

계통연계형 태양광발전 시스템이 계통의 전력품질에 미치는 영향

(Effect of the Interconnected Solar Power Generation System on the Power Quality of Power System)

권동철* · 박중신 · 이동영**

(Dong-Chul Kwon · Joong-Sin Park · Dong-Young Yi)

Abstract

In this study, we have investigated the effect of the solar power generation facilities on the power quality of interconnected solar power generation system. When the solar power generation facility was connected to the distribution system, whether the solar power generation is under operation or not, Peak factor of current was increased to 0.033[%], Frequency is deviated from 60 ± 0.2 [Hz] and also Short term flicker indication(P_{st}) increased to 0.213[p.u.] compare with the disconnected situation. Harmonic current [%] in orders was 11.42[%] maximum under 11th orders and was 7.861[%] between 11th and 17th orders. These values were about 3 or 4 times compared with “the power system interconnection technique standards” at the same situation above. Therefore, we could confirmed that the solar power generation facility, when it was connected to the existing distribution system, made bad influence on the power qualities such as the peak factor of current, frequency regulation, short term flicker indication(P_{st}) and harmonic current [%] in orders etc.

Key Words : Solar Power Generation, Power Quality, Interconnected Distribution System

1. 서 론

최근 고유가와 환경문제 등으로 인하여 태양광이나 풍력 발전 등 분산형전원의 보급이 점차 증가되고 있는 추세이다. 그러나 소규모 태양광 발전설비가 기존의 배전계통에 연계되면 전압변동, 역률, 주파수, 고조

파, 플리커 등의 전원 품질에 영향을 줄 수 있기 때문에 전기공급약관 제39조와 분산형 전원의 배전계통 연계 기술기준 등의 지침을 정하여 규제하고 있다[1]. 소규모의 분산형 전원은 부하의 증가 및 감소에 상관 없이 분산형 전원 특성상 풍력 발전설비, 태양광 발전설비의 경우 태양의 방사에너지 양과 바람의 세기에 따라 발전되는 전력생산량이 일정하지 않으므로 배전계통에 잦은 연계와 분리를 반복하게 되는 문제점이 생길 수 있고, 분산형 전원에서 발생된 각종 고장 및 전원품질의 저하가 연계된 기존의 배전계통에 파급될 경우 전원품질의 상당한 저하를 초래할 가능성이 내

* 주저자 : 한국전기안전공사 경북동부지사 검사기술부 검사대리

** 교신저자 : 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수

Tel : 054-760-1661, Fax : 054-760-1669

E-mail : dyyi@uu.ac.kr

접수일자 : 2012년 5월 21일

1차심사 : 2012년 6월 18일, 2차심사 : 2012년 6월 2일

심사완료 : 2012년 7월 5일

재되어 있다.

따라서 본 논문에서는 현재 날로 확대 보급되고 있는 태양광 발전설비가 전력계통과 연계 운영되어 전력계통의 전원품질 요소에 어떠한 영향을 미치고 있는지를 측정·분석함으로써 향후 분산형 전원설비의 확대 보급에서 발생할 수 있는 전원품질 저하 문제에 대처하기 위한 토대를 마련하고자 한다.

2. 측정장치 및 방법

전원품질이란 공급자의 관점에서 보면 전원공급 신뢰도를 말하며, 고객의 관점에서 보면 동력을 공급하는 장치, 시스템 등의 전기설비에 공급되는 전원의 상태이다[2].

본 논문에서는 계통연계형 분산전원이 전력계통의 전원품질에 미치는 영향을 분석하기 위해 태양광 발전설비를 설치하여 상업 운전 중인 고객의 전력계통(자가용 전력설비)과 분산형 전원이 연계된 공통접속점(PCC : Point of Common Coupling)에 전원품질분석 시험설비를 설치하여 전원품질요소에 영향을 주는 요소들을 측정하였다. 품질분석 설비는 AMETEK 사의 Meridian 6000을 이용하였으며 제원은 표 1과 같다[3].

