IEC 국제표준에 따른 계통연계형 풍력터빈 발전기계통의 전력품질 측정방법에 관한 심화연구

A Synthetical Study on Power Quality Measurement of Grid-Connected Wind Turbine Generating System based on the IEC International Standards

조 수 환*
(Soo-Hwan Cho)

Abstract - As more and more renewable energy resources are connected into the existing power system and their generation capacities are increasing, the need for regulations to minimize their impacts on the power grid is increasingly growing. And minimizing the irregular impacts made by grid-connected wind generators is important, since the output power generated by renewable energy resources can be changed easily by the weather condition and surrounding environment. In South Korea, an operational technical standard for distributed generation is used as a regulation, in which renewable energy sources including wind power are considered as a kind of distributed generation. In this paper, an international standard, IEC 61400-21, for the grid-connected wind turbine generating system(WTGS) will be introduced and a comprehensive and detailed review on the measuring methods of power quality characteristic parameters for WTGS based on the related IEC standards will be presented. Additionally, some prerequisites for applying the international standards to KEPCO system will be proposed.

Key Words : Power quality, Grid-connected wind turbine, IEC 61400-21, IEC standards, Voltage fluctuation

1. 서 론

신재생에너지 발전원의 보급이 활성화되고 계통 전체에서 차지하는 신재생에너지의 설비용량이 늘어남에 따라, 기존 전력계통에 주는 신재생에너지원의 영향을 최소화하기 위한 규제(표준)의 필요성이 점점 부각되고 있는 상황이다. 현재 한국전력에서는 『분산형 전원 배전계통 연계 기술기준』을 적용하여 분산전원 형태의 신재생에너지원의 계통연계를 제한하고 있다[1]. 참고문헌 [1]에 따르면, 국내 배전계통에 연계되는 분산전원(풍력발전기)의 연계용량이 100kW 미만이고 누적연계용량이 해당 배전용 변압기 용량의 50% 이하인 경우에는 저압한전계통(교류단상 220V 혹은 교류 삼상 380V)에, 연계용량이 100kW 이상 10,000kW 이하이고 특고압 일반선로 누적연계용량이 해당 선로의 상시운전용량 이하인 경우에는 특고압한전계통(교류삼상 22,900kV)에 연계하도록 규정하고 있다. 또한 연계제한을 위한 전기품질 요구조건으로 0.5% 이하의 직류유입제한, 90% 이상의 역률(계통측 기준 지상역률) 유지를 포함하여 플리커와 고조파 연계조건을 제시하고 있다. 고조파의 경우에는 『배전계통 고조파 관리 기준』에 준하는 허용기준이 적용되고 있지만, 플리커의 경우에는 측정 및 평가에 대한 기준이 아직 명확히 마련되어 있지 않은 실정이다. 한국전력의 『전기공급약관 시행세

칙』에 따르면, 아크로 및 전기철도 등 주기적인 전압변동을 발생시키는 고객에 한하여 플리커와 고조파의 허용기준을 제시하고 있으며, 해당 허용기준치 초과 시에는 고객의 부담으로 저감장치를 설치하여 각각의 허용기준치를 만족시킬 것을 권고하고 있다[2].

하지만 최근 개정된 『분산형 전원 배전계통 연계기술기준-플리커』에서는 “분산형전원은 빈번한 기동, 탈락 또는 출력변동 등에 의하여 한전계통에 연결된 다른 전기사용자에게 시각적인 자극을 줄만한 플리커나 설비의 오동작을 초래하는 전압요동을 발생시켜서는 안 된다.”라고만 언급되어 있을 뿐 초기 연계기술기준에서 언급되었던 플리커에 대한 연계기준(평가를 위한 방출한계치)의 내용($E_{Pst} \leq 0.35$, $E_{Pti} \leq 0.25$)이 삭제되었다. 이는 오랜 연구를 통해 IEC 국제표준의 내용을 국내 실정에 맞게 적용해온 고조파 규정과는 달리, 플리커의 경우에는 측정 및 평가에 대한 기준이 아직 IEC 국제표준에 따르지 못하기 때문이다. 2000년 이전까지 국내 플리커 평가지표로는 $\Delta V_{10}(10\text{-Hz}$ 등가 플리커평가지수)이 사용되었고, 2000년 중반에 이르러서야 플리커 관련 IEC 표준도입에 대한 연구가 진행되었다. 하지만 IEC표준에 근거한 플리커 측정 및 평가방법은 계통의 특성에 따라 기존 방법과는 다른 기준이 적용되어야 함은 물론 IEC 61000-3-3, 3-6, 3-7, 4-7, 4-15, 4-30 등 다양한 표준이 매우 복잡하게 연계되어 있기 때문에 표준화작업에 어려움을 겪게 되었다.

지금까지 국내에서 수행된 풍력발전 전력품질 관련 연구들을 살펴보면, IEC 61400-21에 언급된 내용을 일부 다루고 있으나, 파라미터 계산과정에 대한 구체적인 설명 및 다른 표준들과의 연관성에 대한 자세한 설명이 부족하다[3-5].

* Corresponding Author : Dept. of Energy Grid, Sangmyung University, Korea

E-mail : shcho@smu.ac.kr

Received : August 5, 2013; Accepted : January 9, 2014

더불어 풍력발전기의 누적데이터를 활용한 이벤트 데이터 분석에 대한 연구가 진행되었고[6], Labview 기반의 풍력발전기 전력품질 측정장비 구현 관련 연구가 수행되었다[7]. 하지만 기존의 상용전력품질분석기를 사용하여 일반적인 항목의 전력품질을 측정하였을 뿐, IEC61400-21에 소개된 품질측정기법을 적용하지 않았으며, 풍속, 출력전압, 출력주파수 및 전류스펙트럼 등 풍력발전기의 기본 데이터를 활용한 장비개발이라는 한계를 보였다. 이에 반해 해외에서는 플리커 실측치와 가상계통 모의결과의 비교분석[8, 9]과 고조파 평가를 위한 측정치 합산방법[10] 등 주로 IEC표준의 응용 분야에 초점이 맞춰져 있어, 국내와 해외의 기술적 수준 차가 현격한 실정이다.

