제주계통 단독운전 시 주파수 안정도 유지를 위한 풍력발전 운전용량 산정 방법에 관한 연구

論 文
56-2-2

A Study on the Assessment of Operational Capacity Limit of Wind Turbine for the Frequency Stability of Jeju Island System

黃 敎 益* · 全 瑩 煥†
(Kyo-Ik Hwang · Yeong-Han Chun)

Abstract – As the Kyoto Protocol, which aims at reducing greenhouse gases in accordance to the UNFCCC, came into force, research on environment friendly energy resources has been a matter of concern worldwide. As a general power generation system, among renewable energy resources, that is interconnected and operated with power system, the wind turbine is emerging as an effective alternative. Since power capacity of the wind turbine has been steadily increasing and its relative importance is also increasing in total facility capacity, we cannot ignore its effect. Because controlling generation output in the wind turbine is not as easy as in the synchronous machine due to its facility characteristics and it generates irregular output fluctuations when interconnected with power system, system interconnection was difficult.

But the effect of large capacity wind turbine on isolated power system like Jeju island is serious problem on the frequency stability. Accordingly, it is necessary to analyze the effects of wind turbine on system interconnection and assess the optimum capacity of wind turbine that satisfies the most important principle of stable power supply. This paper have analyzed the effects of wind turbine capacity increases on the system and suggested the method of the capacity to achieve its steady operation. And It is applied to the Jeju island.

Key Words : frequency stability, renewable energy, power capacity of the wind turbine

1. 서 론

풍력발전은 가장 빠르게 성장하고 있는 신·재생 에너지로 세계적으로 전력계통에 연계되어 운전되고 있는 양이 점점 증가하고 있으며, 우리나라에서도 설치 계획량이 급격히 증가하고 있다. 우리나라 전체 계통 측면에서 보면 단위 발전 용량은 아직 기존의 가스터빈 발전기나 화력발전기에 비해서 매우 적기 때문에 주파수 안정도 문제는 무시할 수 있을 정도이다. 따라서, 풍력발전기를 계통에 연계할 경우에 유도발전기 채용에 따른 전압변동을 제어하기 위해 커패시터 뱅크를 설치하는 등의 해결책을 이용해왔다. 하지만, 풍력발전이 발전단지의 형태로 대형화되면서 세계적으로 설비용량이 2004년 초에 이미 40Gw를 넘어서고 있으며, 앞으로 그 양이 더욱 더 증가할 전망에 있다. 전체 계통 설비용량에 비하여 풍력발전용량이 적을 때는 풍력발전 출력의 변동이 계통 주파수에 큰 영향을 주지 못하였으나 용량이 계속 증가하게 되면 계통의 주파수 안정도에 영향을 미치게 되므로 이에 대한 대비책이 필요하다. 특히, 풍력발전기에 의한 영향은 정상상태 보다 과도상태에서 더 크게 나타날 것으로 예상이 되며 풍력발전기의 출력 변동이 과도 상태에서 계통의 상황을 더욱 악화시킬 우려가 있다. 따라서 풍력발전의 계통연계에 의한 영향을 분석하고 안정적인 전력공급이라는 가장 중요한 원칙을 만족하는 적정 풍력발전용량을 산정이 필요하다.

풍력발전기의 계통 연계에 대한 연구는 주로 무효전력 수급에 따른 전압 변동에 중점이 주어져 왔지만, L. Holdsworth 는 농형 유도발전기와 권선형 유도발전기의 관성응답에 관한 논문[1]을 발표하였고 G. Lalor 는 권선형 유도발전기 제어를 통한 과도상태 계통 주파수의 응답을 개선하는 논문[2]을 발표하였다. 그 내용은 주로 과도상태 주파수 응답의 악영향을 분석하는 것이었다.

특히, 우리나라의 경우는 제주 계통이 주파수 안정도 문제에 노출되어 있다. 제주 계통은 HVDC 연계선에 의해서 제주 계통 전체 용량의 1/2 정도를 공급하고 있으며, 이 연계선이 주파수 제어 모드로 운전이 되고 있다. 현재 제주 계통에서 운전되고 있는 풍력발전기 용량은 15.8 MW 이지만, 앞으로 계획되고 있는 풍력발전기 용량은 해상 풍력단지를 포함하여 2007년 까지 85 MW의 추가 건설이 예정되어 있다[3]. 예정된 건설이 다 이루어지게 되면 100.8 MW 로 제주도 내 발전기 설비용량의 15.34 %에 해당하지만, 보통 운전 용량의 거의 30% 이상이 되는 경우가 많다. 실제로 바람이 많이 부는 경우는 각 발전기의 출력 변동을 살펴보면 정격출력의 40%-100%에 이르는 정도의 출력 변동 현상을 보이기 때문에, 이 때 연계선이 차단되는 경우가 발생하면, 제주 계통은 주파수 안정도에 매우 취약하다. 따라서, 제주

* 學生會員 : 弘益大學校 電氣電子工學科 碩士課程
† 교신저자, 正會員 : 弘益大學校 電氣電子工學科 副敎授 · 工博
E-mail : yhchun@hongik.ac.kr
接受日字 : 2006年 10月 23日
最終完了 : 2006年 12月 18日

계통의 안정적인 운전을 위해서는 풍력발전기의 출력 변동에 따른 주파수 유지가 매우 중요한 문제이다. 따라서 본 논문에서는 과도상태 주파수 변화를 해석하기 위하여 풍력발전기의 출력변동과 주파수 변화율의 관계[4]와 계통연계 발전기들의 등가화 개념[5]을 이용하여 풍력발전이 계통에 미치는 영향을 분석하고 안정적인 운전을 목표로 한 적정 풍력발전용량 산정 방법을 제안하였다.

