

계통연계 풍력발전 시스템의 플리커 지수 계산방법

안 덕 근, 노 경 수  
 동국대학교 전기공학과 / 차세대전력기술연구센터

A Method to Calculate Flicker Emission of a Grid-Connected Wind Turbine System

Duck-Keun Ahn, Kyoung-Soo Ro  
 Dept. of Electrical Engineering, Dongguk University / NPT Center

**Abstract** - The development of IEC 61400-21 provides firm basis for assessment of the impact of wind turbines on voltage quality. This paper presents analysis and modeling of the flicker emission of wind turbines. The paper concentrates on the theoretical aspects of the flicker algorithm, wind turbine characteristics and the generation of flicker during continuous operation of wind turbines. It also introduces a simplified assessment to limit the flicker emission.

그림1은 플리커미터의 구조를 나타낸다. 5개의 블록으로 나타나는 이 구조는 크게 둘로 분리할수 있다. 1) lamp-eye-brain연결 응답의 시뮬레이션과(block 2, 3, 4), 2) 플리커 시그널의 on-line 통계적 해석과 그 결과의 표현으로 나뉜다(block 5).

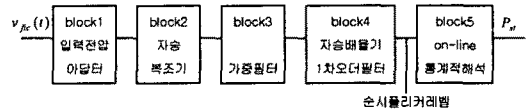


그림 1. 플리커미터의 블록 다이어그램

1. 서 론

풍력발전 장치 사이에는 때때로 전력의 저품질 전원이 고려된다. 평탄치 않은 전력생산과 길이가 긴 급전선에 기인하는 취약한 연결이 몇몇 이런 요소들이다. 평탄치 않은 전력생산뿐만 아니라 다른 요소들 또한 풍력 발전의 전력 품질에 기여하는데 이중 한요소가 플리커(flicker)이다. 전기에 관한 플리커는 수요자의 교란(부하의 변동)을 원인으로 하는 전압변동의 측정이다.

풍력발전 장치에서 플리커 발생은 기동(start-up)시에 발생하는 것뿐만 아니라, 지속운전 에에서도 발생한다. 정상적인 운전중의 플리커 발생은 풍속의 증감과 tower shadow effect같은 풍속변화에 따라 생산된 전력의 변동이 주원인이다. 적어도 취약한 계통의 경우 플리커는 풍력발전에 중대한 제한이 될 것이다.

풍력발전 시스템에서 이런 영역은 미약하게 고려돼왔었고, 최근에 이르러 기술적인 결론에 이르렀다. IEC (International Electrotechnical Commission)는 계통연계 풍력발전 시스템을 위한 전력품질 요구에 대해 지속적인 작업을 해왔고, 그 결과가 IEC 61400-21에 나타난다[3]. 이 규정은 풍력발전 장치의 전력 품질을 특성화하기 위한 명시와 특성들의 양을 정하는 측정절차를 포함한다. 또한 전력 품질에 관련된 풍력발전 장치의 요구가 주어지고 풍력발전 장치의 전력품질 평가 방법이 제안된다.

본문에서는 계통연계 풍력발전 장치 각각의 플리커 지수를 계산한 후, PCC(point of common coupling)에서의 플리커 지수를 구하는 방법을 소개한다. 그 절차로서 플리커미터(flickermeter)의 설명, 가상 그리드 사용에 관한 내용과 플리커 지수 계산방법을 설명한다. 그리고 플리커 지수의 평가를 나타낼 것이다.

2. 플리커 지수 계산

2.1 Flickermeter

플리커 레벨은 플리커지수  $P_{st}$ 와  $P_b$ (P는 'perturbation', st는 'short-term' 10분, lt는 'long-term' 2시간)로 정해진다. 플리커미터의 기능과 설계는 IEC 61000-4-15에 명시되어 있다[1].

block 1은 첫단계로서 입력전압을 기준 레벨로 스케일한다. block 2는 램프의 반응을 시뮬레이션할 목적으로 입력 전압을 자승한다. block 3은 두 개의 필터로 구성되며, 첫 번째 필터는 dc전압과 이차 주파수를 제거하고, 두 번째 필터는 인간 시각시스템과 결합된 전구의 전압 변동 주파수응답을 시뮬레이션 한다. block 4는 자승배율기와 1차 오더 low-pass필터로 구성된다. block 5는 플리커 레벨의 on-line 통계적 해석을 수행하는  $\mu$ -processor를 결합한다.

