

U57 풍력발전기 전력품질 실증연구

이 병철¹⁾, 박 희철²⁾, 황 진수³⁾, 류 지윤⁴⁾

Study of Power Quality Measurement U57 Windturbine

Byungchul Lee, Heechul Park, Jinsu Hwang, Jijune Ryu

Key words : Power quality(전력품질), Maximum Power(최대전력), Reactive Power(무효전력), Voltage fluctuation(전압변동), Harmonic(고조파), Power factor(역율), 풍력발전기(wind turbine generator)

Abstract : The exploitation of the wind energy resource is a rapidly growing area world-wide. The number of installed units is continuously increasing, and it is important to respect and to deal with the impact of wind turbine. This paper addresses the power quality characteristics of U57 Wind Turbine. 750kW gearless type wind turbine for low wind speed, named U57, is developed by UNISON. The power quality measurement system consists of measuring WTG output current, line-to line voltage and wind speed signal. With using measured data, power quality measurement is evaluated about maximum power, reactive power, voltage fluctuation, harmonics according to IEC 61400-21.

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
 P_n : rated power of wind turbine

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. 서 론

풍력발전시스템은 바람의 상태에 따라 출력이 변동 되기 때문에 전력품질에 많은 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 IEC, IEEE 등에서는 전력품질에 대한 기준을 정하였다. 풍력발전기 제작사는 이러한 기준을 만족할 수 있게 발전기 출력을 제어하고 전력품질에 대한 성능 평가를 해야 한다. 본 논문에서는 저풍속형으로 개발

된 U57 풍력발전기 시스템의 전력품질 특성에 대해 IEC에서 제시하고 있는 측정방법을 소개하고, 측정된 U57 풍력발전기의 전력품질 성능을 소개하고자 한다.

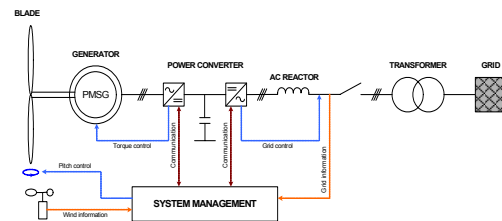


Fig. 1 U57 system configuration

- 1) 유니슨 주식회사 풍력연구소
E-mail : lbc@unison.co.kr
Tel : (042)360-1133 Fax : (042)360-1119
- 2) 유니슨 주식회사 풍력연구소
E-mail : hchpark@unison.co.kr
Tel : (042)360-1134 Fax : (042)360-1119
- 3) 유니슨 주식회사 풍력연구소
E-mail : jshwang@unison.co.kr
Tel : (042)360-1131 Fax : (042)360-1119
- 5) 유니슨 주식회사 풍력연구소
E-mail : jyryu@unison.co.kr
Tel : (042)360-1110 Fax : (042)360-1119

Table 1 U57 WTG specification

General type	horizontal axis, upwind	
Rated power	750kW	
Design class	IEC type class IIIA	
Rotor diameter	57m	
Speed	Cut-in	3m/s
	Rated	11m/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. 전력품질 계측 및 기준

U57 풍력발전기의 전력품질에 대한 성능평가는 IEC 61400-21에 근거하여 4주간 측정된 데이터를 기반으로 전력품질 평가를 수행하였다.

2.1 전력품질 기준

전력품질을 측정하기 위한 시험조건은 IEC61400-21에서 명시한 조건을 만족해야 한다. ⁽¹⁾Table 2는 측정기간 동안 측정된 측정값에 대해 IEC61400-21에 명시되어 있는 시험조건과 비교한 결과이다.

