

3상 계통연계형 태양광발전시스템의 태양전지 출력단 전압제어에 관한 연구

남종하, 강병희, 고재석, 최규하, 신우석*
건국대학교, 두원공과대학*

A Study on Solar Cell Output Voltage Control for 3-Phase Utility Interactive Photovoltaic System

J.H. Nam, B.H. Kang, J.S. Gho, G.H. Choe, W.S. Shin*
Konkuk University, Doowon College*

ABSTRACT

Generation of electrical energy faces many problems today. Solar power converters were used to convert the electrical energy from the solar arrays to a stable and reliable power source. The object of this paper is to analyze and design DC-DC converters in a solar energy system to investigate the performance of the converters. A DC-DC converter can be commonly used to control the power flow from solar cell to load and to achieve maximum power point tracking(MPPT), DC-AC converter can also be used to modulate the DC power to AC power being applied on common utility load. A DC-DC converter is used to boost the solar cell voltage to constant 360[V] DC link and to ensure operation at the maximum power point tracking. If a wide input voltage range has to be covered a boost converter is required. In this paper, author described that simulation and experimental results of PV system contain solar modules, a DC-DC converter(boost type chopper), a DC-AC converter (3-phase inverter) and resistive loads.

1. 서 론

오늘날 화석연료는 급격하게 감소하고 있으며 에너지 비용도 크게 증가하고 있는 실정에서 이에 대한 대책으로 세계각국에서는 대체에너지 개발이 진행중이며 이중 태양광 에너지는 가장 광범위한 대체에너지원중의 하나이다. 태양광발전은 무한정, 무공해의 햇빛을 직접 전기로 바꿀 수 있는 첨단기술이다. 따라서 햇빛이 비치는 곳에서는 어디서나 전기를 얻을 수 있으며 다른 발전방식과는 달리 대기

오염, 소음, 발열, 진동 등의 공해가 전혀 없는 깨끗한 에너지원이다.^[1]

본 논문에서는 3상 계통연계형 태양광 발전시스템에 적용될 DC-DC 컨버터를 해석 및 설계하고 MPPT를 위해서는 태양전지의 고성능 전압제어를 선행하기 위한 전압제어기 및 전류제어기를 해석적으로 고찰하고 설계하였다.

2. 계통연계형 태양광 발전시스템의 분류

2.1 DC-DC 컨버터를 사용하지 않는 방식

그림 1은 DC-DC 컨버터를 사용하지 않은 3상 계통연계형 태양광 발전시스템으로 태양전지로부터 최대 출력을 얻어내기 위해 MPPT를 적용하기 위해서는 직류단 전압 V_c 의 가변전압제어가 필요하다. 이 방식은 DC-DC 컨버터를 사용하지 않으므로 가격이 싸고 단일제어루프를 갖는다는 장점을 가진다. 하지만 태양광 발전시스템을 계통연계형으로 운전하기 위해서는 비선형부하에 의한 전원측 전류의 왜곡을 방지하기 위한 APF기능이 필수이며 이러한 APF 기능을 적용하려면 직류단 전압인 V_c 를 급격한 기울기를 갖는 고조파 전류를 보상하기 위해 높게 유지해야만 한다. 또한 3상에서 스위칭 함수는 직류전압을 이용하여 만들게 되는데 스위칭 함수가 선형영역에서 동작하기 위해서는 변조기법에 좌우되는 선형영역 K에 따라 다음과 같은 조건을 갖는다.^{[2][4]}

$$0 \leq M \leq K \quad (1)$$

공간벡터 변조기법의 최대선형제어영역은 그림 2에서 외부원에 해당하고 지름이 $1/\sqrt{3}$ 이므로 six-step 인버터의 최대 상전압 $2/\pi$ 를 기준으로 하면 선형영역이 약 90.7[%]이다.^[5]

