

액티브필터 기능을 추가한 새로운 태양광 발전시스템의 제안

김 봉 태*, 박 민 원**, 성 기 철***, 유 인 근*
 *창원대학교, **오사카대학, ***한국전기연구원

Novel Concept of Shunt Active Filter Function Added in PV Generation System

Bong-Tae Kim*, Minwon Park**, Ki-Chul Seong***, In-Keun Yu*
 *Changwon National University, **Osaka University, ***KERI

Abstract - Novel concept of shunt active filter (AF) function added in photovoltaic (PV) generation system is described in this paper. So far, for the PV generation system has been treated as one of harmonic sources to the power distribution systems, not only a PV system combined with AF but also AF systems using PV module as their power source have never been discussed. The basic structure and control strategy of the PV-AF system are, for the first time, introduced in this work. In order to stabilize the output current of voltage source inverter (VSI), the reference voltage MPPT control is applied. Simulation analysis shows that it is possible to combine AF function to the three-phase grid-connected PV generation system without any physical difficulties, and the performance of the proposed PV-AF system is acceptable and stable as well.

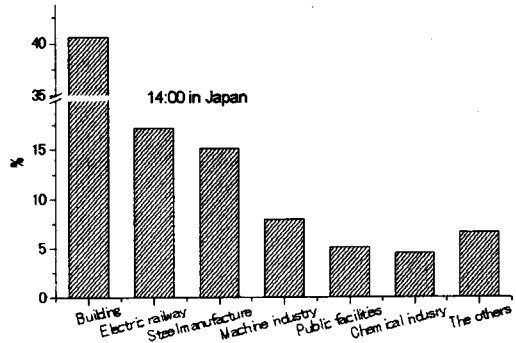


그림 2 배전선로에서의 고조파원들

고전력 소비자들에 의해 확인된 개개의 비선형부하들이 계통에 설치되었기 때문에 고전력 다이오드/사이리스터 정류기, cyclo컨버터, 그리고 아크로는 고조파를 발생시키는 부하들임을 증명하였다. 확인되지 않은 부하들의 경우, 단일 저전력 다이오드정류기의 고조파전류는 대수롭지 않지만 다수의 저전력 다이오드정류기들은 배전계통으로 많은 고조파를 유입시킨다. 주거지역의 5차 고조파의 최대값은 4%를 초과하였고 THD는 한계 5% 보다 작다. 그리고 Oku등은 일본에 고조파오염의 심각한 상태를 보고하였다[1-2]. 소비자중에서도 배전선로에서 피크시간에 측정된 빌딩시스템은 그림 2에서 보여주는 것 같이 고조파 관점에서 보면 배전선에 가장 취약하다. 한편, 배전계통에서의 고조파를 보상하기 위한 능동필터는 전력전자기술에 의해 급속하게 확장되었다. 능동필터의 기초보상개념은 약 1970년에 제안되었고 그 이후에 많은 연구와 능동필터에 실제적인 적용을 하게 되었다 [3-7]. 개개의 소비자들에 의해 설치된 능동필터의 주목적은 고조파발생 부하들의 전류 고조파 또는 전류 불균형을 보상하기 위한 것이다. 가까운 미래에 계통에 설치되어진 능동 필터의 근본적인 목적은 전압 고조파나 전압 불균형 또는 배전계통에 고조파를 제공하는 것에 대한 보상을 위한 것일 것이다. 저자는 태양광 발전시스템의 전력변환기에 능동필터기능을 포함하는 새로운 개념을 제안하였다. 빌딩에는 이미 계통연계된 태양광발전시스템이 많이 있다. 본 논문에서는 빌딩에 설치된 태양광발전시스템의 전력변환기에 병렬 AF기능을 가진 다중 기능 인버터 제어방법으로 기준전압 MPPT 제어기법을 이용하여 개발하였다. 그리고 계통연계된 3상 태양광발전시스템에 능동필터기능을 추가하는 것과 더불어 PV-AF 시스템현실화 가능성을 시뮬레이션 결과로 보여 주었다.

