

**EMTP를 이용한 태양광 발전의 계통 연계시 전압변동 분석에 관한 연구**

박준희\*, 서훈철\*\*, 여상민\*  
 성균관대학교\*, 기초전력연구원\*\*

**A Study on Voltage Variation in Grid-Connected Photovoltaic System using EMTF**

\*June-Hee Park, \*\*Hun-Chul Seo, \*Sang-Min Yeo  
 \*Sungkyunkwan University, \*\*KESRI

**Abstract** - 태양광 발전 기술의 발달로 용량이 증가함에 따라 계통연계가 증가하고 있다. 본 논문에서는 태양광 발전이 계통에 연계됨에 따라 기존 배전계통에 미치는 전압변동 즉, 플리커 현상을 분석하였다. EMTF/ATPDraw를 이용하여 태양광 발전이 연계된 배전계통을 모델링 하였다. 태양광 발전은 직류가 3상 PWM 인버터를 통하여 교류로 변환되어 계통에 연결되도록 모델링 하였다. 태양광 array를 병렬로 연결하여 태양광 발전의 출력량을 증가시켜서, 출력변동에 따른 계통의 전압변동을 분석하였다.

터를 통해 AC로 변환하여 계통에 연결한다.

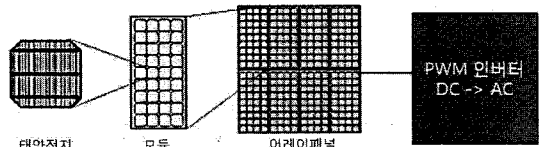


그림 1. 어레이 패널의 구성 및 AC 변환

**1. 서 론**

석유의 추가 생산 능력의 한계와 산유국의 정세 불안 및 세계 석유 수요 급증으로 인한 수급 불평형으로 인하여 고유가 시대가 도래함에 따라 신재생 에너지의 필요성이 더욱 대두되고 있다. 신재생 에너지 중, 최근 pn 접합을 이용한 태양전지의 개발과 array 패널 및 컨버터 등의 전력전자 기술의 발달로 인해 태양광 발전의 보급이 확대되고 있다. 그렇지만, 태양광 발전은 기본적으로 직류로 생산되어 인버터를 거쳐서 교류로의 변환으로 인한 고조파 문제 및 전압변동 문제, 대기 온도 및 조사량에 따른 출력변동 문제, 역조류문제, 주파수 변동 등으로 인하여 계통연계 시 다양한 문제를 발생시킬 수 있다.

본 논문에서는 다양한 전력품질 문제 중 전압변동에 대하여 EMTF를 이용하여 분석하였다. EMTF/ATPDraw를 이용하여 태양광 발전이 연계된 배전계통을 모델링하였다. 태양광 발전은 직류가 3상 인버터를 통하여 계통에 연결되도록 모델링하였다. 이러한 모델링을 바탕으로 태양광 발전의 출력을 증가시켜, 플리커 현상을 모의하였다. 출력변동에 따른 플리커 현상을 분석하기 위하여 계통 전압의 실효치를 이용하여 전압변동 폭 및 주기를 계산하였다. 분석결과, 태양광 발전의 출력이 증가함에 따라 전압변동이 사람이 인식하기 가장 쉬운 주파수인 10Hz에 가까워짐을 확인할 수 있었다.

**2. 태양광과 전력품질**

**2.1 태양광 전원**

태양광 전원은 태양광을 직접 전기로 변환시키는 발전 방식으로, 반도체의 pn접합으로 만든 태양전지에 반도체의 금지대폭(Band Gap Energy)보다 큰 에너지를 가진 태양광이 입사되면 전자-정공 쌍이 생성되는 원리를 이용한다. 태양전지는 필요에 따라 직·병렬로 연결하여 장기간 자연환경 및 외부 충격에 견딜 수 있는 구조로 만들어 사용하게 되는데, 그 최소 단위를 태양광 모듈(Photovoltaic Module)이라고하고, 실제 사용부하에 맞추어 모듈을 어레이 형태로 구성하여 설치하게 된다. 이때 어레이 패널에 의해 생성된 전기는 DC인데 이를 3상 인버

