

제주계통 연계선 고장 시 풍력을 고려한 부하차단 용량 계산에 관한 연구

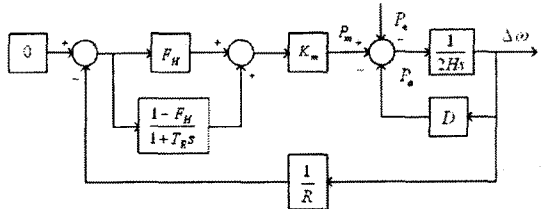
황교익 전영환
홍익대학교 전기정보제어공학과

A study on load shedding considering wind power effect in Che-ju island

Kyo ik Hwang Yeong Han Chun
Hongik Univ.

Abstract - 풍력 발전에 대한 관심이 증대 되면서 우리나라도 제주도과 강원도를 중심으로 풍력에 대한 계통연계를 시도 하고 있다. 특히 제주도의 경우 풍속이 적절하여 현재 총 15.8MW 설비의 풍력 발전 설비를 갖고 있으며 높은 이용률을 보이고 있다. 2007년 까지 추가 건설 계획 중인 용량은 85MW로 계속적으로 설비를 확대 하고자 한다. 계획 중인 풍력 용량이 완공되면 제주도 전체 설비의 14%에 달하게 된다. 이런 용량의 증가는 풍력 발전기의 불규칙적인 특성상 제주도의 전력 시스템에 영향을 줄 것으로 보인다. 제주도는 연평균 전력의 30%정도를 내륙과의 연계 선에 의지하고 있어 현재도 5단계의 부하차단 시스템을 운영하고 있다. 따라서 본 논문에서는 풍력발전기의 갑작스런 출력 변동 시 계통에 미치는 영향을 분석하고 증대된 풍력 발전기에 의한 영향을 안정화하기 위한 적정 부하 차단량을 산정하고자 한다.

그대로 반영하여 해석하기 위한 모델이다. 응답은 급격한 변동들의 평균 값으로 나타난다. 계통의 발전기는 주로 재열 증기 터빈으로 구성되어 있다고 가정한다. 그러면 평균 주파수 응답에 영향을 주는 가장 중요한 시정수는 재열기 시정수(reheater time constant)이고 두 번째는 관성 정수(inertia constant), 세 번째는 조속기 시정수가 된다. 이런 가정을 통해 발전기 모델을 간략화 하면 (그림 1)과 같이 된다.



(그림 1) SFR 모델의 간략화

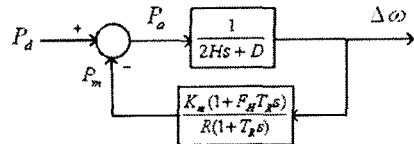
1. 서 론

풍력 발전에 대한 관심이 증대 되면서 우리나라도 제주도 행원, 한경 지역과 강원도 대관령을 중심으로 풍력에 대한 직접적인 도입을 시도 하고 있다. 특히 제주도의 경우 풍속이 풍력 발전을 하기에 적당한 이점으로 현재 총 15.8MW 설비의 풍력 발전 설비를 갖고 있으며 최대 14.3MW의 높은 이용률(2005년 행원 최대 8.3 MW, 한경 최대 6.0MW)을 보이고 있다. 2007년 까지 추가 건설 계획 중인 용량은 85MW로 계속적으로 설비를 더욱 확대 하고자 한다. 예정중인 용량을 건설하게 되면 전체 풍력 발전 용량은 100.8MW가 되어 제주도 전체 설비(연계선 제외)의 14%에 달하게 된다. 제주도는 연평균 전력의 30%를 연계선에 의지하고 있어 현재도 5 단계의 부하차단 시스템을 운영하고 있다. 갑작스런 풍속의 변동이나 기타 문제로 인하여 풍력 발전기가 계통에서 탈락하거나 출력의 급변하게 되면 그 영향은 크게 나타날 것이다. 따라서 본 논문에서는 풍력 발전설비의 용량을 추가 건설 예정 용량이 완공된 100.8MW로 하여 풍력발전기의 출력 변동 시 계통에 미치는 영향을 계통 주파수 응답 모델(System Frequency Response Model)을 통하여 분석하고 해결 방안으로 풍력 발전기의 출력 변동 시 계통 안정을 위한 부하 차단량을 산정하고 현재 운영 중인 부하 차단 시스템과 비교를 통하여 안정적 운영을 위한 부하차단에 관하여 알아보고자 한다.

