는 낙도와 같이 중앙계통으로부터 송.배전선을 이용한 전력공급이 어려운 약 계통(Weak grid)에 주로 사용되는 계통연계형 분산전원시스템의 설계 방법을 설명한다. Weak grid에서는 계통의 전압변동의 폭이 매우 크기 때문에 부하에 안정적으로 정전압을 공급할 수 있는 전압제어형 전압원 인버터(VCVSI: Voltage-Controlled Voltage Source Inverter)를 주로 사용한다. 따라서 본 연구에서는 계통의 전압에 변동에 따른 각각의 시스템 파라미터 특성을 분석하고 이에 따른 최적의 시스템 용량의 선정방법을 제시한다.

1. 서 론

전 세계적으로 송.배전선을 이용한 중앙계통으로부터 전력을 공급 받지 못하는 지역에 살고 있는 인구가 아직도 세계 인구의 절반을 차지하고 있다. 이러한 지역은 중앙계통과 멀리 떨어져 있고 다른 도심지보다 상대적으로 적은 전력요구량을 요구하게 되며 송.배전선을 설치하여 전력을 공급하는 방법의 대안으로 그림 1과 같이 디젤 발전기와 신.재생에너지를 결합한 계통연계형 분산전원시스템이 주목받고 있다[1]-[3].

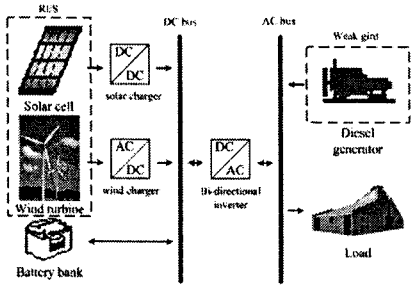

그림 1. Weak grid용 계통연계형 분산전원시스템

그림 1에서처럼 Weak grid에서는 디젤 발전기가 계통의 역할을 담당하게 되어 부하의 전압 변동 폭이 매우 크게 된다. 따라서 Weak grid용 계통연계형 분산전원시스템에 사용되어지는 양방향 인버터는 계통의 전압 변동과 상관없이 항시 부하에 안정적으로 정전압을 공급할 수 있는 전압제어형 전압원 인버터(VSI)를 주로 사용한다[4]. 전압제어형 VSI는 계통과 부하를 분리할 수 있도록 디커플링 인덕터(Decoupling Inductor)가 필요하게 된다. 이로 인해 계통 전압이 변동할 시 무효전력이 발생하게 되며 이를 설계시 반드시 고려해야 한다. 또한 계통, 부하 그리고 인버터간의 전력흐름(Power flow)을 제어하기 위해 인버터의 출력전압과 계통 전압의 위상차를 제어하게 된다. 이를 전력제어각(Power angle)이라 하며 이의 제어범위에 따라 각각의 시스템 용량과 역률이 결정된다. 따라서 본 연구에서는 계통전압의 변동과 전력제어각의 상관관계를 분석하고 이를 기반으로 최적의 시스템 용량 설계 방법과 최대전력제어각 선정 방법을 제시한다.

2. 전압제어형 VSI를 적용한 계통연계형 분산전원시스템

그림 1은 단상 전압제어형 VSI를 적용한 계통연계형 분산전원시스템의 간단한 구성도이다.

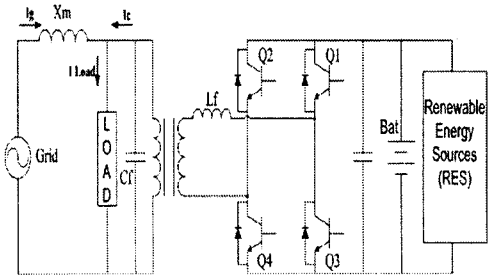

그림 2. 전압제어형 VSI를 적용한 계통연계형 분산전원시스템의 구성도

그림 2에서처럼 전압제어형 VSI를 적용한 계통연계형 분산전원시스템은 태양광, 연료전지와 같은 신.재생에너지원을 이용한 분산전원과 전압제어형 VSI 그리고 계통과 인버터의 과도한 전력 흐름을 억제하기 위한 디커플링 인덕터로 구성된다.