2. 본 론

2.1 풍력발전기의 계통주파수 영향

주파수 제어란 계통 수요와 발전량의 불일치로 인한 주파수의 변화를 보상하여 주파수를 규정 값으로 유지시켜주는 것이다. 전력계통내의 모든 동기발전기는 일정한 회전수로 동기운전하고 있다. 계통내의 총 발전력이 부하의 총 소비전력과 총 손실전력의 합계를 상회하게 되면 계통내의 각 발전기 회전자에 가해지는 가속토크는 양의 값이 되기 때문에 회전자의 속도는 상승하여 전력계통의 주파수는 규정 값보다 올라간다. 반대로 총 발전력이 모자라게 되면 회전자에 회전속도는 저하되고 주파수는 내려간다. 따라서 전력계통의 주파수 변동폭을 일정한 범위 내에 유지시키기 위해서는 전력계통의 전체 발전력을 항상 소비전력과 손실전력의 합과 같게 하여 전력계통의 수급 균형을 유지하도록 총 발전력을 제어할 필요가 있다.

풍력발전은 바람의 에너지를 이용하기 때문에 출력의 변화가 생길 수밖에 없다. 따라서 정상상태 주파수 제어를 위하여 풍력발전기는 일정한 출력을 유지하기 위한 제어를 필요로 한다. 정출력 제어를 통해 유지할 수 없는 출력의 변동은 계통에 연계되어 있는 발전기들의 출력의 제어로 주파수를 유지하게 된다. 계통에 주파수가 하락하는 사고가 발생하면 연계된 발전기들은 순간적으로 관성응답을 하며 주파수 편차를 입력받아 규정 주파수로 회복하기 위해 출력을 변동하게 된다. 풍력발전기는 관성응답에는 참여하지만 조속기에 의한 제어를 하지 않으므로 출력의 변동을 통한 주파수 회복에는 참여하지는 못한다. 따라서 전체 계통용량에 비하여 풍력발전용량이 많아지게 되면 동기발전기만으로 구성된 계통에 비하여 사고에 대한 주파수 회복이 느려지게 된다. 따라서 계통 사고와 풍력발전의 사고를 고려해서 풍력발전용량을 산정해야 사고가 발생해도 안정적으로 계통을 운영할 수 있다. 과도상태의 주파수 회복은 조속기에 의하여 이루어지기 때문에 풍력발전용량은 계통에 연계된 발전기들의 주파수 응답 특성에 의하여 결정되어야 한다. 조속기의 응답 특성을 기준으로 풍력발전용량을 산정하기 위하여 먼저 계통에 연계된 발전기의 관성정수와 조속기의 속도조정율을 등가화하여 계통 주파수 응답을 분석한다.

2.1.1. 조속기 모델과 등가 관성정수

조속기는 발전기의 종류에 따라 다양한 방법으로 출력량을 제어하며 제어 방법에 따라 다양한 모델이 적용된다. 하지만 본 논문에서는 일반적인 조속기의 주파수 응답 특성을 분석하기 위해 그림 1의 조속기 모델을 사용한다[6].

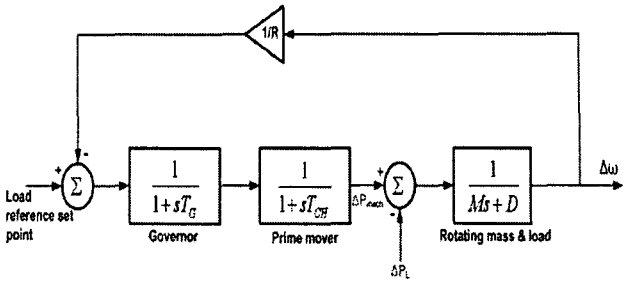

그림 1 일반적인 조속기 모델
Fig. 1 General Governor Model

계통에 외란이 발생한 과도상태에서 계통 주파수를 정주파수로 유지하기 위해 동기발전기는 속도조정율(droop) 운전으로 출력을 변화시킨다. 계통의 외란에 대한 정상상태에서의 주파수 편차를 구하기 위해 외란을 계단함수의 출력변동으로 나타내면 주파수 영역에서 외란을 (1)식과 같이 나타낼 수 있으며, 외란에 대한 주파수 편차의 전달함수는 (2)식과 같이 된다.

$$\Delta P_{accident}(s) = \frac{\Delta P_{accident}}{s} \tag{1}$$

$$\Delta\omega(s) = \Delta P_{accident}(s)\left(\frac{\frac{-1}{Ms+D}}{1+\frac{1}{R}\left(\frac{1}{1+sT_G}\right)\left(\frac{1}{1+sT_{CH}}\right)\left(\frac{1}{Ms+D}\right)}\right) \tag{2}$$

