

## 이중 여자 비동기 발전기를 포함한 풍력단지 시모의 해석

\*조 성구<sup>1)</sup>, \*\*송 화창<sup>2)</sup>, 이 장호<sup>3)</sup>

### Time Domain Simulation Analysis For Wind Farm with DFAG

\*Sungkoo Cho, \*\*Hwachang Song, Jang-Ho 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. The penetration of wind energy from wind farm is getting larger and larger, so we need adequate control strategies for wind farm. To devise adequate control strategies for wind farm, time domain simulation analysis needs to be performed. This presents a Simultaneous Implicit-based time domain simulation algorithm for wind farm with DFAG (Doubly Fed Asynchronous generator) connected to the external power systems. This paper shows an illustrative example with a 5-bus test system.

**Key words** : Doubly fed asynchronous generators, simultaneous implicit, time domain simulation, wind farms

#### Nomenclature

$r_s$  : stator resistance  
 $x_s$  : stator reactance  
 $r_R$  : rotor resistance  
 $x_R$  : rotor reactance  
 $x_m$  : magnetizing reactance  
 $H_m$  : rotor inertia  
 $K_p$  : pitch control gain  
 $T_p$  : pitch control time constant  
 $K_v$  : voltage control gain  
 $T_e$  : voltage control time constant  
 $R$  : rotor radius  
 $\rho$  : number of poles  
 $\eta_{GB}$  : gear box ratio

### 1. 서론

최근 세계적으로 환경오염과 에너지 고갈에 대한 위기의식으로 전력계통에 연결되어 운전되는 풍력발전기가 늘어나고 있다. 현재 우리나라도 전기 네트워크에 접속되고 있는 풍력발전설비의 용량이 급속히 증가하는 추세에 있다. 전력 시스템에 포함된 다른 요소들과 마찬가지로 전기 네트워크에 연계된 풍력발전단지 및 해당 설비들은 전력 시스템 신뢰도(Power System Reliability)의 심각한 저하를 야기하지 않아야 풍력발전의 지속적인 계통 투입이 가능하다. 따

라서 본 논문에서는 풍력 발전단지에 대한 제어 전략 수립을 위한 기본적인 연구로서 이중 여자 비동기 발전기(Doubly Fed Asynchronous Generator) 모델<sup>(1-2)</sup>을 포함하는 풍력발전단지를 SI기법을 이용한 pu기반의 전기 네트워크 시모의 해석 알고리즘으로부터 시모의 하였다. 본 연구에서는 이중 여자 발전기의 시모의 해석을 위한 모델링과 초기화의 과정을 소개하며, 개발된 프로그램을 간단한 5모선 시험계통에 적용한 결과를 설명하고자 한다.

### 2. 이중 여자 발전기 시모의 해석

#### 2.1 시모의 해석 알고리즘

동적 모델을 포함하는 전기 네트워크는 전기 자기적인 과도현상 (Electromagnetic transient phenomena) 이 아주 빠르게 응답하여 사라진다고 가정하였을 때 미분·대수 방정식 (DAE, Differential Algebraic Equations) 으로 표현할

- 
- 1) 서울산업대학교 전기공학과 석사과정  
E-mail : chosk01@snut.ac.kr  
Tel : (02)970-6402 Fax : (02)978-2754
  - 2) 서울산업대학교 전기공학과 조교수  
E-mail : hcsong@snut.ac.kr  
Tel : (02)970-6402 Fax : (02)978-2754
  - 3) 군산대학교 기계자동차공학부 조교수  
E-mail : jangho@kunsan.ac.kr  
Tel : (063)469-4863 Fax : (063)469-4727

수 있다.

그럼 전력 시스템이 다음과 같이 DAE 모델로 간단하게 표현할 수 있다고 하자.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y) \\ 0 &= g(x, y) \end{aligned} \quad (1)$$

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. 그림 1은 본 연구에서 적용한 시모의 해석법의 절차를 설명하고 있다. 먼저 시모의 해석을 위해 전기 네트워크 데이터를 이용하여 전력조류계산을 수행한 후 이로부터 각 시스템 요소의 동적 모델의 상태변수를 초기화 한다.

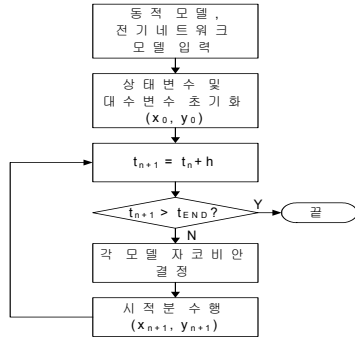


Fig. 1 시적분 기법의 순서도

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.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{n+1} &= f(x_{n+1}, y_{n+1}) \\ 0 &= g(x_{n+1}, y_{n+1}) \\ x_{n+1} &= x_n + h \frac{x_{n+1} + \dot{x}_n}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서 아래첨자  $n$ ,  $n+1$ 은 현재 스텝과 다음 스텝을 의미하며  $h$ 는 적분 스텝을 표현한다.