본 논문에서는 현재 상업운전중인 연계형 태양광 발전설비를 그 대상으로 하였으며 태양전지의 cell type은 단결정 태양전지이고 국내산이다. 전력변환장치(PCS)는 일본산이며 DC 입력은 250~495[V], 154.6[A] AC 출력은 3상, 60[Hz], 380[V], 76.7[A]이며 출력은 50[kVA]이다.

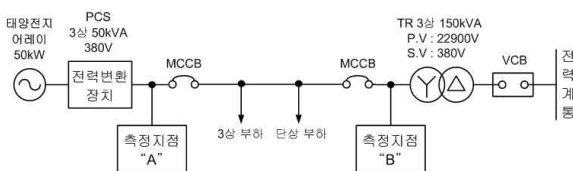


그림 1. 태양광 발전시스템의 전원품질요소 측정 위치
Fig. 1. Points of power quality measurement in solar power system

태양광발전시스템의 전력품질 측정을 위한 계통도 및 측정위치는 그림 1과 같다. 측정위치는 전력계통측

(측정지점 “B”)과 태양광 발전설비의 전력변환장치(PCS)의 교류전원 출력측(측정지점 “A”)이며 주간의 태양광 발전설비가 발전을 할 경우와 야간 또는 흐린 날에 발전을 하지 않을 경우의 전원품질요소를 측정하였다. 전원품질요소 측정 방법은 1회 24시간 측정을 원칙으로 하되 부하설비의 부하변동 및 태양의 일사량 변화에 의한 태양광 발전량 변화를 고려하였다. 측정 개소별로 3회 반복 측정하여 측정 데이터의 오차를 줄여 신뢰도를 높였다.

표 1. 측정성능
Table 1. Measurement Capabilities

항 목	측 정 성 능
Accuracy	전압, 전류는 전체 범위의 $\pm 0.05\%$; 고속과도상태 250[ns], 14[bit] 분해능
Voltage Current	주요 측정값들은 실효값(RMS), 파형(waveform), 최소(min), 최대(max), 평균(avg), INST
Power Quality	파형외란, 불균형, 최대값, 주파수, 하락, 상승, 부족/과전압, notching
Power	유효전력, 피상, 무효전력, 역률, 수용전력
Energy	유효, 피상, 무효, 망, 공급
Harmonics	DC, 63차 THD 설정, 전압, 전류, 63차 전력 설정
Flicker	IEC 868와 IEC 61000-4-15

3. 측정 결과

상기의 측정방법과 절차에 따라 계통연계형 태양광 발전설비가 전력계통의 여러 가지 전원품질요소에 미치는 영향을 측정하고 그 결과를 살펴보았다. 표 2와 표 3은 여러 가지 전원품질요소에 대한 측정결과를 정리한 것이며 그림 2, 그림 3, 그림 4는 각각 주파수, 고조파전류 차수별(%), 플리커(P_{st})에 대한 측정결과이다.

3.1 전압 변동(Voltage RMS)

태양광 발전설비의 전압 실효치는 전력계통과 연계되어 가동 중일 때, 정지 상태일 때 그리고 태양광 발전을 분리 운전할 때 모두 전기사업법 제18조 ①항 및 시행규칙의 표준전압 및 전압 유지범위를 만족하고

있다[4-6]. 또한 태양광 발전에서 발전설비가 가동 중일 때의 값이 최대 2.95[%]로 분산전원 계통 연계 기술기준을 만족하고 있다[10]. 그러나 태양광설비가 가동정지 상태일 때 전력계통 측에서는 태양광설비가 부하로 작용하므로 계통분리가 될 경우 약간의 전압 상승(3.34[%])이 발생하는 것으로 추정된다.

