

풍력발전기 계통 영향분석을 위한 시뮬레이션 모델링에 관한 연구

이수미, 황교익, 전영환
홍익대학교

Modeling of Wind Turbine Generator for the Simulation Study

Su-Mi Lee, Kyo-Ik Hwang, Yeong-Han Chun
Hong-ik University

Abstract - 풍력발전의 출력은 설비의 특성상 출력량 제어가 동기기처럼 자유롭지 못하기 때문에 계통연계 운전시 많은 문제점들이 야기된다. 특히 풍력발전기가 계통에 미치는 주파수 안정도는 풍력발전이 차지하는 비중이 높아짐에 따라 점차 중요시되고 있다. 따라서 상세한 계통해석을 위해 전체 계통에 대한 시뮬레이션 기법이 필요하게 되었다. 본 논문에서는 계통과 풍력발전기의 시뮬레이션 기법을 제안하고 그 효용성을 사례 연구를 통하여 검증하였다.

1. 서 론

화석연료와 환경문제가 대두되면서 유가 불안정, 기후 변화 협약 등으로 신재생 에너지의 중요성이 증가하고 있다. 그 중 풍력발전의 경우 다른 신재생 에너지원에 비해 유럽을 중심으로 한 지속적인 보급, 대용량 발전기 개발 등으로 인해 가장 빠르게 성장하고 있는 에너지원이다. 세계적으로 계통에 연계되어 운전되는 용량이 증가되고, 단위 발전 용량으로 MW 급이 상용화 되는 등 활발하게 연구 중이다. 현재 국내에서도 제주 계통에서 풍력발전기를 운전 중이며, 제주 계통과 대관령에 추가 용량을 계획하고 있다. 현재 풍력 발전 용량은 아직 기존 가스터빈 발전기나 화력발전기에 비해 매우 작기 때문에 주파수 안정도 문제는 무시할 수 있는 정도이다. 따라서 풍력발전기를 계통에 연계할 경우에 유도 발전기 채용에 따른 전압변동을 제어하기 위해 커패시터 뱅크를 설치하는 등의 해결책을 이용해왔다. 그러나 설비 용량의 대형화되면서 풍력발전단지 형태로 2004년 초 이미 40GW를 넘어서고 있으며, 앞으로 그 양이 증가할 전망이다. 전체 계통 설비용량에 비하여 풍력발전용량이 적을 때에는 풍력발전 출력의 변동이 계통 주파수에 큰 영향을 주지 못하였으나 용량의 계속적 증가는 계통의 주파수 안정도에 영향을 미치게 되므로 이에 대한 대비책이 필요하다. 특히, 풍력발전기에 의한 영향은 정상상태 보다 과도상태에서 계통의 상황을 더욱 악화시킬 우려가 있다. 따라서 풍력발전의 계통연계에 의한 영향을 분석하고 해결하기 위한 시뮬레이션 기법의 개발이 시급하다. PSS/E 등의 계통 해석 프로그램에서 풍력모델이 지원되고 있지만, 세부적인 내용을 직접 제어할 수 없기 때문에 대략적인 결과를 유추할 수밖에 없다. 계통을 해석하고 풍력발전기의 영향을 정확하게 분석하기 위해서 본 논문에서는 풍력발전기의 시뮬레이션 기법을 제안하였다.

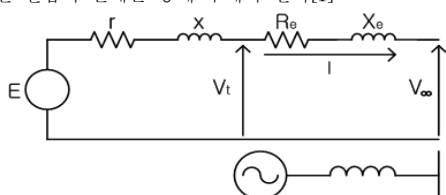
2. 본 론

주파수의 변화는 발전기와 전력 계통의 연속적인 상호 반응에 의해서 발생한다. 따라서 계통 해석을 위해서는 정태(Steady state) 해석과 동태(Dynamic State) 해석을 동시에 해야 한다. 시뮬레이션에서 이러한 연속적인 작용을 구현하기는 매우 힘들기 때문에 매우 짧은 스텝으로 나누어 반복 계산하는 방법으로 구현한다.