1. 서 론

태양광 발전시스템은 무공해 대체전력 전원으로써 많은 주목을 받고 있으며 활발한 연구가 진행되고 있다. 특히 계통연계형 태양광 발전시스템의 유용성과 높은 효율성 때문에 급속한 보급이 예상되고 있다. 그러나, 태양광 발전시스템의 핵심장비인 계통연계형 인버터의 경우, 기상조건에 따라 이용율이 변화할 뿐만 아니라, 야간에는 전혀 동작을 하지 못하므로 인한 낮은 기기 이용율이 결점으로 남아있다. 한편 전력전자기술의 현저한 발전으로 정전력 변환기들과 같은 비선형 부하가 급증하여 배전계통에 전력품질을 저하시키고 있다. 특히, 여러 나라에서 심각한 문제가 되고있는 전압고조파는 비선형 부하에 의한 전류고조파로부터 발생된다. 그림 1에서 보여주는 것처럼 전력공급자는 소비자에게 고조파가 없는 정현파전압원을 공급해야할 책임이 있고, 소비자는 가능한한 정현파 전류를 발생해야한다. 어느 경우나 비선형부하는 확인된 부하와 비확인된 부하로 각각 분류되었고 요즘은 계통에서 비정현파 전류를 끌어내는 것은 비선형 부하들이다.

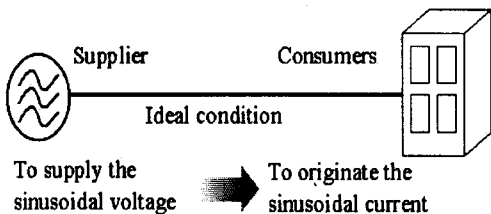


그림 1 공급자와 소비자의 의무

2. 태양전지와 능동필터(PV-AF) 시스템

능동필터시스템은 1970년대부터 개발되었다. 고조파해

결을 위한 능동필터는 비선형부하의 고조파보상에서 계통과 소비자사이의 고조파차단과 배전계통의 고조파를 줄이는 데까지 확장되었다. 즘음하여 본 논문에서는 최초로 태양광발전시스템에 능동필터기능을 추가하는 새로운 시스템을 제안한다.

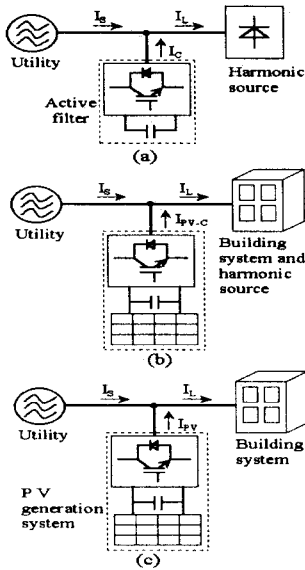


그림 3 PV-AF시스템의 개념도

- (a) 능동필터시스템 (b) 빌딩에 설치된 태양광발전시스템
- (c) 빌딩에 설치된 PV-AF시스템

그림 3은 PV-AF시스템의 개념도를 설명한다. 그림 3(a)와 (b)는 각각 빌딩에 도입된 능동필터와 태양광발전시스템을 보여준다. 그림 3(c)는 PV-AF기능이 결합된 시스템을 설명하고 있다. 그림 3에서 보여주는 것처럼 실제 태양광발전시스템을 이용한 PV-AF시스템을 구성하는 것이 가능하다는 것을 보여주고 있고 그것이 본 논문을 제안하는 이유이다. 개개의 소비자들과 수용가들은 자신들의 장비에 의해 발생된 전류고조파를 특정범위까지 유지해야할 책임이 있다. 만약 AF기능이 계통연계된 태양광발전시스템에 포함되어 있다면, 배전시스템의 전력품질은 향상될 것임에 틀림없다.

3. 기준전압 MPPT 제어

PV-AF 시스템을 실현하기 위한 중요한 문제는 태양광발전시스템의 출력전력이 날씨조건에 의해 직접적으로 영향을 받는다는 것이다. 또한 태양전지의 출력전력은 불안정할 뿐만 아니라 제어가 불가능하므로 태양광발전시스템에서의 MPPT제어는 필수 불가결하다. MPPT 이용의 이득은 적용하기 나름이고 추가적인 비용과 신뢰도에 초점을 맞춰야 할 것이다. 지금까지는 많은 MPPT제어법들이 제안되었었고, 그 중 전력비교 MPPT제어가 다른 어떤 방법보다 일반적이었다[8-9]. 그렇다 할지라도 제어회로가 복잡해지고 추종실패의 가능성이라는 결점이 있다. PV 어레이의 최대전력을 찾는 것은 전력비교 MPPT제어의 중요한 요소이고[10], 제어작용 또는 일사량 변화의 결과이든지 관계없이 PV 어레이의 전력출력의 변화(증가 또는 감소)를 결코 인정하지 않는다. 따라서 일사량이 갑자기 변화할 때 일반적인 전력비교 MPPT제어는 출력전류가 흔들리게 된다. 안정된 MPPT제어를 하기 위해 본 논문에서는 새로운 MPPT제어인 기준전압 MPPT제어를 적용했다. 높은

