

계통 연계형 태양광 발전 인버터의 디지털 제어

김용균, 최종우, 김흥근
경북대학교

Digital Control of Utility-Connected PV Inverter

Yong-Kyun Kim, Jong-Woo Choi, Heung-Geun Kim
Kyung-Pook National University

Abstract - The fundamental digital control of utility-connected PV inverter are presented with detailed analysis and simulation and experimental results. PLL controller using virtual two phase detector, current controller of DC-DC converter, dc link voltage controller and inverter current controller are discussed. The novel PLL controller using virtual two phase detector can detect the information of utility voltage instantaneously and is not sensitive to the noise. Current controller of DC-DC converter, dc link voltage controller and inverter current controller are the conventional methods. We have constructed utility-Connected PV Inverter and applied to those controllers. The simulation and experimental results demonstrate an excellent performance in the single-phase grid-connected operation.

1. 서 론

화석 연료의 고갈과 공급의 불안정성으로 인해 대체에너지에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 그 중에서 신 에너지이며 무한 청정에너지인 태양광 발전 시스템이 각광을 받고 있다. 태양광 발전 시스템에서 태양광 발전 인버터는 시스템 특유의 기능을 보유해야 한다.

태양광 발전 인버터에 필요한 제어는 최대 전력점 추종 제어, 단독 운전 검출 제어, 컨버터 전류 제어, PLL 제어, 직류 링크 전압 제어, 인버터 전류 제어로 나눌 수 있다. 최대 전력점 추종제어는 태양광 에너지의 전력이 일사량과 온도에 따라 비선형 특성을 가지므로 최대 전력점을 찾아 효율을 개선하는 제어이며, 단독 운전 검출 제어는 사고로 계통공급이 중단되었을 때 이를 검출하여 인버터의 단독운전을 방지하는 기술이다. 그리고 컨버터 전류 제어는 부스트 컨버터 입력전류가 태양전지의 최대

전력점의 전류를 추종하는 제어이다^[1]. 그리고 PLL 제어는 계통 전압의 위상을 검출하는 제어이다^[2]. PLL제어는 계통 전압의 위상을 검출하여 인버터의 기준전류를 발생시키는데 필수적인 제어이다^[3]. 직류링크 전압제어는 인버터의 직류 링크 전압을 일정하게 제어하여 인버터 기준전류의 크기를 생성한다. 또한 PLL제어와 전압 제어를 통해 발생된 위상과 전류크기를 통해 인버터 기준전류를 발생하여 인버터 전류제어를 수행한다.

본 논문에서는 태양광 발전 시스템에서 가장 기본이 되는 컨버터 전류제어와 PLL 제어, 직류링크 전압제어, 인버터 전류 제어에 대한 알고리즘을 제시한다. PLL제어에서 기존의 방법은 노이즈에 민감하여 계통 전압의 위상을 검출하는데 오류를 발생할 수 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 가상 2상 검출기를 사용한 새로운 방식을 제시한다. 제안된 PLL 제어와 직류 링크 전압 제어를 통해 기준 전류의 위상과 크기를 발생하고 이 기준 전류를 통해 인버터 전류를 제어하게 된다. 제시한 알고리즘을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

2. 본 론

2.1 계통 연계형 태양광 발전 시스템

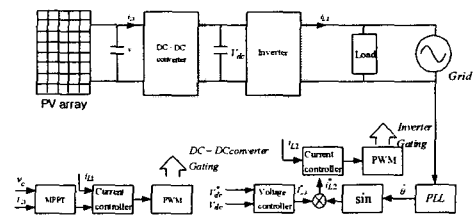


그림 1. 계통 연계형 태양광 발전 시스템의 전체 구성

그림 1은 단상 계통 연계형 태양광 발전 시스템의 전체 구성도를 나타낸다. 계통 연계형 태양광 발전 시스템은

태양전지에서 발생한 직류 전력을 인버터를 통해 교류 전력으로 변환하는 시스템이다. 발전 전력이 부하 전력보다 크면 잉여 전력을 계통에 반환하고, 반대의 경우 부족한 전력을 계통으로부터 공급받는다^[4]. 태양전지는 일사량과 온도에 따라 비선형의 특성을 가지므로 DC-DC 컨버터를 통해 최대 전력점 추종제어(MPPT)를 하여 최대 전력을 생성하고 인버터를 통해 직류 링크 전압(V_{dc})과 인버터 출력 전류(i_L)를 제어하게 된다. 이 때 인버터의 출력 전류(i_L)는 계통의 전압과 동상인 정현파가 되어야 한다. 계통전압과 동상인 정현파를 만들기 위해 PLL제어를 통해 계통 전압의 위상($\hat{\theta}$)을 검출하여 기준 전류(i_L^*)를 생성하여 제어한다^{[5][6]}.