3.2 전압 파형(Voltage Waveform)

태양광 발전설비의 전압 파형은 전력계통의 선간전압 파고율이 가동 중일 때 1.417~1.422, 정지 상태와 태양광 발전을 분리할 때 1.407~1.414로 측정되었다. 즉 전력계통의 파고율 최대치는 태양광 발전설비가 정지 상태와 태양광 발전을 전력계통에서 분리할 때 이상적인 정현파 파고율 1.414($\sqrt{2}$)와 같게 나타나며, 태양광 발전설비가 가동 중일 때 태양광 발전설비 및 부하설비의 고조파 영향으로 최대 0.008정도 더 높게 나타나는 것으로 보인다.

3.3 전압 불평형(Voltage Unbalance)

3상 전압 불평형은 전력계통과 연계되어 가동 중일 때 0.170~0.646[%], 정지 상태와 태양광 발전을 분리할 때 0.002~0.387[%]로 측정되었다. 즉 태양광 발전설비가 가동 중일 때 전력계통에서 전압불평형이 0.259[%] 정도 높게 나타나고 있다.

3.4 전류 파형(Current Waveform)

전류 파형의 상전류 파고율은 전력계통과 연계되어 가동 중일 때 1.487~1.585, 정지 상태일 때 1.433~1.975, 태양광 발전을 분리할 때 1.455~1.989로 측정되었다. 태양광 발전설비는 정지 상태일 때 부하로 작용하여 태양광 발전설비가 가동 중일 때 보다 파고율이 0.39 정도 높게 나타나지만, 이 수치는 태양광 발전을 분리할 때도 이상적인 정현파 파고율 1.414($\sqrt{2}$)보다 0.575가 높은 1.989로 측정됨으로 태양광 발전설비의 영향보다 부하설비의 고조파에 의한 영향으로 전력계

통의 파고율이 높게 나타난다고 볼 수 있다.

표 2. 전원품질요소 측정 결과(I)

Table 2. Results of power quality (I)

요소	구분	규정 범위	발전 상태	측정 결과	
				태양광 발전	전력 계통
전압 변동 (%)	상시(10분 평균값) 3[%] 이내		가동 중	2.95	2.44
			가동 정지	4.08	2.16
			계통 분리	-	3.34
전압 파형 파고율	정현파 파고율 1.414 ($=\sqrt{2}$)		가동 중	최대 1.416	최대 1.422
			가동 정지	최대 1.418	최대 1.416
			계통 분리	-	최대 1.414
전압불평형 (%)			가동 중	0.509	0.646
			가동 정지	0.346	0.373
			계통 분리	-	0.387
전류 파형 파고율	정현파 파고율 1.414 ($=\sqrt{2}$)		가동 중	최대 1.543	최대 1.585
			가동 정지	최대 2.064	최대 1.975
			계통 분리	-	최대 1.942
위상차 (°)	전압	각 상 120[°] 유지 기준에서 ± 0 [°]	가동 중	최대 0.54	최대 0.1
			가동 정지	최대 0.39	최대 0.2
			계통 분리	-	최대 0.3
	전류	각 상 120[°] 유지 기준에서 ± 0 [°]	가동 중	최대 3.7	최대 12.6
			가동 정지	최대 228.3	최대 16.04
			계통 분리	-	최대 16.2
역률[%]	지상 90[%] 이상		가동 중	진상 99.8	지상 90.0
			가동 정지	진상 0.9	지상 88.8
			계통 분리	-	지상 90.1

3.5 위상(Phase)

전압 위상은 3상 교류회로의 각 상(30[°], 150[°], 270[°])의 위상각 기준 120[°]에서 위상각 편차는 태양광 발전설비가 가동 중일 때 최대 0.1[°], 정지 상태일 때 최대 0.2[°], 태양광 발전을 분리할 때 최대 0.3[°]로 나타나고 있다. 즉 3상 교류전압의 위상각 편차는 태양광 발전설비가 전력계통과 연계되어 있을 때 보다 분리 상태일 때 0.1[°]정도 편차가 더 발생됨으로 태양광 발전설비의 영향은 없는 것으로 생각된다.

