

임피던스 분광법을 이용한 태양전지 모듈의 동특성 모델 개발

김옥, 최우진
송실대학교 전기공학과

Development of the Dynamic Model of the Solar Cell Module by the Impedance Spectroscopy

Wook Kim, Woojin Choi
Department of Electrical Engineering, Soongsil University

ABSTRACT

태양전지에 관한 많은 모델이 제안되어 왔으나 대부분은 특정 일사량에서 측정된 태양전지의 I-V 특성커브를 기준으로 보간법을 사용하여 운전점을 구하는 모델링 방식을 사용하고 있으며, 태양전지의 동특성 모델에 관한 연구는 매우 드물다. 효율적인 에너지 변환을 위한 고성능 전력변환기의 설계를 위해서는 태양전지의 정특성 및 동특성에 관한 정확한 정보가 요구된다. 태양전지의 정특성은 제조사에 의해 일반적으로 측정되어 공개되므로 용이하게 이해될 수 있으나 동특성은 그렇지 못하다. 본 논문에서는 임피던스 분광법(Impedance Spectroscopy)을 이용하여 태양전지 모듈의 동특성 모델을 개발하고, 개발된 모델의 유용함과 정밀함을 실험을 통해 검증하였다. 개발된 동특성 모델은 정밀한 태양전지 시뮬레이션과 새로운 MPPT 알고리즘 개발에 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

태양광 발전시스템이 주요한 신재생에너지원으로 인식되기 시작하면서 관련 분야에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다. 다른 신재생에너지원에 비하여 상대적으로 낮은 효율과 높은 발전단가, 넓은 설치면적이라는 단점을 극복하기 위해서는 웨이퍼나 셀 등 재료적인 측면에서의 효율 개선 노력과 전력변환 과정에서 발생하는 손실 저감, 최대전력 추종제어에 대한 연구가 필수적이다. 특히 전력변환과정에서 효율을 증대시키기 위해서는 태양전지의 출력특성에 대한 정확한 이해가 필요하다. 태양전지의 출력은 일사량과 온도의 변화에 매우 민감하게 반응한다. 때문에 제조사에서는 일반적으로 특정 일사량과 온도에서 측정된 출력특성 데이터를 제공하고 있지만 이를 바탕으로 임의의 조건에서의 특성이나 동특성을 알기에는 한계가 있다. 정특성 모델은 태양전지의 방정식과 보간법을 사용하여 임의의 조건에서의 출력특성을 근사적으로 예측하는 방법이 주로 사용되고 있으며, 이러한 방법들은 공통적으로 태양전지가 동일한 일사량과 온도 조건에서 정상상태로 동작하고 있다고 가정하기 때문에 급변하는 일사량과 온도조건에 의해 불안정한 출력 시 태양전지의 정확한 상태나 동작특성을 알기 어렵다. 또한, 고신뢰성 및 고효율의 태양전지용 전력변환기를 설계하는데 있어서도 태양전지의 동특성에 관한 정확한 이해는 필수적이다.^[1] 본 논문에서는 임피던스 분광법을 이용하여 태양전지

모듈의 교류 임피던스를 측정하고 이를 이용한 동특성 모델을 개발하였다.

2. 본론

2.1 태양전지의 정특성 모델

태양전지는 커다란 PN 접합 다이오드로 모델은 쇼클레이 다이오드 방정식(Schockley Diode Equation)에서 시작된다. 반도체의 PN 접합부에 빛을 조사하게 되면 광전효과에 의해 전자와 정공이 분리되고 양단에서 광기전력이 생기는 원리를 이용한 것이다. 그림 1은 태양전지의 정특성 모델이다. 광생성 전류원 I_{ph} , 다이오드, 직렬저항 R_s (Series Resistance)와 병렬저항 R_{sh} (Shunt Resistance)로 구성되어 있으며 출력전류는 각 지로에 흐르는 전류의 합으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp \frac{q(V + IR_s)}{nkT} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

I_{sat} : reverse saturation current, n : ideality factor, k : Boltzman's constant, q : electron charge