변환 효율과 뛰어난 안정도 때문에 기준전압 MPPT제어는 NEDO의 지원 하에 계획된 대규모의 수소생산 시스템에 채택되었다[11]. 기본적인 이론은 태양전지의 개방전압은 태양전지 표면온도에 반비례하고 선형방정식으로 표현할 수 있다. 식(1)은 태양전지의 VI특성 방정식이고 식(2), (3)은 각각 포화전류와 단락전류의 실험에 의한 식이다.

$$I = I_{sc} - I_{os} \left[\exp\left[\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{n \cdot k \cdot T} \right] - 1 \right] - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$I_{os} = A T \gamma \exp\left(\frac{-E_g}{n \cdot k \cdot T} \right) \quad (2)$$

$$I_{os} = B \cdot s \quad (3)$$

식(1)에서 부하로 흐르는 전류가 0일 때 개방전압을 얻을 수 있다. 이것을 식(4)라 하면, 출력전력은 미분방정식형태로 표현하면 식(6)이 되고 dP/dV가 0일 때 식(7)이 된다.

$$V_{oc} = \frac{1}{KK} \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_{os}} + 1 \right) \quad (4)$$

$$KK = \frac{q}{n \cdot k \cdot T} \quad (5)$$

$$\frac{dP}{dV} = I_{sc} + I_{os} - I_{os} \cdot e^{KK \cdot IR_s} \cdot e^{KK \cdot V} (1 + KK \cdot IR_s \cdot V) \quad (6)$$

$$\frac{I_{sc}}{I_{os}} + 1 = e^{KK \cdot IR_s} \cdot e^{KK \cdot V_{oc}} (1 + KK \cdot IR_s \cdot V_{oc}) \quad (7)$$

최종적으로 식(7)을 식(4)에 대입하면 PV 셀의 최적전압은 식(8), 표 1과 표 2에 의해 식(8)을 다시 정리하면 식(9)이다.

$$e^{KK \cdot V_{oc}} = e^{KK \cdot IR_s} \cdot e^{KK \cdot V_{oc}} (1 + KK \cdot IR_s \cdot V_{oc}) \quad (8)$$

$$V_{op} = (u + s \cdot v) - T \cdot (w + s \cdot y) \quad (9)$$

식(9)는 PV 셀의 종류에 따라 변경될 수 있다. 기준전압 MPPT제어에서 일사량의 변수그룹(u, v, w, y)은 일사량 중에서 사용한다. 실제 사용된 일사량에 따라서 기준전압 MPPT제어의 총효율이 변화한다. 다행히도 일사량이 0.6 과 0.8(kW/m²)사이에서 선택되었다면 어떤 날씨조건에서도 98%이상의 총효율을 얻을 수 있다.

표 1 실험으로 얻어진 태양전지의 상수값

N	1.5	γ	3	A	9.0e-2	E _g	1.103eV
	R _s	0.028Ω			R _{sh}	1kΩ	
	V _{oc} at 25°C	0.58 Volt			B	3.0	

표 2 일사량에 따른 V_{op}방정식

Irradiance level	u	V	w	y
0.1-0.2kW/m ²	0.43404	0.1621	0.00235	-6 e-4
0.2-0.3kW/m ²	0.45404	0.0621	0.00237	-7 e-4
0.3-0.4kW/m ²	0.46604	0.0221	0.00228	-4 e-4
0.4-0.5kW/m ²	0.46964	0.0131	0.00224	-3 e-4
0.5-0.6kW/m ²	0.47969	-0.0070	0.00224	-3 e-4
0.6-0.7kW/m ²	0.48563	-0.0169	0.00218	-2 e-4
0.7-0.8kW/m ²	0.49270	-0.0270	0.00239	-5 e-4
0.8-0.9kW/m ²	0.49190	-0.0260	0.00223	-3 e-4
0.9-1.0kW/m ²	0.49073	-0.0247	0.00205	-1 e-4

