

1000kW 순천 태양광 발전시스템 계통해석 및 전력품질 분석

윤 기갑, 이 학주, 정 원욱, 김 속철

Analysis of Distribution System and Power Quality Integrated with 1000kW Suncheon Photovoltaic Generations

Gigab Yoon¹⁾, Hakju Lee²⁾, Wonwook Jung³⁾, Sukcheol Kim⁴⁾

Key words : Photovoltaic Generation, Distribution System, Power Quality, Hypersim, Distribution Load Flow, PSCAD/EMTDC

Abstract : 최근 다수의 태양광 발전기가 배전계통에 연계되고 있으며 특히, 특정지역을 중심으로 대규모 태양광발전 단지가 구성되어 배전계통에 연계되고 실정이다.

본 논문에서는 순천에 구축된 1000KW급 태양광발전소의 계통해석영향을 분석하기 위하여 PSCAD/EMTDC 툴을 이용하여 모델링 하고 태양광발전이 연계된 배전계통 조류해석과 태양광 발전의 출력에 의한 22.9KV 배전계통의 전압변동을 시뮬레이션 하였으며, 태양광발전에 따른 역조류에 의한 배전계통 전압변동을 분석하였다. 또한, 태양광발전기의 배전계통 연계 전, 후의 배전선로의 임의의 지락고장 모의로 태양광발전기가 고장전류에 미치는 영향 분석과 태양광 발전이 양호, 불량한 경우에 대한 상전압, 고조파 전류, 역률 등의 측정결과에 의한 전력품질을 분석 하였다.

subscrip

S/S : substation substation

D/L : distribution line

1. 서 론

최근 국내에 태양광발전기가 다수 배전계통에 연계되고 있고 특히, 특정 사이트를 중심으로 대규모 태양광발전단지 형태로 배전계통에 연계되고 있다. 본 논문에서는 순천지역에 최근 대규모로 연계되고 있는 태양광발전 연계 배전계통을 대상으로 태양광발전의 출력에 따른 배전계통의 영향을 모의시험하였다. 순천지역에는 기존 제1발전소(150kW), 제2발전소(700kW), 제3발전소(200kW), 제4발전소(198kW)가 서순천 변전소에 연계되어 운전 중이고 추가로 1000kW용량의 태양광발전소가 제3, 4발전소가 위치한 곳에 추가로 건설되었다. 이에 따라 전체 용량이 2250kW 용량의 태양광발전기가 한 D/L에 집중 연계되어 운전 중이다.

본 모의시험 수행을 위한 해석모델을 만들기 위해 변전소, 배전선로, 태양광발전기, 부하 등의 데이터를 확보하여 모델링을 수행하였으

며 태양광발전 출력에 따른 22.9kV 간선의 전압변동을 모의시험하여 태양광발전의 역조류에 의한 배전계통의 전압변동을 분석하였다. 그리고 태양광발전기가 연계되기 전·후에 배전선로의 임의의 지점에서 지락고장 모의시험을 통하여 태양광발전기가 고장전류에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 태양광 발전에 따른 배전계통의 전력품질을 분석하였다.

2. 모의시험 대상 계통 모델링

2.1 배전계통 모델링

본 모의시험 수행을 위한 해석모델을 만들

-
- 1) 한전 전력연구원 배전연구소
E-mail : ykk@kepri.re.kr
Tel : (042)865- 5941 Fax : (042)865-5904
 - 2) 한전 전력연구원 배전연구소
E-mail : juree@kepri.re.kr
Tel : (042)865- 5942 Fax : (042)865-5904
 - 3) 한전 전력연구원 배전연구소
E-mail : wwjung@kepri.re.kr
Tel : (042)865- 5945 Fax : (042)865-5904
 - 4) 한전 전력연구원 배전연구소
E-mail : sukcheol@kepeco.co.kr
Tel : (042)865- 5940 Fax : (042)865-5904

기 위해 변전소, 배전선로, 태양광발전기, 부하 등의 데이터를 확보하여 모델링을 수행하였으며 태양광발전 출력에 따른 22.9kV 간선의 전압변동을 모의시험하여 태양광발전의 역조류에 의한 배전계통의 전압변동을 분석하였다. 그리고 태양광발전기가 연계되기 전·후에 배전선로의 임의의 지점에서 지락고장 모의시험을 통하여 태양광발전기가 고장전류에 미치는 영향을 분석하였다.

2.2 태양광발전 모델링

대규모 태양광발전소는 다수의 인버터가 병렬로 연결된 구조를 갖는다. 본 모의시험에서는 태양광발전의 개별 응답특성보다는 전체 출력이 배전계통에 미치는 영향을 분석하는데 목적이 있다. 따라서 다수의 인버터를 별도로 각각 모델링하지 않고 인버터 모델 하나를 이용하여 태양광발전 단지 전체의 출력 특성을 모의할 수 있도록 용량 및 출력 특성을 모델링하였다. 본 모의시험에서 사용한 태양광모델은 전류원소스로 모델링되었으며 태양광 출력은 온도 25℃, 일사량(Insolation) 30kW/m²에서 최대 출력이 되도록 설정하였다. 또한 무효전력의 출력은 0으로 하여 태양광발전 출력이 역률 1로 운전되도록 모델링하였다.

그림1은 5개소의 태양광발전기소가 연계되어 있는 서순천 S/S 야외 D/L을 하이퍼심 소프트웨어에서 구현한 해석 모델 도면을 보여준다. 이와 같이 태양광발전이 연계된 배전계통의 해석모델을 이용하여 태양광발전 출력에 따른 배전계통의 역조류를 분석하고 이에 따른 배전계통의 전압변동을 검토하고자 한다. 또한 배전계통의 임의의 한 구간에서 지락고장 사고를 모의하여 태양광발전의 고장전류 기여도를 분석하였다.