2.1 정태 시뮬레이션(Steady State Simulation) 방법

2.1.1 발전기의 내부 전압 계산

전력 조류 방정식으로 계통에 연계된 발전 모선의 전압과 발전량을 구하고 동태 방정식으로 발전기의 과도 상태를 계산하기 위해서는 내부 전압과 모선 전압의 관계를 통해 구해야 한다[1]



<그림 1> 발전기 모선

<그림 1>에서 V_{∞} 를 전력 조류 계산의 발전 모선으로 가정하고 V_t 를 발전기의 끝단(Generator terminal) 전압으로 한다. 그러면 E 가 발전기의 내부모선이 된다. 발전기의 과도 상태 계산은 이 내부 모선의 자속에 의해 계산되므로 전력 조류 계산으로 얻는 모선 전압과 전류의 식에서 내부 전압을 계산한다.

$$V_{\infty d} = -(r + R_e)I_d - (x + X_e)I_q + E_d' \quad (1)$$

$$V_{\infty q} = -(r + R_e)I_q - (x + X_e)I_d + E_q'' \quad (2)$$

여기서,

$$V_{\infty d} = -V_{\infty} \sin(\delta - \alpha), \quad V_{\infty q} = -V_{\infty} \cos(\delta - \alpha)$$

식(1)을 전류에 관한 식으로 전개하고 식(2)에 대입하면 식(3)을 얻을 수 있다.

$$I_d = \left(\frac{R}{R^2 + X^2} \right) [-R(V_{\infty d} - E_d) + X(V_{\infty q} - E_q)] \quad (3)$$

동일한 방법으로 q 축의 전류를 구하면 과도 상태에서 계산된 전력 조류 계산에 의하여 d 축과 q 축의 발전기 내부 전압을 구할 수 있고 내부 전압과 전류의 관계에서 전기적 출력을 계산할 수 있다.

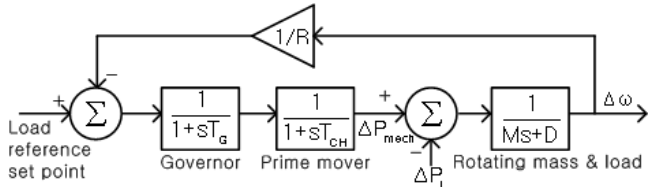
2.1.2 동기기 동태 해석을 위한 초기 조건

보통 동기 발전기의 모델링은 V_t 의 위상각을 0 으로 설정하지만[2] 일반적인 경우 슬랙(Slack, 기준)발전기를 제외한 발전모선은 위상각이 0 이 아니기 때문에 실수축을 기준으로 한 점선의 벡터를 초기 조건으로 사용하면 만족스러운 결과를 얻지 못한다. 사고가 발생하지 않은 정상상태 주파수의 변화에서 슬랙 발전기는 정상 주파수를 유지하는 반면 초기 조건을 감안하지 않은 발전기의 정상 주파수는 요동하는 현상을 보인다. 그러므로 정확한 초기 조건을 얻기 위해서는 발전기의 전압 위상각을 기준으로 한 값을 사용해야 한다. 그러므로 벡터 선도를 이용하여 발전기들의 위상각을 각각 보정하여 모든 발전기들의 주파수가 일정한 주파수를 유지하도록 한다.

2.2 동태 시뮬레이션(Dynamic Simulation) 방법

발전기의 주파수 변화($\Delta\omega$)는 기계적 출력(T_m , Mechanical torque)과 전기적 출력(T_e , Electrical torque)에 의한 가속 화력(T_a , Accelerating torque)과 동요 방정식(Swing equation)을 통하여 구하였다. 즉, 일반적인 조속기 모델과 과도 안정도 해석을 위한 간략화 모델(Reduced - ordered model)을 사용하였으며 풍력 발전기 모델로 쓰이는 유도 발전기는 농형으로 모델링 하였다.

