

Continuation Time Integration (CTI)-Based Time Domain Simulation Analysis for Wind Farms

조성구* · 송화창† · 이장호**
(Sung-Koo Cho · Hwachang Song · Jangho Lee)

Abstract -As a result of increasing environmental concern, the penetration of renewable power on power systems is now increasing. Wind energy can be considered as the most economical energy sources to generate electricity without depletion of fossil fuel. To devise adequate control strategies for wind farm, time domain simulation analysis needs to be performed. This presents a continuation time integration (CTI)-based time domain simulation algorithm for wind farm with doubly fed asynchronous generator (DFAG) connected to the external power systems. This paper depicts how to time trajectories are traced using CTI-based time domain simulation. Also this paper describes the possibilities of hierarchical control for wind farm output limitation, and the coordinated control has been designed by hierarchical control structured from central control level to wind farm control board and to an individual wind turbine level. Finally it shows an illustrative example of time domain simulation result with two test systems through case study.

Key Words : Wind model, 연속법, 유효출력 제한, Time domain simulation analysis, 풍력발전단지

1. 서론

최근 세계적으로 석유, 석탄과 같은 화석연료의 고갈에 대한 위기의식과 온난화현상의 심각성에 따른 이산화탄소 배출 감소 의무로 인해 세계 여러 나라들의 신재생에너지에 관심과 연구가 늘어나고 있다. 이러한 신재생에너지 중에 전력계통에 연계하여 운전되는 발전자원으로 풍력발전이 주목 받고 있다. 전력 시스템에 포함된 다른 요소들과 마찬가지로 전기 네트워크에 연계된 풍력발전단지 및 해당 설비들은 전력 시스템 신뢰도의 심각한 저하를 야기하지 않아야 풍력발전의 지속적인 계통 투입이 가능하다.

기존의 풍력 발전기는 일반적인 원동기 기반의 동기발전기 시스템과는 달리 자연의 풍속에 의존적이므로 발전량에 대한 예측이 어렵고 발전력 분배가 어려운 특성을 가지고 있었다. 그러나 최근 풍력발전 단지에 설치되고 있는 풍력 발전기는 바람의 에너지로부터 얻을 수 있는 최대 발전 가능량과 제한 능력에 따른 한계 값 사이에 그 출력을 제어할 수 있다 [1-3]. 따라서 유효/무효 출력 제어가 가능한 풍력 발전기들로 구성되어 있는 풍력발전단지에 대한 효율적인 운용 기술에 대한 연구가 필요하다.

본 논문은 풍력 발전단지에 대한 제어 전략 수립을 위한 기본적인 연구로서 이중 여자 발전기를 포함하는 풍력발전

단지를 연속 시적분 (CTI, continuation time integration) [4-5]법을 이용한 pu (per-unit) 기반의 전기 네트워크 시모의 해석 알고리즘에 대하여 설명하고자 한다. 최근 전력계통 해석 패키지 [6-7]에서 풍력발전기 모델을 포함하고 있으나 확률분포의 특성을 가지고 있는 바람 모델을 고려하지 않고 있다. 본 논문에서는 Weibull 확률밀도 분포 기반의 바람모델 [8-9]과 기존에 제안된 이중여자 풍력 발전기를 해석하기 위한 모델들 [10-11]을 개발한 시모의 해석 알고리즘에 포함시켰다. 또한 본 논문에서는 개발한 시모의 해석 알고리즘을 이용하여 풍력단지의 운용 기술로 중요하게 인지되고 있는 풍력발전단지 유효전력 출력제한을 목적으로 하는 단지 내 발전기들에 대한 계층적 제어 방안을 제안한다. 본 계층적 제어 방안은 발전단지의 출력에 대한 지정값과 실제 계통 주입전력의 에러를 입력으로 하고 PI 제어를 통해 각 발전기의 유효전력 레벨 신호를 생성하고 이를 각 발전기의 용량에 의존적으로 발전기 출력을 제어하도록 하는 것이다. 사례연구에서는 CTI법 기반 풍력발전단지 시모의 알고리즘을 시험 계통에 적용하여 단지의 유효전력 출력 제어 방안에 대한 적용 가능성에 대하여 설명하고 추가적으로 전력계통 해석 패키지 TSAT [12]의 결과와 비교하고자 한다.

2. CTI 기반 시모의 해석 알고리즘

본 절에서는 풍력발전단지 시모의 해석 기법에 대하여 설명하고자 한다. 동적 모델을 포함하는 전기 네트워크는 빠른 응답특성을 가지고 있기 때문에 전기자기적인 과도현상이 아주 빠르게 감쇠된다고 가정하였을 때 미분·대수 방정

† 교신저자, 정회원 : 서울과학기술대 전기공학과 조교수
E-mail : hcsong@seoultech.ac.kr

* 준 회원 : 서울과학기술대 전기공학과 석사과정

** 비 회원 : 군산대학교 기계자동차공학부 조교수

접수일자 : 2009년 12월 28일

최종완료 : 2010년 8월 22일

식 (DAE, differential Algebraic Equations) 으로 표현할 수 있다. 다음 식은 전력 시스템을 DAE 모델로 간단하게 표현한 것이다.

$$\dot{x} = f(x, y) \tag{1.a}$$

$$0 = g(x, y) \tag{1.b}$$

여기에서 x 와 $f(\cdot)$ 는 동적모델들의 다이내믹스를 표현하는 상태변수 및 미분 방정식 함수를 의미하며, y 와 $g(\cdot)$ 는 전기 네트워크 방정식을 나타내는 대수변수 및 대수 방정식 함수이다. 전기 네트워크는 대수방정식으로서 전력조류방정식에 해당하며 그 외의 시스템 요소는 해당 동적 특성을 표현하는 미분방정식으로 표현한다.

초기 운전점으로부터 시스템 동요에 대한 응답 특성을 알아보기 위하여 시적분을 수행한다. 여러 가지 형태의 시적분 알고리즘의 적용될 수 있으나 그 하나의 Trapezoidal 규칙을 적용하여 각 적분스텝을 이산화한 식은 다음과 같이 표현할 수 있다. 여기에서 아래첨자 $n, n+1$ 은 현재 스텝과 다음 적분 스텝에 해당하며 h 는 적분 스텝을 표현한다.

$$\dot{x}_{n+1} = f(x_{n+1}, y_{n+1}) \tag{2.a}$$

$$0 = g(x_{n+1}, y_{n+1}) \tag{2.b}$$

$$x_{n+1} = x_n + h \frac{\dot{x}_{n+1} + \dot{x}_n}{2} \tag{2.c}$$

식 (2)에 의한 시적분은 SI (simultaneous Implicit) 법에 해당하는 것이다. x_{n+1}, y_{n+1} 을 동시에 구하는 것으로 PE (partitioned explicit)법과는 달리 동적 모델과 네트워크 모델과의 연계 에러 (interface error)가 적어 보다 정확한 시모의 해석을 수행할 수 있다.

