

소규모 전력계통에서 풍력발전 증대에 따른 계통주파수 영향

이성규*, 이종순*, 박진우**, 이강원***
 *한국전력공사, **서울대학교, *** (주)대화기술사

The System Frequency Impact of an Increasing Amount of Wind Power in Weak Grids

Seung-Keu Lee*, Jong-Soon Lee*, Jin-Woo Park**, Kang-Wan Lee***
 *KEPCO, **SEOUL National University, ***DAEHWHA Engineering & Consultants Co., Ltd.

Abstract - 오늘날 풍력발전은 신재생에너지 중에서 실효성 및 경제성이 우수한 에너지원으로 지속적인 기술개발에 따라 규모의 대형화와 더불어 이의 확산이 빠르게 진행되고 있어 전력계통에서 차지하는 비중이 점점 증대되고 있다. 바람이 많은 제주도는 풍력발전에서 비교적 유리한 지역으로 평가되고 있어 앞으로 많은 풍력발전설비가 설치될 전망이다. 그러나 풍력발전은 특성상 전력품질 적정 유지 및 전력공급 신뢰도 측면에서 취약한 형태이며 특히 HVDC로 내륙 전력계통과 연계된 제주 전력계통은 HVDC 운전 형태에 따라 순동예비력 확보가 다르게 되어 계통주파수 제어에 어려움이 있게 된다. 본 논문은 HVDC로 연계된 소규모 전력계통인 제주 전력계통의 풍력발전 증대에 따른 계통주파수 변화 특성을 과도안정도 해석프로그램으로 분석하여 풍력발전시스템 계통 연계관련 안전성 등을 조사한 것이다.

전력계통의 동특성을 제대로 해석하기 위해서는 전력계통의 모의가 잘 이루어져야 한다. 특히 제주 전력계통은 발전기와 이에 관련된 제어설비모델 및 부하모델 모의 외에도 HVDC제어시스템의 모의 그리고 본 논문의 주제인 풍력발전시스템이 적절하게 모의되어야 하며, 제주 전력계통은 규모가 작아 부하변화에 대한 주파수 변화가 크게 나타나며 부하의 구성도 산업체가 거의 없어 대부분 주거 또는 관광영업용으로 내륙 본 계통과 다르게 적용하고 있는 부하모델 및 부하차단 방안도 고려되어야 한다.

제주 전력계통은 2008년에 최대/최소수요 600/300MW로 예상됨으로 HVDC에 의한 내륙으로 부터의 수전 150~40MW와 풍력발전 50~120MW를 고려한 기력 100MWX2기와 내연출력의 경제적 배분도 살펴봐야한다. 그리고 기력 단위기 출력이 계통수요의 15~30%를 초과함으로 이의 탈락을 모의하고 풍력발전 비중 증대에 따른 계통주파수 영향을 검토한다.

1. 서 론

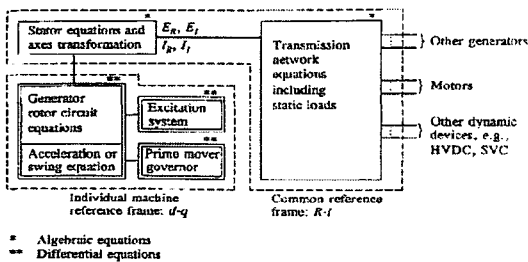
2. 본 론

전력계통의 주파수는 발전기들 전체 입력과 출력 간의 차 즉, 계통 전체의 발전력과 전력수요와의 사이에 불균형이 생겼을 경우에 변동한다. 전력계통에서는 변동하는 수요에 응답할 수 있도록 필요 충분한 예비력이 확보 되어있어야 적정 계통주파수 유지가 가능하게 된다.

내륙과 HVDC로 연계되어있는 제주 전력계통에서는 GFC 및 AGC 기능에 의해 발전기 출력이 부하를 추종하도록 하고 그리고 HVDC의 LFC기능에 의한 연계선 전력조류를 조정하여 주파수를 조정한다.

