

## 태양광/풍력 복합발전 시스템의 최대출력제어기 설계

정상식\* 김시경\* 정영석\*\* 유권중\*\* 송진수\*\*

\*공주대학교 전기공학과

\*\*한국에너지 기술 연구소

### A hybrid maximum power tracker for a photovoltaic/wind hybrid power system

SangSik Jeung\* Sikyung Kim\* Youngselk Jung\*\* Gwonjong Yu\*\* Jinsoo Song\*\*

\*Department of Electrical Engineering, Kongju National University.

\*\*Photovoltaic Research Team, Korea Institut of Energy Research

#### Abstract

In this paper, a hybrid maximum power tracker for a photovoltaic/wind hybrid power system is proposed. In the hybrid system, a direct interfacing the wind power system to the photovoltaic system gives the problems of voltage fluctuations, poor maximum power tracking, and harmonics generation associated with the random wind speed, the random solar irradiation and the pulsating torque came from the wind turbine synchronous generator and photovoltaic. To overcome these problems, a wind side DC/DC converter and a photovoltaic side DC/DC converter are proposed employing a star/delta transformer interconnected between the wind turbine side and the photovoltaic side. The control objective for each dc/dc converter is to extract maximum power from each different photovoltaic system and wind system, and transfer two different powers to the inverter and load.

#### I. 서론

대체에너지 전력발전 시스템은 전력원과 부하 연결 상태에 따라 독립형이나 복합형으로 분류되어진다. 전력원이 독립형인 경우, 이 시스템은 큰 용량의 배터리나 디젤기관과 같은 보조전원으로부터 에너지 공급을 필요로 하게 된다. 이와 같은 보조전원의 사용은 대체에너지의 장점인 발전의 무공해 에너지 특성

을 감소시킨다. 더구나, 독립형 풍력에너지나 태양광 에너지 자원은 계절에 따라 전력 발전 패턴이 변동되어 부하에 대하여 신뢰할 만큼 충분한 전력을 공급하지 못하는 단점을 가진다. 따라서 복합발전 시스템은 독립형 시스템보다 작은 배터리 백업과 더 신뢰성 있는 전력 공급 측면에서 단독 대체에너지 발전 방식의 문제 해결 방안을 제시해 준다. 그러나, 복합발전은 풍력발전 시스템과 태양광 시스템의 연결시 출력 전압의 불안정과 불균일 풍속에 의한 고조파 발생, 풍력터빈 발전기에서 오는 맥동 토크와 같은 문제가 유발된다. 풍력터빈의 출력 전류는 고조파 성분과 기본 주파수 성분이 더해진 식으로 표현되어진다. 그러나, 기본 주파수 성분의 풍력터빈 출력 전류만이 평균전력 공급에 기여하고 고조파 성분의 전류는 풍력 발전의 전력 공급에 기여하지 못한다. 따라서 가능한 입력 전류에 포함되어 있는 고조파 성분을 제거하는 것이 유효한 풍력 에너지의 전부를 이용하여 풍력 발전의 최대 출력 제어를 가능하게 한다. 이러한 복합발전 시스템의 문제를 해결하기 위하여 풍력 측의 DC/DC 컨버터와 태양광 측의 DC/DC 컨버터 및 풍력터빈 측과 태양광 측 사이를 star/delta 변압기로 연결하였다. 여기서 각 DC/DC 컨버터는 태양광 시스템과 풍력 시스템 각각에서 최대 전력을 뽑아서 인버터와 부하로 전력을 공급하도록 제어되어진다. 이와 같은 동작 특성은 풍력 시스템에서 풍력터빈의 출력 역률과 연관되기 때문에 풍력의 이용 효율을 증가시키게 되고, 또한 태양광 시스템에서는 태양전지로부터의 출력 전력을 최대한 추출하기 위하여 사용되어진다.

## II. 복합 시스템 구성

복합 전력 시스템은 두 개로 구성된다.