2.2 DC-DC 컨버터의 전류 제어

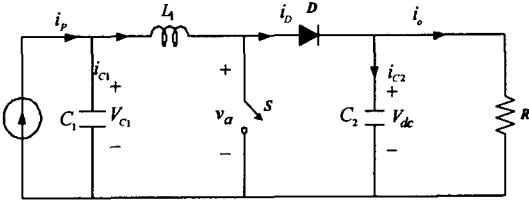


그림 2. DC-DC 컨버터

그림 2는 DC-DC 컨버터를 나타낸다. 정상상태에서 태양전지는 전류원으로 동작화 할 수 있다. 그리고 인버터와 계통을 저항으로 동작화하였다. 이 때,

$$L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = v_{C1} - v_a \quad (1)$$

$$C_1 \frac{dv_{C1}}{dt} = -i_{L1} + i_p \quad (2)$$

이다. 그림 3은 DC-DC 컨버터의 전류 제어 블록도이다.

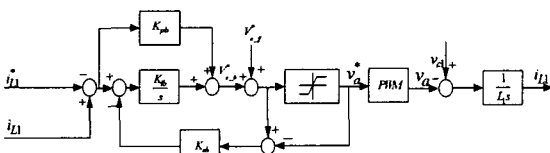


그림 3. DC-DC 컨버터 제어 블록도

여기서 전압지령은 전향보상성분($v_{a_ff}^*$)과 궤환성분($v_{a_fb}^*$)으로 구성된다.

$$v_a^* = v_{a_ff}^* + v_{a_fb}^* \quad (3)$$

전향보상성분은 다음과 같다.

$$v_{a_ff}^* = v_{C1} \quad (4)$$

PWM이 이상적이라고 가정하고($v_a^* = v_a$), 식(3)과 (4)를 식(1)에 대입하면

$$L \frac{di_L}{dt} = -v_{a_fb}^*$$

가 된다. 지령전류와 실제전류사이의 전달함수는

$$\frac{i_L}{i_L^*} = \frac{(SK_{pbc} + K_{ibc})}{L_1 s^2 + K_{pbc} s + K_{ibc}} \quad (5)$$

가 된다.

2.3 PLL(Phase Locked Loop) 제어

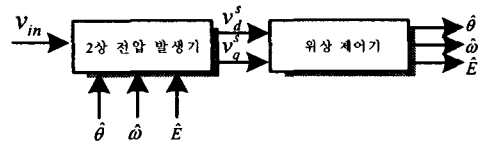


그림 4. 가상 2상 위상 검출기

그림 4는 가상 2상 위상 검출기의 블록도이다. 가상 2상 위상 검출기는 2상 전압발생기와 위상제어기로 구성되어 있다. 2상 전압 발생기는 입력 전압 v_{in} 를 통해 위상차가 $\pi/2$ 인 v_d^s 와 v_q^s 를 발생시킨다. 이 두 신호를 위상제어기를 통해 제어하여 추정위상각($\hat{\theta}$)과 추정주파수($\hat{\omega}$)와 추정진폭(\hat{E})을 계산한다^[5].