여기서, ω : 회전 속도 P_L : 부하량
D : 부하 댐핑 상수 T_G : 조속기 시정수
T_{CH} : 원동기 시정수 R : 속도 조정률
M : 기기의 각 운동량(Angular momentum of the machine)

계통 주파수는 연계된 모든 발전기들에 의하여 동시에 제어되기 때문에 계통에 연계된 조속기들의 특성을 모두 반영해야하며, 주파수 제어에 응답하는 정도가 발전기 마다 차이가 있으므로 속도조정율과 관성정수를 등가화는 방법을 사용한다[5]. 각 발전기의 관성 정수는 (3)식에 의해 등가화되어 합산함으로써 등가 관성정수를 구하고 속도조정율은 (4)식으로 계산하여 등가 속도조정율을 얻는다.

$$M_{eq} = \sum_{i=1}^{n} \frac{Machine_{base.i}}{System_{base,i}} \times M_{machine,i} \tag{3}$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{R_i} \tag{4}$$

속도조정율은 조속기 제어 시스템에서 궤환 신호(Feedback signal)인 주파수 편차에 이득 요소(Gain factor)가 되어 각 발전기의 기준(Reference) 값과 함께 출력제어를 위한 입력신호가 된다. 만약 속도조정율이 5 % 인 발전기 10 대가 연계되어있는 계통의 등가 속도조정율은 (4)식

에 의해 0.005 로 200(=1/0.0.005) 의 이득을 갖지만 풍력발전기가 2 기의 동기발전기를 대신하여 운전되면 0.00625 가 되어 160 으로 감소하게 되므로 주파수 변동에 대한 응답이 늦게 된다. 관성정수는 계통베이스에 의해 환산되어 합산되므로 동기발전기의 관성정수와 풍력발전기의 관성정수가 동일하다면 5 MW 용량의 풍력발전기 4 기가 20 MW 용량의 동기발전기를 대체하여도 동일한 값을 얻게 된다. 따라서 풍력발전기가 동기발전기를 대체하게 되면 등가 관성정수의 변화는 적지만 속도조정율에는 영향을 미친다.

2.1.2. 주파수 변화율의 적용

많은 종류의 조속기 모델이 있고 계통 주파수에 영향을 주는 성분이 다양하기 때문에 과도상태의 계통주파수 변화를 수식적으로 정의하기는 어렵지만, 외란이 발생하였을 때의 주파수 변화율($t=0$)과 이후 주파수가 회복되어 정상상태에 도달하였을 때의 주파수 편차(이 때의 주파수 편차는 0가 아니다) 값은 주파수 초기값 이론과 최종값 이론을 적용하여 도출할 수 있다. 최종값 이론(Final value theorem)을 (2)식에 적용하면 Δw 의 정상상태 값은 (5)식으로 구할 수 있다.

$$\Delta\omega_{|s.s.} = \lim_{s\to 0}[s\Delta\omega(s)] = \frac{-\Delta P_{dist}\left(\frac{1}{D}\right)}{1+\left(\frac{1}{R}\right)\left(\frac{1}{D}\right)} = \frac{-\Delta P_{dist}}{\frac{1}{R}+D} \quad (5)$$

여기서, 계통의 부하제동상수(load-damping constant; D)가 없다고 가정하면 주파수 편차는 (6)식으로 간단히 표현된다.

$$\triangle w_{|s.s.} = -R\times\Delta P_{dist} \quad (6)$$

(6)식은 정상상태 주파수 편차는 속도조정율과 외란의 값에 비례함을 나타낸다.

외란 발생 시점의 주파수 변화율은 (7)식과 같이 초기값 이론(Initial value theorem)에 적용한다. (2)식의 미분을 라플라스 변환하면 (7)식이 되며 초기값 이론을 적용하면 (8)식을 구하게 된다[7].

$$\frac{d}{dt}\Delta\omega(t)\Big|_{t=0} \leftrightarrow s^2\Delta\omega(s)\,|_{\,s->\infty} \quad (7)$$

$$s^2\triangle\omega_{|s->\infty} = s^2\Delta P_{dist}(s)\left(\frac{\frac{-1}{Ms+D}}{1+\frac{1}{R}\left(\frac{1}{1+sT_G}\right)\left(\frac{1}{1+sT_{CH}}\right)\left(\frac{1}{Ms+D}\right)}\right)\Bigg|_{s=\infty} = -\frac{\Delta P_{dist}}{M} \quad (8)$$

계통의 외란을 풍력발전기의 출력변동량(ΔP_{wind})으로 나타내고 그 때의 주파수 변화율을 m_{wind}라고 하여, (6)식과 (8)식을 정리하고 등가 관성정수와 등가 속도조정율을 적용하면 풍력발전기의 출력변동량에 대한 계통의 주파수 응답 특성을 정리할 수 있다[4].

$$\Delta w_{wind}|_{s.s} = -R_{eq}\times\Delta P_{wind} \quad (9)$$

$$m_{wind} = 60\times\left(\frac{d}{dt}\Delta\omega(t)\Big|_{t=0}\right) = -\frac{\Delta P_{wind}}{M_{eq}}\,Hz/s \quad (10)$$