식(1)과 같은 전압, 전류의 관계로부터 태양전지의 정특성 모델을 확립할 수 있으나, 모든 파라미터가 제조사로부터 제공되지는 않는다, 제조사는 정밀한 시뮬레이터를 이용하여 측정 기준인 표준 AM 1.5, 100mW/cm² 조건 및 25°C 온도에서 측정된 개방전압(V_{oc}), 단락전류(I_{sc}), 최대전력 출력점의 전압(V_{mpp}), 전류(I_{mpp}), 전력값(P_{max})을 제공할 뿐이다. 따라서 제공된 한정된 데이터로부터 태양전지 방정식과 보간법 등 다양한 방법을 이용하여 미지 변수의 값을 추정해야 식(1)을 완성할 수 있다.

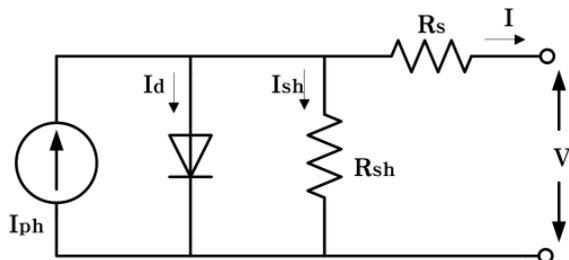


그림 1 태양전지 정특성 모델
Fig 1. Steady-state model of the solar cell

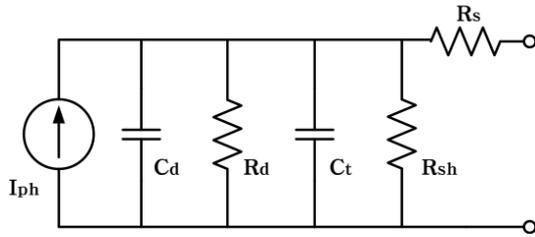


그림 2 태양전지의 교류 임피던스 모델
Fig 2 AC impedance model of the solar cell

2.2 태양전지의 동특성 모델

그림 1에서 나타난 태양전지의 교류임피던스 모델은 그림 2와 같이 표현되는데, 직류 임피던스 모델에서 다이오드만 소신호 모델(Small Signal Model)로 대체된 형태이다.^[2] 소신호 모델에서 다이오드는 하나의 직렬저항 R_d (Dynamic Resistance)와 두 개의 커패시턴스 C_p (Diffusion Capacitance) 및 C_t (Transition Capacitance)가 병렬로 연결된 형태로 표현된다. 이 때 R_d 는 비선형적 다이오드의 특성을 나타내는 저항이고, C_t 는 다이오드 PN 접합의 공핍층에 존재하는 공간전하(Space Charge)의 한 커패시턴스이며, C_d 는 다이오드의 다수 캐리어의 양에 비례하는 커패시턴스이다.

따라서 태양전지의 동특성 모델의 등가회로는 전압 V , 절대 온도 T , 주파수 ω 에 관한 함수로 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.^[3] 일정한 일사량과 온도를 가정하면 등가 임피던스는 주파수만의 함수로 식(3)과 같이 표현될 수 있다.

$$Z(V, T, \omega) = R(V, T, \omega) + jX(V, T, \omega) \quad (2)$$

$$= \left[R_s + \frac{[R_{sh} + R_d(V, T)]R_{sh}R_d(V, T)}{[\omega R_{sh}R_d(V, T)\{C_d(V, T, \omega) + C_t(V, T)\}]^2 + [R_{sh} + R_d(V, T)]^2} \right] - j \left[\frac{\omega\{R_{sh}R_d(V, T)\}^2\{C_d(V, T, \omega) + C_t(V, T)\}}{[\omega R_{sh}R_d(V, T)\{C_d(V, T, \omega) + C_t(V, T)\}]^2 + [R_{sh} + R_d(V, T)]^2} \right]$$

$$Z(\omega) = \left[R_s + \frac{R_p}{(\omega R_p C_p)^2 + 1} \right] - j \left[\frac{\omega R_p^2 C_p}{(\omega R_p C_p)^2 + 1} \right] \quad (3)$$

여기서 $R_p = R_d \parallel R_{sh}$, $C_p = C_d + C_t$

태양전지의 교류 임피던스는 저주파($\omega \rightarrow 0$)로 갈수록 리액턴스 값은 0에 가까워지며, 이 때 전체 임피던스 값은 실수성분인 R_s 와 R_p 의 합이 되고, 주파수가 커지면 R_s 값만 갖게 됨을 알 수 있다.

