

# SVR을 이용한 풍력 발전 시스템의 플리커 추정

반탄롱\*, 누옌 탄하이\*, 金起弘\*\*, 李東椿†

## Flicker Estimation for Wind Turbine Systems using SVR

Tan Loung Van, Thanh Hai Nguyen, Ki-Hong Kim, and Dong-Choon Lee

### 요 약

본 논문은 풍력 터빈에서 발생하는 플리커를 추정하기 위하여 SVR(Support Vector Regression)을 이용한 시뮬레이션 모델을 제시한다. SVR 훈련을 위한 입력은 전압 변동이고 출력은 플리커로 설정한다. 오프라인 훈련을 통해 출력전압과 플리커의 관계가 도출된다. 제안된 기법은 플리커를 추정하는데 필요한 데이터 양을 줄이고 또 연산시간을 감소시킨다. 제안된 알고리즘은 시뮬레이션과 실험을 통해 그 타당성이 검증된다.

### ABSTRACT

This paper presents a simulation model based on support vector regression (SVR) for flicker estimation emitted from the wind turbines. For the SVR training, the voltage variation and flicker level are selected as input and output, respectively. Through the off-line training, the relationship between the voltage variation and flicker level is derived. The required amount of data for the flicker measurement is decreased and its processing time is also reduced. The simulation and experiment results have shown that the flicker estimation is performed accurately.

**Key Words** : Fixed-speed wind turbine, Flicker, Estimation, SVR

## 1. 서 론

최근 풍력 발전 시스템은 세계적으로 급속히 성장하고 있으며 풍력으로 발생된 전력이 계통에서 차지하는 비율이 점차 증가하고 있다. 풍력발전기 출력전압은 여러 가지 요인에 의해 변동한다. 풍력터빈의 출력전압은 풍속의 변화에 많이 변동하며 이에 의해 시각적으로 깜빡거림 현상이 나타나는데 이를 플리커라고 한다<sup>[1]-[3]</sup>. 이러한 현상은 가변속 시스템보다 일정속 풍력시스템에서 더 크게 나타난다<sup>[2]</sup>.

풍속의 변화뿐만 아니라 타워 그림자(tower shadow)와 풍속 전단 효과(wind shear effect)도 발전기 출력전력을 변동시켜 플리커를 야기한다<sup>[1]-[3]</sup>. 3개의 블레이드를 가진 풍력 터빈은 1회전당 3번의 전력 강하가 발생하고 (이 주파수를 3p 주파수라 함), 3p 주파수에서 평균 전력의 20% 정도의 전력 변동이 발생한다<sup>[1]</sup>.

플리커 레벨을 계산하기 위하여 DFT(discrete Fourier transform)와 FFT(fast Fourier transform)를 적용한 방법이 연구된 바 있는데 이러한 방법은 다량의 샘플 데이터를 필요하다는 단점이 있다<sup>[3],[4]</sup>. 그리고 IEC 플리커 미터를 이용하는 방법은 순시 플리커 레벨의 온라인 통계 분석을 통하여 단기 플리커 가혹성을 측정하는데 10분간 대용량의 데이터를 저장해야 한다<sup>[5]</sup>.

†교신저자 : 정희원, 영남대 전기공학과 교수

E-mail : dclee@yu.ac.kr

\*정희원, 영남대 전기공학과 박사과정

\*\*학생회원, 영남대 전기공학과 석사과정

접수일자 : 2010. 7. 13

1차 심사 : 2010. 7. 17

심사완료 : 2010. 7. 20

본 연구에서는 SVR을 이용하여 오프라인 훈련을 통해 출력전압과 플리커 지수와의 관계를 유도하는 새로운 알고리즘을 제시한다. 이 방법은 필요한 데이터의 양을 줄이고 연산시간도 감소시키며 정확도도 유지한다. 농형 유도발전기를 사용하는 일정속 풍력터빈 시스템에 대하여 시뮬레이션과 실험을 수행하여 제시된 알고리즘의 타당성을 검증한다.

## 2. 풍력 터빈 시스템

### 2.1 농형 유도 발전기

계통 연계형 농형 유도발전기는 일반적으로 일정속 방식으로 운전된다. 발전기의 회전자는 샤프트를 통해 풍력 터빈과 기계적으로 연결되고 고정자는 계통과 직접 연결된다. 계통으로부터 발전기 여자 전류가 공급되므로 저풍속에서 낮은 역률로 운전된다. 무효전력을 공급하기 위하여 고정자에 외부 커패시터 뱅크가 연결된다. 계통 정상 상태시, 로터 속도는 발전기 슬립의 변화에 따라 변하게 되며, 슬립의 범위는 1~5%이다.

특정 풍속에서 일정속 방식의 풍력 터빈은 최대 전력 변환 계수에서 운전될 수 있다. 그러나 풍속이 변화할 때, 발전기는 최대 전력을 발생할 수 없다. 일정속 운전으로 인하여 풍속의 변화에 대해 기계적 스트레스를 많이 받게 되고, 발전기는 가변속 방식보다 출력 전력의 변동이 더 커지게 된다.

### 2.2 블레이드 모델링

풍력 터빈의 공기역학적 모델은  $C_p(\lambda, \beta)$  곡선의 특성을 가진다.  $C_p$ 는 전력 변화 계수이며, 주속비( $\lambda$ )와 블레이드 피치각( $\beta$ )의 함수이다. 주속비( $\lambda$ )는 다음 식으로 정의된다<sup>[6]</sup>.

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (1)$$

여기서  $R$ 은 블레이드 반지름[m],  $\omega$ 는 풍력 터빈 속도[rad/s],  $v$ 는 풍속[m/s]이다.

풍력 터빈의 기계력 전력방정식은 식 (2)와 같이 나타낸다<sup>[6]</sup>.