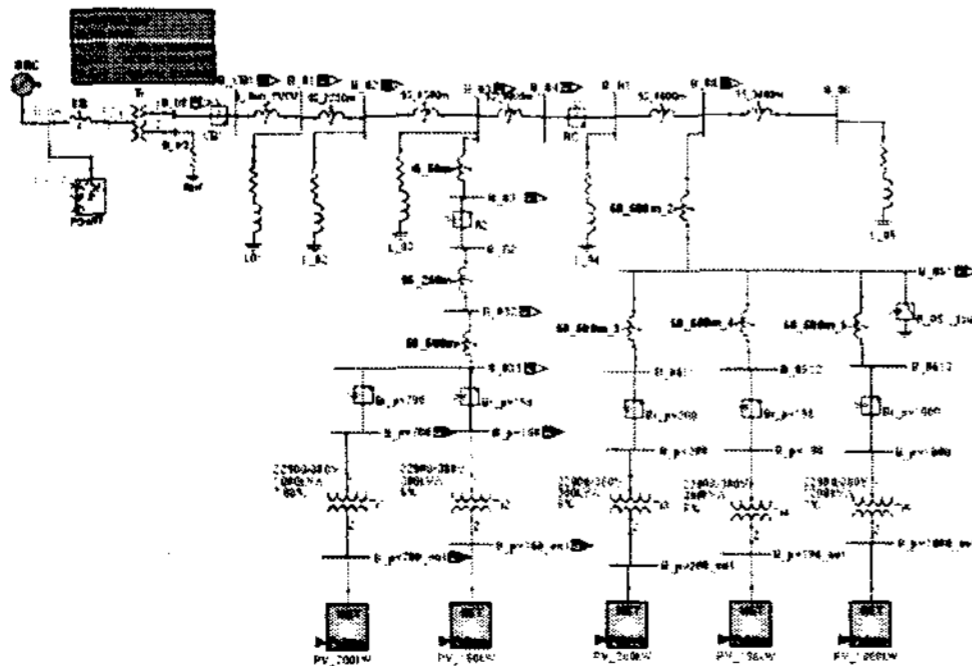


그림 1: 태양광 연계 배전계통 모델링 도면

Table 1 배전선로 선종 및 공장

선종	중성선	공장 (km)
AWOC95	AL95	2.20
		1.50
		1.80
		1.60
		3.40
		1.60
		0.50
		4.50
		0.3
8.60		
AWOC58	AL58	0.50
CNCV325	-	0.30

Table 2 부하 데이터

부하	부하량	
	P (kW)	Q (kVAr)
L_01	450	140
L_02	1080	360
L_03	930	300
L_04	300	140
L_05	300	90
합계	3,060	1,030

3. 태양광발전 출력에 따른 계통 전압변동 해석

3.1 태양광발전 출력에 따른 배전계통 조류 해석

그림2는 태양광발전의 출력에 따른 배전계통에 흐르는 조류 변동을 보여주고 있다. 그래프 (a)는 5개 태양광발전소가 순차적으로 유효출력을 내는 것을 보여주고 있으며 그래프 (b)는 태양광발전소의 유효출력에 대한 배전계통의 조류변동을 보여주고 있다. P_CB1은 그림2의 도면에서 변전소 인출 차단기에서의 유효전력을 의미하고 P_RC는 모선 B_04와 B_05사이의 리클로저(RC)에 흐르는 유효전력을 의미한다.

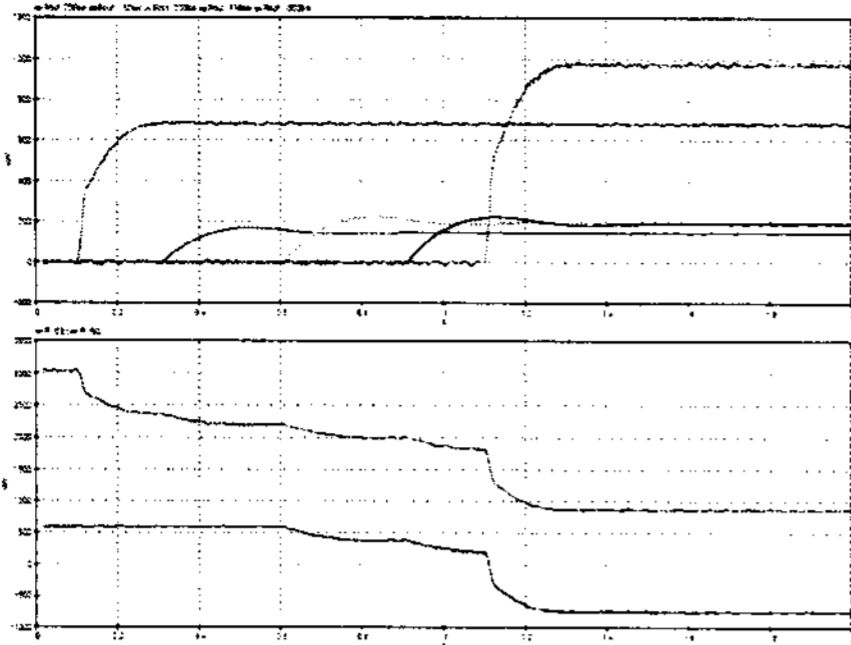


그림 2: 태양광발전 출력에 따른 배전계통 조류변동

결과 그래프에서와 같이 0초~0.6초 구간에서 700kW, 150kW 태양광발전이 출력하게 되면 P_CB1은 줄어들고 P_RC는 변동이 없다. 이것은 700kW와 150kW 출력이 배전계통의 부하에 일정 전력을 공급하면서 변전소로부터 오는 유효출력이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 700kW, 150kW 태양광발전 출력이 L_01, L_02, L_03에 뿐만 아니라 L_04, L_05에도 일정 부분 공급하지만 700kW, 150kW 태양광이 연계된 지점의 하위에 여타의 발전원이 없기 때문에 P_RC의 조류 변동은 없는 것으로 분석될 수 있다. 그러나 모선 B_051에 연계되어 있는 200kW, 198kW, 1000kW 태양광이 0.6초 이후 순차적으로 발전하면서 그림 2에서 P_Rc의 유효출력도 태양광발전 출력만큼 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 태양광발전 출력에 따른 전압변동

