2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2004.7.14-16

풍력발전단지와 연계된 변전소의 모선전압 분석

김영환*, 현길주*, 고석범**
*전력거래소 제주지사, **한전제주지사 전력소

나경윤***, 양익준***, 김세호***
***제주대학교 대학원 전기공학과

Bus Voltage Analysis of Substation Connected to the Wind Generation Farm

Kim Young Hwan*, Hyun Gil Ju*, Ko Seok Bum**
*KPX Ieiu District. **KEPCO Ieiu District

Yang Ik Jun***, Na Kyoung Yun***, Kim Se Ho***
***Cheiu Universitv

Abstract - In recent years wind turbine technology has undergone the rapid development in response to the demands for increased use of renewable sources of energy. Using wind turbines for production of electrical energy requires reliable operation. The increased share of wind power in electrical system makes it necessary to have grid-friendly interfaces between the wind turbines and the grid in order to maintain power quality. Increasingly wind turbines are being connected into electricity distribution system. The grid-connected wind power stations have many impacts on power systems such as voltage variations, harmonics. The paper investigates the influences of grid-connected wind power generation system on substation bus voltage.

1. 서 론

풍력발전은 자원의 무한정성, 청정성, 기술의 범용성 등으로 대체에너지원 중 가장 각광받는 전원으로서 전 세계적으로 많은 용량의 발전기가 설치되어 있으며 국내에서는 제주도 행원에 10MW의 풍력발전단지가, 한경에 6MW의 풍력발전시스템이 건설되어 상업운전을 하고 있다[1-2]. 이러한 풍력발전시스템은 소규모인 경우에는 배전선로에 직접 연결될 수 있으나 운용이나 경제성 측면에서 대규모로 단지가 조성되어 전용선로를 이용하여 배전용 변전소에 직접 연계되어 있다. 그러나 풍력발전은 바람을 이용하는 것이므로 바람의 세기나 방향에 따라 출력 변동이 심하여 변전소로 직접 연계된다 하더라도 전압변동이 나타날 우려가 있다[3,4]. 본 연구에서는 10MW의 풍력발전단지가 연계된 배전용 변전소의 모선전압을 측정하여 전압품질을 분석함으로써 풍력발전이 기존 계통에 미치는 영향을 살펴보고자 한다

2. 본 론

2.1 전압품질

우리나라의 전기품질 관리는 전기사업법에 근거하여 전력회사 측에서는 정전시간 및 정전회수, 30분 평균 전압유지율, 주파수 유지율에 대한 목표 관리치를 부여함으로써 적정하게 유지되고 있다. 그러나 정보, 통신, 제어기술의 발달에 따라 정보통신기기, 정밀제어기기, 사무자동화 기기, 전산기기 등의 확대공급에 따른 전기공급은 아주 짧은 시간동안의 품질 저하에도 민감하게 작용하여 생산 활동 장애 등 기회비용이 증가하고 있다.[5,6]

전기품질은 전력계통에서 주어진 시간과 정해진 위치에서 전압과 전류에 의해서 발생하는 다양한 전자계 현상을 참고로 하고 있으며 여러 가지 형태로 정의될 수 있으나 일반적으로 사용되는 IEEE의 전기품질 요소는 표 1과 같다.

표 1. IEEE의 대표적 전기품질 요소

분 류	지속시간	전압크기
<단주기 변동>		
1. Instantaneous		
Sag	0.5-30 cycles	0.1-0.9 pu
Swell	0.5-30 cycles	1.1-1.8 pu
2. Momentary		
정전	0.5 cycles - 3s	< 0.1 pu
Sag	30 cycles - 3s	0.1-0.9 pu
Swell	30 cycles - 3s	1.1-1.4 pu
3. Temporary		
정전	3s - 1 min	< 0.1 pu
Sag	3s - 1 min	0.1-0.9 pu
Swell	3s - 1 min	1.1-1.2 pu
<장주기 변동>		
영구정전	> 1 min	0.0 pu
저전압	> 1 min	0.8-0.9 pu
과전압	> 1 min	1.1-1.2 pu
고조파	steady state	0-20%

표 1에서 보는 바와 같이 전기품질은 단주기 변동과 장주기변동으로 구분할 수 있으며 단주기변동은 변동 지속시간에 따라 순시(Instantaneous), 순간(Momentary), 일시(Temporary)의 3가지 범주로 분류된다.