- \* 태양전지, 풍력터빈, 부하, 부하로 AC 전력을 공급하는 인버터, 태양전지 측의 전력 컨버터와 풍력발전기 측의 전력 컨버터로 구성된 전력부
- \* PWM 발생부를 포함한 제어기, 최대 전력 추적 제어부, 그리고 배터리 충전 제어부로 구성된 제어기부

그림.1은 복합 전력 시스템의 전체 회로 구성을 보여준다. 태양광 발전기의 출력과 풍력 발전기의 출력을 각각 대체에너지원으로 사용하기 위해 두 개의 Boost 컨버터를 사용하여 연결한다. 풍력 측의 컨버터는 3상 정류기, star/delta 변압기 그리고 Boost 컨버터로 구성되어지는 반면 태양광 발전기 측은 Boost 컨버터로만 구성되었다. Boost 컨버터 출력 측에 연결되어진 VSI(Voltage Source Inverter)의 주기능은 출력 필터를 통하여 직류 전압을 단상 교류전압으로 바꿔주는 기능을 담당한다

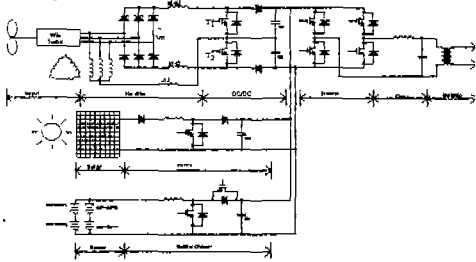


그림.1. 복합 전력 시스템의 전체 시스템 구성

## III. 풍력 시스템의 동작

제안한 풍력 시스템의 블록 다이어그램은 그림.2에 보였다. 이는 영구자석으로 된 풍력터빈, 3상 정류기, star/delta 변압기 그리고 DC/DC 컨버터로 구성되었다. 여기서 star/delta 변압기는 그림.2에 보여진 것처럼 입력(교류)측과 출력(직류)측 사이를 연결한다. 변압기의 2차 측은 delta 결선 되어지고 무부하 상태로 되었다. 풍력터빈에서 발전된 교류 전압은 3상 브리지 다이오드에 의해 정류된다. 출력 측의 DC/DC 컨버터는 출력 전압을 레귤레이션하는 기능을 담당한다.

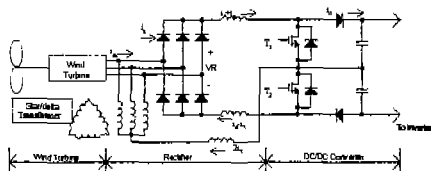


그림.2. 풍력 터빈 전력 시스템 구성

## 1. 입력 전류 해석

이 절에서는 풍력터빈 전력 변환 시스템의 해석을 소개하고 최대 전력 추적 동작을 설명한다. 풍력터빈 연결의 간소화된 회로 다이어그램은 그림.2에 보여진다. 그림과 같이 정류기의 출력 전류는 두 개의 Boost 컨버터를 이용하여  $(i_d + i_3)$ 와  $(i_d - i_3)$ 을 제어하는 것이다. 여기서, 직류 측 전류 기준치  $i_{d,ref}$ 와 3 고조파 전류  $i_{3,ref}$ 는 각각 그림.4의 풍력터빈의 최대 전력 제어기로부터 얻어진다. 직류 측 전류  $i_d$ 는 부하(inverter)로 공급되고 3 고조파 전류  $2i_3$ 은 그림.2에 보여진 것과 같이 풍력터빈 측과 DC측 사이의 star/delta 변압기를 통하여 순환된다. 전류  $2i_3$ 는 풍력터빈 AC측의 각 상에 동일하게 흐르게 된다. 전류  $2i_3$ 의 주입이 풍력의 이용률(최대 출력 제어)을 개선하는 원리를 그림.3에 설명하였다. 이 그림에서 풍력터빈을 제어한 결과로 풍력터빈의 선전류  $i_a$ 가 정현파로 구성되어지는 것이 상세하게 묘사되었다. 그림.3.(a)는 정류된 후 Boost 컨버터에 입력되는 전류를 보여준다. 그림.3.(b)는 순환하는 고조파 전류  $i_3$ 를 나타내고 있으며 이 전류의 피크치는  $i_d$ 와 같다. 선전류  $i_a$ 는 그림.3.(c)에 보여진 것처럼 정현파 형태로 수정되었다. 정류기의 직류 측에 있는 두 개의 DC/DC 컨버터는 직류성분과 3 고조파 성분을 포함한 직류 측 전류를 끌어온다. 3고조파 전류는 정류기의 교류 측과 직류 측을 순환한다. 그리고 순환하는 3 고조파 전류는 그림.3.(c)에 보인 것처럼 풍력 터빈의 출력운전에 사용된다.