전류 위상은 3상 교류회로의 각 상(330[°], 210[°], 90[°])의 위상각 기준 120[°]에서 위상각 편차는 태양

광 발전설비가 가동 중일 때 최대 6.0[°], 정지 상태일 때 최대 17.6[°], 태양광 발전을 분리할 때 최대 9.3[°]로 나타나고 있다. 즉 3상 교류전류의 위상각 편차는 태양광 발전설비가 정지 상태일 때가 전력 계통과 분리할 때 보다 약 2배 정도 높게 나타난다.

태양광 발전설비가 발전하지 않을 경우는 태양광 발전설비에서 전압과의 위상차가 14.6[°]~146.4[°]로서 부하설비로 작용하면서 3상 전류 위상차가 11.7[°]인 고조파 성분을 함유한 전류를 발생시켜 전력계통으로 유출한다고 볼 수 있다.

3.6 역률(Power Factor)

역률은 전력계통과 연계되어 가동 중일 때 최대 90.0[%]로 국내 전력회사의 전기공급기본약관 등에 규정된 기준 역률 90[%] 이상을 유지하고 있으나, 정지 상태일 때는 태양광 발전설비가 부하로 작용하여 역률이 최대 88.8[%]로 1.2[%]의 역률 저하가 발생한다. 태양광 발전을 분리할 때는 다시 90.1[%]로 역률이 기준 역률 90[%] 이상을 유지한다[4-5, 9-10].

3.7 주파수(Frequency)

태양광 발전설비의 주파수는 그림 2에서 보는 바와 같이 전력계통과 연계되어 가동 중일 때 기동전류가 큰 부하의 갑작스러운 기동 시에 태양광 발전에서 59.5~60.2[Hz]로서 심하게 주파수 변동이 발생(Point 1)하여 전기사업법 제18조에 의한 표준주파수 및 허용오차 60±0.2[Hz]를 초과하고 있으며, 이 주파수 변동은 전력계통에도 악영향을 주어 59.7~60.1[Hz]로 허용오차를 초과(Point 2)한 수치를 나타내게 한다[4-6].

태양광 발전설비가 정지 상태와 태양광 발전을 분리할 때는 59.8~60.2[Hz]로 다시 주파수가 안정되는 것으로 나타나고 있다.

3.8 고조파 전압 THD(%)

고조파 전압 THD(%)는 전력계통과 연계되어 가

동 중일 때 0.945~1.630[%], 정지 상태일 때 0.880~1.283[%], 태양광 발전을 분리할 때 1.285~1.906[%]로 측정되었다. 발전설비가 가동정지 상태일 때 부하로 작용하여 최대 4.076[%]가 되지만 전력계통 측에서는 국내 전력회사의 고조파 허용기준인 3[%]이하를 만족하고 있다[3-4, 8-9]. 전력계통에서 태양광 발전을 분리할 때도 최대 1.906[%]가 발생됨으로 태양광 발전설비의 계통연계에 따른 영향은 없는 것으로 나타나고 있다.

