

## U50 풍력발전기에 대한 전력품질 실증연구

박 희철<sup>1)</sup>, 심 필섭<sup>2)</sup>, 이 병철<sup>3)</sup>, 정 태홍<sup>4)</sup>, 류 지윤<sup>5)</sup>

### Study of Power Quality Measurement for U50 Windturbine

Heechul Park, PillSub Shim, Byungchul Lee, Taehong Jeong, Jijune Ryu

**Key words** : Power quality(전력품질), Maximum Power(최대전력), Reactive Power(무효전력), Voltage fluctuation(전압변동), Harmonic(고조파)

**Abstract** : 국내 업체인 유니슨에서는 750kW Gearless형 풍력발전기, U50을 개발하였다. 개발된 풍력발전기는 대관령 풍력실증연구단지에서 설치되었다. 풍력시스템의 전력품질 측정 및 평가는 계통에 대한 영향을 조사하는데 있어서 중요한 요소이다.

이 논문에서는 전력품질에 대한 국제기준인 IEC61400-21을 적용하여 U50 풍력발전기의 전력품질에 대한 데이터 수집 및 수집된 데이터를 통해 U50 풍력발전기가 계통에 미치는 전력품질의 영향을 검토하였다.

#### Nomenclature

$V_n$  : rated voltage, V  
 $I_n$  : rated current, A  
 $f_n$  : rated frequency, Hz  
 $P_{mc}$  : maximum permitted power, kW  
 $P_{0.2}$  : maximum measured power(0.2s), kW  
 $P_{60}$  : maximum measured power(60s), kW

#### subscrip

PQ : power quality  
 VTHD : voltage total harmonic distortion  
 ITHD : current total harmonic distortion  
 $C(\psi_k)$  : flicker coefficient for continuous operation  
 $P_{st}$  : short-term flicker

#### 1. 서론

최근 지구환경 문제와 고유가에 대한 불안심리가 가중되면서 신재생에너지에 대한 관심이 증가하고 있다. 이에 유니슨은 지난 2001년 12월부터 3년간 750kW Gearless형 풍력발전시스템, U50 풍력발전기를 개발하였고 강원도 대관령 풍력실증연구단지에 설치하였다. 본 논문에서는 국산개발 풍력발전기에 대하여 국제기준을 적용한 전력품질 측정결과를 소개하고자 한다.

Table 1 Technical specifications

General type	horizontal axis, upwind	
Rated power	750kW	
Design class	IEC type class IA	
Hub height	50m	
Speed	Cut-in	3m/s
	Rated	12m/s
	Cut-out	25m/s
Generator	permanent magnet, synchronous	
Power converter	AC/DC/AC, 690V, 60Hz	
Pitch system	Independent blade pitch	
Controller	PLC, SCADA of web based	
Yaw system	active, 3 x asynchronous motor	

#### 2. 측정환경

U50 풍력발전기의 전력품질에 대한 성능평가는 IEC61400-21에 근거하여 12주간 측정 및 평가를 수행하였다.

- 1) 유니슨 주식회사 풍력기술연구소  
E-mail : hchpark@unison.co.kr  
Tel : (041)620-3415 Fax : (041)552-7416
- 2) 유니슨 주식회사 풍력기술연구소  
E-mail : sepsam@unison.co.kr  
Tel : (041)620-3428 Fax : (041)552-7416
- 3) 유니슨 주식회사 풍력기술연구소  
E-mail : lbc@unison.co.kr  
Tel : (041)620-3425 Fax : (041)552-7416
- 4) 유니슨 주식회사 풍력기술연구소  
E-mail : thjung@unison.co.kr  
Tel : (041)620-3418 Fax : (041)552-7416
- 5) 유니슨 주식회사 풍력기술연구소  
E-mail : jyryu@unison.co.kr  
Tel : (041)620-3410 Fax : (041)552-7416

## 2.1 시험조건

전력품질을 측정하기 위한 IEC61400-21의 시험조건은 다음과 같이 구성된다.