본 논문에서는 계통연계형 풍력발전기의 전력품질 특성과 파라미터의 측정방법을 종합적이고 구체적으로 검토해 보고자 한다. 이를 위해 IEC 61400-21에서 다루고 있는 개별 전력품질 특성파라미터의 측정방법에 대해서 자세히 살펴보고, 평가를 위한 국제표준의 레포트 양식(IEC 61400-21의 부록 A와 부록B)을 근간으로 하여 개별 특성파라미터를 결정하는 방법에 대해 종합적으로 소개할 것이다. 또한 특성파라미터 선정 시, 국내 계통환경을 감안하여 수정이 필요한 부분을 지적하고자 한다. 다시 말해, IEC 61400-21을 중심으로 관련 표준인 IEC 61000-3-3, 3-6, 3-7, 4-7, 4-15, 4-30 등을 종합적으로 정리하고, 국내 전력계통환경에서 IEC 국제표준 적용의 한계를 알아봄으로써 풍력발전기의 계통연계시 검토되어야 하는 전력품질 조건에 대해 심도있게 살펴볼 것이다. 더불어 한전의 기술기준에서 정의된 용어를 사용함으로써 의미의 혼선을 피하고자 최대한 노력하였다.

2. IEC 61400-21에 따른 전력품질측정의 개요

2.1 IEC 61400-21 개요

IEC 61400-21은 계통연계형 풍력터빈 발전기 시스템(Grid-connected Wind Turbine Generator System, WTGS)에 대한 전력품질 특성을 측정하고 평가하기 위한 방법론을 구체적으로 제시하고 있으며 풍력발전기의 계통연계와 관련된 이해 당사자들(제조사, 운영자, 계통계획 및 규제기관, 인증 및 심의기관 등)에게 공통적으로 적용되는 표준을 제안하고 있다[11]. 해당 표준은 WTGS가 기존 계통에 연계됨에 따라 발생할 수 있는 전력품질 문제에만 관심을 갖고 있기 때문에, WTGS에서 계통으로 흐르는 방향을 전류의 기준방향으로 설정(즉, 발전기 기준 부호규약에 따름)하였다. 또한 본 표준의 측정절차는 계통연계형 삼상 풍력발전기 한 대의 개별 특성을 파악하기 위한 것으로, IEC기준 중압계통(MV, 1kV 초과 35kV이하) 혹은 고압계통(HV, 35kV 초과)에서 공통연결점(PCC, Point of Common Coupling)을 갖는 WTGS에 한정된다. 즉, 국내 배전계통 연계기준에 적용될 수 있는 전압대인 교류 삼상 22.9kV는 IEC 기준 중압계통(MV)에 해당한다.

WTGS의 전력품질(PQ, Power Quality)을 평가하기 위해 사용하는 전력품질 특성파라미터에는 일반적인 정격데이터(복소전력, 유/무효전력, 전압, 전류), 최대허용전력, 최대측정전력 그리고 전압요동(Voltage Fluctuation)과 고조파가

있으며 표 1과 같이 정리된다[5]. 이외에 IEC표준에서 다루고 있는 WTGS의 일반데이터(블레이드 개수, 로터 반경, 허브높이, 블레이드 제어방식, 컨버터 용량 등)는 설비의 기계적 스펙에 의해 결정되는 부분이므로 본 논문에서는 다루지 않는다. 표 1의 개별 전력품질 특성파라미터들에 대한 구체적인 측정방법은 3장에서 자세히 다룰 것이다.

표 1 IEC 61400-21의 WTGS 전력품질 평가를 위한 PQ 특성파라미터

Table 1 PQ characteristic parameters for power quality assessment of WTGS according to IEC 61400-21

전력품질(PQ) 특성파라미터 분류		설 명	
정격 데이터	S_n	복소전력(VA)	풍력터빈 제조사 제공 데이터
	P_n	유효전력(W)	
	Q_n	무효전력(var)	
	U_n	공칭전압(선간전압)(V)	
	I_n	정격전류(A)	
최대 허용 전력	P_{mc}	풍력터빈 제어시스템의 최대허용 유효전력(W)	측정에 의한 추정치
	Q_{mc}	P_{mc} 에서의 무효전력(var)	
최대 측정 전력	P_{60}	60초 평균 유효전력 중 최대측정치	측정에 의한 추정치
	$P_{0.2}$	0.2초(12사이클) 평균 유효전력 중 최대측정치	
	Q_{60}	P_{60} 에서의 무효전력(var)	
	$Q_{0.2}$	$P_{0.2}$ 에서의 무효전력(var)	
전압 요동	$c(\Psi_k, V_a)$	플리커계수	스위칭 운전 시 연속운전 시
	N_{10}	10분 동안 스위칭 회수의 최대치	
	N_{120}	120분 동안 스위칭 회수의 최대치	
	$k_f(\Psi_k)$	임피던스 위상각에 대한 플리커 스텝지수 (flicker step factor)	
	$k_U(\Psi_k)$	임피던스 위상각에 대한 전압변동지수 (voltage change factor)	
고조파	I_h	50차수까지의 개별고조파 전류	

2.2 측정 일반사양

표 1에서 소개한 특성파라미터를 산출하기 위한 기본데이터는 전압순시치, 전류순시치 그리고 풍속데이터이다. 그림 1에서 정리된 측정과정을 살펴보면 먼저 센서(PT, CT)를 통해 전압, 전류순시치를 센싱하고 변환기(transducer)를 거쳐 전력값(복소전력, 유효전력, 무효전력)을 산출한다. 이후 안티앨리어싱 필터를 통과한 후 데이터 취득장치(DAQ, Data Acquisition)를 이용해서 샘플링 데이터(이산형 데이터)를 취득한다. 이 때 사용되는 PT, CT, 전력변환기의 정확도는 오차등급 class 1.0 (오차 $\pm 1\%$) 이하를, 풍속계는 $\pm 0.5m/s$ 이하의 정확도를 요구한다[11]. 풍력터빈의 단자에서 측정된 선간전압, 상전류 그리고 풍속데이터들은 10분 단

위로 취득되어 별도로 저장한 후, 각 연산절차를 걸쳐 다양한 파라미터로 환산되어야 한다.