여기서, Δw_{wind} : 풍력발전기의 출력변동에 의한 주파수 편차

R_{eq} : 계통 등가 속도조정율

ΔP_{wind} : 풍력발전기의 출력변동량

m_{wind} : 풍력발전기 출력변동 시의 주파수 변화율

M_{eq} : 계통 등가 관성정수

주파수 변화율에 관한 식인 (10)식을 출력변동량의 식으로 정리하면 (11)식을 얻을 수 있다.

$$\Delta P_{wind} = \frac{Mm_{wind}}{60}\,p.u. \quad (11)$$

즉, 풍력발전기의 출력변동에 의한 주파수 변화율은 풍력발전 변동량과 계통의 관성 정수로 알 수 있으며 반대로 주파수 변화율과 계통의 관성 정수를 알면 (11)식으로 풍력발전 변동량을 구할 수 있다. 풍력발전 변동량(ΔP_{wind})은 계통 시뮬레이션을 통해 주파수 변화율을 정하게 되면 (11)식의 관계에서 등가 관성정수와 기준 주파수 변화율을 통하여 최저허용주파수 이하로 주파수가 하락하지 않는 발전량 변동을 구할 수 있다.

그림 2 주파수 변화율과 풍력발전용량

Fig. 2 Rate of Frequency Change and Wind Power Capacity

2.2 풍력발전기의 최대출력 변동용량 및 풍력발전운전용량 산정 방법에의 적용

계통의 주파수 편차의 최대값은 신뢰도 기준에 의해서 정해진다. 즉, 현재 우리나라의 계통운용기준에서 정상적인 상태에서 허용하는 주파수 편차의 최대값은 $\pm 0.2Hz$이다. 이는 신뢰도 유지 기준에서 정하는 값이다. 그러나 대규모 발전기 탈락 등의 상정사고가 발생했을 때에는 이 기준이 적용되지 않는다. 현재 우리나라에는 이러한 경우에 대해서는 자세한 규정이 되어 있지 않다. 특히, 제주계통이 연계선 없이 단독으로 운전하고 있을 때의 주파수 유지 기준이 정해져 있지 않기 때문에 주파수 안정도를 유지하기 위해서는 연계선 없이 단독운전 경우에 대해서도 이러한 기준이 마련되어야 할 것이다. 본 연구에서는 이러한 유지 기준이 없기 때문에 $\pm 0.5Hz$를 주파수 편차의 최대값으로 가정하여 기술하도록 한다. 시스템에 발전기나 부하의 출력 변동 외란이 발생하였을 때, 주파수 편차가 최대값으로 하락하는 것은 계통의 등가관성정수와 출력 변동량에 따라 다르며, 외란 발

생 시의 주파수 변화율과도 관계가 있다. 즉, 계통 운영 중에는 계통의 등가관성정수를 알 수 있기 때문에 외란 발생 시점에서의 주파수변화율을 안다면 주파수 편차가 최대가 되는 출력 변동량을 쉽게 산정할 수 있다.

따라서, 어떠한 운영 조건에서도 계통의 관성 정수를 안다면, 가장 보수적인 주파수 변화율을 적용하여 그 시스템 운영 조건에서의 최대 주파수 편차를 초래하지 않는 최대출력 변동량을 산정할 수 있다. 이렇게 최대 출력 변동량을 산정할 수 있다는 것은, 제주계통의 연계선이 순간적으로 차단이 되었을 때, 풍력발전기의 최대 운전량을 순간적으로 결정하여 풍력발전기 단의 출력을 제한할 수 있는 조처를 취할 수 있다는 측면에서 매우 중요하다.

여기서 문제가 되는 것은 가장 보수적인 주파수 변화율을 어떻게 결정하는가 하는 문제이다. 본 논문에서 사용한 방법은 계통의 운전 가능한 발전기 조합에 대해서 다양한 운전점(operating point)에서 시뮬레이션을 통해 각각의 경우에 대해서 주파수 변화율을 결정하여 그 중에서 가장 보수적인 값을 대표값으로 정하는 것이다. 즉, 각각의 운전점에서 최대 주파수 편차가 0.5 Hz가 되는 출력 변동과 그 때의 주파수 변화율을 시뮬레이션을 통해 구한다. 가장 보수적인 주파수 변화율은 모든 운전점에서 구한 주파수 변화율 중 그 크기가 가장 작은 값이다.

최대 풍력발전 변동량이 결정되면, 그 때의 풍력발전운전용량은 식 (12)에서와 같이 풍력발전 출력변동계수를 이용하여 구할 수 있다. 이 때, 풍력발전 출력변동계수는 풍력발전기의 타입, 지역적 특성, 풍력발전기의 대수 등에 따라 다르게 나타나는 값으로 전체 풍력발전 출력 변동 데이터로부터 구할 수 있는 값이다.

$$WPOD = k_f \cdot WPC \tag{12}$$

이 때, $WPOD$: 풍력발전 출력변동용량
k_f : 풍력발전 출력변동계수
WPC : 풍력발전 운전용량

위의 내용을 정리하여 최대 풍력발전 출력변동량을 산정하는 절차는 다음과 같다.

