

제주환경 풍력발전시스템에 연계된 가정의 전압품질 분석

김 세 호* · 양 익 준*

Voltage Quality Analysis of Household Connected to the Wind Generation System in Jeju Hankyung

Se-Ho Kim* · Ik-Jun Yang*

ABSTRACT

Operation of wind turbines has impacts on the voltage quality at the connected electricity network. Increasing penetration of wind energy makes necessary to study the power quality regarding voltage variations(sag, swell, interruption) and presence of harmonics in the grid. This paper investigates the voltage quality of low voltage customers connected to wind generation system. To study the influences of wind power generation to low voltage power system, voltage data are collected in three house using PQM(Power Quality Monitoring) equipment during one month and analyzed regarding voltage variation and harmonics.

Key Words : Voltage Quality, Harmonic, Wind Generation System

1. 서 론

최근 산업발전 및 생활수준의 향상에 따라 정보통신기기, 정밀제어기기 등의 사용이 증가하고 있으나 이러한 첨단 전기기기는 외부의 전압변동에 민감하므로 고도의 전기품질을 요구하게 된다[1-4]. 또한 지구환경 문제와 고유가에 대한 불안심리가 가중되면서 대체에너지에 대한 관심이 증가하고 있으며 그 중 풍력발전시스템은 전 세계적으로 가장 많은 용량이 설

치되어 있고 이러한 추세는 계속될 것이다.[5-7] 그러나 풍력발전시스템은 바람의 상태에 따라 출력이 심하게 변하기 때문에 전압변동에 큰 영향을 미칠 수 있으며 풍력발전시스템은 용량에 따라 배전선에 직접 또는 전용선로를 이용하여 변전소로 연계하고 있다.

현재 제주도 한경지역의 풍력발전시스템은 전용선로의 공사지연으로 인하여 임시적으로 배전선로 중간에 연결되어 수용가에 전력을 공급하고 있어 풍력발전시스템이 배전선로의 수용가에 미치는 영향을 파악하기 위한 좋은 기회가 되고 있다. 본 연구에서는 풍력발전시스템이 연계된 배전선로에 인접한 저압 수용가의 전압을 일정기간 측정하여 전압품질에 풍력발전시스템이 어떤 영향을 미치는지 분석하고자 한다.

* 제주대학교 대학원 전자전기공학과, 첨단기술연구소
Electronic & Electrical Eng., Graduate School, Cheju Nat'l Univ.,
Res. Inst. of Adv. Tech.

II. 전압품질 요소 및 기준

전기품질은 전력회사의 입장에서 보면 공급신뢰도로, 수용가의 입장에서 보면 수용가의 전기설비에 공급되는 전기의 상태로서 정의될 수 있으며 품질의 정도를 나타내는 지표로 주파수유지율, 전압유지율 및 정전횟수(시간) 등이 사용되어 왔으나 최근 외란에 대하여 민감하게 영향을 받는 고도부하들에 대한 대책 마련의 일환으로서 순시전압저하, 순시전압상승, 순시정전, 고조파 등의 요소들이 고려되고 있다.

단시간 전압저하는 정격 주파수에서 지속시간이 0.5 사이클에서 1분 정도, 저하의 정도가 0.1에서 0.9 p.u. 인 현상을 말하며 이 중에서 특히 지속시간이 0.5에서 30사이클 정도가 되는 현상을 순시전압저하라고 한다. 전압상승은 정격 주파수에서 지속시간이 0.5 사이클에서 1분정도, 전압크기가 1.1에서 1.8 p.u. 정도로 되는 현상을 말하며 이 중에서 특히 지속시간이 0.5에서 30사이클 정도가 되는 현상을 순시전압상승이라고 한다. 단시간 정전은 공급전압이나 부하전류가 1분을 초과하지 않는 범위 내에서 0.1 p.u. 미만으로 감소하는 현상을 말하는데 특히 지속시간이 30 사이클 이하의 경우를 순시정전으로 규정하고 있다.