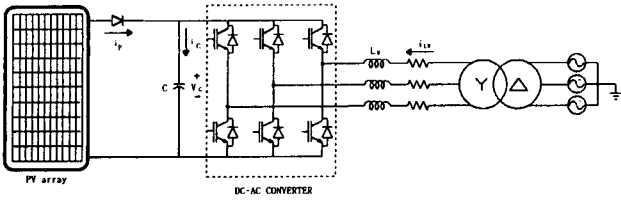


그림 1 DC-DC 컨버터를 사용하지 않는 3상 계통 연계형 태양광 발전시스템

Fig. 1 3-phase PV system without DC-DC converter

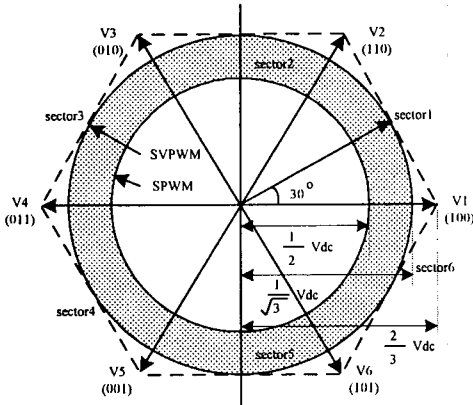


그림 2 정지좌표계에서 표현된 3상 하프브리지 인버터 출력전압의 선형제어영역

Fig. 2 Linear control region of 3 phase half-bridge inverter output voltage in stationary frame

2.2 DC-DC 컨버터를 사용하는 방식

그림 3은 DC-DC 컨버터를 사용한 단상 계통연계형 태양광 발전시스템으로, DC-DC 컨버터는 태양전지로부터 최대 전력을 얻기 위해 태양전지의 출력단 전압 V_{c1} 을 가변 전압 제어하게 되며 AC-DC 컨버터는 V_{c2} 를 일정전압으로 제어하게 된다. 따라서 태양전지 출력단 전압은 MPPT 운전에 적합하도록 가변전압제어가 가능해지며 태양전지 출력단전압을 DC-DC 컨버터를 통해 승압하게 되므로 인버터의 선형제어영역을 벗어날 우려가 적어지고 DC 링크단 전압은 인버터에 의해 일정전압으로 유지된다.

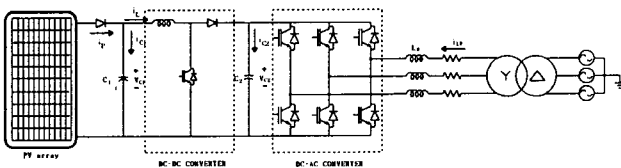


그림 3 DC-DC 컨버터를 사용하는 3상 계통 연계형 태양광 발전 시스템

Fig. 3 3-phase PV system with DC-DC converter

3. 시스템의 해석

3.1 DC-DC 컨버터의 해석

그림 4는 태양전지를 등가화 시켜 나타낸 그림으로 정

상상태에서 태양전지는 전류원으로 등가화 할 수 있고 인버터부 등은 저항으로 등가화 할 수 있다. 태양광 발전시스템에 적용하는 DC-DC 컨버터의 특이점은 보통 DC-DC 컨버터의 관심사가 컨버터 출력전압인 V_{c2} 의 제어인 반면에 태양광 발전시스템에 적용하는 DC-DC 컨버터의 경우는 태양광에서 최대 출력을 끌어내기 위한 MPPT 알고리즘을 사용하므로 컨버터 입력단 전압인 V_{c1} 이 제어대상이다. 그림 4에서 정상상태일 경우 시스템을 상태평준화기법을 사용하여 행렬 형태로 정리하면 식 (2)와 같다.

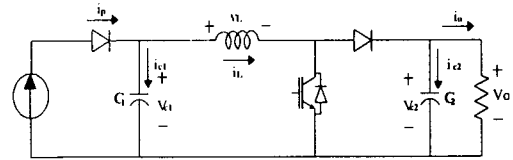


그림 4 전체시스템의 등가회로

Fig. 4 Equivalence circuit of the system

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_L \\ \dot{V}_{C1} \\ \dot{V}_{C2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{L} & -\frac{1}{L}(D-1) \\ -\frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{RC_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ V_{C1} \\ V_{C2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{C_1} \\ 0 \end{bmatrix} [i_P] \quad (2)$$

3.2 시스템의 파라미터 선정

태양전지로부터 최대전력을 끌어내기 위해서는 DC-DC 컨버터의 인덕터 전류가 연속적으로 흘러 컨버터가 CCM 모드로 동작해야 하므로 그에 맞게 인덕터의 크기를 선정해야 하며 V_{C1} 의 리플은 태양전지의 출력전력의 리플을 초래하므로 커패시터 C_1 은 V_{C1} 의 리플을 충분히 작게 할 수 있도록 선정되어야 하며 커패시터 C_2 는 컨버터 출력 전압의 리플을 고려하여 선정한다.