다음은 우측항의 지정값이 0이 되도록 식 (2)를 변형한 것이다.

$$F_1(\cdot) = -\dot{x}_{n+1} + f(x_{n+1}, y_{n+1}) = 0 \tag{3.a}$$

$$F_2(\cdot) = g(x_{n+1}, y_{n+1}) = 0 \tag{3.b}$$

$$F_3(\cdot) = -x_{n+1} + x_n + h \frac{\dot{x}_{n+1} + \dot{x}_n}{2} = 0 \tag{3.c}$$

식 (3)으로부터 실제 변수는 $(x_{n+1}, y_{n+1}, \dot{x}_{n+1})$ 이며 각 시모의 단계에서 상태벡터의 1차 미분 (\dot{x}_{n+1}) 도 계산될 것이라는 것을 알 수 있다.

식 (3)에 대한 해를 구하기 위해 일반적으로 적용되는 뉴턴 반복을 적용할 경우 필요한 수정방정식은 다음과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_x & f_y & -I \\ g_x & g_y & 0 \\ -I & 0 & \frac{h}{2}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{n+1} \\ \Delta y_{n+1} \\ \Delta \dot{x}_{n+1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F_1(\cdot) \\ F_2(\cdot) \\ F_3(\cdot) \end{bmatrix} \tag{4}$$

여기에서 I 는 단위행렬을 의미하며, $(\Delta x_{n+1}, \Delta y_{n+1}, \Delta \dot{x}_{n+1})$ 는 식 (4)의 우측항에 해당하는 residual을 줄이기 위한 상태변수의 변화분을 표현하는 수정벡터이다.

본 논문에서는 연속법을 적용한 시적분 기법 [4-5]을 적용하여 시모의 알고리즘을 구현하였으며, 본 방법은 그림 1에서 설명하고 있는 바와 같이 궤적 예측과정과 궤적 수정과정으로 나눌 수 있다.

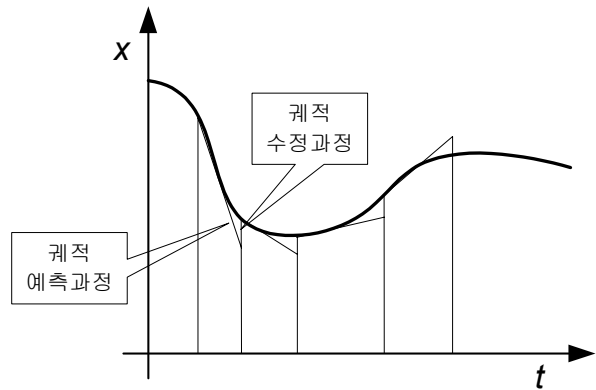


그림 1 연속 시적분의 예측 및 수정 과정
Fig. 1 Predictor and corrector steps in CTI

2.1 궤적 예측과정

예측과정은 현재 $t=t_0$ 에서의 해로부터 시계적 (time trajectory)을 따라 나타나는 다음 해를 예측하는 과정이다. 현재 해를 $[x_n, y_n, \dot{x}_n]$ 로 가정한다. 현재해로부터 다음해를 예측하기 위하여 다음 식이 적용된다.

$$\begin{bmatrix} f_x & f_y & -I & 0 \\ g_x & g_y & 0 & 0 \\ -I & 0 & \frac{hI}{2} & N \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx_{n+1} \\ dy_{n+1} \\ dx_{n+1} \\ dh_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$N \equiv \frac{\dot{x}_n}{2} + \frac{\dot{x}_{n-1}}{2}$$

여기에서 e_k 는 k 번째 성분 만에 1에 해당하고 나머지는 0으로 채워져 있는 단위벡터를 의미한다. 선형방정식 (5)의 해는 현재 해에서 시적분 스텝 증가에 대한 접선벡터이며 이 벡터는 다음 식에 의해 정규화된다.

$$T \equiv \frac{1}{\|dx_{n+1} dy_{n+1} \dot{dx}_{n+1} dh_{n+1}\|} \begin{bmatrix} dx_{n+1} \\ dy_{n+1} \\ \dot{dx}_{n+1} \\ dh_{n+1} \end{bmatrix} \tag{6}$$

다음으로 T 를 이용하여 다음 스텝에서의 해는 다음과 같이 예측된다.

$$\begin{bmatrix} x_{n+1}^{(0)} \\ y_{n+1}^{(0)} \\ \dot{x}_{n+1}^{(0)} \\ h_{n+1}^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ \dot{x}_n \\ h_n \end{bmatrix} + \sigma T \tag{7}$$

여기에서 σ 는 스텝크기를 표현한다.

2.2 궤적 수정과정

식 (7)의 예측된 결과로부터 N-R 반복법을 이용하여 궤적의 다음 해를 푼다. 따라서 식(8)의 방정식은 수정방정식으로 이 식을 우측항의 residual의 절댓값의 최대값이 지정된 수렴허용 한계 내로 들어올 때까지 식 (8)을 반복적으로 풀어 해를 구한다.

$$\begin{bmatrix} f_x & f_y & -I & 0 \\ g_x & g_y & 0 & 0 \\ I & 0 & \frac{hI}{2} & N \\ e_k & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_{n+1} \\ \Delta y_{n+1} \\ \Delta \dot{x}_{n+1} \\ \Delta h_{n+1} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} F_1(\cdot) \\ F_2(\cdot) \\ F_3(\cdot) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$N \equiv \frac{\dot{x}_n}{2} + \frac{\dot{x}_{n+1}}{2}$$

식 (8)의 자코비안은 예측과정의 것과 같은 형태이며, 식 (8)로부터 구한 수정벡터를 이용해 해를 다음과 같이 갱신한다.