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 Harmonic Distortion: THD) 및 조파별 고조파 함유율을 사용하고 있다. 종합 왜형율은 기본파 성분 실효치에 대한 전체 고조파 성분 실효치의 비율로 식 (1)과 같이 나타내며,

$$\text{왜형률(THD)} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (1)$$

조파별 고조파 함유율은 기본파 성분 실효치에 대한 어떤 차수의 고조파 성분 실효치의 비율로 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$\frac{n\text{조파의고조파전압}}{\text{기본파전압}} = \frac{V_n}{V_1} \times 100\% \quad (2)$$

여기서,

V_n : 제n차 고조파 전압의 실효치 ($n \geq 2$)

V_1 : 기본파 전압의 실효치

각국에서는 전기 공급자가 소비자에게 전력이 공급됨에 있어서 적정의 전압을 부하에 공급하도록 하기 위해 자체적인 기준을 정하고 있으며 국내(한국전력), 일본, IEEE 기준을 Table 1에서 3에 수록하였다.

Table 1. Domestic(KEPCO) voltage standard

Harmonic		Voltage	
Standard	THD(%)	Standard	Bound
66kV below	3.0	220 V	220±13V

Table 2. Harmonic standard in japan

Standard	degree									
	3	5	7	11	13	17	19	23	23~39	Total
Extra High Vol. Network	3.0	4.0	3.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.0	1.0	5.0

Table 3. Harmonic standard of IEEE 519

Voltage	THD	Degree	
		Even harmonic	Odd harmonic
415 V	5.0	4.0	2.0

III. 사례연구

3.1. 측정대상 계통

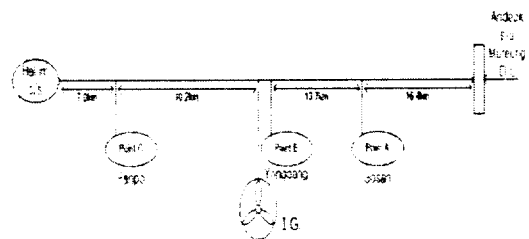


Fig. 1. Hankyong distribution network

배전선로에 연결된 풍력발전시스템은 전용선로로 한림 변전소에 연계될 예정으로 지금은 임시적으로 배전선로의 중간에 접속되어 있고 Fig. 1에 측정대상 계통을 표시하였다. 연결된 배전선로는 변압기 용량 24,882kVA, 최대부하 7,500kW, 공장 47.3 km의 선로로서 일반 농촌 마을을 포함하고 있다. 풍력발전시스템에 연결된 저압 수용가의 전압품질을 분석하기 위해 풍력발전의 접속점과 먼 곳(point A, 고산리의 일반가정), 풍력발전의 접속점(point B, 용당리 사무소), 변전소쪽의 전원방향(point C, 관포리 사무소) 등 측정 점을 3군데로 정하였다. 측정 기간은 2004년 4월 21일부터 5월 23일 까지 한 달 동안 기간별로 나누어 측정하였다. 계측기는 AMETEK사의 APEX 5000 Power Quality Analyzer를 사용하였으며 샘플링 간격은 1초로 설정하였고 순시전압변화를 해석하기 위해 3일간은 1 싸이클로 정하였다.

3.2. 전압품질 분석

3.2.1. 측정데이터

3군데의 측정점에서 취득한 데이터를 이용하여 전압이 규정대로 유지되는지 고조파 왜형율이 적정한지에 대해 분석하였으며 풍력발전시스템의 접속점 인근에 위치한 용당리의 하루에 대한 전압파형을 Fig. 2에 표시하였다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 전압의 크기는 규정범위내로 유지되고 있으며 각 측정지역에 대한 일 데이터의 시간대별 평균, 최대, 최소 전압을 Table 4-6에 나타내었다. Fig 3-5에는 시간대별 전압 데이터가 막대 그래프로 표현되어 있다

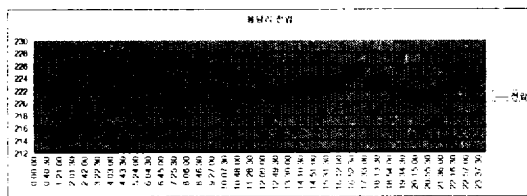


Fig. 2. Voltage waveform of Yongdang(May 11th)

Table 4. Voltage data of Gosan(April 26th)