고조파는 공급계통 기본 주파수의 정수배 주파수를 가지는 사인파의 전압이나 전류를 말하며 왜곡된 파형은 기본파와 고조파의 합으로 분리할 수 있다. 고조파 왜형은 계통의 부하와 기기의 비선형적인 특성에 의해 발생되며 고조파 왜형의 정도를 나타내기 위하여 종합 왜형율(Total Hatmonic Distortion: THD) 및 조파별 고조파 함유율을 사용하고 있다. 종합 왜형율은 기본파 성분 실효치에 대한 전체 고조파 성분 실효치의 비율로 나타낸다.

각국에서는 전기 공급자가 소비자에게 전력이 공급됨에 있어서 적정의 전압을 부하에 공급하도록 하기 위해 자체적인 기준을 정하고 있으며 국내(한국전력), 일본, IEEE의 기준을 표 2에서 4에 수록하였다.

표 2. 국내(한전) 전압기준

고조파		전 압	
기준전압	전압왜형률(%)	기준전압	전압유지범위
66kV 이하	3.0	22.9kV	22.9kV -1% ~ 4%

표 3. 일본 전압 고조파 기준

기준	고조파 차수									
	3	5	7	11	13	17	19	23	23~39	총합
특고계통	2.0	2.5	1.5	1.5	1.5	1.0	1.0	0.5	0.5	3.0

표 4. IEEE 519 전압 고조파 기준

회로전압	왜형률	각 차 고조파 전압	
		기수 고조파	우수 고조파
33 kV	3.0	2.0	1.0

2.2 사례연구

2.1.1 측정대상 계통

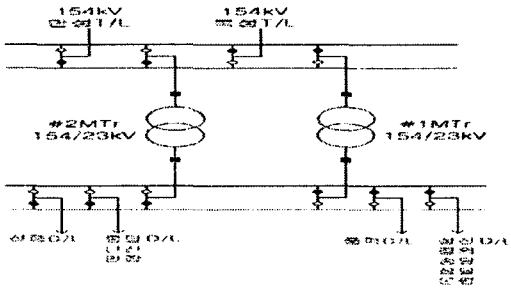

그림 1. 측정대상(성산 S/S) 계통도

15기의 풍력발전시스템으로 구성된 행원풍력발전단지는 총 용량 10MW로서 궁장 24.6km의 전용선로(풍력 D/L)로 성산변전소에 연계되어 있으며 성산변전소의 계통도를 그림 1에 표시하였다. 풍력발전단지가 변전소 모선의 전압에 미치는 영향을 분석하기 위해 성산변전소 구내의 풍력 D/L과 다른 변압기 뱅크에 속해 있는 신풍 D/L의 인출점에 두 대의 계측 장비를 설치하여 한달 정도 데이터를 취득하였다. 계측장치는 (주)피에스디테크의 PQM(Power Quality Monitoring)장비로서 데이터 취득을 위한 샘플링 시간은 5초로 설정하였다.

2.1.2 전압품질분석

2.1.2.1 측정데이타

변전소의 두 군데 D/L의 인출점에서 취득한 데이터를 이용하여 전압이 규정내로 유지되는지 고조파 왜형율이 적정한지에 대해 분석하였으며 2일(5월 8일, 5월 19일)에 대한 풍력발전량 및 모선전압의 전압파형을 그림 2와 3에 표시하였다. 그림 2와 3에서 보는 바와 같이 전압의 크기는 규정범위내로 유지되고 있으며 전압변화가 급격한 곳은 ULTC가 동작한 경우에 해당하고 모선 전압변화가 규정을 준수하고 있더라도 풍력발전기의 출력이 변동하는 경우에는 풍력발전단지가 연계된 모선에서의 전압변동이 심하다는 것을 알 수 있다.