$$\begin{aligned} x_{n+1}^{(k+1)} &= x_{n+1}^{(k)} + \Delta x_{n+1}^{(k)} \\ y_{n+1}^{(k+1)} &= y_{n+1}^{(k)} + \Delta y_{n+1}^{(k)} \\ x_{n+1}^{(k+1)} &= \dot{x}_{n+1}^{(k)} + \Delta \dot{x}_{n+1}^{(k)} \\ h_{n+1}^{(k+1)} &= h_{n+1}^{(k)} + \Delta h_{n+1}^{(k)} \end{aligned} \quad (9)$$

3. 풍력발전기 모델 및 바람모델

본 논문에서 적용한 풍력발전기 모델은 문헌 [5-6]에서 제안한 이중 여자 비동기 발전기 (DFAG)를 기반으로 하는 모델로서 회전자 주파수, 전압, 피치각 제어가 포함되어 있다. DFAG는 로터를 가변속 회전하여 풍속의 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 발전기로 그림 3과 같이 고정자측은 계통에 직접 연결하고 회전자측도 컨버터 시스템을 통하여 계통과 연결한다. 이중 여자 발전기의 제어는 컨버터시스템을 이용하여 회전자 측 q축 전류를 통해 회전자 속도 제어, 회전자 측 d 축 전류를 통해 발전기 단자 전압 제어, 피치각(Pitch angle) 제어를 포함하고 있다.

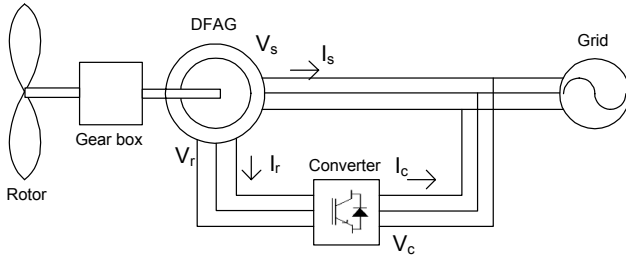


그림 3 이중 여자 비동기 발전기 모델
Fig. 3 Doubly fed asynchronous generator model

3.1 발전기 모델

그림 3과 같이 이중 여자 풍력 발전기는 정속도 풍력발전기와는 다르게 고정자와 회전자(컨버터를 통해)가 모두 계통에 연결되어 있기 때문에 계통으로 주입되는 유효, 무효 전력은 고정자 측 전류 I_s 와 컨버터 측 전류 I_c 에 의해 좌우된다.

풍력발전기에서 계통으로 주입되는 유효전력 무효전력은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$P = v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs} + v_{dc}i_{dc} + v_{qc}i_{qc} \quad (10.a)$$

$$Q = v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs} + v_{qc}i_{dc} - v_{dc}i_{qc} \quad (10.b)$$

여기서, 아래첨자 d 와 q 는 전기적인 동기 속도로 회전하는

하나의 기준 축과 동일한 상 및 90° 앞서는 성분을 각각 의미한다. 식 (10)에서 v_{ds}, v_{qs} 는 각각 고정자 전압의 d축과 q축 성분을 나타내고, i_{ds}, i_{qs} 는 각각 고정자 전류의 d축과 q축 성분을 표현한다. 그리고 v_{dc}, v_{qc} 는 각각 변환기 출력 전압의 d축과 q축 성분을 의미하고, i_{dc}, i_{qc} 는 각각 변환기 출력 전류의 d축과 q축 성분을 나타낸다.

또한, 컨버터에서 계통으로 흐르는 전력은 아래의 식으로 표현된다.

$$P_c = v_{dc}i_{dc} + v_{qc}i_{qc} \quad (11.a)$$

$$Q_c = v_{qc}i_{dc} - v_{dc}i_{qc} \quad (11.b)$$

그리고 회전자와 컨버터 사이에 흐르는 유효 및 무효 전력은 다음 식으로 표현될 수 있다.

$$P_r = v_{dr}i_{dr} + v_{qr}i_{qr} \quad (12.a)$$

$$Q_r = v_{qr}i_{dr} - v_{dr}i_{qr} \quad (12.b)$$

위의 식을 컨버터에서의 손실이 없다고 가정한다면 위 식은 다시 아래와 같이 쓸 수 있다. 컨버터와 계통 사이에 흐르는 무효전력은 제어방법에 따라 다르지만 일반적으로 0으로 놓는다. 곧 이 말은 계통과 연결된 컨버터에서는 오직 유효전력의 전력 주입만 있으며, 따라서 이중 여자 발전기와 계통간의 무효전력 송전은 오직 고정자 측에서만 일어난다 [10].

$$P_c = P_r \quad (13.a)$$

$$Q_c = 0 \quad (13.b)$$

따라서 풍력발전기에서 계통에 주입되는 유효전력, 무효전력은 최종적으로 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$P = v_{ds}i_{ds} + v_{qs}i_{qs} + v_{dr}i_{dr} + v_{qr}i_{qr} \quad (14.a)$$

$$Q = v_{qs}i_{ds} - v_{ds}i_{qs} \quad (14.b)$$

다음으로 권선형 유도 발전기가 발전하는 전기적 토크를 구할 수 있다.

$$T_e = x_m (i_{qr}i_{ds} - i_{dr}i_{qs}) \quad (15)$$

여기에서 x_m 은 유도기 등가모델의 자화 인덕턴스에 따른 리액턴스를 의미한다.

일반적으로 발전기 회전자의 각속도의 변화량 $\dot{\omega}_m$ 은 식 (15) 과 같이 발전기 회전자의 기계적 토크와 발전기의 전기적 토크의 차로 이루어진 아래의 회전 방정식으로 계산된다.

$$\dot{\omega} = (T_m - T_e)/2H_m \quad (16)$$

여기서 H_m 관성상수이다.

3.2 회전자 속도 전기적 제어 모델

풍력 발전기의 가변속 운전은 터빈의 최대의 효율을 얻기 위해 회전자 속도를 제어함으로써 넓은 바람 속도 범위에서 운전이 가능하다. 다음의 식 (17)은 회전자 q축 전류와 발전기의 전기적 토크와의 관계를 보여주고 있다 [7].

$$T_e = - \frac{x_m V}{x_s + x_m} i_{qr} \quad (17)$$

위 식으로부터 회전자 q축 전류로 발전기 전기적 토크를 제어할 수 있음을 알 수 있다. 여기서 V 는 발전기의 단자전압을 의미하며, x_s 는 유도기 등가모델의 고정자 권선 리액턴스를 나타낸다.