- 총 전압고조파 : 5% 미만(10분 평균)
- 계통 주파수 : 공칭 주파수의  $\pm 1$  [%](0.2초 평균)
- 순간 계통주파수 변동률 : 0.2 [%]미만
- 전압변동률 : 공칭전압의  $\pm 5$  [%](10분 평균데이터)
- 전압불평형 계수 : 2[%]미만(10분 평균데이터)
- 난류강도 : 8~16[%]사이(10분주기)

연계될 계통연계지점의 피상단락전력은 최소한 풍력발전기의 최대허용 피상전력에 50배여야 한다. 단, 계통의 피상단락전력은 계산에 의해 결정되거나 계통운영자와의 협의에 의해 결정될 수 있다.

## 2.2 시스템 구축

전력품질 데이터를 측정하기 위한 측정 장비는 독일에서 제작된 DEWE-3010이다.

Table 2 Measurement system

System	7channels, OS : Window 2000
A/D converter	DEWE-ORION-1624, 24bit, fmax = 2.8MHz
Filter	Eligible 20, 200, 2000, 10,000 and 20,000Hz
Isolating amplifier	Isolating amplifier error - current : 0.5% of the maximum input level - voltage : 0.1% of the maximum input level
Software	- measurement data acquisition : DEWESoft and WINDTEST Data acquisition IEC/MEASNET - Computation and analysis : WINDTEST Analysis software IEC and FAMOS

U50풍력발전기의 전력품질 측정에 사용되는 전류변환기의 정밀도는 class 1.0이고, 전압은 직접 연결되어 있다. 이는 IEC61400-21에 명시되어 있는 전류변환기 및 전압변환기의 정밀도 class 1.0에 적합함을 보여준다.

측정장비의 설치는 fig.1과 같이 U50풍력발전기의 690V 출력단에 설치되었다.

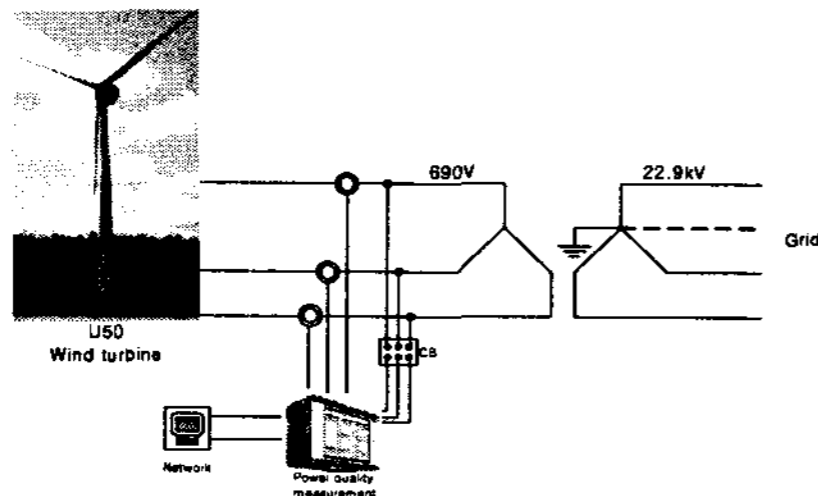


Fig. 1 Configuration of PQ measurement system

## 3. 전력품질 측정 및 검토

전력품질에 대한 성능평가 측정항목은 시험조건을 검증하기 위한 데이터를 기반으로 최대전력, 무효전력, 전압변동(또는 플리커) 및 고조파로 구분할 수 있다.

### 3.1 시험조건 검증

측정기간 동안 측정된 측정값에 대해 IEC61400-21에 명시되어 있는 시험조건과 비교·검토하였다.