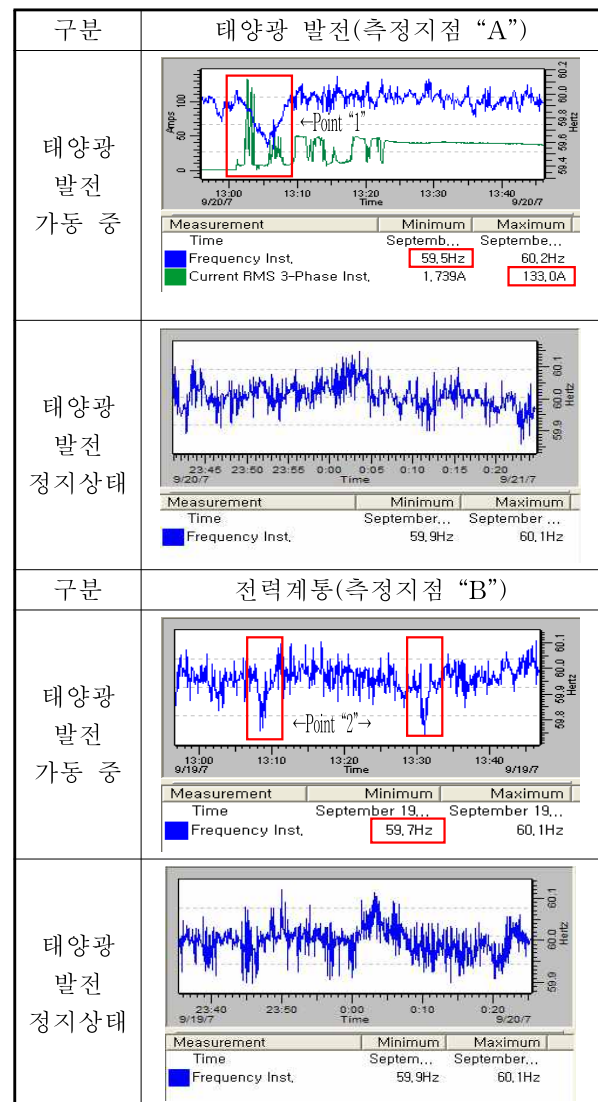


그림 2. 주파수
Fig. 2. Frequency

표 3. 전원품질요소 측정 결과(II)
Table 3. Results of power quality measurement(II)

요소	구분	규정 범위	발전 상태	측정 결과	
				태양광 발전	전력 계통
고조파 전압 THD(%)	국내 전력회사 3% 이하		가동 중	0.817~1.744	0.945~1.630
			가동정지	1.011~4.076	0.880~1.283
			계통분리	-	1.285~1.906
고조파 전류 THD(%)	국내 전력회사 5% 이하		가동 중	2.768~6.447	4.145~23.20
			가동정지	19.98~47.42	5.257~27.81
			계통분리	-	5.812~28.54
고조파 DC전류 (A)	분산전원 정격 최대 전류의 0.5%		가동 중	최대 2.459	최대 2.622
			가동정지	최대 2.349	최대 2.035
			계통분리	-	최대 3.093
플리커 P_u (P.U)	분산전원 : 0.25 이하 전력계통 : 0.65 이하		가동 중	0.696~0.739	0.711~0.734
			가동정지	0.725~0.774	0.779~0.793
			계통분리	-	0.728~0.763

3.9 고조파 전압 차수별(%)

차수별 개별 고조파 전압 함유율(%)은 전력계통과 연계되어 가동 중일 때, 정지 상태와 태양광 발전을 분리할 때 모두 IEC 1000-2-2 규정(3차→5%, 5차→6%, 7차→5%, 9차→1.5%, 11차→3.5%, 13차→2%, 15차→0.3%, 17차→2% 19차→1.5%)에 의한 차수별 개별 고조파 전압에 대한 함유율을 만족하고 있고, IEEE Std 519 규정(5.0% 이하)에 의한 차수별 개별 고조파 전압 왜형률도 만족하고 있다[8].

3.10 고조파 전류 THD(%)

고조파 전류 THD(%)는 태양광 발전 측에서는 전력계통과 연계되어 가동 중일 때 최대 6.447%로 분산전원의 계통연계 기술기준인 전류 THD 5%를 초과하고 있고 발전설비가 정지 상태일 때 부하로 작용하면서 최대 47.42%로 높게 측정되었다. 전력계통 측에서는 태양광 발전설비가 가동 중일 때 최대 23.20%, 정지 상태일 때 최대 27.81%, 계통분리시 최대 28.54%로 높게 나타났다[10].