2.4 직류 링크 전압 제어

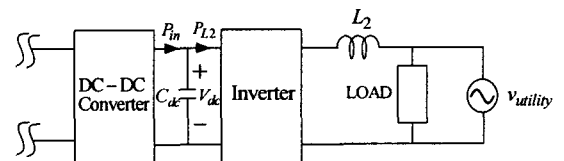


그림 5. 전력 흐름

그림 5는 승압형 컨버터(Boost Converter)와 인버터(Inverter) 사이의 전력의 흐름을 나타낸다. 태양전지에서 공급되는 전력이 부하에서 소비하는 전력보다 클 경우에는 직류링크 전압이 증가하고 반대의 경우에는 직류링크의 전압이 감소하므로 출력 전력을 제어함으로써 직류링크 전압을 제어할 수 있다. 직류 링크단에 대한 순시 전력평형 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) = P_{in} - P_{L2} \quad (6)$$

여기서, 출력전력의 한주기 평균값은 단위역률인 경우

$$P_{L2} = \frac{I_{L2} E}{2} \quad (7)$$

로 주어진다. 여기서 i_{L2} 는 출력전류의 진폭이고, E 는 전원전압의 진폭이다. 전류제어가 완벽하고 태양전지로부터의 입력전력에 대한 보상 성분이 완벽하다면, 평균치 개념에서

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) = P_{in} - \frac{i_{L2}^* E}{2} \quad (8)$$

가 성립한다. 그러므로, 출력전류 진폭의 지령(i_{L2}^*)은 전향보상항과 궤환항으로 구성할 수 있다.

$$i_{L2}^* = i_{L2_ff}^* + i_{L2_fb}^* \quad (9)$$

$$i_{L2_ff}^* = \frac{2P_{in}}{E} \quad (10)$$

식(10)을 식(9)에 대입하고 식(9)를 식(8)에 대입하면

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) = - \frac{i_{L2_fb}^* E}{2} \quad (11)$$

이 되고

궤환항 $i_{L2_fb}^*$ 은 PI제어기를 사용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i_{L2_fb}^* = K_{pv}(V_{dc} - V_{dc}^*) + K_{iv} \left(\int (V_{dc} - V_{dc}^*) dt \right) \quad (12)$$

커패시터 양단의 전압리플로 인해 기준 전류의 크기에 리플이 발생한다. 이 리플을 최소화하기 위해 궤환되는 V_{dc} 에 디지털 필터를 삽입한다.

그림 6은 전압제어기의 블록도이다. 기준 직류링크전압(V_{dc}^*)과 필터를 거친 직류링크전압(V_{dc_fl})의 차를 PI제어하면 인버터 출력 기준 전류의 크기(i_L^*)가 발생한다.

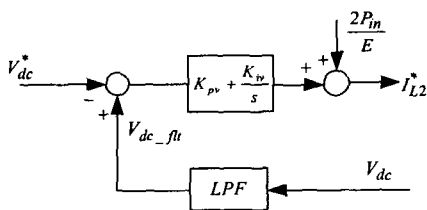


그림 6. 전압 제어기

2.5 전류 제어기

그림 7은 전류제어기의 블록을 나타낸다. 이상적인 인버터의 경우 인버터의 지령전압과 출력전압 사이의 전달 함수가 '1'이 되므로, 제어기의 지령전류 i_{L2}^* 와 인버터의 출력전류 i_{L2} 사이의 관계식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{i_{L2}}{i_{L2}^*} = \frac{K_{pc}s + K_{ic}}{L_2s^2 + K_{pc}s + K_{ic}} \quad (13)$$

계통 전압을 외란으로 취급할 때 계통에 대한 i_s 의 응답성은 다음과 같다.

$$\frac{i_{L2}}{v_{utility}} = \frac{s}{L_2s^2 + K_{pc}s + K_{ic}} \quad (14)$$

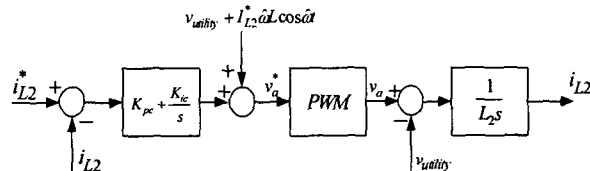


그림 7. 전류 제어기

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

시뮬레이션은 MATLAB Simulink를 사용하였다. 그림 1에서 실험을 위해 TMS320c32 DSP 보드를 사용하였으며 스위칭 주파수는 10kHz 이고, DC-DC 컨버터의 커패시터(C_1)과 인덕터(L_1)는 각각 $2500\mu F$, $1mH$ 를 사용하였고 인버터의 직류링크단 커패시터(C_{dc})와 인덕터(L_2)는 $7500\mu F$, $5mH$ 를 사용하였다.