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (2)$$

여기서  $\rho$ 는 공기밀도[kg/m<sup>3</sup>],  $A = \pi \cdot R^2$ 은 블레이드 회전면적[m<sup>2</sup>],  $\beta$ 는 블레이드 피치각[degree]이다.

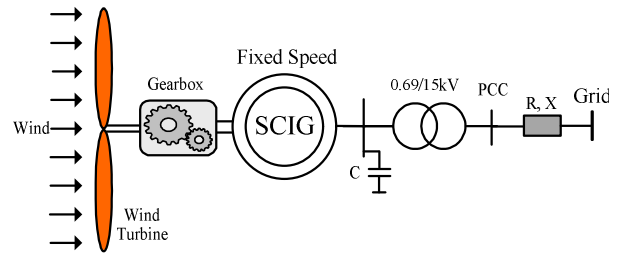


그림 1 일정속 방식의 계통 연계형 풍력 터빈 시스템  
Fig. 1 Grid-connected fixed-speed wind turbine

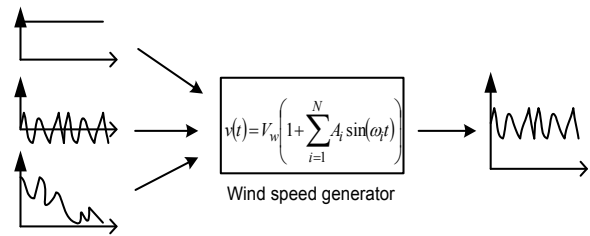


그림 2 풍속 모델링  
Fig. 2 Wind speed modeling

### 2.3 풍속 모델링

풍속은 그림 2와 같이 여러 가지 주파수 성분의 합으로 나타낼 수 있으며, 식 (3)으로 표시된다<sup>[7]</sup>.

$$v(t) = V_w \left( 1 + \sum_{i=1}^N A_i \sin(\omega_i t) \right) \quad (3)$$

여기서  $v(t)$ 는 시간  $t$ 에 대한 순시 풍속이며,  $V_w$ 는 평균 풍속,  $N$ 은 고조파 샘플 수,  $\omega_i$ 는 고조파의 각주파수,  $A_i$ 는 고조파 진폭이다.

각주파수  $\omega_i$ 에서 고조파 진폭은 식 (4)로 표현된다.

$$A_i = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{1}{2} [\phi_u(\omega_i) + \phi_u(\omega_{i+1})] \cdot [\omega_{i+1} - \omega_i]} \quad (4)$$

여기서,  $\phi_u$ 는 Dryden spectra이다. 대기 난류의 파워 스펙트럼은 Dryden spectra에 의해 근사화될 수 있고 longitudinal Dryden 파워 스펙트럼은 식 (5)와 같이 정의된다<sup>[7]</sup>.

$$\Phi_u(\omega) = \frac{L_u}{V_o} \frac{2\sigma^2}{\pi} \frac{1}{1 + \left( L_u \frac{\omega}{V_o} \right)^2} \quad (5)$$

여기서,  $\sigma$ 는 난류 강도,  $L_u$ 는 난류의 기간,  $\omega$ 는 고조파 각주파수이다. 평균 풍속에 의해 발생된 토크( $T_t$ )는 식 (6)으로 표현된다.

$$T_t = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_p(\lambda, \beta) V_w^2 \quad (6)$$

## 2.4 타워 그림자와 전단 효과

타워 그림자 효과는 타워가 바람의 흐름을 방해함으로써 발생한다. 이것은 타워의 구조 때문에 바람의 흐름이 영향을 받고, 블레이드가 타워를 지나는 위치에서 토크가 감소하게 된다. 타워 그림자 효과로 인한 토크 진동은 식 (7)과 같이 모델링되며 이것이 그림 3에 보인다<sup>[6]</sup>.

$$T_{shadow} = -t_{shadow} \cdot \cos \psi \quad (7)$$

여기서  $\psi$ 는 타워로부터 블레이드의 회전각이며,  $-\psi_r \leq \psi \leq \psi_r$ 이다.

한편, 풍속은 고도에 따라 차이가 있으므로 블레이드가 회전함에 따라 블레이드가 받는 토크가 상하 위치에 따라 달라진다. 이러한 현상을 전단 효과라 하며 이것 또한 토크의 진동을 발생시킨다. 전단 효과로 인한 토크 변화는 식 (8)과 같이 나타내며 이것이 그림 4에 보인다<sup>[6]</sup>.

$$T_{shear} = -t_{shear} \cdot \cos \psi \quad (8)$$

여기서  $t_{shear}$ 는 바람 전단의 계수이다.

타워 그림자와 전단 효과를 고려하여 블레이드에서 발생하는 토크는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$T_i = T_t + T_{shear} + T_{shadow} \quad (9)$$

## 2.5 피치각 제어

MW급 풍력 터빈의 경우 고풍속에서 블레이드의 피로를 야기하는 과도한 입력 토크로부터 터빈의 보호를 위해 피치각을 조절하여야 한다. 풍력 발전 시스템은 일반적으로 풍속 5~25[m/s]에서 운전되고, 12~16[m/s]의 풍속 범위에서 정격 전력을 발생한다<sup>[8]</sup>. 블레이드의 피치각은 정격 풍속 이상의 범위에서 발전기출력을 정격으로 유지하기 위해 제어된다. 그림 5에 블레이드 피치 제어 블록도를 보이며 여기서는 단순한 PI 제어를 사용한다<sup>[8]</sup>.