IEC 61000-4-15는 적어도 64단계를 사용하여, 적어도 6 bits 해답으로 구성되기 위한 해석을 나타낸다 [1]. 최소 샘플링 비는 초당 50 샘플이다. 단기간 플리커 지수  $P_{st}$ 는 아래처럼 다중지점 방법(multipoint method)을 사용하여 계산된다.

$$P_{st} = 0.1 \sqrt{3.14P_{0.1} + 5.25P_{1s} + 6.57P_{3s} + 28P_{10s} + 8P_{50s}} \quad (1)$$

여기서, 백분율의  $P_{0.1}, P_{1s}, P_{3s}, P_{10s}, P_{50s}$ 는 관찰기간동안 시간의 0.1, 1, 3, 10, 50% 동안 초과된 플리커 레벨이다. 첨자 s는 사용될 것인 평탄된 값을 지시한다.

$$P_{1s} = (P_{0.17} + P_{1s})/3$$

$$P_{3s} = (P_{2.2} + P_{3s} + P_{4s})/3$$

$$P_{10s} = (P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})/5$$

$$P_{50s} = (P_{30} + P_{30} + P_{30})/3$$

$P_{st}$ 는 10분간의 단기간 플리커 지수이고 12개의 연속적인  $P_{st}$ 를 이용하여 2시간 동안의 장기간 플리커 지수  $P_b$ 가 유도된다.

$$P_b = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} P_{st,k}^3} \quad (2)$$

여기서,  $P_{st,k}$ 는 단기간 플리커 지수  $P_{st}$ 의 연속적인 값이다.

순시 플리커를 측정하는 방법과  $P_{st}$ 를 계산하기 위해 요구되는 알고리즘은 상당히 복잡하며, 일반적인 해석방법으로  $P_{st}$ 를 찾는 것은 불가능하다. 그렇지만, 알고 있

는 플리커 근원으로부터 플리커의 총합계를 결정하는 방법이 있다. IEC 61000-3-7에서는 여러 가지 부하가 원인이 되는 단기간 플리커 지수의 일반적인 결합관계를 아래의 형태로 찾아왔었다[2].

$$P_{st} = \sqrt[m]{\sum_i P_{st,i}^m} \quad (3)$$

여기서,  $P_{st,i}$ 는 결합되기 위한 플리커 지수 각각의 레벨이고,  $m$ 값은 변동하는 주원인의 특성에 의존한다.  $m$ 값은 부하특성에 따라 4, 3, 3.2, 2, 1의 5가지가 있고 가장 일반적인 값은  $m=3$ 이 쓰인다.

## 2.2 플리커 지수 계산

플리커 지수의 계산은 다음절의 가상 그리드와 플리커 미터의 출력을 이용하여 가중절차를 거쳐서 계산한다.

### 2.2.1 가상그리드

풍력발전 장치의 플리커 발생을 측정하는 이상적인 방법은 계통에 어떤 변동부하도 없는 상태로 PCC(point of common coupling)에서 전압의 플리커를 측정하는 것이다. 하지만 여러 다른 수요자들이 계통망에 연결되어 있기 때문에 플리커와 전압변화 측정을 곧바로 하는 것은 불가능하므로 IEC 61400-21에서 나타나는 가상 그리드를 이용한다[3].

풍력발전 장치의 단기간 플리커는 계통에서 측정된 전류를 바탕으로 기준 그리드를 사용하여 계산될 것이고, 이 절차는 두단계로 구성된다.

첫 단계는, 시계열로 측정된 전류를 아래 있는 방정식에 따라 가상 그리드상에서 전압변화의 시계열을 계산하기 위해 사용된다.

$$v_{fc}(t) = v_0(t) + R_{fc} \cdot i_m(t) + L_{fc} \cdot \frac{d i_m(t)}{dt} \quad (4)$$

여기서,  $v_0(t)$ 는 이상 전압원,  $R_{fc}$ 와  $L_{fc}$ 는 가상 그리드의 저항과 인덕턴스이고,  $i_m(t)$ 는 선전류의 순시치이다.

이상 전압원은 다음처럼 나타난다.

$$v_0(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot V_n \cdot \sin(\alpha_m(t)) \quad (5)$$

여기서,  $V_n$ 은 그리드 공칭전압의 실효치이고,  $\alpha_m(t)$ 는 측정 전압의 기본 전기각이다.

