

태양광 발전의 Power Hardware-in-the-Loop Simulation (PHILS)을 위한 태양광 셀 모델의 연산 성능 향상기법

곽상규, 김예린, 정지훈
울산과학기술원(유니스트)

Enhanced Method of Photovoltaic (PV) Cell Model Computation for Power Hardware-in-the-Loop Simulation (PHILS) of PV power Generation

Sang Kyu Kwak, Jee Hoon Jung

Ulsan National Institute of Science and Technology(UNIST)

ABSTRACT

태양광 발전에 있어서 실제 태양광 셀 특성은 날씨와 같은 환경 요인에 의존적이기 때문에 다양한 동작 조건에 대한 태양광 셀의 특성을 전력변환장치를 통해 테스트하기 위해 많은 시간과 비용이 소요된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 Power Hardware-In-the-Loop Simulation (PHILS) 기술을 이용해 태양광 발전용 전력변환장치 시제품의 테스트 시간 및 비용을 단축할 수 있다. PHILS는 실시간 모의시험장치와 외부 입력이 가능한 전력변환장치로 구성되며, 해당 장치에서 모델의 동특성을 실시간으로 연산하기 때문에 모델이 복잡할수록 고성능 모의시험장치가 요구된다. 태양광 셀 모델의 출력 전압은 수치 해석 기법을 통해 계산되고, 수치해석 기법의 종류와 초기 값에 따라 연산 시간 등의 성능이 변화하므로 적절한 기법을 선정하여 모델의 연산시간을 감소시킬 수 있다. 본 논문에서는 수치 해법 분석을 통한 태양광 발전의 PHILS를 위한 태양광 셀 모델의 연산 성능향상 기법을 제시하고, 실제 태양광 발전용 PHILS를 구현하여 실험적으로 제안하는 기법의 성능을 검증한다.

1. 서론

태양광 시스템 기술이 발전하면서, 시스템의 규모가 커지고 복잡해짐에 따라 태양광 셀의 전력을 제어하는 인버터의 시제품 개발 시, 태양광 셀의 다양한 동작 상황에서 기능테스트를 수행해야 한다. 태양광 인버터의 동작 테스트 플랫폼으로는 가상의 시뮬레이션과 연동해 실제 하드웨어의 동작을 검증할 수 있는 Power-Hardware-in-the-Loop Simulation (PHILS) 기술이 주로 이용되고 있다.

PHILS를 활용한 동작 테스트에서는, 실시간 시뮬레이터로 태양광 셀 모델을 시뮬레이션하여 태양광 셀의 동작을 모사한다. 복잡한 모델을 실시간으로 시뮬레이션하기 위해서는 고성능의 시뮬레이터가 필요하다. 따라서, PHILS를 구성 시 모델의 복잡도를 줄이기 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. 태양광 셀의 모델은 수치 해법을 통해 태양광 셀의 출력 전압을 구해지고 다양한 기법을 통해 계산 속도를 향상해 모델의 복잡도를 개선할 수 있다.

기존 연구에서는, Five-parameter 태양광 셀 모델을 통하여 다양한 수치 해법을 적용해 성능을 비교하고, 초기 값 설정 방법을 통하여 태양광 셀 모델을 간소화하였다. 하지만

Five-parameter 모델은 Forward biased region에서만 태양광 셀을 모사한다. 본 논문에서는 Reverse biased region에서도 태양광 셀을 모사할 수 있는 dynamic 태양광 셀 모델의 복잡도를 줄이기 위해 여러 수치 해법들을 적용하고, 초기 값 설정 방법을 제시한다.

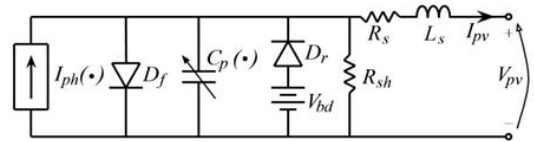


그림 1 Dynamic 태양광 셀 모델

Fig. 1 Dynamic PV cell model

2. 태양광 셀 모델 계산 성능 향상기법

2.1 태양광 셀 모델

그림 1은 Dynamic 태양광 셀 모델의 등가회로를 나타내고 있다[1]. 모델의 출력은 태양광 셀의 전압으로 아래 식 (1)와 같이 나타난다.

$$V_{pv}(V_d, I_{pv}) = V_d - I_{pv}R_s - L_s \frac{dI_{pv}}{dt} \quad (1)$$

$$0 = I_{ph}(G, T) - I_{df}(T, V_d) - I_{Cp}(V_d) + I_{dr}(T, V_d) - I_{Rsh}(G, V_d) - I_{pv} \quad (2)$$

출력전압 V_{pv} 은 Forward Diode D_f 의 전압인 V_d 로부터 구할 수 있다. V_d 의 값은 키르히호프 전류 법칙을 통해 식 (2)로부터 구할 수 있다. V_d 를 구하기 위한 식은 초월함수의 형태이기 때문에 분석적 방법에 의해 근을 구할 수 없다. 따라서 수치해법을 사용해서 V_d 의 값을 구할 수 있다. 태양광셀 모델에서 수치해법은 주로 Newton-Raphson method가 사용되고 식(4)와 같이 나타난다.

$$V_{d,n+1} = V_{d,n} - \frac{f(V_{d,n})}{f'(V_{d,n})} \quad (4)$$

그림 2와 같이 수치해법은 함수 $f(x)$ 의 값을 0으로 가정하고 그 때의 근을 구하는데 사용된다. 임의로 x 의 초기 값을 설정하고, 초기 값으로부터 계산을 반복하여 실제 근에 수렴한

다. x_n 은 반복법 수행 시 예상되는 현재 근의 값이고, x_n 으로부터 새로운 해인 x_{n+1} 를 얻을 수 있다. 태양광 셀 모델에서는 V_d 가 x 에 해당된다.