컨버터 입력전압의 리플을 구하면 식 (3)과 같고 이에 근거해 커패시터의 크기를 선정할 수 있다. 정상상태에서 태양전지 출력전류의 크기가 일정하다고 가정하면 태양광 출력 전력의 리플을 식 (4)와 같이 나타낼 수가 있다. 커패시터의 크기가 너무 작을 경우 태양전지 출력 전력의 리플의 크기가 커지게 되므로 평균출력 전력의 저하를 초래함을 알 수 있다. 컨버터 출력전압의 리플을도 입력전압의 리플과 같은 방식으로 구하면 식 (5)와 같지만

$$\frac{\Delta V_{C1}}{V_{C1}} = \frac{D V_{C1}}{8L C_1 f^2} \quad (3)$$

$$\Delta P_{cell} = \frac{D V_{C1}}{8L C_1 f^2} \times I_P \quad (4)$$

$$\frac{\Delta V_{C2}}{V_{C2}} = \frac{D}{R C_2 f} \quad (5)$$

4. 제어기의 설계

일반적으로 부스트 컨버터의 제어로는 일반적으로 전압 모드 제어기법과 평균전류 모드 제어기법을 들 수 있다. 전압 모드 제어기법은 전압 지령치와 실제 전압을 비교해 제어하는 방식이며 평균전류 모드 제어기법은 좀 더 발전된 기법으로 전압제어기 내부에 전류제어기를 가지는 형태를 가진다.

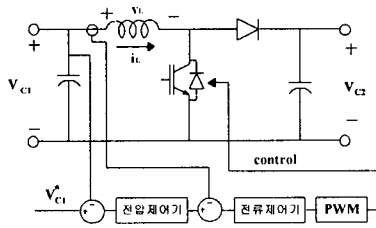


그림 5 평균전류 모드 제어기법
Fig. 5 Average current-mode control algorithms

4.1 전압제어기

전압제어기는 부하와 전원간의 전력의 평형을 이루어 직류전압이 지령전압을 추종하도록 하는 역할을 한다. 만일 입력전압이 일정하다고 하면 전압제어를 위한 제어변수는 전류가 되며 이러한 전류의 제어는 전류제어기에서 수행되며 전압제어기는 전류제어기의 기준신호를 발생하는 역할을 하며 그림 6의 태양광 발전시스템의 DC단은 그림 7과 같이 등가화 시켜 나타낼 수 있으며 태양광 발전시스템의 DC단은 식 (6), 식 (7)과 같이 간단한 식으로 나타내어질 수 있으며 태양전지는 전류원의 특성을 가지고 있으며 실제로 태양전지의 출력전류는 온도나 일사량의 영향을 받아 변동을 한다. 하지만, 이러한 온도나 일사량에 의한 변동속도보다는 시스템의 제어 루프의 속도가 충분히 빠르므로 제어기의 관점에서는, 일사량에 의한 변동은 무시할 수 있으며 시스템은 식 (8)과 같이 적분기로 모델링 된다.

$$V_{cl} = \frac{1}{C_1} \int i_{cl} dt \quad (6)$$

$$C_1 \frac{dV_{cl}}{dt} = -i_L + i_{sol} \quad (7)$$

$$G(s) = \frac{1}{sC_1} \quad (8)$$

전압제어기로 PI제어기를 사용할 때 페루프 전달함수는 식 (9)와 같고 여기서 비례이득이 적분이득에 비해 작아서 영점이 원점에서 충분히 멀리 위치하고 있다면 극배치법에 의한 이득값은 다음과 같은 식에 의해서 구해진다.