2.2.1 일반적인 조속기 모델과 동요 방정식



<그림 2> 일반적인 조속기 모델

발전기의 속도 조절을 운전으로 인해 나타나는 정상 상태 오차를 구하기 위해 계통에서 부하의 변화를 계단 함수로 가정하고 <그림 2>의 전달 함수를 구하면 식(4)를 얻을 수 있다[3].

$$\Delta\omega(s) = \Delta P_L(s) \left(\frac{-1}{Ms+D} \right) \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{R} \left(\frac{1}{1+sT_g} \right) \left(\frac{1}{1+sT_{ch}} \right) \left(\frac{1}{Ms+D} \right)} \right) \quad (4)$$

단, w : 회전 속도 P_L : 부하량 D : 댐핑 상수
 T_G : 조속기 시정수 T_{CH} : 원동기 시정수
 R : 속도 조정률 M : 기기의 각 운동량

2.2.2 동기 발전기와 풍력 발전기 모델

동태 해석을 위한 동기 발전기 모델은 식(5)의 모델을 사용한다[4].

$$T_e = E_d' I_d + E_q' I_q - (L_q' - L_d') I_d I_q \quad (5)$$

풍력 발전기는 풍속과 발전기 용량 등에 따라서 다양한 모델이 제안되었지만 본 논문에서는 가장 기본적인 농형 유도 발전기의 과도 안정도 모델을 사용한다[5].

$$p(v_d') = -\frac{1}{T_0'} [v_d' + (X_s - X_s') i_{qs}] + p\theta_r v_q' \quad (6)$$

$$p(v_q') = -\frac{1}{T_0'} [v_q' + (X_s - X_s') i_{ds}] + p\theta_r v_d'$$

단, $T_0' = \frac{L_r + L_m}{R_r} = \frac{L_{rr}}{R_r}$
 $X_s = w_s (L_s + L_m) = w_s L_{ss}$
 $X_s' = w_s (L_{ss} - \frac{L_m^2}{L_{rr}})$
 $p\theta_r = \frac{w_s - w_r}{w_s}$: 슬립 속도

유도 발전기의 동태 방정식을 계산하기 전에 슬립(slip) 초기 값을 계산해줘야 한다[6].

2.3 시뮬레이션 알고리즘

계통 시뮬레이션을 위해 시뮬레이션 시간을 미소 시간으로 나누어 매 순간 전력조류를 계산, 각 발전기 모델의 동태 방정식, 동요 방정식을 계산하여 반복한다. 알고리즘 단계를 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

1 단계)

전력 조류를 계산하여 각 발전 모선의 출력을 구한다. 계산된 출력은 정상상태에서의 각 발전기의 출력이 된다. 즉, 발전기의 기계적 출력과 전기적 출력이 같음을 의미한다.

2 단계)

부하의 변동, 발전기 탈락 등의 사고 발생 시 전력 조류를 계산하여 발전모선의 출력을 계산한다. 본 과정의 목적은 변화된 부하에 대한 각 발전기의 분담량을 결정하기 위해서이다.

3 단계)

기계적 출력은 급격히 변할 수 없기 때문에 단계 2)에서 부하가 변했을 지라도 발전기의 기계적 출력은 순간적으로 단계 1)의 출력과 같다. 하지만 부하의 변화에 의한 전기적 출력은 주파수를 변화시키면서 수급 조건을 만족하기 때문에 기계적 출력과 전기적 출력사이의 차이인 가속 화력이 발생하게 된다. 즉, 단계 2)에서 계산된 발전 모선 유효 전력은 전기적 출력이 되고 기계적 출력과 전기적 출력의 차이는 각 발전기의 가속력이 된다. 가속력으로 각 발전 모선의 주파수 편차를 구하고 주파수 편차를 이용하여 각 발전 모선의 위상각과 계통 주파수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\delta_i = \delta_i^{new} - \delta_i^{old} \quad (7)$$

$$\theta_i^{new} = \theta_i^{old} - \Delta\delta_i$$

또한 계통 주파수는 주파수 중심점(Center of frequency, COF)을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$w_{sys} = \frac{1}{M_T} \left(\sum_{i=1}^n w_i \times M_i \right) \quad (8)$$

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_i$$

4 단계)

3 단계)에서 구한 새로운 위상각 θ_i^{new} 와 전압 값을 이용한 계통의 전력 조류 계산을 통해 발전모선의 새로운 전기적 출력을 구할 수 있다.