고조파 전압의 왜곡정도를 분석하여 시간별 평균 왜형율과 왜형율을 구간으로 나눈 구간별 고조파의 막대그래프로 그림 4-7에 표시하였다.

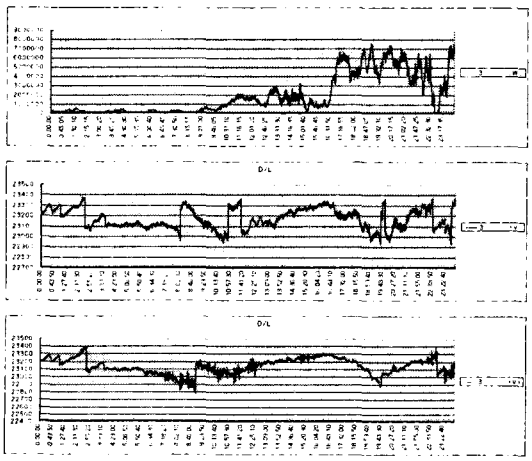

그림 2. 풍력발전량 및 모선전압(5월 8일)

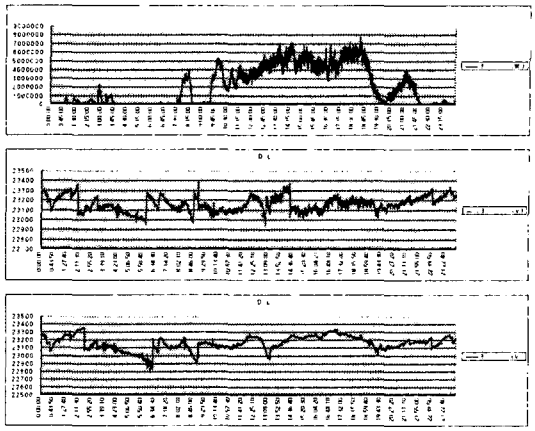

그림 3. 풍력발전량 및 모선전압(5월 19일)

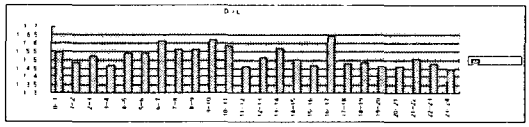

그림 4. 풍력D/L 모선 고조파 그래프(5월 8일)

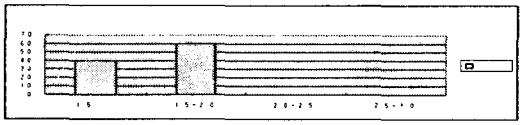

그림 5. 풍력D/L 모선 구간별 고조파 그래프(5월 8일)

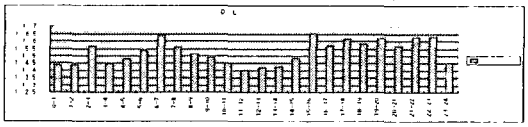

그림 6. 신풍D/L 모선 고조파 그래프(5월 8일)

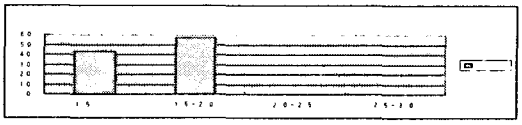

그림 7. 신풍D/L 모선 구간별 고조파 그래프(5월 8일)