다음 식은 회전자 q축 전류 제어에 대한 미분방정식을 나타내고 있다.

$$\dot{i}_{qr} = \left(-\frac{x_s + x_m}{x_m V} P_w^*(\omega_m) / \omega_m - i_{qr}\right) \frac{1}{T_e} \quad (18)$$

여기에서 T_e 는 시정수를 나타내며 P_w^* 는 그림 4에서 회전 속도에 따른 유효출력 지정값을 의미한다.

이러한 회전자 q축 전류의 제어는 그림 4의 회전자 속도에 대한 출력 특성 그래프에 따른다. 이 그래프에 의해서 이중 여자 발전기는 발전기의 유효 전력 출력 제어를 수행할 수 있다. 다시 말해 동기 속도 이하 영역에서는 회전자의 속도를 따른 최대 유효전력 출력 가능한 값 따라 최적의 에너지를 얻기 위한 회전자 속도 제어가 수행된다. 동기 속도 이상의 영역에서는 발전기 유효전력을 정격으로 제한되는 제어가 수행된다.

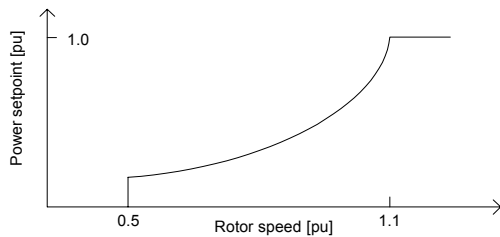


그림 4 이중 여자 발전기의 회전자 속도에 대한 출력 특성
Fig. 4 Optimal rotor speed versus power characteristic of DFIG

3.3 발전기 단자전압 제어

이중 여자 발전기는 회전자축 d축 전류를 이용하여 발전기의 단자전압 및 무효전력을 제어할 수 있다. 다음 식은 발전기 단자전압을 위한 회전자 d축 전류 제어를 표현하는 방정식이다.

$$\dot{i}_{dr} = K_V(V - V_{ref}) - V/x_m - i_{dr} \quad (19)$$

여기서 V_{ref} 는 단자전압 지정값을 나타내고 K_V 는 전압제어 이득을 의미한다.

3.4 피치각 제어 모델

피치각 제어기는 오직 높은 바람의 영역 즉 회전자 회전 속도가 동기 속도이상 (super-synchronous)의 영역에서만 동작한다. 이 제어기에서는 높은 속도의 바람이 불어서 회전자 속도가 동기속도 이상으로 빨라졌을 때 발전기 회전자 속도를 동기 속도 근처로 제한해주는 역할을 수행한다. 또한 높은 속도의 바람이 지속적으로 불었을 때 잠정적으로 회전자 과부하에 걸려 전기적, 기계적 손상을 줄 수 있기 때문에 이러한 현상을 막기 위하여 피치각 제어가 수행된다. 이러한 피치각 제어로 출력 계수 (power coefficient)를 조정하여 바람 에너지에서 터빈 에너지로 전환되는 에너지 P_{ex} 를 감소시킨다. 그림 5는 피치각 제어의 블록 다이어그램을 나타내고 있다.

3.5 Weibull 분포 기반 바람 모델

Weibull 분포의 누적분포함수는 다음의 식으로 표현된다 [8-9].

$$F(v_w) = 1 - e^{-(v_w/c)^k} \quad (20)$$

여기서 c 와 k 는 각각 스케일 계수와 형상 계수를 나타낸다. 식 (20)을 변형하여 Weibull분포에 대한 재현 기대 풍속은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_w(t) = -c[\ln(1 - F(v_w))]^{1/k} \quad (21)$$

특정 바람에 대한 c 와 k 가 주어진 상태에서, 식 (21)의 $(1 - F(v_w))$ 을 무작위로 선택하도록 하여 시계열 데이터를 생성한 후 최종적으로 다음의 식으로 바람 시계열 데이터를 구한다.

$$v_m(t) = (1 + v_w(t) - v_{wm})v_{wa} \quad (22)$$

여기서 $v_m(t)$ 는 바람 모델 시계열 데이터 출력이며 v_{wm} 은 앞에서 구한 바람 시계열 데이터의 평균값을 의미한다. 식 (22)에서 v_{wa} 는 해당 풍력발전기 출력의 초기값에 대응하는 풍속을 나타낸다.

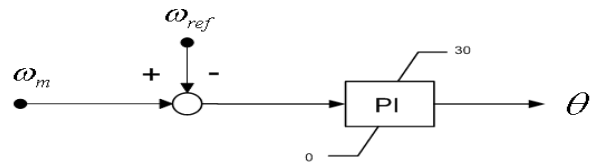


그림 5 피치각 제어기 모델
Fig. 5 Pitch angle controller model

4. 풍력발전 단지 출력 제어모델

풍력발전 시스템이 연계된 외부 전력계통이 설비 고장으로 인하여 안전도 측면에서 심각한 상태에 있을 때, 대규모 풍력단지의 유효전력 출력 값 (P_{inj})이 아주 클 경우 어떠한 내·외부의 원인으로 인하여 해당 출력의 순간적으로 급감하는 상황이 발생하면 외부계통에 큰 충격을 주게 된다. 이러한 상황에서 계통 신뢰도 유지를 위한 대책방안은 대규모 풍력발전 단지의 유효전력 출력을 어느 값 (P_{max})이하로 감소시켜 예측 가능한 값으로 제한하는 것이다. 실제로 스페인에서는 이러한 권한을 송전 시스템 운영자 (System Operator, SO)에 주고 있다 [13].

풍력발전단지에 출력 제한 값(P_{max})이 주어지면 각 풍력 발전기에 대한 출력감소량이 분배되어야하며, 이를 위해 출력 감소량 제어는 풍력발전단지 효율적 운영측면에서 결정되어야 한다. 따라서 이러한 발전기 출력 제어는 풍력발전단지의 유효/무효전력 협조 제어의 범주에 해당하며 외부계통이 약한 경우에서 뿐 아니라 운전 효율성을 고려한 일반적인 운전조건에서의 단지 내의 각 발전기 간의 협조 제어에 대한 연구가 필수적으로 수행되어야 한다.

본 연구에서는 풍력발전단지 유효전력 출력 제어의 한 기법으로써 PI제어 기반 협조제어로부터 유효전력 출력을 제한하는 계층형 제어 기법을 제안하고자 한다. 그림 6은 풍력발전단지 유효 및 무효 출력 계층 제어 블록다이어그램을 간단하게 나타내고 있다.

