

모듈형 3상 계통연계 태양광 발전 시스템용 PCS 및 제어방식

김홍성* 정재기* 이인성**
 * 한빛EDS(주) ** 한국 수자원 공사

Module Type 3-Phase PCS for UIPV System and Control Method

Hong-Sung Kim Jae-Kee Jeong In-Sung Lee
 Hanbit EDS Co., Ltd. Korea Water Resources Corporation

ABSTRACT

일반적으로 3상 계통연계형 PV 시스템용 PCS는 2-레벨 인버터 회로를 채용하고 AC 출력 선전류의 제어를 통하여 PV-array의 DC 출력을 계통측으로 발전시키는 형태로 구성된다. 이러한 전력변환 회로는 스위치 회로의 한 암에서 고장 시 시스템의 정상적인 발전이 어려운 단점을 가진다. 본 연구에서는 이러한 단점을 개선하기 위해 모듈형 3상 계통연계 태양광 발전 시스템용 PCS 및 제어방법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 타당성을 검증한다.

1. 서론

최근 계통 연계형 태양광 발전 시스템은 3[kW] 시스템을 중심으로 한 가정용 시스템이라는 큰 흐름 외에 발전사업의 법제화로 인해 발전소화 되어감에 따라 중용량 100~200[kW]급 PCS의 수요도 증가하고 있다^[1].

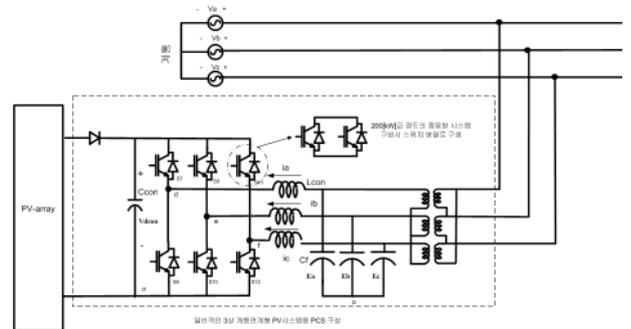
일반적으로 3상 계통연계형 PV 시스템용 PCS는 그림1(a)와 같은 2-레벨 인버터 회로를 채용하고 AC 출력 선전류의 제어를 통하여 PV-array의 DC 출력을 계통측으로 발전시키는 형태로 구성된다. 이러한 전력변환 회로는 스위치 회로의 한 암에서 고장 시 시스템의 정상적인 발전이 어려운 단점을 가진다^[2].

본 연구에서는 스위칭 회로에 문제가 발생한 경우에도 시스템의 운전을 일정 범위내에서 수행할 수 있는 모듈형 PCS를 제안한다. 제안된 PCS는 그림 2(a)와 같이 DC 링크단을 공유하는 3대의 단상 풀브리지 회로를 3상 전원의 각 상간에 연결하는 방식으로 구성되며 1대의 시스템 정지시에는 출력을 2/3이하로 제한하고 2대의 스위칭 회로를 통하여 3상 운전이 가능하며 2대 이상시는 단상 운전도 가능하다. 제안된 시스템은 단상 풀브리지 회로를 이용함에 따라 UPWM의 적용시 PCS의 운전주파수를 효율적으로 두배로 할 수 있어서 필터 커패시터의 전류 용량을 줄일 수 있는 부차적 효과^[3] 및 저출력영역에서 효율 향상을 기대할 수 있다.

