

IEC 기준에 따른 풍력터빈 전기품질 측정절차 수립에 관한 연구

서정출, 윤기갑, 정원욱, 채우규, 김상준  
한국 전력연구원

Studying power quality measurement procedures of wind turbines according to IEC standard

Jung-Chul Seo, Gi-Gab Yoon, Won-Wok Jung, Woo-Kyu Chae, Sang-Joon Kim  
Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - The wind turbine system, one of the distributed resource, has a large effect on the distribution system. because windfarm is located in the end part of the distribution system, the hilly section and the shore, which is easy to obtain the wind energy, it is difficult to manage the voltage and the power quality. Therefore this paper deals with the measurement and assessment of power quality characteristic of wind turbines with IEC 61400-21.

1. 서 론

우리나라의 전력수요는 산업구조의 지속적 성장과 대형 냉장고, 에어컨 등의 냉방부하의 증가에 따라 매년 증가하고 있다. 이렇게 증가하는 전력 수요를 충족시키기 위하여 장기전원 개발계획 등에 따라 대규모 발전소의 건설과 송전선로의 확충·신설이 지속적으로 이루어지고 있다. 그러나 화석 연료와 같은 에너지 자원의 양이 한정적이며, 최근 범세계적인 주목을 받고 있는 환경문제 및 발전소, 송전선로 건설에 필요한 입지확보의 어려움 등으로 인하여 분산전원에 대한 관심이 고조되고 있다.

분산전원 중 풍력발전은 어느 곳에서나 산재되어 있는 무공해, 무환경의 바람을 이용하므로 환경에 미치는 영향이 거의 없고, 국토를 효율적으로 이용할 수 있으며, 대규모 발전단지의 경우에는 발전단지도 기존의 발전방식과 경쟁 가능한 수준의 분산전원이다. 또한, 풍력발전 단지의 면적 중에서 실제로 이용되는 면적은 풍력 발전기의 기초부, 도로, 계측 및 중앙제어실 등으로 전체 면적의 1%에 불과하며, 나머지 99%의 면적은 목축, 농업 등의 다른 용도로 이용할 수 있다. 일반적으로 발전방식에 따른 소요면적은 풍력 1,335 m<sup>2</sup>/GWh, 석탄 3,642 m<sup>2</sup>/GWh, 그리고 태양광발전 3,237 m<sup>2</sup>/GWh 로서 풍력발전이 가장 적은 면적을 필요로 한다.

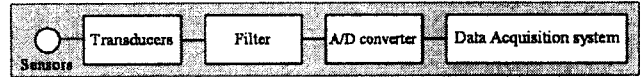
그러나 풍력발전은 어느 분산전원보다 계통연계시 선로에 미치는 영향이 큰 발전설비이다. 특히, 풍력발전 단지는 대부분 지리적 여건상 바람의 에너지를 얻기가 용이한 산간 고지대나 해안가 등에 위치하고 있어 계통연계 지점이 배전선로의 말단인 경우가 많아 전압관리 및 전기품질 관리 등에 많은 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 풍력터빈의 지속적인 발전과 운용을 보장하기 위해 IEC 61400-21 규정에 따른 풍력터빈 전기품질 측정절차 수립에 대한 연구를 수행하였다. 풍력터빈 전기품질 특성 파라미터로는 정격 데이터, 최대 허용출력, 최대 측정출력, 무효전력, 전압변동(연속운전, 스위칭 운전), 고조파가 있으며 본 논문에서는 연속운전에서의 전압변동을 다루고 있다.

2. 풍력터빈 전기품질 측정절차

2.1 측정조건

풍력터빈에 대한 측정이 이루어지기 전에, 풍력터빈이 계통에 연계되는 PCC(point of common coupling : 접속점)에서 아래의 측정조건(또는 시험조건)이 요구된다.