4. PV-AF 시스템의 제어법

AF 제어 계획은 보상 목적과 요구되는 AF뿐만 아니라, 정상상태에서는 물론 일시적인 상태에서도 여과하는 특성에 커다란 영향력을 가진다. 유사한 왜곡 소스로부터 고조파 전압이나 흐려진 전류를 위해 대개 2가지의 제어 계획이 있다. 하나는 주파수 영역에서 푸리에 해석을 기본으로 하고 다른 하나는 소위 "p-q 이론"이라고 하는 3상 회로에서 순간적인 무효전력의 이론을 기본으로 한다. 시간 영역에서 p-q 이론의 개념은 거의 모든 AF 제어계획으로 나타내어진다. 역시 p-q 이론은 AF 함수의 제어 계획과 같이 이 논문에서 제안된 PV-AF 시스템에서 나타난다.

4.1 병렬 능동필터의 제어법

일반적인 d-q 변환은 역상 성분과 고조파 성분을 상쇄시키는 것을 이 논문에서 사용하였다. 식(10)에서 나타낸 것처럼 d-q 변환을 사용한 정상성분, 역상성분과 고조파 성분은 마치 각각 dc 성분, 2fHz 성분, 6kfHz 성분과 같이 나타난다(f=기본 파형, k=1,2,3,...). 그리고 또한, n-d-q(역 dq) 변환의 경우, 식(11), 역상성분은 dc 성분과 같이 나타난다. 그러므로, 고역 필터의 고조파 성분은 d-q 변환을 사용하여 추론할 수 있고, 역시 역상성분은 저역 필터와 같이 n-d-q 변환을 사용하여 추론할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} i_o \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} i_o \\ i_{nd} \\ i_{nq} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (11)$$

4.2 회로도 및 제어흐름도

PV-AF 시스템의 주회로도도 그림 4와 같다. PV 어레이의 출력 단자는 PV-AF 인버터와 평할커패시터가 함께 연결되어진다. 추론되어진 PV-AF 시스템의 목적이 평범한 태양광발전시스템이 AF 함수의 역할로 덧붙여 운전되어지기 때문에 기본적인 회로도도 대부분 계통에 연결된 평범한 3상 태양광발전시스템과 거의 같다. 그것의 제어흐름도는 그림 5와 같다.

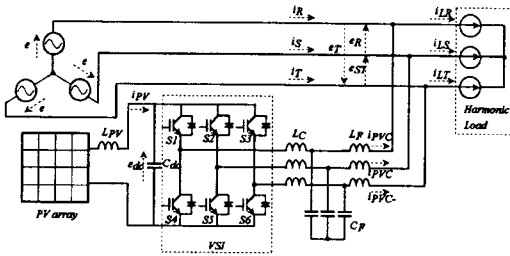


그림 4 PV-AF 시스템의 회로도

피드백 받은 부하 고조파전류는 DQ와 nDQ값으로 변경된다. nDQ값은 LPF에 의해 여과되고 역상성분만 남는다. 고조파 성분은 HPF에 의해 얻어진다. d', q', d~, q~와 같이 상쇄 전류가 결정된다. 다른 한편으로, 모듈 표면 온도로부터 얻어진 기준전압(edc)은 PV 어레이의 피드백전압과 비교된다. PI 제어기를 사

용하여, 기준 q 성분 전류(pv-q)는 인버터의 최종 단계의 출력전압에 포함된다.

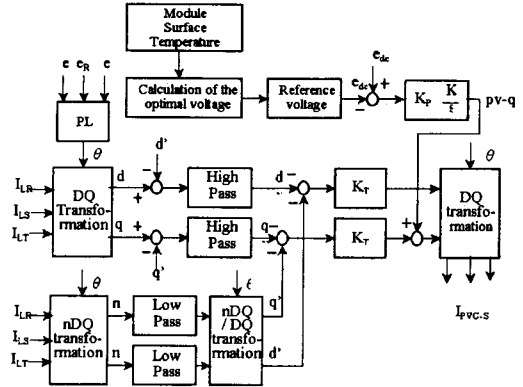


그림 5 PV-AF 시스템의 제어 흐름도

5. 시뮬레이션 결과

5.1 시뮬레이션 조건

PV-AF 시스템의 유용성을 증명하기 위해 가상 시뮬레이션 분석을 하였다. 기본적인 회로와 제어흐름도는 각각 그림 4, 5와 같다. 전압원 PWM 컨버터는 인버터의 출력 전류의 피드백 루프에 의해 제어되어진다. PI gain의 최적값과 필터상수는 적합한 응답을 얻기 위해서 바뀐다. PV 어레이와 계통의 비는 표 3에서 설명한다.

