

계통연계형 태양광 발전 시스템에서의 전원측 역율 개선

조영준 김홍성 목형수 최규하 김한성
건국대학교 전기공학과

Source Side Power Factor Correction for Utility Interactive Photovoltaic System

Y.J Joe H.S Kim H.S Mok G.H Choe H.S Kim
Dept. of Elec. Eng. of Kon-Kuk Univ.

Abstrac - Recently, according to developing industry and life style, power consumption have been increased year after year. Currently these much power demand from power consumer is weakening the allowable power reserve margin in summer. As one of the remedies about this problem, the small scale utility interactive photovoltaic system(UIPVS) is considered for auxiliary power source. For this system one of problems to be solved technically, system operating power factor. Generally in case of small scale system, system is operated in unity power factor. But this unity power factor operating mode decrease power factor viewed from utility because UIPVS supply active power to utility. Therefore this paper propose UIPVS with power factor correcting function and this system is analyzed.

1. 서론

현재 급증하는 부하에 대한 원만한 전력공급을 위해 새로운 대용량의 발전소 건설 외에 계통연계형 태양광 발전시스템, 열병합 발전 시스템, 연료전지 발전 등과 같은 소용량의 분산형 전원이 도입되고 있다[1][2].

이러한 분산형 전원 중 특히 계통연계형 태양광 발전시스템은 무한한 청정 에너지원이라는 점 때문에 새로운 에너지원으로 각광 받고 있다. 일반적으로 계통연계형 태양광 발전시스템은 태양광 발전시스템 자체의 역율을 단위역율로 운전하는 쪽으로 연구되었으나 태양광 발전시스템과 같은 분

산형 발전시스템을 계통과 연계하여 태양광 발전시스템의 자체 역율을 단위 역율로 운전 할 경우 계통의 역율을 저하시키는 요인이된다. 특히 태양광 발전시스템에서의 유효전력의 공급이 증가함에 따라 전원측 역율저하 현상이 급격히 발생한다[3].

따라서 본 논문에서는 계통 연계점에서 태양광 발전시스템의 자체 역율을 단위 역율로 운전할 경우의 전원측의 역율저하를 증명하고, 그 해결책으로 부하의 상태를 검출하여 전원측의 역율을 개선하는 기능을 가지는 계통 연계형 태양광 시스템을 제안한다.

2. 계통연계형 태양광 발전시스템

2.1 시스템의 기본구성

계통연계형 태양광 발전시스템은 그림1과 같이 배전계통과 연계하여 대규모 발전소를 보완하는 분산전원의 역할을 한다.

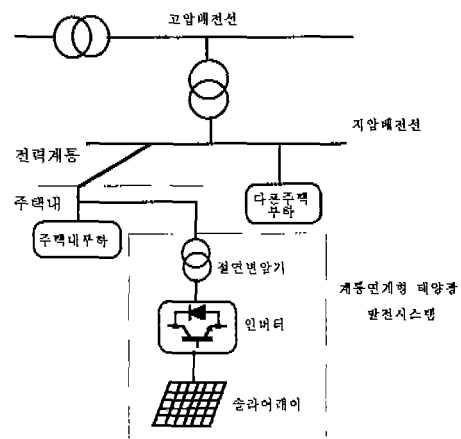


그림1. 계통연계형 태양광발전시스템의 구성

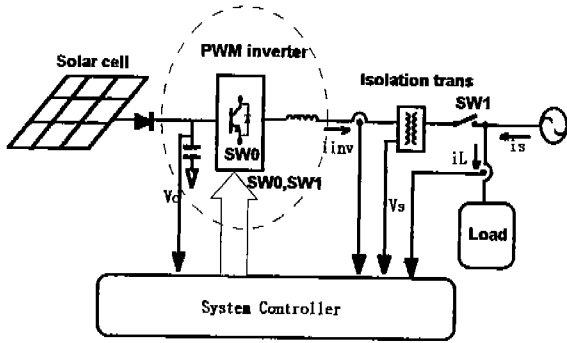


그림2. 태양광발전 시스템의 전체 구성도

그림2는 계통연계형 태양광발전시스템의 전체 구성도이다. 일사량 및 온도 변화에 따른 태양전지의 출력으로부터 인버터를 거쳐 변환된 전력이 부하에 공급되는데 이때 시스템 제어기는 전류제어기, DC 전압 제어기, 무효전류 검출 기능을 가진다[4]. 그리고 계통과 태양광발전시스템과의 절연을 목적으로 변압기를 사용한다.