- 풍력터빈은 평가되는 최대 허용 피상전력에 상응하는 정격전력을 가진 표준 변압기를 통해 MV(중전압 : 1kV<U<sub>n</sub>≤15kV)-네트워크에 직접 연결한다.
- MV-네트워크의 연결점에서 단락 피상전력은 적어도 평가되는 풍력터빈의 최대 허용 피상전력의 50배이어야 한다. 네트워크 단락 피상전력은 계산에 의해 결정되거나 풍력터빈을 시험하기 전 계통 운영자와 협의에 의해 결정된다.
- 50차수까지의 모든 고조파를 포함한 전압의 총고조파 왜율은 풍력터빈이 발전하지 않는 동안 풍력터빈 출력단에서 10분 평균 데이터로서 5% 미만으로 측정되어야 한다. 전압 총고조파 왜율은 풍력터빈을 시험하기 전 측정에 의해 결정된다.
- 0.2초 평균 데이터로 측정되는 계통주파수는 공칭 주파수의 ±1% 이내이어야 하며, 0.2초의 평균 데이터로 측정되는 계통 주파수의 변화율은 0.2초당 공칭 주파수의 0.2% 미만이어야 한다. 보통 대규모 전력 계통과 연계되어 계통 주파수가 위의 요구사항 내에서 아주 안정되고 고품질인 경우 더 평가될 필요는 없다. 그렇지 않은 경우, 계통주파수는 시험시 측정되어야 하며, 측정 기간 동안 부적절한 계통 주파수로 샘플링된 시험 데이터는 제외되어야 한다.



〈그림 1〉 측정시스템

〈표 1〉 측정 장비에 요구되는 사양

장비	요구되는 정확도	준수규격
전압 변환기	등급 1.0	IEC 60186
전류 변환기	등급 1.0	IEC 60044-1
피상전력 변환기	등급 1.0	IEC 60688
유효전력 변환기	등급 1.0	IEC 60688
무효전력 변환기	등급 1.0	IEC 60688
풍속계	±0.5 m/s	-
필터+D/A 변환기+데이터 획득 시스템	100%의 1%	-

- 전압은 풍력터빈의 출력단에서 10분 평균 데이터로 측정되는 공칭 값의 ±5% 이내이어야 한다. 보통 풍력터빈이 대규모 계통에 연계되어 전압이 위의 요구사항 내에서 아주 안정되고 고품질인 경우 더 평가될 필요는 없다. 그렇지 않은 경우, 전압은 시험시 측정되어야 하며, 측정 기간 동안 부적절한 전압으로 샘플링된 시험 데이터는 제외되어야 한다.
- 전압 불평형 계수는 풍력 터빈의 출력 단에서 측정되는 10분 평균 데이터로 2% 미만이어야 한다. 전압 불평형 계수는 식(1)과 측정된 전압을 이용하여 결정한다. 전압 불평형 계수가 위의 요구사항을 충족한다면, 더 평가될 필요는 없다. 그렇지 않을 경우, 전압 불평형 계수는 시험시 측정되어야 하며, 측정기간 동안 부적절한 전압 불평형 계수로 샘플링된 시험 데이터는 제외되어야 한다.

$$\left| \frac{U^-}{U^+} \right| = \frac{\sqrt{U_{31}^2 + U_{23}^2 - 2 \cdot U_{31} \cdot U_{23} \cdot \cos(60 - \theta)}}{U_{31} + U_{23} - 2 \cdot U_{31} \cdot U_{23} \cdot \cos(\theta + 60)} \quad (1)$$

여기에서 U<sub>31</sub>, U<sub>23</sub> 및 U<sub>12</sub>는 상간 전압으로 측정되며, θ는 아래와 같다.

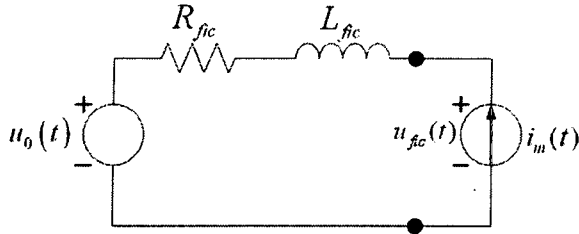
$$\cos(\theta) = \frac{U_{31}^2 + U_{23}^2 + U_{12}^2}{2 \cdot U_{31} \cdot U_{23}}$$

- 10분 주기로 측정된 난류 강도는 8~16% 사이이어야 한다. 난류강도는 장애물 및 지형 변화에 근거하여 구간별로 검증하여, 또는 풍속 측정에 근거하여 평가되어야 한다. 어느 방법이든, 측정기간 동안 위에서 언급한 범위 밖의 난류 강도로 샘플링된 시험 데이터는 제외되어야 한다.