본 연구에서 적용된 SI(Simultaneous Implicit) 기법은 식 (2)에서의  $x_{n+1}, y_{n+1}$ 을 동시에 구하는 것으로 PSS/E 패키지의 전력계통 과도안정도 해석 프로그램에 적용된 PE 과는 달리 동적 모델과 네트워크 모델과의 연계 에러(Interface error)가 적어 보다 정확한 시모의 해석을 수행할 수 있다.

## 2.2 이중 여자 발전기 모델

이중 여자 비동기 발전기는 풍속에 맞춰 로터 회전수를 제어하여 풍속의 변화에 능동적으로 대처할 수 있는 발전기로 정속도 유도 발전기와 달리 전력 계통과 발전기의 주파수를 컨버터 시스템을 끼어 분리하고, 로터를 가변속 회전하여 넓은 풍속범위를 갖는 발전기이다. 이중 여자 발전기의 제어는 컨버터시스템을 이용하여 회전자 축 전류  $i_{qr}$ 을 통해 회전자 속도 제어,  $i_{dr}$ 을 통해 발전기 단자 전압 제어, 피치각(Pitch angle)  $\theta$ 를 통해 출력제어 등 다양한 제어 방법을 가지고 있다. 이와 같은 제어 방법은 다수의 논문에서 언급했고 잘 알려져 있기 때문에 본 논문에서는 모델링과 초기화에 관해 설명하고자 한다.

### 2.2.1 풍력터빈 모델

바람에너지로부터 터빈 블레이드를 통해 추출할 수 있는 에너지  $P_w$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_w = \frac{\rho}{2} c_p(\lambda, \theta) A_r v_w^3 \quad (3)$$

여기서  $\rho$ 는 공기의 밀도,  $A_r$ 은 풍력 로터의 회전면적을 나타내며  $\lambda$ 는 블레이드 팁 속도 비율,  $\theta$ 는 피치각,  $c_p$ 는 동력계수를 나타낸다.

$$c_p(\lambda, \theta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda_i}} \quad (4)$$

위와 같이 동력계수  $c_p$ 는  $\lambda_i$ 와  $\theta$ 의 함수로 나타낼 수 있다.  $\lambda_i$ 는 아래와 같이 정의되며

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1} \quad (5)$$

블레이드 팁 속도 비율  $\lambda$ 은 정속도 발전기와 같다.<sup>(3)</sup>

### 2.2.2 발전기 모델

그림 2는 이중 여자 풍력 발전기에 적용된 유도발전기의 등가회로이다. 전류의 방향은 계통으로 나가는 방향으로 기준을 잡았을 때 회전자와 고정자측 d-q축 전압 방정식은 식(6) 같이 나타낼 수 있다. 여기서 고정자, 회전자의 과도전압은 다른 값에 비해 상대적으로 반응이 빠르기 때문에 무시할 수 있다. 슬립(Slip)  $s$ 를 식(7)과 같이 정의하였을 때

$$v_{ds} = -R_s i_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} + \frac{d\Psi_{ds}}{dt} \quad (6)$$

$$v_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} + \frac{d\Psi_{qs}}{dt}$$

$$v_{dr} = -R_r i_{dr} + s\omega_s \Psi_{qr} + \frac{d\Psi_{dr}}{dt}$$

$$v_{qr} = -R_r i_{qr} + s\omega_s \Psi_{dr} + \frac{d\Psi_{qr}}{dt}$$

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (7)$$

그리하여 식(8) 과 같은 d-q축 전압 방정식을 구할 수 있다. 여기서  $\omega_s$ 는 동기각속도 이다.

$$\begin{aligned} v_{ds} &= -r_s \dot{i}_{ds} + ((x_s + x_m) \dot{i}_{qs} + x_m \dot{i}_{qr}) \\ v_{qs} &= -r_s \dot{i}_{qs} - ((x_s + x_m) \dot{i}_{ds} + x_m \dot{i}_{dr}) \\ v_{dr} &= -r_r \dot{i}_{dr} + (1 - \omega_m)((x_R + x_m) \dot{i}_{qr} + x_m \dot{i}_{qs}) \\ v_{qr} &= -r_r \dot{i}_{qr} - (1 - \omega_m)((x_R + x_m) \dot{i}_{dr} + x_m \dot{i}_{ds}) \end{aligned} \quad (8)$$