2.1 시스템 해석

그림 2에서 전압제어형 VSI의 출력 전압은 출력필터에 의해 이상적인 정현파로 가정하면 그림 3과 같이 정전압으로 해석할 수 있다.

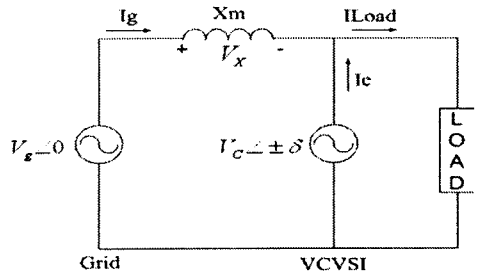

그림 3. 등가회로도

그림 3에서 디커플링 인덕터(X_m)이 순수 인덕턴스 성분이라고 가정하면 계통전류(I_g)와 디커플링 인덕터의 전압(V_x)는 90° 지연된 위상차가 발생하게 된다. 이를 이용하여 식 (1)과 같이 계통전류를 구할 수 있다.

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

여기서, V_g, V_c는 계통전압과 인버터의 출력전압, X_m은 디커플링 인덕터의 임피던스 값, δ는 전력제어각으로 계통전압과 인버터 출력전압 사이의 위상차이다.

본 연구에서는 Weak grid의 경우 전압변동의 폭이 매우 큰 것을 감안하여, 임의로 전압 변동율을 ±20[%]로 가정하여 설명한다. 여기서 부하전압은 전압제어형 VSI의 출력전압과 병렬로 연결된 형태로 부하에 안정된 정전압을 공급하기 위해서는 전압제어형 VSI는 항시 정전압을 유지해야 한다. 따라서 다음과 같이 세 가지 경우로 나누어서 해석 할 수 있다.

- Mode1: V_g<V_c (V_g가 V_c보다 작은 경우)
- Mode2: V_g=V_c (V_g와 V_c가 같은 경우)
- Mode3: V_g>V_c (V_g가 V_c보다 큰 경우)

그림 4는 순수부하일 때의 계통전압의 변동에 따른 각각의 시스템 파라미터 벡터도이다.

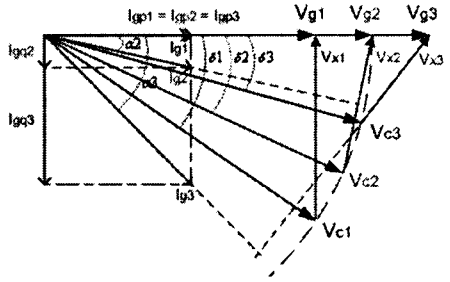

그림 4. 계통전압 변동에 따른 시스템 벡터도

그림 4에서 V_{g1}, V_{g2}, V_{g3}는 Mode1, Mode2, Mode3일 때의 계통전압이다. 여기서 인버터의 출력전압은 계통전압의 변동에 상관없이 항시 일정해야 함으로 계통전압의 변동에 따른 인버터의 출력전압은 V_{c1}=V_{c2}=V_{c3}=$1.0_{p.u}$ (per unit value) 이고, δ_1, δ_2, δ_3은 각각의 계통전압(V_{g1}, V_{g2}, V_{g3})과 인버터의 위상차인 전력제어각이다. 디커플링 인덕터 전압(V_{x1}, V_{x2}, V_{x3})은 각각의 계통전압과 인버터의 전압차이며, 계통전류(I_{g1}, I_{g2}, I_{g3})와는 90° 의 위상차를 가진다. 계통전압과 계통전류의 위상차 (α_2, α_3)는 역률이며, V_{g1}과 V_{x1}의 위상차가 90° 인 경우 α_1=0으로 역률 1 제어가 가능함을 알 수 있다. 그러나 이런 특수한 경우를 제외하고는 전압제어형 VSI를 적용한 계통연계형 분산전원시스템은 역률이 기본적으로 발생하게 된다.

