

계통연계형 3상 태양광 PCS 기술 분석

이상희, 차한주
충남대학교

Analysis of Utility Interactive 3-phase Photovoltaic Power Conditioning System

Sanghoey Lee, Hanju Cha
Chungnam National University

Abstract - 이 논문에서는 멀티스트링 타입 계통연계형 3상 태양광 발전 시스템 개발 과정에서 인버터 파트에 필요한 기본적인 기술들을 살펴보고 검증해 보았다. 계통연계에 필요한 위상추종제어 3상 DPLL(Digital Phase Locked Loop)과 DC 링크 전압제어 그리고 계통전류 제어기의 구조와 비간섭전류제어 등을 살펴보고 무변압기형에 사용되는 3상인버터의 L-C-L 필터 설계 방법을 살펴보고 L-C 필터와 비교하여 살펴보았다. 최종적으로 앞에서 언급하였던 제어기와 이론 등을 시뮬레이션으로 검증하였으며 현재 개발 중인 프로토타입 하드웨어 설계에 대해서도 기술하였다.

1. 서 론

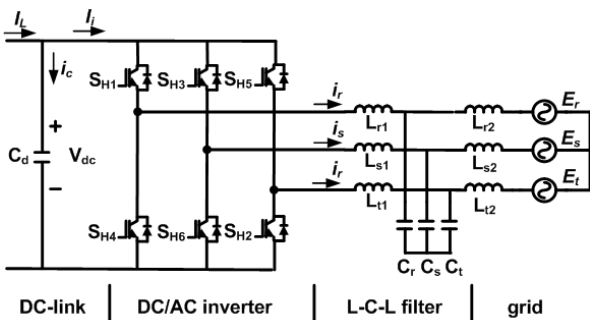
전 세계적으로 신재생에너지시스템에 많은 관심이 집중되고 있다. 이 중 태양광발전시스템은 공해 없이 전기를 생산하고, 무한함 태양에너지를 전기로 직접 변환하는 장점을 가지고 있어 많은 잠재적 발전 가능성이 보이고 있다. 최근에는 성능향상을 위해 태양전지 생산 비용을 줄이고 태양전지와 인버터의 효율을 최대도 이용하는 것이 주된 목적을 이루고 있다. 이는 가까운 미래의 화석연료의 고갈을 대비하며 대체에너지로서의 태양광발전시스템에 많은 기대를 하고 있기 때문이다. 그래서 본 논문에서도 태양광인버터의 효율을 증대시키며 다목적 구조물에 적용할 수 있는 멀티스트링 3상 태양광 인버터를 개발 중에 있다. 이 3상 태양광 인버터는 크게 두 부분으로 나뉜다. dc-dc 컨버터부와 dc-ac 인버터 부분으로 구성되며 dc-dc 컨버터 부는 3상 인터리브 타입으로 개발 중에 있으며 dc-ac 인버터 부는 무변압기형으로 개발 중에 있다. 이 중 본 논문에서는 인버터 부분에 사용된 여러 기술적인 이론을 시뮬레이션을 통해 분석하여 보고 하드웨어 구성 또한 살펴보도록 하겠다[1].

2. 본 론

2.1 3상 태양광 인버터 구조

태양광 발전 시스템의 PCS는 현재 여러 방면으로 많은 토폴로지와 새로운 기술이 제시되고 있다. 간단히 토폴로지들을 살펴보면 저주파 변압기 방식, 고주파링크방식, 무변압기 방식 등이 주로 이용되고 있으며 각각의 토폴로지는 장단점을 가지고 있지만 본 논문에서는 저주파 변압기를 사용하지 않고 고효율, 소형, 경량화에 유리한 특징을 가지는 무변압기 방식의 토폴로지를 이용하여 시스템을 구현하였다.

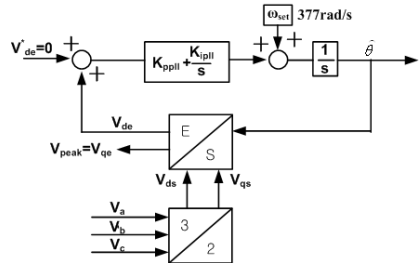
그림 1은 3상 태양광인버터의 기본 토폴로지이다. 3상 스위치를 위한 IGBT와 L-C-L 필터 그리고 dc 링크 부분으로 나누어져 있다. 동작은 PV 어레이의 dc 전압이 dc-dc 컨버터를 통해서 승압되며 전류 i_c 는 C_d dc 링크 커패시터에 전압을 충전한다. 잉여전력은 I_r 는 dc-ac 인버터를 스위칭 하여 초평면 ac 파형이 만들게 된다. 3상 220V 4kW정격용량으로 프로토타입을 기준으로 만들고 있다. 이 파형을 L-C-L 필터를 통해 계통의 위상과 전압이 같은 파형을 발생한다.



