

전원측 무효전력 보상기능을 갖는 계통연계형 태양광 발전 시스템의 해석 및 설계

이상용, 고재석, 한찬영, 이정락, 최규하, 목형수
건국대학교 전기공학과

Analysis and Design of Utility Interactive Photovoltaic System with Source Side VAR Compensation

J.S. Gho, S.Y. Lee, C.Y. Han, J. R. Lee, G.H. Choe, H.S. Mok
Dept. of Electrical Eng. Konkuk Univ.

ABSTRACT

The application field of photovoltaic system has been increased widely. In the application of photovoltaic system, the utility interactive photovoltaic system(UIPVS) has benefits of not only the home energy saving in domestic system but also reduction of peak power which threaten the capacity of power plant equipment when the maximum power consumption is occurred in daytime. This paper represents the effect of the nonlinear AC load which connected to the UIPVS with parallel connection and introduces the active power filtering(APF) techniques to the UIPVS for the reactive power compensation. The enhancement of source side power quality using APF algorithm is verified using simulation.

1. 서론

태양광 발전 시스템은 계통과 연계 유무에 따라 계통연계형과 독립형으로 크게 분류가 되고 독립형은 계통과 분리되어 태양광 발전에 의해서만 전력을 부하에 공급하는 시스템을 말하며 시스템에 따라 에너지축적 시스템과 연계시키기도 한다. 반면에 계통연계형 태양광 발전 시스템은 일일발전량 추이가 첨두 전력 삭감(Peak power cutting)에 적합한 형태를 가지며 에너지축적 시스템 없이 발전 전력을 계통 또는 계통과 병렬로 연결된 부하로 공급할 수 있다.[1]

또한 교류측에 비선형 부하가 연결될 경우 부하에서 발생하는 고조파 전류분은 통신선로의 유도장애 및 반도체 제어장치의 오작동을 일으키며, 유효전력만 계통에 공급하는 발전 시스템은 전원측 역률을 저감시키는 문제점이 있다.[2]

따라서 태양광 발전 시스템이 부하가 요구하는 무효 전력을 보상하며 전원측으로 유효전력을 공급하게 되면 전원측 역률이 향상될 것이다. 본 논문을 통해 태양광 발전 시스템이 계통연계시 교류측 비선형 부하를 갖는 경우에 야기되는 전원측 역률에 미치는 영향에 대해 기술하였으며, 이에 대한 대책으로서 이미 많은 연구가 이루어진 무효전력보상기법을 태양광 발전 시스템에 도입하고 그 효과에 대하여 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

2. 계통연계형 태양광 발전 시스템

그림1은 일반적인 계통연계형 태양광 발전 시스템이다.

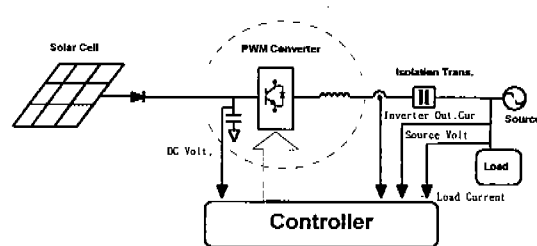


그림 1. 계통연계형 태양광 발전 시스템

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 태양전지에서 일사량에 따른 출력을 얻고 컨버터를 통하여 교류로 변환하여 절연변압기를 통하여 계통에 연계하게 된다.

