

# 모듈형 3상 계통연계 태양광 발전용 PCS의 DC link 커패시터 수명진단을 위한 비침투 Capacitance 연산법

김 홍 성   길 서 종   윤 여 영   정 재 기  
한빛EDS(주)

## Non-invasive Capacitance Calculation Method for Life Estimation of DC Link Capacitor of Module Type 3-Phase PCS for UIPV System

Hong-Sung Kim   Seo-Jong Gil   Yeo Young Yoon   Jae-Kee Jeong  
Hanbit EDS Co., Ltd.

### ABSTRACT

태양전지 어레이(PV-array)로부터 발전되는 DC 전력을 AC로 변환시켜 계통으로 발전시키는 역할을 하는 태양광 발전 시스템용 PCS의 스위칭 회로 Topology로는 일반적으로 3상 풀브리지 회로가 사용된다. 이러한 3상 풀브리지 회로 시스템의 수명예측을 위해 DC link 단의 커패시터의 커패시턴스를 계산하여 커패시턴스의 감소정도를 이용하여 전체 시스템의 수명을 예측하게 된다. 이러한 커패시터의 상태를 추정하기 위해서는 시스템을 정지시킨 후 커패시터를 분리하여 커패시턴스를 측정하는 방법, 특정 주파수의 전류(일반적으로 저주파)를 주입하고 주입한 전류의 주파수에 해당하는 전류 및 전압을 검출하여 capacitance 연산하는 방식 등이 이용된다. 시스템을 정지시킨 후 커패시터를 분리하여 커패시턴스를 측정하는 방법은 번거로우며, 전류 주입을 이용한 방식은 불필요한 고조파 전류가 계통으로 침투하는 단점을 가진다. 그러므로 본 연구에서는 모듈타입 PCS 이용시 계통으로 고조파 침투가 없는 비침투 커패시턴스 계산 알고리즘을 제안한다.

### 1. 서 론

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<sup>[1]</sup>.

일반적으로 3상 계통연계형 PV 시스템용 PCS는 그림1과 같은 2-레벨 인버터 회로를 채용하고 AC 출력 선전류의 제어를 통하여 PV-array의 DC 출력을 계통측으로 발전시키는 형태로 구성된다. 이러한 전력변환 회로는 스위칭 회로의 한압에서 고장 시 시스템의 정상적인 발전이 어려운 단점을 가진다<sup>[2]</sup>. 그리고 시스템 수명예측을 위해 이용되는 방법중 하나인 DC link 커패시터의 커패시턴스 연산시 전원에서 시스템 측으로 고조파 전류의 주입이 필요하다<sup>[3]</sup>.

본 연구에서는 스위칭 회로에 문제가 발생한 경우에도 시스템의 운전을 일정 범위내에서 수행할 수 있는 모듈형 PCS에 적용 가능한 비침투 DC link 커패시터 용량 추정법을 제안하고 실험결과를 통해 타당성을 제시한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 일반적인 3상 PCS 구성<sup>[4]</sup>