그림 6에서와 같이 풍력발전단지의 계층형 제어는 크게 아래와 같이 풍력단지 제어단과 풍력발전기 제어단으로 나

눌 수 있다. 먼저 SO가 풍력발전단지의 출력량을 지정해 주면 상위 단계에 있는 풍력발전단지 제어기는 SO로부터 $P_{desired}^{WF}$ 와 실제 풍력발전단지의 출력 P_{meas}^{WF} 를 입력으로 받아 에러를 계산하고 이 신호를 가지고 P_{level} 신호를 결정한다. P_{level} 과 $P_{m/M}$ 신호를 이용해 각 풍력발전기의 발전 지정량을 결정한다. 하위 단계에 있는 풍력발전기 제어기는 현재 풍력발전기의 출력량과 지정량을 비교하여 에러를 만들고 적분기를 통해 각 풍력발전기의 감소량을 결정한다.

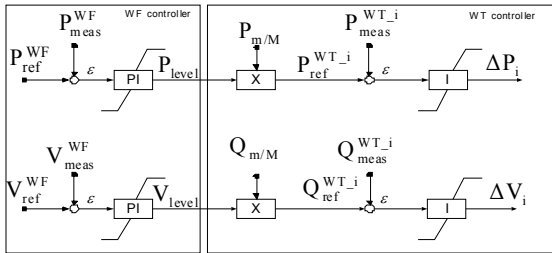


그림 6 풍력발전단지 계층 제어 블록 다이어그램
Fig. 6 Block diagram of Wind Farm hierarchical control

본 연구에서는 풍력발전단지 유효 출력 제한 기법 중 하나의 방법으로 회전자 q축 전류를 제어하여 풍력 발전기의 유효전력출력을 제한하는 기법을 적용하였다. 회전자 제어기 모델에서와 그림 4의 이중 여자 발전기의 회전자 속도에 대한 출력 특성을 통해 각 풍력발전기의 유효전력 출력 제어를 수행할 수 있다. 그림 6에서의 각 풍력발전기의 감소량 신호 ΔP 는 그림 4에 나타나있는 각 풍력발전기의 이중 여자 발전기의 회전자 속도에 대한 출력 특성의 입력에 해당하는 유효전력 출력 값을 ΔP 만큼 낮춤으로서 유효전력 출력 제어를 수행할 수 있다.

5. 사례연구

5.1 상용 패키지 TSAT 결과와의 비교 검증

5.1에서 나타내어진 사례연구 결과의 신뢰성 확보 및 발전기 상태 변수 및 출력의 응답 특성 시뮬레이션 결과의 타당성을 입증하기 위해 전력계통 동적안정도 해석에 적용되고 있는 TSAT [11]의 결과와 비교하였다. 또한 본 연구에 적용된 모델링을 통하여 발전기 모델을 TSAT UDM (user defined model)으로 구현하였으며, 그림 7은 검증을 위해 구현한 TSAT UDM 블록도를 나타내고 있다.

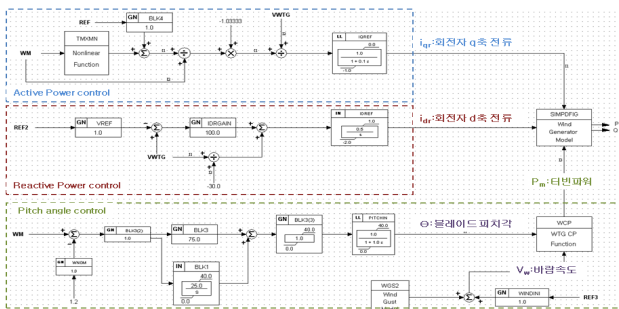


그림 7 TSAT UDM을 이용한 풍력발전기 제어 블록도
Fig. 7 Wind turbine control block diagram using TSAT UDM

그림 8은 TSAT과의 검증작업에 고려된 시험 계통도이다. 본 검증에서는 풍력발전단지를 하나의 풍력발전기로 대가화되어진 모델로 나타내어 풍력단지 모선에 연결하였고, 동기발전기를 포함한 모선을 기준 모선으로 설정하였다.

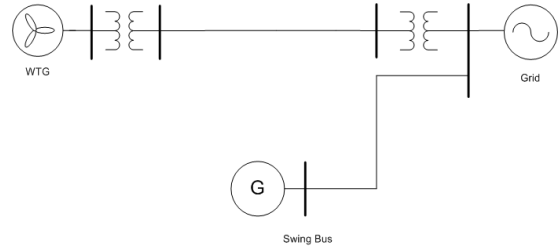


그림 8 동기발전기 및 풍력발전기를 포함한 시험 계통
Fig. 8 A test system including synchronous generators and WT

그림 9에서는 TSAT에서 구현된 바람 모델을 나타내고 있다. TSAT에서는 웨이블 분포를 이용한 바람 모델과 같이 실제 바람과 유사한 바람모델이 제공되지 않는다. 따라서 다음과 같이 초기 바람속도에서 20초동안 4m/s 증가하는 하나의 경우를 만들어 본 모델과 TSAT모델에 똑같이 적용하여 발전기 상태 변수 및 출력의 응답 특성을 비교 및 검증하였다.

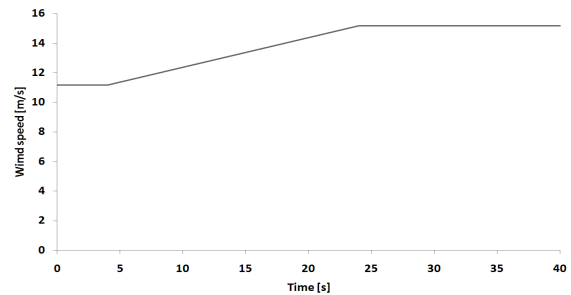


그림 9 TSAT에 구현된 바람 모델
Fig. 9 Wind model implemented by TSAT

그림 10은 바람의 변화에 따른 회전자 각속도의 응답 특성을 TSAT 모델과 본 연구에 적용된 모델 비교를 통하여 나타내고 있다.