2.2 측정장비

측정은 그림 1과 같은 측정시스템을 적용하며, 각 측정 장비는 표 1의 사양을 따라야 하며 아래의 사항을 만족해야 한다.

- 풍속계를 제외한 센서, 변환기, 지역 통과 필터의 증침된 응답은 각각 규정된 주파수보다 빨라야 한다. 지역 통과 필터된 신호를 저장하기 위한 데이터 획득 시스템의 샘플링 주파수는 적어도 차단 주파수의 2배는 되어야 한다.
- 이상적으로, 허브 높이에서의 풍속계는 풍력 터빈 자체의 방해물이나 풍력터빈의 후류 영향을 받지 않는 곳에 설치하여 풍속을 측정해야 한다. 일반적으로 측정위치가 풍속의 상류 방향으로 회전자 지름의 2.5배인 곳이 권장된다.
- 풍속계의 위치로 인한 불확실성은 ±1m/s를 초과해서는 안 된다.
- 풍속계의 응답 시간에 대한 특정한 요구사항은 없으며, 응답시간은 보통 10분 평균값으로 계산하여 적용한다.



〈그림 2〉 이상적인 전압원을 갖는 가상 계통

### 2.3 전압변동

측정되는 풍력터빈은 MV 네트워크에 연결된다. MV 네트워크는 일반적으로 측정되는 풍력터빈 출력단자에 상당한 전압 변동을 일으킬 수 있는 변동 부하를 가지고 있다. 따라서 풍력터빈에 의한 전압변동은 계통의 특성에 영향을 받는다. 그러나 측정의 목표는 측정 사이트에서 계통 조건과 상관없는 측정결과를 얻는 것이다. 이를 위해서 IEC 61400-21에서는 풍력터빈 출력단자에서 측정된 전류 및 전압 값을 이용하여 풍력터빈 이외에 전압변동 요소가 없는 가상계통에서 전압변동을 모의한다.

#### 2.3.1 가상계통

그림 2는 가상계통의 회로도를 나타낸다. 가상계통은 순시값  $u_0(t)$ 를 갖는 이상 전압원(상전압)과 저항  $R_{fic}$ 에 인덕턴스  $L_{fic}$ 이 직렬로 연결된 네트워크 임피던스로 나타낼 수 있다. 풍력터빈은 전류원  $i_m(t)$ 로 나타내며, 이는 측정된 전류의 순시값이다. 이 모델로부터 순시전압  $u_{fic}(t)$ 를 모의할 수 있고 그 값은 식(2)에 의해 구해진다.

$$u_{fic}(t) = u_0(t) + R_{fic} \cdot i_m(t) + L_{fic} \frac{di_m(t)}{dt} \quad (2)$$

여기에서, 이상전압  $u_0(t)$ 는 다음의 두 조건을 만족해야 한다.

- 이상전압원은 전압변동이 없어야 한다. 즉, 플리커가 '0'이어야 한다.
- $u_0(t)$ 는 측정된 전압의 기본 위상과 같은 각 주파수를 가져야 한다.

#### 2.3.2 연속운전

플리커 계수  $c(\phi_a, v_a)$ 가 결정되어야 하며,  $\phi_a$ 는 가상계통 임피던스 각,  $v_a$ 는 평균풍속이다. 측정과 모의를 통해 계산되며 필요한 측정은 다음과 같다.

- 풍력터빈 출력단자에서 3선 순시 선전류와 3상 순시 상전압을 측정한다.
- 시동 풍속에서 15m/s까지 각 1m/s 단위에 대하여 적어도 15분의 10분간 순시 전압 및 전류를 취득한다. 여기서 풍속은 10분 평균값이다.
- 스위칭 운전은 풍력터빈 연속운전 중 커패시터의 스위칭이 일어나는 경우를 제외하고는 배제한다.

측정은 그림 1에 묘사된 측정시스템과 표 1의 사양을 만족시키는 장비를 사용한다. 측정 전압 및 전류의 차단 주파수는 적어도 400Hz 이상이어야 한다.

측정된 순시 전압 및 전류 10분 값을 이용하여 각 10분 측정값에 대한 플리커 계수를 구해야 하며 그 방법은 1)~3)과 같다.