Table 2 Comparison of test condition for measured value

항목	IEC	측정
총 전압고조파[%] (Voltage total harmonic distortion)	5%미만	1.5% 미만
난류강도[%] (Turbulence intensity)	8 ~ 16	6 ~ 16
전압변동[V] (Voltage fluctuation)	Vn ±5% [380 ~ 420]	392 ~ 408
전압 불평형계수[%] (Voltage unbalance factor)	2%미만	0.08 ~ 0.54
계통 주파수[Hz] (Grid frequency)	fn ±0.1% 이내 [59.4~60.6]	59.84 ~ 60.16
계통주파수 변동[%] (Grid frequency fluctuation)	0.2 %미만	0.2%미만

본 전력품질 평가는 4주간 측정된 데이터로 IEC61400-21에서 규정한 시험조건 범위내에 고조파, 난류강도, 전압변동, 전압불평형 계수, 계통주파수 및 변동 조건에 만족함을 볼 수 있다.

2.2 계측 시스템

전력품질 계측 시스템은 데이터를 수집하는 장치와 신호 계측을 위한 test equipment로 구성된다. IEC 61400-21에서는 측정장비의 정밀도는 class 1.0 미만을 요구하고 있으며, 풍속계는 ±0.5m/s의 정밀도를 요구하고 있다. 본 전력품질 평가에 사용된 계측 시스템은 IEC 요구사항에 부합되도록 설치되었다. Table 3은 데이터 수집 장비에 대해 나타낸 것이며 Table 4는 계측장비 항목 및 사양을 나타낸 것이다.

Table 3 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

Table 4 Test equipment

Measured signal	Description of transducer	Measurement accuracy	Scale factor
3 phase current	Rogowski current probes	class 1	1000A/2V
3 phase-to-phase voltage 690V	-	-	1V/ 1V
wind speed	nacelle anemometer	±0.5m/s	0V ~ 10V (0 ~ 40m/s)

2.3 계측 시스템 구성

계측시스템의 구성은 Fig.2와 같이 풍력발전기의 출력단에 전류, 전압변환기를 설치하여 전류, 전압 및 풍속 데이터를 수집한다. 계측된 데이터는 필터와 A/D 컨버터를 거쳐 데이터 수집장치에서 데이터를 저장하며 데이터를 분석하기 위해 IEC 61400-21 기준을 적용한 별도의 소프트웨어를 사용하여 전압변동, 고조파, 최대출력 등 풍력발전기의 전력품질을 분석한다.

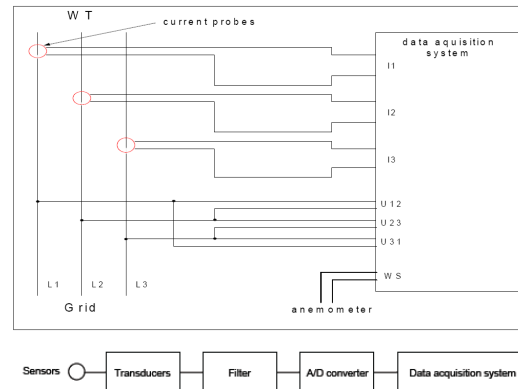


Fig. 2 Configuration of PQ measurement system

3. 전력품질 분석

전력품질에 대한 분석은 IEC 61400-21의 측정 항목에 대한 시험조건을 검증하기 위한 데이터를 기반으로 최대전력, 무효전력, 전압변동(또는 플리커) 및 고조파로 구분한다. 전력품질 분석은 IEC 61400-21에서 명시한 데이터 양을 만족해야 한다. Table 4는 측정항목별 측정된 데이터의 양에 대해 IEC61400-21에서 요구하는 데이터량과 측정기간동안 수집한 데이터량을 나타낸다. Table 5에서는 측정된 데이터량이 IEC61400-21의 요구사항을 만족하는 것을 확인할 수 있다.

Table 5 Number of measured data

측정 항목	IEC 요구량	수집 데이터량
최대전력 무효전력	시동풍속에서 15m/s까지 각 풍속별 5개이상 수집	측정된 총 데이터 수 526개
전압변동 (연속운전)	시동풍속에서 15m/s까지 각 풍속별 5개이상 수집	측정된 총 데이터 수 597개
고조파	계통에 대한 기본주파수를 기준으로 50차수까지 정의	측정된 총 데이터 수 730개

3.2 전압변동

3.2.1 측정 방법

전압변동은 풍력발전기에 의한 전압변동만을 고려한다. 그러나 실제 풍력발전기는 계통에 연계되어 있어 풍력발전기에 의한 영향뿐만 아니라 계통에 의해 영향을 받는다. 순수 풍력발전기에 의한 전압변동을 분석하기 위해서는 측정지점의 순시전압과 전류를 측정하여야 하며, 모의 가상계통에 측정값을 적용하여 측정지점에 대해 가상 순시전압 변동을 계산하여야 한다. 그림 3은 모의 가상계통회로를 나타낸다.