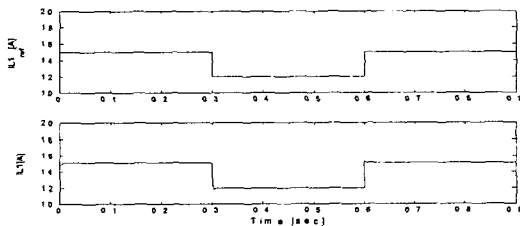


그림 8. DC-DC 컨버터 전류제어 시뮬레이션 파형 (i_{L2}^*, i_{L2})

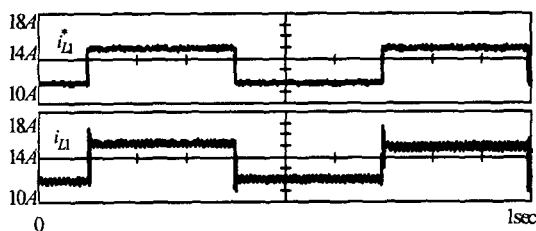


그림 9. DC-DC 컨버터 전류제어 실험 파형 (i_{L2}^*, i_{L2})

그림 8과 9는 DC-DC 컨버터의 전류제어를 한 시뮬레이션과 실험파형이다. DC-DC 컨버터 전류지령(i_{L2}^*)을 0.3초 간격으로 15A에서 12A로 주었을 때 i_{L2} 가 지령전류를 추종하는 것을 확인할 수 있다.

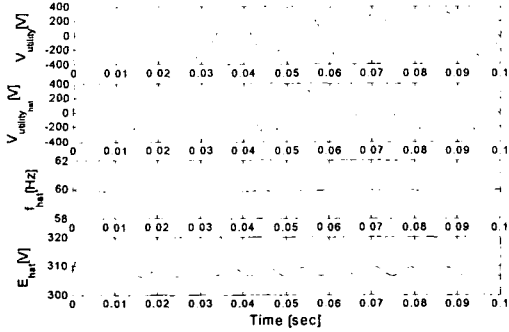


그림 10. PLL 제어 시뮬레이션 파형($v_{utility}$, $\hat{v}_{utility}$, \hat{f} , \hat{E})

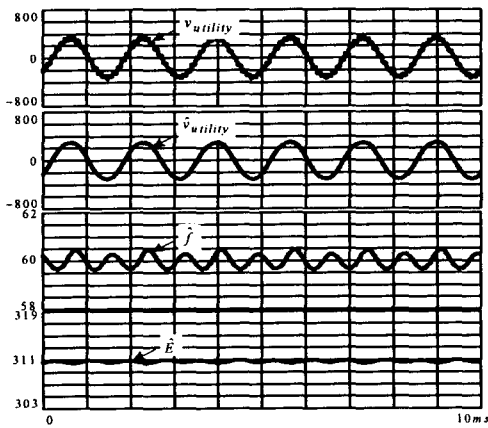


그림 11. PLL 제어 실험 파형($v_{utility}$, $\hat{v}_{utility}$, \hat{f} , \hat{E})

그림 10과 11은 PLL제어를 한 파형이다. 2상 전압 발생기로 2차 필터를 이용하고 위상 추정기로 동기 좌표계를 이용한 경우인 방식 VIII^[5]에서 입력 전원에 노이즈 (30Vpeak, 1kHz)가 포함되어 있을 때 추정특성을 나타낸 것이다. 노이즈가 있는 상황에서도 추정 입력 전원이 실제 입력 전원을 잘 추정하며 주파수도 60Hz로 추정한다.