표 3 PV-AF 시스템 조건

PV array	Rated power	30kW
	Rated voltage	6kV
	Rated current	5A
Utility	Rated voltage	6.6kV
	Frequency	60Hz

표 4 시뮬레이션 조건

Simulation time	1.4 sec
Simulation sampling time	1 μsec
Simulator	PSCAD/EMTDC

표 4는 시뮬레이션 상태를 보여준다. 실제 기상 상태에서 태양광발전시스템을 위한 시뮬레이션 방법은 참고문헌[15]에서 주어진다.

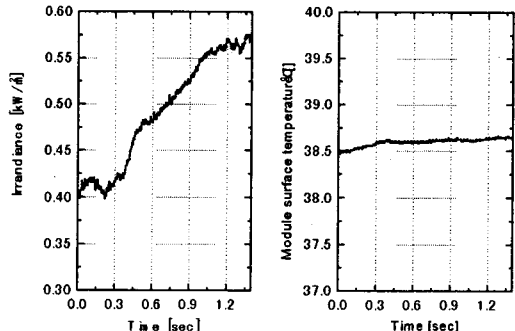


그림 6 실제 기상조건

(a)일사량 (b)태양전지표면온도

그림 6은 실제 기상 상태에서 시뮬레이션 분석한 것을

보여준다. 일사량은 급격히 바뀌고, 태양전지표면의 온도는 거의 일정하다.

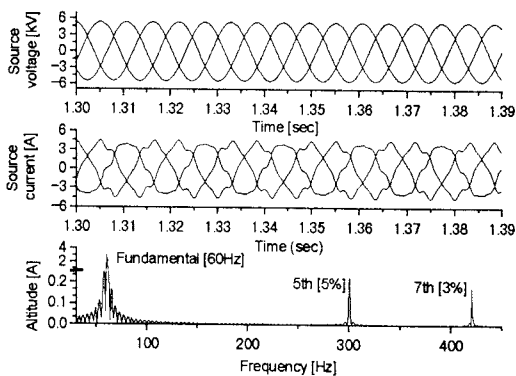


그림 7 고조파 부하조건

그림 7은 고조파부하조건을 보여준다. 제 5고조파와 7고조파는 이 경우에서 각각 5%와 3%이다. 왜냐하면, 전압원은 본 논문에서 PV-AF 기능을 가진 인버터가 병렬 연결이고 전류원과 상쇄한다고 가정하여 완전한 정현파라고 할 수 있다.

5.2 태양전지와 AF시스템의 동작

만약 그림 4의 VSI가 단지 태양광발전시스템을 위해 동작한다면, 시뮬레이션 결과는 그림 8에서 보여주는 바와 같이 얻을 수 있다.

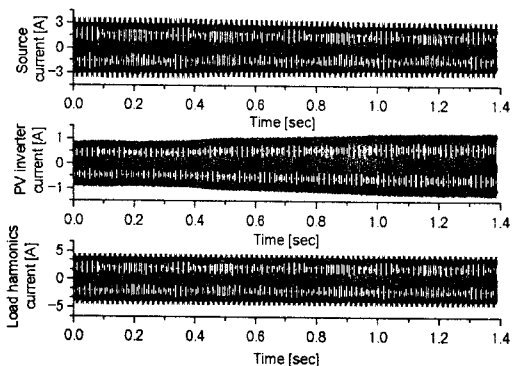


그림 8 단일의 태양광발전시스템 동작의 시뮬레이션 결과

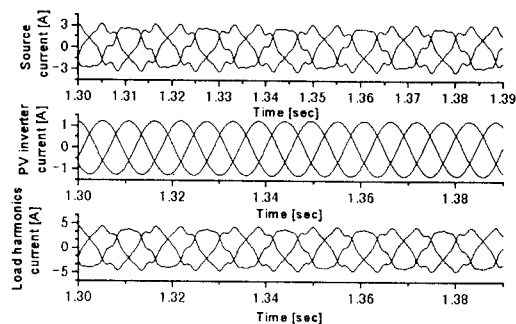


그림 9 확대하여 본 그림 8

그림 9는 그림 8의 짧은 기간의 결과를 나타낸 것이다. 그림 9에서 보여주는 것과 같이 VSI의 출력 전류는 예상했던 것처럼 안정되게 흐른다. 왜냐하면, 그것은 전류

원의 고조파와 완전히 관련지을 수 없다.