다음 단계에서, 전압변동  $v_{fc}(t)$ 는 IEC 61000-4-15에 있는 플리커 알고리즘의 입력으로 사용된다[1].

### 2.2.2 플리커 지수 계산 절차

플리커 지수를 계산함에 있어 앞에서 언급한 내용들을 이용하여 계산하는 절차와 각 요소 값들의 측정 방법들을 IEC 61400-21은 제시하고 있다. 이 절에서는 IEC에서 언급한 방법에 기초를 두고 그 절차에 따라 플리커 지수를 계산할 것이다[3].

우선은 다음의 범위에 따라 계산에 필요한 각 요소들의 측정이 수행된다. 3개의 순시 선전류와 순시 상전압은 풍력발전 장치의 단자에서 측정한다. 측정은 cut-in 풍속과 15m/s 풍속 사이의 각 1m/s 풍속 범위에 모아지는 순시 전압과 전류의 값이 적어도 15번 10분 시계열이 되도록 취해진다. 여기서 풍속은 10분 평균값으로 측정된다. 전압과 전류의 cut-off 주파수는 적어도 400Hz 일 것이다. 지속 운전시의 플리커 계수  $\alpha(\psi_k, v_a)$ :(평가를 위해 보고될 때 각각의  $\psi_k$ 와  $v_a$ 에 따라 분류되는 플리커 계수)는 임피던스 위상각  $\psi_k = 30, 50, 70, 85 \text{ deg}$ 와 연 평균 풍속  $v_a = 6, 7.5, 8.5, 10\text{m/s}$ 에서의 99%로 지정될 것이다. 그 외의 정격 값

들은 풍력발전 장치 제조회사의 명세서에 나와있는 정보들을 사용한다.

가상 그리드에서 보여준 식(4)에 의해  $v_{fc}(t)$ 를 시뮬레이션하고, 그 결과를 IEC 61000-4-15에 있는 플리커 알고리즘의 입력으로 한다[1]. 그 결과 각 10분간의 가상 그리드 플리커 지수  $P_{st,fc}$ 가 얻어진다. 플리커 계수는 아래 수식으로 각각의 계산된 플리커 값으로 결정된다.

$$\alpha(\psi_k) = P_{st,fc} \cdot \frac{S_{k,fc}}{S_n} \quad (6)$$

여기서,  $\alpha(\psi_k)$ 는 임피던스 위상각  $\psi_k$ (PCC에서 측정)에서의 플리커 계수,  $S_n$ 은 풍력발전 장치의 정격 피상전력이고,  $S_{k,fc}$ 는 가상 그리드의 단락 피상전력으로서 다음수식으로 결정된다.

$$S_{k,fc} = \frac{V_n^2}{\sqrt{R_{fc}^2 + X_{fc}^2}} \quad (7)$$

임피던스 위상각  $\psi_k$ 는 아래와 같다.

$$\psi_k = \tan^{-1}\left(\frac{X_{fc}}{R_{fc}}\right) \quad (8)$$

IEC 61400-21에서는 평가를 위한 플리커 계수를 결정하기 위해 가중방법을 쓰고 있다[3]. 위에서 얻어진 플리커 계수는 다음의 절차를 거쳐서  $\alpha(\psi_k, v_a)$ 를 얻을 수 있다.

Rayleigh 분포에 상응하는  $i$ 번째 풍속내의 풍속 발생 빈도  $f_{y,i}$ 는 다음 방정식으로 구한다.

$$f_{y,i} = e^{-\frac{v_i}{v_a} \cdot (v_i/v_a)^{0.5}} - e^{-\frac{v_i + \Delta v}{v_a} \cdot (v_i + \Delta v)/v_a)^{0.5}} \quad (9)$$

여기서,  $v_i$ 는  $i$ 번째 풍속범위의 중간이고,  $v_a$ 는 연평균 풍속이다. 방정식 (6)의 결과에 따른 분포를 이용하여 실제 발생빈도  $f_{m,i}$ 를 계산한다.

$$f_{m,i} = \frac{N_{m,i}}{N_m} \quad (10)$$

여기서,  $N_{m,i}$ 는  $i$ 번째 풍속 범위에서 측정된 플리커 계수의 수이고,  $N_m$ 은 총 숫자이다. (9)와 (10)번 방정식을 이용하여 가중 팩터  $w_i$ 를 구한다.