2.2 시스템 운전특성

계통연계형 태양광 발전시스템은 태양광 발전시스템 자체의 역율을 단위 역율로 운전하는 것이 일반적이다.

일정한 역율각을 갖는 일정용량의 선형 부하에 대하여 태양광 발전시스템이 부하에 전력을 공급하지 않을 때 즉, 계통에 의해서만 부하에 전력이 공급될때의 부하역율은 식 (1)와 같이 구해진다.

$$PF_l = \frac{I_{lp}}{I_l} \quad (1)$$

$$= \frac{I_{sp}}{I_s} \quad (2)$$

여기서 I_{lp} : 부하 유효전류의 실효치

I_l : 부하전류의 실효치

I_{sp} : 입력유효전류의 실효치

I_s : 입력전류의 실효치

이러한 부하에 태양광 발전시스템을 연계하고 태양광발전시스템을 단위역율로 운전할 경우의 전원측 역율은 다음과 같이 계산할 수 있다.

먼저 태양광 발전측 역율을 단위역율로 제어할 경우는 계통과의 연계점에 키르히호프의 전류법칙을 적용하면 계통의 공급전압, 즉 전원전압이 식 (3)과 같을 때 전원측에 흐르는 전류는 다음과 같

이 표현할 수 있다.(그림2 참조)

$$v_s(t) = \sqrt{2} V_s \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$i_s(t) = i_{lp}(t) + i_{lq}(t) - i_{inv}(t) \quad (4)$$

$$= (\sqrt{2} I_{lp} \sin \omega t - \sqrt{2} I_{invp} \sin \omega t) + \sqrt{2} I_{lq} \cos \omega t \quad (5)$$

여기서 $i_s(t)$: 계통에서 공급되는 전류의 순시치

$i_{lp}(t)$: 부하의 유효전류의 순시치,

$i_{lq}(t)$: 부하의 무효전류의 순시치

I_{lp} : 유효 부하전류의 실효치

I_{invp} : 인버터 출력전류의 실효치

I_{lq} : 무효 부하전류의 실효치

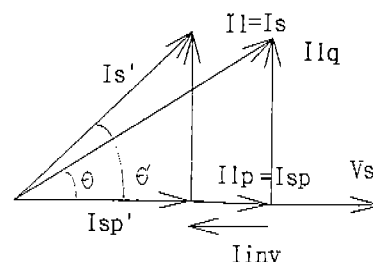
식 (4)에서 입력 전류의 유효성분은 우변의 첫항과 같고 이때 그 실효치는 부하의 유효전류 성분의 실효치에서 인버터 출력전류의 실효치를 뺀값과 같으므로 이를 역율 계산식 (1)에 대입하면, 역율은 다음과 같이 인버터 출력전류 실효치의 함수로 표현할 수 있다.

$$PF_s = \frac{I_{lp} - I_{invp}}{\sqrt{((I_{lp} - I_{invp})^2 + I_{lq}^2)}} \quad (6)$$

$$= \frac{I_{sp}}{I_s} \quad (7)$$

여기서 I_{sp} , I_s 는 각각 태양광발전시스템을 단위 역율로 운전할 때의 입력 유효전류의 실효치, 입력전류의 실효치를 나타낸다.

이로부터, 태양광발전출력에 의한 계통측의 유효전류의 감소가 역율을 감소시킴을 알수 있으며 이를 개념적으로 나타내면 그림3과 같은 벡터도르 나타낼 수 있다.