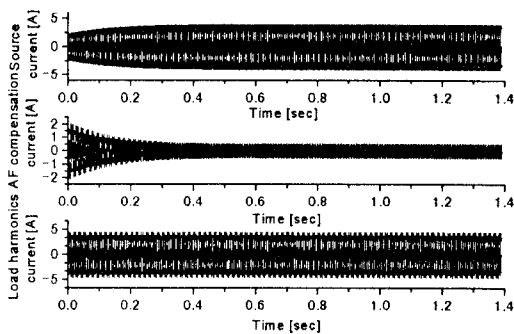


그림 10 단일의 AF 기능 동작의 시뮬레이션 결과

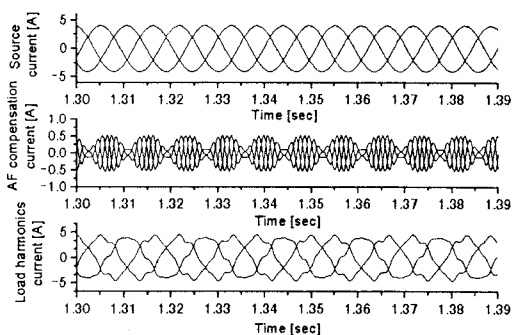


그림 11 확대하여 본 그림 10

5.3 PV-AF시스템의 동작

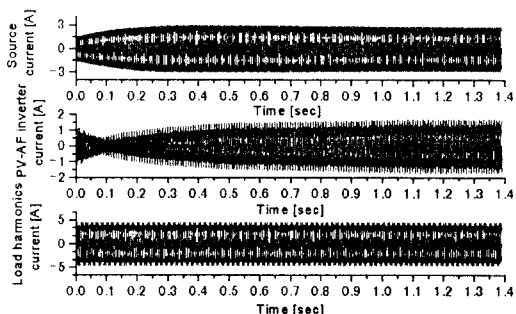


그림 12 PV-AF 시스템 동작의 시뮬레이션 결과

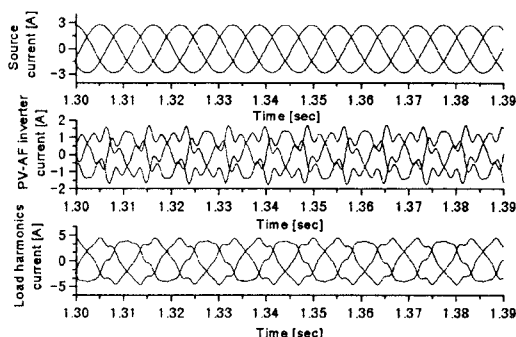


그림 13 확대하여 본 그림 12

그림 10은 VSI가 AF 시스템처럼 동작할 때의 시뮬레

이선 결과이다. 그림 10의 AF 보상 전류에서 알 수 있듯이 LPF의 시간 상수 때문에 0.3초 후에 줄어든다. 그리고, 그림 11은 그림 10의 확대한 결과이다. 그림 11에서 보는 것과 같이, 전류원이 보상되어 AF에 의해 정현파가 되는 것을 알 수 있다.

AF의 시뮬레이션 결과를 보여주는 그림 12는 태양광발전시스템의 기본이다. 그림 12가 확대된 그림 13에서 정현파 전류원은 시스템에서 PV-AF기능에 의해 얻어진다. PV 어레이의 출력 전력은 5.7고조파 부하로부터 보호되어진다. 부족전류는 전류원으로부터 공급된다. AF 상쇄전류는 VSI로부터 공급되고, 정현파 전류원을 만든다.