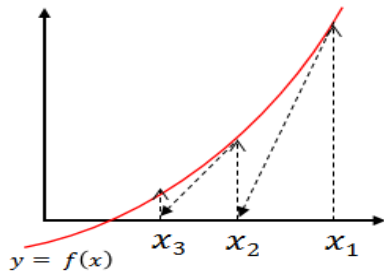


그림 2 Newton-Raphson method의 개념
Fig. 2 Concept of Newton-Raphson method

표 1 수치해법의 성능 비교

Table 1 Performance Comparison of Numerical Methods

	Newton-Raphson	Halley's method
계산 시간	2.95 us	2.49 us
반복 횟수	12	8

2.2 수치해법의 성능 비교

태양광 셀 모델에서 계산 속도를 향상시키기 위해 Halley's method가 사용된다[2]. Halley's의 식은 다음과 같이 나타낸다.

$$V_{d,n+1} = V_{d,n} - \frac{2f(V_{d,n})f'(V_{d,n})}{2(f'(V_{d,n}))^2 - f(V_{d,n})f''(V_{d,n})} \quad (5)$$

Newton-Raphson method 과 Halley's method는 테일러 급수로부터 유도된다. Newton-Raphson method는 1차 미분식에서 근사화 되지만 Halley's method는 2차 미분식에서 근사화 되어 빠른 속도로 근에 수렴한다. 표 1은 각 수치 해법들의 성능을 나타낸다. 계산시간은 시뮬레이션의 한 time step 당 모델을 계산하는데 걸리는 시간을 나타낸다. Newton-Raphson method와 Halley's method의 계산시간은 각각 2.95us, 2.49us 이고 계산 반복횟수는 12회에서 8회로 줄어들었다. Halley's method를 사용함으로써 모델 계산 속도가 15.6% 감소함을 확인할 수 있다.

2.3 태양광 셀 초기 값 적용 방법

수치 해법은 초기 값을 근에 얼마나 가깝게 정하는지에 따라 계산시간이 달라진다. 그림 1의 태양광 셀 모델에서 D_r 과, R_{sh} 의 영향을 없애면 식 (2)를 지수함수로 표현할 수 있다. 유도된 지수함수로부터 V_d 값을 구해 초기 값으로 사용하면 실제 V_d 값과 근사한 값을 구해 계산 속도를 향상할 수 있다 [3]. 그림 3은 태양광 셀의 i-v curve와 D_r 과 R_{sh} 를 제거했을 경우 i-v curve를 나타내고 두 값이 비슷한 것을 확인할 수 있다. 그림 3에서 1번은 초기 값을 0으로 설정한 경우이고, 2번은 개선된 초기 값 설정 방법을 사용한 경우이다. 개선된 초기 값 설정 방법을 사용한 2번의 경우가 최종값에 더욱 근사한 것을 확인할 수 있다. 표 2는 Halley's method를 사용한 경우 초기 값을 0으로 설정했을 때와 개선된 초기 값 설정 방법을 사용

했을 때의 모델 계산 속도의 비교 결과를 나타내고 있다. 초기 값이 0일 때와 개선된 방법을 사용했을 때의 계산 결과는 각각 2.49us와 2.02us 으로 개선된 방법을 사용하여 계산속도가 18.9% 감소 되었고, 계산 반복 횟수는 8회에서 3회로 줄었다.

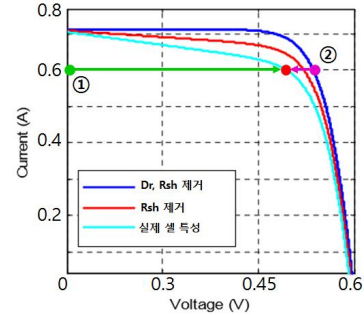


그림 3 태양광 셀 I-V curve

Fig. 3 I-V curve of PV Cell

표 2 초기값에 따른 모델 계산시간

Table 2 Model computation time according to initial value

초기값	0	개선된 초기 값
계산 시간	2.49 us	2.02 us
반복 횟수	8	3

3. 결론

본 논문에서는 PHILS용 태양광 셀 모델 계산 속도 향상을 위한 방법을 five-parameter 모델에서 향상된 dynamic 태양광 셀 모델에 적용하였다. Halley's method를 사용함으로써 계산 속도를 15.6% 감소 시켰고, 개선된 초기 값 설정 방법을 통하여 계산 속도를 기준에 비해 18.9% 감소 시켰다. 따라서 두 가지 방법을 사용하여 계산 속도를 총 31.5% 감소하였다.

본 과제는 UNIST 자유혁신연구사업 (1.170004.01)의 지원으로 수행되었습니다

참고 문헌

- [1] K. A. Kim, C. Xu, J. Lei, and P. T. Krein, "Dynamic photovoltaic model incorporating capacitive and reverse-bias characteristics," IEEE J. Photovoltaics, vol. 3, no. 14, pp. 1334-1341, 2013.
- [2] J.-H. Jung "Power hardware-in-the-loop simulation (PHILS) of photovoltaic power generation using real-time simulation techniques and power interfaces," Journal of Power Sources, vol. 285, pp 137 - 145, 2015.
- [3] H. Can, D. Ickilli, and K. Parlak, "A new numerical solution approach for the real-time modeling of photovoltaic panels," in Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, pp. 1 - 4, March 2012.