

단독계통에서 풍력발전기의 주파수 영향 분석

황교익 전영환
홍익대학교 전기정보제어공학과

The Effect of Wind Turbine on the Frequency of Isolated Systems

Kyo Ik Hwang Yeong han Chun
Hongik Univ.

Abstract - There has been increasing interest in the renewable energies. Wind energy is worldwide number one renewable energy from the installed capacity viewpoint. Most of the power systems utilizing wind energy are connected to other large systems. In such integrated systems, frequency control is not big issue. But the situation is different in isolated systems like Korean power system. It is important to assess appropriate capacity of wind power for our system, as it affects the system operation and control strategy. In this paper we made it clear the relationship among generator inertias, governor droop, system damping and wind energy capacity.

1. 서 론

1970년대 초 석유 파동을 기점으로 신 재생 에너지의 관심이 높아진 이래 많은 기술적인 발전이 있었지만, 그 중에서도 풍력에너지 이용은 현재 설치 용량 관점에서 보면 가장 두드러진 성과라 할 수 있다. 특히 유럽의 독일, 덴마크, 북아메리카, 일본 등 선진국을 중심으로 앞으로 지속적으로 용량이 증대될 것으로 보인다. 현재 풍력이 도입되고 있는 전력 계통은 서로 연계되어 있는 대형 시스템이므로 풍력 발전량의 변동에 의한 주파수 제어 문제는 현재로서는 큰 영향이 없으나, 우리나라와 같은 단독시스템의 경우에는 풍력발전량의 변화에 따른 시스템 주파수 유지 문제는 도입 용량이 증대됨에 따라 크게 영향을 받게 된다.

현재 우리나라에서도 신재생 에너지의 도입이 증대될 전망이다. 특히, 실계통에서 많이 이용되고 있는 풍력 발전량의 도입이 증대될 경우, 우리나라 전력시스템의 전체 용량에 대비하여 시스템의 운영에 영향을 미치지 않는 범위에서 도입 가능한 용량을 산정할 필요가 있다. 또한 그 이상 도입되는 경우, 시스템 운영과 주파수 제어 전략도 수정해야 할 것이다. 본 논문에서는 이러한 배경을 바탕으로 시스템 용량과 조속기 속도 조정율, 시스템 댐핑, 풍력 발전 용량과 주파수 편차 사이의 관계를 정식화하고 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 본 론

2.1 풍력 발전 단지 계통 연계 시 문제점

대부분의 발전 설비가 동기 발전기를 통하여 발전을 하지만 풍력 발전의 경우 유도기를 발전에 사용하게 된다. 소형 풍력 발전기의 경우 동기기를 사용하여 운영되고 있으나 MW 급의 대용량 발전기의 경우 농형 또는 권선형 유도기를 사용하는 것이 일반적이다. 따라서 본 논문에서는 유도기형 풍력 발전기를 사용한 풍력 발전단지에서의 출력 변동시의 영향을 분석하고자 한다. 유도 발전기의 여자를 위한 무효 전력의 소모는 출력의 변동에 따른 전압의 변동을 가져오며 이것은 풍력 발전단에 SVC, DSTATCOM 등의 보상기를 통하여 보상한다고 가정한다. 풍력 발전기는 정속 운전을 필요로 하고 속도변 유 지시하기 위하여 블레이드의 피치제어나 기어 박스 등을 통하

여 조정하지만 풍력 발전기의 특성상 정속 운전이 어렵다. 따라서 빈번한 출력 변동이 생기게 되며 출력의 변동으로 인하여 주파수에 영향을 미치게 된다. 풍력 발전 단지의 규모가 커질수록 바람의 변화에 의해 변동되는 폭은 증가할 것이다. 그러므로 안정적인 계통 운영을 위해서는 풍력 발전기의 출력이 급변 하였을 때 안정적인 계통운동을 가능케 하는 용량에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 한계 변동 범위를 주파수의 경우 0.1Hz로 하여 이것을 만족하는 풍력 발전기 출력의 최대 변동 범위를 알아보고자 한다.

2.1.1 풍력 발전기의 주파수에 관한 영향

계통에 연계되는 모든 발전기는 동기화가 되어 있고 주파수는 전력 조류에 의하여 결정되므로 운동 방정식에 의해 결정된다. 풍력 발전기의 출력이 급감 또는 급증하게 되면 계통의 주파수가 변하게 되고 발전기와 부하의 출력량이 재 배분된다. 계통의 모든 부하와 발전기를 고려한 운동 방정식은 다음과 같다.