그림 1 전력품질 특성파라미터 측정 시스템

Fig. 1 Measuring system of PQ characteristic parameters

측정을 위한 WTGS의 일반조건은 아래와 같다[11].

- 풍력터빈은 표준 변압기를 통해 MV계통(우리나라의 경우, 22.9kV)에 직접 연결되어야 한다.
- 계통연계점(point of connection)에서의 단락용량은 최대 허용복소전력(Sn)의 50배 이상이어야 한다.
- 풍력터빈이 발전하지 않는 조건(풍력발전기가 계통에 투입되기 전)에서 풍력터빈 단자측에서 측정된 10분 평균 전압THD(즉, 계통연계점에서 풍력발전기의 영향을 배제한 순수 계통에서의 전압THD)가 5%이하이어야 한다.
- 계통주파수는 12사이클(0.2초) 평균값으로 공칭주파수(60Hz)의 $\pm 1\%$ 이내이어야 하고, 계통주파수의 변화율은 12사이클 동안 공칭주파수의 0.2% 이내이어야 한다.
- 풍력터빈 단자에서 측정된 10분 평균 선간전압이 공칭전압(22.9kV)의 $\pm 5\%$ 이내이어야 한다.
- 아래 식으로 계산된 전압불평형은 풍력터빈 단자에서 측정된 10분 평균치로 공칭전압의 2% 이내이어야 한다.

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

여기에서 U_{31} , U_{23} , U_{12} 는 측정된 선간전압을 의미하며, θ 는 $\cos^{-1}\left(\frac{U_{31}^2 + U_{23}^2 - U_{12}^2}{2U_{31}U_{23}}\right)$ 이다.

3. IEC 61400-21에 따른 전력품질 특성파라미터의 측정방법

3.1 정격데이터, 최대허용 유효전력(P_{mc}) 및 최대측정 유효전력($P_{0.2}$, P_{60})

정격유효전력(P_n , W), 정격복소전력(S_n , VA), 정격무효전력(Q_n , var), 정격전압(U_n , 공칭전압(선간전압)), 정격전류(I_n , A) 그리고 풍력발전기의 정격풍속(v_n , m/sec)은 풍력터빈 제조사에서 제공하는 데이터들을 사용한다. 풍력터빈의 최대허용 유효전력(P_m)은 풍력터빈의 제어계통의 한계유효전력을 의미하며 이 값도 제조사로부터 제공되는 정보를 사용하고 이 값을 정격유효전력(P_n)으로 나누어 정규화 최대허용 유효전력(p_{mc} , p.u 단위)을 계산한다.

WTGS에 의해 발생하는 유효전력은 풍속과 밀접하게 관련되기 때문에 풍속데이터와 함께 측정되어야 한다. WTGS의 연속운전(continuous operation) 조건에서 10분 평균풍속과 함께 동일한 시간태그를 지닌 10분 단위의 전력순시치를 취득, 저장한다. 결국 10분 당 1개의 평균풍속값과 동일 시간동안의 전력순시치가 시계열데이터 형태로 저장되며, 이때 10분 평균풍속값은 시동풍속(일반적으로 3m/sec)과 15m/sec 사이에 대해서만 유효하다. 10분 평균풍속 데이터들이 수집되면 풍속빈에 저장된다. 풍속빈은 1m/sec 간격으로 측정 풍속을 이산화한 것으로 시동풍속이 3m/sec인 경우 15m/sec까지 총 12개의 풍속빈이 생성된다. 최대측정 유효전력을 결정하기 위해서는 각 풍속빈에 최소 5개 이상의 데이터가 저장되어야 한다. 측정이 완료되면 각 10분의 전력순시치(시계열데이터)를 0.2초(12사이클) 평균값과 60초 평균값으로 유효전력을 계산하고 그 중 최대값을 $P_{0.2}$ 과 P_{60} 로 결정한다.

3.2 무효전력(Q_{mc} , $Q_{0.2}$, Q_{60})

유효전력의 계산과 동시에 무효전력을 계산하고 측정된 10분 평균풍속 별로 계산된 무효전력(10분 평균치)을 정격전력 대비 0, 10, 20, ..., 80, 90, 100%로 정렬하여 아래의 표 2를 완성한다. 표 2를 기준으로 3-1에서 결정된 P_{mc} , $P_{0.2}$ 와 P_{60} 에 해당하는 무효전력값 Q_{mc} , $Q_{0.2}$, Q_{60} 를 보간법을 이용하여 결정한다.