5 단계)

3 단계)에서 4 단계)를 시뮬레이션 시간만큼 반복 계산하여 기계적 출력을 변화시켜 전기적 출력과 기계적 출력이 일치하는 새로운 운전 상태를 찾아간다. 이 때, 풍력 발전기는 사고에 의하여 전기적 출력은 변화하지만 기계적 출력은 변화하지 않는다.

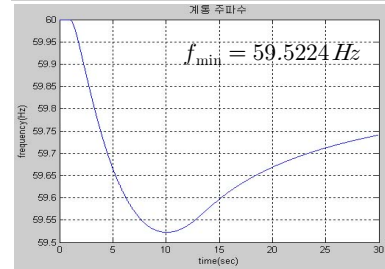
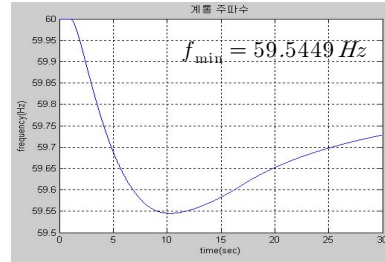
3. 사례연구

우리나라는 현재 제주도의 15.8 MW 만이 실계통 연계 운전하고 있으므로 제주 계통에 적용해보고자 한다. 제주도의 부하량은 510 MW 에서

최소 320 MW 정이며 제주도 내의 발전기는 16기로 총 657 MW 의 발전설비가 운영 중이다. 10개의 154KV 모선이 환상망을 이루고 있으며 제주도 내의 북제주 모선과 내륙 해남 지역의 모선이 고압직류송전(HVDC)로 연계되어 있다. 현재는 풍력 발전기의 용량이 전체 계통 용량에 비하여 적으므로 풍력 발전기에 의한 영향은 없지만 2007년 10월까지 85.8 MW 의 풍력 발전기 용량을 추가할 예정이기 때문에 향후 풍력 발전기에 의한 영향을 고려해야 할 필요가 있다.

제주 전력 계통의 데이터는 PSS/E 30 의 데이터를 사용하였으며 풍력 발전기의 영향을 나타내기 위하여 총 부하량 504.6 MW 중에 57.8 MW 의 풍력 발전기가 운영 중이라고 가정한다. 풍력 발전기의 탈락 사고와 풍력 발전기 운전 중의 계통 사고의 시뮬레이션 하였으며 각각 <그림 3>, <그림 4> 의 결과를 얻을 수 있었다.

<그림 3> 풍력 발전기의 탈락



<그림 4> 풍력 발전기 운전 중의 계통 사고

풍력 발전기 운전 중의 계통 사고량은 풍력 발전기 탈락 사고의 경우와 동일한 사고량으로 하기 위하여 57.8 MW 로 하였다. 풍력 발전기는 계통 사고에 의한 출력 증가가 없기 때문에 주파수의 최저점에 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 계통해석시 여러 요소들을 고려함으로써 주파수의 영향을 다양하고 정확하게 분석할 수 있도록 하는 풍력발전기의 시뮬레이션 기법을 제안하였다. 사례연구를 통하여 실제 계통에서 풍력발전기 탈락시와 운전중 계통사고시 각각 계통에 미치는 영향을 효과적으로 해석할 수 있으며 이는 풍력발전 증가에 따른 연계 계통의 상황에 대응하는 계통 운영의 제어 및 안정화 방안에 활용될 수 있을 것이다. 특히 대단위 풍력발전단지 조성시 계통에 공급하는 풍력발전의 비중이 높아짐에 따라 계통 운영에서 발생하는 급격한 출력변동에 따른 문제점들을 미리 고려할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] P. M. Anderson, M. Mirheydar, "Power System Control and Stability", IEEE Press, New York, pp. 142-143
[2] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink", Prentice Hall 1998, pp. 273-278
[3] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation and Control", John Wiley & Sons, Inc. 1996, New York, pp. 336-340
[4] P. M. Anderson, M. Mirheydar, "Power System Control and Stability", IEEE Press, New York, pp. 83-140
[5] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill 1994, pp. 279-305
[6] Alan Mullane, Mark O'Malley, "The Inertia Response of Induction-Machine-Based Wind Turbine". IEEE, Transaction on Power System, Vol. 20, No. 3, Aug., 2005, pp. 1496-1503