① 단독계통 운전 시의 주파수 편차의 최대값을 결정한다.
- 신뢰도 유지 기준에서 정해지지만, 본 논문에서는 $\pm 0.5Hz$ 로 한다.

② 계통의 다양한 부하 레벨에 대한 운전점을 결정한다.
이 때, 동기로 운전중인 발전기의 조합에 따라 등가 관성정수가 달라진다.

③ 각 운전점에서 계통 시뮬레이션을 통해 주파수 편차의 최대값을 초래하는 출력변동량과 그 때의 주파수 변화율을 구한다.

④ 위 ③ 과정을 반복하여 급전 가능한 모든 조합의 시뮬레이션을 통해 각 경우의 주파수 변화율을 구한다.

⑤ 주파수 변화율은 풍력발전 출력변동의 최대값에 비례하am로 모든 운전 상황에 보수적으로 적용하기 위해 크기가 가장 작은 주파수 변화율을 풍력 발전용량 산정의 기준 주파수 변화율로 정한다.

⑥ 이 때의 기준 주파수 변화율을 적용하여 (11)식을 이용하여 풍력발전 최대출력변동량을 운전 중에 산출할 수 있다.

⑦ 풍력발전 최대출력변동량을 구하면, 식 (12)를 이용하여 풍력발전 운전용량을 산정할 수 있다.

3. 풍력발전최대출력변동용량 산정법의 제주계통 적용

3.1 제주계통 개요

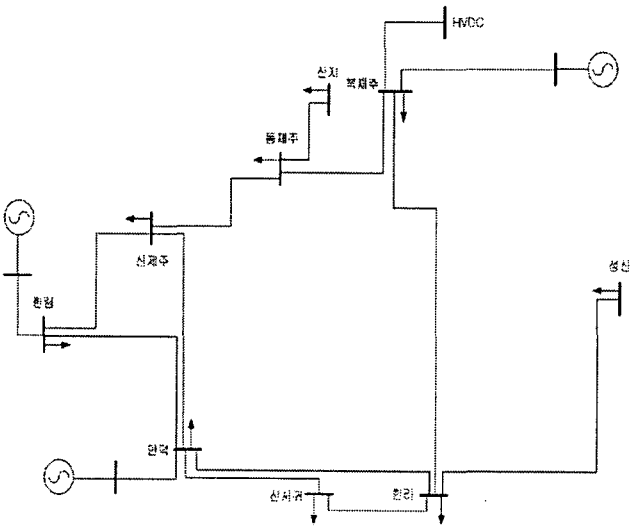

그림 3 사례 연구 계통도(제주도)
Fig. 3 Power System for Case Study(Jeju Island)

제주도의 부하량은 약 510 MW에서 350 MW 정도이며 제주도내의 발전기는 16 기로 북제주 7 기, 남제주 6 기, 한림 3 기의 총 657 MW의 발전설비가 운영 중이다. 북제주와 남제주의 발전기가 기저와 평균 부하를 담당하고 한림의 발전기는 첨두부하를 담당하고 있다. 현재 15.8 MW 용량의 풍력발전을 상용화 운전을 하고 있고 2007년 10 월까지 85.8 MW 용량의 추가 건설 계획이 추진 중이다[3]. 전력계통 구조는 10 개의 154 kV 모선에 송전망은 환상망을 이루고 있고 제주도내의 북제주 모선과 내륙 해남지역 모선이 2 회선의 연계선(HVDC)으로 연결되어 있다. 제주계통은 연계선에 의하여 연평균 40 % 정도의 전력을 공급 받고 있고 5 단계의 부하 차단을 통하여 사고에 대응 하도록 설계되어있다. 본 논문은 단독 계통 운전 시, 혹은 연계선의 정출력 운전시, 풍력발전기의 출력변동에 따른 연계 발전기들의 주파수 응답에 관한 분석이 목적이므로 연계선은 정출력 운전을 하는 것으로 모의하였다. MATLAB을 이용하여 시뮬레이션 하였고 풍력발전기는 현재 운영 중인 농형 유도발전기 모델을 사용하였다.

3.2 풍력발전용량 산정

풍력발전의 최대 출력변동용량은 기준 주파수 변화율과 계통 등가관성정수에 의하여 정해진다. 각각의 부하 수준에 따른 발전기 운전 조합에 따라 시스템의 등가관성정수가 달라지므로, 각각의 운전점에서 최대 주파수 변화량을 초래하는 출력변동량과 주파수변화율을 시뮬레이션을 통하여 구하고, 그 중 가장 보수적인 주파수 변화율을 기준주파수변화율로 미리 정해 둔다. 이렇게 정한 기준주파수 변화율을 이용하여, 실제 운전 중에 발전기 등가 관성정수를 알 수 있기 때문에 그 때의 최대주파수 변동량을 초래하는 풍력발전기의 출력변동량을 산정할 수 있다. (3)식을 통해 등가관성정수를 구하기 위한 제주도 내의 각 발전기의 설비용량과 관성정수는 표 1과 같다.