본 모의시험의 대상이 되는 서순천S/S 야외 D/L에는 850kW, 398kW가 각각 모선 B_033과 B_051에 연계되어 전체 1250kW 용량의 태양광발전이 연계되어 운전 중인 상황에서 추가적으로 모선 B_051에 1000kW 용량의 태양광발전소가 신규 연계되었다. 본 모의시험에서는 태양광발전이 없는 경우, 기존 1250kW 태양광발전이 연계된 경우 그리고 1000kW가 추가로 연계되는 경우에 대하여 각각 배전계통의 전압변동을 검토하였다.

먼저, 그림1에서 변전소로부터 700kW, 150kW 태양광발전의 연계점 B_033까지를 구간1로 정의하고 변전소부터 200kW, 198kW, 1000kW 태양광발전의 연계점 B_051까지를 구간2로 정의하여 각 구간에서의 전압변동을 각각 분석한다.

그림3은 구간1과 구간2 배전선로에서 태양광발전기가 연계되기 전의 전압과 기존 1250kW 용량의 태양광발전이 연계된 경우, 그리고 추가로 1000kW 용량의 태양광이 B_051에 증설되어 전체 2250kW 용량의 태양광발전이 배전계통에 연계되어 있는 경우에 대하여 각 모선의 전압값을 보여주고 있다.

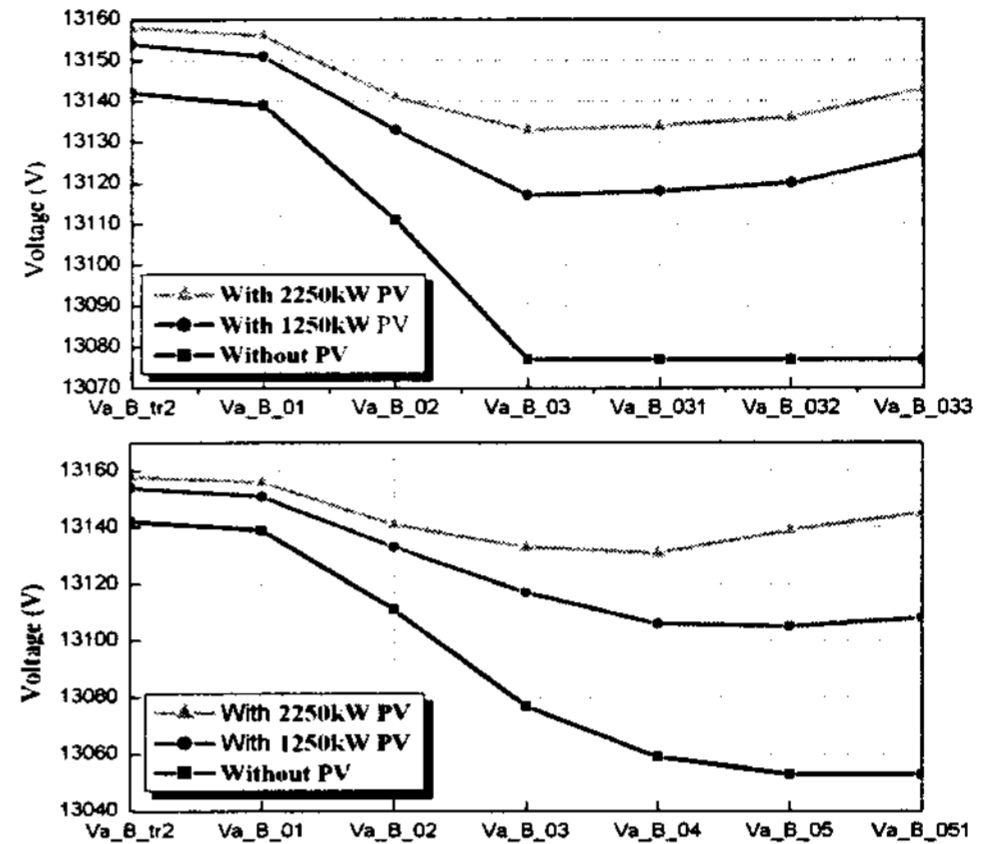


그림 3: 태양광발전 출력에 따른 배전선로의 전압분포

연계구간1의 결과 그래프에서와 같이 배전선로에 연계되는 태양광발전 용량이 1250kW 일 경우 B_033의 전압은 0.38% 상승하고 연계 용량이 2250kW일 경우 0.43% 상승하는 것을 확인할 수 있다. 여기서, 1000kW 태양광발전이 모선 B_051에 연계되는 경우에도 모선 B_033의 전압이 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 B_051 지점에 연계되는 태양광발전의 유효전력이 인근 부하에 전력을 공급함과 동시에 상위계통으로 역조류를 흘려보내게 되어 B_033 지점에서의 전압을 상승시키는 것으로 분석된다.