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

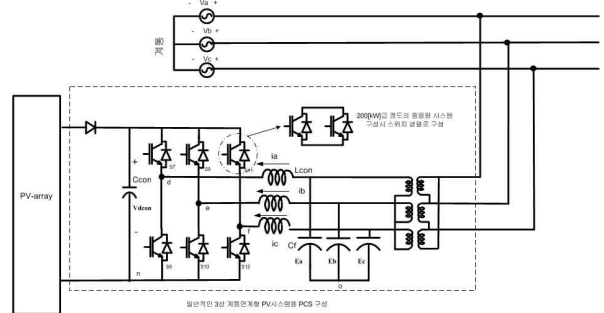


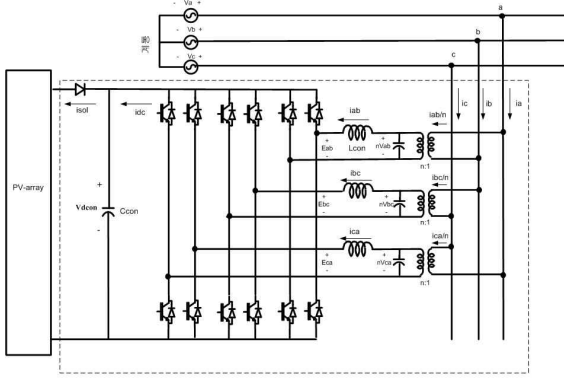
그림 1 일반적인 3상 PCS의 전력회로

#### 2.2 모듈형 3상 PCS<sup>[5]</sup>

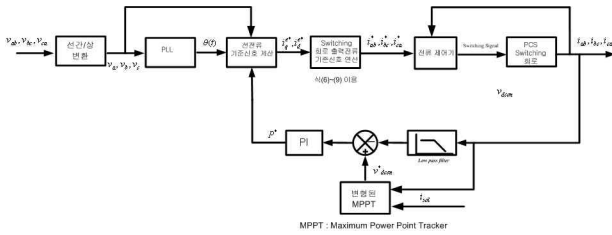
그림 2는 제안된 3상 PCS의 전력회로 및 제어계통을 나타낸다. 전력회로는 그림2(a)와 같이 DC 링크단을 공유하는 3대의 단상 풀브리지 회로를 3상 전원의 각 상간에 연결하는 방식으로 구성되며 1상의 스위치 고장시에는 출력을 2/3 이하로 제한하고 2대의 시스템을 통하여 3상 운전이 가능하며 2대 이상시는 단상 운전도 가능하며 그림 2(b)에서 전류 기준 신호는 표 1과 같이 연산된다.

표1 모듈형 PCS의 상간 시스템 전류 기준 신호 계산식

3대 운전시	$\begin{bmatrix} i_{ab}^* \\ i_{bc}^* \\ i_{ca}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix}$
c-a상간 시스템 정지	$\begin{bmatrix} i_{ab}^* \\ i_{bc}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix}$
b-c상간 시스템 정지	$\begin{bmatrix} i_{ab}^* \\ i_{ca}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix}$
a-b상간 시스템 정지	$\begin{bmatrix} i_{bc}^* \\ i_{ca}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -2 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix}$



(a) 전력회로



(b) 제어계통

그림 2 모듈형 PCS의 전력회로 및 제어계통

### 2.3 비침투 DC 링크 커패시터 용량 추정 방법

각 상간 스위칭 회로 출력 전류의 기준신호를 다음과 같이 제어하면,

$$i_{ab} = I_m \cos(n\omega t) \quad (1)$$

$$i_{bc} = I_m \cos(n\omega t) \quad (2)$$

$$i_{ca} = I_m \cos(n\omega t) \quad (3)$$

다음과 같이 표현되는 각 상의 선전류는 0이 된다.

$$i_a = i_{ab} - i_{ca} \quad (4)$$

$$i_b = i_{bc} - i_{ab} \quad (5)$$

$$i_c = i_{ca} - i_{bc} \quad (6)$$

PCS의 입력 전압을 다음과 같이 가정하고

$$v_{ab} = V_m \cos(\omega t) \quad (7)$$

$$v_{bc} = V_m \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \quad (8)$$

$$v_{ca} = V_m \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \quad (9)$$

스위칭 손실을 무시하고 식(1)~(3), 식(7)~(9)을 이용시 PCS의 DC link단 입력 전력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{dc} = v_{ab}i_{ab} - \frac{1}{2}L_{con}\frac{d}{dt}i_{ab}^2 + v_{bc}i_{bc} - \frac{1}{2}L_{con}\frac{d}{dt}i_{bc}^2 + v_{ca}i_{ca} - \frac{1}{2}L_{con}\frac{d}{dt}i_{ca}^2 = -\frac{3}{2}L_{con}I_m^2 n\omega \sin(2n\omega t) \quad (10)$$

PV-array의 출력 전류(isol)가 영이라고 가정하면 - 즉 PV-array 발전 양도록 함 -DC Link 단에서의 전력 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{2}C_{con}\frac{d}{dt}V_{dcon}^2 = P_{dc} \quad (11)$$