θ : 태양광발전시스템이 없는 경우의 역율

θ' : 태양광 발전시스템 동작시 역율

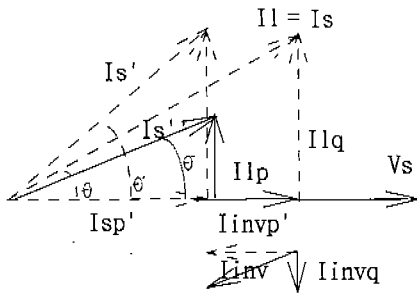
그림3. 계통연계점에서의역률저하

이와같은 모드로 계통연계형 태양광발전시스템을 운전할 경우 입력 역율의 감소로 나타나는 영향을 고려할 때 이와 같은 모드로 운전하는 것이 바람직하지 않음을 알 수 있다.

위에서 언급한 모드의 문제점이 태양광발전측의 유효성분에 의한 계통측의 유효전류량만 감소(분담)하고 무효 성분은 변동이 없기 때문에 부하역율각 보다 입력측의 역율각이 커진 경우이므로, 태양광 발전시스템의 효율과 전원측역율 보상에 의한 손실등을 적절히 고려하여 태양광발전시스템에서 유효전력과 더불어 무효전력까지 발전할 수 있도록 운전한다면 태양광 발전 시스템 자체의 역율을 단위 역율로 제어할 경우 보다는 입력 역율의 개선효과를 볼 수있다. 이는 식(8)로부터 검증할 수 있다.

$$PF_s = \frac{I_{lp} - I_{invp}}{\sqrt{(I_{lp} - I_{invp})^2 + (I_q - I_{invq})^2}} \quad (8)$$

또한 이를 개념적으로 나타내면 그림4와 같은 벡터도로 표현할 수 있다.



θ : 개선된 역률

I_s'' : 역률 조정 후 입력전류실효치

그림4. 역률 제어 벡터도

비선형 부하일 경우는 I_{invq} 가 기본파 무효 성분 및 고조파 성분에 의한 무효전력의 실효치량과 같다.

3. 역율 개선시 태양광발전시스템의 운전특성

태양광 발전시스템의 발전출력으로부터 무효전력을 보상한다면 이에 따른 발전 손실이 있을 것이다. 이에 대해 다음과 같이 해석을 할 수 있다.

태양광 발전시스템의 출력전류는 인버터에 의한 전력 손실이 없다고 가정하고 인버터에서 고조파를 포함한 무효전력을 출력하고 있다고 하면 다음

과 같이 인버터의 전류로 표현된다.

$$i_{inv}(t) = i_1(t) + \sum_{n=2}^{\infty} i_{invhn}(t) \quad (9)$$

또한 기본파 전류를 유효전류와 무효전류로 분리하여 표현 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{inv}(t) = i_{invp}(t) + i_{invq}(t) + \sum_{n=2}^{\infty} i_{invhn}(t) \quad (10)$$

여기서 순시 인버터 전류의 실효치는 정의에 의해서 구할 수 있으며 각각 유효 성분의 실효치, 무효성분의 실효치, 고조파 성분의 실효치에 관한 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$I_{inv} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{invhn}^2} \quad (11)$$

$$= \sqrt{I_{invp}^2 + I_{invq}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{invhn}^2} \quad (12)$$

이때 인버터 전류에 의한 전력손실은 다음과 같이 표현되고

$$P_{loss} = I_{inv}^2 \cdot R_s \quad (13)$$

전력손실과 기본파 성분에 의한 발전출력으로 표현한 태양광발전시스템의 전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다(그림 5 참조).

$$P_{sc} = P_{loss} + P_{gen} \quad (14)$$

$$= \left(\sqrt{I_{invp}^2 + I_{invq}^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_{invhn}^2} \right)^2 \cdot R_s + V_s I_{invp} \quad (15)$$

$$= I_{invp}^2 \cdot R_s + I_{invq}^2 \cdot R_s + \sum_{n=2}^{\infty} I_{invhn}^2 \cdot R_s + V_s I_{invp} \quad (16)$$

$$= I_{invp}^2 \cdot R_s + I_{invq}^2 \cdot R_s + I_{invh}^2 \cdot R_s + V_s I_{invp} \quad (17)$$

여기서 P_{sc} : 태양광발전시스템 출력

P_{loss} : 발전손실

P_{gen} : 유효발전출력

R_s : 전원임피던스

I_{invh} : 고조파 보상 전류

또한 보상정도에 따라 인버터에서 보상해야 할 기본파 무효전류와 고조파전류의 양은 다음과 같이 보상 정도에 따라 표현할 수 있다.

