

탄성에너지를 이용한 전력보상장치의 운전특성에 관한 연구

박세준*, 강병복, 임종열, 윤정필, 조경재, 차인수
 동신대학교 전기전자공학과

A Study on Driving Characteristics of Power Compensation Device using elasticity

Se-Jun Park*, Byung-Bog Kang, Jung-Yeol Lim, Jeong-Phil Yoon, Kyung-Jae Cho, In-Su Cha
 Dept. of Electrical and Electronics Eng. Dongshin Univ.

Abstract - Combined generation system of photovoltaic and wind power is required backup system that such as a storage battery to supply energy, when not enough photovoltaic and wind power source for power supply equally and continually, because the energy source is changeable and stable through change of weather as irradiation, temperature, wind speed, wind speed, wind direction, seasons, etc..

통해 흐르는 광전류이고, I_d 는 암전류로서 I_{ph} 와는 반대 방향이다. 병렬저항 R_{sh} 는 이상적인 다이오드 특성에서 벗어나 일정한 상수 저항으로 표시되는 누설저항을 나타내며, R_s 와 R_L 은 각각 전지 내부에 존재하는 직렬 저항과 외부에서 걸어주는 부하저항을 나타낸다.

1. 서론

화석에너지의 고갈과 지구환경의 악화라는 두 가지 제약조건이 기존의 에너지이용을 둘러싼 인식에 새로운 변화를 요구하고 있다. 그래서 대체에너지의 개발이 세계적인 공동 연구과제가 된지 오래다. 그 대표적으로 태양 에너지와 풍력 에너지를 꼽을 수 있는데, 무한정, 청정에너지원이라는 장점을 가지고 있어서 지속적인 연구가 진행되어져 현재는 실용화 단계에 이르렀다.

그러나 태양광에너지나 풍력 에너지 모두 일사량, 온도, 풍속, 풍향, 계절 등의 기상조건의 변화에 따라 출력이 불안정하고 극히 간헐적인 에너지원이라는 특성을 가지고 있기 때문에 기존 발전 시스템에 비교한다면 태양 및 풍력 발전시스템 각각은 신뢰성 면에서 에너지 변환, 저장, 부하조정 등의 측면에서 어느 정도의 문제점을 가지고 있다.

이러한 이유로 태양광발전과 풍력발전시스템을 복합한 발전방식이 신뢰도를 높이고 경제성을 높이는 새로운 방법으로 각광을 받고 있다.

그러나 지역조건과 기상조건 등에 따라 태양광과 풍력 복합발전시스템도 최적화를 요구하기 때문에 이를 위해 태양광과 풍력 복합발전시스템에 백업시스템의 일종으로 태엽스프링의 탄성에너지를 이용한 전력보상장치를 추가적으로 설치하여 복합발전시스템의 에너지가 부족할 때 축전지에 전력을 공급하도록 하였다. 전력보상장치를 추가적으로 설치 활용함으로써 이러한 문제점들을 해결하여 지역에 상관없고 기상조건의 변화에도 연속적인 에너지를 얻을 수 있는 장치가 필요하다고 생각된다.

2. 에너지의 특성

2.1. 태양전지의 특성

태양전지 표면에 입사하는 빛의 일부는 표면에서 반사되며, 표면을 투과한 빛은 태양전지 내에서 흡수되어 광자수는 지수함수적으로 감소한다. 그림 1은 빛이 조사될 때 광기전력효과(Photovoltaic Effect)를 이용한 태양전지의 등가회로를 보여주고 있다.