표 2 무효전력 측정 결과표(예시)

Table 2 Example of reactive power measurement

출력전력 (% of P_n) (예: 정격전력이 500kW인 경우)	출력전력(kW) (10분 평균값)	무효전력(kvar) (10분 평균값)
0 (0kW)	[0, 25kW) 평균	해당 무효전력 평균
0 (0kW)	[25, 75kW) 평균	해당 무효전력 평균
0 (0kW)	[75, 125kW) 평균	해당 무효전력 평균
0 (0kW)	[125, 175kW) 평균	해당 무효전력 평균
0 (0kW)	[175, 225kW) 평균	해당 무효전력 평균
0 (0kW)	[225, 275kW) 평균	해당 무효전력 평균
0 (0kW)	[275, 325kW) 평균	해당 무효전력 평균
0 (0kW)	[325, 375kW) 평균	해당 무효전력 평균
0 (0kW)	[375, 425kW) 평균	해당 무효전력 평균
0 (0kW)	[425, 475kW) 평균	해당 무효전력 평균
0 (0kW)	[475, 525kW) 평균	해당 무효전력 평균

3.3 전압요동(voltage fluctuation)

전압요동(voltage fluctuation)은 플리커(flicker)와 자주 혼동되어 사용되는 전력품질 현상으로, 전압요동에 대해 정확히 이해하기 위해서는 전압요동과 플리커와의 용어적 차이를 먼저 이해해야 한다. IEC 표준에 따른 용어의 정의는 아래와 같다[8, 9].

- 전압요동(voltage fluctuation)은 일련의 반주기 실효치 전압변동(voltage change) 혹은 전압포락선(voltage envelop)의 주기적인 변화를 의미한다. IEC 전압 순시치 데이터로

부터 매 반주기마다 실효치를 계산한 후 계통의 공칭전압으로 나누어 상대적인 전압변동치로 환산하고 시계열데이터로 표현하여 상대적 전압변동(relative voltage change)의 변화추이를 파악한다. 여기에서 전압변동은 이전 반주기 실효치 대비 현재의 반주기 실효치의 크기변화를 의미하고 전압요동은 연속적인 전압변동을 의미한다.

- 플리커(flicker)는 시간에 따라 밝기가 변화하는 전등부하에 의해 시각적으로 인지되는 불안정한 깜박임 현상을 의미한다. 즉, 전압요동을 지닌 전압신호가 전등부하(백열전구)에 인가되었을 때 전등의 밝기의 주기적인 변화로 발현되고 이를 전등부하 사용자가 인지하는 정도를 플리커라고 한다.

결과적으로 전압요동은 플리커의 직접적인 원인이며 플리커는 전압요동에 의한 하나의 결과물로 이해될 수 있다. 또한 전압요동과 전압변동을 구분짓는 중요한 요소로는 주기성을 들 수 있다. 전압변동은 상대적인 전압변화의 크기와 지속시간으로 특징지을 수 있으며 이러한 전압변동이 주기적으로 발생할 경우에 전압요동이 될 수 있다. 참고로 전력품질 이벤트 중 순간전압강하는 주기성을 지니지 않은 일회성 성격의 현상이므로 일정한 크기(0.1 이상 0.9 p.u 이하)와 지속시간(0.5 사이클 이상 1분 이하)에 따라 정의되는 전압변동 현상의 한 종류이다.

IEC표준에 따른 WTGS의 전압요동 측정 및 평가조건은 크게 연속운전(continuous operation)조건과 스위칭동작(switching operation)조건으로 구분된다. 연속운전 조건은 풍력터빈의 기동과 정지동작을 제외한 정상적인 운전상황을 의미한다. 스위칭동작 조건은 풍력터빈의 기동 상황과 풍력터빈 간의 스위칭 동작 상황을 의미하며 다음과 같이 세분화된다.

- 시동풍속(Cut-in wind speed)에서 풍력터빈 기동 시
- 정격풍속(Rated wind speed)에서 풍력터빈 기동 시
- 두 대 이상의 풍력터빈 간의 스위칭동작 중 최악의 조건

조건 C에서는 최악의 조건이라고 함은 일정 시간동안 측정된 플리커스텝지수(flicker step factor)와 전압변동지수(voltage change factor) 중에서 가장 큰 값을 산출하는 경우를 의미한다.

WTGS에 대한 전압요동 측정절차는 연속운전 조건에서 풍력터빈의 플리커계수($c(\psi_k, v_a)$)를 결정하는 과정이며, 스위칭동작 조건에서는 10분(P_{st} 측정시간) 간 스위칭 동작의 최대횟수(N_{10}), 120분 간 스위칭 동작의 최대횟수(N_{120}), 계통 임피던스에 대한 플리커스텝지수($k_f(\psi_k)$)와 전압변동지수($k_U(\psi_k)$)를 결정하는 과정으로 요약할 수 있다. 풍력터빈의 연계점에서 계통 조건과는 별도로 독립적인 PQ왜곡 정도를 측정하기 위해서 WTGS의 계통 투입 전 상황(계통분리)에서 전압(선간전압)과 전류(상전류)를 측정하고 이를 가상계통에 적용하여 풍력터빈의 운전에 따른 전압신호($u_{fic}(t)$)를 얻는다. 이 전압신호를 입력으로 하여 IEC 플리커지수인 P_{st} 를 계산하고 전압변동을 추정하여 다양한 지수를 계산하게 된다. 다음 절에서 이 과정을 자세히 설명하도록 한다.

3.3.1 가상계통의 구성

연속운전조건과 스위칭동작조건 하에서 전압요동을 측정, 평가하기 위해서는 계통조건과는 독립적인 풍력터빈만의 전압신호($u_{fic}(t)$)를 얻어야 한다. 참고문헌 [15]에도 가상계통과 유사한 개념이 소개되어 있는데, 저압계통에서 PQ왜곡원에 대한 전압변동과 전압요동, 플리커의 평가에 사용되는 일반적인 시험조건(reference network)과 유사한 계통구성을 갖는다. 이를 위해서 무부하(계통분리) 상황에서 풍력터빈의 단자전압과 전류를 측정한다. 이 때 취득된 전류신호는 가상계통에서 풍력터빈을 전류원으로 취급하기 위한 것이고, 전압신호는 전류와의 위상차를 계산하기 위해 필요하다. $u_{fic}(t)$ 의 계산식은 아래와 같다.