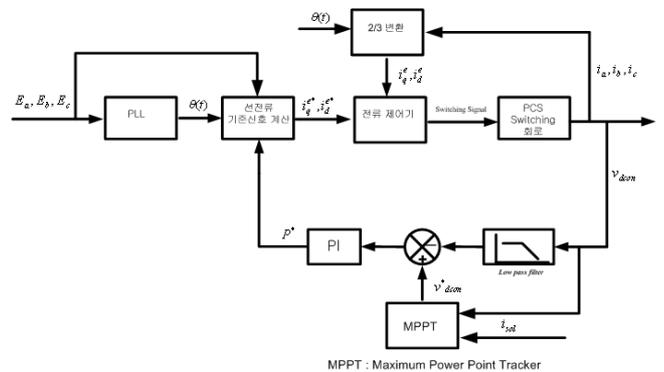
2. 본론

2.1 일반적인 3상 PCS 구성^{[3][4][5]}

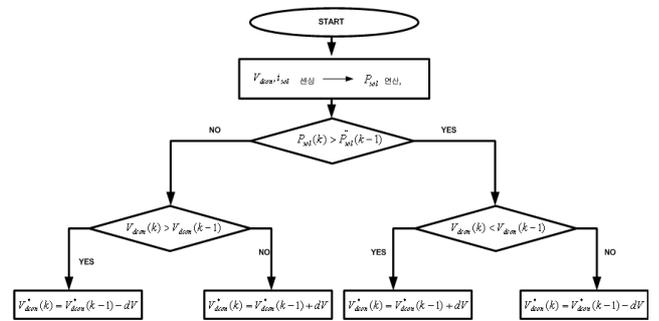
그림 1은 일반적인 3상 계통 연계형 PV 시스템용 PCS 구성도, 제어계 블록선도 및 MPPT(Maximum Power Point Tracker)를 나타낸다.



(a) 일반적인 3상 PCS의 전력회로



(b) 제어계 구성



(c) 그림 1 (b)에서 MPPT의 구성(hii climbing 법)

그림 1 일반적인 3상 PCS의 구성

2.2 제안된 모듈형 3상 PCS 및 제어계 구성

그림 2는 제안된 3상 PCS의 전력회로를 나타낸다. DC 링 크단을 공유하는 3대의 단상 풀브리지 회로를 3상 전원의 각 상간에 연결하는 방식으로 구성되며 1상의 스위치 고장시에는 출력을 2/3 이하로 제한하고 2대의 시스템을 통하여 3상 운전이 가능하며 2대 이상시는 단상 운전도 가능하다.

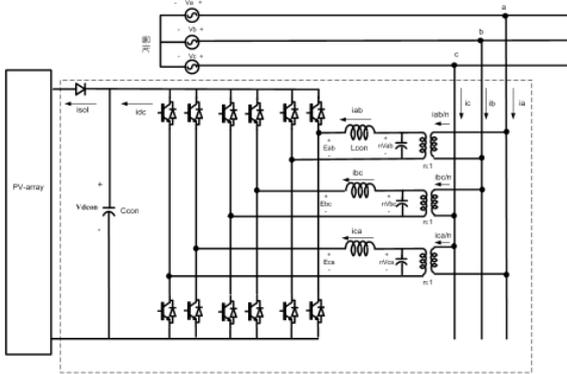


그림 2 제안된 모듈형 PCS의 전력회로

2.2.1 3대 운전 시 전류 제어기 기준신호 연산

그림 2(a)는 제안된 3상 PCS 전력회로를 나타낸다. 계통의 선전류 및 각 스위칭 회로의 출력 전류 i_{ab} , i_{bc} , i_{ca} 간의 관계는 키르히호프의 전류법칙을 이용하면 다음과 같이 표현된다(필터 커패시터 충전전류 무시, 변압비 $n=1$ 가정).

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} = \tilde{A} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \end{bmatrix} \quad (1)$$

제어계 구성시 선전류에 대한 전류기준신호로서 i_a^* , i_b^* , i_c^* 를 얻을 수 있다면 각 스위칭 회로 출력 전류의 기준신호는 식(1)을 이용하여 행렬 \tilde{A} 의 역행렬을 구하면 얻을 수 있으나 행렬 \tilde{A} 는 singular matrix 이므로 역행렬을 가지지 않는다. 다음과 같은 보조 방정식을 도입하고

$$i_{\Delta} = i_a^* + i_b^* + i_c^* = 0 \quad (2)$$

식(1)을 이용하여 선전류 및 선간의 스위칭회로 출력전류 기준신호간의 관계를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_{\Delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 1 \\ -1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \\ 0 \end{bmatrix} = \tilde{A}^* \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \\ i_{ca} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

\tilde{A}^* 는 nonsingular matrix이므로 역행렬을 구하면 3대의 스위칭 회로 출력전류의 기준신호를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_{ab}^* \\ i_{bc}^* \\ i_{ca}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2.2 2대 시스템이 운전시 전류 제어기 기준신호 연산

그림 2에서 c-a 상간의 시스템이 발전을 멈춘다고 가정하면 이 $i_{ca} = 0$ 이므로 계통의 선전류 및 각 스위칭 회로의 출력 전류 i_{ab} , i_{bc} 간의 관계는 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \end{bmatrix} = \tilde{A} \begin{bmatrix} i_{ab} \\ i_{bc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

