

전압제어형 VSI를 적용한 계통연계형 분산전원시스템의 동작특성

강대업*, 조성필*, 고성훈**, 이성룡*, 이수원***, 문영현***
 군산대학교*, 전북대학교**, 연세대학교***

Operational Characteristics of Grid-Interactive Distributed Generation System with Voltage-controlled VSI

Dae-Up Kang*, Sung-Phil Cho*, Sung-Hun Ko**, Seong-Ryong Lee*, Su-Won Lee***, Young-Hyun Mun***
 Kunsan National University*, Chonbuk National University**, Yonsei University***

Abstract - 본 논문에서는 전력품질개선, 부하수요관리, 무정전전원공급, 부하전압안정화 등의 기능을 통합적으로 수행할 수 있는 전압제어형 전압원인버터(VCVSI: Voltage-Controlled Voltage Source Inverter)를 적용한 계통연계형 분산전원시스템의 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 시스템은 계통, 신재생에너지원(또는 배터리) 그리고 부하조건에 따라 3가지 모드(전력품질개선모드, 부하수요관리모드, 무정전전원공급모드)에 따라 동작한다. 본 연구에서는 각각의 모드에 따른 동작특성을 분석하고, 시뮬레이션을 통해 그 유용성을 확인하였다.

2. 계통 연계형 분산전원시스템

그림 1은 VCVSI를 적용한 계통연계형 분산전원시스템의 간단한 회로도로서 계통, 단상 풀-브릿지 인버터, 디커플링 인덕터(X_m) 그리고 신재생에너지원으로 구성된다. 여기서 인버터의 출력전압은 출력필터에 의해 이상적인 전압원이고, 디커플링 인덕터가 순수 인덕턴스 성분이라고 가정하면 계통전류(I_g)는 디커플링 인덕터의 전압(V_g)과 90° 위상차가 발생하게 된다.

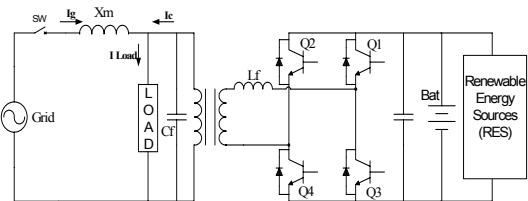
1. 서 론

산업 및 정보·통신의 급격한 발전과 문화적 편리성을 추구하는 소비자들의 요구증대에 따른 비선형 부하(컴퓨터, 에어컨, 조명기기 등)의 대량적 확산은 계통의 전력품질의 저하를 초래하였다. 또한, 에너지 사용의 급증으로 인한 지구온난화, 기후변화, 화석연료고갈(또는 비용증대)과 같은 에너지 수급 및 환경문제가 더욱 심각해지고 있는 실정이다. 이런 문제를 해결하기 위한 방안의 하나로 태양광, 풍력, 연료전지와 같은 신재생에너지(RES: Renewable Energy Source)원을 이용한 계통연계형 분산전원시스템(DGS: Distributed Generation System)이 주목받고 있다 [1]-[2]. 신재생에너지원을 이용한 분산전원시스템은 산업사회의 고도화에 따라 증가하는 전력수요에 대응하여 에너지 Security를 확보하고, 에너지 절약 및 온실가스 저감 그리고 친환경적 에너지 생산과 같은 환경적 측면과 함께 전력수급의 지역간 불균형 해소와 같은 다양한 효과를 기대할 수 있는 전력시스템으로 평가되고 있다. 특히, 기존의 전력계통과의 연계를 통해 보다 안정적인 전원공급이 가능하고, 잉여전력의 계통공급을 통한 에너지원의 효율적 활용이 가능하기 때문에 기존의 중앙집권식 전원에 의한 송배전과 연계하여 도입·보급되는 형태가 바람직한 것으로 판단되고 있다. 따라서 계통연계형 분산전원시스템은 단순히 신재생에너지원의 발전된 전력을 부하 또는 계통에 공급하는 역할 뿐 아니라 계통, 신재생에너지 그리고 부하조건을 고려하여 전력품질개선, 부하수요관리(DSM: Demand Side Management), 부하전압안정화, 무정전전원공급(UPS: Uninterruptible Power Supply) 등의 기능을 수행할 수 있도록 요구되며 다음과 같은 사항을 만족해야 한다[3].