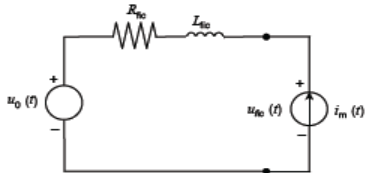


Fig. 3 Fictitious grid for simulation

가상계통은 순시값 $u_0(t)$ 를 갖는 전압원(상전압)과 저항 R_{fic} 에 인덕턴스 L_{fic} 이 직렬로 연결된 네트워크 임피던스로 나타낸다. 풍력발전기 전류원 $i_m(t)$ 는 전류의 순시측정값이다. 이 가상계통은 순시값 $u_{fic}(t)$ 를 갖는 모의전압을 가지며, 그 값은 다음과 같다.

$$u_{fic}(t) = u_0(t) + R_{fic} \cdot i_m(t) + L_{fic} \cdot \frac{di_m(t)}{dt} \quad (1)$$

식(1)에서의 전압원 $u_0(t)$ 는 측정된 전압의 기본위상각과 같은 전기각 $\alpha_m(t)$ 를 가져야 한다. 따라서 $u_0(t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$u_0(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_n \cdot \sin(\alpha_m(t)) \quad (2)$$

여기서 U_n 는 계통 공칭전압이 실효치이다. 측정된 전압의 전기각은

$$\alpha_m(t) = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^t f(t)dt + \alpha_0 \quad (3)$$

$f(t)$ 는 주파수

t 는 시간

α_0 는 $t=0$ 에서의 위상각

R_{fic} , L_{fic} 적절한 네트워크 임피던스 위상각을 얻을 수 있도록 선택한다.

$$\tan(\psi_k) = \frac{2\pi \cdot f_g \cdot L_{fic}}{R_{fic}} = \frac{X_{fic}}{R_{fic}} \quad (4)$$

그러므로 가상계통의 피상전력은

$$S_{k,fic} = \frac{U_n^2}{\sqrt{R_{fic}^2 + L_{fic}^2}} \quad (5)$$

$S_{k,fic}$ 와 S_n 사이의 적절한 비율을 사용하여 적용된 플리커 알고리즘 또는 기기가 IEC 61400-15에 요구되는 측정범위 내에 포함되는 P_{st} 를 찾아야 한다. 계산된 가상 순시전압 변동값으로 IEC61000-4-15의 플리커메타 알고리즘에 적용하여단기플리커 방출값을 계산한다.

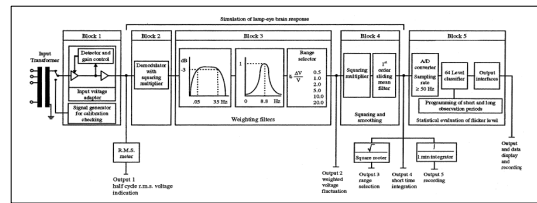
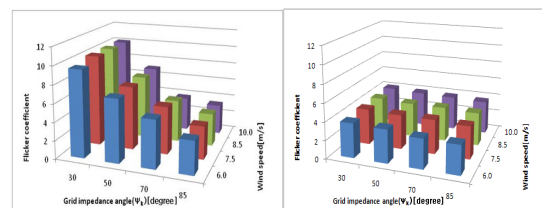


Fig. 4 Functional diagram of IEC flickermeter

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

3.2.2 측정 결과 비교

연속운전에서의 풍력발전기 전압변동의 플리커계수 $c(\psi_k, v_a)$ 는 연평균 풍속과 네트워크 임피던스 위상각에 의해 정의되며 10분 평균풍속을 사용할 경우 레일리 분포로 평가되어야 한다. 그림 5는 U50 풍력발전기와 U57 풍력발전기의 플리커계수의 측정결과를 비교한 것이다.