3.11 고조파 전류 차수별(%)

차수별 고조파 전류 함유율(%)은 그림 3에서 보는 바와 같이 전력계통과 연계되어 가동 중일 때와 정지 상태일 때 11차 미만에서 최대 11.42%, 11~17차에서 최대 7.861%로 측정되어 분산전원의 계통연계 기술기준인 11차 미만에서 4%, 11~17차 미만에서 2% 보다 많은 고조파 전류를 전력계통으로 유출한다[10]. 전력계통에서는 태양광 발전설비가 가동 중일 때와 정지상태일 때가 태양광 발전을 분리할 때 보다 약 2배 정도 높게 나타나며 부하설비의 고조파 전류와 합쳐져 최대 8.92%로 나타난다. 따라서 태양광발전설비의 계통연계가 차수별 고조파 전류 함유율(%)의 증가에 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

3.12 고조파 DC 전류

고조파 DC전류의 경우 발전설비 측에서 발전설비가 가동 중일 때와 정지 상태일 때의 DC전류는 최대 2.459[A], 계통 측에서는 2.622[A]로 나타났다. 분산전원의 계통연계 기술기준에 따르면 본 연구에서 시험 대상으로 한 태양광 발전설비의 경우 전력계통 연계 지점에서 발전설비의 정격 최대전류(76[A])의 0.5%인 0.38[A] 이상의 직류 전류를 전력계통으로 유입하여서는 안 된다[10]. 따라서 상기 결과는 기준을 초과하고 있지만 태양광 발전을 전력계통과 분리할 때도 부하설비의 영향으로 DC전류가 최대 3.093[A]가 발생되는 것으로 보아 태양광 발전설비의 계통연계에 따른 영향은 없는 것으로 보인다.

3.13 플리커 : P_{st} (Short Term Flicker)

Short Term Flicker Indicator P_{st} 는 그림 4에서 보는 바와 같이 발전설비 측에서는 태양광 발전설비가 가동 중일 때와 정지 상태일 때 0.492~1.039[p.u.]로 측정(Point 3)되었으며 이는 분산전원의 계통연계 기술기준인 $Epsti \leq 0.35$ [p.u.](단시간 : 10분)를 초과하고 있다[10]. 전력계통 측에서는 발전설비가 정지 상태일 때 최대 1.124[p.u.](Point 4)로 측정되었고 이는 IEC