$$I_{invq} = K_q \cdot I_{lq} \quad (18)$$

$$I_{invh} = K_h \cdot I_{lh} \quad (19)$$

윗식에서 전원전압은 계통이 무한 버스라고 가정하면 일정한 값으로 놓을 수 있고 기본파에 의한 무효전류와 고조파 전류 성분은 모두 부하에 의해 결정되고 전원측 임피던스 또한 일정한 값으로 가정하면 무효전력을 보상 할 경우 태양광 발전에 의한 기본파 전류의 실효치는 다음과 같이 기본파 무효전류의 실효치, 고조파 전류의 실효치 및 태양광 발전 출력의 함수로 나타 낼 수 있다.

$$I_{invp} = f(I_{invq}, I_{invh}, P_{sc}) \quad (20)$$

식 (17)로부터 태양광 발전시스템이 무효전력을 보상할 경우 태양광 발전시스템에 의한 기본파 출력은 다음과 같다.

$$I_{invp} = \frac{-V_s \pm \sqrt{V_s^2 - 4V_s(I_{invq}^2 R_s + I_{invh}^2 R_s - P_{sc})}}{2R_s} \quad (21)$$

태양광발전시스템의 효율은 다음식으로 계산할 수 있다.

$$\eta = \frac{P_{gen}[W]}{P_{sc}[W]} \cdot 100[\%] \quad (22)$$

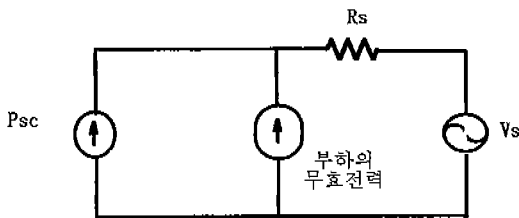


그림5. 태양광 발전손실해석 등가회로

4. 시뮬레이션 및 해석

부하 정격을 유효전력 3KW를 1pu로하고 태양광 발전시스템의 출력이 정격출력 3KW까지 증가할 때 에 대하여 해석하였으며, 편이상 기본파 무효전류에 의한 무효전력 또는 고조파 전류에 의한 무효전력만을 고려할 경우에 대해서 무효전력을

보상할 경우와 보상하지 않을 경우 일정량만을 보상할 경우에 대해 역율변화 및 효율에 관한 해석을 하였다. 또한 부하 용량을 0.5pu로 했을 경우와 1.5pu로 했을 경우에 대해서도 같은 방법으로 해석하였다.

(1) 부하 정격 1pu 일때

먼저 태양광 발전시스템이 무효전력을 보상하지 않고 유효전력만을 발전할 경우 무효전력의 비율을 부하가 유효 전력량 대비 0.2pu, 0.6pu, 1pu로 증가시킬 때, 태양광 발전 출력의 변화에 따른 입력측의 역율 저하는 식(6)에 의해서 구할 수 있으며 그림6(a)와 같이 나타난다.