<그림 1> 계통 연계형 3상 태양광인버터 구조

2.2 DPLL 위상추종제어

계통연계 시스템에서는 계통의 주파수와 계통의 위상을 추종하는 기술은 매우 중요하다. 이 절에서는 위상과 주파수를 추종하는 DPLL에 대해 기술하였다. 우선적으로 DPLL은 여러 논문에서 증명과 검증이 되어 있으며 본 논문에서는 사인파를 기준으로 하는 좌표이론을 적용하였다. DPLL의 동작과정을 살펴보면 3상 선간전압을 측정하고 이를 상전압으로 변환하여 d-q변환을 통해 동기좌표계로 변환한다. 이때 변환을 통해 위상을 피드백 받아 위상차를 보상하고 PI 제어를 통해 추종위상과의 차를 적분기를 통해 더해주어 위상 $\hat{\theta}$ 를 추종하게 된다[2].



<그림 2> DPLL 블록다이아그램

2.3 전류제어기

수식 (1),(2)는 동기좌표계로 나타낸 d,q 등가회로를 정리한수식이다. 수식에서처럼 간섭분 $-\omega L_{idq}$ 와 ωL_{iq} 가 존재함으로써 이러한 영향을 없애기 위하여 간섭 분을 미리 보상하는 비간섭 전류제어기가 필요하게 된다.

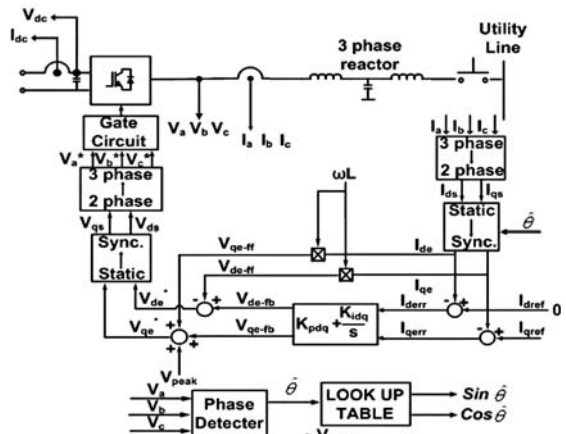
$$L \frac{di_q}{dt} = -i_q R + E_q - V_q - \omega L i_d \quad (1)$$

$$L \frac{di_d}{dt} = -i_d R + E_d - V_d + \omega L i_q \quad (2)$$

비간섭전류계의 개루프 전달함수는 수식 (3)과 같다.

$$G_{co}(s) = K_p \left(\frac{1+sTi}{sTi} \right) \cdot \frac{1}{sL+R} \quad (3)$$

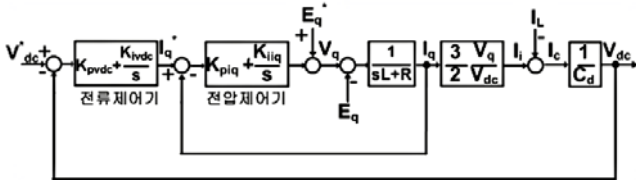
수식(3)의 Ti는 플랜트전달함수의 극점을 제거하여 K_p 는 뎀핑계수 $\xi=0.707$ 이 되도록 설정한다.



<그림 3> DC-AC 인버터 전류제어기 블록다이아그램

인버터전류제어기에서는 비간섭제어가 포함되어 있으며 그림 3과 같다. 그림에서처럼 피드포워드 보상기법을 사용하였으며 d-q 변환을 이용하여 전압과 전류를 제어한다. 전체적으로 동작을 살펴보면 DPLL을 통해 위상과 피크전압을 구하고 전류를 정지좌표변환과 회전좌표변환을 통해 I_{dq} 와 I_{qref} 를 구하게 된다. 이때 구해진 전류는 앞에서 언급한 비간섭 전류제어기를 통해 피드포워드 보상한다. 역률제어를 위해 I_{dref} 는 0으로 PI 제어를 하며 I_{qref} 는 dc 링크 커패시터에 충전되어지는 입력 파워에 따라 전류의 크기가 결정되어지게 된다. 마찬가지로 PI 제어를 수행하며 최종적으로 결정된 출력 값은 게이트회로를 거쳐 PWM 제어를 수행하게 된다. 여기서의 PWM제어는 공간 벡터 PWM을 수행하여 자유도를 갖는 스위칭을 함으로서 정현파 PWM에 비해 출력전압의 증가로 고조파와 왜형 율이 좋은 계통의 파형 만들 수 있다[3][4].