**2.2 전압 플리커[1-3]**

전압변동(Voltage Fluctuation)이란 일련의 랜덤한 전압변화로써 그 크기는 ANSI C84.1-1982에서 규정된 변동범위인 0.9 p.u. - 1.1 p.u.를 벗어나지 않는 현상을 말한다. IEC 6100-3-3에서는 전압변동을 "전원전압의 영점교차(zero-crossings) 사이의 각각의 연속적인 반 주기에 대한 하나의 값으로 계산된 실효치 전압의 연속적인 변화"로서 정의하고 있듯이 일련의 랜덤 또는 연속적인 전압변화가 이에 해당한다고 할 수 있다. 전압변동과 플리커는 표준규격에서 종종 혼용되고 있고, 이러한 전압변동을 나타내기 위하여 전압 플리커라는 말을 일반적인 어휘로 사용하고 있다. 다음 그림 2는 전형적인 전압 플리커 파형의 예를 나타낸다. 그림 2를 살펴보면, 전압 파형의 실효치 값이 연속적으로 변동하고 있음을 확인할 수 있다.

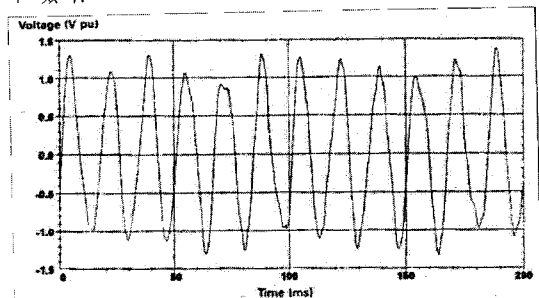


그림 2. 전형적인 전압 플리커 파형의 예

전압플리커는 분산형 전원 혹은 부하에 의하여 유발된 계통전압의 동적 변화를 나타낸다. 빛의 강도의 변화에 대한 사람의 민감도는 주파수 의존적이다. 사람의 눈은 10Hz 정도의 전압 변동에 가장 민감하다. 전통적으로 전압 플리커는 큰 부하 변동이 나타날 때 고려된다. 그러나, 분산형 전원이 투입되는 경우 빈번한 구동과 정지, 변동하는 에너지원으로 인한 입력전력의 연속적인 변화로 인하여 계통전압이 변화할 수 있어 플리커 현상을 유발할 수 있다. 특히, 태양광 발전의 경우 출력변동이 더욱 심하므로, 플리커 현상은 더욱 심하게 나타나게 된다.

플리커 현상은 단시간 플리커 지수 및 장시간 플리커 지수로 평가한다. 단시간 플리커 지수는 10분간 사람이 빛의 변화를 인식할 수 있는 횟수로, 장시간 플리커 지수는 2시간동안 사람이 빛의 변화를 인식할 수 있는 정도로 평가한다.

그러나, 이러한 평가는 시물레이션을 통하여 수행할 수 없으므로, 본 논문에서는 전압변동 즉,  $\Delta V/V$  및 이의 주파수 분석을 통하여 플리커 현상을 평가하였다.

### 3. 시물레이션

#### 3.1 계통모델[4]

태양광 발전의 계통연계에 따른 플리커 현상을 모의하기 위한 계통모델은 다음 그림 3과 같다. 전체 배전선로는 20km이며, 선로 임피던스는 정상분  $0.1823+j0.1471$  ohm/km, 영상분  $0.4533+j0.452$ ohm/km 이다. 부하는 22.9kV측 부하 8MVA, 역률 0.9로 설정하였고, 380V측 부하 400kVA, 역률 0.9로 설정하였다.

태양광 발전은 3상 PWM 인버터를 거쳐서 380V의 저압계통에 연결되도록 모델링하였다. 배전선로는 EMTP의 집중정수 모델을 이용하여 모델링하였으며, 부하는 용량과 역률을 이용하여 부하 임피던스를 계산하여 모델링하였다. 태양광 전원은 DC전원으로 가정하였다.