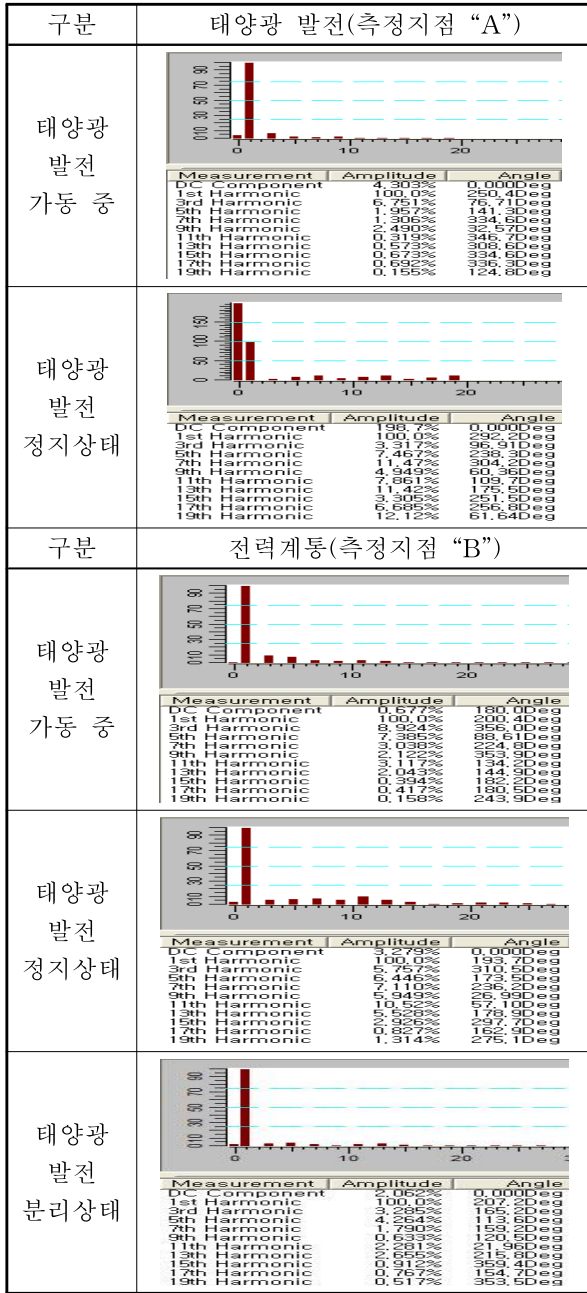


그림 3. 고조파 전류 치수별(%)
Fig. 3. High harmonics current in orders(%)

규정에 의한 허용한계 1.0[p.u.]를 초과한 수치이며 발전설비를 분리할 때 보다 0.213[p.u.]정도 높게 나타났다. 따라서 태양광 발전설비의 계통연계는 전원품질요소 중 P_{st} 에 악영향을 주는 것으로 생각된다.

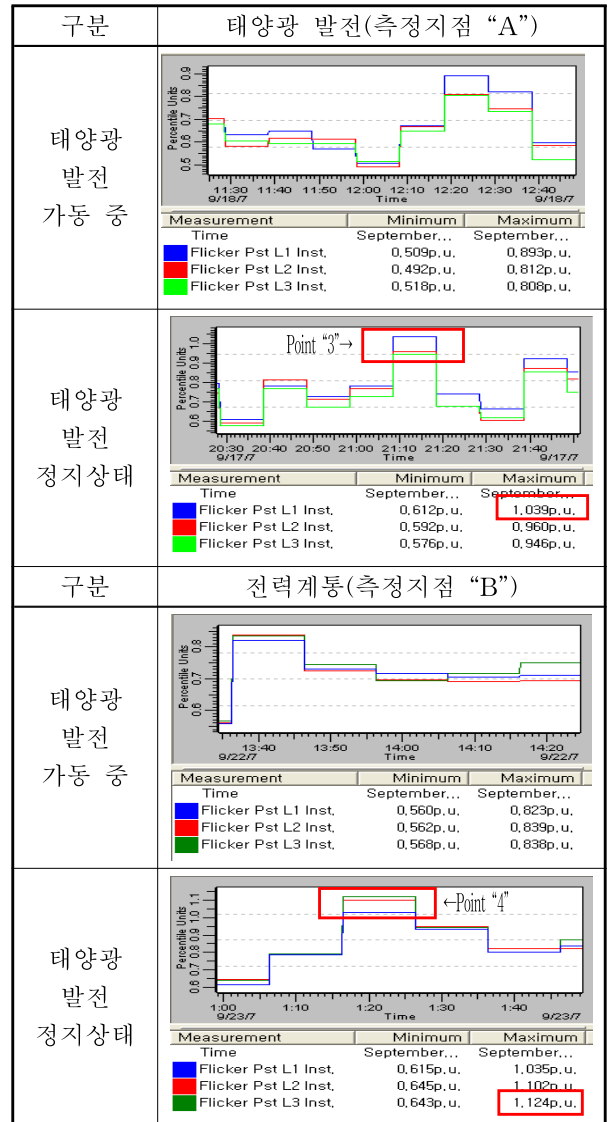


그림 4. 플리커 P_{st} (Short Term Flicker I)
Fig. 4. Flicker P_{st} (Short Term Flicker I)

4. 결론

본 논문에서는 점차 보급이 확대되고 있는 연계형 분산 전원 중에서 현재 배전계통에 연계되어 상업 운전 중인 태양광 발전설비가 가동 중일 때와 정지 상태일 때 그리고 전력계통에서 분리되었을 때로 구분하여 전원품질요소를 측정하고 각 상태별로 전원품질요소를 비교·분석하였다.