(Unit : V)

Time	Average	Max.	Min.
0~1	223.8405	226.114	220.680
1~2	223.1026	224.678	220.614
2~3	225.1480	227.086	222.314
3~4	225.9877	227.684	221.958
4~5	225.8091	228.039	223.786
5~6	226.7791	229.121	223.851
6~7	227.5450	229.648	225.124
7~8	225.6459	229.265	220.451
8~9	223.7917	225.876	220.480
9~10	223.2127	227.633	219.827
10~11	222.2005	224.282	218.114
11~12	221.6498	224.063	215.751
12~13	222.6059	225.108	218.091
13~14	222.3890	224.275	219.512
14~15	221.7843	223.847	218.910
15~16	222.2958	224.037	217.368
16~17	221.9302	224.116	219.445
17~18	220.8577	222.776	217.061
18~19	219.6984	222.087	216.577
19~20	221.0140	223.170	218.142
20~21	221.1312	222.768	217.161
21~22	221.3433	224.107	218.558
22~23	225.3596	227.198	222.947
23~24	225.8646	227.307	221.191

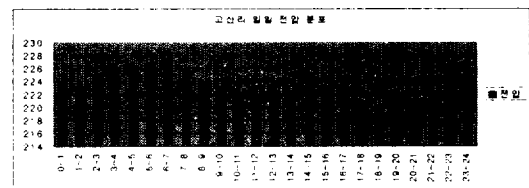


Fig. 3. Voltage distribution per date of Gosan(April 26th)

Table 5. Voltage data of Yongdang(May, 11th)
(Unit : V)

Time	Average	Max.	Min.
0~1	223.8417	225.737	220.419
1~2	223.7457	225.526	220.430
2~3	225.7695	227.139	221.971
3~4	226.5281	227.692	224.684
4~5	225.3853	226.678	222.940
5~6	224.7782	225.703	221.683
6~7	225.0892	226.051	222.797
7~8	222.6506	224.846	219.515
8~9	221.5954	223.464	217.857
9~10	221.4550	224.142	217.504
10~11	221.1145	222.660	216.923
11~12	221.3324	223.806	217.980
12~13	221.8850	224.063	215.474
13~14	222.3672	224.024	213.465
14~15	222.7808	224.310	214.727
15~16	223.3237	224.755	214.699
16~17	224.3329	225.945	216.604
17~18	224.4256	226.622	221.551
18~19	223.2364	224.506	220.107
19~20	221.6242	223.179	218.799
20~21	221.2047	222.281	219.339
21~22	222.1222	223.760	218.394
22~23	223.6794	225.203	219.998
23~24	224.1286	225.557	221.312

Table 6. Voltage data of Panpo (May 22th)
(Unit : V)

Time	Average	Max.	Min.
0~1	223.1267	224.519	218.848
1~2	223.9941	225.814	217.170
2~3	223.3213	224.544	213.668
3~4	223.7509	224.846	219.892
4~5	223.1814	224.609	217.416
5~6	223.4100	224.694	214.551
6~7	223.8801	225.288	219.365
7~8	221.6681	223.623	216.568
8~9	222.9414	224.608	215.872
9~10	221.4684	223.734	214.975
10~11	220.9321	222.135	215.556
11~12	221.3022	222.767	217.137
12~13	222.3844	223.719	215.723
13~14	222.8410	224.104	217.005
14~15	222.8524	224.035	217.320
15~16	222.9853	224.212	219.204
16~17	223.0602	224.342	215.614
17~18	224.1580	225.713	219.840
18~19	224.3080	226.306	217.750
19~20	221.9270	224.490	214.903
20~21	221.2910	222.450	215.240
21~22	222.1243	223.538	215.164
22~23	222.2269	224.030	217.946
23~24	224.1671	226.122	220.198

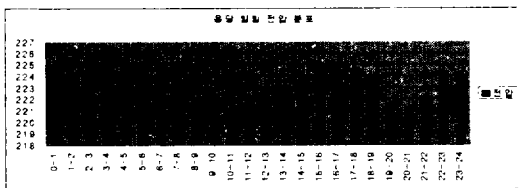


Fig. 4. Voltage distribution per date of Yongdang (May 11th)