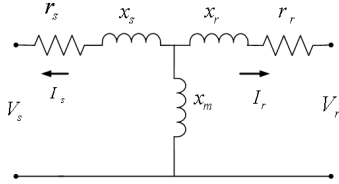


Fig. 2 이중 여자 발전기 등가회로

일반적으로 발전기 회전자의 각속도  $\dot{\omega}_m$ 은 식(9) 과 같이 발전기 회전자의 기계적 토크와 발전기의 기계적 토크의 차로 이루어진 아래의 미분방정식으로 계산된다.

$$\dot{\omega}_m = (T_m - T_e) / 2H_m \quad (9)$$

회전자의 기계적 토크는  $P_w$ 와  $\omega_m$ 에 의해서 정의될 수 있다.

$$T_m = \frac{P_w}{\omega_m} \quad (10)$$

발전기의 전기적 토크는 식(11)과 같이 정의할 수 있다.

$$T_e = \psi_{ds} \dot{i}_{qs} - \psi_{qs} \dot{i}_{ds} \quad (11)$$

위식은 다시 아래식과 같이 표현할 수 있다.

$$T_e = x_m (i_{qr} i_{ds} - i_{dr} i_{qs}) \quad (12)$$

### 2.3 발전기 상태변수 초기화

그림3과 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 컨버터측 전류  $I_c$ 에 의해 좌우된다.

풍력발전기에서 계통으로 주입되는 유효전력 무효전력은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P &= v_{ds} \dot{i}_{ds} + v_{qs} \dot{i}_{qs} + v_{dc} \dot{i}_{dc} + v_{qc} \dot{i}_{qc} \\ Q &= v_{qs} \dot{i}_{ds} - v_{ds} \dot{i}_{qs} + v_{qc} \dot{i}_{dc} - v_{dc} \dot{i}_{qc} \end{aligned} \quad (13)$$

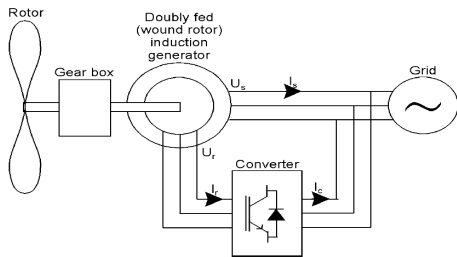


Fig. 3 이중 여자 풍력 발전기 모델

또한, 컨버터에서 계통으로 흐르는 전력은 식(14)와 같고,

$$\begin{aligned} P_c &= v_{dc} \dot{i}_{dc} + v_{qc} \dot{i}_{qc} \\ Q_c &= v_{qc} \dot{i}_{dc} - v_{dc} \dot{i}_{qc} \end{aligned} \quad (14)$$

회전자와 컨버터 사이에 흐르는 유효, 무효 전력은 식(15)와 같다.

$$\begin{aligned} P_r &= v_{dr} \dot{i}_{dr} + v_{qr} \dot{i}_{qr} \\ Q_r &= v_{qr} \dot{i}_{dr} - v_{dr} \dot{i}_{qr} \end{aligned} \quad (15)$$

위의 식을 컨버터에서의 손실이 없다고 가정한다면 위 식은 다시 아래와 같이 쓸 수 있다. 컨버터와 계통 사이에 흐르는 무효전력  $Q_c$ 는 제어 방법에 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.

$$\begin{aligned} P_c &= P_r \\ Q_c &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

따라서 풍력발전기에서 계통에 주입되는 유효 전력, 무효전력은 최종적으로 아래식과 같다.

$$\begin{aligned} P &= v_{ds} \dot{i}_{ds} + v_{qs} \dot{i}_{qs} + v_{dr} \dot{i}_{dr} + v_{qr} \dot{i}_{qr} \\ Q &= v_{qs} \dot{i}_{ds} - v_{ds} \dot{i}_{qs} \end{aligned} \quad (17)$$

풍력발전기의 상태 변수를 초기화를 위해 정상상태의 조류계산 후 전기 네트워크의 입력과 본 모델에 적용된 회전자 속도에 따른 에너지 특성을 이용하여  $\omega_m$ 의 초기치를 구한다. 또한 식(8)로부터 계통과 이중 여자 풍력 발전기를 있는 연결방정식(Interface Equation)을 얻어 나머지 변수들의 초기치에 대한 해를 구할 수 있다.

### 3. 사례 연구

본 논문에서 제안한 이중 여자 풍력 발전기를 포함한 풍력 발전단지 시모의 해석 알고리즘을 5-모션 시험 시스템에 적용한 결과를 설명하고자 한다. 그림에서 본 풍력발전단지의 5모션 시험 계통도를 나타내고 있다. 적용된 이중 여자 풍력 발전기의 정격용량은 2MW이며, 정격속도는 12m/s이다. 표 1에서는 본 모의에서 이용된 이중 여자 풍력발전기 모델 파라미터를 나타내고 있다. 이중 여자 발전기 시모의 해석은 정격속도 이하의 영역과 정격속도 이상의 영역으로 나누어 이루어 졌다.