(a)U50 플리커 계수

(b)U57 플리커 계수

Fig. 5 Measured flicker coefficient compare U50 with U57((a)U50 WTG (b)U57 WTG)

3.3 최대전력

최대전력은 최대허용전력과 측정된 최대전력으로 구분한다. 최대허용전력은 풍력발전시스템에서 제어할 수 있는 최대로 허용된 10분평균 전력으로써 시스템 사양에 따라 결정된다. 그리고 측정된 최대전력은 순시 측정값을 통해 0.2초 및 60초 평균값으로 나타낸다.

시스템의 최대허용전력(P_{mc})은 770[kW]이고, 측정주기별 측정된 최대전력은 Table 6과 같다.

Table 6 Maximum measured active power

측정주기	최대전력[kW]	최대전력/정격전력[%]
0.2초	777.85	1.04
60초	767.67	1.02
600초	756.23	1.01
P_{mc}	770	1.03

3.4 무효전력

무효전력은 정격전력에 대한 단계별(즉, 0, 10, ...90, 100[%]) P_{mc} , $P_{0.2}$, P_{60} 에 대한 평균무효전력으로 구분한다.

Table 7은 단계별 P_{mc} , $P_{0.2}$, P_{60} 에 대한 평균무효전력을 나타낸다.

Table 7 Reactive power at different maximum power peaks

Reactive power at P_{mc}	-8.5
Reactive power at P_{60}	-3.5
Reactive power at $P_{0.2}$	-2.1

역률은 측정된 유효전력과 무효전력데이터로 계산하였다. 출력이 10[%]이하일 경우 역률이 0.996이고 10[%]이상은 역율 1로 계측 되었다. 성능평가에 사용된 풍력발전시스템은 역률제어를 하며 측정결과 출력성능이 우수함을 확인할 수 있다. Table 8은 측정된 데이터로부터 역률을 계산한 결과를 보여준다. Fig. 6은 출력별 역률제어 특성을 그래프로 나타낸 것이다.

Table 8 Power factor calculation of measured power

출력 (% of P_n)	데이터수	유효[kW]	무효[kW]	역률
0 ~ 10	158	38.3	-3.4	0.996
10 ~ 20	147	109.9	-3.3	1.000
20 ~ 30	84	182.8	-3.1	1.000
30 ~ 40	45	264.3	-2.2	1.000
40 ~ 50	32	332.5	-2.0	1.000
50 ~ 60	12	395.7	-2.5	1.000
60 ~ 70	18	490.7	-3.6	1.000
70 ~ 80	13	556.6	-3.6	1.000
80 ~ 90	18	636.3	-3.5	1.000
90 ~ 100	53	730.4	-5.7	1.000
100 ~ 110	17	753.2	-6.8	1.000

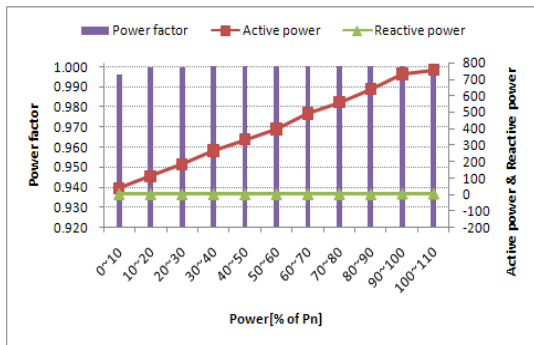


Fig. 6 Reactive power for the different power classes

3.5 고조파

본 논문의 풍력발전시스템은 계통연계인버터를 사용하였다. 인버터 구성은 전력전자 반도체 소자인 IGBT를 사용한 AC/DC/AC PWM 인버터를 사용함에 의해 발전기 출력 전압 및 전류에 고조파 성분이 나타난다. 이에 발전기 제작사는 고조파에 대한 성능을 설명해야 한다. 고조파에 대한 기준은 IEC, IEEE, 한국전력공사에서 정한 규정을 풍력발전기 시스템은 만족해야 한다.