여기서 I_{ph} 는 입사된 빛에 의해 생성된 캐리어(Carrier)가 외부로부터 방해받지 않을 때 폐회로를

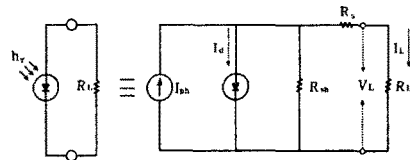


그림 1. 태양전지의 등가회로

등가회로에서의 태양전지의 출력전력은

$$I_L = I_{ph} - I_d - \frac{V}{R_{sh}} \tag{1}$$

$$= I_{ph} - I_0 \left(\exp \frac{qV}{A_0KT} - 1 \right) - \frac{V}{R_{sh}}$$

$$V_d = V + IR_s \tag{2}$$

$$= \left[\frac{A_0KT}{q} \ln \left(\left(I_{ph} - \frac{I_L}{I_0} \right) + 1 \right) \right] + IR_s$$

여기서 I_0 는 다이오드 포화전류이다.

광 투사시 $R_s=0$, $R_{sh}=\infty$ 이상적인 PN접합 다이오드인 경우 부하에 흐르는 전류 I_L 은 다음과 같다.

$$I_L = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nKT} \right) - 1 \right] \tag{3}$$

여기서, I_L 은 출력전류, I_{ph} 는 광전류, I_0 는 다이오드 포화전류, n 은 다이오드 상수, K 는 볼츠만 상수이고 q 는 전자의 전하량이다.

그리고 일정온도와 일정 일사조건에서 태양전지의 전압-전류 특성 곡선은 그림 2와 같이 된다. 여기서 개방전압 V_{oc} , 단락전류 I_{sc} , Fill Factor (FF) 등 3개의 변수는 에너지 변환효율과 관련된 파라미터로서, $I_L=0$ 인 조건에서 개방전압 V_{oc} 는 다음과 같다.

$$V_{oc} = \frac{nKT}{q} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \tag{4}$$

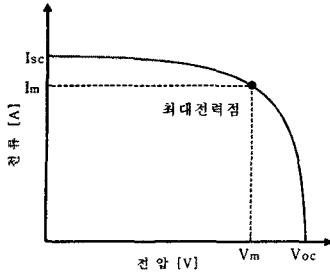


그림 2. 태양전지의 전압-전류곡선

2.2 풍력에너지의 특성

풍력에너지의 크기는 바람의 속도와 밀접한 관계가 있다. 속도 V 로 통과면적 A 를 지나는 바람이 갖는 에너지의 총량은 다음과 같다.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho v^3 A \quad (5)$$

여기서, P_w : 풍력 에너지 총량 [W], v : 풍속 [m/sec]

A : 통과면적 [m^2], ρ : 공기밀도 [kg/m^3]

P_w 의 에너지는 회전자에 의해 기계적인 동력으로 변환되는데 각 운동량의 변화가 없고 회전자 끝의 간섭흐름이 없을 때 변환효율을 표시하는 실제 동력계수 C_p 의 값은 회전자 및 운전상태에 따라 다르며 통상 0.35~0.5정도의 값을 갖게 된다. 실제로 이용 가능한 동력 P_e 는 다음 식은 다음과 같다.

$$P_e = C_p \eta_m \eta_g P_w = C_p \eta_m \eta_g \frac{1}{2} \rho V^3 A \quad (6)$$

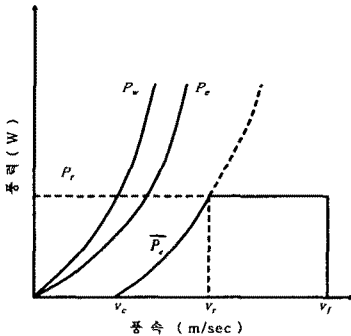


그림 3. 풍력발전시스템의 출력 특성모델

그림 3은 일반적인 풍력발전시스템의 출력 특성모델을 보이고 있다.

실제 풍력발전시스템의 기동시에는 시스템의 기계적 관성, 마찰 및 전기적 손실 등에 의해 시동풍속 V_c 이상의 풍속에서만 시스템의 출력이 생산되기 시작하고 정격 풍속 V_r 에서 정격출력 P_r 까지는 V^3 에 비례하여 출력을 나타내며, 그 이상의 풍속에서는 시스템의 출력이 일정하게 유지된다. 그리고 중단풍속 V_t 에서 시스템의 보호를 위해 출력을 멈추게 된다.