구간2에서도 구간1과 마찬가지로 연계되는 태양광발전 용량이 증가함에 따라 태양광발전계통연계 지점 B_051의 전압이 상승하는 것을 확인할 수 있다. 기존 태양광 1250kW 연계시 B_051지점의 전압은 0.42% 상승하고 추가로 1000kW 연계시 0.7% 상승한다. 1000kW 태양광발전이 B_051지점에 연계되므로 1000kW 태양광의 추가 연계로 인하여 전압상승이 구간1보다는 구간2에 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고 1000kW 태양광발전이 추가로 연계되는 경우 B_051의 전압이 선로 중간 지점 B_03보다 높아지는 것을 볼 수 있다. 이것은 기존 1250kW 태양광이 연계된 경우에 B_051

모선에는 398kW 용량이 태양광발전이 연계되어 있고 인근 부하 L_04 (300kW)와 L_05 (300kW)에서 태양광발전 전력을 모두 소모하기 때문에 부하 L_04, L_05의 상위 지점 B_03 보다 전압이 높지는 않았지만 1000kW 태양광이 B_051 지점에 추가로 증설됨에 따라 부하 L_04, L_05에 공급하고 남은 잉여 전력이 B_03 상위 계통으로 흘러들어가기 때문에 모선 B_03 하위 계통의 전압이 상승하는 것으로 분석된다.

3.3 선로 고장 해석

본 절에서는 태양광발전이 연계된 배전선로에서의 고장해석을 수행하고 고장발생 시 태양광발전의 출력 특성을 분석하고 태양광발전 출력이 고장전류에 어떻게 기여하는지 살펴본다. 그림1의 모델링 도면의 모선 B_051에서 A상 1선 지락 고장을 1.5초에 발생시키고 1.6초에 고장을 제거하는 시나리오로 1선 지락고장을 모의하고 이때 고장 저항은 10Ω으로 설정하였다.

그림4는 배전선로에 연계되어 운전 중인 1000kW 태양광발전기의 고장발생에 따른 출력 특성을 보여준다. 결과 그래프에서와 같이 정상출력 운전 중인 태양광발전기가 고장발생시 약간 출력 전류가 상승하고 고장 제거 후 바로 정상상태로 복귀하는 것을 확인할 수 있다.

표3은 태양광발전의 정상운전 시 출력전류와 고장발생시 출력전류를 보여준다. 본 모의시험에서는 고장발생시 각 태양광발전기의 출력이 정상 출력전류의 107 ~ 112% 증가하여 고장전류에 기여하는 것으로 확인되었다. 이것은 태양광발전의 출력 전류는 보통 최대 1.2 pu 정도로 제한되도록 인버터에서 제어되기 때문에 고장 상황에서도 제한치를 넘지 않는 범위 내에서 출력하게 되는 것으로 분석된다. 따라서 태양광발전 연계계통의 고장발생시 태양광발전기는 정격전류의 최대 1.2 배 정도 고장전류에 기여한다고 볼 수 있다.

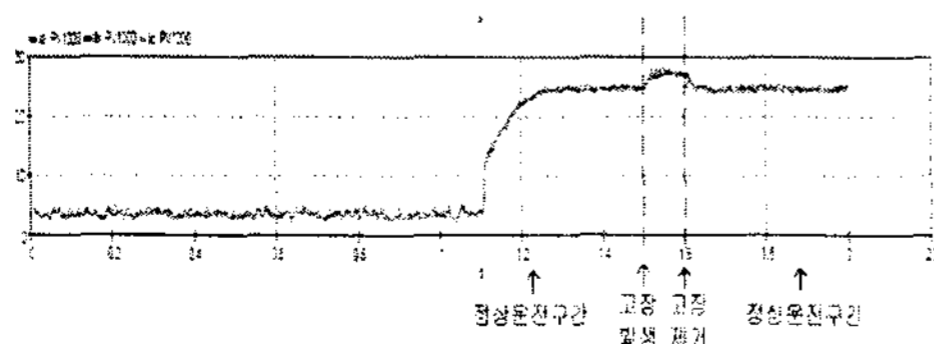


그림4: 고장발생시 태양광발전(1000kW)의 출력전류 특성

Table 3 태양광발전의 고장전류 기여도

태양광발전	태양광 출력전류		증가량(%)
	정상시(A)	고장시(A)	
700kW	17.0	18.4	108
150kW	4.1	4.4	107
200kW	5.4	5.9	109
198kW	5.3	5.9	111
1000kW	24.0	28.0	117
합계	55.8	62.6	112

4. 태양광발전 계통연계 전력품질 분석

4.1 태양광 발전시스템 출력

순천태양광 발전소는 서순천 변전소 야외 D/L 일반 배전선로에 고압 수전설비를 거쳐 1250kVA 변압기를 거쳐 132개의 계통연계형 인버터와 연계되어 운전되고 있다. 순천 태양광 발전소는 국산 및 외산 인버터가 조합되어 각 특성을 파악할 수 있도록 구성되어 있으며, 또한 국산 및 외산의 모듈별 성능 및 특성을 파악할 수 있도록 하여 다양한 성능평가 및 실증시험을 수행 할 수 있도록 구성되어 있다.

그림 5는 순천변전소 야외D/L에 구축된 전력품질 측정시스템 나타내고 있으며, 측정포인트는 총5개소로 야외D/L 인출단, 인접D/L, 저압변대, 태양광발전소 2개소로 구성되어있다.