표 5. 풍력 D/L 날짜별 전압 왜형율 분포

일자	고조파 전압 왜형율 분포(%)				
	1.5%이하	1.5~2.0%	2.0~2.5%	2.5~3.0%	3.0%초과
5월 1일	18.770	79.035	2.1936	0	0
5월 2일	10.709	82.741	6.5494	0	0
5월 3일	26.246	72.728	1.019	0.00579	0
5월 4일	78.599	21.400	0	0	0
5월 5일	76.584	23.415	0	0	0
5월 6일	71.230	28.769	0	0	0
5월 7일	58.722	41.277	0	0	0
5월 8일	40.038	59.955	0.005	0	0
5월 9일	51.727	48.266	0.0057	0	0
5월 12일	75.105	24.894	0	0	0
5월 13일	90.481	9.5180	0	0	0
5월 14일	77.094	22.905	0	0	0
5월 15일	68.921	31.078	0	0	0
5월 16일	58.614	41.385	0	0	0
5월 17일	74.910	25.089	0	0	0
5월 18일	83.592	16.407	0	0	0
5월 19일	79.178	20.821	0	0	0
5월 20일	78.194	21.805	0	0	0
5월 21일	77.522	22.477	0	0	0
5월 22일	64.920	35.079	0	0	0
5월 23일	80.522	19.477	0	0	0

표 6. 신풍 D/L 날짜별 전압 왜형률 분포

일자	고조파 전압 왜형률 분포(%)				
	1.5%이하	1.5~2.0%	2.0~2.5%	2.5~3.0%	3.0%초과
5월 5일	46.521	53.454	0.023	0	0
5월 6일	63.454	36.406	0.139	0	0
5월 7일	71.859	28.129	0.011	0	0
5월 8일	43.145	56.726	0.127	0	0
5월 9일	55.602	44.281	0.115	0	0
5월 12일	67.148	32.845	0.005	0	0
5월 13일	52.604	47.140	0.254	0	0
5월 14일	74.520	25.468	0.011	0	0
5월 15일	64.303	35.668	0.028	0	0
5월 16일	36.291	63.529	0.179	0	0
5월 17일	68.625	31.304	0.069	0	0
5월 18일	66.496	33.462	0.040	0	0
5월 19일	72.460	27.435	0.104	0	0
5월 20일	69.921	30.067	0.011	0	0
5월 21일	70.094	29.899	0.005	0	0
5월 22일	74.379	25.609	0.011	0	0
5월 23일	65.862	34.137	0	0	0

표 7. 국제기준과의 비교(풍력 D/L, 일본 규정)

측정일자	고조파 차수에 따른 규정 초과 샘플수							
(5월)	3	5	7	11	13	17	19	23
1일	0	0	0	0	0	0	0	1035 (0.2604%)
2일	0	0	0	0	0	0	0	2337 (0.5880%)
3일	2	2	0	0	0	0	0	241 (0.0606%)
4일	0	0	0	0	0	0	0	962 (0.2420%)
5일	0	0	0	0	0	0	0	814 (0.2048%)
6일	0	0	0	0	0	0	0	281 (0.0707%)
7일	0	0	0	0	0	0	0	332 (0.0835%)
8일	0	0	0	0	0	0	0	757 (0.1904%)
9일	0	0	0	0	0	0	0	1567 (0.3942%)
12일	0	0	0	0	0	0	0	2907 (0.7314%)
13일	0	0	0	0	0	0	0	2688 (0.6763%)
14일	0	0	0	0	0	0	0	2573 (0.6473%)
15일	0	0	0	0	0	0	0	2849 (0.7168%)
16일	0	0	0	0	0	0	0	3116 (0.7840%)
17일	0	0	0	0	0	0	0	3866 (0.9727%)
18일	0	0	0	0	0	0	0	1724 (0.4337%)
19일	0	0	0	0	0	0	0	4184 (1.0527%)
20일	0	0	0	0	0	0	0	3570 (0.8982%)
21일	0	0	0	0	0	0	0	4212 (1.0597%)
22일	0	0	0	0	0	0	0	5659 (1.4238%)
23일	0	0	0	0	0	0	0	5738 (1.4437%)

표 8. 국제기준과의 비교(풍력 D/L, IEEE 규정)

구분	총 샘플수	규정 초과 샘플수	규정 초과율(%)
IEEE 규정	362840	2(3고조파) 3(5고조파)	0.001378

날짜별 전압왜형율 분포를 표 5, 6에 표시하였으며, 5월 10, 11일은 계측장비의 이동으로 인하여 전압측정이 되지 않아 데이타가 생략되어 있다.