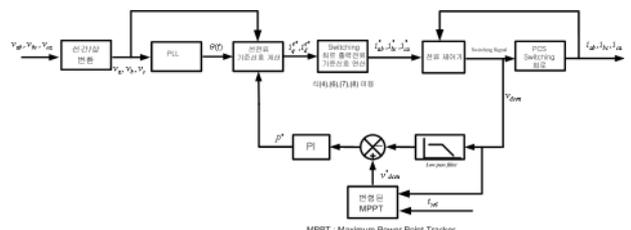
식(5)에서 행렬 \tilde{A} 의 행벡터는 1차 독립을 이루므로 의사 역행렬(Pseudo inverse)를 이용하여 2대의 출력전류 기준신호를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} i_{ab}^* \\ i_{bc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} \quad (\text{c-a상간 시스템 정지}) \quad (6)$$

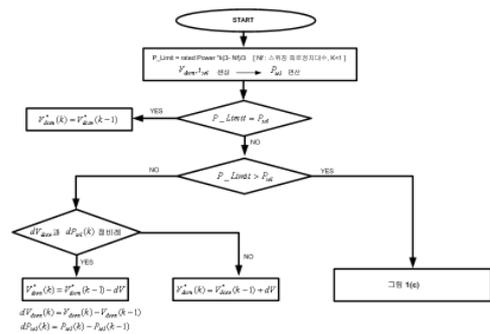
상기와 같은 방법으로 각각 b-c 선간의 시스템, a-b 선간의 시스템 정지시 운전되는 시스템의 전류 기준신호는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{bmatrix} i_{ab}^* \\ i_{ca}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} \quad (\text{b-c상간 시스템 정지}) \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} i_{bc}^* \\ i_{ca}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} \quad (\text{a-b상간 시스템 정지}) \quad (8)$$



(a) 제어계 구성



(b) 변형된 MPPT부

그림 3 제안된 모듈형 PCS 제어계통

그림3은 제안된 PCS의 제어계통을 나타낸다. 제어계통에서 전류 기준 신호부는 선전류 기준 신호 발생부 및 각 상간 시스템 기준신호로의 변환부로 구성되며 MPPT에는 그림3(b)와 같이 출력 제한 기능이 추가된다. 그림1(a)와 같이 구성되는 시스템은 스위치 회로를 구성하는 스위칭 소자 중 1개의 이상이 발생시 시스템은 발전을 멈추어야한다. 그림2와 같이 제안된 시

시스템은 1대의 스위칭 회로에 이상이 발생시 이상 회로를 MCCB를 이용하여 분리한 후 2대로 3상 운전이 가능하다. 그리고 이러한 가능성은 3대가 정상일 경우에서도 PV-array 출력이 정격의 2/3이하로 저하시 2대의 운전을 실시하여 저출력 영역에서 효율 향상을 기대할 수 있다.

3. 결 과

제안된 시스템의 타당성을 검증하기 위해 Powersim사의 PSIM을 이용하여 다음과 같은 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다.

표 1 시뮬레이션 조건

계통 조건	380[V], 60[Hz]
변압비(1:n)	1:0.7
DC 전압	700[V]
샘플링 주파수	8[kHz]
스위칭 주파수	4[kHz]
데드타임	4[μsec]
전류제어기 연산 지연시간	80[usec]
정격 PV-array 출력	200[kW]
전류제어기	데드비트 PI 전류제어기 ^[4]

시뮬레이션에서 PV-array는 다음 식을 이용하였다^[5].

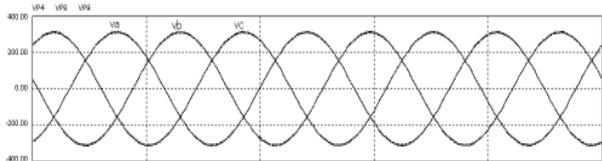
$$i_{sol}(t) = i_{sc} [1 - \exp(k(\frac{v_{sol}(t)}{V_{oc}} - 1))] \quad (26)$$