그림 5에 계통전압의 크기와 전력제어각에 따른 계통의 역률 변화를 나타내었다. 그림 5에서처럼 계통의 전압이 전압제어형 VSI의 출력 전압보다 높을 때(Mode3) 역률이 가장 좋지 않으며, 계통의 전압이 전압제어형 VSI의 출력 전압보다 같을 경우(Mode2)일 때 역률이 가장 좋음을 알 수 있다. 그러나 Weak grid의 경우 계통의 전압은 항상 변동하게 되며 시스템이 Mode2로 동작하는 구간은 극히 일부분이다. 따라서 계통의 역률을 향상시키기 위해서는 전력제어각을 높게 제어해야 하지만, 전력제어각을 높게 제어하게 되면 디커플링 인덕터의 무효전력이 증가하게 되어 전체 시스템의 용량이 커지는 문제가 발생하게 된다. 또한, ±8° 부근에서 역률이 급격하게 감소됨을 확인할 수 있는데 이는 전압제어형 VSI의 치명적인 단점으로 부하가 낮을 경우 역률이 현저히 감소하는 것을 알 수 있다.

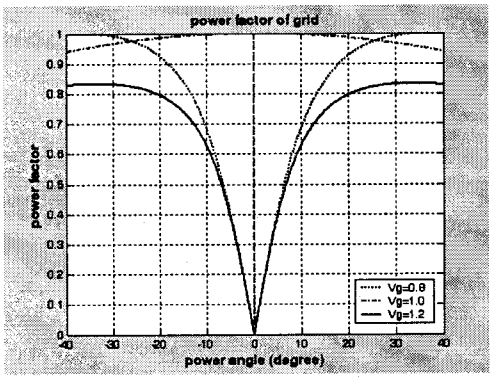

그림 5. 전력제어각에 따른 계통의 역률 변환

2.2 시스템 설계

2.1절에서 시스템을 분석한 결과 전압제어형 VSI를 적용한 계통연계형 분산전원시스템의 용량 설정에서 가장 중요한 파라미터가 전력제어각 임을 알 수 있다. 일반적으로 전력제어각을 제어하는 범위를 제한하기 위해 최대 전력제어각(δ_{max})을 선정하게 된다. 이는 시스템 용량 선정 시 전력제어각을 제한하지 않고 최대전력전달이 가능한 90°로 제어하게 되면 디커플링 인덕터의 용량이 증가함으로서 시스템의 대형화 및 가격상승 등의 문제점이 발생하기 때문이다. 그러나 전력제어각의 제어 범위를 작게 선정하면 역률이 악화되는 문제점이 발생하게 된다. 또한 Weak grid의 경우에는 계통의 용량선정도 아주 중요한 변수로 설계 시 반드시 고려해야 한다. 따라서 전압제어형 VSI를 적용한 계통연계형 분산전원시스템을 최적으로 설계하기 위해서는 전력제어각에 따른 계통, 디커플링 인덕터 그리고 인버터의 용량변화를 분석할 필요가 있다.

그림 6은 최대전력제어각에 따른 각각의 시스템 파라미터의 최대용량 변화를 나타내고 있다.