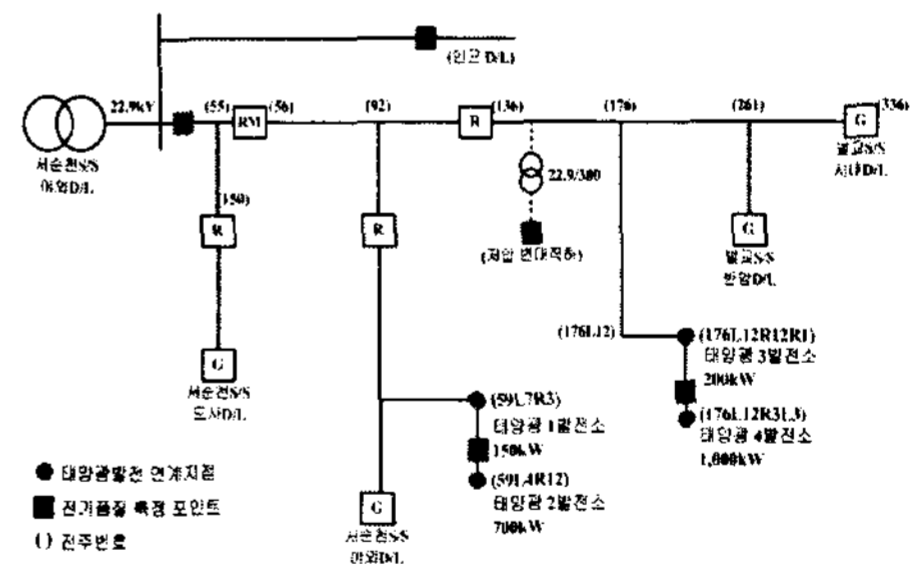


그림 5: 구축된 전력품질 측정시스템

그림 6과 그림 7은 1000kW 태양광 발전소 메인 VCB반에서 측정한 상전류와 상전압을 나타내고 있으며, 2주간 측정된 상전압은 상시전압 변동폭 12kV ~ 13.8kV의 허용 변동범위임을 확인할 수 있다.