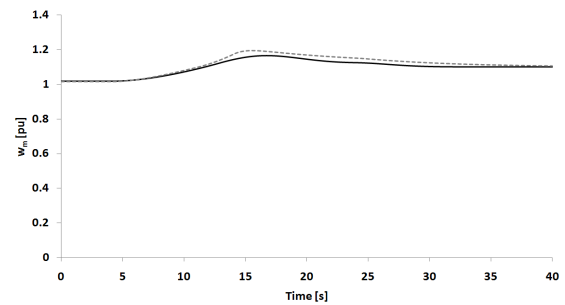


그림 10 회전자 각속도 비교
Fig. 10 Comparison of rotor angular speed

그림 10에서 실선으로 표시된 그래프는 TSAT UDM 모델 시뮬레이션 결과이고 점선으로 나타낸 것이 본 연구에서 개발된 알고리즘을 적용한 결과를 나타내고 있다. 정격 회전자 각속도는 1.1[pu]로 회전자 각속도가 정격을 넘어가면 (Super Synchronous) 모드로 들어가 피치각 제어가 동작하여 아래 그림과 같이 정격으로 제어되고 있다. 그림 11-13은 바람의 변화에 따른 각 발전기 모델의 상태변수 및 출력을 그래프로 나타낸 것이다.

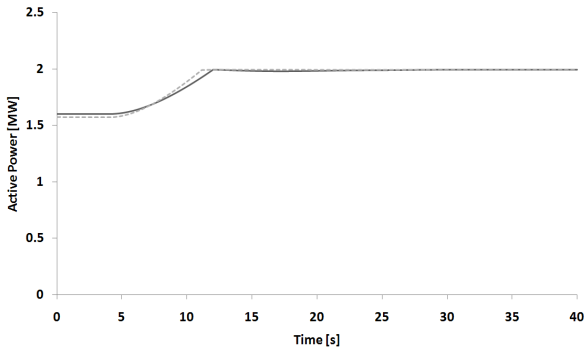


그림 11 유효전력 출력 비교
Fig. 11 Comparison of active power outputs

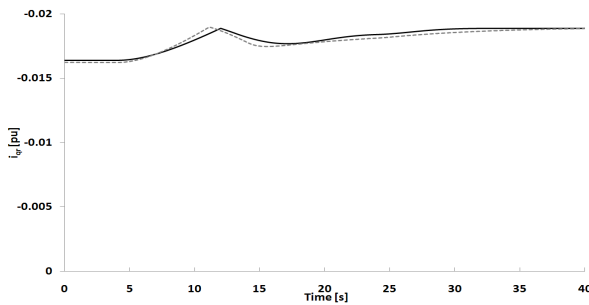


그림 12 회전자 q축 전류의 비교
Fig. 12 Comparison of q-axis rotor currents

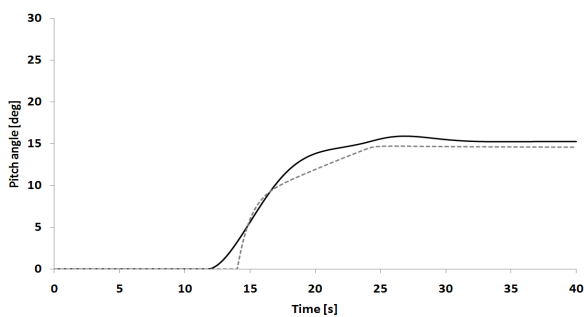


그림 13 피치각의 비교
Fig. 13 Comparison of pitch angles

본 알고리즘을 적용한 결과와 TSAT의 결과를 비교하였다. 약간의 오차가 존재하나 TSAT UDM모델과 본 연구에 적용된 모델의 동적 특성은 일치한다고 볼 수 있다.

5.1 풍력발전기 출력 및 상태변수 응답 특성

본 논문에서 제안한 이중 여자 풍력 발전기를 포함한 풍력 발전단지 시뮬의 해석 알고리즘을 5-모선 시험 계통과 풍력발전단지 출력 제어에 적용한 결과를 설명하고자 한다. 그림 14는 본 풍력발전단지의 5모선 시험 계통도를 나타내고 있다.

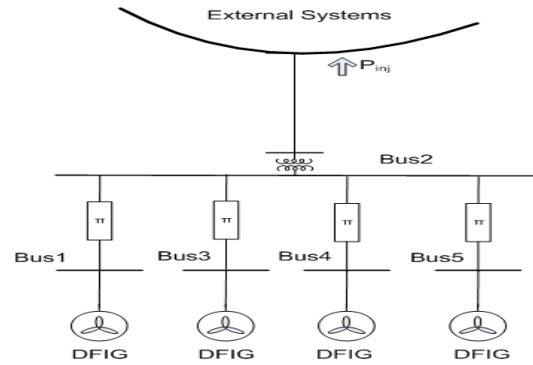


그림 14 5모선 풍력발전단지 시험 계통
Fig. 14 Test system of 5-bus wind farm

풍력발전단지 5모선 시스템은 4기의 풍력발전기를 4개의 모선에 연결하였고, 적용된 이중 여자 풍력 발전기의 정격은 2MW, 정격 바람속도는 12m/s이다. 표 1에서는 본 모의에서 이용된 풍력발전기 모델 파라미터를 나타내고 있다.

표 1 이중 여자 발전기의 파라미터

Table 1 Parameter of DFIGs

파라미터	적용 값	단 위
r_s	0.5	p.u
x_s	5	p.u
r_R	0.5	p.u
x_R	4	p.u
x_m	150	p.u
H_m	0.06	p.u
K_v	100	-
T_e	0.01	s
R	37.5	m
ρ	4	int
η_{GB}	0.011236	-

풍력발전기의 입력인 시간에 따른 바람의 변화를 구현하기 위해 Weibull 분포를 이용하여 구한 바람 모델을 적용하였으며 그림 15는 이렇게 구현된 바람 모델의 예를 나타내고 있다. 그림 16-20은 본 연구에 적용된 시뮬의 알고리즘으로부터 풍력발전기의 바람에 변화에 따른 이중 여자 발전기 변수들의 응답 특성의 결과를 보여주고 있다. 이 결과는 1번 모선에 연결된 이중여자 풍력 발전기의 값에 해당한다.

그림 16에서는 바람의 변화에 따른 이중 여자 발전기의 유효전력 출력을 보여주고 있다. 정격 속도 이상의 바람이 불었을 때 회전자 q축 전류 제어기와 피치각 제어기의 동작에 따라 발전기 정격 이하로 출력이 제한되고 있는 모습이 다. 즉 동기 속도 이상 (super-synchronous) 영역에서는 발전기 출력을 정격으로 제한하고 동기 속도 이하 영역

(sub-synchronous)에서는 바람의 변화에 따른 출력을 내고 있다.