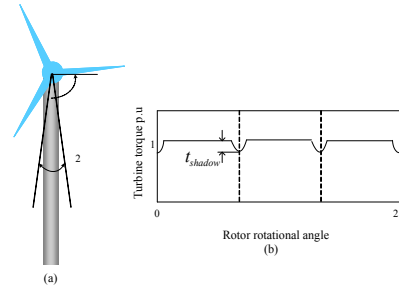


그림 3 타워 그림자 효과  
Fig. 3 Tower shadow effect

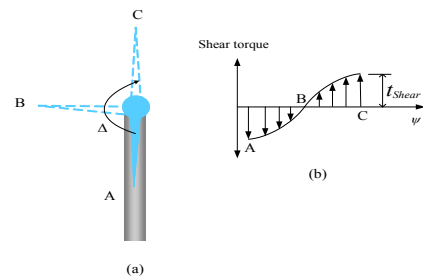


그림 4 풍속 전단 효과  
Fig. 4 Wind shear effect

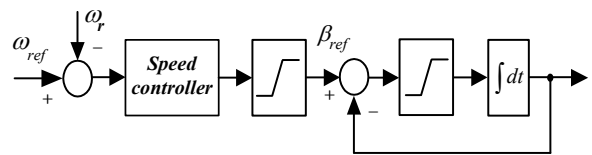


그림 5 피치각 제어 블록도  
Fig. 5 Block diagram of pitch angle control

## 3. 플리커 미터

IEC 표준(IEC 61000-4-15)<sup>[9]</sup>에 따라, 플리커 미터 모델을 이용하여 단기 플리커 가혹성( $P_{st}$ )이 계산된다. 그림 6의 블록도는 플리커 미터의 구성을 나타내는데 다음과 같이 두 부분으로 나눌 수 있다.

- 입력 전압과 램프-눈-뇌 고리 (lamp-eye-brain chain)의 시뮬레이션 응답 스케일링 (블럭 2, 3, 4)
- 플리커 신호와 그 결과의 온라인 통계 분석 (블럭5)

각 블록의 역할은 다음과 같다.

- 블럭 1 : 입력 전압을 내부 기준 레벨로 스케일링함
- 블럭 2 : 램프 반응을 시뮬레이션하기 위해 입력 전압을 제곱

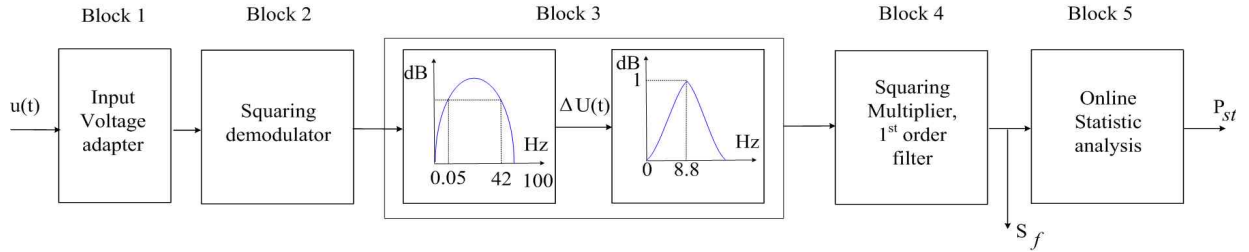


그림 6 플리커 미터 모델의 블럭도  
Fig. 6 Block diagram of the flicker meter model

- 블럭 3 : 두 개의 직렬형 필터로 구성  
첫 번째 필터는 블럭 2에서 재조성된 직류 성분과 기본 주파수의 두 배의 리플성분을 제거한다. 가스 주입 필라멘트 램프의 정현과 전압 변동에 대한 주파수 응답을 시뮬레이션하기 위하여 가중 필터가 사용된다.
- 블럭 4 : 시정수 0.3s의 1차 저역통과필터와 차승배율기로 구성되며 출력은 순시 플리커 민감도( $S_f$ ).
- 블럭 5 : 플리커 레벨의 통계 분석을 수행  
먼저, 플리커 레벨의 누적 확률 함수를 세운다. 단기 플리커 가혹성( $P_{st}$ )은 식 (10)으로 정의된다.

$$P_{st} = \frac{1}{10 \sqrt{K_{0.1}P_{0.1} + K_{1s}P_{1s} + K_{3s}P_{3s} + K_{10s}P_{10s} + K_{50s}P_{50s}}} \quad (10)$$

$$K_{0.1} = 3.14, \quad K_{1s} = 5.25, \quad K_{3s} = 6.57, \\ K_{10s} = 28, \quad K_{50s} = 8$$

여기서  $P_{0.1}, P_{1s}, P_{3s}, P_{10s}, P_{50s}$ 는 관측 주기 동안에 0.1%, 1%, 3%, 10%, 50% 초과된 플리커 레벨이고, 아래 첨자 's'는 평활화된 값을 나타낸다. 이 플리커 레벨은 다음 식으로 나타내어진다.

$$P_{1s} = \frac{(P_{0.7} + P_1 + P_{1.5})}{3} \quad (11)$$

$$P_{3s} = \frac{(P_{2.2} + P_3 + P_4)}{3} \quad (12)$$

$$P_{10s} = \frac{(P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17})}{5} \quad (13)$$

$$P_{50s} = \frac{(P_{30} + P_{50} + P_{80})}{3} \quad (14)$$

$P_{0.1}$ 은 급격히 변화하지 않으므로 지수 계산에서 무시할 수 있다.

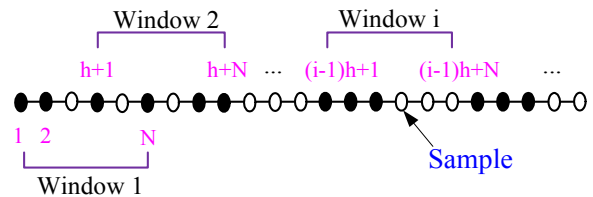


그림 7 전압 측정을 위한 창 이동법  
Fig. 7 Moving window method to measure the voltage

## 4. 플리커 추정

### 4.1 간접 복조 기법

각 주기마다 (N개의 샘플) 전압 변동 ( $\Delta V(t)$ ) 실효값의 평균치를 계산하기 위하여 간접 복조 기법 (IDM : Indirect Demodulation Method)이 사용된다<sup>[10],[11]</sup>. 샘플 측정법은 그림 7과 같이 처음 주기(window)에서 N개의 샘플(1~N)을 측정하고, 다음 측정은 처음 주기에서 h개의 샘플이 이동된 N개의 샘플(h+1~h+N)을 측정한다. 이와 같이 반복적으로 샘플 주기가 바뀔 때, 각 샘플링 주기에서 다음과 같은 샘플을 측정한다.