통과면적 A 을 지나는 바람의 평균 에너지 $\overline{P_w}$ 는 다음과 같다.

$$\overline{P_w} = \frac{1}{2} \rho A \int_0^\infty v^3 P(v) dv = \frac{1}{2} \rho A C^3 \Gamma(1 + \frac{3}{k}) \quad (7)$$

풍력발전시스템의 평균 풍력에너지 $\overline{P_e}$ 는 다음과 같다.

$$\overline{P_e} = \frac{1}{2} \rho A \int_0^\infty C_p \eta_m \eta_g v^3 P(v) dv \quad (8)$$

그러나 (8)에는 실제 시스템의 효율 등은 고려되었으나 평균 출력에너지에 영향을 미치는 시스템의 운전특성은 고려되어 있지 않으므로 실제의 시스템 운전특성을 모델링화한 그림 3에 의해 풍력발전시스템의 실제 평균 출력에너지 $\overline{P_e}$ 는 다음과 같다.

$$\overline{P_e} = \frac{1}{2} \rho A \int_{V_c}^{V_r} C_p \eta_m \eta_g v^3 P(v) dv + \frac{1}{2} \rho A C_p \eta_m \eta_g V_r^3 \int_{V_r}^{V_t} P(v) dv \quad (9)$$

2.3 태엽 스프링의 탄성에너지

탄성은 모든 물체에 대해서 나타나는데, 고체에서 힘이 어느 한계를 넘으면 탄성이 없어져 힘을 제거해도 변형이 남게 된다. 이렇게 탄성을 유지할 수 있는가 어떤가의 경계가 되는 힘의 크기를 그 물체의 탄성한계라고 하고, 탄성한계를 넘어 더 힘을 가하여 어느 점에 이르렀을 때, 갑자기 변형이 증가하게 된다.

탄성은 복원력의 결과로서 안정된 상태의 특성이다. 즉, r_0 를 평형상태의 크기(길이), $x(\equiv r - r_0)$ 을 늘어난(또는 줄어든) 길이라고 할 때

$$F \propto -(r - r_0) \quad (10)$$

이다. 비례상수로서 스프링 상수 k 를 도입하여

$$F = -kx \quad (11)$$

로 표시된다.

힘을 받아 일시적으로 변형되고 있는 물체는 밖으로부터의 힘을 잠재적 에너지로 저장하고 있는 상태에 있다. 변형하고 있는 탄성체는 위치에너지를 가지게 되고 이것을 탄성에너지라 한다. 이러한 탄성 에너지를 이용해 발전기를 구동하게 된다. 에너지를 방출하는 비율은 사용 매개변수에 의해 결정된다.

또한, 늘려진 스프링이 펴지면서 일을 하게 되므로 늘려진 스프링에는 일을 할 수 있는 능력 즉, 위치에너지가 저장되어 있다고 할 수 있다. 이 탄성(위치)에너지는 다음과 같다.

$$U = - \int F dx = \int kx dx = \frac{1}{2} kx^2 \quad (12)$$

그림 4는 스프링의 평형위치 부근에서의 근사 위치에너지와 온도가 높아질 때 열팽창 특성을 설명해주는 스프링의 비대칭적인 위치에너지를 보여주고 있다.

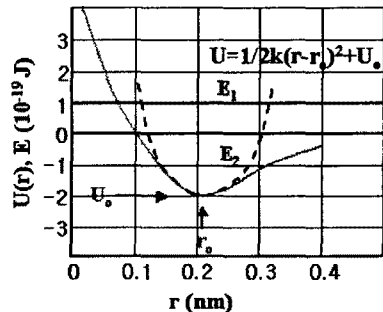


그림 4. 스프링의 위치에너지와 대칭적 위치에너지

3. 전력보상시스템

그림 5는 전력보상시스템의 전체 구성을 보여주고 있다.