여기서,

- P_m : 기계적 출력(mechanical power)
- P_e : 전기적 출력(electrical power)
- P_a : 가속력(accelerating power, $P_m - P_e$)
- F_H : 고압 터빈(High Pressure)의 출력비
(Fraction of total power generated by the HP turbine)
- T_R : 재열 시정수(reheater time constant)
- H : 관성 정수(inertia constant)
- D : 부하 변동 계수(Damping factor)
- K_m : 유효 이득 계수(effective gain factor)

(그림1)을 계통에서 발전기 탈락 시의 영향을 분석하기 위해 사고량을 입력으로 하는 모델로 변형하면 (그림 2)와 같다.



(그림 2) 사고량을 입력으로 변형된 모델

2. 본 론

2.1 계통 주파수 응답 모델(System Frequency Response Model, SFR Model)

SFR 모델은 계통의 갑작스런 부하변동에 대한 해석을 가장 적은 차수의 모델로 표현하면서 계통의 동특성은

간략화 된 모델의 응답은 (식1)을 통해 얻을 수 있다.

$$\Delta w = \left(\frac{Rw_n^2}{DR + K_m} \right) \left(\frac{(1 + T_R s)P_d}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \right) \quad (식1)$$

여기서,

$$w_n^2 = \frac{DR + K_m}{2HRT_R}$$

$$\zeta = \left(\frac{2HR + (DR + K_m F_H) T_R}{2(DR + K_m)} \right) w_n$$

$$P_d(s) = \frac{P_{wind}}{s}$$

2.1.1 중요파라미터 정의

1) 관성 정수(H)

$$H = \frac{\text{stored energy in joules}}{\text{rating in voltage} - \text{amperes}} \quad (\text{식2})$$

관성 정수는 (식2)과 같이 정격 출력과 운동에너지의 비를 말하며 계통의 합성 관성 정수는 (식3)으로 구할 수 있다.

$$H_{system} = \frac{H_1 MVA_1 + H_2 MVA_2 + \dots + H_n MVA_n}{MVA_1 + MVA_2 + \dots + MVA_n} \quad (\text{식3})$$

2) 유효 이득 계수(K_m)

$$K_m = \frac{P_m \text{ in MW}}{S_{SB}} \quad (\text{식4})$$

여기서,

S_{SB} : 계통 베이스(모든 발전기 용량의 합)

유효 이득 계수는 발전기의 용량 중 유효 전력량의 비를 나타내어 총 발전량 중에 기계적 출력량을 말한다.

2.1.2 파라미터의 적용

PSSE 30 버전의 제주계통 데이터(2005년 8월 하계)의 내용(연계선 제외)을 정리하면 (표1)과 같다.

모선 번호	유효 전력량(MW)	Machine Base(MW)	관성정수	속도 조정율
20121	10.0	12.5	3.0	0.05
20122	78.0	92.0	5.4	0.05
20123	78.0	92.0	5.4	0.05
20125	0.0	70.0	2.56	0.05
20126	0.0	70.0	1.86	0.05
20166	24.4	45.0	6.0	0.05
20167	30.0	45.0	6.0	0.05
20168	30.0	45.0	6.0	0.05
20171	20.0	12.5	3.465	0.05
20176	18.0	12.5	2.55	0.05
20178	18.0	12.5	2.55	0.05
20127	0.0	70.0	2.56	0.05
20131	40.0	92.0	6.02	0.05

(표1) 제주계통 발전기 데이터

계통 관성 정수와 유효 이득 계수를 구하고 속도 조정률을 증가화 한다. 그 외의 데이터는 일반적인 값을 적용한다.