- window 1 (1번째 샘플 창) : 1~N
- window 2 (2번째 샘플 창) : h+1~h+N
- ⋮
- ⋮
- ⋮
- window i (i번째 샘플 창) : (i-1)h+1~(i-1)h+N

이러한 방법으로 샘플을 측정하여 샘플 데이터의 용량을 줄일 수 있다<sup>[11]</sup>. 여기서 샘플은 PCC 전압이며, 전압 변동( $\Delta V(t)$ ) 실효값은 다음 식과 같다.

$$\Delta V_s [i] = \sqrt{\frac{\sum_{m=(i-1)h+1}^{m=(i-1)h+N} \Delta V^2[m]}{N}} \quad (15)$$

실효값의 평균치는 다음과 같다.

$$\Delta V_{average} = \frac{\left( \sum_{i=1}^H \Delta V_s [i] \right)}{H}, \quad (16)$$

$i = 1, 2, \dots, H.$

여기서  $H$ 는 샘플 주기의 수이다.

## 4.2 SVR 기법

회귀방정식 기법(Regression Method)은 훈련데이터로부터 시스템 입·출력 사이의 미지 함수를 추정하기 위한 알고리즘이다. 오프라인에서 시스템의 입·출력 관계가 정확하게 추정되면, 온라인에서 시스템 입력 값으로부터 출력을 예측하는데 사용된다<sup>[12]-[14]</sup>.

오프라인 훈련을 위한 입출력 데이터가  $(y_1, x_1), (y_2, x_2), \dots, (y_n, x_n)$ 로 주어진다. 여기서  $x_i$ 와  $y_i$ 는 입력과 출력 벡터,  $n$ 은 훈련 데이터의 개수를 나타낸다. 회귀 문제의 목적은 불분명한 변수를 정확하게 찾을 수 있는 함수를 결정하는 것이다.

SVR의 일반적인 함수는 다음 식과 같다<sup>[12]</sup>.

$$f(x) = (w \cdot \Phi(x)) + b \quad (17)$$

여기서  $w$ 는 가중치 벡터,  $b$ 는 바이어스,  $\Phi$ 는 비선형 함수, ‘·’는 벡터 내적을 나타낸다. 가장 작은 크기의  $w$ 를 찾기 위해 다음 식과 같이 최적화 문제를 구성한다.

Minimize

$$R_{reg}(f) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \Gamma(f(x_i) - y_i) \quad (18)$$

subject to

$$\begin{aligned} y_i - w \cdot \Phi(x_i) - b &\leq \varepsilon + \zeta_i^* \\ w \cdot \Phi(x_i) + b - y_i &\leq \varepsilon + \zeta_i \\ i = 1, 2, \dots, n \quad \zeta_i, \zeta_i^* &\geq 0 \end{aligned} \quad (19)$$

여기서  $\Gamma(\cdot)$ 는 비용 함수,  $\varepsilon$ 는 편차이며,  $C$ 는 훈련 데이터에 대해 얼마나 편차를 허용할 것인가를 결정한다. 즉 모델의 복잡도( $\|w\|^2$ )를 결정한다. 일반적으로  $\varepsilon$  편차 외부에 훈련데이터가 존재하더라도 최적화의 문제가 성립하도록 하기 위하여 슬랙 변수(Slack Variable,  $\zeta_i, \zeta_i^*$ )를 도입한다.

식 (18)과 (19)의 문제를 해결하기 위하여, 라그랑지(Lagrange) 함수를 식 (20)과 같이 구성한다.

$$\begin{aligned} L_p(w, b, \zeta_i, \zeta_i^*) &= \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^n \Gamma(f(x_i) - y_i) \\ &+ \sum_i \alpha_i (y_i - w \cdot \Phi(x_i) - b - \varepsilon - \zeta_i) \\ &+ \sum_i \alpha_i^* (-y_i + w \cdot \Phi(x_i) + b - \varepsilon - \zeta_i^*) \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 라그랑지 승수는  $\alpha_i, \alpha_i^* > 0$ ,  $\zeta_i, \zeta_i^* > 0$ 이다. 우선 식 (18)은 변수  $(w, b, \zeta_i, \zeta_i^*)$ 에 관하여 최소화되어야 하고, 라그랑지 승수  $(\alpha_i, \alpha_i^*)$ 에 관하여 최대화되어야 한다. 그러므로  $L_p$ 의 편미분은 변수에 관하여 0이 되어야 한다.

$$\frac{\partial L_p}{\partial w} = 0 \rightarrow w = \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) \cdot \Phi(x_i) \quad (21)$$

$$\frac{\partial L_p}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial L_p}{\partial \zeta_i^*} = 0 \rightarrow C = \zeta_i^* \quad (23)$$

$$\frac{\partial L_p}{\partial \zeta_i} = 0 \rightarrow C = \zeta_i \quad (24)$$

최적화 문제는 다음 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Max_{\alpha_i, \alpha_i^*} & - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) (\alpha_j - \alpha_j^*) K(\alpha_i, \alpha_j) \\ & + \sum_{i=1}^n y_i (\alpha_i - \alpha_i^*) - \varepsilon \sum_{i=1}^n (\alpha_i + \alpha_i^*) \end{aligned} \quad (25)$$

$K$ 는 커널 함수(Kernel Function)로 다음 식으로 정의된다<sup>[12]</sup>.