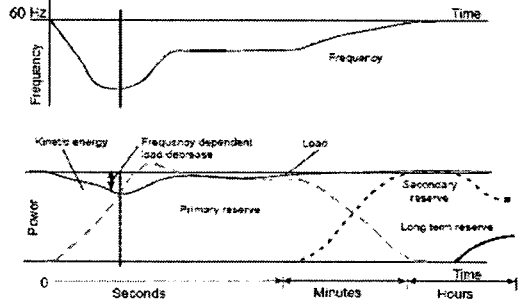
2.1 예비력에 의한 주파수 제어

전력계통 운영에서 계통주파수의 규정범위 안정유지는 전력품질 유지 및 전력공급 신뢰성 확보를 위해 매우 중요한 항목이다. 내륙과 HVDC로 연계되어있는 제주 전력계통에서 수요와 발전 간의 불균형 또는 전기사고에 의한 왜란으로 주파수가 변하면 이를 규정주파수로 회복시키기 위해 발전기 조속기추종제어(Governor Free Control : GFC) 및 자동발전제어(Automatic Generation Control : AGC) 기능에 의해 발전기 출력이 부하를 추종토록하고 그리고 HVDC 정주파수제어(Load Frequency Control : LFC) 기능에 의해 연계선 전력조류를 조정하여 주파수를 제어한다.



<그림 1> 과도안정도 해석 개요도

과도안정도 해석프로그램은 전력계통의 구성, 조속기, 여자기 및 안정화 설비들이 구비된 발전기 특성과 부하의 주파수특성 등이 고려된 전력계통의 시간적인 동특성을 규명하는 것이다. 제주 전력계통은 여기에 전력 용동에 이용되고 있는 HVDC 동특성 및 지속적으로 확대되고 있는 풍력발전시스템 동특성을 표현하는 특정 모델을 포함하여 동특성을 규명해야한다. <그림 1>은 과도안정도 해석 개요를 나타낸 것이다.[1]



<그림 2> 발전기 탈락시 주파수제어 예

<그림 2>는 일반 전력계통에서 발전기 탈락과 같이 발전력이 부족한 불균형 상태에서 발전기와 같은 관성에너지와 1차 및 2차 예비력에 의해 계통주파수가 제어되는

예를 나타낸 것이다. 즉, 발전 입출력 불균형 발생으로 계통 주파수가 저하하는데 초기에 발전기 및 전동기와 같은 회전체의 관성에너지에 의해 주파수가 서서히 감소하게 된다. 1차 예비력은 일종의 순동예비력으로 초단위로 응답하고 2차 예비력은 수동 또는 자동으로 10분에서 15분 이내에 응답하는 예비력으로 제주 전력계통에서는 부하조정(Load management)으로 확보한다.[2]

제주 전력계통의 경우 전력수요의 상당 부분을 비교적 응답 속도가 빠른 HVDC 연계선로 조류에 의해 공급되고 있어 HVDC 운전형태 및 제어 동특성에 의해 계통주파수가 변화된다.

2.2 전력계통 모의

2.2.1 부하 모의

전력계통의 동특성을 해석하기 위해 고정자와 회전자로 구성되어있는 발전기 모델 및 여기에 관련된 제어설비를 모델화한다. 발전기 관련 제어설비는 발전기 단자 전압을 조정하는 응답속도가 빠른 여자기(Exciter), 터빈의 기계적인 입력과 발전기의 전기적인 출력이 평형을 유지하도록 조절하는 조속기(Governor) 및 발전제어의 최적화는 물론 계통 동요를 억제하기 위한 안정화장치(Power system stabilizer)가 있다.

전력부하는 전압의 크기에 따라 그리고 주파수 상태에 따라 변하게 된다. 과도안정도 해석에 이용되는 부하모형은 전압변화에 따른 유효 및 무효전력 상관관계와 주파수 변화에 따른 유효 및 무효전력 상관관계를 설정해야한다. 본 연구에서는 <표 1>과 같은 부하모델을 사용하여 전력계통 동특성을 모의한다.

<표 1> 부하 모델 [단위: %]

구분	정전력	정전류	전압과 주파수 의존 부하
유효전력	50.8	14.1	35.1
무효전력	26.3	29.3	44.4

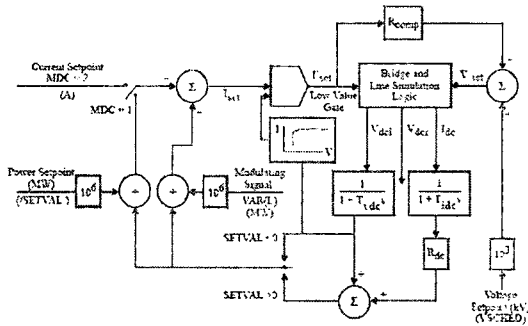
다음은 전압과 주파수 의존 부하모델 표현 식이다.[3]

$$P = P_0 \left[\frac{KPF1}{100} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n1} (1 + KPF1 \cdot \Delta f) + \frac{KPF2}{100} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{n2} (1 + KPF2 \cdot \Delta f) \right]$$

$$Q = Q_0 \left[\frac{KQF1}{100} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{m1} (1 + KQF1 \cdot \Delta f) + \frac{KQF2}{100} \left(\frac{V}{V_0} \right)^{m2} (1 + KQF2 \cdot \Delta f) \right]$$

2.2.2 HVDC 모의

제주 전력계통은 지역이 갖는 제약에 따라 전력 생산의 경제성과 전력공급 신뢰성을 높일 수 있도록 제주 해남간 300MW, 150kV 양방향 방식의 HVDC 시스템이 정주파수제어 형태로 운전되고 있다.