2.3 DC 링크 전압제어기



〈그림 4〉 전압제어기 블록다이어그램

그림 4는 전압제어기의 블록다이어그램이다. PV 어레이에서 발전된 최대전력을 dc-dc 컨버터를 통해서 dc 링크에 전압으로 충전되어진다. 따라서 전압제어기는 dc 링크에 일정전압을 유지하며 PV 어레이에서 넘어온 전력을 인버터에 넘겨주게 된다.

2.5 출력 L-C-L 필터 설계

태양광 인버터에는 계통연계를 할 경우 출력 필터가 필요하게 된다. 출력필터에는 변압기를 이용하거나 리액터를 사용한다. 본 논문의 PCS는 무변압기형 3상 태양광 인버터이므로 리액터를 사용하였다. 소용량의 파워시스템에는 필터를 L 혹은 L-C를 사용하고 대용량으로 증가함에 따라 L-C-L 필터를 사용하게 된다. 변압기는 용량이 커짐에 따라 가격이 수직상승 하므로 L-C-L 필터를 사용하여 크기를 줄이면서도 성능을 올리는 연구가 진행되어 왔다 하지만 L-C-L필터를 설계 시에는 계통전류제어에 주의 하여야하며 공진현상 등과 같은 문제점이 있으며 이를 보완하는 방법에는 보드선도를 그려서 확인하여보고 댄핑 저항 등을 달아 θ 값을 변경하는 방법이 있다. 여기서는 L-C-L 필터 설계방법을 확인하여 보았다. 수식 (5)는 L_1 의 값을 결정하는 수식으로 V_g 는 rms 상전압을 나타내며 f_s 는 스위칭주파수 I_{ripple} 는 계통의 정격전류의 리플 15%로 피크기준이다[5].

$$L_1 = \frac{V_g}{2\sqrt{6} f_s i_{ripple, peak}} \quad (5)$$

$$C_f \leq 0.05 C_b \quad (6)$$

$$C_b = \frac{1}{(\omega_n Z_b)} \quad (7)$$

$$Z_b = \frac{V_g^2 L L}{P_n} \quad (8)$$

수식 (6)-(8)은 필터 커패시터 C_f 를 구하는 수식으로 C_b 는 베이스 커패시턴스이며 Z_b 는 베이스 임피던스이다. V_{gLL} 은 계통선간전압을 나타내며 P_n 은 인버터의 정격파워이다.

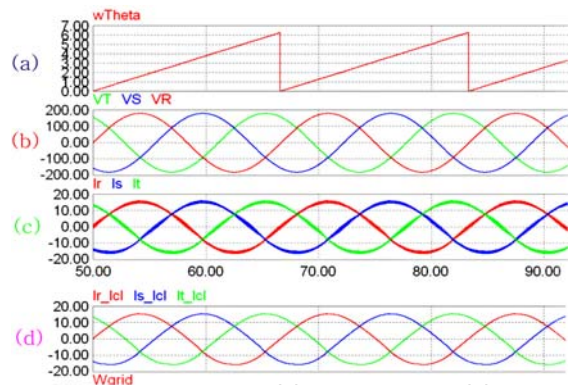
필터 커패시터 C_f 는 스위칭주파수의 전류 리플 20dB를 감안하여 수식 (9)와 같이 나타낸다. L_2 는 수식 (10)에서처럼 L_1 의 80% 정도로 계산한다.