$$S_{SB} = 671 \quad R = 0.05 \quad H = 4.46$$

$$K_m = 0.52 \quad F_H = 0.3 \quad T_R = 8.0$$

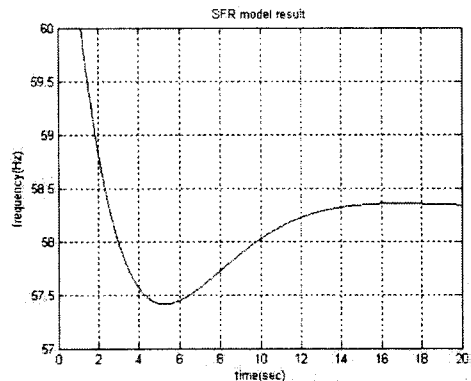
$$D = 1.0$$

2.2 풍력 발전기 탈락에 대한 부하 차단량 산정

2.2.1 풍력 발전 설비 추가 시 계통 영향

부하 차단량을 산정하기 위해서는 모든 상황에 대처하기 위해 최악의 상황을 산정해야 하며 부하에 전력을 원활히 공급하기 위해 최소의 차단량으로 계통의 안정화를 목표로 한다. 차단량을 산정하기 위한 단서가 되는 것은 사고 발생시 주파수 변화의 기울기이다. 기울기는 실시간으로 계통의 주파수를 샘플링하여 얻을 수 있으며, 샘플링 간격이 크면 실제 기울기와 차이가 발생하게 되어 차단량이 크게 달라질 수 있다. 따라서 샘플링 간격은 작을수록 정확한 사고량의 측정이 가능하다.

현재 풍력 발전설비는 제주 전체 용량의 3.14%에 해당하여 전 용량 동작 상황에서 탈락되어도 최저 59.81 Hz에서 회복하여 계통에 영향이 거의 없다고 할 수 있다. 하지만 예정대로 풍력 발전 용량이 증대되어 100.8 MW가 되면 최저점은 58.78 Hz가 된다. 하지만 가장 심각한 사고인 연계선(160MW 가정)과의 탈락의 상황까지 고려하게 되면 주파수의 최저점은 56.84 Hz로 현 부하차단 시스템 체계 중 가장 심각한 5단계 57.6Hz를 훨씬 넘어어서게 된다.



(그림3) 추가설비 이후의 탈락 시 주파수 변화

발전기 안정 운전점이 59.5Hz 이상임을 감안해보면 연계적인 사고가 발생하여 사고의 정도는 (그림3)의 상황보다 악화될 것이다. 따라서 안정적인 계통의 운영을 위해서는 사고 발생 시 부하 차단을 통해 전력의 수급을 조정해야 한다. 현재 제주도 부하차단 체계의 1단계인 59Hz는 외국의 일반적인 경우와 비교하였을 때 낮은 값으로 사고 발생 시 주파수의 감소를 빠르게 해결하지 못하게 되어 사고를 확대 시켜서 계통에 악영향이 발생한다. 따라서 상황이 필요하며 1단계 주파수를 59.5Hz로 하고 차단 단계는 기존과 동일하게 5단계로 0.3 Hz의 간격을 두고 부하차단을 한다고 가정한다.

2.2.2 풍력 발전기 탈락으로부터 계통 보호를 위한 차단 용량의 산정

풍력 발전기 탈락시의 주파수 기울기는 (식5)를 통해 구할 수 있다.

$$m_0 = 60 \frac{d\Delta\omega}{dt} \Big|_{\omega=0} = \frac{60 P_{drop}}{2H} \text{ Hz/s} \quad (\text{식5})$$

여기서,

$$P_{drop} = P_{wind} + P_{HVDC}$$

발전용량에 따른 주파수 값과 기울기 값은 (표2)와 같다.

P_{drop}	m_0		$\Delta\omega_{max}$	f_{min}
	pu/s	Hz/s		
-0.2000	-0.0226	-1.3453	-0.6312	59.3688
-0.4000	-0.0448	-2.6906	-1.2624	58.7376
-0.6000	-0.0673	-4.0359	-1.8936	58.1064
-0.6337	-0.0710	-4.2626	-2.0000	58.0000
-0.8000	-0.0897	-5.3812	-2.5248	57.4752
-1.0000	-0.1121	-6.7265	-3.1561	56.8439

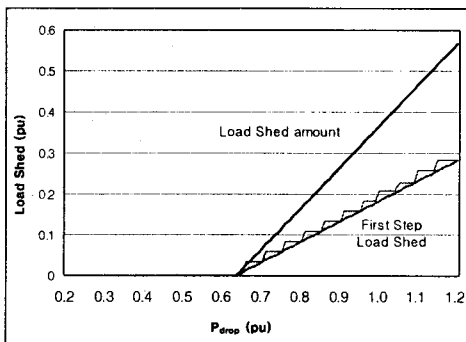
(표2) 사고 용량에 따른 주파수 변화

차단 용량의 산정은 풍력 발전기에 의한 주파수 한계 값을 정하는 것에서 시작된다. 본 논문에서는 주파수 변화 한계를 58.0Hz로 하였다. 따라서 (표2)의 내용에서 주파수 변화 기울기가 -0.071pu/s 보다 크게 되면 한계 주파수 범위를 넘어가는 사고이기 때문에 부하차단을 시작해야 한다. 차단 한계가 정해지면 차단용량은 (식6)과 (식7)을 통해 구할 수 있다.