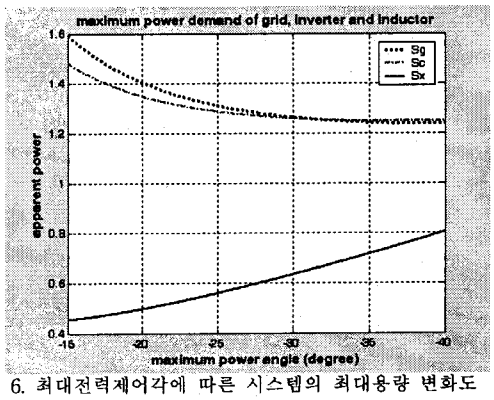

그림 6. 최대전력제어각에 따른 시스템의 최대용량 변화도

그림 6에서 계통의 최대용량은 Mode3일 경우이며, 인버터의 최대용량은 Mode2일 경우이다. 여기서 디커플링 인덕터의 용량은 최대전력제어각이 증가 할수록 같이 증가하지만 그와 반대로 인버터와 계통의 용량은 감소함을 알 수 있다. 앞서 언급한 것처럼 Weak grid에서는 계통과 인버터의 용량도 전체 시스템의 부피 및 가격을 결정하는 중요한 파라미터이므로, 본 연구에서는 적정한 최대전력제어각을 선정하기 위해서는 디커플링 인덕터의 용량이 상대적으로 작은 20° 와 인버터와 계통의 용량이

작아지는 30° 를 최대전력각으로 선정하여 각각의 시스템 파라미터를 비교분석할 필요가 있다.

그림 7과 8은 순수 저항 부하일 때의 계통과 디커플링 인덕터의 용량 변화를 시뮬레이션 한 결과이다. 전압제어형 VSI를 적용한 시스템은 부하에서 요구되는 무효전력은 인버터에서 전부 부담하게 됨으로 계통과 디커플링 인덕터의 용량 변화를 확인하기 위해 순수 저항 부하를 사용하였다.

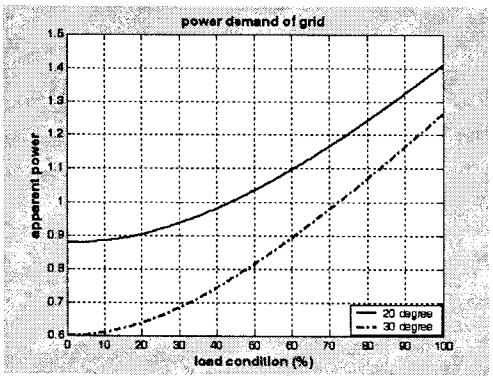

그림 7. 부하 조건에 따른 계통의 용량 변화(20° & 30°)

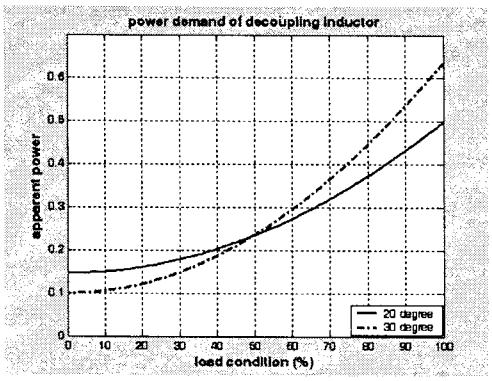

그림 8. 부하 조건에 따른 디커플링 인덕터의 용량 변화(20° & 30°)

그림 7에서 계통은 최대 부하일 경우 20° 일 때 ($1.41_{p.u}$) 보다 30° ($1.26_{p.u}$)로 제어할 때 용량이 작음을 알 수 있다. 즉, 20° 로 제어하는 것 보다 30° 로 제어할 때 계통의 용량을 약 11% 정도 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그림 8의 디커플링 인덕터 최대 용량은 최대 부하일 경우 20° 는 $0.5_{p.u}$, 30° 는 $0.67_{p.u}$로 30° 로 제어할 때 디커플링 인덕터의 용량이 더 큰 것을 알 수 있다.

인버터의 경우에는 앞서 언급한 것처럼 신.재생에너지원 또는 배터리와 같은 분산전원과 연계하여 운전할 경우 부하의 무효전력성분뿐 아니라 분산전원에서 부하 또는 계통에 유효전력을 공급해야 한다. 따라서 본 연구에서는 인버터의 최대용량을 확인하기 위해서 역률 0.8인 부하(부하각이 36.9°)인 부하를 가정하여 시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과를 그림 9에 나타내었다.