Table 3 Comparison of test condition for measured value

항목	IEC	측정
총 전압고조파[%] (Voltage total harmonic distortion)	5%미만	1.3% 미만
난류강도[%] (Turbulence intensity)	8 ~ 16	6 ~ 16
전압변동[V] (Voltage fluctuation)	Vn $\pm$ 5% [380 ~ 420]	392 ~ 408
전압 불평형계수[%] (Voltage unbalance factor)	2%미만	0.08 ~ 0.54
계통 주파수[Hz] (Grid frequency)	f $\pm$ 1%이내 [59.4~60.6]	59.84 ~ 60.16
계통주파수 변동[%] (Grid frequency fluctuation)	0.2 %미만	0.2%미만

IEC61400-21에 근거한 전력품질 측정장비를 통해 측정된 전압고조파, 난류강도, 전압변동, 전압불평형계수, 계통주파수 및 계통주파수변동의 데이터는 IEC61400-21의 시험조건 기준에 만족하는 것으로 나타났다. 또한 측정항목별 측정된 데이터의 양은 IEC61400-21에서 요구하는 데이터 요구량에 만족함을 보여준다.

Table 4 Number of measured values

측정 항목	IEC 요구량	수집량
최대전력	시동풍속에서 15m/s까지	각 빈별로 5개 이상 측정
무효전력	각 풍속빈별 5개이상 수집	측정된 총 데이터 수 407개
전압변동 (연속운전)	시동풍속에서 15m/s까지 각 풍속빈별 5개이상 수집	각 빈별로 5개 이상 측정 측정된 총 데이터 수 407개
전압변동 (스위칭운전)	이벤트 시험별 5회 이상 측정	시동풍속에서 5회 정격풍속에서 5회
고조파	계통에 대한 기본주파수를 기준으로 50차수까지 정의	측정된 총 데이터 수 454개 각 차수별 고조파 50차수까지 정의

### 3.2 최대전력

최대전력은 최대허용전력과 측정된 최대전력으로 구분한다. 최대허용전력은 풍력발전시스템에서 제어할 수 있는 최대 허용된 10분평균 전력으로써 제작사의 정보를 근거로 판단한다. 그리고 측정된 최대전력은 순시 측정값을 통해 0.2초 및 60초 평균값으로 나타낸다.

U50풍력발전기의 최대허용전력(P<sub>mc</sub>)은 770[kW]이고, 측정주기별 측정된 최대전력은 다음과 같이 측정되었다.

Table 5 Maximum measured power

측정주기	최대전력[kW]	최대전력/정격전력[%]
0.2초	805.3	1.07
60초	776.1	1.03
600초	768.1	1.02

### 3.3 무효전력

무효전력은 정격전력에 대한 단계별(즉, 0, 10, ...90, 100[%]) 10분 평균무효전력 및 P<sub>mc</sub>, P<sub>0.2</sub>, P<sub>60</sub>에 대한 평균무효전력으로 구분한다.

단계별 10분 평균무효전력 및 P<sub>mc</sub>, P<sub>0.2</sub>, P<sub>60</sub>에 대한 평균무효전력은 다음과 같이 측정되었다.

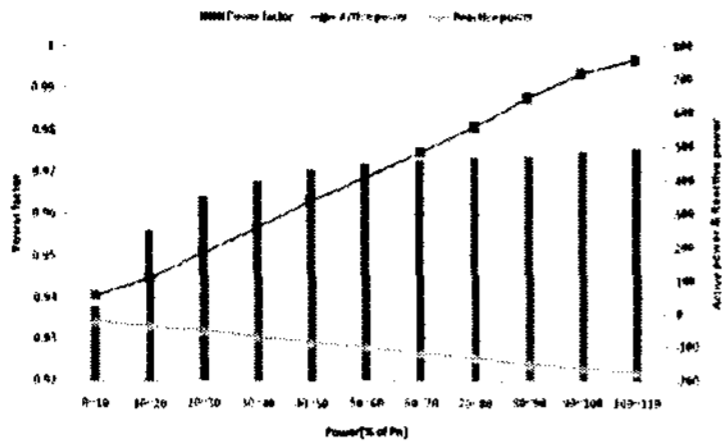


Fig. 2 Reactive power for the different power classes

Table 6 Reactive power at different maximum power peaks

Reactive power at $P_{mc}$	-173
Reactive power at $P_{60}$	-168.5
Reactive power at $P_{0.2}$	-174.4