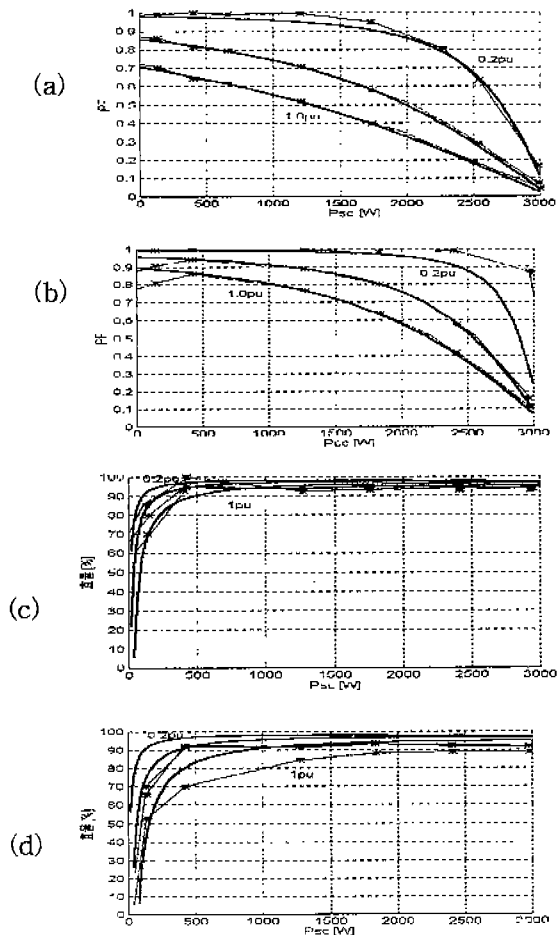


그림6 (a) 비보상시 전원측 역율(b)50% 보상시 전원측역율 (c)50% 보상시 효율(d)100% 보상시효율

— : 해석결과(computation result)

* : 시뮬레이션 결과

그림6(a)에서 알 수 있듯이 무효전력을 보상하지 않고 유효전력만을 발전하는 모드로 태양광 발전 시스템을 운전할 경우 태양광 발전시스템의 발전량 증가에 따른 입력측의 역율저하가 심하게 됨을 알 수 있다.

이러한 입력측 역을 저하를 개선하기 위해서 태양광 발전시스템이 무효전력을 전부 보상할 경우, 태양광 발전 시스템의 효율은 식(22)에 의해 계산할 수 있다. 이때 선로의 저항은 High impedance 조건을 가정하여 0.4Ω 로 하였으며, 무효전력량과 태양광 발전 시스템의 발전량 증가에 따른 효율 변화는 그림6(c),(d)와 같다.

(2) 부하정격 0.5pu 일 때

부하의 정격이 0.5pu이고 무효전력이 0.2pu,0.6pu, 1.0pu로 변할 때 역을 및 효율에 대한 파형은 다음과 같다.