- 무효전력보상: 계통의 고조파 감소 및 역률개선
- 유효전력공급: 신재생에너지원 및 배터리를 이용하여 부하조건에 따른 부하수요관리(또는 침투부하감소)
- 무정전전원공급: 계통 정전시 부하에 즉시 안정된 전원공급

이러한 기능을 수행하기 위해 계통과 분산전원 사이의 전력흐름을 제어하는 양방향 인버터가 필요하며, 제어방법에 따라 전압제어형 전압원인버터(VCVSI: Voltage-Controlled Voltage Source Inverter)와 전류제어형 전압원인버터(CCVSI: Current-Controlled Voltage Source Inverter)로 분류할 수 있다. CCVSI는 역률개선 및 고조파저감 같은 계통의 전력품질향상면에서, VCVSI는 무정전전원공급 및 부하전압안정화 등에서 각각 우수한 성능을 보인다[4].

본 논문에서는 부하에 안정적인 전력을 공급하기 위해 계통연계형 분산전원시스템에 사용되는 양방향 인버터로 VCVSI를 적용하였으며, 전력품질개선, 부하수요관리, 무정전전원공급, 부하전압안정화 등의 기능을 통합적으로 수행할 수 있는 시스템 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 시스템은 크게 부하의 무효전력보상 및 고조파 저감을 위한 전력품질개선(PQC: Power Quality Control)모드, PQC 기능을 수행하면서 동시에 신재생에너지원의 전력을 이용하여 계통 또는 부하에 전력을 공급하는 DSM 모드, 계통 정전시 즉시 부하에 안정된 전력을 공급하는 UPS 모드로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 각각의 모드에 따른 동작특성을 분석하고, PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통해 그 유용성을 확인하였다.



<그림 1> VCVSI를 적용한 계통연계형 분산전원시스템 회로도

따라서 계통 전류 및 유효전력은 다음과 같이 구할 수 있다.

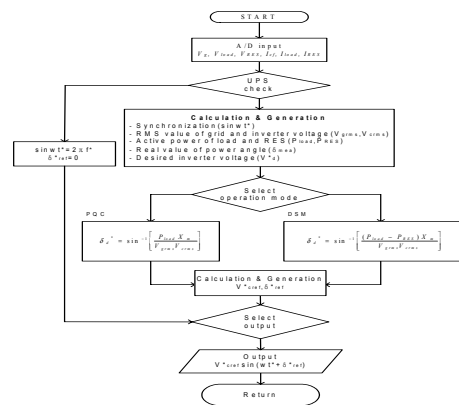
$$I_g = \frac{V_g \angle 0 - V_c \angle \delta}{jX_m} = \frac{V_g \sin \delta}{X_m} - j \frac{V_g - V_c \cos \delta}{X_m} \quad (1)$$

$$P_g = P_{load} - P_{RES} = - \frac{V_g V_c}{X_m} \sin \delta \quad (2)$$

여기서 V_g , V_c 는 계통 및 인버터의 전압, P_g , P_{load} , P_{RES} 는 각각 계통, 부하 그리고 신재생에너지원의 유효전력이다. 제안된 시스템은 각각의 동작모드에 따라 VCVSI의 출력전압과 위상각(계통전압과 인버터 출력전압 사이의 위상차: δ)을 제어하게 되며 위상각은 식 (2)를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다

$$\delta = \sin^{-1} \left[\frac{(P_{load} - P_{RES}) X_m}{V_g V_c} \right] \quad (3)$$

그림 2는 VCVSI를 적용한 계통연계형 분산전원시스템의 제어 알고리즘 순서도이다.