그러므로 식(10), (11)을 이용하면 정상상태에서 DC link 전압은 다음과 같다.

$$V_{dcon} = \sqrt{V_{dcono}^2 - \frac{3}{2C_{con}}L_{con}I_m^2 \sin(2n\omega t)} \quad (12)$$

여기서  $V_{dcono}$  :  $V_{dcon}$ 의 초기치 (DC link 전압의 DC 성분으로 볼 수 있음)

식 (3-2-28)을 통해 식(3-2-17)~(3-2-19)와 같이 주파수가  $n\omega$ 인 영상분 전류가 흐르도록 제어하면 DC link 단 전압  $V_{dcon}$ 에는  $2n\omega$  성분의 리플 전압이 발생함을 알 수 있다.

이는 DC link 단으로  $2n\omega$  성분의 전류가 주입되어  $2n\omega$  성분의 리플 전압이 발생한 것으로 해석될 수 있으며, 이러한 결과를 통해 식(3-2-17)~(3-2-19)과 같이 전류 제어시 계통으로는 영향이 없으며, DC link 단으로 임의의 주파수 성분을 주입할 수 있음을 알 수 있다.그러므로 DC link 입력전류(idc)에 포함된 스위칭 회로 입력 전류의 2배 주파수( $2n\omega$ ) 성분 및 리플 전압을 검출하여 실효치를 계산하면 다음과 같이 DC link 커패시터의 capacitance를 연산할 수 있다.

$$C_{con} = \frac{I_{2n\omega}}{2n\omega V_{2n\omega}} \quad (13)$$

여기서  $I_{2n\omega}$  : DC link 단에 포함된  $2n\omega$ 성분 전류의 실효치

$V_{2n\omega}$  : DC 전압에 포함된  $2n\omega$ 성분 전압의 실효치

식(13)에서  $V_{2n\omega}$ 는 그림 3과 같이 DC link 전압  $V_{dcon}$ 을 중심 주파수가  $2n\omega$ 인 대역통과 필터를 통과 시킨 후 구한 전압을 이용하여 연산된다. 실제 구현시 DC link 단은 Stray inductance를 최소화 하기위해 동관을 이용하여 구성하므로 DC link 입력전류(idc)를 검출 하는 것은 불가능하므로 다음과 같이 계산하여 사용한다.

$$\hat{i}_{dc} = \frac{(E_{ab}^*i_{ab} + E_{bc}^*i_{bc} + E_{ca}^*i_{ca})}{V_{dcon}} \quad (14)$$

여기서  $V_{dcon}$  : 저역통과 필터링 된 DC link 전압

$\hat{i}_{dc}$  : 연산된 DC link 전압

$I_{2n\omega}$ 는 상기와 같이 구해진 DC link 전류를 중심 주파수가  $2n\omega$ 인 대역통과 필터를 통과 시킨 후 구한 전류를 이용하여 연산된다.

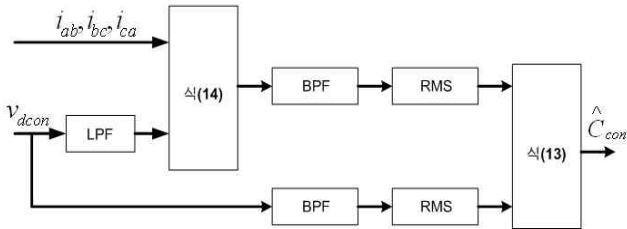


그림 3 커패시터 용량 계산 블록 다이어그램

### 3. 결과 및 결론

제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 다음과 같은 조건에서 실험을 수행하였으며 그림4는 실험에 이용된 시스템 사진이다.