3. 실험 및 고찰

3.1 임피던스 분광법

임피던스 분광법이란 주파수가 다른 미소한 교류신호를 측정대상에 부여하여 임피던스를 측정하는 방법이다. 주로 전기화학분야에서 전극반응이나 복합체의 특성을 분석하기 위한 틀로 사용되며, 연료전지, 배터리, 슈퍼커패시터와 같은 전력기기를 모델링하고 진단하는 데에도 쓰이고 있다. 따라서 태양전지 모델링에 적용할 경우 교류신호를 출력하는 태양전지 내부의 임피던스를 정확하게 측정하고 그에 따른 동특성 모델링이 가능해진다. 이러한 방식의 연구가 몇몇 있었지만 모두 암상태(Dark Condition)에서 태양전지에 전압을 인가하여 측정하는

방식을 택하여 엄밀한 의미에서 운전상태의 태양전지를 모델링한 것으로 보기 어려운 문제가 있다^[1-3]. 본 논문에서는 할로겐램프를 이용하여 빛이 태양전지에 균일하게 조사되는 상태에서 부하 전류를 섭동시켜 그 내부 임피던스를 측정하는 방법을 택함으로써 실제 운전 중인 상태에서의 태양전지 모듈의 교류 및 직류 임피던스를 측정하고 이를 이용한 동특성 모델링을 수행하였다.

3.2 태양전지 모듈의 임피던스 측정 방법

실험에 사용된 태양전지 모듈은 S-energy 사의 80[W]급 SM-80 모델이다. 일사조건을 모의하기 위하여 할로겐램프를 인공 광원으로 선정하여 이용하였으며, 모듈을 구성하고 있는 36개의 각 셀들에 빛이 균일하게 조사 될 수 있도록 셀 당 한 개씩 독립적으로 램프를 설치하였다. 모듈의 출력 단은 전자 부하의 입력 단자에 연결되고, 본 연구실에서 기 개발된 EIS(Electrochemical Impedance Spectroscopy) 소프트웨어 및 DAQ 보드는 전자부하를 제어하며, 센서를 통해 측정된 태양전지 모듈의 전압 및 전류의 값을 디지털 변환하여 컴퓨터 내부로 전송한다. 얻어진 데이터들로부터 동특성 모델링을 위한 주파수별 임피던스 값을 계산하고 등가회로를 이용하여 파라미터를 추정하게 된다.^[4] 측정 대상 태양전지 모듈의 정특성 그래프는 빛을 조사한 상태에서 전류를 변화시켜 가면서 태양전지 모듈의 전압을 측정하여 그림 3과 같이 얻어졌다. 이후 각각의 부하별 동작점에서 섭동전류에 의한 전압변화가 식(4)에서 허용된 열전압(Thermal Voltage)의 값을 넘지 않도록 리플전류의 크기를 조절해 가면서 태양전지 모듈의 교류 임피던스를 25kHz에서 10Hz 까지 측정하였다.

$$V_T = \frac{kT}{e} = 31[mV] \text{ at } 84^\circ\text{C} \quad (4)$$

3.3 태양전지 모듈의 임피던스 측정결과

그림 3에는 정특성 시험에서 얻어진 I-V 특성곡선을 나타내는데 모듈 표면의 온도는 84°C에서 단락전류 5.49A, 개방전압 17.73V, 최대출력전력 65.80W, I_{mpp} 5A, V_{mpp} 13.16V 값을 얻었다. 그림 4는 운전점별로 측정된 전압, 전류 데이터로부터 주파수별 임피던스를 계산한 뒤 그린 Nyquist Plot이다. 각 운전점에서 측정된 결과를 토대로 등가회로를 이용한 커브 피팅을 수행하고 모델의 파라미터를 추출하였다. 표 1에는 운전점별로 측정된 등가 임피던스 모델의 파라미터를 나타내었다.