<그림 2> 제안된 시스템의 제어 알고리즘 순서도

본 연구에서 제안한 시스템의 제어 알고리즘은 계통 전압(V_g), 부하 전압 및 전류(V_{load} , I_{load}), 캐패시터 필터전류(I_{cf}) 그리고 신재생에너지원의 전압 및 전류(V_{RES} , I_{RES}) 등을 입력받아 전력품질개선, 부하수요관리, 전압안정화, UPS 기능을 수행할 수 있는 최종적인 인버터 전압 지령치($V_{ref}^* \sin(\omega t + \delta_{ref}^*)$)를 생성하게 된다. 우선, 계통 전압의 "0"교차점(Zero crossing point)과 계통전압의 이상유무(UPS check)를 확인한다. 여기서 계통의 정전을 판단하는 기준은 일반적으로 전압의 크기를 측정하는 방법을 사용한다. 본 연구에서는 임의로 계통전압의 크기(V_{gpeak})가 50[V]이하로 4[ms]이상 지속되는 경우를 정전의 기준으로 설정하였다. 각각의 측정된 값을 이용하여 계통과 동기화된 정현함수($\sin \omega t^*$), 계통 및 인버터 전압의 실효값(V_{grms} , V_{crms}), 부하 및 신재생에너지원의 유효 전력(P_{load} , P_{RES}), 계통전압과 인버터 출력전압사이의 실제 위상각(δ_{mea}), 그리고 인버터 출력전압과 캐패시터 필터전류(I_{cf})를 이용하여 요구되는 인버터 전압(V_d^*)을 연산한다. 연산된 값을 이용하여 신재생에너지원과 부하조건을 고려하여 PQC모드와 DSM모드를 선택하게 되며, 각각의 동작모드에 따라 요구되는 전력상차각(δ^*)을 연산한다. 연산된 값(V_d^* , δ^*)과 실제 값(V_{cmea} , δ_{mea})의 오차를 오차보상기를 통하여 최종적인 지령전압(V_{ref}^*) 및 위상각(δ_{ref}^*)을 생성한다. 생성된 지령 값을 이용하여 각각의 모드(PQC, DSM, UPS)에 따라 최종적인 인버터 전압 지령치($V_{ref}^* \sin(\omega t + \delta_{ref}^*)$)를 출력한다. 여기서 UPS모드의 경우 정현함수의 주파수는 60[Hz]로 설정하였다.

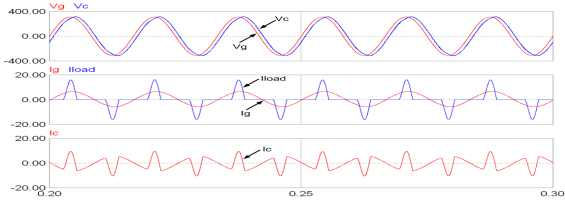
3. 시뮬레이션 및 고찰

제안된 시스템의 동작특성 및 제어 알고리즘의 유용성을 확인하기 위해 PSM을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이션 조건은 표 1과 같다. 시스템 파라미터는 문헌[1]의 설계 방법에 따라 선정하였으며, 그림 2의 프로그램 순서도는 DLL 파일을 이용하여 구현하였다.

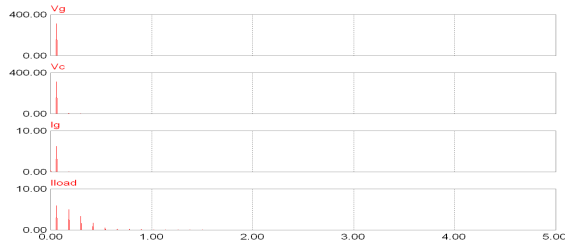
〈표 1〉 시뮬레이션 조건

Parameters	Values	Parameters	Values
DC전압(V_{RES})	200[V _{dc}]	디커플링 인덕터(X_m)	42[mH]
계통전압(V_g)	220[V _{rms} ±13V]	스위칭 주파수	10[kHz]
기본주파수	60[Hz]	최대부하용량	1[KVA]
필터(L_f , C_f)	100uH, 10uF	DC링크 캐패시터	1000uF

그림 3~5는 시스템의 동작모드에 따른 시뮬레이션 결과 파형으로, 그림 3은 PQC모드, 그림 4는 DSM모드 그리고 그림 5는 UPS모드로 동작할 때의 각각의 시뮬레이션 결과 파형이다.