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_{\text{gen}} + P_{\text{wind}} - P_{\text{load}} \quad \text{식(1)}$$

여기서,

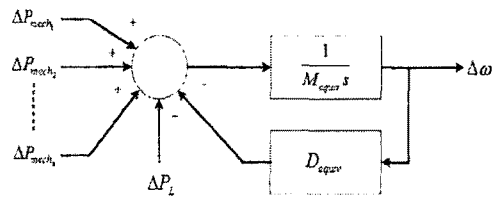
M : 관성 정수 (angular momentum of the machine)

P_{gen} : 계통 발전기의 출력

P_{wind} : 풍력 발전기의 출력

P_{load} : 계통 부하의 출력

계통의 주파수에 영향을 미치는 것은 계통에 연계된 모든 발전기의 시정수와 출력량 그리고 부하의 댐핑 특성임을 알 수 있다. 따라서 발전기들의 관성 정수와 부하의 댐핑을 등가화하고 발전기의 출력을 합하여 계통 주파수 변동을 다이어그램으로 나타내면 다음과 같다.



(그림 1) 주파수 변화 Block diagram

AGC의 주파수 제어 시정수는 조속기에 비해 매우 크게 설계하는 것이 일반적이므로, 조속기의 속도 조정률(droop)만을 고려하면, 정상상태에서의 주파수 편차는 주파수 제어에 관여하는 모든 속도 조정률의 합과 댐핑 특성에 따라서 다음과 같이 나타난다.

$$\Delta \omega = - \frac{\Delta P_{\text{wind}}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} + D} \quad \text{식(2)}$$

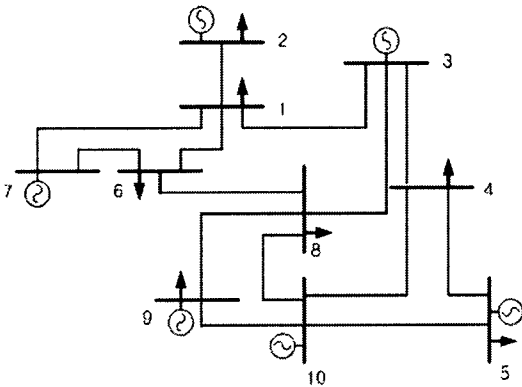
속도 조정률을 증가시킨 조속기, 부하모델, 간략화된 원동기 모델을 고려하면 Δw 와 ΔP_{wind} 사이의 관계는 다음과 같이 주어지며 이 식을 통하여 허용 주파수 0.1Hz를 만족하는 최대 출력 변동량을 계산할 수 있다.

$$\Delta w(s) = \Delta P_{wind} \frac{-\frac{1}{Ms+D}}{1 + \frac{1}{R} \left(\frac{1}{1+sT_G} \right) \left(\frac{1}{1+sT_{CH}} \right) \left(\frac{1}{Ms+D} \right)} \quad \text{식(3)}$$

여기서,
 T_G : 조속기 시정수
 T_{CH} : 펄브 시정수
 D : 부하의 댐핑

연계 계통에 시정수가 큰 대규모 발전 설비를 통하여 주파수를 안정시킬 수 있으나 부하의 댐핑 특성이나 발전기의 시정수의 조절은 어렵기 때문에 풍력 발전기에 의한 주파수 변동을 제어하기 위한 방법으로 조속기와 펄브의 시정수의 조절을 통하여 주파수 변동을 조절할 수 있음을 알 수 있다.

2.1.2 사례 계통



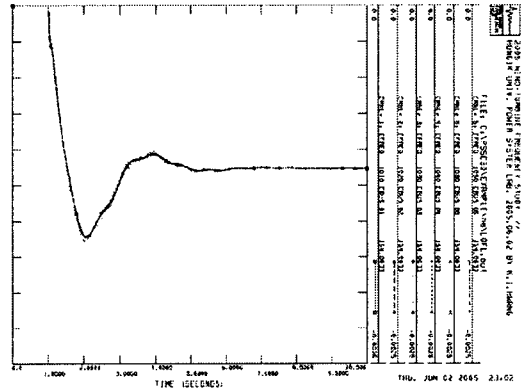
(그림 2) 계통 모델(10모선 6기)

모선 번호	발전량(MW)			부하량(MW)	
	P	Q	발전기	P	Q
1	-	-	-	1080	190
2	336	213.3	화력	170	10
3	535	-124	풍력	-	-
4	-	-	-	210	83
5	472	228	화력	300	96
6	-	-	-	200	107
7	386.5	255	화력	-	-
8	-	-	-	350	48
9	736.5	52.7	화력	795	292
10	664.9	286.3	원자력	-	-

(표 1) 모선별 전력량

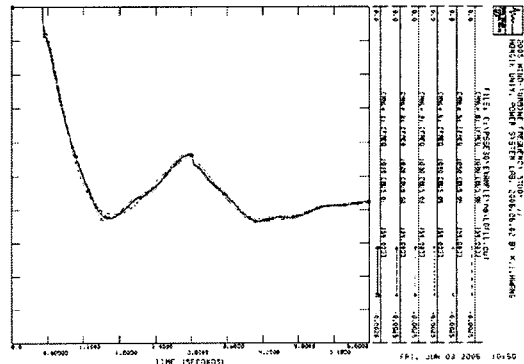
총 부하량은 3,105 MW이며, 3번 모선 발전기를 풍력 발전기로 가정하여 154kV 모선에 접속 시키고 유효 전력 535MW