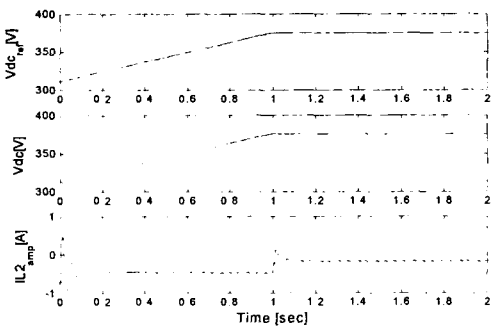


그림 12. 직류링크 전압제어 시뮬레이션 파형(V_{dc}^* , V_{dc} , I_{L2}^*)

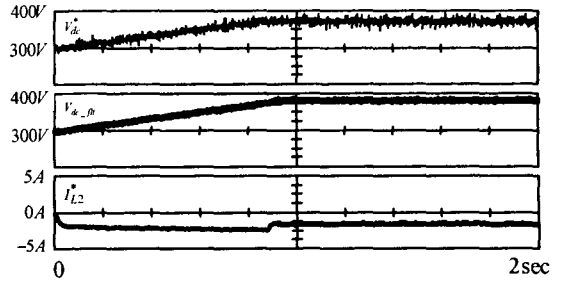


그림 13. 직류링크 전압제어 실험 파형(V_{dc}^* , V_{dc} , I_{L2}^*)

그림 12와 13은 직류링크 전압(V_{dc})의 초기 충전을 나타내는 그림이다. 초기에 커패시터 C_{dc} 에 계통 전압의 피크치인 300V가 충전되고 직류링크 전압지령(V_{dc}^*)을 0.9초 동안 300V에서 375V까지 증가시킬 때, 직류링크 전압이 지령전압을 추종한다. 그리고 이 때 전압제어의 출력(I_{L2}^*)은 0.9초 동안 서서히 감소하다가 0.9초 이후로 약 -1.5A의 값을 유지한다.

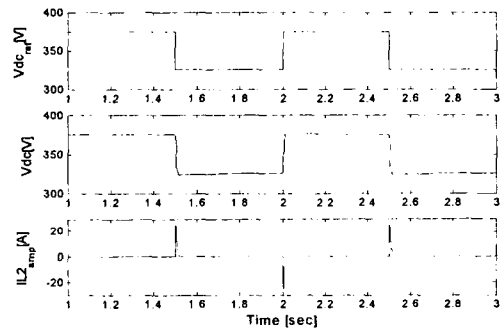


그림 14. 직류링크 전압제어 시뮬레이션 파형

(직류링크 전압지령을 구형파로 주었을 때)(V_{dc}^* , V_{dc} , I_{L2}^*)

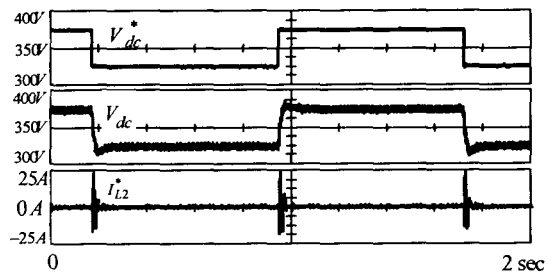


그림 15. 직류링크 전압제어 실험 파형

(직류링크 전압지령을 구형파로 주었을 때)(V_{dc}^* , V_{dc} , I_{L2}^*)

그림 14와 15는 직류 링크 전압지령을 0.5초 간격으로 375V와 325V를 주었을 때 직류링크 전압지령과 직류링크 전압, 그리고 직류링크 전압제어 출력(I_{L2}^*)를 나타낸다. 직류 링크 전압이 직류링크 전압지령을 잘 추종하고 있다.

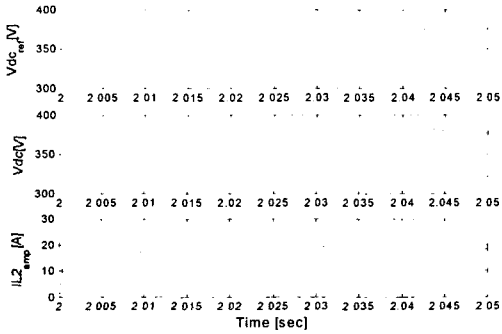


그림 16. 직류링크 전압제어 시뮬레이션 파형

(직류링크 전압지령을 일정하게 주었을 때)(V_{dc}^* , V_{dc} , I_{L2}^*)

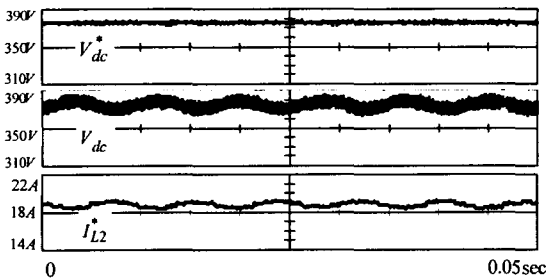


그림 17. 직류링크 전압제어 실험 파형

(직류링크 전압지령을 일정하게 주었을 때)(V_{dc}^* , V_{dc} , I_{L2}^*)

그림 16과 17은 DC-DC 컨버터의 전류가 15A일 때 직류링크 전압을 375V로 제어하는 파형이다. 직류링크 전압이 10Vpeak, 120Hz의 약간의 맥동성분을 가지는 것을 확인할 수 있다.