(a) 전압 및 전류 파형

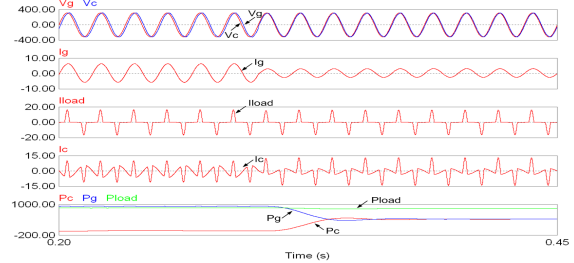


(b) 전압 및 전류 FFT 파형

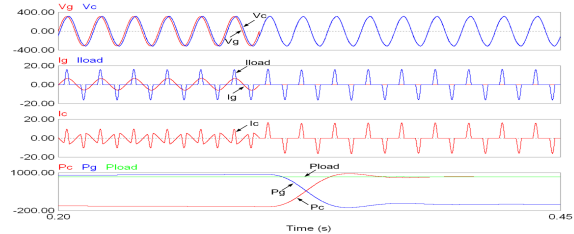
〈그림 3〉 PQC 동작모드시 시뮬레이션 결과 파형

그림 3(a)는 PQC 동작모드시 계통전압 및 전류, 부하 전압 및 전류, 인버터 출력전류의 시뮬레이션 결과 파형으로 부하전류는 전형적인 비선형적 특성을 나타내지만, 전력품질개선 기능을 수행하여 무효전력(고조파 포함)을 보상함으로써 계통 전류는 정현파임을 알 수 있다. 그림 3(b)는 계통전압, 부하전압, 계통전류, 부하전류의 FFT 파형으로 부하전압의 THD=1.9%, 계통전류 THD=1.8%으로 한전배전계통 공급기준과 IEEE 표준규격을 만족하고 있음을 확인하였다. 그림 4는 신재생에너지원에서 발전된 전력을 계통 또는 부하에 공급하는 DSM 동작모드시 시뮬레이션 결과 파형으로, 제안된 시스템이 전력품질개선 기능을 수행하면서 동시에 신재생에너지원의 발전전력을 계통 또는 부하에 공급하는

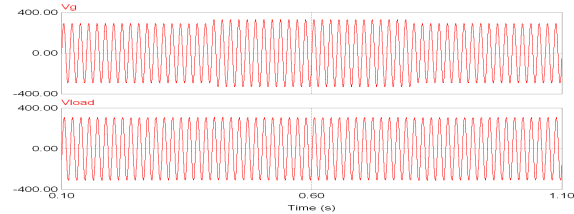
수요관리 기능도 수행할 수 있음을 확인 할 수 있다. 그림 5는 UPS 모드시의 시뮬레이션 결과 파형으로, 계통의 정전시 부하에 안정적인 전력을 공급함을 알 수 있다. 여기서 계통의 정전유무를 판단하여 시스템이 UPS 모드로 전환되는 시간은 앞서 설명한 것처럼 약 4[ms]이상의 시간이 필요하다. 그러나 제안된 시스템은 VCVSI의 가장 우수한 장점인 부하전압안정화 기능을 항상 수행하기 때문에 전력전환시 발생하는 문제(과전압, 과전류, 절체시간)없이 안정적으로 시스템은 정전압원으로 동작함을 확인 할 수 있다. 그림 6은 시스템의 부하전압안정화 기능을 확인하는 시뮬레이션 결과파형으로 계통전압이 0.4초에서 330[V]→292[V], 0.8초에서 292[V]→330[V]로 변동시에도 전압보상을 통해 부하 전압을 항상 일정하게 유지할 수 있음을 확인하였다.



〈그림 4〉 DSM 동작모드시 시뮬레이션 결과 파형



〈그림 5〉 UPS 동작모드시 시뮬레이션 결과 파형



〈그림 6〉 계통전압 변동시 시뮬레이션 결과 파형

4. 결 론

본 논문에서는 전력품질개선, 부하수요관리, 무정전전원공급, 부하전압안정화 등의 기능을 통합적으로 수행할 수 있는 전압제어형 전압원인버터를 적용한 계통연계형 분산전원시스템의 제어 알고리즘을 제안하였으며, 각각의 동작모드에 따른 동작특성을 확인하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 시스템 제어 알고리즘은 평시에는 계통, 신재생에너지 그리고 부하조건을 고려하여 전력품질개선, 부하수요관리, 부하전압안정화 기능을 동시에 수행할 수 있음을 확인하였으며, 계통의 정전시에는 즉시 부하에 안정된 전력을 공급할 수 있음을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이성룡,전철환,이수원,고성훈, "부하전압 안정화 기능을 갖는 계통연계형 분산전원시스템의 설계", '06'대한전기학회 하계학술대회논문집, pp. 990-991, 2006. 7.
- [2] 고성훈,신영찬,이성룡, "전력품질개선 및 부하분담기능을 갖는 계통연계형 소규모 에너지저장시스템", 전기학회논문지. vol. 54B, no, 8, pp. 387-394, 2005. 8.
- [3] 박정욱,이수원,이성룡, "계통연계 분산전원시스템", 전력전자학회지, vol. 11, no. 5, pp. 46-50, 2006. 10.
- [4] S.-H. Ko, S. R. Lee, H. Dehbonei, and C. V. Nayar. "Application of Voltage-and Current-Controlled Voltage Source Inverters for Distributed Generation Systems", IEEE Trans. on Energy conversion, Vol. 21, No. 3, pp. 782-792, Sept. 2006.