를 발전하고 무효 전력 124MW를 소모하고 있다. 원자력과 화력의 관성 정수는 각각 8과 6으로 하고 정격 용량은 1000MW와 600MW이다. 부하의 댐핑 특성은 2로 하고 원자력 발전기는 주파수 제어에 참여하지 않고 화력 발전기의 속도 조정률을 2%라고 하면, 등가 속도 조정률은 0.5%가 된다. 변동 허용 주파수 변화를 0.1 Hz(0.00167 pu)로 하였을 경우 식(3)을 이용하여 계산하면 135MW를 얻을 수 있다. PSS/E를 통하여 계통을 모의해 보았다. 원자력 발전기의 경우 조속기 모델을 뺀 클래식 모델을 사용하였다. 실제 발전량의 변화는 선형 적으로 증감하지만 여기서는 순간적으로 최대 변동 범위의 출력량이 감소한다고 가정하였다. 또한 조속기의 시정수를 조정하여 결과를 분석하고 출력의 지속적인 감소의 상황을 고려해 보았다.



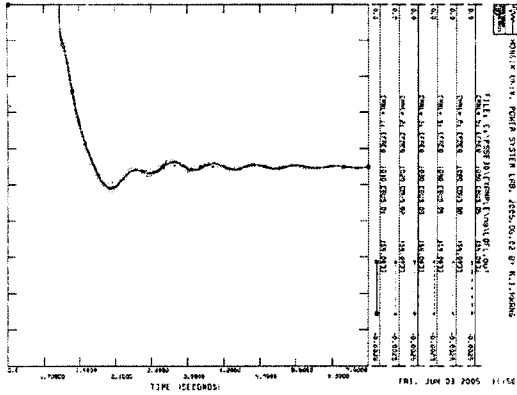
(그림 3)PSS/E 결과-1

(그림 3)의 결과는 풍력 발전기의 출력이 급변하여 1초 후에 135MW의 풍력 발전량이 사라졌을 때의 풍력 발전기 모선과 이 모선에 직접 연계된 모선들의 주파수 변화이다. 다소 간 차이가 있으나 모든 발전기가 동기화되어 있기 때문에 전체적으로 비슷하게 감소하다가 한계 범위(0.1Hz) 내에서 회복되는 것을 볼 수 있다. (그림 4)의 결과는 풍력 발전기 용량 135MW가 감소하고 이어서 40MW의 용량이 추가로 감소하여 총 175MW의 용량이 감소한 상태이다.



(그림 4)PSS/E 결과-2

(그림 5)의 결과는 주파수 조정에 참여하는 발전기들의 조속기 시정수를 조정하여 동일 출력량 변동이 발생하였을 때의 주파수 변동을 나타낸 것이다. 응답 특성이 개선되어 시정수의 조절을 통하여 풍력 발전기의 운영을 더욱 안정적으로 할 수 있음을 알 수 있다.



(그림 5)PSS/E 결과-3

3. 결 론

총 발전량 3,130 MW에서 모의 계통에서의 풍력 발전기는 25%인 535MW였고 풍력 발전기 출력의 33.75%인 135MW가 급변해도 계통의 한계 변동 범위인 0.1Hz를 만족하는 것을 볼 수 있었다. 계통 연계 시 풍력 발전기의 주파수에 대한 영향은 계통의 정제 용량에 의하여 결정되며 계속적인 출력의 감소가 발생하여도 정상 상태 허용 오차를 만족하는 용량의 감소까지는 안정적인 운영을 할 수 있음을 보였다. 또한 계통에 연계된 다른 발전기의 조속기 시정수를 조정하면 풍력 발전기에 의한 계통 주파수 변동을 더욱 안정시킬 수 있다. 따라서 안정적인 계통에 연계되는 풍력 발전단지의 경우 적정용량 계산을 통해 용량을 산정하고 계통에 연계하면 출력의 변동에도 안정적으로 운영될 수 있다.

감사의 글	연계 기초기술개발 연구
본 연구는 기초전력공	(과제번호 :
학공동연구소 과제인 신·	R-2004-B-125)의 지원
재생에너지 발전의 계통	으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control, 2nd ed. NewYork: Wiley, 1996.
- [2] Thomas Ackermann, Wind Power in Power Systems. WILEY, 2005.
- [3] J.F.Manwell, J.G.Mcgowan, A.L. Roger, Wind Energy Explained:Theory, Design and application, WILEY, 2003
- [4] Z.Lubosny, Wind Turbine Operation in Electric Power Systems:Advanced modeling, Springer, 2003
- [5] Stephen J.Chapman, Electric Machinery fundamentals:Fourth Edition, McGRAW, 2005