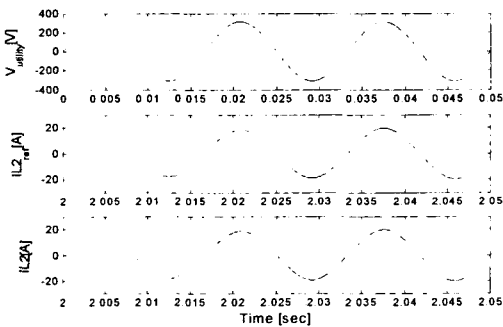


그림 18. 인버터 전류 제어 시뮬레이션 파형($V_{utility}$, i_{L2}^* , i_{L2})

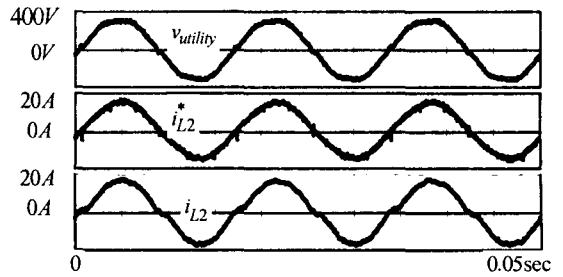


그림 19. 인버터 전류 제어 실험 파형($V_{utility}$, i_{L2}^* , i_{L2})

그림 18과 19는 인버터 전류제어를 한 파형이다. 인버터 전류지령(i_{L2}^*)이 18Apeak, 60Hz인 정현파를 가지며 인버터 출력 전류(i_{L2})가 지령을 잘 추종하고 있다. 계통 전압과 인버터 전류지령, 인버터 전류가 동상임을 확인할 수 있다.

4. 결론

최대 전력점 추종 제어를 통해 검출된 전류 지령으로 DC-DC 컨버터의 입력 전류를 제어하며 직류링크 전압제어를 통해 직류링크 전압을 일정하게 유지시킨다. 직류링크 전압제어기의 출력인 인버터 전류지령의 크기와 PLL제어를 통해 검출된 계통 전압의 위상을 통해 인버터 전류 지령을 만든다. 이 인버터 전류 지령을 통해 전류 제어가 행해진다. 본 논문에서는 태양광 발전 시스템의 구성과 제어방법에 대하여 기술하고 시뮬레이션과 실험을 통해 타당성을 검증하였다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소(R-2002-B-051) 주관으로 수행된 과제임

참고 문헌

- [1] 김태엽 "태양광 발전 시스템을 위한 새로운 최대 출력점 추종 제어 알고리즘", 대한전기학회논문지 51권 3호, pp.133-141
- [2] SaKamoto S., Izumi T., Yokoyama T., Haneyoshi T., "A new method for digital PLL control using estimated quadrature two phase frequency detection." in PCC Osaka 200 proceedings, Volume 2, pp. 671-676
- [3] Arruda L. N., Silva S. M., Filho B. J. C., "PLL structures for utility connected systems", in IAS'2001, 2001, Volume 4. pp. 2655-2660
- [4] 김홍성 "3상 계통 연계 태양광 발전 시스템의 제어기 설계", 건국대학교 대학원 박사학위 청구논문, 1998
- [5] 김용균, 최중우, 김홍근, "계통 연계형 태양광 발전 시스템을 위한 디지털 PLL 제어" 2003. 대한 전기 학회 춘계 학술대회 논문집
- [6] Guan-Chyu Hsieh, Hung. J. C., "Phase-locked loop techniques loop techniques. A survey", IEEE Transaction on Industrial Electronics, Volume 43, Issue 6, Dec, 1996, pp. 609-615