$$\frac{P_{Shed}}{2H} = \frac{|P_{drop}|}{2H} - 0.071 \quad (식6)$$

$$P_{Shed} = |P_{drop}| - 0.142H = H \left(\frac{m_0}{30} - 0.142 \right) pu \quad (식7)$$

차단용량은 계통 관성 정수와 주파수 변화의 기울기의 함수로 나타나며 (그림4)에서와 같이 차단 용량과 첫 단계에서 차단해야 하는 용량을 구할 수 있다. 시뮬레이션 결과 단계별 부하 차단에서 가장 중요한 것은 첫 번째 차단 용량이었다. 차단 용량이 커야만 주파수의 감소를 최소한으로 줄일 수 있다. SFR 모델을 이용한 주파수 시뮬레이션을 통하여 첫 단계 차단 용량은 최소한 상정 사고의 절반 이상이 되어야 지속적인 주파수의 감소를 막을 수 있었다. 이 차단용량에 더하여 현실적으로 계전기는 순시동작 하지 않기 때문에 5% 정도의 여유를 두고자 한다. (그림4)의 계단 함수가 5%의 여유를 나타내고 있으며 P_{step} 이 1.05pu가 되는 값인 0.2083을 첫 단계의 차단 용량으로 산정한다.

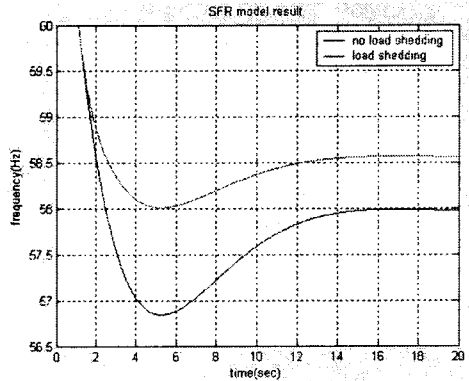


(그림4) 부하 차단량

주파수 감소는 첫 번째에 비하여 다음 단계는 큰 비중을 차지하지 않으므로 각각 0.1pu로 하였다.

차단 주파수	차단용량	
	pu	MW
59.5	0.2083	54.324
59.2	0.1	26.08
58.9	0.1	26.08
58.6	0.1	26.08
58.3	0.1	26.08
계	0.6083	158.644

(표3) 계전기 디자인



(그림5) 부하차단 결과

만약 현 제주 시스템의 부하차단 첫 단계 주파수인 59Hz로 하고 첫 단계 차단용량을 본 논문에서 제시한 54.324MW로 했을 경우 최저 주파수는 57.7433 Hz까지 떨어지게 된다. 차단 용량 산정 시 고려한 최저 기준점 58Hz를 만족하기 위해서는 첫 단계에 96.94MW를 차단해야 했다. 따라서 차단기의 차단 주파수의 상향이 필요하며 풍력이 추가로 건설되어도 계전기의 적절한 차단용량의 산정으로 계통을 안정적으로 운영할 수 있음을 알 수 있다.

3. 결론

계통 주파수 응답(SFR) 모델을 통하여 제주도에 예정되어 있는 풍력 발전설비가 계통에 미칠 수 있는 영향에 대하여 분석하였다. 내륙 연계선과 출력이 불규칙적인 풍력 발전설비가 동시에 발생하는 최악의 경우를 상정하여 모의해본 결과 현재 운영중인 부하차단 시스템의 차단 주파수와 용량을 조정하면 논문에서 산정한 주파수 최저 한계 값인 58Hz를 만족하는 결과를 얻었으며 계통을 안정적으로 운영할 수 있음을 나타냈다.

감사의 글

본 연구는 기초전력공학공동연구소 과제인 신·재생에너지 발전의 계통연계 기초기술개발 연구 (과제번호: R-2004-B-125)의 지원으로 수행되었음.

[참고 문헌]

- [1] P. KUNDUR, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994
- [2] P. M. Anderson, "A Low-Order System Frequency Response Model", IEEE Trans, VOL 5, NO 3, 1990
- [3] P. M. Anderson, "An Adaptive Method for Setting Under frequency Load Shedding Relays", IEEE Trans, VOL 7, NO 2, 1992
- [4] 김영환, "제주지역 풍력발전기에 의한 전력계통운영 영향분석", 대한전기학회, A 권, p 127. 2005