## 2. 최대 전력 추적

스위치 T1과 T2의 제어기 블록 다이어그램은 그림.4에 보여진다. 그림에서 알 수 있듯이 전압제어 루프는 태양전지와 배터리가 연결되며, 시스템 직류 버스의 출력 전압을 안정하게 조절한다. 기준 전류  $i_{d,ref}$ 는 풍력터빈의 최대 전력 출력과 DC 버스 전압 제어기의 출력의 합으로부터 얻어진다. 기준전류  $i_{d,ref}$ 는 풍력터빈의 출력 전압으로부터 얻어지고  $i_{3,ref}$ 의 피크치는 풍력 터빈에서 얻어지는 최대 전력에 의해 조절되어진다.  $i_3$ 의 최적치는 유용한 단일 전력벡터에서 얻어지는  $i_{d,ref}$ 와 같다.

한편, 풍속  $v_0$ 에 의한 풍력 터빈에서의 전기적인 힘은 다음 식을 이용하여 얻어진다.

$$P_w(v) = \frac{-406.3 + 183v - 5.63v^2}{1000} \quad (1)$$

최대 전력 추적 제어를 통한 다음 Boost 컨버터가 이용할 수 있는 출력 전류의 최대치는 다음 식을 이용하여 얻을 수 있다.

$$I_{d,ref} = \frac{P_w(v)}{V_{0,ref}} \quad (2)$$

여기서  $P_w(v)$ 는 풍력터빈에서의 최대 전력이고  $V_{0,ref}$ 는 Boost 컨버터 DC 버스의 기준 전압이다. 더욱이  $I_{3,ref}$ 의 피크치는  $I_a$ 와 같아야 하고 선 전압과 같은 위상이어야 한다. 정류기의 출력 전류  $I_a$ 의 정확한 제어에 의해 풍력 Boost 컨버터 출력 전류는 기준 전류  $I_{ref}$ 를 추종하여야 하며, Boost 컨버터의 출력 전력은 풍력 터빈의 이용할 수 있는 최대 전력을 추종하게 된다.

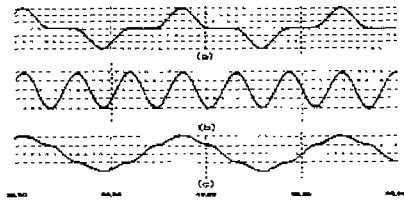


그림.3. 3 고조파전류 주입동안의 입력전류  $i_{3s}$ 의 각 상태

- (a) 전류  $i_a$ 를 조정한 후 인덕터 L을 경유하여 노드 e 와 N의 상호 연결
- (b) 순환하는 3고조파  $i_3$
- (c) 전류  $i_a$ 입력 후 변압기 연결

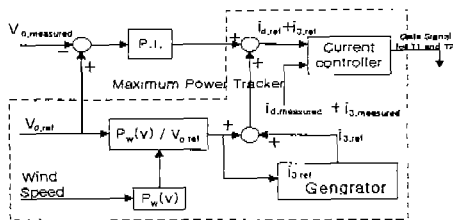


그림.4. 풍력터빈 최대 출력 제어기 블록 다이어그램

#### IV. 태양광 전력 시스템의 동작

그림.5에 보여진 것처럼 태양광 시스템은 최대 전력을 추적하는데 DC/DC 컨버터가 사용되어진다. 더욱이 DC/DC 컨버터는 인버터가 그림.1.(c)와 같이 부하에 AC 전력을 공급하도록 연결되어진다.