3.5.1 고조파 기준

Table 9, 10에서는 IEEE 및 한국전력공사에서 정한 전압, 전류 고조파 기준을 나타낸다.

Table 9 Reference of voltage harmonic distortion

	각 차수별 전압 왜형률[%]	전압THD[%]
IEEE	3.0	5.0

Table 10 Reference of current harmonic distortion

	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	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

3.5.2 고조파 측정 결과

Fig 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 고조파 발생시점의 유효 전력값도 확인할 수 있다.

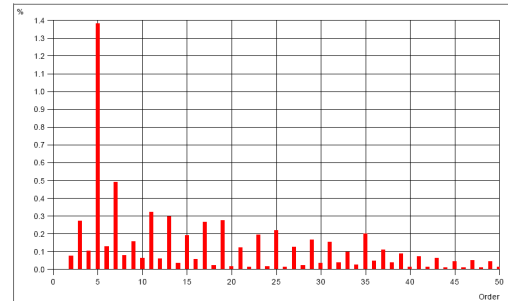


Fig. 7 Spectrum for the voltage harmonics

측정된 각 차수별 전압고조파에서는 3차 고조파가 1.5[%]로 가장 많이 발생하였으며, 최대VTHD도 측정기간 동안 1.507[%]로 나타났다. 이것은 IEEE에서 제시된 각 차수별 전압왜형률인 3[%] 및 VTHD 5[%]에 비해 고조파 특성이 우수함을 확인할 수 있다.

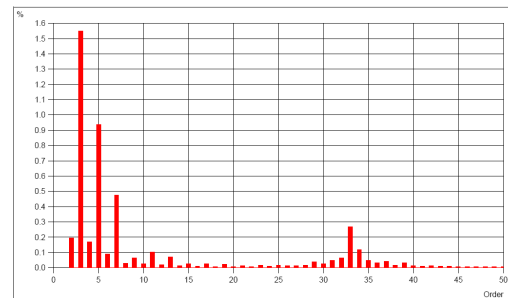


Fig. 8 Spectrum for the current harmonics

측정된 각 차수별 전류고조파에서는 3차 고조파가 출력이 739.9[kW]일 때 1.5[%]로 가장 많이 발생하였으며, 최대 ITHD도 출력이 739.922[kW]에서 1.759[%]로 나타났다. 이것은 IEEE 및 한국전력공사에서 제시된 각 차수별 전류왜형률 및 TDD 5[%]에 대해서 매우 안정적인 것을 확인할 수 있다.^{(2) (3)}

4. 결 론

본 실증연구에서는 U57 풍력발전기에 대한 전력품질 국제기준인 IEC61400-21에 따른 측정방안을 제시하였고 저풍속형으로 국산화 개발된 750kW 풍력발전기에 적용하여 전력품질에 대해 측정 및 평가를 수행하였다. 고조파의 경우 모든 차수에 대해 한국전력공사 및 IEEE std.1159-1995에 명시되어 있는 기준보다 적게 나타났다. 전압변동 및 역률의 경우 U50과 비교했을 경우 발전기 제어성능이 향상되었음을 알 수 있다. 또한 난류강도, 전압불평형률, 전압변동, 주파수등에 대해서도 매우 안정적인 출력제어성능이 나타남을 볼 수 있었다. 본 연구성과를 바탕으로 출력제어 성능을 향상시켜 양질의 전력품질을 공급할 수 있도록 지속적으로 연구할 예정이다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 시행한 에너지자원 기술개발사업(과제명: 저풍속형 고효율 풍력발전기 요소기술개발 및 현장실증)의 일환으로 수행되었습니다.

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.
- [5] Park, H. C., “U50 풍력발전기에 대한 전력품질 실증연구” 한국 신재생에너지학회 추계학술대회 논문집 pp. 345-348. 2007