- 1) 측정된 전압·전류 값을 식(2)의 입력으로 하여 전압값  $u_{fic}(t)$ 를 구한다.
- 2) IEC 61000-4-15에 따라 전압값  $u_{fic}(t)$ 를 플리커 알고리즘의 입력으로 하여 각 10분 측정값에 대한 가상계통에서의 플리커 방출 값  $P_{st, fic}$ 를 구한다.
- 3) 식(3)을 이용하여 계산된 각 플리커 방출 값에 대한 플리커 계수를 구한다.

$$c(\psi_k) = P_{st, fic} \times \frac{S_{k, fic}}{S_n} \quad (3)$$

여기에서  $S_n$  : 풍력터빈의 정격피상 전력  
 $S_{k, fic}$  : 가상계통의 단락피상 전력

그 다음으로, 각 풍속 빈에 대한 가중 계수를 결정하여 가정된 풍속분포와 일치하는 플리커 계수의 발생빈도를 결정한다. 가중 계수를 결정하는 방법은 a)~e)와 같다.

- a) i번째 풍속 빈 내의 가정된 풍속의 발생 빈도  $f_{y,i}$ 는 레일리 분포와 일치해야 하며 식(4)와 같다.

$$f_{y,i} = \exp\left[-\frac{\pi}{4} \times \left(\frac{v_i - 0.5}{v_a}\right)^2\right] - \exp\left[-\frac{\pi}{4} \times \left(\frac{v_i + 0.5}{v_a}\right)^2\right] \quad (4)$$

여기에서  $v_i$  : i번째 풍속 빈의 중간점  
 $v_a$  : 가정된 연평균 풍속

- b) i번째 풍속 빈 내에서 측정 플리커 계수의 실제 발생 빈도  $f_{m,i}$ 는 식(5)와 같이 주어진다.

$$f_{m,i} = \frac{N_{m,i}}{N_m} \quad (5)$$

여기에서  $N_{m,i}$  : i번째 풍속 빈 내에서 측정된 플리커 계수 값의 수  
 $N_m$  : 플리커 계수 값의 총 개수

- c) 계산 값  $f_{y,i}$ 와  $f_{m,i}$ 를 식(6)에 대입하여 시동풍속과 15 m/s 사이의 각 1 m/s 풍속 빈에 대한 가중 계수를 결정한다.

$$w_i = \frac{f_{y,i}}{f_{m,i}} \quad (6)$$

마지막으로 플리커 계수 값의 가중 누적 분포를 구하고, 플리커 계수  $c(\phi_a, v_a)$ 를 이 분포의 0.99번째 백분율로 결정한다.

- d) 플리커 계수 값의 가중 누적분포는 식(7)과 같다.

$$\Pr(c < x) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{bin}} w_i \times N_{m,i,c < x}}{\sum_{i=1}^{N_{bin}} w_i \times N_{m,i}} \quad (7)$$

여기에서  $N_{m,i,c < x}$  : i번째 풍속 빈 내의 값 x보다 작거나 같은 플리커 계수 값의 개수

$N_{bin}$  : 풍속 빈의 총 개수

- e) 플리커 계수  $c(\phi_a, v_a)$ 를 플리커 계수 값의 가중 누적 분포의 0.99 백분율로 결정한다.  $\Pr(c < x)$ 를 계산하고 여기서 0.99번째 백분율을 읽는다.

## 3. 결 론

풍력터빈 전기품질 특성 파라미터로는 정격 데이터, 최대 허용출력, 최대 측정출력, 무효전력, 전압변동(연속운전, 스위칭 운전), 고조파가 있으며 본문에서는 연속운전에서의 전압변동을 다루었다. 연속운전에서의 전압변동에 대한 더 자세한 내용은 IEC 61400-21 부록 B에서 예를 들어 설명하고 있다. 향후 연구로써, IEC 61000-4-15의 플리커 알고리즘에 가상계통 전압값  $u_{fic}(t)$ 를 입력으로 하여 가상 계통에서 플리커 방출 값  $P_{st, fic}$ 를 구하는 것과 스위칭 운전에서의 전압변동에 대한 연구가 필요하다.

### [참 고 문 헌]

- [1] IEC, "Wind turbine generator systems-part 21 : Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines", IEC 61400-21, 2001.
- [2] IEC, "Testing and measurement techniques-Flickermeter-Functional and design specifications", IEC 61000-4-15, 1997.