<그림 3> HVDC 제어시스템

<그림 3>은 HVDC 제어시스템을 나타낸 것이다.[4]

직류송전 점토각 한계는 과도상태에서 정태상태보다 넓은 범위에 있게 된다. 순시전류 설정치는 전력조류에서 정해진 여유전류를 감안하여 정류기 전류 설정치를 따른다. 직류운전 설정치 VSCHED, SETVAL 및 MDC

등은 조류계산 데이터에 의해서 변경된다.

2.2.3 풍력발전시스템 모의

풍력발전시스템 모델은 기존의 경우 구조가 간단한 초기 형태인 SCIG(Squirrel cage induction generator)로 그리고 새로 설치될 풍력발전시스템은 전력전자변환기를 적용하여 회전자 권선에 전력을 공급함으로써 어느 정도 속도 조정이 가능하고 고정자 무효전력을 조정할 수 있어 효율과 전력품질 측면에서 유리한 DFIG(Doubly-fed induction generator)형태로 모의 한다.[5]

풍력발전시스템은 154kV 변전소에서 22.9kV 전운선로를 통하여 계통에 연계된 것으로 하고 각각의 풍력단계를 단일터빈모델(Single turbine model)로 모의한다.

2.2.4 부하차단 방안 모의

제주 전력계통은 내륙과 HVDC로 연계되어 있는 비교적 소규모의 전력계통이다. 제주 전력계통은 이와 같은 특수성이 고려된 주파수 운전 한계를 벗어나지 않도록 안정화 대책으로 부하차단 방안을 적용하고 있다. 전력계통 부하차단 방안 및 운영실태는 전력계통 규모와 이의 구성 형태에 따라 각각 다르게 된다. 즉, 제주 전력계통은 규모가 작아 부하 변화에 대한 주파수 변화가 크게 나타난다. <표 2>는 현재 적용되고 있는 제주 전력계통 부하차단 방안을 나타낸 것이다.

<표 2> 부하차단 방안

단계	UFR 댕[Hz]	부하차단[%]	지연시간[Hz]
1	59.2	10	10
2	59.0	10	10
3	58.6	10	10
4	58.4	10	6
5	58.0	7	6
6	57.6	5	6
합계		52	

최초 부하차단은 59.2Hz에서 시작된다. 이는 내륙의 부하차단 시작 주파수 58.8Hz에 비해 높은 주파수로 전력계통 규모와 HVDC에 의한 내륙과의 연계 특성을 감안 한 것이다.

2.3 전력계통 규모와 발전 배분

지속적으로 증가되고 있는 제주 전력계통 2008년 최대 수요는 600MW 정도로 예상되며 기저부하는 최대수요의 50%를 가정하여 300MW로 예상된다. 최소부하 300MW가 나타나는 날 최대부하를 450MW로 가정하면 이날의 경제적인 발전계획은 가동시간이 매우 짧은 가스터빈 발전기 등을 고려하여 400MW 이상을 감당하도록 준비할 필요가 있다. <표 3>은 최소부하 300MW 수준에서 HVDC에 의한 150MW 직류 송전을 고려하여 제주 전력계통의 경제적인 발전계획 우선순위를 나타낸 것이다.

<표 3> 최소부하 300MW 수준에서 경제 발전계획

발전기	최대출력 (MW)	최소출력 (MW)	변동비 단가 (원/kWh)	우선 순위
남제주내연#1	18	7	74.01	1
남제주내연#2	17	7	74.01	1
제주내연#1	38	26	74.49	3
남제주기력#3	93	50	74.58	4
남제주기력#4	93	50	74.58	4
합 계	259	140		

현재 제주 전력계통에서 운전중인 풍력발전기는 19MW 규모이며 2008년까지 설치 희망중인 풍력발전을 고려하면 총 누적용량은 200MW 이상이 된다. 그러나

현재와 같이 HVDC 운전 형태가 내륙에서 제주로 한 방향으로 그리고 기술적인 안정운전 한계인 40MW 이상이라는 전력조류 조건하에서 풍력발전 한계용량이 있게 된다.