U50풍력발전기는 역률을 1로 제어한다. 하지만 Fig. 2에 나타나있는 것과 같이 U50풍력발전기에서 측정된 역률은 출력의 변화에 따라 0.94에서 0.98 까지 비례하여 나타났다. 이것은 full-scale 전력 변환장치를 사용하는 U50풍력발전기의 출력 역률은 1이지만 소내부하 및 성능평가를 위한 여러 계측기들이 발생하는 무효성분에 의해 조금 낮게 나타난 것이다. 그러나 한국전력공사에서 제시한 '분산형 전원 배전계통 연계 기술기준' 인 계통연계지점에서의 역률이 90[%]이상 유지되어야하는 것에 대해 U50풍력발전기는 변동되는 전체 출력범위에서도 역률이 매우 안정적임을 볼 수 있다.

### 3.4 전압변동

전압변동은 풍력발전기에 의한 전압변동만을 나타내는 것으로 실제 계통과 연계되어 있는 시스템의 경우, 발전기 자체의 영향뿐만 아니라 연계되어 있는 계통의 특성에 따라 변화 될 수 있다.

순수 풍력발전기만의 전압변동을 나타내기 위해 측정지점의 순시전압과 전류를 측정하여 fig. 4와 같이 모의된 가상계통에 적용한다. 그리고 가상계통의 측정지점에 대한 가상 순시전압 변동값을 계산한다.

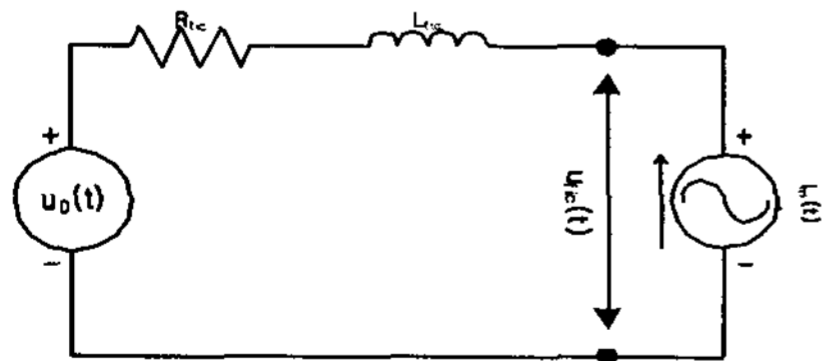


Fig. 3 Fictitious grid for simulation

계산된 가상 순시전압 변동값을 IEC61000-4-15의 플리커메타 알고리즘에 적용하여 단기플리커 방출값을 발생시킨다.

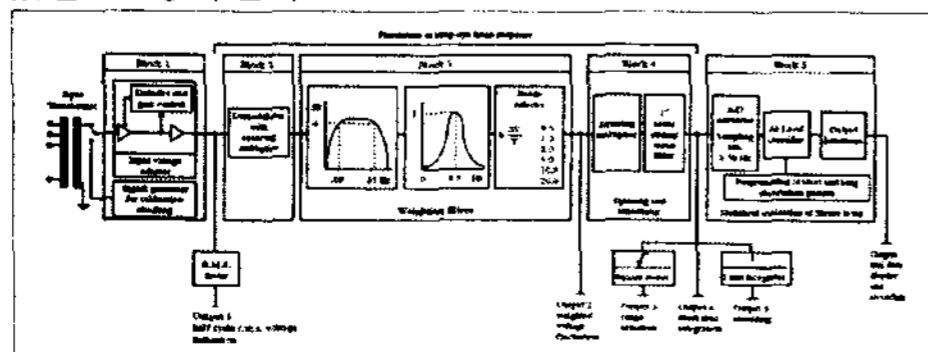


Fig. 4 Functional diagram of IEC flickermeter

발생된 단기플리커 방출값을 통해 각각의 전압변동 알고리즘을 구분 적용하여 풍속과 가상계통의 임피던스에 대한 플리커계수, 플리커 스텝계수 및 전압변동에 대한 값을 도출한다.