태양광 발전 시스템은 기본적으로 일사량에 따른 최대전력점 추적과 단위역률 유지기능, 그리고 사고에 대한 대책으로서 보호장치를 갖추고 있어야 한다.[3] 태양전지의 출력은 계속적으로 변동되는 일사량에 의하여 변동되게 되며 최대전력을 발생할 수 있는 태양전지의 동작점도 이에 따라 변동 되게 된다. 따라서 최대의 태양전지 출력을 얻기 위해서는 일사량 변화에 따른 최대 전력점 추적기능이 필요하다.[4] 또한

과전압, 부족전압, 과전류등에 관한 여러 가지 보호장치는 태양광 발전 시스템에도 적용되어야 하며, 특히 전원측이 사고 또는 수리등의 이유로 계통과 분리되었을 때 태양광 발전 시스템은 이를 검출하여 운전을 정지하여 인명 및 시스템을 보호하여야 한다.[5]

단위역률의 유지는 지금까지는 컨버터 출력단의 역률향상에만 연구자들의 관심이 집중되었지만 최근에는 교류측 비선형 부하가 태양광 발전 시스템의 출력과 병렬로 운전될 경우 전원의 관점에서 단위역률 유지에 대한 연구에 연구자들의 관심이 집중되고 있다.

3. 시스템 모델링(2,6)

태양전지는 일사량과 온도에 따라서 출력 특성이 변동되며 다음과 같이 간략하게 모델링된다.

$$I_{sol} = I_{sc} \left\{ 1 - e^{k \left(\frac{V_{sol}}{V_{oc}} - 1 \right)} \right\} \quad (1)$$

이때 I_{sc} 는 태양전지 단락전류로서 온도와 일사량의 함수이며 V_{oc} 는 태양전지 개방전압으로서 온도의 함수이다. I_{sol} , V_{sol} 는 태양전지 출력전류, 전압을 나타낸다.

컨버터부는 KVL, KCL 방정식에 의해 다음과 같이 식 (2)와 (3)로 표현할 수 있다. 특히 컨버터 출력전류를 정현파로 가정할 때 식 (4)의 표현이 가능하다. 즉, 변조지수 및 전원전압과의 위상차를 제어함으로 해서 전원측 전류를 제어할 수 있다.

$$v_s(t) = L \frac{di_s(t)}{dt} + Ri_s(t) + v_{con}(t) \quad (2)$$

$$C \frac{dv_{dc}(t)}{dt} = i_{dc}(t) + i_{sol}(t) \quad (3)$$

$$v_{con}(t) = d \sin(\omega t - \delta) v_{dc}(t) \quad (4)$$

$v_s(t)$: 전원 전압, $i_s(t)$: 전원 전류

$v_{con}(t)$: 컨버터 전압

d : 변조지수, δ : 전원전압과의 위상차

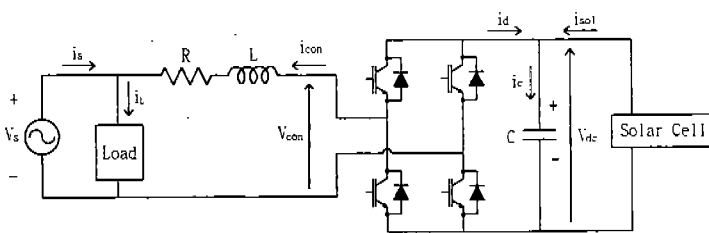


그림 2. 계통연계형 태양광발전 시스템 회로도

4. 계통연계 태양광 발전시 무효전력 보상

태양광 발전시스템에서의 무효전력의 보상은 이미 많이 연구되어진 무효전력 보상기법의 응용분야중 하나로서 계통측에서의 역률 향상을 목적으로 한다.

전원측 역률을 결정하게 되는 요소들은 기본파 유효 성분 전류 및 기본파 무효성분 전류, 고조파전류이며, 기본파 무효성분 전류와 고조파전류를 보상하여 계통측 역률을 향상 시킬 수 있다. 태양광 발전 시스템을 계통과 연계하여 사용할 때 전원측 위상과 동상인 유효성분만을 출력하는 태양광 발전 시스템은 전원공급자 입장에서 바라볼 때 공급해야될 무효전력은 일정하고 유효전력은 감소한 것을 의미하며 그림3과 같이 역률의 감소를 가져온다.[2]