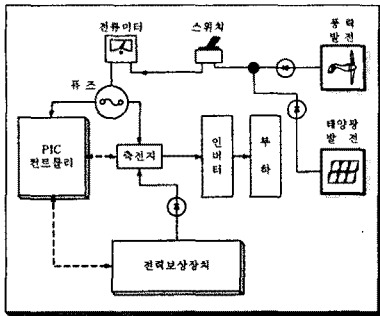


그림 5. 전력보상시스템의 구성도

전력보상시스템은 태양광발전 시스템부, 풍력발전 시스템부, 전력보상장치부, 인버터, 다이오드, 축전지 등으로 구성되어있다.

개발된 전력보상장치는 탄성 에너지를 가지고 있는 태양 스프링을 발전기와 연결하여 다른 발전 시스템(태양광과 풍력)의 출력이 기상 조건에 의해 부하에 전력을 공급할 수 없을 때나 축전지에 축적된 에너지가 충분하지 못한 경우, 제어부의 지시에 따라 태양 스프링의 탄성 에너지를 이용한 전력보상장치를 구동시켜 부하에 전력을 지속적으로 공급하는 시스템이다.

그림 6은 태양 스프링의 탄성 에너지를 이용한 전력보상장치의 구성을 나타내고 있다.

그 구성은 크게 태양스프링(재질 : STC-5, 외형 : 직경 10cm, 내경 : 2cm, 높이 : 5cm), DC모터(TD8025G-12, 12V, 2.5A, 25W, 300rpm), 기어모터(S8KA60B, 50rpm), 포터센서(Autonics, BM200-DDT), PIC(Peripheral Interface Controller)로 구성되어있다.

태양 스프링은 제어부의 신호에 따라 DC Motor(와 Gear Motor)가 동작하여 풀리거나 감진다.

전체 태양을 감는 시간은 약 2분 정도이고 풀리는 시간은 약 30분 정도이다.

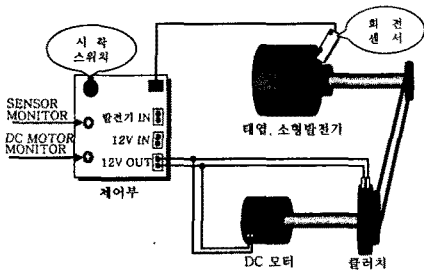


그림 6. 전력보상장치 구성도

본 실험에서는 태양의 보호를 위해 회전수를 40 턴으로 제한하였으며, 회전수는 제어부의 덤 스위치를 이용하여 바꿀 수 있도록 설계하였다.

그림 7은 보상장치의 구성도인 그림 6을 제작한 실제 사진이다.

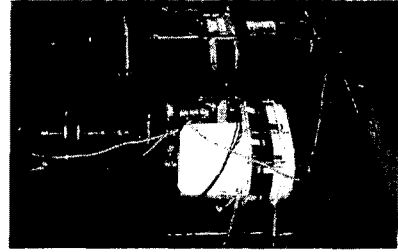


그림 7. 태양스프링 탄성 에너지를 이용한 전력보상 시스템

입력전압 V_i 가 입력되면 제어부의 PIC가 비교기를 통해 기준전압과 실제 측정전압을 비교한다.

기준전압 이상이 되었을 때, V_M 을 통하여 DC모터를 구동시킴으로써 보상장치에 태양을 감아주며, V_B 를 통해서 부하를 인버터의하여 구동시킨다.

기준전압 이하가 되었을 때, 보상장치를 통하여 축전지에 지속적인 전력을 공급한다.

동력저장 복합발전시스템은 페루프 시스템으로 운전되기 때문에 무인 운전이 가능하고 시스템을 스스로 보호할 수 있는 안전 장치로써 전기제어 시스템을 사용하여 안전하게 운전 될 수 있도록 설계하였다.