$$K(x_i, x) = \Phi(x_i) \cdot \Phi(x) \quad (26)$$

식 (25)의 최적화 문제는 다음 식으로 변환된다.

$$\begin{aligned} f(x) &= \sum_{i=1}^n (\alpha_i - \alpha_i^*) \cdot K(x_i, x) + b \\ \text{subject to} \quad & 0 \leq \alpha_i \leq C, 0 \leq \alpha_i^* \leq C \end{aligned} \quad (27)$$

훈련 데이터 중 0이 아닌 라그랑지 승수  $(\alpha_i - \alpha_i^*)$ 가 실질적인 문제 해결에 사용된다. 이 훈련 데이터가 지원벡터(support vectors)이다. 식 (27)의 바이어스 항  $b$ 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$b = \text{mean} \left( \sum_{i=1}^n \{y_i - (\alpha_i - \alpha_i^*)K(x_i, x_j)\} \right) \quad (28)$$

근사화 문제를 반영하여 선정된 커널 함수(RBF : Gaussian radial basis function)는 다음과 같다.

$$K(x_i, x) = \exp \left( - \frac{(x_i - x)^2}{2\sigma^2} \right) \quad (29)$$

여기서  $\sigma$  : Gaussian width

### 4.2 전압 플리커 추정

전압 플리커의 가장 중요한 주파수 성분은 사람의 눈에 인식되는 8.8[Hz]이다. 그림 6의 블록 3에서 8.8 [Hz]가 중심 주파수로 선정된다. 창이동법(window shift method)을 이용하여 각 주기의 N개의 전압 변동 샘플을 측정하고 실효값 및 실효값의 평균치를 계산한다. 이 평균치는 SVR의 입력으로 선정되어 오프라인 훈련이 실시된다.

SVR 훈련을 위한 입력은 전압 변동분 실효값의 평균치이고, 출력은 단기 플리커 가혹성( $P_{st}$ )이다. 오프라인 훈련 동안, 커널 함수  $K(x_i, x_j)$ 가 모든 지원 벡터에 대해 계산되고, 라그랑지 승수( $\alpha_i, \alpha_i^*$ )가 식 (20)과 같은 2차 시스템을 최소화하도록 결정된다. 마지막으로 바이어스( $b$ )가 결정된다

그림 8은 플리커 추정 순서도를 나타내며, 추정 순서는 다음과 같다.

- (1) 식 (15)를 이용한 실효값 계산
- (2) 식 (16)을 이용한 측정 기간이내의 실효값의 평균치 계산
- (3) 훈련 데이터( $x_i, y_i$ ) 수집, 파라미터 ( $\epsilon, \sigma, C$ ) 선정
- (4) RBF  $K(x_i, y_i)$  계산
- (5) 식 (20)을 이용한 라그랑지 승수 ( $\alpha_i, \alpha_i^*$ ) 판정
- (6) 바이어스  $b$  계산
- (7) 식 (27)을 이용하여 입력에 대한 출력( $P_{st}$ ) 계산

## 5. 시뮬레이션 결과

그림 1과 같이 농형 유도 발전기를 가지는 일정속 풍력 터빈 시스템은 변압기(0.69/15 kV)를 통하여 계통(15kV, 60Hz)에 연계된다. 풍력 터빈은 풍속의 변화와 타워 그림자, 풍속 전단 효과를 고려하여 모델링되었다.

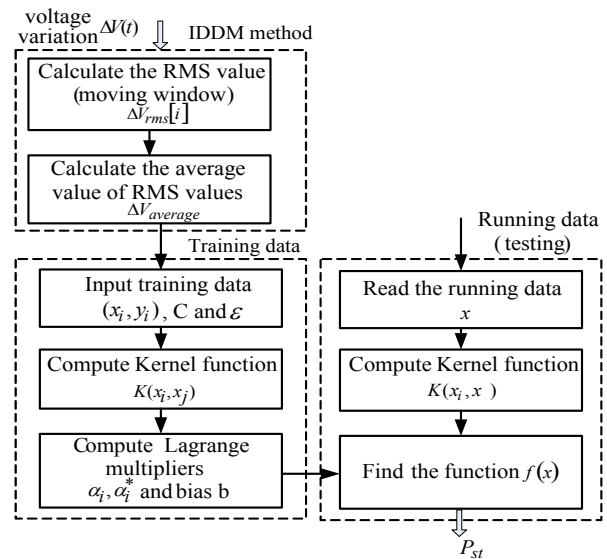


그림 8 SVR을 이용한 플리커 추정 순서도  
Fig. 8 Flowchart of flicker estimation using SVR

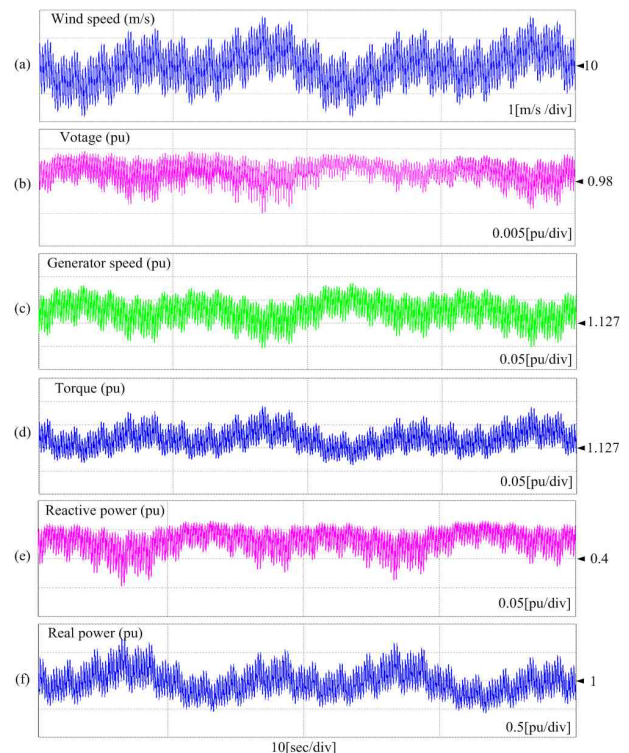


그림 9 풍속 변화에 대한 시스템 응답  
(a)풍속, (b)PCC 전압, (c)발전기 속도, (d)터빈 토크, (e)무효전력, (f)유효전력  
Fig. 9 System responses at wind speed variation  
(a)wind speed, (b)PCC voltage, (c)generator speed, (d)turbine torque, (e)reactive power, (f) real power