$$G(s) = \frac{V_{cl}}{V_{cl}^*} = \frac{k_{PI}s + k_I}{C_1 s^2 + k_{PI}s + k_I} \quad (9)$$

$$k_{PI} = 2\zeta \omega_n C_1 \quad (10)$$

$$k_I = C_1 \omega_n^2 \quad (11)$$

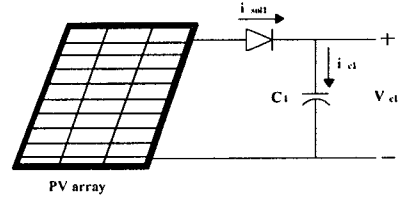


그림 6 태양광 발전시스템의 DC단
Fig. 6 DC link of PV system

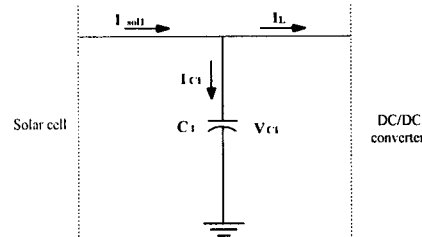


그림 7 DC단의 등가화 모델
Fig. 7 Equivalence model of DC link

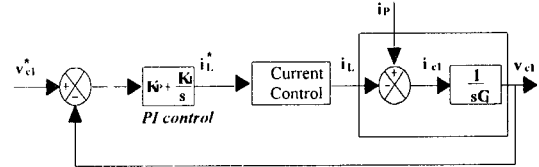


그림 8 전압제어기의 흐름도
Fig. 8 Flow chart of voltage controller

4.2 전류제어기

빠른 동적응답을 위해 전압제어기의 루프내에 전류제어기를 포함하여 DC-DC 컨버터의 인덕터 전류를 제어하게 되며 전류제어기는 전압제어기에서 만들어진 전류기준신호를 추종하도록 하는 역할을 한다.

인덕터의 흐르는 전류를 상태평균화 기법을 사용해 나타내면 식 (12)와 같고 여기에 소신호 모델을 적용하면 다음 식 (13)과 같다.

전류제어기로 PI제어기를 사용할 때 페루프 전달함수는 식 (14)와 같다.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_{cl} + D V_{cl} - V_{cl} \quad (12)$$

$$L \frac{d\hat{i}_L}{dt} = \hat{V}_{cl} - \hat{V}_{cl} + D \hat{V}_{cl} + \hat{d} V_{cl} \quad (13)$$

$$G(s) = \frac{i_L}{i_L^*} = \frac{k_{PI}s + k_I}{L s^2 + k_{PI}s + k_I} \quad (14)$$

식(14)에서 영점이 원점에서 충분히 멀다는 가정에서 제어기의 이득선정을 일반화할 수 있으며 극배치 설계에 의해 제어기를 설계하면 다음과 같이

전류제어기 이득을 선정할 수 있다.

$$k_{p2} = 2\xi\omega_n L - R \quad (15)$$

$$k_{v2} = \omega_n^2 L \quad (16)$$

위에서 해석한 제어기의 성능을 확인하기 위하여 MATLAB을 이용하여 계단응답과 주파수응답을 알아보면 다음과 같다. 그림 10은 전압제어기의 계단응답을 나타내고 있으며 오버슈트 13[%], 정정시간 0.01[sec]를 보였다. 그림 11은 전류제어기의 계단응답을 나타내고 있으며 오버슈트 7[%], 정정시간 0.005[sec]를 보여 전압제어기의 오버슈트가 조금 큰 것을 알 수 있다.