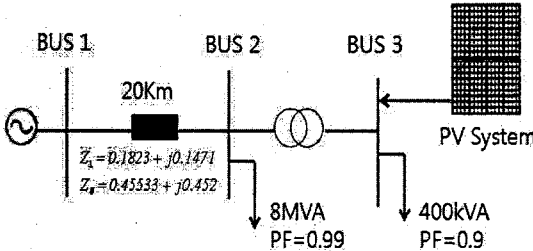


그림 3. 태양광 발전의 계통연계 모델링

#### 3.2 시물레이션 조건

태양광 발전의 출력 변동에 따른 플리커 현상을 모의하기 위한 시물레이션 조건은 다음 표 1과 같다. 태양광 출력 증가는 array를 병렬로 연결하여 전류가 증가함으로써, 출력 용량이 증가하도록 모델링하였다.

표 1. 태양광 발전의 계통연계 및 전압 변동 측정

태양광 Array 병렬 연결 수	출력 용량[kW]
1	50
2	100
3	150
4	200
5	250

#### 3.3 시물레이션 결과 및 분석

다음 그림 4는 출력용량 변동에 따른 실효치의 전압변동을 나타낸다. 그림 4를 통하여, 계통전압이 일정하지 않고, 전압변동이 나타남을 알 수 있으며, 전압변동에 대하여 일정한 주기가 있음을 확인할 수 있다. 이를 통하여, 플리커 파형의 특성이 나타남을 알 수 있다. 좀 더 세밀한 분석을 위하여  $\Delta V$ ,  $\Delta V/V\%$ , 주기(T)를 구하여 변조주파수를 구할 수 있다. 다음 그림 5는 그림 4에서 태양광의 출력 용량이 100kW인 경우에 대하여 상기 요소를 구하기 위한 방법을 나타낸다. 순시치의 파형의 변동폭 즉,  $\Delta V$ 를 구하기 위하여 실효치의 진동폭을 그림 5와 같이 구할 수 있다. 또한 변조 주파수를 구하기 위하여 한 주기 시간 즉, T를 그림 5와 같이 구할 수 있

다. 이 값은 계속 일정하지 않고 변화하게 된다. 이 두 값은 계속 일정하지 않고 시간에 따라 약간의 차이를 나타낸다. 따라서, 상기 표 1의 시물레이션 조건에 대하여  $\Delta V$ ,  $\Delta V/V\%$ , 변조주파수[Hz]의 최소 및 최대를 구하면 다음 표 2와 같다. 태양광 출력이 50kW인 경우  $\Delta V/V\%$ 는 0.541%-1.902%의 변화를 나타내며, 변조주파수는 5.12-5.68Hz의 변화를 보인다. 태양광 출력이 100kW인 경우  $\Delta V/V\%$ 는 1.147%-2.579%의 변화를 나타내며, 변조주파수는 5.34-6.31Hz를, 태양광 출력이 150kW인 경우  $\Delta V/V\%$ 는 1.309%-3.881%, 변조 주파수는 5.81-7.69Hz를 나타낸다. 그렇지만 태양광 출력이 200kW인 경우  $\Delta V/V\%$ 는 0.883%-3.107%로 다소 감소하지만 변조주파수는 5.81-8.37Hz로 증가한다. 마찬가지로 태양광 출력이 250kW인 경우  $\Delta V/V\%$ 는 0.767%-3.055%로 좀 더 감소하지만 변조주파수는 11.77-15.39Hz로 좀 더 증가한다.

이와 같이, 태양광 출력이 증가할수록  $\Delta V/V\%$ 는 일정 정도까지만 증가한 후 다시 감소하지만 변조주파수는 플리커에 가장 민감한 주파수로 계속해서 증가하고 있음을 확인할 수 있다.