$$u_{fic}(t) = u_0(t) + v_R(t) + v_L(t) \quad (2)$$

$$= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_n \sin(2\pi f_m t + \alpha_0) + R_{fic} i_m(t) + L_{fic} \frac{di_m(t)}{dt}$$

샘플링을 통해 아래와 같은 이산신호로 표현할 수 있다.

$$u_{fic}[n] \approx u_n[n] + R_{fic} i_m[n] + L_{fic} \frac{i_m[n] - i_m[n-1]}{\Delta t} \quad (3)$$

식 (2)에서 U_n 은 풍력터빈의 연계지점에서의 공칭전압(선간전압 실효치, 22.9kV)이고, α_0 는 측정된 전압과 전류의 위상각의 차이를 의미한다. 또한 식 (3)에서 Δt 는 샘플링비에 의해 결정되며, $u_n[n]$ 은 측정된 전압신호($u_m(t)$)와 동일한 각 속도를 갖는 순수정현파(크기는 상전압 실효치의 $\sqrt{2}$ 배, 주파수(f_m)는 측정된 전압신호($u_m(t)$)와 동일하고 위상차는 α_0 인 이산화된 전압신호)를 의미한다. 표준에 제시된 가상계통의 임피던스 위상각(ψ_k)은 30° , 50° , 70° 그리고 85° 이므로 해당 위상각에 대해 R_{fic} 과 L_{fic} 은 아래의 식 (4)와 (5)를 이용해서 결정한다.

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

$$S_{k, fic} = \frac{U_n^2}{\sqrt{R_{fic}^2 + X_{fic}^2}} = \frac{U_n^2}{\sqrt{R_{fic}^2 + (2\pi 60 L_{fic})^2}} \quad (5)$$

여기에서 $S_{k, fic}$ 은 가상계통에 대한 3상 단락용량으로, 산정이 어려운 경우에는 풍력터빈의 정격용량의 50배(즉, $50S_n$)를 사용하도록 권고하고 있다.

IEC표준에서 주어진 임피던스위상각에 대한 R_{fic} 과 L_{fic} 의 비는 표 3과 같다.

표 3 계통 임피던스위상각에 따른 저항 대 리액턴스 비
Table 3 Ratio of R_{fic} and L_{fic} for network impedance phase angle

임피던스 위상각(ψ_k)	$\tan(\psi_k)$	L_{fic} / R_{fic}
30°	0.577	0.00153
50°	1.192	0.00316
70°	2.747	0.00729
80°	11.430	0.03032

3.3.2 연속운전 조건에서 전압요동 측정방법

IEC 61400-21에서 제안하는 연속운전 조건 하에서 전압요동의 측정절차의 핵심은 각 계통임피던스 위상각(ψ_k)에 대해 연평균풍속($v_a=6.0, 7.5, 8.5, 10$ m/sec)별 총 16개의 플리커계수($c(\psi_k, v_a)$)를 결정하는 것이다.

플리커계수를 결정하는 과정은 크게 3단계로 나뉜다.

- 1단계: 측정풍속 대비 플리커계수($c(\psi_k)$) 계산
- 2단계: 풍속별 가중치 결정
- 3단계: 연평균풍속별 플리커계수($c(\psi_k, v_a)$) 산정

먼저 풍력터빈 단자측에서 각 상에 대한 전압과 전류 데이터를 취득한다. 이 때 전압은 선간전압으로 취득되기 때문에 식 (6)을 이용해서 상전압으로 환산한다.

$$u_1 = \frac{u_{12} - u_{31}}{3}, u_2 = \frac{u_{23} - u_{12}}{3}, u_3 = \frac{u_{31} - u_{23}}{3} \quad (6)$$

동시에 풍속데이터를 취득하고 10분 평균을 계산하여 10분 평균풍속측정값을 얻는다. 이 때 동일한 시간격(10분) 동안 측정된 전압, 전류의 순시치 데이터를 시계열데이터 형태로 저장한다. 풍속데이터의 측정범위는 시동풍속과 15m/sec으로 하고 1m/sec간격으로 풍속빈(시동풍속이 3m/sec인 경우 총 12개의 풍속빈이 생성됨)을 구성하며, 스위칭동작 데이터는 제외하고 각 풍속빈 당 최소 5개의 10분 시계열데이터를 저장한다.

- 1단계: 측정풍속 대비 플리커계수($c(\psi_k)$) 계산

이렇게 취득한 전압, 전류 순시치데이터를 이용하여 임피던스위상각별로 가상계통에서의 $u_{fic}(t)$ 를 구하고 이 전압신호를 입력으로 하여 IEC 61000-4-15의 플리커미터를 구현한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 $P_{st, fic}(\psi_k)$ 을 계산한다. $P_{st, fic}$ 은 10분 당 1개의 결과값이 산출되며 해당 플리커지수(P_{st} , 단기플리커심각도지수)를 계산하는 과정은 참고문헌 [13]에 자세히 소개되어 있다. IEC 플리커 평가지수에는 P_{st} (Short-term flicker severity index)와 P_{lt} (Long-term flicker severity index)가 있다. P_{st} 는 측정시간(10분)동안 전압신호에 포함된 전압요동성분 중에서 계통주파수의 70%(계통주파수가 50, 60Hz의 경우, 각각 35, 42Hz) 이하에 해당하는 주파수 성분들이 시감각에 의해 인지되는 정도를 수치적으로 표현한 플리커 심각도지수이다. P_{lt} 는 2시간(120분) 동안 취득된 12개의 P_{st} 결과값을 이용하여 계산한다.