그림 9에서 DSM(Demand Side Management) 비율은 인버터가 부하의 유효전력을 분담하는 비율로 0[%]일 경우에는 계통이 부하의 유효전력을 전부 공급함을 의미하며, 100[%]일 경우에는 인버터가 부하의 유효전력을 전부 공급함을 의미한다. 그림 9에서 인버터의 최대용량의 경우는 DSM 비율이 100[%]인 지점으로 최대전력제어각이 20° 일 때는 $1.55_{p.u}$이고 최대전력제어각이 30° 일 때는 $1.27_{p.u}$임을 알 수 있다. 이는 최대전력제어각을 30° 로 선정할 경우 인버터의 용량을 20° 로 선정했을 경우 보다 22[%]를 줄일 수 있음을 의미한다.

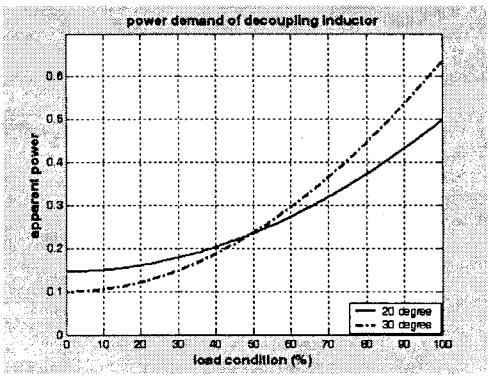

그림 9. DSM의 비율에 따른 인버터의 피상전력(20° & 30°))

이상의 결과를 종합해 보면 최대전력제어각(δ_{max})을 20° 로 제어하는 것 보다 30° 로 제어하는 것이 인버터 및 계통의 용량을 줄일 수 있으며 역률도 개선됨을 알 수 있다. 또한 최대전력제어각을 30° 로 선정했을 경우 $1.0_{p.u}$의 부하용량을 기준으로 계통은 $1.26_{p.u}$ 이상, 디커플링 인덕터는 $0.64_{p.u}$ 이상, VCVSI는 $1.37_{p.u}$ 이상의 정격용량을 가지도록 설계해야 함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 연구에서는 낙도나 산간벽지와 같이 중앙계통으로부터 송.배전선을 이용한 전력공급이 어려운 Weak grid의 안정된 전력공급에 주로 사용되는 전압제어형 VSI를 적용한 계통연계형 분산전원시스템의 설계시 고려할 점에 대해 논의하였고, 계통의 전압 변동과 전력각 제어범위에 따른 계통, 디커플링 인덕터 그리고 인버터의 최대용량선정 계산 방법을 제시하였다.

본 연구를 통해 전압제어형 VSI를 적용한 계통연계형 분산전원시스템을 설계할 경우, 전체 시스템 부피와 가격 면을 고려하여 적절한 최대전력제어각을 선정해야 하며 그에 따른 계통, 디커플링 인덕터 그리고 인버터의 정격용량을 선정해야 함을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 신재생에너지기술개발사업(2007-N-PV 08-03-0)의 지원에 의하여 연구되었음

[참 고 문 헌]

[1] W. Wongsaichua, Wei-Jen Lee; S. Oraintara, C. Kwan, F. Zhang,, "Integrated high-speed intelligent utility tie unit for disbursed/renewable generation facilities," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, pp. 507 - 513, 2005.

[2] F. Blaabjerg, Zhe Chen; S.B. Kjaer,, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, pp. 1184 - 1194, 2004.

[3] C.V. Nayar, "Control and interfacing of bi-directional inverters for off-grid and weak grid photovoltaic power systems," IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 2, pp.1280 - 1282, July 2000.

[4] H. Dehbonei, "Power Conditioning for Distributed Renewable Energy Generation," Ph.D. Dissertation, Dept. elect. Comput. Eng., Curtin Univ. Technol., perth, 2003.