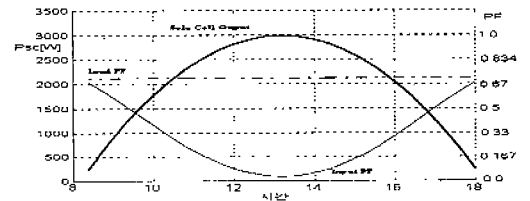


그림 3. 태양광 발전시스템을 단위 역률로 운전할 경우 태양광 발전출력에 따른 입력측 역률 저하 추이

본 논문에서는 계통연계형 태양광발전 시스템에 전원측 무효전력 보상기능을 추가하였고 그림 4을 통해 시스템 해석이 가능하다.

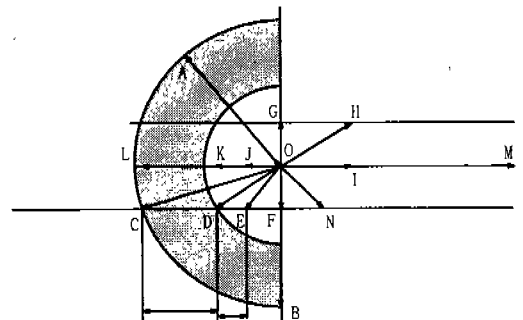


그림 4. 시스템 기본파 전압, 전류 벡터도

\overline{OM} : 전원전압

\overline{OH} : 부하전류

\overline{OI} , \overline{OG} : 부하전류 유효분, 무효분

\overline{OA} : 태양전지 출력의 크기

\overline{OE} , \overline{OD} , \overline{OC} : 인버터 출력전류

\overline{OJ} , \overline{OK} , \overline{OL} : 인버터 출력전류 유효분

\overline{OF} : 인버터 출력전류 무효분

\overline{CD} : \overline{OC} 운전시 계통반환 유효전류분
 \overline{DE} : \overline{OE} 운전시 계통제공 부하 유효전류분

대상 시스템은 전력저장소자를 사용하지 않았으므로 태양전지 출력의 크기에 따라 보상 가능한 기본과 무효전력 및 고조파 무효전력의 크기는 제한된다. 하지만 고조파 무효전력량은 보상해야 될 기본과 무효전력량에 비해 상대적으로 작다고 가정하고 용량설정 고려대상에서는 기본파의 유효성분 및 무효성분을 벡터 해석에서 고려해보았다.

그림4에서 인버터 최대출력의 크기는 전력의 흐름이 태양전지에서 부하쪽으로 향할 때 \overline{OA} 로 제한된다. 동시에 전원측의 입력역률을 단위역률로 유지하기 위해 인버터 출력은 \overline{OG} 를 보상하기 위한 \overline{OF} 의 무효전류분의 발생이 예상되며 이때 태양전지 최대출력을 활용한다면 인버터 출력전류는 \overline{OC} 가 될 것이다.

만약 태양전지출력을 모두 무효전류분의 보상에만 사용한다면 이 경우에 최대 보상가능한 무효전력량은 식(5)와 같이 태양전지의 출력과 일치한다.

$$Q_{comp} = P_{sol} \quad (5)$$

Q_{comp} : 최대보상가능 무효전력

P_{sol} : 태양전지출력

만약 태양전지의 출력이 없고 DC전압을 일정하게 유지하는 경우에 인버터 출력전류는 \overline{ON} 이 될 것이 예상되며 이 경우에 지속적으로 보상가능한 무효전력량은 식(6) 와 같다.

$$Q_{comp} = P_c \times \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

P_c : 컨버터 용량

따라서 태양전지 최대출력과 동일한 용량의 컨버터라고 가정할 때 상시 보상할 수 있는 무효전력량은 컨버터 용량의 $1/\sqrt{2}$ 배라는 기본과 무효성분만을 고려한 해석이 가능하다. 이와 같은 해석에 기초해서 컨버터의 용량은 태양전지의 최대 출력보다는 크고 보상해야 될 무효전력보다는 $\sqrt{2}$ 배가 커야된다.