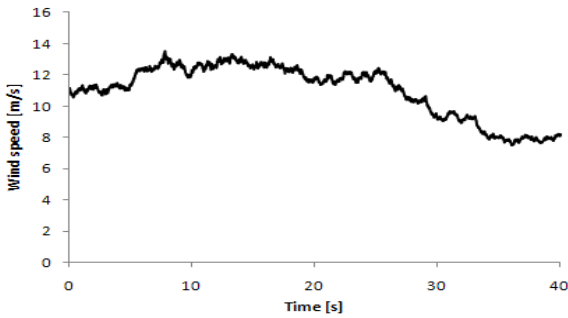


그림 15 웨이블 분포를 이용한 바람 모델의 예
Fig. 15 Example of wind model using weibull distribution

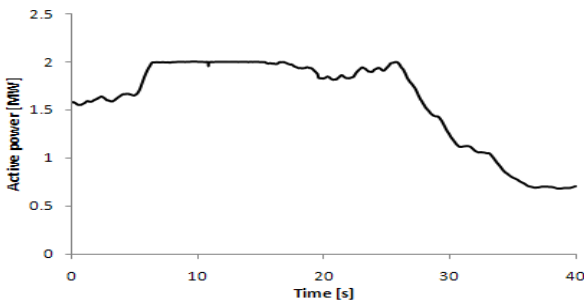


그림 16 이중 여자 비동기 발전기의 유효전력 출력
Fig. 16 Active power output of DFAG

그림 17은 회전자 q축 전류의 변화를 나타내고 있다. 회전자 q축 전류는 회전자 속도에 대한 출력 특성에 따라 제어되고 있는 모습이다. 따라서 동기 속도 이하 영역에서는 최적의 유효 전력 출력을 위해 그림 14와 같이 출력 계수를 최적의 값을 유지하여 최대의 발전력을 얻기 위한 제어와 동기 속도 이상 영역에서는 발전기 출력을 정격으로 제한되는 제어가 수행되고 있다.

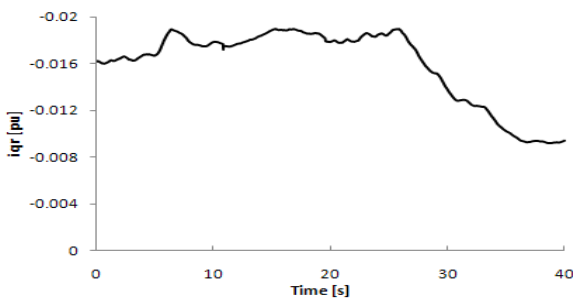


그림 17 회전자 q축 전류
Fig. 17 Quadrature component of rotor current

그림 18은 바람의 변화에 따른 회전자 속도의 변화를 나타내고 있다. 동기 속도 이하 영역에서는 바람에 의존적으로 회전자의 속도가 변화하지만 동기 속도 이상 영역에서는 회

전자의 과부하 방지 및 출력 제한을 위한 피치각 제어가 수행된다. 따라서 피치각 제어에 따라 발전기 회전자 속도는 동기 속도 이상으로 증가하다 다시 동기속도 근처로 제한되어지는 모습을 확인할 수 있다.

그림 19는 강한 바람이 불어 풍력 발전기가 동기 속도 이상 (Super Synchronous) 모드가 되면 피치각 제어기가 동작하여 피치각이 변화하는 모습을 나타내고 있다. 정격속도 이상의 바람이 지속적으로 불어 풍력 발전기 회전자 속도가 동기 속도 이상으로 가속되었을 때 피치각 제어기가 동작하여 발전기 회전자 속도를 그림 18과 같이 제어한다.

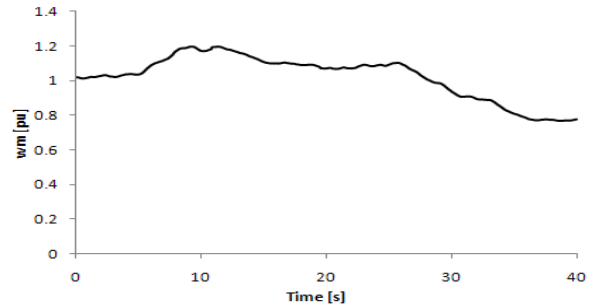


그림 18 풍력발전기 회전자 속도
Fig. 18 Wind generator's rotor angular speed

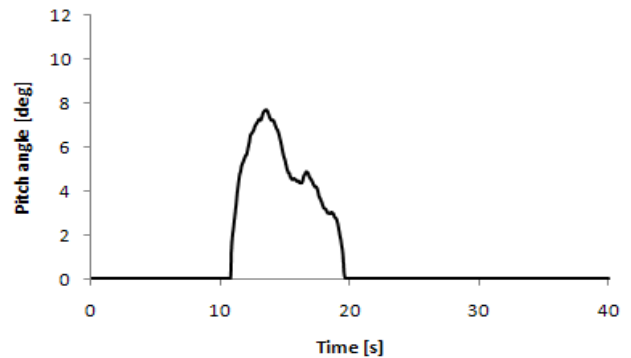


그림 19 시모의 시 피치각의 변화
Fig. 19 Pitch angle variation in time simulation

그림 20은 풍력 발전기의 동기 속도 이상 모드와 동기 속도 이하 모드 따른 풍력 발전 제어기의 동작에 의해 전력계수 c_p 가 변화하는 모습을 나타내고 있다. 피치각 제어기가 동작하면 출력 계수가 낮아지는 모습을 볼 수 있다. 동기 속도 이하의 영역에서는 회전자 q축 전류 제어를 통해 바람이 변화에 관계없이 최적의 c_p 값을 추종하는 제어를 수행하는 모습을 확인할 수 있다.

그림 21에서는 풍력발전단지의 출력 제한 신호로부터 풍력발전지에서 계통으로 주입되는 유효전력 출력 제어의 결과를 나타내고 있다. 8초 이전에는 출력 제한 신호가 입력되지 않은 상태이다. 따라서 각 풍력발전기는 8초 이전에는 바람에 따른 최적의 출력을 낼 것이다.

8초에는 SO가 출력 제한 값을 적용된다고 가정한다. SO로부터 출력 제한 값을 입력 받으면 풍력발전단지 제어기와 풍력발전기 제어기의 동작을 통해 40초까지 풍력발전지의 출

력이 제한되고 있다. 40초에는 다시 출력 제한 값을 취소하였다. 이후에는 다시 각 바람에 따른 최적의 출력을 얻기 위한 동작이 수행된다. 본 시모의는 충분한 바람이 불어줄 때를 가정하였다. 만약 8초에 SO로부터 제한 값을 입력받았다고 하더라도 해당 시점에서의 출력값이 제한 값보다 낮다면 각 풍력발전기는 바람에 따른 최적 출력을 얻기 위한 동작을 수행할 것이다.