태양광 발전설비는 배전계통과 분리되었을 때 보다

배전계통과 연계되어 가동 또는 정지 상태일 때 전류 파형 과고율은 0.033[%] 상승하였고, 주파수는 60 ± 0.2 [Hz]의 오차범위를 초과하였으며, Short Term Flicker Indicator P_{st} 는 0.213[p.u.]가 상승하여 전력계통의 전원품질에 영향을 미치고 있는 것으로 나타났다. 차수별 고조파 전류 함유율(%)은 전력계통과 연계되어 가동 중일 때와 정지 상태일 때 11차 미만에서 최대 11.42[%], 11~17차에서 최대 7.861[%]로 측정되어 분산전원의 계통연계 기술기준인 11차 미만에서 4[%], 11~17차 미만에서 2[%] 보다 많은 고조파 전류를 전력계통으로 유출함을 확인하였다. 또한 발전설비가 정지상태일 때 부하설비로 작용하면서 태양광 발전설비 측에서는 고조파전류 THD[%]가 47.42[%]로 국내 전력회사 고조파전류 THD [%] 기준 5[%]를 초과하였다.

결론적으로 연계형 분산전원인 태양광 발전설비는 전력계통과 연계될 경우 전압변동, 고조파전류 THD [%], 고조파전류 차수별 [%], 주파수 변동, 플리커 등이 증가하여 전력계통에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 향후 태양광 발전설비에 못지않게 보급이 확대되고 있는 풍력발전설비가 전력계통의 전원 품질에 미치는 영향에 대한 측정 및 분석을 시행할 예정이며 이를 바탕으로 연계형 분산전원의 대규모 보급시 전원품질 저하 문제 해결을 위한 토대마련에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

이 논문은 위덕대학교 교원연구년 지원에 의한 논문임.

References

[1] The Technical Guideline for the Grid Connection of the Substitution Energy Generation System. Ministry of Commerce, Industry and Energy, Final Report, 2004. 6.
 [2] The Newest Distribution System Engineering, KIEE, Bookshill, 2006.
 [3] "IElectromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-15: Testing and measurement techniques - Flickermeter - Functional and design specifications", IEC 61000-4-15 Ed. 2.0 b:2010.

[4] Business 0100 The Basic Rules and Rates for Electric Service, KEPCO, 2007. 7.
 [5] Business 0900 The Regulation for the Use of the Distribution Electric Power Facility. KEPCO. 2006. 9.
 [6] The Electric Power System Reliability and Electricity Quality Maintenance Criteria. Notification of Ministry of Commerce, Industry and Energy volume 2005-11, 2005. 1.
 [7] "IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications", IEEE Std 446-1995.
 [8] "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power System", IEEE Std 519-1992.
 [9] Business 0110 The Basic Rules and Rates for Electric Service, The Detailed Enforcement, 2007. 8.
 [10] The Technological Standard for the Connection in the Distribution Power System of the Distributed Energy Resource, KEPCO, 2007, 4.

◇ 저자소개 ◇



권동철 (權東哲)

1970년 10월 10일생. 1991년 대구공업대학 전기과 졸업. 1993~1994년 동해철강(주) 전기과 사원. 1994~1996년 동방산업(주) 전기안전관리자. 2006년 위덕대학교 전기공학과 졸업. 2008년 위덕대학교 일반대학원 정보전자공학과 졸업(석사). 1996년 ~현재 한국전기 안전공사 경북동부지사 검사기술부 검사대리.



박중신 (朴重信)

1956년 3월 3일생. 1980년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1982년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1979~1990년 한국전력공사 북부지점. 1990~1992년 한국전력 전력연구원 선임연구원. 1992~2002년 한국전력공사 중앙교육원 배전교육팀 교수. 2002~2005년 동해대학교 전기공학과 조교수. 2005년~현재 위덕대학교 에너지전기공학부 조교수.



이동영 (李東映)

1962년 7월 19일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1985~1986년 삼성반도체(주) 사원. 1990년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995~1996년 기초전력공학공동연구소 선임연구원. 1996~1997년 한전 전력연구원 선임연구원. 1997년~현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수.