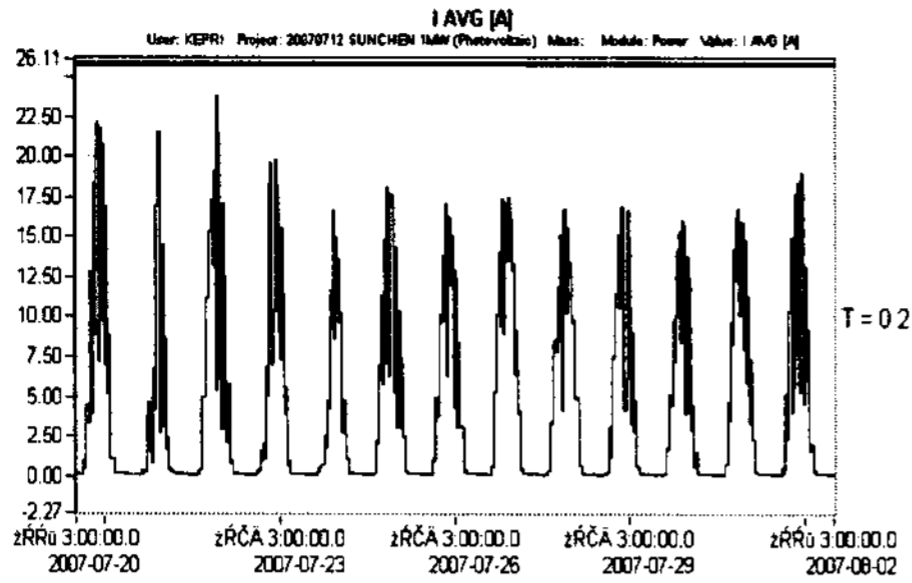


그림 6: 측정된 상전류

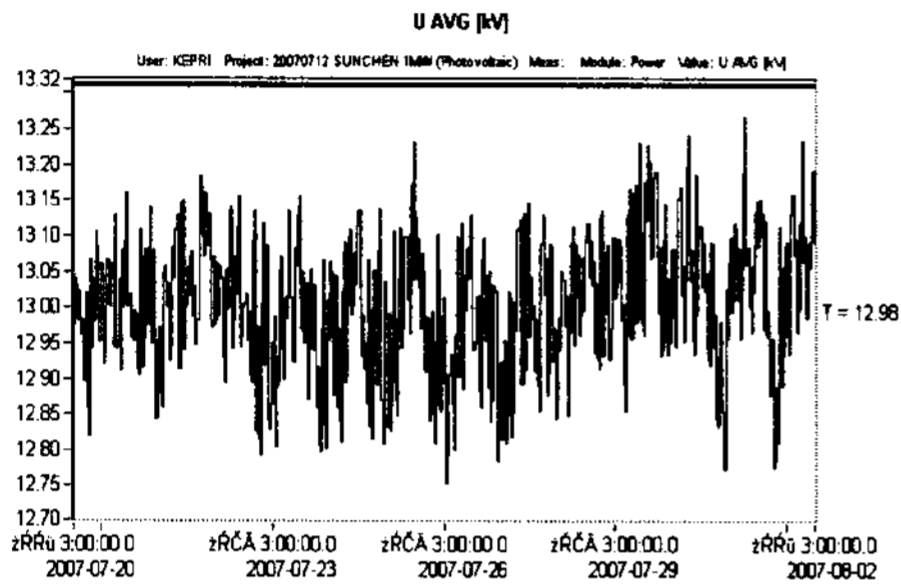


그림 7: 측정된 상전압

주파수 변동 폭은 60 Hz를 기준으로 $\pm 2\%$ 임을 알 수 있다

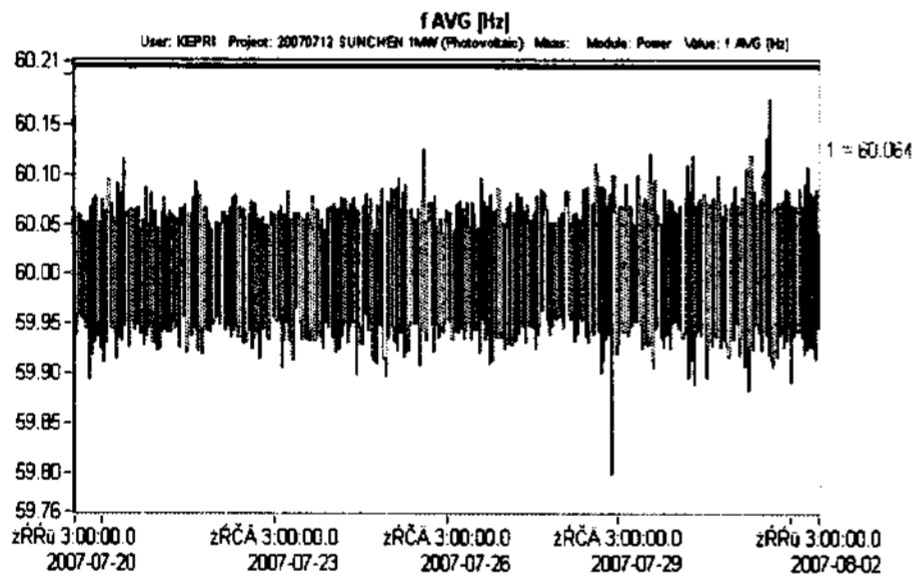


그림 8: 측정된 주파수

그림 9와 그림 10은 태양광이 좋지 않을 경우와 좋은 경우의 유효전력 (active power)과 전압의 측정치를 보여준다. 그림에서 보듯이 태양광이 좋지 않을 경우 (그림 9), 유효전력 출력이 태양광이 좋은 경우의 유효출력 곡선에 비해 매우 산만적임을 알 수 있다. 또한, 태양광이 좋은 경우와 태양광이 좋지 않을 경우 전압변동폭은 12kV ~ 13.8kV 내에서 변동함을 알 수 있다.