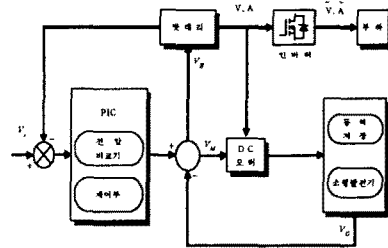


그림 8. 전력보상 시스템의 블록선도

5. 실험 및 검토

그림 9는 태양전지 어레이(직렬 : 9, 병렬 : 2)의 전압-전류, 전압-전력 동작 특성 시뮬레이션 곡선을 보여주고 있다.

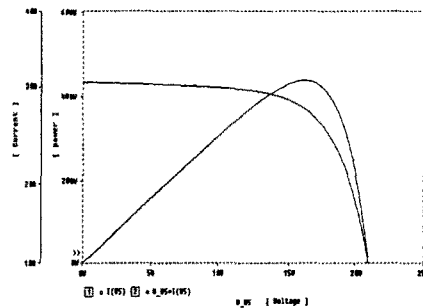


그림9. 태양전지의 전압-전류 및 전력 시뮬레이션 곡선

그림 10은 풍속에 따른 풍력발전시스템의 출력 특성을 시뮬레이션 곡선으로써 기동 풍속은 2.7 m/s이고, 풍속이 선형적으로 증가하면서 풍속이 12.5 m/s일 때 최대 출력점에 도달됨을 알 수 있다.

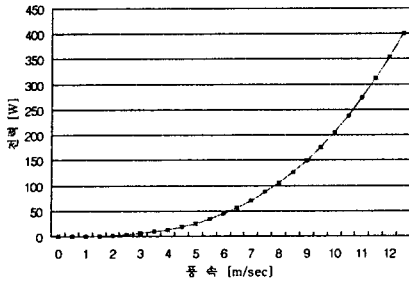


그림 10. 풍속에 따른 출력 특성

그림 11은 전력보상시스템의 DC모터의 구동특성을 보여주고 있다.

즉, 발전기의 출력상태에 따라 DC모터의 구동상태를 알 수 있으며, 보상장치에 출력상태를 알 수 있다.

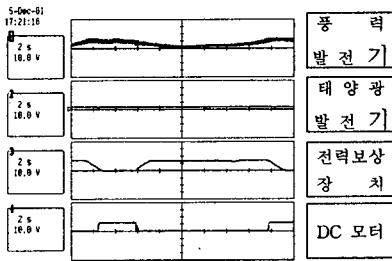


그림 11. 전력보상장치의 DC 모터 구동특성

그림 12는 일별 태양광과 풍력의 출력 특성을 나타내고 있다.

그림 12를 통하여 태양광발전과 풍력발전이 상호보완 관계에 있음을 알 수 있다.

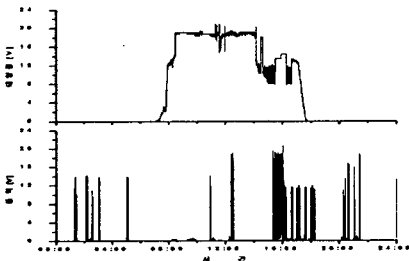


그림 12. 일별 태양광과 풍력발전기의 출력 특성

그림 13과 14는 제안된 방법으로 얻어진 보상장치에 따른 이상적 보상과 실제적 보상 상태를 나타내고 있다. 이상적인 보상상태와 실제적인 보상상태 사이에서 큰 오차가 발생하고 있는데, 이것은 보상시스템의 용량 한계성과 데이터통계의 결핍에 의한 것이다..