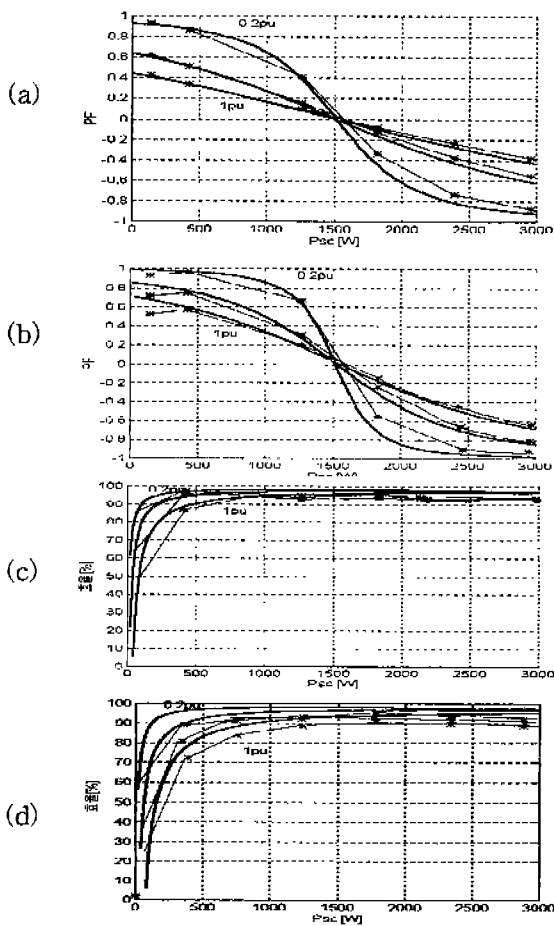


그림7 (a)비보상시 전원측 역을 (b)50% 보상시 전원측역을 (c)50% 보상시 효율(d)100%보상시 효율

(3) 부하정격 1.5pu 일때

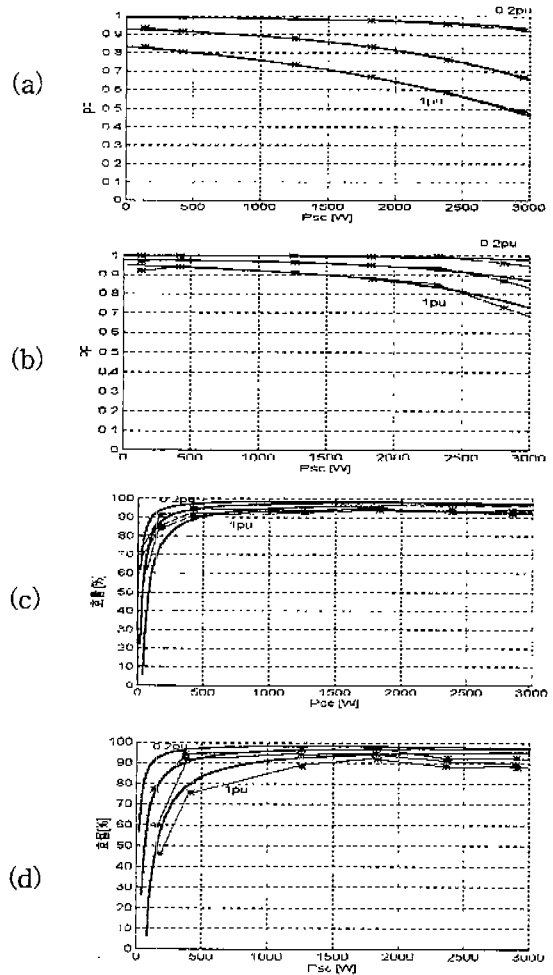


그림8 (a)비보상시 전원측 역을 (b)50% 보상시 전원측역을 (c)50% 보상시 효율(d)100%보상시 효율

부하가 1.5pu이고 무효전력량이 0.2pu에서 1.0pu까지 변할 때 역을 및 효율에 대한 파형은 그림8과 같다.

부하 정격과 무효전력의 양에 따른 태양광 발전 시스템의 출력 변화에 대한 비보상시의 입력측 역을 저하와 효율 변화 그리고 100% 보상시의 효율 변화 또한 50% 보상시의 입력 역을 및 효율 변화에 대해서 고찰 해 보았다.

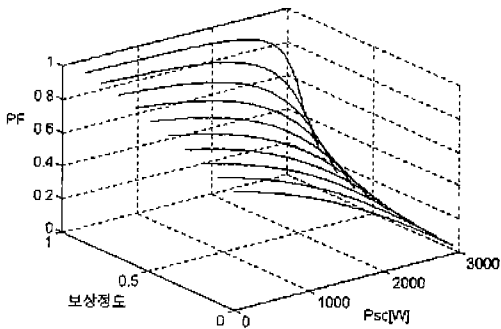
이와 같은 해석을 토대로 입력측 역을을 개선하기 위해 태양광 발전 출력과 부하 조건에 따라 적정량의 무효 전력을 보상하면 태양광 발전시스템의 효율을 크게 저하시키지 않는 선에서 입력측 역을을 일정 값으로 유지할 수 있음을 알 수 있다.

그림7(a)와 7(c)에서 태양광 발전시스템이 무효전력을 50%만 보상하여도, 태양광 발전출력이

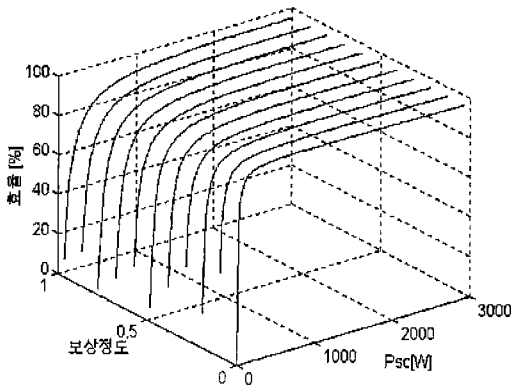
500W에서 2.3KW 사이에서는 입력측 역율이 0.9 이상으로 보상되며 태양광 발전 시스템의 효율이 90% 이상이 됨을 알 수 있다. 즉 무효전력을 전부 보상 할 경우보다 역율은 다소 감소하나 효율은 향상됨을 알 수 있다.