<표 4>는 300MW 부하수준에서 HVDC 안정운전 제약인 40MW를 고려한 풍력발전 증대에 따른 발전 배분을 예상한 것이다.

<표 4> 300MW 부하수준에서 풍력발전을 포함한 발전계획

발전 Case	내연	화력	풍력	HVDC	합계
Case 1	40.00	175.67	47.80	40.00	303.47
Case 2	40.00	162.64	61.00	40.00	303.64
Case 3	40.00	144.64	80.70	40.00	305.35
Case 4	40.00	118.64	110.70	40.00	309.34

전력계통 주파수 제어에 크게 기여하는 순동예비력은 화력발전이 풍력발전에 비하여 유리하다. 따라서 상시 부하 변동으로 나타나는 발전과 수요의 불균형으로 발생한 주파수 변화를 제어하기 위해서는 적정 화력발전 비중이 요구된다. 여기서 풍력발전 비중 증대에 따라 발전 합계가 증가하는 것은 풍력발전단지 까지 22.9kV 배전선로를 통해서 계통에 연계되어 연계선로 손실이 상대적으로 크기 때문이다.

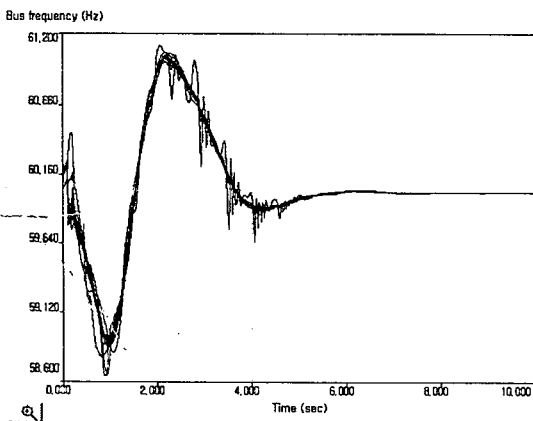
2.4 풍력발전 증대에 따른 계통주파수 영향

제주 전력계통에서 수요와 발전 간 불균형으로 나타나는 계통주파수 변화를 고찰하기 위해 최신회력발전기가 있는 남제주화력발전소에서 전기 사고로 화력발전기 1기에 해당되는 100MW정도 발전이 탈락하는 것을 모의한다. 고장이 발생하게 되면 보호계전기가 이를 검출하여 고장 구간이 건전한 전력계통으로부터 분리되도록 차단기를 개방한다. 이때 차단기가 개방 될 때까지의 시간을 고장제거시간(Fault clear time)이라고 한다. 여기서는 발전기 단자에 3상단락고장을 모의하고 0.1초 후에 고장 제거와 동시에 100MW발전이 탈락하는 것을 모의한다.

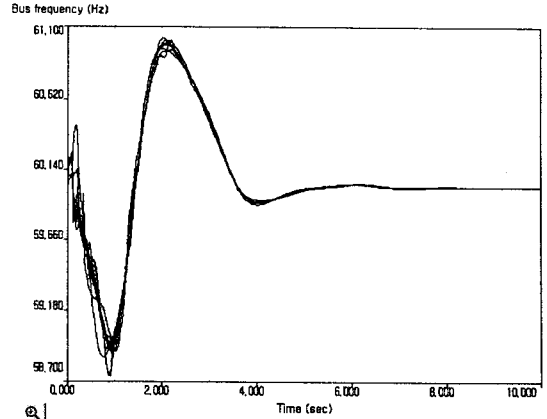
<그림 4>에서 <그림 7>까지는 각 Case별 모션 주파수를 나타낸 것이고 <표 5>는 각각의 부하차단 결과를 요약한 것이다. 여기에 나타난 것과 같이 풍력발전 비중이 증대됨에 따라 주파수제어가 불리한 상태를 보여주고 있다.