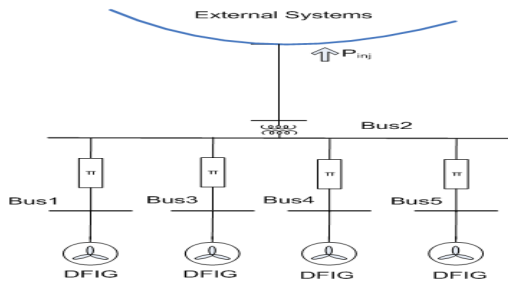


Fig. 4 5모선 풍력발전단지 시험 계통

Table 1 . 이중 여자 풍력 발전기 파라미터

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	kws/kva
$K_p$	88	-
$T_p$	1	s
$K_v$	100	-
$T\epsilon$	0.01	s
$R$	37.5	m
$\rho$	4	int
$\eta_{GB}$	0.011236	-

그림 5, 6은 본 연구에 적용된 시모의 해석으로부터의 결과를 보여주고 있다. 그림 5는 각각 1번 모선에 연결된 이중여자 풍력 발전기에 적용된 바람과 그에 따른 유효전력 출력을 나타낸 그래프이다. 이중여자 발전기는 정격이상의 바람이 불었을 때 발전기 정격 출력으로 제한되는 모습을 확인할 수 있다.

그림 6은 이중여자 풍력 발전기의 제어동작을 보여주고 있다. 그림 안의 첫 번째 그래프는 바람의 속도 변화에 따른 풍력발전기의 회전자의 각속도  $\omega_m$ 의 변화를 시모의한 결과를 나타내고 있다. 두 번째 그래프는 발전기 회전자 속도 제어를 위한 회전자 전류  $i_{qr}$ , 세 번째 그래프는 정격속도에 이상에서 발전기 출력을 제어하는 피치각 제어 방법에 따른 피치각  $\theta$ 의 변화, 네 번째 그래프는 발전기 단자 전압 제어를 위한 회전자 축 전류  $i_{dr}$ 의 변화를 보여주고 있다.

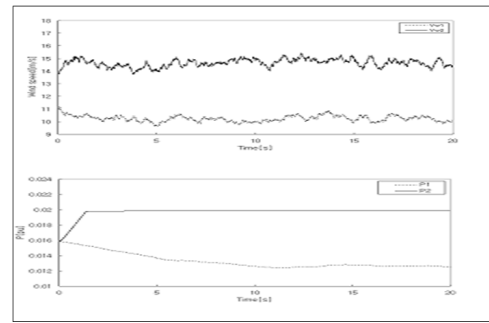


Fig. 5 이중 여자 발전기 출력

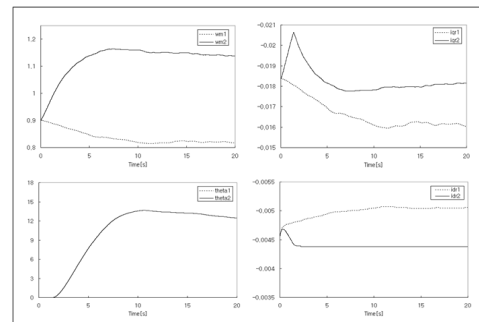


Fig. 6 이중 여자 발전기 상태변수

#### 4. 결론

본 논문에서는 이중여자 발전기를 포함하는 풍력발전 단지의 응용 특성을 분석하기 위해 필요한 시모의 해석 알고리즘을 SI법을 기반으로 개발하고 개발 프로그램을 풍력발전단지 5모선 시험계통에 적용하여 그 결과를 보였다. 본 시모의 해석을 통하여 추후에 연구될 풍력발전단지의 협조 제어 연구에 필요한 기술적 토대를 마련했다고 사료된다.

#### 후기

본 연구는 지식경제부의 지원에 의하여 에너지관리공단 주관(신재생에너지 기술개발)으로 수행되었습니다.

#### References

[1] J. G. Sloopweg, "Modelling and Impact on Power System Dynamics," Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2003.  
 [2] J. G. Sloopweg, H.Polinder, W.L.Kling, "Dynamic Modelling of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator," Power Engineering Society Summer Meeting 2001. IEEE, vol.1, 2001, pp.644-649  
 [3] Luis M.Fernandez, "Dynamic models of wind farms with fixed speed wind turbines," Renewable Energy, vol. 31, 2006, pp. 1203-1230.