$$C_f = 0.025 C_b \quad (9)$$

$$L_2 = 0.8 L_1 \quad (10)$$

2.6 시뮬레이션 결과

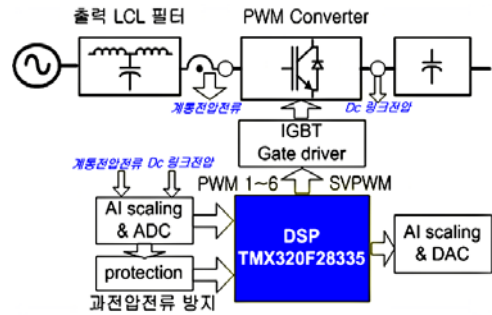
앞에서 언급한 3상인버터의 제어방법과 필터설계값을 시뮬레이션을 통해 검증하여 보았다. 시뮬레이션에서는 L_1 은 2mH를 L_2 는 1.6mH C_f 는 10uF를 사용하고 정격 4kW에서 시뮬레이션을 확인하였다. 그림 5의 (a)는 DPLL의 수행에 따라 변화 하는 위상값을 보여주고 있다 (b)는 계통의 선간전압을 상전압으로 변환하여 보여주고 있으며 (c)는 L-C 필터를 거쳐 나온 전류이다. 이 전류에는 많은 노이즈가 L-C-L 비례 높다는 것을 (d)와 비교해 알 수 있다. (d)는 L-C-L 필터를 거쳐 나온 계통전류이다. (c)파형에 비해 클리어 하다는 것을 확인 할 수 있다. 이처럼 시뮬레이션의 파형들로 하여금 앞에서 언급된 여러 기술들이 실제로 구현되어 시뮬레이션에 적용되어 잘 동작하는 것을 확인하였다. 하지만 시뮬레이션과 실제 하드웨어는 이상적인 부분이 배제되어 있으므로 실제로 구현 했을 때는 필터값 선정에 마진 등을 고려할 것이다.



〈그림 5〉 시뮬레이션 파형 (a) DPLL 추종위상 (b) 계통상전압 (c) L-C 필터 계통전류 (d) L-C-L 필터 계통전류

2.7 하드웨어 개발

본 논문은 멀티스트링 타입 태양광 인버터 개발에 필요한 기술들을 서술하고 있다. 이 장에서는 앞으로 사용될 하드웨어를 살펴보자 멀티스트링 태양광 인버터는 크게 dc-dc 컨버터와 dc-ac 인버터로 나뉘며 앞에서 언급한대로 인버터만을 기술하겠다. 3상 태양광 인버터는 현재 개발 중이며 크게 파워부와 제어부로 나누었다. 파워 부는 IGBT IPM 스위치를 사용하였으며 제어 부는 DSP 28335 마이크로 컨트롤러를 사용하여 제작 중에 있다. 28335는 플로팅 연산이 되며 ePWM 기능이 탑재되어 태양광인버터개발에 이상적이다. 현 하드웨어는 실 시스템의 알고리즘을 테스트하기위한 프로토타입으로 모든 알고리즘들은 소프트웨어로 작성하고 테스트 할 수 있도록 하였다. 그림 6은 전체제어기의 블록도이다.



〈그림 6〉 전체 제어기 블록다이어그램

3. 결 론

본 논문에서는 3상 태양광 인버터에 사용되는 여러 기술들을 확인하여 보았다. 3상 인버터의 구조와 DPLL의 구현방법, dc 링크전압제어기 그리고 L-C 필터와 L-C-L 필터의 성능확인 등을 기술하고 시뮬레이션을 통해 확인하고 검증 하였다. 시뮬레이션의 파형으로 보아 이론대로 구현되었으며 이를 DSP 마이크로컨트롤러에 적용해도 무난히 동작할 것으로 기대하며 현재 진행 중인 프로토타입 하드웨어 개발에 적용하여 발표할 계획이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 권정민, 김응호, 남광희, 권봉환, "계통연계형 멀티스트링 태양광 발전시스템", 한국신재생에너지학회, vol.3, no.4, p. 69-76, 2007
- [2] V. Blasko, V. Kaura, "Operation of a Phase Locked Loop System Under Distorted Utility Conditions", IEEE Transactions On Industrial Electronics, vol.33, no.1, p.58-63, January/February 1997
- [3] J. M Kwon, B. H Kwon, K. H Nam, "Three-Phase Photovoltaic System With Three-Level Boosting MPPT Control", IEEE Transactions On Power Electronics, vol.23, no.5, p.2319-2327, Sept 2008
- [4] Q. Zeng, L. Chang, "An Advanced SVPWM-Based Predictive Current Controller for Three-Phase Inverters in Distributed Generation Systems", IEEE Transactions On Industrial Electronics, vol.55, no.3, p.1235-1246, March 2008
- [5] A.O Zué, A. Chandra, "Simulation and Stability Analysis of a 100 kW Grid Connected LCL Photovoltaic Inverter for Industry", in proceeding PESG, 2006