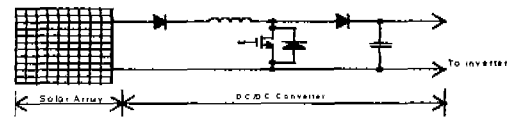


그림.5. 태양광 전력 시스템의 구조

태양전지로부터 최대 전력 추적하는 제어기를 얻을 수 있는데 먼저 태양전지 시스템의 출력 전류와 출력 전압은 그림.6에 보여진 것처럼 전력/전압의 곡선의 최대 출력의 전력 점을 DC/DC 컨버터가 출력하도록  $V_{ref}$ 가 조정되어진다.

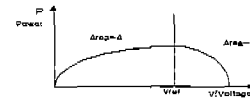


그림.6. 태양전지의 전력/전압 곡선

최대 전력 추적을 위해 DC/DC 컨버터는 태양광 시스템이 최대 전력점에서 동작되도록 컨버터 출력 전압을 제어한다. 태양광 시스템에서 신용할만한 최대 전력 추적 방법이 여러 문헌[2,3,4]에 제안되어졌다. 이러한 접근은 기준 전압으로 정의된 전압 안에서 최대 전력량의 선형적인 변화인 전력/전압의 관계를 사용하였다. 이와 같이 최대 전력점을 나타내는 기준전압  $V_{ref}$ 는 전력/전압 곡선에서 확정되어진다. 출력 전력 비교 후, 이전의 값  $P_n$ 과 현재 상태  $P_f$ 는 다음의 출력 방적식으로 나타내어진다.

$$P_n = V_n \times I_n \quad (3)$$

$$P_f = V_f \times I_f \quad (4)$$

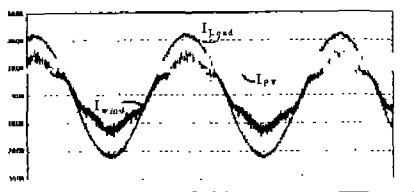
여기에 변수  $V_n$ 과  $I_n$ 은 현재 측정된 값이고 변수  $V_f$ 와  $I_f$ 는 이전에 측정된 값이다. 시스템의 동작 모드에서  $P_n$ 과  $P_f$ 를 비교하면 세 개의 다른 형태로 나올 수 있다.

- (i)  $P_n > P_f$  : 이 조건에서, 태양광 출력 변수는 시스템이 안정한 상태인지 어떤지를 판단한다.
- (ii)  $P_n = P_f$  : 이 모드에서는 최대 전력점에서 태양광의 시스템을 표현한다.
- (iii)  $P_n < P_f$  : 이 모드에서 만약  $V_n > V_f$ 이면 태양전지의 최대 전력 동작점은 그림.6.에서 보여 주듯이 Area-A에서 Area-B를 통과한다. 따라서  $V_{ref}$ 는 감소하게 되고  $V_n < V_f$  인 경우 최대 전력 동작점은 Area-B에서 Area-A로 이동하게 되고  $V_{ref}$ 는 Area-A에서 Area-B까지 증가한다.

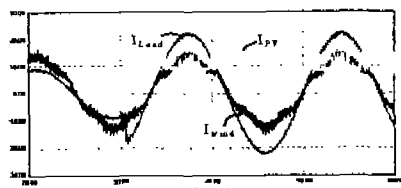
태양전지로부터 전력 추적 제어의 최대 값을 얻기 위해 먼저 태양전지 시스템의 출력 전압과 출력전류가 전력/전압 단면을 따라 감으로써 제어될 수 있다. 이는 정의된 기준전압에서 최대전력량의 선형적인 관계에 기인하고 있다. 그러므로 최대 전력점을 나타내는 기준전압은 태양전지 전력/전압 단면으로부터 얻을 수 있게된다.