다음은 부하의 유효정격이 1.0pu이고 무효전력 정격이 유효정격대비 1.0pu인 경우에 대해 무효전력의 보상량을 변동하여 해석적으로 구한 태양광 발전 출력 변동에 따른 전원측 역율보상정도과 그때 효율을 나타낸다.

부하정격이 다른 경우에 대해서도 마찬가지로 입력역율 개선과 효율을 고려하여 무효 전력량의 보상 비율을 결정할 수 있다.



(a)



(b)

그림9 (a) 보상정도, 태양광 발전출력 변화에 대한 전원측 역율 (b) 태양광발전시스템 효율(부하 : 유효전력 1pu, 무효전력 1pu)

이러한 해석을 토대로 ACSL을 사용한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다. 이때 부하의 유효전력은 정격 1.0pu 즉 3.0KW 이고 무효전력 또한 1.0pu이다. (그림 10 -12)

그리고 비선형 부하에 대한 경우는 단상정류기 부하를 사용하였으며 부하출력은 650W이고 부하 역율은 0.57이다. (그림 13 - 15)

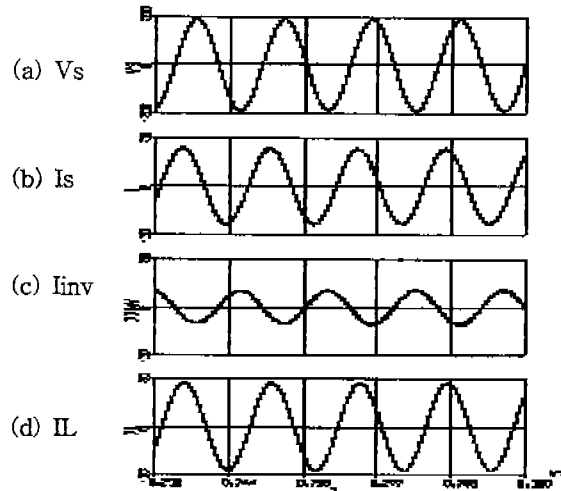


그림 10. 태양광발전시스템을 단위역율 운전할때 각부파형

(a) 전원측 전압, (b) 전원측 전류
(c) 인버터출력전류 (d) 부하전류

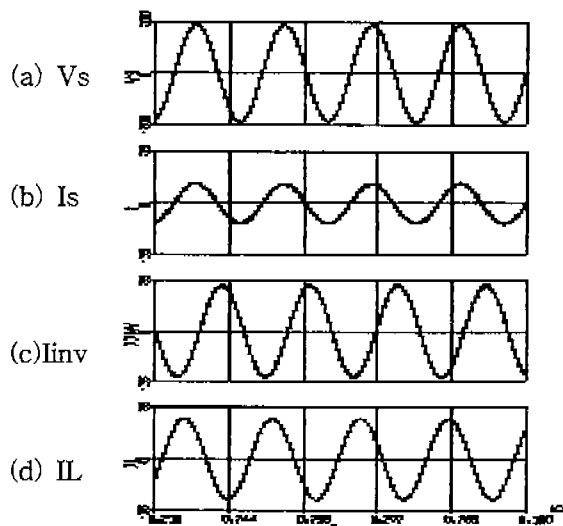


그림11. 무효전력 100% 보상시