오프라인 훈련을 위하여 가변 풍속 조건에서 PCC 전압과 플리커를 측정한다. 측정된 PCC 전압의 변동분의 실효값의 평균치( $\Delta V$ )를 구해 SVR 훈련 입력으로 사용하고, 측정된 플리커( $P_{st}$ )를 출력으로 사용한다. 훈련을 통해 SVR의 각 파라미터를 선정한다. 2[MW] 농형 유도 발전기 파라미터를 부록에 나타낸다.

그림 9의 (a)는 평균 10 [m/s]의 풍속, (b)는 PCC 전압, (c)는 발전기 속도, (d)는 터빈 토크, (e)는 무효전력, (f)는 유효전력을 나타낸다. 풍속의 변화와 타워 그림자 효과, 풍속 전단 효과 때문에 PCC 전압, 발전기 속도, 토크, 유·무효 전력이 변동됨을 보인다.

그림 9와 같은 조건에서 PCC 전압을 측정하고 SVR 기법을 이용하여 온라인에서 플리커를 추정한다. 표 1은 SVR을 이용한 플리커 추정값과 실제 측정된 플리커를 나타낸다. 제안된 알고리즘을 통하여 추정된 값은 오차 약 5% 이내의 정확성을 보인다.

표 1 전압 변동에 따른 단기 플리커 가혹성( $P_{st}$ )  
Table 1 Short-term flicker severity( $P_{st}$ ) according to voltage deviation

Voltage deviation $\Delta V$ (pu)	Short-term flicker severity( $P_{st}$ )		
	Measurement	Estimation	Error (%)
0.008159095	0.182443	0.173313	5.004302714
0.008283503	0.182699	0.181423	0.698416521
0.008433918	0.183807	0.191091	3.96285234
0.009314735	0.245967	0.243344	1.066403217
0.010426938	0.291906	0.301928	3.43329702

### 6. 실험 결과

그림 10 (a)는 실험 구성도를 나타내며, 3[kW] 3상 농형 유도기가 M-G 세트로 구성되며, 3상 유도전동기(터빈부) 제어를 위하여 back-to-back 컨버터와 TMS320VC33 제어보드가 사용되었다. (b)는 실험에 사용된 M-G 세트이다. PCC 전압 측정과 플리커 계산을 위한 제어보드와 플리커 측정을 위한 플리커 미터(FLUKE 435)는 그림 10 (c)에 보인다. 풍력 터빈 시뮬레이터로 3상 유도 전동기가 풍속과 타워 그림자, 풍속 전단효과를 고려한 토크 제어 모드로 운전된다.

그림 11은 터빈 토크 변동을 모델링하기 위하여 평균 풍속 10 [m/s]와 타워 그림자 및 풍속 전단 효과로 인한 토크 변동을 보인다. 풍속이 (a)와 같이 변화할

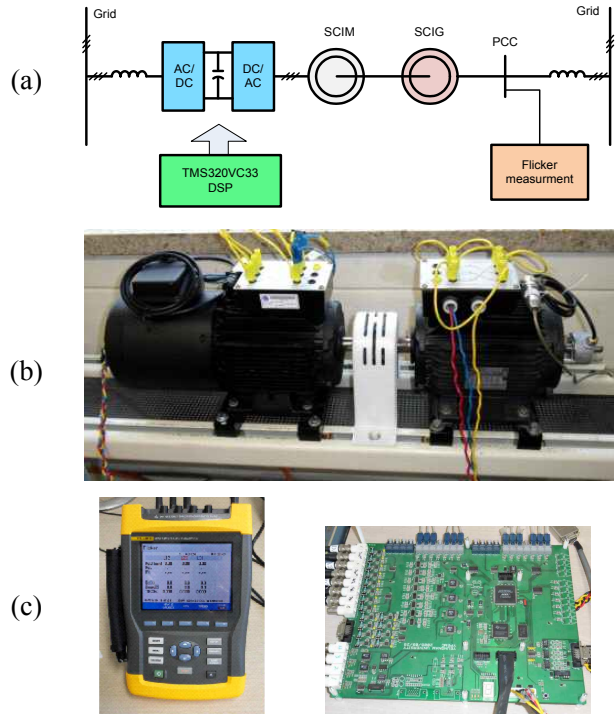


그림 10 플리커 추정을 위한 실험 구성도  
(a)실험 구성도, (b)M-G 세트, (c)플리커 미터(FLUKE 435)와 DSP 제어 보드

Fig. 10 System configuration for flicker estimation  
(a)system configuration, (b)M-G set, (c)flicker meter(FLUKE 435) and DSP control board

때, (b)는 풍속에 의한 토크, (c)는 풍속 전단 효과에 의한 토크 변동, (d)는 타워 그림자 효과에 의한 토크 변동이다. 그러므로 (e)와 같이 토크 변동의 합은 풍력 터빈의 전체 토크로 결정되며, 터빈 시뮬레이터로 사용된 유도전동기의 토크 지령이 된다.