<표 5> Case별 부하차단 결과

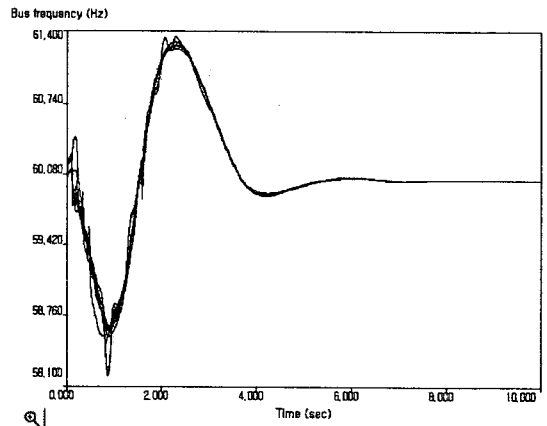
발전 Case	차단단계	차단량[MW]	최저주파수[Hz]
Case 1	2	57.52	58.64
Case 2	2	57.72	58.73
Case 3	2	57.72	58.19
Case 4	3	86.28	57.71



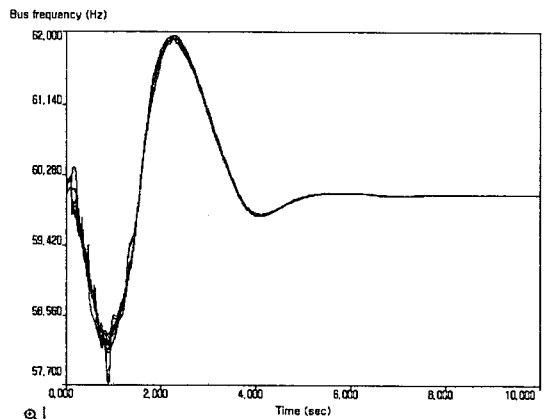
<그림 4> Case 1 모션 주파수



<그림 5> Case 2 모션 주파수



<그림 6> Case 3 모션 주파수



<그림 7> Case 4 모션 주파수

<표 5>에 나타난 부하차단 결과는 부하차단 방안에 정한 20% 및 30%에 못 미치고 있다. 이는 발전소 내 소비전력이 빠졌기 때문이다.

Case 1의 경우 Case 2에 비해 최저 주파수가 더 낮게 나타나는 것은 Case 2의 경우 부하차단 시작이 Case 1보다 빨리 진행되어 발전출력 입출력 불균형이 상대적으로 빨리 해소된 영향 때문이다.

모션 주파수가 회복된 다음 60Hz 이상까지 진행되어 과도하게 상승한 것은 발전기들 또는 HVDC 주파수 제어 이득(Gain)이 너무 크거나 또는 필요 차단부하 이상

을 차단하였기 때문일 것으로 판단되며 이는 앞으로 연구가 필요한 사항이다.

풍력발전 비중이 가장 큰 Case 4 경우 3단계 부하차단이 일어났으며 계통주파수도 최저 부하차단 단계인 6단계 저주파수계전기 댕 57.6Hz에 근접한 상태이다. 따라서 최저 부하수준 300MW에서 부하의 40%인 120MW 이상 풍력발전이 점유하게 되면 계통의 안정운전을 위협받게 될 것으로 판단된다.

3. 결 론

풍력발전은 실효성 및 경제성으로 인하여 규모의 대형화와 더불어 이의 확산이 빠르게 진행되고 있다. 바람이 많은 제주도는 풍력발전에서 비교적 유리한 지역으로 평가되어 앞으로 많은 풍력발전 설비가 설치될 전망이다. 그러나 풍력발전은 자연환경에 의존하여 발전하기 때문에 전력공급 신뢰도와 전력품질 측면에서 비교적 불리하다. 따라서 HVDC로 연계된 소규모 전력계통인 제주 전력계통은 안정도 등을 고려하여 풍력발전량을 제한할 필요가 있게 되었다.

전력계통의 동특성을 현실과 유사하게 모의하기 위해서는 전력계통을 구성하고 있는 각 전력설비의 정확한 정태 및 동태 특성을 모의해야 된다.

과도안정도 해석프로그램을 이용하여 2008년 기준 최저부하 300MW정도에서 제주 전력계통 주파수 변화를 모의한 결과 풍력발전량이 120MW를 넘지 않는 것이 바람직한 것으로 나타났다. 그러나 앞으로 풍력발전 연계 기준 강화, 집중 제어할 수 있을 SCADA 설치 및 HVDC 증설과 같은 적정 대책들이 보완될 경우 풍력발전 한계용량이 증대 될 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. Kunder, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, 1993
- [2] Holttinen, Hannele, "The impact of large scale wind power production on the Nordic electricity system", VTT Publications, November 2004
- [3] DSATools, "TSAT Model Manual", Powertech Labs Inc. April 2007
- [4] PSS/E 30.2, "Volum II: Program Operation Manual", SIEMENS, November 2006
- [5] 이종순, 이강완, "풍력발전시스템을 포함한 전력계통 과도안정도 모의", 2007년도 대한전기학회 학계학술대회논문집, 2007, 7