$$w_i = \frac{f_{y,i}}{f_{m,i}} \quad (11)$$

위에서 열거한 수식을 이용하여 플리커 계수값의 가중 측정분포  $P_r(c(x))$ 를 계산한다.

$$P_r(c(x)) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{bin}} w_i \cdot N_{m,i,c(x)}}{\sum_{i=1}^{N_{bin}} w_i \cdot N_{m,i}} \quad (12)$$

여기서,  $N_{m,i,c(x)}$ 는  $i$ 번째 풍속 이내의  $x$ 값보다 작거나 같은 플리커 계수의 수이고,  $N_{bin}$ 은 풍속 범위의 총수이다.

$P_r(c(x))$ 에 따라 지속운전시의 풍력발전 장치의 플리커 계수  $\alpha(\psi_k, v_a)$ 는 표에 있는 계통 임피던스 위상각  $\psi_k = 30, 50, 70, 85 \text{ deg}$ 와 연 평균 풍속  $v_a = 6\text{m/s}, 7.5\text{m/s}, 8.5\text{m/s}, 10\text{m/s}$ 에서의  $P_r(c(x))$ 의 99%를 만족하는 값으로 각각 제시될 것이다. 위상각  $50^\circ$  일

때 플리커 계수의 보고형식은 아래 표와 같은 형식을 취한다.

표 1 지속운전시의 플리커 계수 보고형식(3)

계통 임피던스 위상각, $\phi_k$ (deg)	30	50	70	85
연 평균 풍속, $v_a$ (m/s)	플리커 계수, $c(\phi_k, v_a)$			
6.0		8.9		
7.5		10.1		
8.5		10.3		
10.0		10.4		

단일 풍력발전 장치의 플리커 지수  $P_{st}$ 가 구해지면 식(2)에 의해  $P_{ll}$ 를 구할수 있다. 만일 2시간 동안의 풍속의 조건이 지속적으로 같게 나타난다면 12개의  $P_{st}$ 는 같을 것이고,  $P_{ll}$ 또한 아래처럼 같게 나타날 것이다.

$$P_{st} = P_{ll} = c(\phi_k, v_a) \cdot \frac{S_n}{S_k} \quad (13)$$

여기서,  $S_n$ 은 정격 피상전력,  $S_k$ 는 단락 피상전력이다. 단일 풍력발전 장치의 플리커 계수 값에 의해 PCC 연결 풍차에서의 플리커 지수를 구하려면 다음의 합계방법으로 구한다.

$$P_{ll\Sigma} = P_{ll\Sigma} = \frac{1}{S_k} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (c_i(\phi_k, v_a) \cdot S_{n,i})^2} \quad (14)$$

### 3. 플리커 발생 제한과 평가

MV(1kV <  $V_n$  < 35kV)와 HV(35kV <  $V_n$ ) 전력 시스템의 변동부하에 대한 발생 제한 평가는 IEC 61000-3-7에 나타난다[2]. 풍력발전 장치의 플리커 지수도 이 기준을 만족하여야만 하고, 그 제한이 규정 되어있다. 식(13)과 (14)는 플리커 발생 제한을 만족하여야 한다.

$$P_{st} \leq E_{Pst} \quad (15)$$

$$P_{ll} \leq E_{Pll} \quad (16)$$

여기서,  $E_{Pst}$ ,  $E_{Pll}$ 는 관련된 PCC의 단기간과 장기간 플리커 발생 제한이다. IEC 61000-3-7은 MV시스템에서의  $E_{Pst}$ ,  $E_{Pll}$ 의 값을 아래와 같이 정의한다[2].

$$E_{Pst} = G_{PstMV} \cdot \sqrt[3]{\frac{S_i}{S_{MV}} \cdot \frac{1}{F_{MV}}} \quad (17)$$

$$E_{Pll} = G_{PllMV} \cdot \sqrt[3]{\frac{S_i}{S_{MV}} \cdot \frac{1}{F_{MV}}} \quad (18)$$

여기서,  $G_{PstMV}$ ,  $G_{PllMV}$ 는 MV시스템에서 플리커 레벨을 위한 지역 부하의 최대 전체 기여( $P_{st}$ 의 형태로 표현)이고,  $S_i$ ( $S_i = P_i / \cos \phi_i$ )는 허용전력,  $S_{MV}$ 는 MV시스템에 직접 공급되는 부하의 총 전력이다. 그리고  $F_{MV}$ 는 동기 계수로서 일반적인 값은 0.2 ~ 0.3이다.