하지만 해당 국제표준을 국내 계통에 직접 적용하는 데에는 여러 제약조건이 따르게 되는데, 첫 번째로 국내의 배전계통 전압레벨(220V)이 IEC에서 제시하고 있는 전압대(120V와 230V)와 상이하다는 점을 들 수 있다. 결국 참고문헌 [13]의 플리커 측정방법을 그대로 사용하는 경우, 전압크기의 차이로 인해 결과값($P_{st, fic}(\psi_k)$)에 오차가 포함되며, 이를 방지하기 위해서는 220V에 해당하는 가중치필터를 사용한 시뮬레이션이 사용되어야 한다. 두 번째, 계통주파수인 60Hz를 감안하여 IEC 플리커미터의 알고리즘을 수정해야 한다.

이는 기존의 플리커미터 알고리즘이 미국계통(120V, 50Hz)과 유럽계통(230V, 60Hz)만을 감안하여 구현되었기 때문이다. 결과적으로, IEC 플리커 측정 알고리즘에 우리나라 배전계통(220V, 60Hz)에 대한 조건이 추가적으로 고려되어야 하며, 만일 우리나라와 유사한 유럽계통 조건을 사용하는 경우에는, 전압크기의 차이로 인해 P_{st} 가 실제보다 약 4.5%정도 작게 산출된다는 점을 감안해야 한다. 또한 해당 알고리즘은 연속계로 정의되어 있으므로 국내 환경에 적합한 이산계로 변환하여 플리커미터의 개별 구성요소들을 구현해야 할 필요가 있다[14].

이렇게 각 계산된 $P_{st, fic}(\psi_k)$ 를 아래의 식으로 정규화하여 플리커계수($c(\psi_k)$)를 얻는다.

$$c(\psi_k) = P_{st, fic}(\psi_k) \frac{S_{k, fic}}{S_n} \quad (7)$$

- 2단계: 풍속별 가중치 결정

1단계에서 산출된 플리커계수($c(\psi_k)$)를 기반으로 i -번째 풍속빈의 출현빈도($f_{m, i}$)를 산출한다.

$$f_{m, i} = \frac{N_{m, i}}{N_m} \quad (8)$$

여기에서 $N_{m, i}$ 는 i -번째 풍속빈에 속하는 플리커계수의 개수이며, N_m 은 전체 플리커계수의 개수를 의미한다.

그 다음으로 연평균풍속($v_a=6.0, 7.5, 8.5, 10$ m/sec)에 대한 i -번째 풍속빈의 출현빈도를 예측하는데 이 때 풍속이 아래 식으로 정의되는 Rayleigh분포를 따른다고 가정한다.

$$f_{y, i} = \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v_i - 0.5}{v_a}\right)^2\right) - \exp\left(-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v_i + 0.5}{v_a}\right)^2\right) \quad (9)$$

표 4 연평균 풍속(v_a)별 풍속빈의 출현빈도(%) 결정

Table 4 Frequency of occurrence of $f_{y, i}$ (%) for each annual average wind speed

풍속빈 (m/s)	풍속빈의 중간값 (v_i)	$f_{y, i}$ (%) ($v_a=$ 6m/s)	$f_{y, i}$ (%) ($v_a=$ 7.5m/s)	$f_{y, i}$ (%) ($v_a=$ 8.5m/s)	$f_{y, i}$ (%) ($v_a=$ 10m/s)
3~4	3.5	11.64	8.21	6.64	4.98
4~5	4.5	12.57	9.44	7.83	6.02
5~6	5.5	12.37	10.04	8.59	6.80
6~7	6.5	11.26	10.04	8.91	7.32
7~8	7.5	9.58	9.53	8.83	7.56
8~9	8.5	7.67	8.65	8.41	7.56
9~10	9.5	5.80	7.52	7.74	7.34
10~11	10.5	4.15	6.29	6.88	6.93
11~12	11.5	2.82	5.07	5.94	6.39
12~13	12.5	1.82	3.95	4.97	5.75
13~14	13.5	1.11	2.97	4.05	5.07
14~15	14.5	0.65	2.16	3.21	4.37

여기에서 v_i 는 풍속빈의 중간값을 의미하고, v_a 는 IEC표준에서 제시하는 연평균풍속($v_a=6.0, 7.5, 8.5, 10$ m/sec)을 의미하므로, 시동풍속을 3m/sec으로 가정하면 각 연평균풍속에 대해 아래와 같은 출현빈도가 결정된다.

위에서 구한 $f_{m,i}$ 와 $f_{y,i}$ 를 바탕으로 각 풍속빈에 대한 가중치(w_i)를 아래와 같이 결정한다.

$$w_i = \frac{f_{y,i}}{f_{m,i}} \quad (10)$$

- 3단계: 연평균풍속별 플리커계수($c(\psi_k, v_a)$) 산정

1, 2단계에서 구한 값들을 바탕으로 플리커계수의 가중누적확률분포를 계산하고 내림차순으로 정리하여 그 결과로부터 99% 확률분포에 해당되는 값을 최종적인 플리커계수($c(\psi_k, v_a)$)로 결정한다.

3.3.3 스위칭동작 조건에서 전압요동 측정방법

IEC 61400-21에서 제안하는 스위칭동작 조건 하에서 전압요동의 측정절차의 핵심은 스위칭동작 조건(A:시동풍속에서 풍력터빈 기동, B: 정격풍속에서 풍력터빈 기동, C: 발전기 간의 스위칭)별 각 계통임피던스 위상각(ψ_k)에 대해 N10, N120과 플리커스텝지수(flicker step factor, $k_f(\psi_k)$), 전압변동지수(voltage change factor, $k_U(\psi_k)$)를 결정하는 것이다. 이 때 N10과 N120은 풍력터빈 제조사로부터 제공받는 데이터이며 플리커스텝지수와 전압변동지수는 측정과 시뮬레이션을 통해 계산되는 값이다. 먼저 연속운전 조건과 동일하게 $u_{nc}(t)$ 를 구한 후 T_p 를 10분(600초)으로 하여 $P_{st, fic}$ 을 시뮬레이션으로 통해 계산하고 플리커스텝지수를 아래 식으로 결정한다.