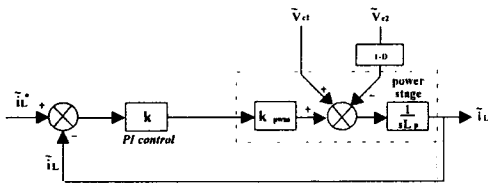


그림 9 전류모드 제어기의 블록선도
Fig. 9 Block diagram of current-mode controller

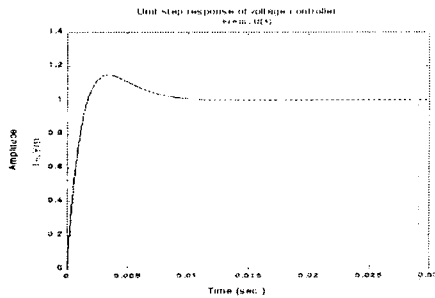


그림 10 전압제어기의 단위계단응답
Fig. 10 Unit step response of voltage controller

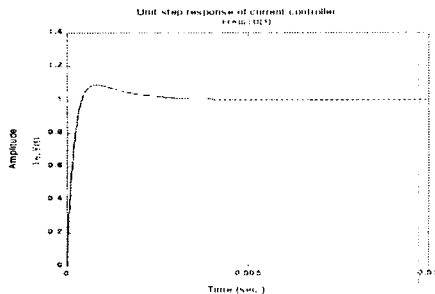


그림 11 전류제어기의 단위계단응답
Fig. 11 Unit step response of current controller

5. 시뮬레이션

지금까지 얻어진 이론적 결과들을 검증하고 시스템의 정상상태 및 과도상태 특성해석을 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위해 PowerSim사의 전력전자 전용 시뮬레이션 툴인 PSIM을 사용하였다.

표 1 시뮬레이션 조건

Table 1 Simulation conditions

태양전지 용량	P_{sol}	3 [KW]
적류단 커패시터	$C1$	7050 [μ F]
태양전지 흡력단 커패시터	$C2$	2350 [μ F]
DC-DC 컨버터의 인덕터	L	1 [mH]
전압제어기 P 게인	k_{p1}	7.92
전압제어기 I 게인	k_{i1}	2605.263158
전류제어기 P 게인	k_{p2}	5.92
전류제어기 I 게인	k_{i2}	4933.333333
태양전지 모듈의 직렬 연결 수	N_s	20
태양전지 모듈의 병렬 연결 수	N_p	3

그림 12는 정상상태에서의 태양전지 출력단 전압과 DC 링크단 전압 및 태양전지 출력이다. 태양전지 출력단과 DC 링크단 전압이 지령치를 잘 추종하고 있음을 알 수 있으며 그림 13은 정상상태에서의 태양전지 출력단 커패시터 전류와 인덕터 전류이며 인덕터 전류는 전류지령치인 태양전지 출력전류를 잘 추종하고 CCM 모드로 동작하고 있다는 것을 알 수 있다.

그림 14과 15는 정상상태에서의 계통 전압 및 전류이며 a상, b상, c상의 전압 및 전류는 120°의 위상차를 가지며 나타남을 볼 수 있다.

그림 16은 제어기의 성능을 검증하기 위해 MPPT를 적용하였다고 가정하였을 때 전압의 변동폭을 10[V] 상승하였을 때의 태양전지 출력전력, 태양전지 출력단 전압 및 DC 링크단 전압을 나타낸 그림으로 최대 전력점을 추종하고 있는 것을 알 수 있다. 파형에서 알 수 있듯이 MPPT를 적용하더라도 DC-DC 컨버터가 있는 태양광 발전시스템의 경우 DC 링크단 전압이 MPPT에 직접적으로 영향을 받지 않음을 알 수 있고, 그림 17은 전압의 변동폭을 10[V] 하강하였을 때를 나타낸 그림으로 최대 전력점을 추종하고 있는 것을 알 수 있다. 역시 MPPT를 적용하더라도 DC 링크단 전압이 MPPT에 직접적으로 영향을 받지 않음을 알 수 있다.

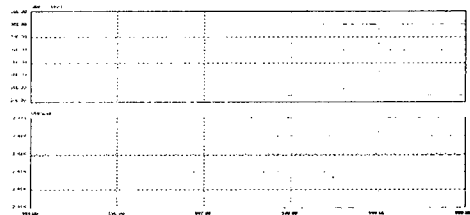


그림 12 정상상태에서의 태양전지 출력단 전압과 DC 링크단 전압, 태양전지 출력
Fig. 12 Solar cell output voltage and DC link voltage in steady state.

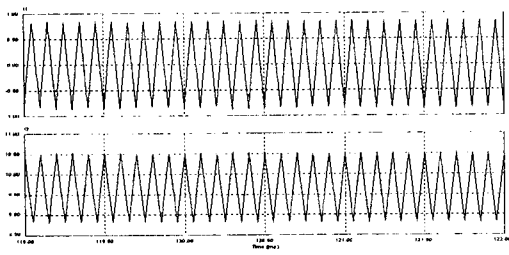


그림 13 정상상태에서의 태양전지 출력단 커패시터 전류와 인덕터 전류

Fig. 13 Solar cell output capacitor current and inductor current in steady state.