## V. 시뮬레이션

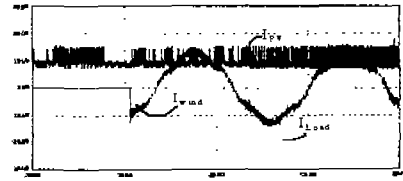
제시된 기법을 검증하기 위해서 각 상태에 대하여 복합발전시스템의 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 첫째, 풍력터빈과 태양광 발전을 갖는 복합 시스템의 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용되어진 주요 파라미터들은 다음과 같다. 선간 전압은 380(V), 태양광 입력 전압은 300(V), DC 측의 커패시터는 2000( $\mu$ F), 인덕터는 1(mH). 그림.7.(a)는 풍력터빈 발전기와 태양광 발전기를 갖는 복합 시스템의 시뮬레이션 결과를 나타내고있다. 여기서  $I_{load}$ ,  $I_{PV}$ ,  $I_{wind}$ 는 부하전류, 태양광 발전 전류, 풍력 발전 전류이다. 두 번째로 태양광 전력 시스템이 off 상태에서 on 상태로 갑자기 변할 때 복합 시스템의 과도 응답을 그림.7.(b)에 나타냈다. 이 그림은 풍력 시스템이 과도상태에서 잘 동작됨을 보여준다. 더욱이, 이 그림은 복합발전모드와 두 개의 독립된 풍력발전 모드를 갖는 복합전력 시스템의 가능성을 보여주고 있다. 마지막으로, 풍력 시스템이 off 상태에서 on 상태로 갑자기 변할 때 복합 시스템의 과도 응답은 그림.7.(c)과 같다. 이 그림은 태양광 시스템이 과도상태에서도 성공적으로 동작됨을 보여준다. 더욱이, 이 그림은 복합 발전 모드와 두 개의 독립된 태양광 발전 모드를 갖는 복합발전시스템의 가능성을 입증하고 있다.



(a) 복합 발전 모드의 시뮬레이션 결과



(b) 태양광 시스템이 변동될 때의 시뮬레이션 결과



(c) 풍력 시스템이 변동될 때의 시뮬레이션  
그림 7. 상태에 따른 시뮬레이션 결과

## VI. 결론

본 논문에서는 태양광/풍력 복합발전 시스템의 복합 최대 전력 추적기를 제안하였다. 복합 시스템에서 풍력 측의 DC/DC 컨버터, 태양광 측의 DC/DC 컨버터와 풍력터빈 측과 태양광 측 사이를 연결하는 star/delta 변압기가 사용되었다. 각 DC/DC 컨버터의 제어 목적은 태양광 시스템과 풍력 시스템 각각에서 최대 전력을 얻어 인버터와 부하로 두 개의 다른 전원을 공급하는 것이다. 제안된 제어기법은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 입증되었다.

## Reference

- [1] J. Holtz, "A High Power Multitransistor Inverter Uninterruptable Power Supply System", *IEEE Tr. PE*, Vol.3, No.3, pp.278-285, July 1988
- [2] L. Solero et al., "Performance of A 10kW Power Electronic Interface for Combined Wind/PV isolated Generating Systems", *IEEE IAS Conf.* pp. 1027-1032, 1996
- [3] Development of the Photovoltaic-wind Power Hybrid System for the Electrification of the Non Electrified Rural Areas, Annual Report of Korea Institute of Energy Research, 1997 2.
- [4] Beyer H.G. et al., "A method for the Identification of configurations of PV/WIND Hybrid Systems for the Reliable Supply of Small Loads *Solar Energy*" Vol.57, No. 5, pp.381-391, 1996
- [5] Andrews, J.W. "Energy storage requirements reduced in coupled wind-solar generating systems *Solar Energy*", Vol.18, pp.73-74
- [6] Beyer H.G. et al, "Solar/Wind Hybrid systems for the autonomous supply of small electrical loads", *ISES Solar Wind Congr.*, Vol. 8, pp.173-178, 1993