$$k_f(\psi_k) = \frac{1}{130} \frac{S_{k, fic}}{S_n} P_{st, fic} T_p^{0.31} \quad (11)$$

이 식은 여러 IEC표준에 걸쳐 소개된 P_{st} 산정방법 중 분석적 방법(analytical method)으로부터 유도된 것이다. 참고문헌 [15]에 따르면 P_{st} 를 결정하는 방법에는 플리커미터를 이용한 직접측정법, 시뮬레이션법 그리고 전압변동과 형태인자(shape factor)를 이용한 분석적 방법 그리고 $P_{st}=1$ 그래프를 이용한 방법이 있다. 그 중에서 분석적 방법은 초당 1회 이하로 발생하는 다양한 형태(이중스텝, 램프, 정사각파, 삼각파 등)의 전압변동을 1회의 스텝함수형태로 등가화시킨 형태인자(shape factor, F)를 이용하는 방법으로, 위에서 언급한 다양한 형태의 전압변동을 상대적 전압변동의 크기(d_{max})와 지속시간(T)으로 정의하고 그래프를 이용하여 형태인자(F)를 결정한 후 플리커표출시간(t_f)의 합산결과로부터 P_{st} 를 추정하는 방법이다. 일반적으로 T_p (측정시간)은 600초(플리커지수 P_{st} 측정시간, 10분)이다.

플리커스텝지수($k_f(\psi_k)$)와 더불어 스위칭동작 동안 측정된 상대적전압변동의 최대값과 최소값의 차이로부터 전압변동지수($k_U(\psi_k)$)를 계산한다.

$$k_U(\psi_k) = \sqrt{3} \left(\frac{U_{fic, max}}{U_n} - \frac{U_{fic, min}}{U_n} \right) \frac{S_{k, fic}}{S_n} \quad (12)$$

각 스위칭 조건 별로 5회 이상 측정을 수행하고 그 평균값으로 최종적인 플리커스텝인자($k_f(\psi_k)$)와 전압변동지수($k_U(\psi_k)$)를 결정한다.

3.4 고조파

고조파 측정은 전력전자 컨버터 장비를 갖춘 풍력터빈에 한하여 실시하며 그 구체적인 측정방법은 IEC 61000-4-7에 따른다[15]. 계통주파수의 20%에 해당하는 주파수대역(50, 60Hz의 경우, 각각 10, 12사이클)의 윈도우를 사용하여 이산 푸리에연산(Discrete Fourier Transform)을 거친 후, 그룹화(grouping)와 평활화(smoothing)를 연속적으로 수행한다. 그룹화는 위의 샘플링조건(윈도우크기)에 의해 결정되는 5Hz 간격의 DFT 결과값을 60Hz간격의 n 차 고조파성분으로 환산하기 위한 것이고, 평활화는 1차 저대역통과필터(LPF, 시정수:1.5초)를 사용하여 각 차수의 고조파성분의 대폭값을 산정하기 위한 과정이다. 이러한 과정을 통해 연속운전 시간동안 풍력터빈에 의해 방출되는 고조파 전류를 50차까지 측정, 기록한 후 개별 고조파전류와 최대전류THD를 결정한다. 개별 고조파전류의 경우 10분 평균치로 정격전류에 대한 상대값을 기입하고 0.1% 이하의 고조파전류는 0으로 결정한다.

일반적으로 고조파전류는 다수의 부하(WTGS에 해당)에 의해 발생하여 계통으로 흘러들어오기 때문에 종합적인 해석을 위해서는 일반화된 합산결과로 변환되어야 한다. 다수의 고조파 왜곡원(풍력발전기계통)으로부터 유입되는 고조파 전류의 합산방법은 IEC 61000-3-6에 자세히 설명되어 있으며 그 합산식은 다음과 같다 [17].

$$I_{h, total} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{I_{h, i}}{n_i} \right)^2} \quad (13)$$

여기에서 N은 해당 PCC에 연계된 풍력발전기의 개수를 의미하고, $I_{h,i}$ 는 위에서 설명한 i -번째 풍력발전기의 h 차-고조파전류, n_i 는 i -번째 풍력발전기가 연결된 변압기의 감쇄비 그리고 β 는 고조파 차수별로 정의된 계수로서 4차 이하의 고조파에서는 '1.0'이, 5차 고조파부터 10차 고조파까지는 '1.4'가, 11차 고조파 이상에서는 '2.0'이 선택적으로 사용된다. 특히 n_i 는 변압기 1차측과 2차측에서 측정된 고조파전류의 크기의 비로서 정의되기 때문에 국내 변압기 계통특성이 반영된 값으로 새롭게 결정되어야 한다.

지금까지 설명한 전력품질 파라미터들을 참고문헌[11]의 부록에 소개되어 있는 레포트 형식에 맞춰 최종적으로 기입함으로써 계통연계형 풍력발전시스템에 대한 전력품질 측정을 완료한다.