#### 3.4.1 연속운전에서의 전압변동

연속운전에서의 전압변동은 시동 및 정지조건을 제외한 발전기의 운전동안에 발생하는 전압변동을 말한다.

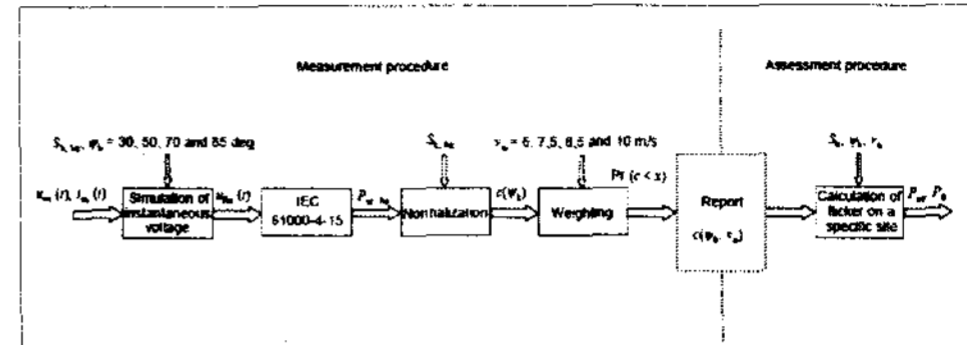
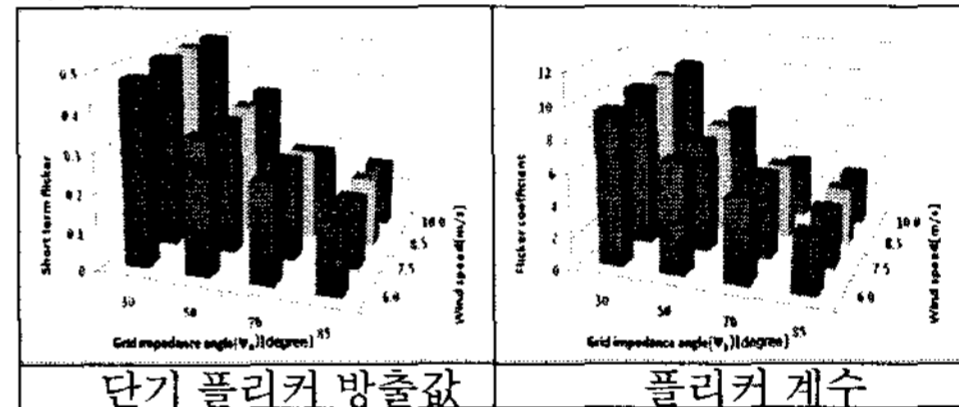


Fig. 5 Measurement and assessment procedures for flicker during continuous operation of the wind turbine

측정 및 계산된 단기 플리커 방출값 및 플리커 계수에 대한 결과값은 다음과 같다.



연속운전에서의 단기 플리커 방출값 및 플리커계수의 결과는 가상계통 임피던스에 영향 받는 것을 알 수 있다.

#### 3.4.2 스위칭운전에서의 전압변동

스위칭운전에서의 전압변동은 발전기 기동 시 발생할 수 있는 전압변동으로써 시동풍속과 정격풍속으로 구분할 수 있다.