2.1.2.2 국내(한전)기준 분석

배전용 변전소 모선의 전압변동에 대한 국내기준은 22.9kV -1% ~ 4% 로서 풍력발전단지가 연계된 모선이나 연계되지 않은 2개의 모선전압 모두 유지범위 내에 속해 있다. 행원 풍력발전단지의 발전기는 비동기식인 유도발전기로서 기동시 돌입전류로 인한 순간적인 전압강하의 우려가 있으나 현재까지 분석된 결과로는 전압변동이 기준치 이내로 유지되고 있음을 알 수 있다. 그러나 변전소 모선의 전압변동이 품질기준을 준수하고 있지만 풍력발전단지가 연계된 모선의 전압변동이 연계되지 않은 모선보다 전압변동이 크게 나타나고 있다. 이것은 풍속이나 풍향에 따른 풍력발전기의 출력변동이 심하기 때문이며 추후 플리커 측면에서 전압변동을 검토하여야 할 것이다.

3%이내가 기준인 고조파 전압 왜형율에 대해서는 풍력발전기의 순간 돌입전류를 억제하기 위하여 소프트 스타팅 기동방식으로 인한 고조파 발생의 우려가 있으나 기준을 만족함으로써 풍력발전시스템에 대한 고조파의 영향이 크지 않다고 분석된다.

2.1.2.3 국제기준 분석

국제기준에 비교해 보면 일본 규정에서는 3, 5, 23조파 이하(표 7), IEEE 규정은 3, 5조파(표 8) 등에서 일부 규정을 벗어나나 전체 측정 데이터 수에 비해 아주 적은 양이므로 일본과 IEEE의 국제기준은 만족하는 것으로 분석하였다.

3. 결 론

풍력발전단지와 연계된 변전소의 모선전압을 측정하여 전압품질을 분석한 결과는 다음과 같다.

- 변전소 모선의 전압변동이 품질기준을 준수하고 있지만 풍력발전단지가 연계된 모선의 전압변동이 연계되지 않은 모선보다 크게 나타나고 있다.
- 규정범위내의 전압 유지는 만족스러우나 전압변동은 심하므로 플리커 관점에서 연구가 수행되어야 한다.
- 풍력발전기의 순간 돌입전류를 억제하기 위하여 소프트 스타팅 기동방식으로 인한 고조파 발생의 우려가 있으나 기준을 만족함으로써 풍력발전시스템에 대한 고조파의 영향이 크지 않다고 분석된다.
- 일본이나 IEEE 등의 국제기준과 비교해서도 기준을 벗어나는 사례가 많이 발생되지 않아 국내의 전압품질이 국제 기준을 만족하고 있다고 분석된다.

한달 정도의 기간에 대해 전압 품질을 분석하여 풍력발전단지와 연계된 모선의 전압 변화를 분석할 수 있었으나 장기간 지속적인 데이터의 측정과 분석이 이루어져야만 보다 정확한 풍력발전에의 영향을 파악할 수 있을 것이며 향후 풍력발전기의 기동이나 정지 등 급격한 상황변화에 대하여 고정밀의 계측기를 이용한 전압품질의 측정 및 분석이 필요하다.

본 연구는 한국 전력거래소 제주지사의 지원으로 수행된 결과의 일부이며 한전 제주지사 제주 전력소의 협조에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

[1] 한국남부발전, 제주 풍력건설 타당성 보완조사, 2002. 7.
[2] 제주도, 제주도내 풍력발전단지 성능 모니터링 및 평가(II), 2003. 6.
[3] P. D. Ladakakos, M.G. Ioannides, " Assessment of Wind Turbines on the Power Quality of Autonomous Weak Grids", 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, October, 1998.
[4] Paul S. Wright, " An Overview of harmonic and flicker emission standards and their associated measurements", Power Engineering Journal, April, 2001.
[5] J. Arrillaga, D. A. Bradley, P.S. Bodger, Power System Harmonics, John Wiley & Sons, 1985.
[6] Wilson E. Kazibwe, Musoke H. Sendaula, Electric Power Quality Control Techniques, Van Nostrand Reinhold, 1993.