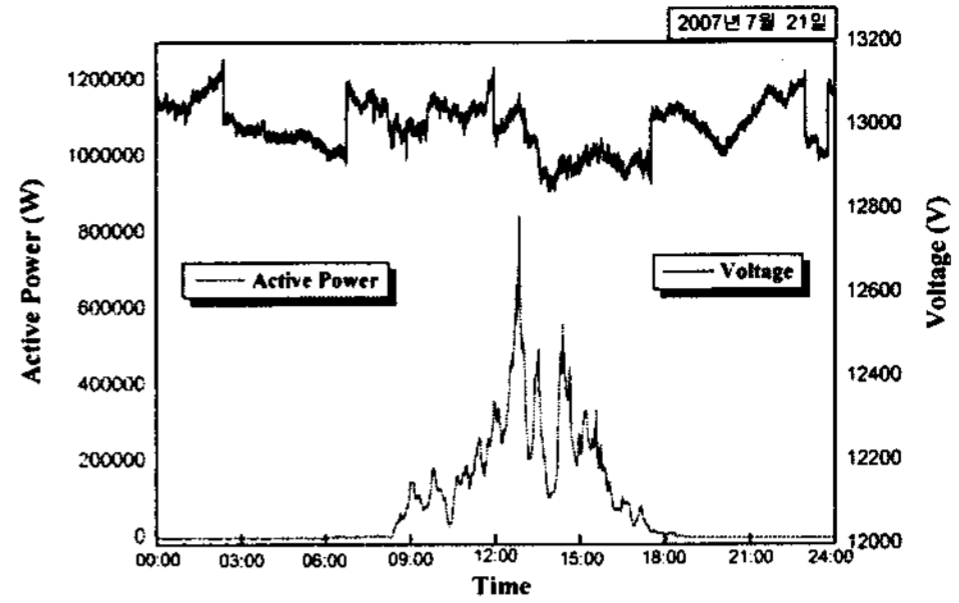


그림 9: 태양광이 좋지 않을 경우 유효전력과 전압

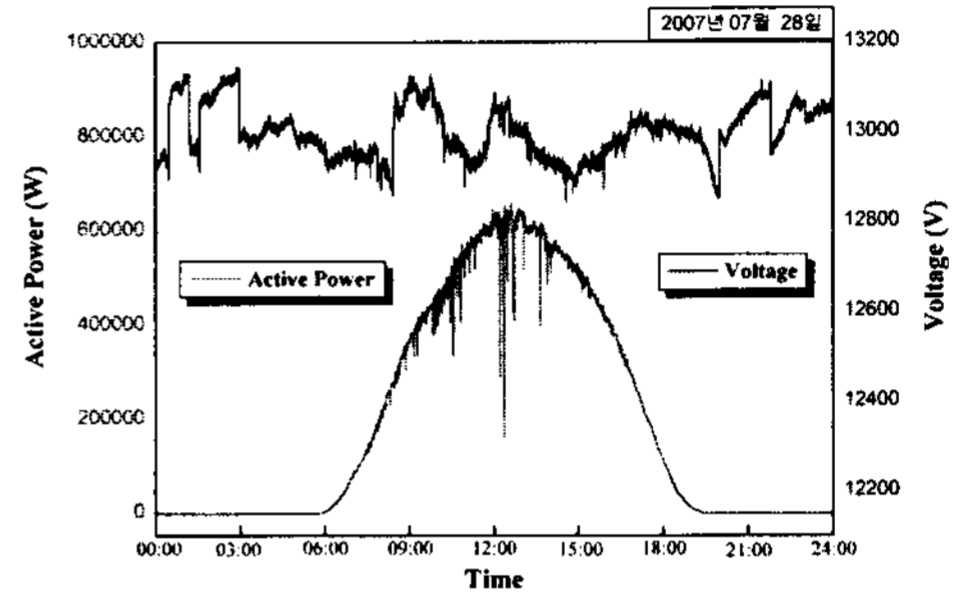


그림 10: 태양광이 좋은 경우의 유효전력과 전압

그림 11과 그림 12는 태양광이 좋지 않을 경우와 좋은 경우의 유효전력과 THD 특성을 보이는데, 태양광이 좋지 않을 경우의 THD가 요구되는 값 1.5 이상/이하로 크게 변동함을 알 수 있다. 반면, 태양광이 좋을 때는 THD가 1.5근방에서 변동 특성을 가지고 있음을 볼 수 있다. 그러나 이러한 수치는 계통의 상황에 따라서 움직이는 현상으로 파악 할 수 있다.

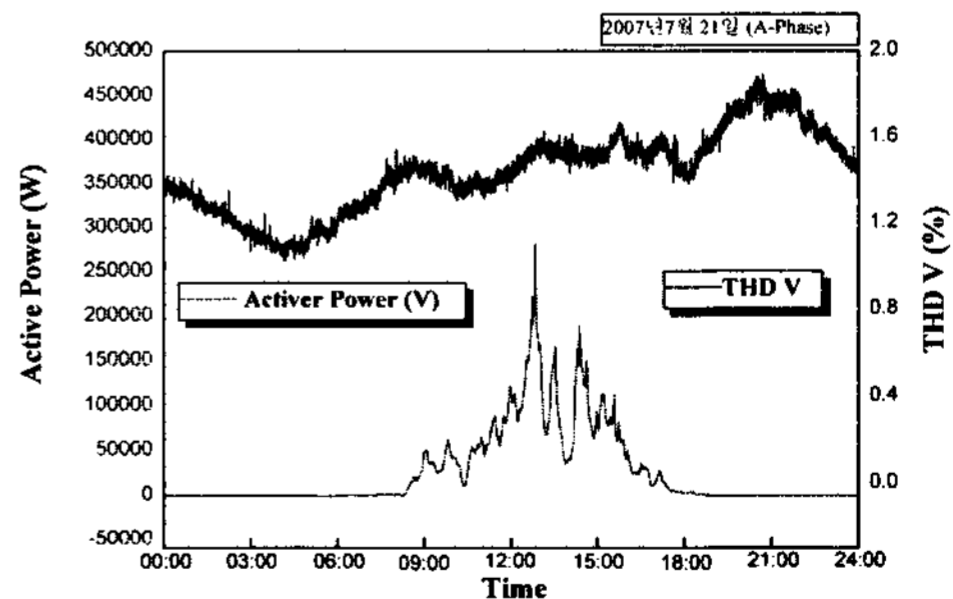


그림 11: 태양광이 좋지 않은 경우 유효전력과 THD

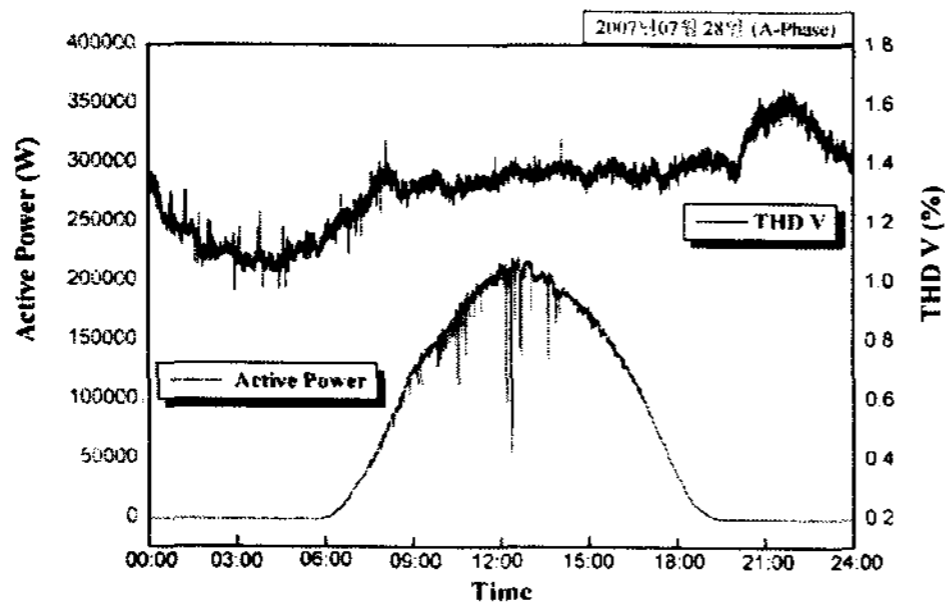


그림 12: 태양광이 좋은 경우 유효전력과 THD.

또한 태양광이 좋지 않을 경우의 역률 (그림 13)은 좋을 경우의 역률 특성 (그림 14)에 비해 현저히 나쁘다는 것을 그림 13과 그림 14로부터 알 수 있다. 태양광이 좋을 경우에는 역률이 1을 유지하고 있다는 것을 볼 수 있다.