표 1 발전기 용량과 관성 정수
Table 1 Generator Capacity and Moment of Inertia

구 분	설비 용량 (MVA)	관성 정수 (H)
제주기력 #1	10.0	3.00
제주기력 #2	79.0	5.40
제주기력 #3	79.0	5.40
제주내연 #1	45.0	6.02
제주G/T #1	55.0	1.86
제주G/T #2	55.0	2.56
제주G/T #3	55.0	2.56
남제주기력 #1	10.0	3.465
남제주기력 #2	10.0	3.465
남제주내연 #1	10.0	2.55
남제주내연 #2	10.0	2.55
남제주내연 #3	10.0	2.55
남제주내연 #4	10.0	2.55
한림복합G/T #1	35.0	6.00
한림복합G/T #2	35.0	6.00
한림복합S/T #1	35.0	6.00

제주 내의 모든 발전기가 운전하게 되는 하계의 경우 등가 관성 정수는 46.786 이며 부하량이 적은 춘계의 경우는 20.792 이다. 계통의 부하량이 동일하여도 과도상태의 주파수 변화는 연계되어 운전 중인 발전기의 관성정수와 속도조정율에 의하여 다르게 나타난다. 따라서 모든 상황에 맞는 기준을 정하기 위해서는 모든 발전기의 계통 연계 조합을 고려해야 하며 사고량과 주파수 변화율의 관계는 수식적으로 완전하게 해석이 불가능하기 때문에 계통 상황을 시뮬레이션하여 기준 최저 주파수를 만족하는 출력변동량을 구한다. 기준 최저 주파수에서 회복하는 출력변동량을 구하면 (10)식의 관성정수와 출력변동량의 관계에 의해 주파수 변화율을 구할 수 있다. 제주도 내의 발전기 운전 상황을 8가지의 경우로 가정하고 시뮬레이션하여 구한 결과를 정리하면 표 2가 된다.

표 2 각 운전점에서의 주파수 변화율
Table 2 Rate of Frequency Change at Operating Points

	부하량 (MW)	등가 관성 정수	출력변동량 (MW)	최저 주파수 (Hz)	주파수 변화율 (Hz/s)
CASE 1	351.2	20.792	31.8	59.50	0.765
CASE 2	365.3	23.972	32.6	59.50	0.680
CASE 3	400.8	27.336	36.2	59.50	0.662
CASE 4	420.6	32.432	36.8	59.50	0.567
CASE 5	447.1	36.340	46.6	59.50	0.641
CASE 6	457.3	38.254	54.9	59.50	0.718
CASE 7	472.5	42.586	56.0	59.50	0.657
CASE 8	512.6	46.786	60.0	59.50	0.641

(10)식의 관계를 보면 주파수 변화율은 출력변동량과 비례 관계에 있으므로 주파수 변화율 중에 가장 작은 값을 기준으로 정하면 모든 경우에 기준 최저 주파수 보다 빠르게 주파수가 회복되는 출력변동량을 구할 수 있다. 표 2에서 최소 변화율은 0.567 Hz/s 이며 이 값을 기준으로 하여 (11)식에 대입하여 얻은 각 운전 상황별 최대 출력변동량은 표 3과 같다.

표 3 최대 출력변동용량
Table 3 Maximum Power Output Change

	부하량 (MW)	등가 관성 정수	최대 출력변동용량 (MW)
CASE 1	351.2	20.792	23.6
CASE 2	365.3	23.972	27.2
CASE 3	400.8	27.336	31.0
CASE 4	420.6	32.432	36.8
CASE 5	447.1	36.340	41.2
CASE 6	457.3	38.254	43.4
CASE 7	472.5	42.586	48.3
CASE 8	512.6	46.786	53.1

표 3은 동기발전기로 구성된 계통으로 시뮬레이션하여 얻은 결과로 풍력발전기가 동기발전기를 대체하게 되면 계통의 속도조정특성이 달라지므로 풍력발전의 출력변동량을 계산하기 위해서는 속도조정율의 수정이 필요하다. 따라서 표 4와 같이 풍력발전의 운전에 의한 속도조정율의 변화를 반영해야 풍력 발전기가 있는 계통에서 풍력발전의 출력변동에 따른 주파수가 기준 최저 주파수 이전에 회복할 수 있다.

계통에 연계된 발전기들의 용량, 관성정수, 속도조정율을 알 수 있으면 시뮬레이션을 통해 기준 주파수 변화율을 구하고 등가 관성정수를 통하여 최대 풍력발전용량을 구한다. 만약 주파수 제어에 관여하는 발전기를 대체 하여 풍력발전기가 운전되는 경우에는 그만큼의 등가 속도조정율 저하 특성을 반영하여 최대주파수 변화량 범위 안에서 운전할 수

표 4 최대풍력발전 출력변동용량과 풍력발전운전용량
Table 4 Maximum Output Change and Operational Capacity

	등가 속도조정율		최대풍력출력 변동량 (MW)	풍력발전 운전용량 (MW)
	동기기만 운전하는 경우	풍력발전기가 투입된 경우		
CASE 1	0.00714	0.00833	20.2	47.2
CASE 2	0.00714	0.00833	23.3	54.4
CASE 3	0.00625	0.00714	27.1	63.3
CASE 4	0.00625	0.00714	32.2	75.2
CASE 5	0.00500	0.00556	37.1	86.7
CASE 6	0.00417	0.00455	39.8	93.0
CASE 7	0.00417	0.00455	44.3	103.5
CASE 8	0.00385	0.00417	49.0	114.5