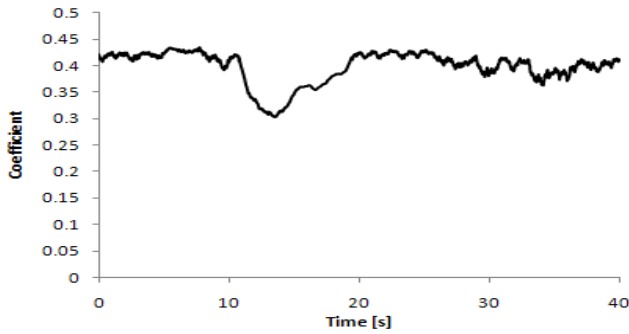


그림 20 풍력터빈의 출력 계수 변화
Fig. 20 Power Coefficient variation of wind turbine

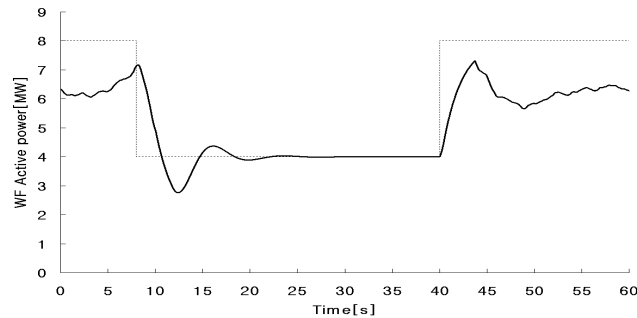


그림 21 풍력단지의 계통으로의 유효전력 주입
Fig. 21 Injected active power from wind farm to the network

5. 결 론

본 논문에서는 풍력발전 단지의 확률적인 바람변화에 따른 응답 특성을 분석하기 위해 연속법 기반 시모의 해석 알고리즘을 개발하였다. 연속법 기반 시모의 해석은 SI기법을 적용하며, 이는 PE (partitioned-explicit) 기법에 비하여 동적모형을 표현하는 미분방정식과 이를 네트워크에 연결하는 대수 방정식의 해를 동시에 구하므로 연계 에러를 감소시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 알고리즘은 웨이블 분포를 기반으로 한 바람모형을 고려하여 바람에 따른 출력의 변화를 모의할 수 있다. 아울러, 본 논문은 이중 여자 발전기를 포함하는 풍력 발전단지에 대한 유효 및 무효전력 전력 출력을 제한하는 협조 제어 기법을 제안하고 유효전력 출력의 단지 제어 모델을 개발 시모의 알고리즘에 구현하고 이를 시험계통에 적용한 결과를 설명하였으며, 기존 상용툴 (TSAT)과의 시뮬레이션 결과를 비교 및 검증하였다.

감사의 글

본 논문은 지식경제부 지원에 의하여 에너지관리공단 주관 신재생에너지 기술개발사업 “5MW급 대형 해상풍력발전 시스템 개발” 및 “도시형 풍력발전기술 (2009T100100576)”의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] J. Ekanayake, N. Jenkins, "Comparison of the response of doubly fed and fixed-speed induction generator wind turbines to changes in network frequency," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 19, 2004, pp. 800-802.
- [2] J. Ekanayake, L. Holdsworth, N. Jenkins, "Control of DFIG wind turbines," *Power Engineering Journal*, vol. 17, 2003, pp. 28-32.
- [3] R. G. De Almeida, E. D. Castronuovo, J. A. Pecas Lopes, "Optimum generation control in wind parks when carrying out system operator requests," *IEEE Trans. on Power systems*, vol. 21, 2006, pp. 718-725.
- [4] Y. Zhou, V. Ajjarapu, "A Novel Approach to Trace Time Domain Trajectories of Power Systems in Multiple Time Scales," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 20, no. 1, Feb. 2005, pp. 149-155.
- [5] Q. Wang, H. Song, and V. Ajjarapu, "Continuation Based Quasi-Steady-State Analysis," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 21, no. 1, Feb. 2006.
- [6] J. G. Slootweg, H. Polinder, W.L. Kling, "Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator," *Proc. of 2001 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, vol.1, 2001, pp. 644-649.
- [7] J. G. Slootweg, *Modelling and Impact on Power System Dynamics*, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2003.
- [8] S. Mathew, *Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, Springer, 2006.
- [9] 이봉희, 김병조, 김동우, 김현구, 하영철, "국가바람지도를 이용한 극한 풍속의 추정," *한국풍공학회논문집*, 14권, 1호, 2010, pp. 29-38.
- [10] Z. Lubosny, *Wind Turbine Operation in Electric Power Systems*, Springer, 2003.
- [11] Hansen AD, Poul Sorensen, Florin Iov, and Frede Blaabjerg, "Centralized power control of wind farm with doubly fed induction generators," *Renewable Energy*, vol. 31, 2006, pp. 935-951.
- [12] TSAT user manual, Powertech Labs Inc, 2007.
- [13] E. Castronuovo, J. Usaola, A. Jaramillo, "Delegated dispatching of wind farms: an optimal approach considering continuous control and interruption capabilities," *Wind Energy*, 2008. DOI: 10.1002/we.296.

저 자 소 개



조 성 구

2009년 서울산업대 전기공학과 졸업. 현재 서울과학기술대 전기공학과 석사과정.
E-mail : chosk01@seoultech.ac.kr



송 화 창

1997년 고려대 전기공학과 졸업. 1999년, 2003년 동 대학원 석사, 박사학위 취득. 2003-2004년 미국 아이오와 주립대 Post-doctoral scholar. 2005-2008년 4월 군산대 전자정보공학부 조교수. 현재 서울과학기술대 전기공학과 조교수.
Tel : 02-970-6403
E-mail : hcsong@seoultech.ac.kr



이 장 호

1988년 서울대 농업기계학과 졸업. 1995년, 2004년 포항공과대 기계공학과 석사, 박사학위 취득. 현재 군산대 기계자동차공학부 조교수, 지식경제부 지원 도시형 풍력발전 원천기술 연구센터장.
Tel : 063-460-4869
E-mail : jangho@kunsan.ac.kr