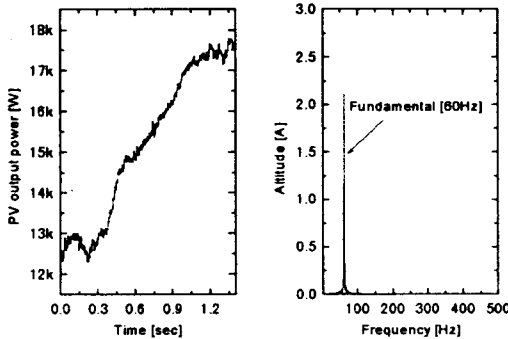


그림 14 PV-AF 시스템의 결과

그림 14는 PV 어레이의 출력전력과 전류원의 FFT 결과를 보여주는 것이다. PV 어레이의 출력 전력은 PV 어레이의 최대전력조절에 의해 최적화되었고 전류원의 고조파 또한 PV-AF기능에 의해 알맞게 보상되었다.

6. 결 론

본 논문에서는 태양광발전시스템에 AF 기능을 추가한 새로운 제어방법을 제시하였고 좋은 결과를 도출하였다. 제안된 PV-AF 시스템의 VSI의 출력 전류를 안정화하기 위하여, 기준전압 MPPT 제어를 사용하였다.

실험결과 아무런 어려움 없이 계통연계된 3상 태양광발전시스템에 AF기능을 포함하는 것이 가능하다는 것을 보여주었고, PV 어레이의 출력전력은 최상의 최대전력을 추종하였을 뿐만 아니라 전류원의 고조파도 PV-AF기능에 의해 적절히 보상된다는 것을 보여주었다. 차후 실생활에 적용하기 위한 좀더 많은 연구와 경험이 필요하다고 생각한다.

[참 고 문 헌]

[1] K. Oku, O. Nakamura, K. Uemura, "Measurement and Analysis of Harmonics in Distribution Systems and Development of a Harmonics Suppression Method", Trans. IEE Japan, Vol. 114-B, No. 3, pp.234-241, 1994

[2] K. Oku, O. Nakamura, J. Inoue, M. Kohata, "Suppression Effects of Active Power Filter on Harmonics of Distribution System Including Capacitors", Trans. IEE Japan, Vol. 115-B, No. 9, pp.1024-1028, 1995

[3] L. Gyugyi, C. Strycula, "Active AC Power Filters", IEEE/IAS '76 Annual Meeting, pp. 529, 1976

[4] H. Akagi, Y. Kanazawa, K. Fujita, A. Nabae, "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power and its Application", Trans. IEE Japan, Vol. 103-B, No. 7, pp.41-48, 1983

[5] L. Gyugi, "Unified Power-Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems", IEE Proceedings-C, Vol. 139, pp.323-331, July 1992

[6] L. Gyugi, C. D. Schauder, S. L. Williams, T. R. Rietman, D. R. Torgerson, A. Edris, "The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 2, pp.1085-1097, April 1995

[7] M. Aredes, E.H. Watanabe, "New Control Algorithms for Series and Shunt Three-phase four-wire Active Power Filters", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, pp.1649-1656, July 1995

[8] A. F. Boehringer, "Self-Adapting dc Converter for Solar Spacecraft Power Supply", T. IEEE on Aerospace & Electron. System, AES-4, 102, 1968

[9] A. F. Boehringer, "Struktur und Regelung von Energieversorgungs systemen in Satelliten", Electrotech. Z. (ET Z)-Z, 92, H.2, 114, 1971

[10] T. Kawamura et al., "Analysis of MPPT Characteristics in Photovoltaic Power System", Journal, Solar Energy Materials and Solar Cells Vol.47 pp.155-165, 1997

[11] T. Asami, M. Park, K. Matsuura, M. Michihira, "Optimization of supply power in solar PV power generation system for large scale hydrogen production", 17th Energy system / economic / environment conference, 10-1, pp.243-248, January 2001

[12] W. M. Grady, M. J. Samotyj, A. H. Noyola, "Survey of active power line conditioning methodologies", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 5, pp.1536-1542, 1990

[13] W. M. Grady, M. J. Samotyj, A. H. Noyola, "The application of network objective functions for actively minimizing the impact of voltage harmonics in power systems", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 7, pp.1379-1386, 1992

[14] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components", IEEE Trans. on Ind. Application, vol. IA-20, pp.625-630, 1984

[15] M. Park, K. Matsuura, M. Michihira, "A Novel Simulation Method of PV cell using Field Data", Trans. IEE Japan, Vol. 121-B, No. 2, pp.262-263, 2001