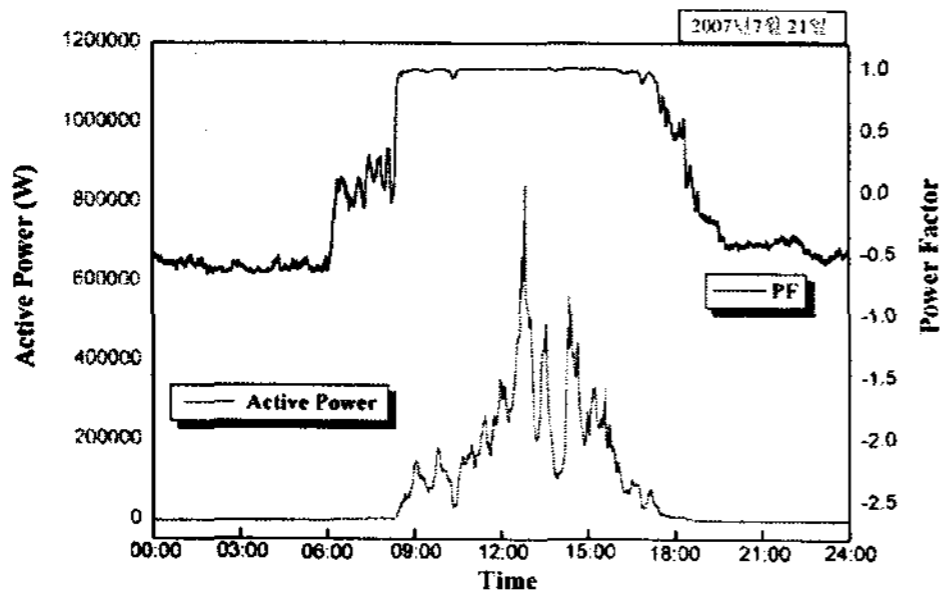


그림 13: 태양광이 좋지 않은 경우 유효전력과 역률

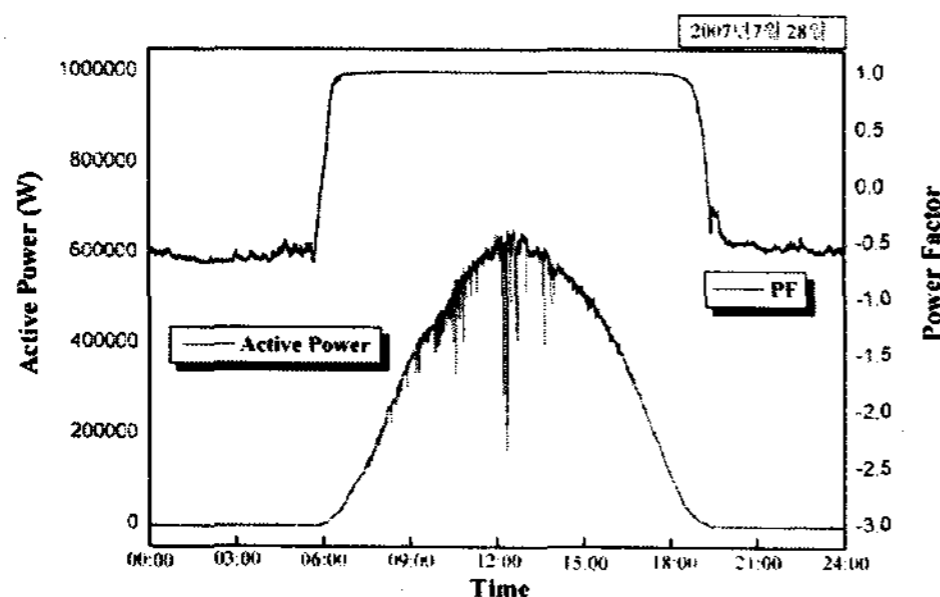


그림 14: 태양광이 좋은 경우 유효전력과 역률

5. 결론

본 논문에서는 실제 운전 중인 태양광발전 연계 배전계통을 대상으로 시뮬레이션을 수행하고 태양광발전 출력에 따른 배전계통의 조류변동 및 전압변동, 고장해석을 수행하였다.

태양광발전 출력에 의해 배전계통은 Bidirectional Power Flow 계통이 되고 계통의 전압은 조류흐름에 따라 형성되게 된다. 보통 태양광발전 출력은 배전계통 전압을 전체적으로 상승시키고

다수의 태양광발전이 연계되는 경우 인근의 태양광발전 출력에 의해서도 계통전압이 모두 상승하기 때문에 태양광발전 연계 배전계통의 모든 태양광발전의 출력을 고려하여 전체 전압변동을 해석해야 한다. 그리고 태양광발전 연계 배전계통에서 고장발생시 태양광발전기의 고장전류 기여도는 인버터의 전류 제한치에 의해 결정됨에 따라 태양광발전 연계 계통에서는 이 점을 고려하여 보호협조를 정정할 필요가 있다.

또한 전력품질측정 분석에서는 태양광이 좋은 경우와 태양광이 좋지 않은 경우에 대하여 전압 변동 및 역률 출력변동 등을 분석하였는데 분석결과 전압변동은 대부분 공급전압 변동범위 이내임을 확인할 수 있었고 태양광이 좋지 않은 경우 역률이 좋지 않음을 확인할 수 있었다. 향후 추가적인 측정 자료를 바탕으로 보다 다양하고 세부적인 분석을 수행할 계획에 있다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단의 지원으로 수행중인 "MW급 태양광 발전시스템 실증 site 구축을 통한 계통연계기준 및 발전사업자 모델 제시를 위한 연구과제" 중에 전력연구원에서 수행한 "태양광발전 계통연계 특성분석 연구" 과제의 연구결과이다.

References

- [1] Seul-Ki Kim, "PSCAD/EMTDC Based modeling and simulation analysis of a grid-connected photovoltaic generation system"
- [2] 전기평론(2005), 분산형전원연계의 배전계통 운용에의 영향평가
- [2] 한전 배전처(2006), 분산형전원 배전계통 연계기술 해설서