HV시스템에서  $E_{Pst}$ ,  $E_{Pll}$ 의 값은 다음과 같다.

$$E_{Pst} = L_{PstHV} \cdot \sqrt[3]{\frac{S_i}{S_{HV}}} \quad (19)$$

$$E_{Pll} = L_{PllHV} \cdot \sqrt[3]{\frac{S_i}{S_{HV}}} \quad (20)$$

여기서,  $L_{PstHV}$ 는 HV시스템의 계획 레벨이고,  $S_{HV}$ 는 HV사용자를 위해 충당되는 HV변전소의 총 공급용량의 부분이다. MV시스템과 HV시스템의 기본 발생 레벨은 일치하며, 다음의 표와 같이 나타난다.

표 2. 기본 발생 제한(2)

$E_{Pst}$	$E_{Pll}$
0.35	0.25

플리커 지수가 구해지면 위와 같은 발생제한에 따른 평가가 이루어져야한다. 발생제한에 따른 평가 절차와 제한기준은 IEC- 61000-3-7에 나타나있다[2].

### 4. 결 론

계통연계 풍력발전 시스템에서는 계통상의 변동부하가 주원인으로 작용하는 플리커 뿐만 아니라, 풍력발전 장치의 기동과 정지시의 스위칭 동작과 지속운전 상태에서 풍속의 증감과 tower shadow effect같은 풍속 변화가 원인이 되어 풍력발전 장치 각각의 단차에서 플리커가 발생된다. 이런 플리커는 계통상에 악영향을 끼칠 것이므로, 이에 대하여 플리커 지수를 계산하여 제한 범위를 벗어나지 않도록 하는 기술적인 조치가 수행되어야 한다.

순시 플리커의 측정과  $P_{st}$ 를 계산하기 위해 요구되는 알고리즘은 복잡하다. 임의의 선택된 전압 교란으로부터  $P_{st}$ 를 결정하기 위해 일반적인 해석방법은 불가능하다.

IEC 규정은 플리커 발생에 관한 측정과 해석 절차를 제안하고, 그 결과에 따른 평가 방법을 제시한다. 이에 따른 플리커 계수를 얻고, 그 계수를 사용하여 계통연계 풍력발전 시스템의 플리커 지수를 계산할 수 있다.

#### (감사의 글)

본 연구는 과학기술부 및 한국과학재단의 ERC 프로그램을 통한 지원으로 이루어졌으며 이에 감사를 드립니다.

#### (참고 문헌)

- [1] IEC 61000-4-15, Electromagnetic Compatibility (EMC)- Part 4: Testing and Measurement Techniques - Section 15: Flickermeter- Functional and Design Specifications, 1997
- [2] IEC 61000-3-7, Electromagnetic Compatibility (EMC)- Part 3: Limits- Section 7: Assessment of Emission Limits for Fluctuating Loads in MV and HV Power Systems, 1996
- [3] IEC 61400-21, Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines, 2001
- [4] Ake Larsson, "Flicker Emission of Wind Turbines During Continuous Operation", IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL.17, NO1, MARCH 2001
- [5] JOG Tande and K Uhlen, "Wind Turbines in Weak Grids - Constraints and Solutions", CIREN 2001, 18-21 June 2001, Conference Publication No. 482 © IEE, 2001
- [6] John Olav Giæver Tande, "Impact of Wind Turbines on Voltage Quality", 0-7803-5105-3/98 © 1998 IEEE
- [7] Preben Jørgensen, John Olav Tande, Anders Vikkelsø, Per Nørgård, Jørgen S. Christensen, Poul Sørensen, Jakob Dyring Kledal, Lars Søndergård, "Power Quality and Grid Connection of Wind Turbines", CIREN 97, 2-5 June 1997, Conference Publication No.438 © IEE, 1997
- [8] P.Sørensen, T.F.Pedersen, G.Gerdes, R.Klosse, F.Santier, N.Robertson, W.Davy, M.Koulouvari, E.Morfiadakis and A.Larsson, "European Wind Turbine Testing Procedure Developments Task 2: Power Quality", Risø National Laboratory, Risø-R-1093(EN), pp.23-37, May 2001.78p.