고조파를 포함한 무효전력의 보상은 부하전류의 무효분을 검출하여 이를 보상하는 컨버터 출력을 발생 시킴으로서 가능하며 부하측 전류를 기본파성분 및 고조파성분으로 푸리에 급수로 표현하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$i_L(t) = \sqrt{2} I_{L1} \sin(\omega_1 t - \varphi_1) + \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2} I_{Lhn} \sin(\omega_n t - \varphi_n) \quad (7)$$

식 (7)에 전원측 전압과 동상이며 크기가 2인 정현파를 곱하면 다음과 같은 식을 얻을 수가 있다.

$$2i_L \sin \omega t = \sqrt{2} I_L \cos \varphi_1 (1 - \cos 2\omega t) + \sqrt{2} I_L \sin \varphi_1 \sin 2\omega + 2 \sin \omega t \sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2} I_{Lhn} \sin(n\omega t - \varphi_n) \quad (8)$$

식 (8)에서 부하전류의 기본과 전류 실효치 I_{L1} 은 직류성분이므로 저역 필터를 통하여 여과해 낼 수가 있고, 여기에 다시 정현파를 곱하여 부하전류에서 빼면 보상해야 될 고조파 전류를 얻을 수가 있다. 이 방법을 푸리에 해석에 의한 고조파 분리라고 한다.[7]

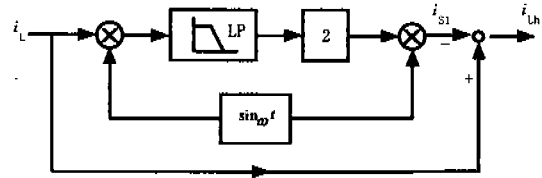


그림 5 . 무효전력 검출 방법

5. 시뮬레이션 및 검토

시뮬레이션에 적용된 시스템 사양은 표 1 과 같다. 표에 주어진 바와 같이 교류측 부하를 태양광 최대 출력의 1/2로 하였다. 그림 6은 제어기의 흐름도이며 DC링크 전압제어기와 전류제어기, 고조파 분리 알고리즘 및 보상 과정에 대해서 보여주고 있다. DC 링크 전압제어기에 의해 유효성분 전류의 크기를 계산하고, 고조파 보상기에 의해 보상해야 될 무효성분 전류를 주입한다. 또한 고조파 전류의 실효치를 계산하여 유효성분 전류의 크기에 더하여 주는 전향(Feed-forward) 부분이 있음을 보여준다.

그림7, 8은 태양광의 출력이 최대 출력일 때와 출력이 영 일때의 무효전력보상을 보여준다. 출력 상태에 관계없이 고조파 보상을 하고 있는 것을 알 수 있다. 그림 9, 10은 고조파를 보상하지 않을 때와 보상할 때의 전원측 전류의 푸리에 스펙트럼을 보여주고 있다. 무효전력의 보상후에 3차, 5차, 7차의 저차 고조파의 감소를 확인할 수 있고 보상전 3차 3.68, 5차 0.952, 7차 0.503 이었던 고조파 성분은 보상후 각각 0.682, 0.277, 0.123으로 삭감되었으며 스위칭 주파수의 1/10배 이상의 고차고조파는 보상할 수가 없었다. 또한 보상후에 역률은 88.8%에서 99.9%로 개선되었다.

6. 결 론

본 논문을 통하여 계통연계형 태양광 발전 시스템이 비선형 교류측 부하를 가질 때 발생하는 전원측 역률 저하에 대하여 기술하였으며, 태양광 발전 시스템이 무효전력 보상기능을 가질 때 컨버터 용량과 무효전력량과의 관계를 고찰하였고, 푸리에 해석에 기초한 고조파 검출 알고리즘을 적용하여 고조파 보상기능에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 전원측 역률 향상 및 THD를 저감할 수 있었다.