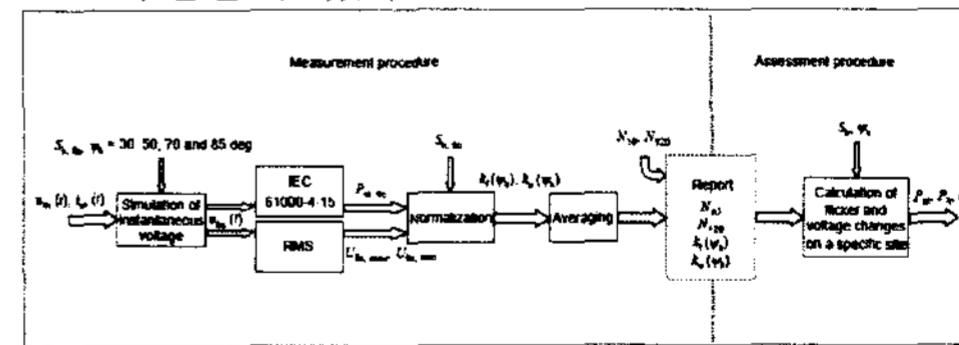
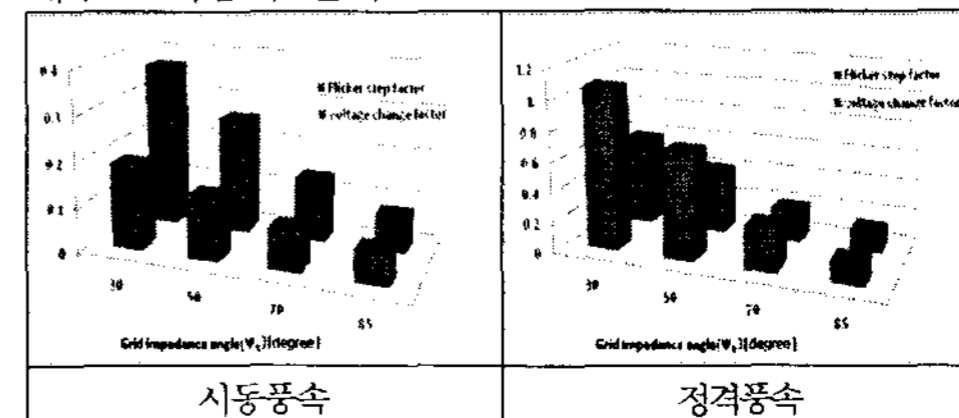


Fig. 6 Measurement and assessment procedures for voltage changes and flicker during switching operation of the wind turbine

시동풍속 및 정격풍속에 대한 스위칭운전에서의 전압변동 결과 값인 플리커 스텝계수 및 전압변동계수는 다음과 같다.



스위칭운전에서의 전압변동은 연속운전에서의 전압변동과 마찬가지로 가상계통 임피던스에 영향 받는 것을 알 수 있다.

### 3.5 고조파

고조파는 연속운전 동안 기본파의 전압, 전류를 왜곡시키는 정수배의 주파수로써 10분 평균데이터를 사용한다.

Table 7, 8은 각 차수별 최대 고조파 및 THD를 나타낸 것으로 각 차수별 최대 고조파는 측정기간 동안 발생된 고조파값을 정격에 대한 [%] 값으로 나타낸다. 그리고 측정된 최대 고조파의 발생시점인 유효 전력값에 대해서도 함께 나타낸다.

Table 7 Maimum voltage harmonics and VTHD

Order [h]	Active power [kW]	voltage [% of Ur]	Order [h]	Active power [kW]	voltage [% of Ur]
2	709.3	0.1	3	186.7	0.2
4	749.5	0.1	5	749.5	1.3
6	749.5	0.1	7	722.5	0.4
8	749.5	0.1	9	39.4	0.1
10	749.5	0	11	523.2	0.2
12	410.1	0	13	739.1	0.2
14	238.8	0	15	562.8	0.1
16	762.1	0	17	65.6	0
18	142.8	0	19	537.2	0
20	40.4	0	21	521.8	0
22	521.8	0	23	227.8	0
24	521.8	0	25	192.3	0.1
26	41.6	0	27	728.8	0
28	710.7	0	29	166.3	0
30	728.8	0	31	166.3	0.1
32	535.7	0	33	562.8	0
34	739.1	0	35	166.3	0.1
36	535.7	0	37	166.3	0.1
38	728.8	0	39	97.7	0
40	105.7	0	41	76.5	0
42	739.1	0	43	728.3	0
44	120.8	0	45	97.7	0
46	96.3	0	47	120.8	0
48	120.8	0	49	191.1	0
50	535.7	0			
Max THD			1.299		
Active Power at max THD[kW]			749.547		