그림 11과 같은 풍속 및 터빈 토크 조건에서 그림 12의 (a)는 그림 11 (e)의 토크 지령에 대한 실제 터빈 토크를 나타내며, (b)는 유도 발전기의 속도, (c)는 PCC 전압, (d)는 무효전력, (e)는 유효전력을 나타낸다. 풍속 및 타워 효과, 풍속 전단효과에 의하여 발전기 속도와 PCC 전압, 유·무효 전력은 변동하게 된다.

위의 조건으로 운전되는 일정속 풍력 발전 시스템에서 PCC 전압을 측정하여 플리커를 추정하였다. 오프라인 훈련을 위한 파라미터는  $C=100, \varepsilon=0.003$ 로 선정되었고 RBF 커널 함수의  $\sigma$ 는 0.00035로 선정되었다.

그림 13은 선정된 파라미터로 근사화된 RBF 커널함수를 나타낸다. 중앙의 실선은 훈련 모델, +는 사용되지 않은 훈련 데이터, ⊕는 지원벡터를 각각 나타낸다.

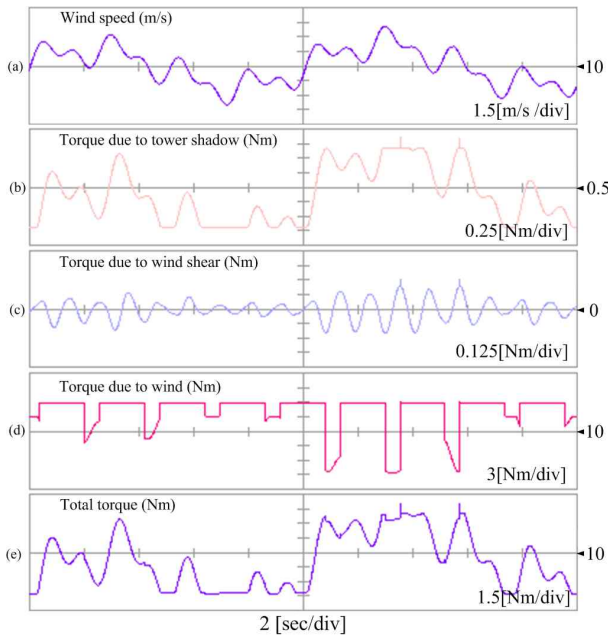


그림 11 터빈 토크 변동  
 (a) 풍속, (b) 풍속에 의한 토크, (c) 풍속 전단효과에 의한 토크, (d) 타워 그림자에 의한 토크, (e) 전체 토크  
 Fig. 11 Turbine torque variations  
 (a) wind speed, (b) torque due to wind speed, (c) torque due to wind shear, (d) torque due to tower shadow, (e) total torque

플리커 미터를 사용하여 측정된 플리커와 제안된 SVR을 이용하여 추정된 플리커는 표 2와 같다. 추정치는 약 3.5% 이내의 오차 범위에 든다.

표 2 단기 플리커 가혹성 ( $P_{st}$ ) 추정  
 Table 2 Estimating short-term flicker severity ( $P_{st}$ )

Voltage deviation $\Delta V$ (pu)	Short-term flicker severity ( $P_{st}$ )		
	Measurement	Estimation	Error (%)
0.00848782	0.20796950	0.20567267	1.10440714
0.00876839	0.22645850	0.22361916	1.25380147
0.00880296	0.22226183	0.22529638	1.36530416
0.00895208	0.23068571	0.23031992	0.15856639
0.00911936	0.24753702	0.23896044	3.46476660
0.00963109	0.27189380	0.26845911	1.26324690
0.00988302	0.28543168	0.28639415	0.33719803
0.00992725	0.28925601	0.28698307	0.78578834

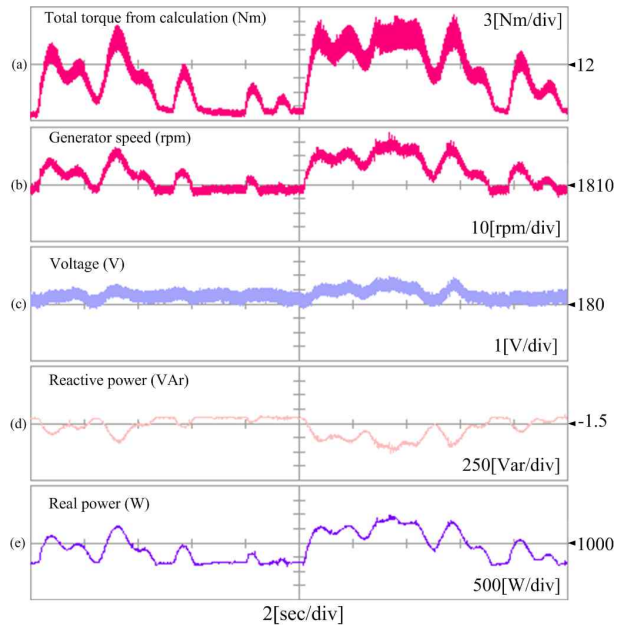


그림 12 풍력 발전 시스템의 성능  
 (a) 터빈 토크, (b) 발전기 속도, (c) PCC 전압, (d) 무효전력, (e) 유효전력  
 Fig. 12 Performances of wind power system  
 (a) total torque from calculation, (b) generator speed, (c) PCC voltage, (d) reactive power, (e) real power

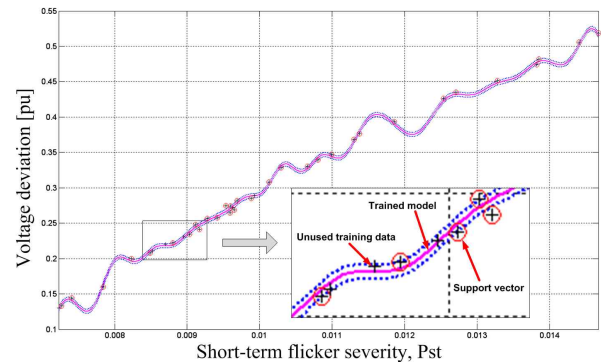


그림 13 전압 변동과 단기 플리커 가혹성 곡선  
 Fig. 13 Curve of voltage deviation and short-term flicker severity for training