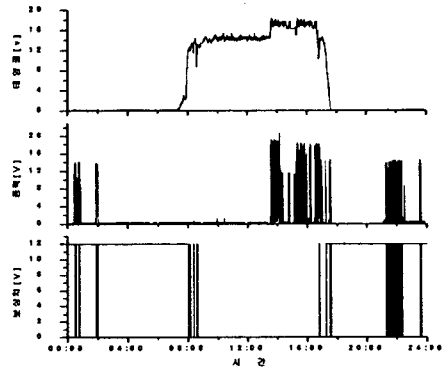


그림 13. 일별 복합발전기의 이상적 보상 특성

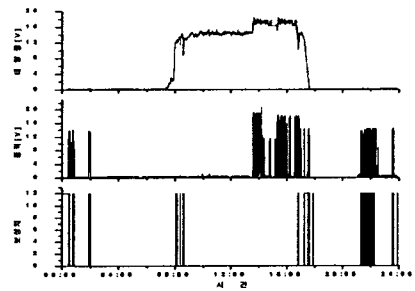


그림 14. 일별 복합발전기의 실제적인 보상 특성

6. 결론

본 논문에서는 지속적인 전력을 공급하기 위해 태양광 에너지(직렬 : 9, 병렬 : 2)와 풍력에너지(정격: 400W)를 복합하였다.

추가적으로, 시스템에 지속적인 전력 공급을 위하여 백업 시스템으로써 태엽 스프링의 탄성에너지를 이용한 전력보상장치를 설치하였다.

실험결과, 탄성에너지를 이용한 전력보상장치는 발전 시스템의 출력이 12V 이하가 되면 전력보상장치가 구동되어 축전지에 보조전력을 공급하여 부하에 지속적으로 전력을 공급할 수 있었다.

이상적 전력 보상값은 태양광발전과 풍력발전의 전압이 12V 이하 일 때를 산출한 것으로 실제 전력보상장치의 운전시에는 기상상태에 따른 복합발전시스템의 발전 출력을 전력보상장치가 충분히 보조해 줄 수 없었고, 실제적으로 이론적인 보상값에 18%~20%정도만 보상해주었다.

향후, 충분한 전력보상을 위해서는 보상장치의 구동시간을 연장할 수 있도록 용량을 증대시키고, 더불어 안정된 전력공급을 위해 DC-DC 컨버터를 추가 장착할 예정이다.

(참고 문헌)

- [1] Fumio Harashima and seiji Kondo, "Optimal Power Flow Control of Photovoltaic Solar Energy System", Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 7-22-1, Roppong, Minato-ku, Tokyo 106, JAPAN
- [2] G. L. Campen, "An Analysis of the Harmonics and Power Factor Effects at a Utility Intertied Photovoltaic System", IEEE Trans. Vol. PAS-101, No. 12, pp. 4632-4639, 1982.

- [3] B. G. Newman, "Multiple actuator-disc theory for wind turbines", *J. of Wind Engineering & Industry Aerodynamics*, vol. 24, no. 3, pp. 215-225, 1980.
- [4] D. K. Ai, "Design and fabrication of low-cost Darrieus vertical axis wind turbine system", Alcoa Lab., ALO-4272, pp. 178, 1980
- [5] L. A. Schienbein and D. J. Malcolm, "Design performance and economics of 50kW vertical axis wind turbine", *J. of Solar Energy Engineering*, vol. 105, no. 11, pp. 418-423, 1983.
- [6] 송기남외, "판형 홀다운 스프링 집합체의 탄성강도 평가", *대한기계학회논문집*, 제21권, 제1호, pp.180-187, 1997
- [7] 김형구의, "기하학적 재료적 비선형성을 갖는 중첩된 판스프링의 특성해석에 관한 연구", *대한기계학회논문집*, 제14권, 제1호, pp.12-22, 1990
- [8] Halliganm, J.Q, "Westinghouse Mechanical Design Manual", Fuel Assembly, Chapter 7 : Fuel Assembly Holddown Springs and Screws, Rev 03, Pittsburgh, PA/U.S.A., 1998