※ 조속기의 속도조정율은 모두 5 % 로 가정

있는 풍력발전 출력변동량을 계산할 수 있다. 또한 기준 주파수 변화율 값은 계통 시뮬레이션을 통해 이미 정해져 있으므로 계통의 발전기 운전 상황이 바뀌게 되면 변화된 관성정수 값을 적용하여 운전 상황에 맞는 최대 풍력발전변동량을 계산할 수 있다. 계통이 허용하는 풍력 발전변동량이 결정되면, 그 때의 적정 풍력발전 운전량은 풍력발전 출력변동계수를 이용하여 구할 수 있다. 그러나, 아직 제주 계통을 전체를 대상으로 이러한 값을 구할 수 있는 데이터베이스가 마련되어 있지 않다. 현재까지 한경 풍력발전소의 경우 단위 기기별로 풍속이 15 - 20 m/sec인 경우 출력 변동이 10초 동안 42.8% 까지 나타난 기록이 있다. 따라서 이 값을 단순히 적용하면 운전점에 따라서 47 Mw - 114.5 Mw 까지 운전을 허용할 때 최대 주파수 변화를 0.5 Hz 이내로 유지할 수 있음을 알 수 있다.

4. 사례연구를 통한 검증

4.1 최대 부하 시 적용

2005년 PSS/E 하계 제주 계통데이터에 본 논문에서 제안된 방법을 적용하였다. 총 부하량은 512.6 MW 이며 제주내의 모든 발전기가 운전 중이고 이때의 등가 관성정수는 46.786 이다. 내륙 연계선을 통해 공급 받는 전력은 155 MW 로 전체 전력량의 30.2 % 이다. 이 때 표 4에서와 같이 49.0 MW 의 풍력발전 변동량이 계산되었다. 따라서 풍력발전기가 제주 G/T#2 (55MW 용량) 동기발전기를 대체하여 49.0 MW 출력하다가 이 용량만큼 탈락한 경우를 시뮬레이션 하였다. 49.0 MW 로 운전 중인 풍력발전기가 계통에서 탈락 하였을 경우 최저 주파수는 59.5313 Hz 로 한계 설정 주파수인 59.5 Hz 보다 높은 값에서 계통 주파수가 회복됨을 알 수 있다.

4.2 최소 부하 시 적용

2006년 춘계 제주 계통 데이터에 동일한 방법을 적용하여 시뮬레이션 하였다. 총 부하량은 351.2 MW 이며 등가 관성

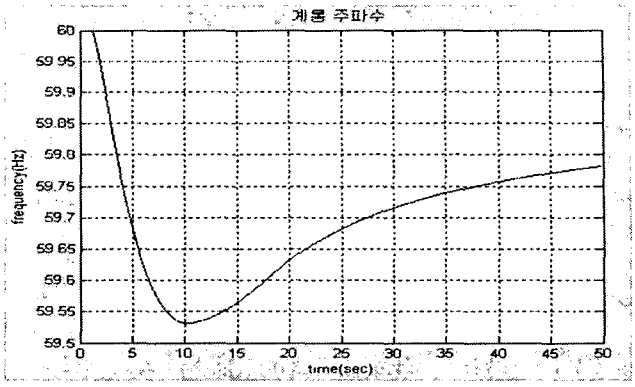

그림 4 49 MW 풍력발전출력 변동 시의 계통 주파수 변화
Fig. 4 System Frequency Plot with Power Change(49 Mw)

정수는 20.792 이다. 내륙 연계선을 통해 공급 받는 전력은 155 MW 로 전체 전력량의 44.1 % 이다.
기준 주파수 변화율은 부하량과 상관없이 보수적으로 정해진 값이므로 최대 부하 시와 동일한 값인 0.567 Hz/s 로 적용한다. 표 4에서 20.2 MW 의 풍력발전변동량이 계산되었다. 따라서 풍력발전 단지가 남제주 내연#1 (10MW), #2 (10MW) 발전기를 대체하여 20.2 MW를 운전한다고 가정한다. 20.2 MW 로 운전 중인 풍력발전기가 계통에서 탈락하여 그 만큼의 출력 변동이 발생했을 경우, 최저 주파수는 59.6379 Hz 로 한계 설정 주파수인 59.50 Hz 보다 높은 값에서 계통 주파수가 회복됨을 알 수 있다.