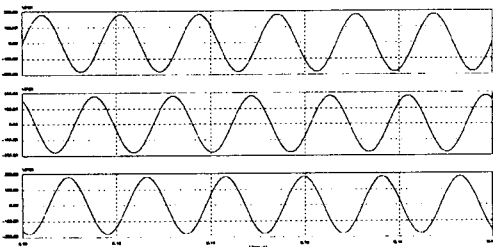


그림 14 정상상태에서의 계통전압(a상, b상, c상)

Fig. 14 Source voltage in steady state(a-phase, b-phase, c-phase).

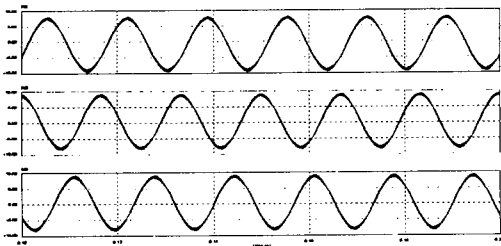


그림 15 정상상태에서의 계통전류(a상, b상, c상)

Fig. 15 Source current in steady state(a-phase, b-phase, c-phase).

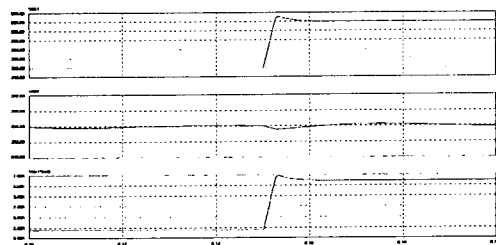


그림 16 MPPT 적용시 각부 파형(전압 지령치 상승시)

Fig. 16 Each waveform with MPPT operation(Voltage reference increasing).

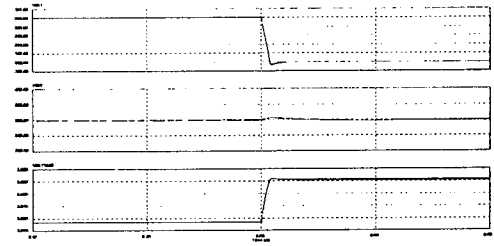


그림 17 MPPT 적용시 각부 파형(전압 지령치 하강시)

Fig. 17 Each waveform with MPPT operation(Voltage reference decreasing).

6. 결 론

계통연계형 태양광 발전 시스템의 다기능화를 위해서는 DC단 전압을 일정하고 높게 유지하는 것이 필요한데 본 논문에서는 이러한 필요성에 의해 3상 계통연계형 태양광 발전 시스템을 위한 DC-DC 컨버터의 해석 및 설계에 대해 연구하였다.

또한 공간벡터변조시 DC 링크전압의 변화시 DC 링크 단 전압에 따른 선형제어범위를 알아보았으며 이를 통해 DC 링크단 전압을 260[V]이상으로 유지해야함을 알 수 있었다.

본 논문을 통하여 3상 계통연계형 태양광 발전시스템에 DC-DC 컨버터를 적용하여 태양전지 출력단 전압을 가변전압제어하고 DC 링크단을 일정전압으로 제어하여 원활한 APF 등의 기능을 수행하기 위한 충분한 DC 링크단 전압을 유지하였다.

참 고 문 헌

- [1] S.J.Chiang, K.T.Chang, and C.Y.Yen, "Residential Photovoltaic Energy Storage System", IEEE Transactions on Electronics, Vol.45, No. 3, June 1998.
- [2] K.H. Hussein, I. Muta, T. Hoshino, M. Osakada, "Maximum Photovoltaic Power Tracking : An Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions", IEE Proceedings Generation Transmission & Distribution, Vol 142, No 1, 1995.
- [3] J.A.Gow and C.D.Manning, "Controller arrangement for boost converter systems sourced from solar photovoltaic arrays or other maximum power sources", IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 147, No.1, January 2000.
- [4] 한찬영, "계통연계형 태양광 발전시스템의 태양전지 출력단 전압제어에 관한 연구", 건국대학교 공학석사 학위논문, 2001.
- [5] 고재석, "PWM 컨버터-인버터 시스템의 제어기 최적 설계", 건국대학교 공학박사 학위논문, 2001.
- [6] 유재현, "태양전지의 전기적 출력 특성을 갖는 PWM컨버터 설계 및 제어", 건국대학교 공학석사 학위논문, 2002.