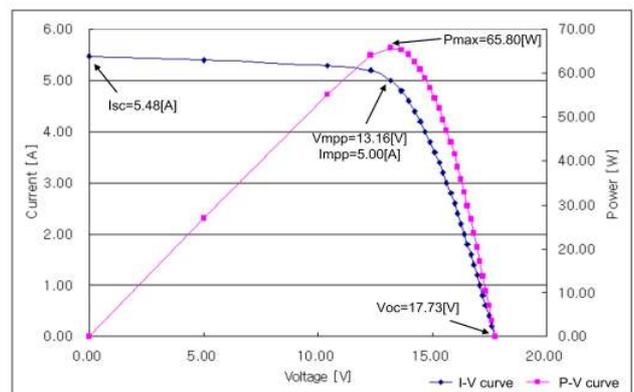


그림 3 SM-80 태양전지 모듈의 전류-전압 특성
Fig 3 I-V characteristic curve of SM-80 solar cell module

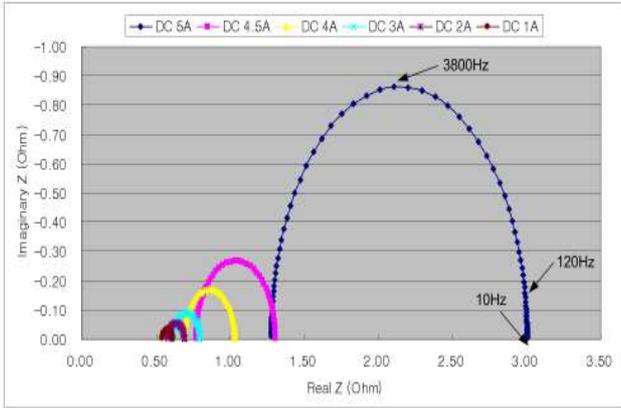


그림 4 각 운전점 별로 측정된 임피던스의 Nyquist Plot
Fig 4 Measured Impedance Nyquist plots at each operating points

표 1 각 운전점 별 등가 모델 파라미터
Table 1 Parameters of the equivalent circuit at each operating points

운전점 [A]	Rs [Ω]	Rsh Rd [Ω]	Ct+Cd [uF]
1	0.5438	0.0693	1825.50
2	0.5801	0.1099	1008.50
3	0.6148	0.1801	523.74
4	0.6923	0.5352	117.60
4.5	0.7717	0.3407	226.69
5	1.2770	1.7250	22.65

태양전지 모듈의 임피던스는 부하가 증가함에 따라 그 반원의 크기가 커지며 원점으로부터 멀어지는 모습이 관찰된다. 여기서, 반원의 좌측이 수평축과 만나는 값이 태양전지 모듈의 직렬저항성분(Rs)이며, 반원의 지름은 병렬저항(Rp)과 다이내믹 저항(Rd)의 병렬 합이 되고, 이 값과 커패시턴 값이 상호작용을 하며 그림과 같은 반원을 그리게 된다.

태양전지에서 발생한 전력을 상용전력으로 변환하기 위해서는 전력변환기의 사용이 필수적이다. 그런데, 인버터의 운전시 전원은 직류 성분과 함께 인버터의 기본파 주파수의 2배의 주파수를 갖는 리플전류성분 전류를 함께 공급해야 한다^[5]. 또한, 이러한 성분이 측정된 교류 임피던스 성분과 상호작용 할 경우 전력손실을 발생시키게 된다.