여기서 V_{oc} : PV-array 개방전압

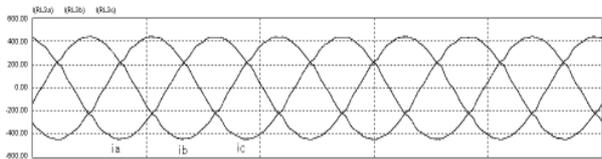
i_{sc} : 일사량에 따라 변화하는 PV-array 단락 전류

k : Fill Factor 조정 계수 (시뮬레이션 시 13.398)

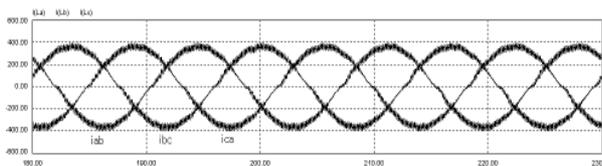
그림4는 200[kW] 출력 시 정상상태 정상상태 계통측 각 부 파형을 나타낸다. 선전류는 상전압과 단위역율로 운전되고 있음을 알 수 있으며 스위칭 회로의 전류 리플은 제거되어 있음을 알 수 있다.



(a) 입력 전압



(b) 각 상 선전류

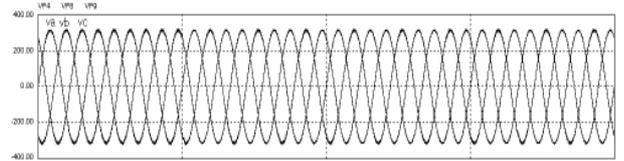


(c) 스위칭 회로 출력 전류

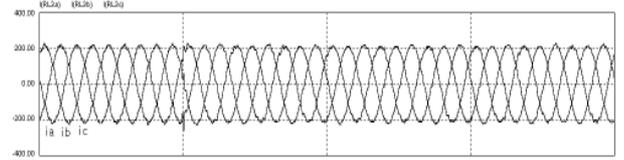
그림 4 정상상태 계통측 각 부 파형

그림5는 100[kW](50%)출력 시 3대 운전모드에서 c-a 상간

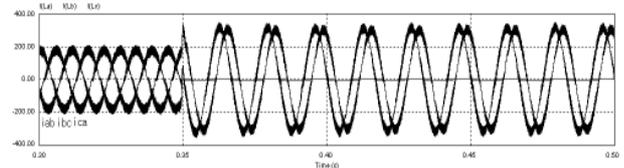
의 시스템의 운전을 중지 시킬 경우 2대 운전모드로의 전환 특성을 보인다. 그림5(c)를 통해 스위칭 회로 한 대의 출력전류가 영이 되고 두 대의 시스템이 발전을 함을 알 수 있다. 그리고 그림5(b)를 통해 각 상의 선전류는 일정하게 유지됨을 볼 수 있다.



(a) 입력 전압



(b) 각 상 선전류



(c) 스위칭 회로 출력 전류

그림 5 3대에서 2대 운전 모드로 전환시 계통측 각 부 파형

4. 결 론

본 연구에서는 계통연계형 태양광 시스템용 모듈형 3상 PCS 및 제어기법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 타당성을 확인하였다. 결과를 통하여 제안된 PCS는 기존의 PCS에 비해 2대 협조에 의한 3상 운전이 가능하므로 시스템의 안정성 면에서 유리함을 알 수 있었다. 그리고 효율적으로 운전 주파수가 스위칭 주파수의 2배가 되므로 스위칭 주파수를 높이기 어려운 대용량 시스템에 적용이 유리한 효과 및 저출력 영역에서 효율을 높힐 수 있는 효과를 부가적으로 기대할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 대체에너지이용 발전전력의 기준가격 지침, 산업자원부고시 제2003-61호(2003. 10. 9)
- [2] D. Kastha, B.K. Bose, "Investigation of fault modes of voltage-fed inverter system for induction motor drive," IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.30,no.4, pp.1028-1038, July, 1994.
- [3] Ned Mohan, "Power Electronics", WILEY, pp. 119~121, 1989.
- [4] 조준석, 이승요, 김홍성, 최규하, "3상 UPS의 정전압 출력 특성 향상을 위한 개선된 데드비트 디지털 제어기 설계", 전력전자학회 논문지, 제5권, 제 1호, pp.1~10, 2002.
- [5] 김홍성, "삼상 계통연계 태양광 발전 시스템의 제어기 설계", 1998 건국대학교 박사학위 청구논문.

본 연구는 전력기반조성 사업센터 전력산업 연구개발사업 연구비 지원으로 수행되었습니다.