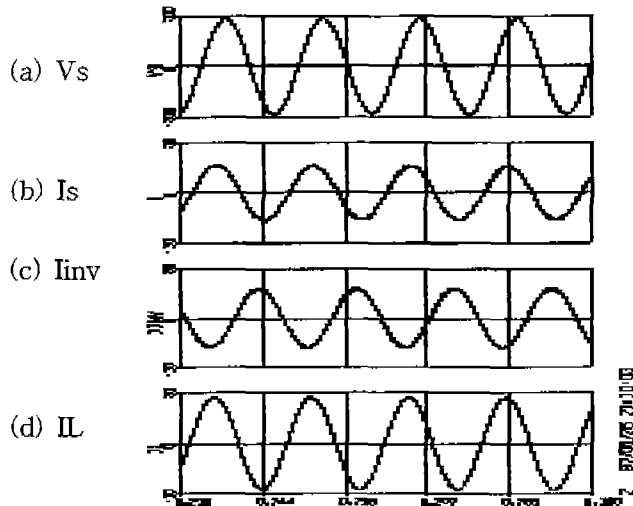


그림12. 무효전력 50% 보상시

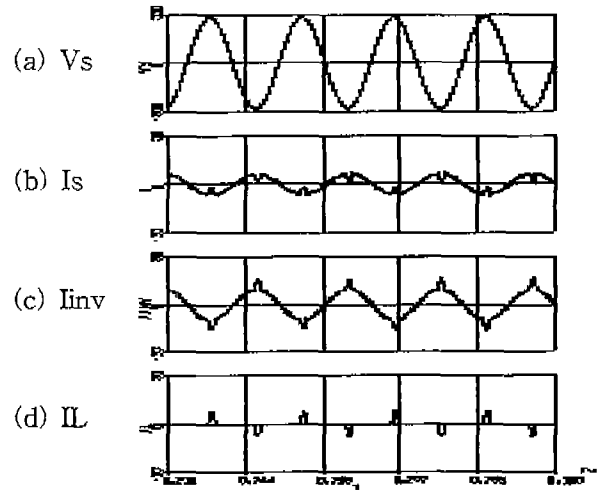


그림15. 무효전력 50% 보상시

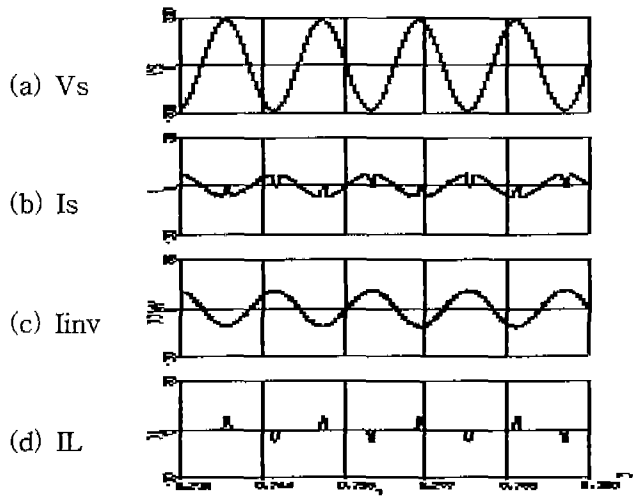


그림 13.태양광발전시스템을 단위역을 운전할때 각부파형

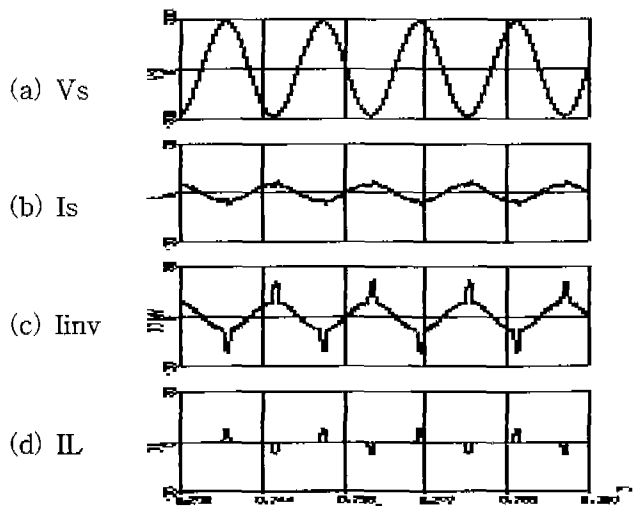


그림14. 무효전력 100% 보상시

참고문헌

- [1] Harashima ,” Microprocessor - Controlled SIT Inverter for Solar Energy System,”, IEEE Trans. Ind. Elec.,vol.,no. 1,pp. 50-55, 1987.
- [2] Tanaka,”Residential Solar-Powered Air Conditioner”, EPE, pp.127-132.1993.
- [3] 김호용외 3인,“분산형전원의 배전계통 도입 전망과 대책” 전기학회지 제45권 10호 1996, pp23-31.
- [4] “A Simple Frequency Independent Method For Calculating The Reactive And Harmonic Current In A Nonlinear Load”, IPEC-Yokohama '95,pp370-375.