차후의 연구로는 실험에 의해 시뮬레이션 결과를 검증하고 무효전력보상기능을 수행할 때 독립운전방지 및 최대 전력점 추적등의 기능에 미치는 영향에 대한 고려가 필요하다고 본다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김홍성, "3상 계통연계 태양광 발전 시스템의 제어기 설계", 건국대학교 대학원, 1998.
- [2] 조영준, "계통연계형 태양광 발전 시스템에서의 입력 역률 개선", 건국대학교 대학원, 1997.
- [3] 고 요, "분산형 전원의 계통연계 기술", 전기학회지, 45권 1호, PP. 10-12, 1996.
- [4] Huan Dong and Hidehiko Sugimoto, "A New Utility Interactive Photovoltaic Power Conditioning System and Its Maximum Power Tracking Control", IPEMC 97, PP. 238-243, 1997.
- [5] 고재석, "계통연계형 태양광 발전시스템을 위한 새로운 역충전 방지 알고리즘 및 디지털 제어기 설계", 건국대학교 대학원, 1996.
- [6] 유권중 외 7명, "최대전력제어를 위한 PSPICE의 태양광 어레이 모델링", '96'전기학회 하계학술대회, PP. 540-542, 1996.
- [7] Sebastian Tepper, "A Simple Frequency Independent Method For Calculating The Reactive And Harmonic Current In A Nonlinear Load", IPEC-Yokohama 95, PP. 370-375, 1995.

표 1. 시스템 사양

Solar Cell 최대출력	3[KW]
부하	1.5[KW]
입력전압	220[V]
DC전압	350[V]
L,C	2[mH], 7050[μ F]
스위칭 주파수	10 [KHz]

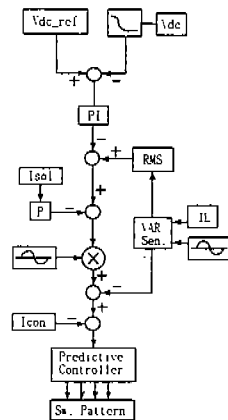


그림 6 . 시뮬레이션에서 사용된 제어 흐름도

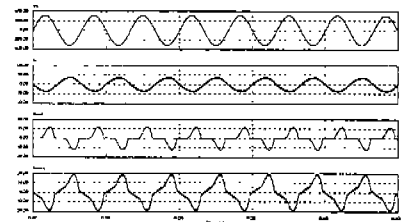


그림 7 . Psol = 3KW일 때 전원전압, 전원전류, 부하전류, 컨버터 출력전류

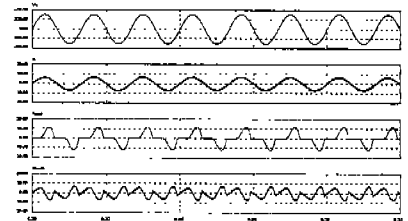


그림 8 . Psol = 0KW일 때 전원전압, 전원전류, 부하전류, 컨버터 출력전류

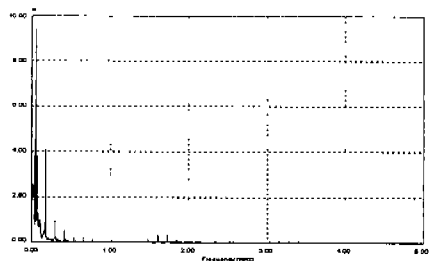


그림 9 . 무효전력 보상 전 입력전류 FFT

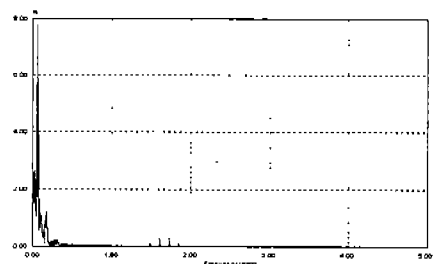


그림 10 . 무효전력 보상후 전원전류 FFT