4. 결 론

본 논문에서는 IEC 61400-21을 비롯하여 다양한 IEC표준에서 제안하고 있는 계통연계형 풍력터빈 발전시스템

(WTGS)에 대한 전력품질 특성과라미터들의 측정방법을 자세하게 소개하였다. 참고문헌 [11]에서는 위에서 소개한 측정방법과 함께 평가방법을 비중있게 다루고 있다. 여기에서 평가(assessment)라 함은 개별장비(EUT, equipment under test)에서 측정된 특성과라미터들이 일정 규제기준을 초과하는지를 결정하는 과정으로, 본 논문에서는 IEC 표준에서 제안하고 있는 평가방법에 대해서는 자세히 다루지 않았다. 이는 근본적으로 IEC에서 제안하는 평가방법(특히 전압요동에 대한 평가방법)을 국내에 적용하기에 그 절차가 매우 복잡하고 체계화 및 단순화가 어렵기 때문이다. 서두에서 언급한 바와 같이, IEC표준에 의한 평가절차는 모든 부하(외란발생원)에 동일한 제한치를 적용하는 것이 아니라 해당 부하의 용량에 따라 각기 다른 제한치가 적용된다. 그 과정을 좀 더 자세히 설명하면, 먼저 계통관리자가 저압계통에서 관리하고자 하는 전력품질지수의 적합성레벨을 결정하고 그 기준에 맞춰 계통레벨(전압대별) 계획레벨을 선정한다. 이후, 상위계통의 계획레벨과 전달계수(변압기를 통한 감쇄정도) 그리고 인근계통에서의 유입정도를 감안하여 전체기여분(global contribution)을 계산하고 그 전체기여분을 초과하지 않도록 해당 계통에 연계된 개별 외란원에 대한 방출한계를 배분한다. 이때 방출한계는 연계점(PCC)에서 다수의 외란원의 전체용량 대비 개별 외란원의 설비용량의 비율에 의해 결정되며 방출한계의 최소치를 정함으로써 작은 용량의 외란원에 대해 비현실적인 제한치가 설정되는 것을 방지한다[16].

향후에는 본 논문에서 소개한 내용을 토대로 연속운전 시 플리커 시뮬레이션 알고리즘의 변경과 고조파 전류 합산에 필요한 변압기 감쇄비 등 우리나라의 계통실정에 맞는 전력품질 측정방법은 물론 IEC표준에 따른 평가방법을 지속적으로 연구하고, 나아가 풍력발전을 포함한 분산전원형태의 신재생에너지원에 대한 계통연계 규제 등 다양한 응용연구를 심도있게 수행해 나갈 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2012학년도 상명대학교 교내연구비를 지원받아 수행하였음.

References

- [1] KEPCO, Technical Standard on Interconnection of Distributed Generators and Power Distribution Systems, 2012.6.27.
- [2] KEPCO, Electricity Supply Agreement: Enforcement Regulations, 2011.12.15.
- [3] Duck-Keun Ahn, Kyoung-Soo Ro, "A Method to Calculate Flicker Emission of a Grid-Connected Wind Turbine System," Proceeding of the 33rd KIEE Summer Conference 2002, pp. 310-312, 2002.07.
- [4] Jung-Chul Seo, Gi-Gab Yoon, Won-Wok Jung, Woo-Kyu Chae and Sang-Joon Kim, "Studying Power Quality Measurement Procedures of Wind Turbines According to IEC Standard," Proceeding of the 37th KIEE Summer Conference 2006, pp. 1197-1198, 2006.07.
- [5] Soo-Hwan Cho and Ji-Young Eum, "Flicker Assessment of Wind Turbine Generating System According to the IEC 61400-21 Standard," Proceeding of the 43rd KIEE Summer Conference 2012, pp. 80-81, 2012.07.
- [6] Chol-Ho So, Jae-Hee Byun, Tae-Sik Choi and Young-Ghi Kim, "A Study on Method of Powet Quality Analysis for Wind Turbines," Proceeding of the 41st KIEE Summer Conference 2010, pp. 1245-1246, 2010.07.
- [7] Jong-Joo Lee, Dong-Joon Kim and Young-Hwan Moon, "An Implementation of Real time Measurement and Assessment System for Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines," Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 59, no. 9, pp. 1560-1565, 2010.09.
- [8] A. Larsson, "Flicker Emission of Wind Turbines During Continuous Operation," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 17, no. 1, pp. 114-118, 2002.03.
- [9] J.J. Gutierrez, J. Ruiz, L.A. Leturiondo and A. Lazkano, "Flicker Measurement System for Wind Turbine Certification," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 58, no. 2, pp. 374-382, 2009.02.
- [10] F. Mendeiros, D.C. Brasil, C.A.G. Marques, C.A. Duque and P.F. Ribeiro, "Considerations on the Aggregation of Harmonics Produced by Large Wind Farms," IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power(ICHQP) 2012, pp. 364-369, 2012.
- [11] IEC 61400-21, Ed. 1: Wind turbine generator systems-Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines. 2000.06.
- [12] IEC 61000-3-3, Ed. 1.1: Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 3-3: Limits-Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current $\leq 16A$ per phase and not subject to conditional connection. 2002.03.
- [13] IEC 61000-4-15, Ed. 1.1: Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 4: Testing and measurement techniques-Section 15: Flickermeter-functional and design specifications. 2003.02.
- [14] Soohwan Cho, "Digital Implementation of the IEC Flickermeter: Its Application for Measurement and Regulation Schemes in 220V/60Hz Power System", Korea University Graduate school, Doctoral Dissertation. 2009.06.

- [15] IEC 61000-4-7, Ed. 2: Electromagnetic compatibility (EMC)-Part4-7: Testing and measurement techniques -General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. 2002.08.
- [16] IEC 61000-3-7, Ed. 1: Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 3: Limits-Section 7: Assessment of emission limits for fluctuating loads in MV and HV power systems. 1996.10.
- [17] IEC 61000-3-6, Ed. 2: Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 3: Limits-Section 6: Assessment of emission limits for the connection of distortion installations to MV, HV and EHV power systems. 2008.02.

저 자 소 개

조 수 환 (趙 秀 桓)

1976년 10월 28일생. 2002년 고려대학교 전기공학과 졸업. 2002~2004년 삼성전자 무선사업부 근무. 2009년 고려대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2009~2011년 한국원자력연구원 선임연구원. 2011년~현재 상명대학교 에너지그리드학과 조교수.

Tel : 02-781-7503

E-mail : shcho@smu.ac.kr