## 7. 결 론

본 논문에서는 풍력발전 시스템에서 SVR을 이용한 플리커 추정 기법이 제안되었다. SVR을 이용한 추정 기법은 전압 변동( $\Delta V$ )과 단기 플리커 가혹성( $P_{st}$ )을 입·출력으로 사용하여 오프라인으로 훈련하여 그 관계



를 미리 구하고, 온라인으로 플리커를 추정할 수 있다. 일정속 유도발전기 시스템에 대하여 시뮬레이션과 실험을 실시하였고 플리커 추정치는 오차 범위 5% 이내의 정확도를 보였다. 제안한 기법은 샘플 데이터를 줄여 메모리를 줄일 수 있고 또한 연산시간을 줄일 수 있다. 또한 주어진 계통시스템에 대해 온라인으로 플리커 예측이 가능하므로 플리커 저감 대책을 강구하는데 유용하게 쓰일 수 있다.

본 연구는 한국서부발전(주)의 지원에 의하여 기초전력연구원(08310) 주관으로 수행된 과제임.

## 참고 문헌

- [1] A. Larsson, "Flicker emission of wind turbines during continuous operation", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 17, No. 1, pp. 114-118, 2002, Mar.
- [2] A. Larsson, "Flicker emission of wind turbines caused by switching operations", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 17, No. 1, pp. 119-123, 2002, Mar.
- [3] C. V. Moreno, H. A. Duarte, and J. U. Garcia, "Propagation of flicker in electric power networks due to wind energy conversions systems", *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 17, No. 1, pp. 267-272, 2002, Jun.
- [4] C. J. Wu and T. H. Fu, "Effective voltage flicker calculation algorithm using indirect demodulation method", *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen. Trans. Distrib.*, Vol. 150, No. 4, pp. 493-500, 2003.
- [5] T. Keppler, N. Watson, and J. Arrillaga, "Computation of the short-term flicker severity index", *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 15, No. 4, pp. 1110-1115, 2000, Oct.
- [6] M. Chinchilla, S. Arnaltes, and J. L. Rodriguez - Amenedo, "Laboratory set-up for wind turbine emulation", *IEEE ICIT Conf. Proc.*, Vol. 1, pp. 553-557, 2004, Dec. 8-10.
- [7] C. Nichita, D. Luca, B. Dakyo, and E. Ceanga, "Large band simulation of the wind speed for real time wind turbine simulators", *IEEE Trans. Energy Conv.*, Vol. 17, No. 4, pp. 523-529, 2002, Dec.
- [8] V. Akhmatov, "Analysis of dynamic behavior of electric power systems with large amount of wind power", Ph.D. dissertation, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark, 2003, Apr.
- [9] Electromagnetic Compatibility (EMC)—Part 4: Testing and Measurement Techniques—Section 15: Flickermeter—Functional and Design Specifications, IEC Std. 61 000-4-15, 1997, Nov.
- [10] M. P. Papadopoulos, S. A. Papathanassiou, S. T. Tentzerakis, and N. G. Boulaxis, "Investigation of the flicker emission by grid connected wind turbines", in *Proc. of 8th Int. Conf. Harmonics Quality of Power*, Vol. 2, Athens, Greece, pp. 1152-1157, 1998, Oct. 14-16.
- [11] T. L. Van, T. H. Nguyen, K.-H. Kim, and D.-C. Lee, "SVR-based flicker estimation for wind power systems", *IPEC Proc.*, pp. 1824-1829, 2010, Jun.
- [12] V. Kecman, Learning and soft computing support vector machines, neural networks, and fuzzy logic models. The MIT press, 2001.
- [13] D. Bi, Y. F. Li, S. K. Tso, and G. L. Wang, "Friction modeling and compensation for haptic display based on support vector machine", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 51, No. 4, pp. 491-500, 2004, Apr.
- [14] A. G. Abo-Khalil, and D.-C. Lee, "MPPT control of wind generation systems based on estimated wind speed using SVR", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 55, No. 3, pp. 1489-1490, 2008, Mar.

## 부 록 1

표. A.1 2[MW] 유도발전기 파라미터 (시뮬레이션)

Parameters	Value
Rated voltage	690[V <sub>I-1 rms</sub> ]/60[Hz]
Number of poles	4
Stator/Rotor resistance	0.048/0.316 [pu]
Stator/Rotor leakage inductance	0.075/0.227 [pu]
Magnetizing inductance	3.8 [pu]
Inertia	200 [kg.m <sup>2</sup> ]

표 A.2 3[kW] 유도발전기 파라미터 (실험)

Parameters	Value
Rated voltage	220[V <sub>I-1 rms</sub> ]/60[Hz]
Number of poles	4
Stator/Rotor resistance	0.033/0.0576 [pu]
Stator/Rotor leakage inductance	0.07/0.07 [pu]
Magnetizing inductance	1.607 [pu]
Inertia	0.0071 [kg.m <sup>2</sup> ]

저 자 소 개



**반탄롱(Tan Loung Van)**

1979년 8월 20일생. 2003년 베트남 호치민대 전기전자공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 현재 영남대 대학원 전기공학과 박사과정.



**누옌탄하이(Thanh Hai Nguyen)**

1980년 10월 7일생. 2003년 베트남 호치민대 전기전자공학과 졸업. 2010년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



**김기홍(金起弘)**

1982년 4월 16일생. 2008년 영남대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



**이동춘(李東椿)**

1985년 서울대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1987년 ~1988년 대우중공업 중앙연구소 주임연구원. 1998년 미국 텍사스 A&M Univ. 방문연구교수. 2004년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 방문연구교수. 현재 영남대 전기공학과 교수. 당 학회 편집이사.