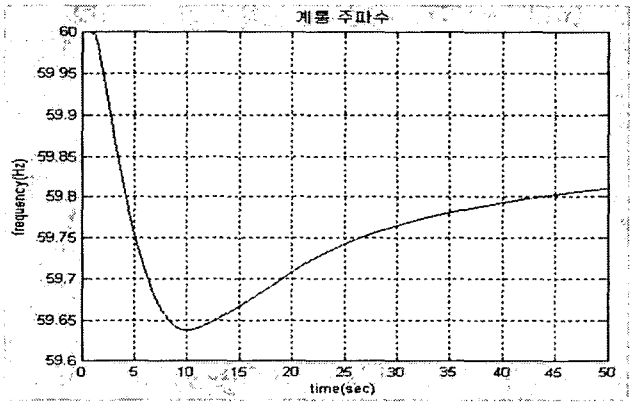

그림 5 20.2 MW 풍력발전 출력변동 시의 주파수 변화
Fig. 5 System Frequency Plot with Power Change(20.2 Mw)

5. 결론 및 향후연구

본 논문에서는 대용량 풍력발전단지가 계통에 연계되는 경우, 풍력발전이 계통의 주파수에 미치는 영향을 분석하고, 적정용량을 산정하는 방법론을 제시하였다. 계통의 주파수 변화량은 발전력의 변화, 발전기 관성, 주파수 변화율, 속도조정율에 따라 달라지기 때문에, 이 들의 관계를 이용하여 적정용량을 산정하였다. 계통이 허용하는 최저 주파수에 해당하는 주파수 변화율을 미리 구하고, 운전 조건에서 발전기의 관성과 속도조정율을 이용하여 각 운전점에서의 적정 풍력발전운전용량을 산정하였다. 산정된 용량을 제주도 계통

에 적용하기 위해 MATLAB을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 현재의 운전 상황에서 주파수 유지 기준을 만족하기 위한 적정 풍력발전 운전용량을 산정할 수 있다면, 앞으로 대단위의 풍력발전단지가 건설이 되는 경우 제주 계통의 안정운전을 위해 풍력발전단지의 출력을 조정하는 데 이용할 수 있다는 큰 장점이 있다.

본 연구에서는 풍력발전 출력변동을 계단함수로 가정하고, 풍력발전 출력변동계수를 단위기기에 대한 값을 적용하였기 때문에 실제 보다 가혹한 조건을 가정하였다. 앞으로 풍력발전 출력변동의 시간적 특성, 그리고 많은 풍력발전기가 출력하는 경우의 특성, 지역적 특성 등의 데이터 베이스를 구축하여 보다 현실적인 연구가 지속되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 홍익대학교 학술연구 조성비로 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] L. Holdsworth, X.G. Wu, J.B. Ekanayake "Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances", IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Vol. 150, No. 3, May, 2003, pp. 343-352

[2] Gillian Lalor, Alan Mullane, Mark O'Malley, "Frequency Control and Wind Turbine Technologies", IEEE, Trans. on Power Systems, Vol. 20, No. 4, Nov. 2005, pp. 1905-1913

[3] 김영환, "제주지역 풍력발전기에 의한 전력계통운영 영향분석", 대한전기학회, A 권, July, 2005, pp. 127-129

[4] P. M. Anderson, M. Mirheydar, "An Adaptive Method for Setting Underfrequency Load Shedding Relays", IEEE, Transaction on Power Systems, Vol. 7, No. 2, May, 1992, pp. 647-655

[5] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-HIll 1994, New York, pp. 444-448

[6] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg, "Power Generation and Control", John Wiley & Sons, Inc. 1996, New York, pp. 336-340

[7] P. M. Anderson, M. Mirheydar, "A Low-Order System Frequency Response Model", IEEE, Transaction on Power Systems, Vol. 5, No. 3, Aug, 1990, pp. 720-729

[8] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-HIll 1994, New York, pp. 581-597

[9] P. M. Anderson, "Power System Control and Stability", IEEE Press, New York, pp. 83-140

[10] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-HIll 1994, pp.279-305

[11] Chee-Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink", Prentice Hall 1998, pp. 273-278

[12] Daniel Ruiz-Vega, Tomas I. Asiain Olivares, Daniel Olguin Salinas, "An Approach to the Initialization of Dynamic Induction Motor Models", IEEE, Transaction on Power Systems, Vol. 17, No. 3, Aug., 2002, pp. 747-751

[13] 송길영, "신편 전력계통공학", 東逸出版社 1998, pp.147-152

[14] E. W. Kimbark, "Power System Stability", John Wiley & Sons, Inc. 1948, 15-27

[15] Hadi Saadat, "Power System Analysis", WCB/Mcgraw-Hill 1999, pp.461-464

[16] 최승호, 황교익, 전영환, "단독계통의 주파수 제어를 위한 자동발전제어(AGC) 특성 분석 및 새로운 제어 전략", KIEE, Trans. Vol. 54A, No. 11, Nov, 2005, pp. 540-547

[17] T. Ackermann, "Wind Power in Power Systems", John Wiley & Sons, Inc. 2005

저 자 소 개

황 교 익 (黃 敎 益)

1978년 11월 5일생. 2004년 홍익대 공대 전자전기공학부 졸업. 2004년~2006년 동대학원 전기정보제어학과 석사과정 졸업.
Tel : 02-320-1620
Fax : 02-320-1110
E-mail : 0sun2love@naver.com

전 영 환 (全 瑩 煥)

1961년 2월 8일생. 1983년 서울대 공대 전기공학과. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1985~1994년 한국전기연구소 근무. 1997년~1998년 동경대 조수 역임. 1998년~2002년 한국전기연구원 그룹장. 2002년~현재 홍익대 전자전기공학부 교수
Tel : 02-320-1620
Fax : 02-320-1110
E-mail : yhchun@hongik.ac.kr