그림 5는 Fronius 사의 2.5kW 태양광발전 인버터를 DC 전원을 소스로 이용하여 계통과 연계한 상태에서 측정된 입력 측 전류파형이다. 그림에서 보듯이 1100[W], 3.8[A]에서 운전되는 경우 0.7[A]의 120Hz 성분을 FFT 분석결과로부터 확인할 수 있으며, 이것이 태양전지의 120Hz에서의 교류 임피던스와 상호작용을 일으켜 식(5)와 같은 전력 손실을 발생시킬 것임을 쉽게 예측할 수 있다.

$$P_{loss} = \left(\frac{i_{120Hz\ Ripple}}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot (R_{s120Hz} + R_{p120Hz}) \quad (5)$$

이를 실측하기 위해 SM-80들을 이용하여 실험을 실시하였다. 그림5와 같이 모듈로부터 4[A]의 직류전류를 출력하도록 전자부하를 조작하여 모듈의 전력을 측정하고, 여기에 피크치 0.7[A]의 120Hz 리플전류가 중첩된 전류가 출력되도록 전자부하를 재조작한 후 전력을 측정하였다. 먼저 직류만 출력시켰을

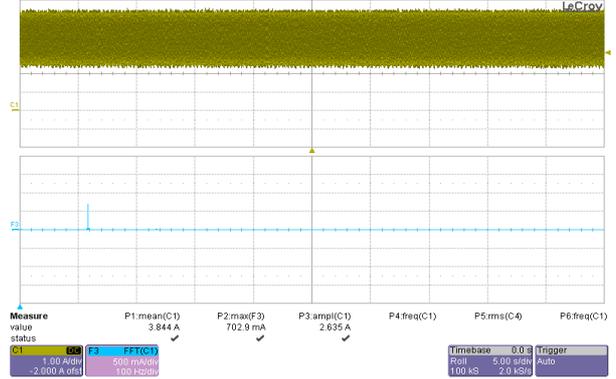


그림 5 인버터 입력 전류와 FFT 결과
Fig. 5 Inverter input current and FFT results

경우의 전력값은 58.13[W]였고, 120Hz 리플전류가 중첩된 전력값은 57.86[W]로 0.27[W]의 전력 손실이 확인되었고, 이는 식 (5)에 의해 계산된 결과와 일치하였다. 이 값은 전체 출력의 0.46%이지만 부하가 큰 경우나 모듈 각 부분의 일사량이 균일하지 않은 경우 모듈의 임피던스가 크게 증가하는 사실과 태양광 발전 시스템은 일사량이 있는 경우 연속적으로 발전한다는 사실을 고려하면 간과할 수 없는 문제가 된다. 또한, 모듈의 결선방법에 따라 손실의 양이 가변되므로 시스템 설계 시 모듈의 최적 구성에도 주의를 기울여야 함을 나타낸다.

4. 결론

본 논문에서는 태양전지 모듈의 동특성 모델을 전기화학적 분광법을 이용하여 도출하고 부하별 교류 임피던스의 변화를 관찰하였다. 전력변환기에 의한 120Hz의 리플전류는 동일 주파수에서 측정된 태양전지의 교류 임피던스와 상호작용하여 손실을 만들어 냄을 예측하였고, 이를 실험을 통해 검증하였다. 개발된 태양전지의 동특성 모델은 신뢰성 있고 고효율인 전력변환기의 설계에 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] D. Chenvidhya, K. Kirkikara and C. Jivacate, "A new characterization method for solar cell dynamic impedance", Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol 80, Issue 4 pp.459-464, 2003.
- [2] R. Anil Kumar, M. S. Suresh, and J. Nagaraju, "Measurement of AC Parameters of Gallium Arsenide Solar cell by Impedance Spectroscopy, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol 48, No.9, 2001.
- [3] D. Chenvidhya, K. Kirkikara and C. Jivacate, "PV module dynamic impedance and its voltage and frequency dependencies", Solar Energy Materials and Solar Cells, Volume 86, Issue 2, pp.243-251, 2005.
- [4] 이주형, 최우진, "전기화학적 전력기기의 모델링을 위한 저가형 임피던스 분광 시스템의 개발", 전력전자학회, Vol. 13, No. 1, pp. 46-54, 2008, Feb.
- [5] Mohan, Undeland, Robbins, Power Electronics, 3rd Edition, John Wiley & Sons, Inc, pp.211-215, 2003.