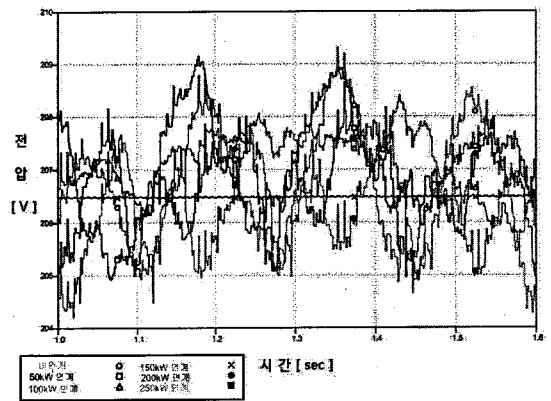


그림 4. 태양광 발전 용량에 따른 전압변동

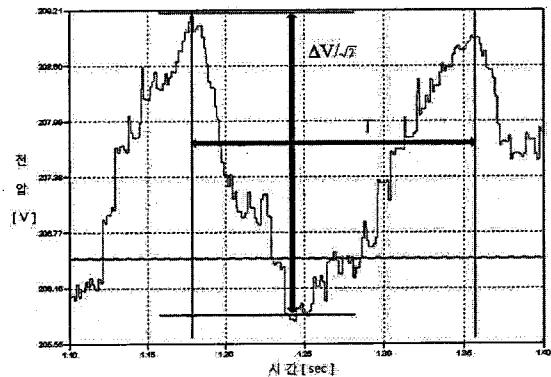


그림 5. 태양광 발전 100kW 연계시의 파형

실제로 전압변동에 가장 민감한 부하는 가정에서 사용하고 있는 전동부하로서 전압변동이 공칭 전압의 1% 이하에서도 플리커 문제를 일으킬 수 있으며, 작은 전압변동도 1Hz에서 25Hz 정도의 주파수를 갖게 되면 인간의 눈에 피로감을 유발할 수 있는 수준의 플리커가 발생할 수 있다[5].

시물레이션 결과와 같이 작은 전압변동이 발생한 경우, 태양광 발전의 출력이 높아질수록 사람이 플리커에 대한 인지 정도가 가장 높은 주파수에 더욱 가까워지고

있음을 확인할 수 있다.

표 2. 태양광 발전의 계통연계 및 전압 변동 측정

태양광 출력		결과	$\Delta V[V]$	$\Delta V/V[\%]$	변조 주파수[Hz]
50kW	최소		1.187	0.541	5.12
	최대		4.172	1.902	5.68
100kW	최소		2.517	1.147	5.34
	최대		5.657	2.579	6.31
150kW	최소		2.871	1.309	5.81
	최대		8.514	3.881	7.69
200kW	최소		1.937	0.883	5.814
	최대		6.817	3.107	8.369
250kW	최소		1.683	0.767	11.765
	최대		6.703	3.055	15.385

#### 4. 결 론

본 논문에서는 태양광 발전의 계통 연계 시 전압변동을 분석하였다. 태양광 발전의 출력량을 변동하며 시뮬레이션을 수행하였으며, 태양광 발전계통 연계 시 용량이 증가할수록 플리커에 대한 인지정도가 가장 높은 주파수인 평균 10Hz에 더욱 가까워지고 있음을 확인할 수 있었다.

본 논문의 연구결과를 바탕으로 향후 태양광 발전의 연계 용량 증가에 따른 플리커 현상의 저감대책을 수립하고자 한다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Srisaen, N and Sangswang, A, "Effects of PV Grid-Connected System Location on a Distribution System", IEEE Asia Pacific Conference, pp. 852-855, 2006.
- [2] Roger C.Dugan, Mark F. McGranaghan, H.Wayne Beaty, "Electrical Power System Quality", McGraw-Hill, pp. 27-28, 2006.
- [3] Nick Jenkins, Ron Allan, Peter Crossley, David Kirschen and Goran Strbac, "Embedded Generation", The Institution of Electrical Engineers, pp. 139-142, inspec/lee, 2000.
- [4] 노의철, 정규범, 최남섭, "전력전자공학", 문운당, pp. 386-415, 1997.
- [5] M. R. Kim, W. K. Kim, K. S. Back, K. W. Lee, "Study about Flickering Phenomenon of Interior Lighting in Electrical Railway Train", 한국철도학회 추계학술대회 논문집, 2호, 617-622, 2003.