Table 8 Maimum current harmonics and ITHD

Order [h]	Active power [kW]	current [% of In]	Order [h]	Active power [kW]	current [% of In]
2	709.3	0.8	3	757.2	0.7
4	749.5	0.1	5	714.2	1.1
6	456.1	0	7	765.7	0.4
8	766.3	0	9	724.6	0
10	749.5	0	11	707.2	0
12	483.7	0	13	59.4	0
14	739.1	0	15	562.8	0
16	630.9	0	17	758.4	0
18	683.6	0	19	619.5	0
20	739.1	0	21	707.2	0
22	534.4	0	23	456.1	0
24	739.1	0	25	456.1	0
26	728.8	0	27	456.1	0
28	728.8	0	29	728.8	0
30	728.8	0	31	166.3	0
32	535.7	0	33	166.3	0
34	728.8	0	35	166.3	0
36	535.7	0	37	728.8	0
38	728.8	0	39	728.8	0
40	728.8	0	41	728.8	0
42	728.8	0	43	535.7	0
44	728.8	0	45	728.8	0
46	728.8	0	47	120.8	0
48	749.5	0	49	457.6	0
50	739.1	0			
Max THD			1.4		
Active Power at max THD[kW]			766.3		

측정된 각 차수별 전압고조파에서는 5차 고조파가 출력이 정격상태일 때 1.3[%]로 가장 많이 발생하였으며, 최대VTHD도 측정기간 동안 출력이 정격상태에서 1.299[%]로 나타났다. 이것은 IEEE에서

제시된 각 차수별 전압왜형률인 3[%] 및 VTHD 5[%]에 대해서 매우 안정적인 것을 확인할 수 있다.

Table 9 Comparison of voltage harmonic distortion

	각 차수별 전압 왜형률[%]	전압THD[%]
IEEE	3.0	5.0
측정값	1.3이하	1.3

측정된 각 차수별 전류고조파에서는 5차 고조파가 출력이 714.2[kW]일 때 1.3[%]로 가장 많이 발생하였으며, 최대ITHD도 측정기간 동안 출력이 정격상태에서 1.4[%]로 나타났다. 이것은 IEEE 및 한국전력공사에서 제시된 각 차수별 전류왜형률 및 TDD 5[%]에 대해서 매우 안정적인 것을 확인할 수 있다.

Table 10 Comparison of current harmonic distortion

	h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
IEEE	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
KEPCO	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
측정값	1.1이하	0	0	0	0	1.4

## 4. 결론

본 연구에서는 U50 풍력발전기에 대한 전력품질을 국제기준인 IEC61400-21에 따른 측정 및 평가를 수행하였고, 수행한 결과는 매우 양호하게 나타났으며, 성능이 우수함을 확인할 수 있었다.

고조파의 경우 모든 차수에 대해 한국전력공사 및 IEEE std.1159-1995에 명시되어 있는 기준보다 적게 나타났고, 난류강도, 역률, 전압불평형률, 전압변동, 주파수등에 대해서도 매우 안정적인 양질의 출력을 나타남을 볼 수 있었다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부의 시행한 에너지자원 기술개발사업(과제명:750kW Gearless형 국산화 풍력발전시스템 실증연구)의 일환으로 수행되었으며, 에너지관리공단의 지원에 감사드립니다.

## References

- [1] IEC61400-21, Wind turbine generator system - Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines.
- [2] IEEE Standard 1159-1995, Recommended Practice on Monitoring Electric Power.
- [3] "풍력발전 계통연계 기술지침 및 연계선로 운영기준 제정에 관한 연구" 중간보고서, 산업자원부, 2003.
- [4] "Power quality measurements on a wind turbine of the type U50 according to the 'IEC 61400-21 First Edition', WINDTEST, 2007.