표 2 시험 조건

계통 조건	380[V], 60[Hz]
변압비(1:n)	1:0.7
DC 전압	550[V]
샘플링 주파수	8[kHz]
스위칭 주파수	4[kHz]
DC 링크 커패시터	55000[μF] (LCR 메터 이용 측정치)
영상분 주파수	5[Hz]

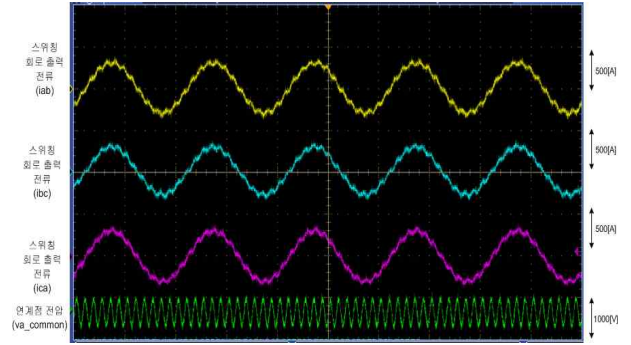


그림 4 실험 장치 사진

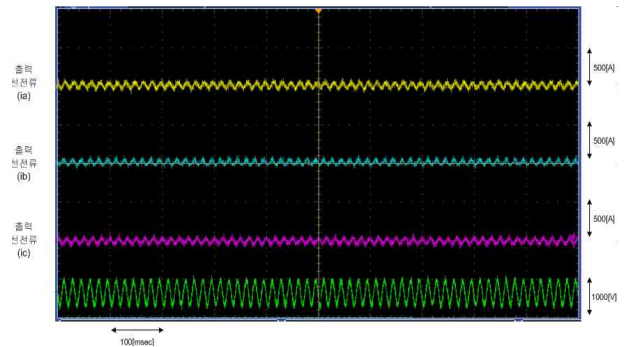
그림 5(a)는 영상분 전류의 피크치를 300[A]로 운전시 식(1)~(3)과 같이 표현되는 영상분 전류 파형을 나타낸다. 맨 밑의 파형은 60[Hz] 계통 전압을 나타내며 영상분 전류의 주파수가 낮음을 알 수 있다. 그림 5(b)는 선전류 및 계통전압 파형으로 선전류에는 저주파 영상분이 나타나지 않음을 볼 수 있다. 선전류는 60[Hz]성분으로 직류 전압 충전을 위해 필요하며, 그림 5(a)의 상간 시스템 출력 전류의 저주파 리플로 나타남을 알 수 있다. 표 3은 영상분 전류의 크기와 커패시턴스 추정 결과간의 관계를 보여 준다. 영상분 피크치가 300[A](피크값)일 경우 오차율 1.4[%] 정도의 오차로 추정됨을 볼 수 있으며 영상분 전류가 적을 수록 오차율이 커짐을 알 수 있다.

표 3 영상 분 전류 및 커패시턴스 추정 결과

영상분 전류값(피크값)[A]	200	250	300
추정된 커패시터 용량[μF]	46150	52990	54700
오차율[%]	17	4.7	1.4



(a) 영상분 전류 및 계통 전압 파형



(b) 선전류 및 계통 전압 파형

그림 5 커패시턴스 용량 추정 운전시 영상분 전류 및 선전류 파형

본 연구에서는 태양광 시스템용 모듈형PCS의 수명 진단을 위하여 비침투 DC link 커패시터 용량 추정법을 제안하고 실험을 통해 타당성을 검증하였다. 2% 이내의 추정오차로 계산 가능함을 통해 향후 PCS 유지보수 시점 제안을 위한 가이드 라인을 제시하는 용도로 제안된 방법이 효과적으로 이용될 수 있을 것이다.

본 연구는 전력기반조성 사업센터 전력산업 연구개발사업 연구비 지원으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- [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] 이강주, 이동춘, 석줄기, "입력전류 주입을 이용한 3상 AC/DC/AC PWM 컨버터의 직류링크 커패시터 용량 추정" 전력전자학회 논문지, 제8권, 제2호, 2003.
- [4] 김홍성, "삼상 계통연계 태양광 발전 시스템의 제어기 설계," 1998년, 건국대학교 박사학위 청구논문.
- [5] 김홍성, 정계기, 이인성, "모듈형 3상 계통연계 태양광 발전 시스템용 PCS 및 제어방식", 전력전자 추계학술대회, 2008년.