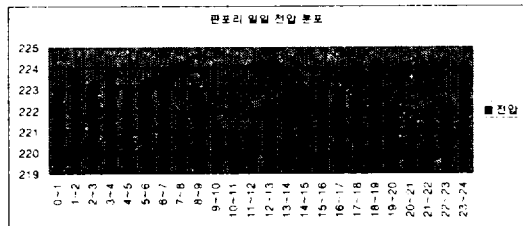


Fig. 5. Voltage distribution per date of Panpo (May 22th)

고조파 전압의 왜곡정도를 분석하여 시간별 평균, 최대, 최소 왜형율과 왜형율을 구간으로 나눈 구간별 고조파에 대한 데이터를 수치로 Table 7-12에, 막대

그래프로 Fig. 6-11에 표시하였다.

Table 7. Harmonic per time in Gosan(April 26th)
(Unit : V)

Time	Average	Max.	Min.
0~1	2.261106	2.599	1.921
1~2	2.152416	2.474	1.788
2~3	2.149341	2.445	1.790
3~4	2.137546	2.444	1.768
4~5	2.164906	2.465	1.757
5~6	2.343600	2.890	1.873
6~7	2.920719	3.392	2.290
7~8	2.944181	3.431	2.374
8~9	3.094071	3.703	2.476
9~10	3.455644	4.037	2.714
10~11	3.484189	4.017	2.876
11~12	3.485763	3.881	2.863
12~13	3.356642	3.777	2.757
13~14	3.445526	3.803	2.851
14~15	3.521553	3.830	2.895
15~16	3.568150	3.950	3.145
16~17	3.787234	4.234	3.141
17~18	3.995995	4.374	3.307
18~19	3.613002	4.105	2.995
19~20	3.405458	3.833	2.906
20~21	3.462375	3.858	3.002
21~22	3.371658	3.866	2.743
22~23	3.031510	3.448	2.487
23~24	2.758529	3.019	2.361

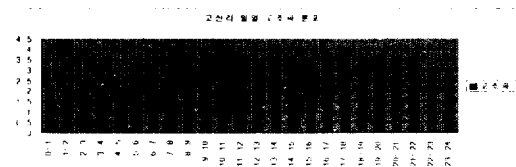


Fig. 6. Harmonic graph per time in Gosan
(April 26th)

Table 8. Harmonic per section in Gosan(April 26th)

Bound	measure- ment No.	% measurement rate (measurement No. / Sample No.)
1.5% below	0	0
1.5~2.0%	1,323	1.53125
2.0~2.5%	19,830	22.95139
2.5~3.0%	11,695	13.53588
3.0% over	53,535	61.96181

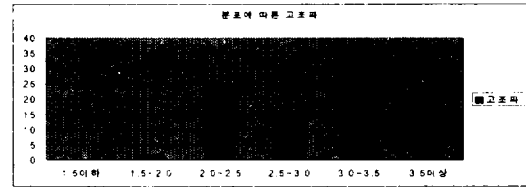


Fig. 7. Harmonic graph per section in Gosan
(April 26th)

Table 9. Harmonic per time in Yongdang(May 11th)
(Unit : V)

Time	Average	Max.	Min.
0~1	2.558611	2.990	2.194
1~2	2.404140	3.005	1.753
2~3	2.200264	2.527	1.742
3~4	2.120092	2.456	1.580
4~5	2.200484	2.440	1.729
5~6	2.337941	2.661	1.882
6~7	2.603066	2.924	1.963
7~8	2.682123	3.086	2.197
8~9	2.657292	2.983	2.243
9~10	2.596019	2.930	2.185
10~11	2.323598	2.735	1.883
11~12	2.224171	2.525	1.903
12~13	2.217951	2.446	1.723
13~14	2.237862	2.596	1.906
14~15	2.362555	2.712	1.984
15~16	2.253664	2.615	1.862
16~17	2.421086	2.698	2.072
17~18	2.383233	2.655	2.045
18~19	2.535038	3.341	2.154
19~20	2.754289	3.219	2.261
20~21	3.085984	3.515	2.680
21~22	2.959142	3.675	2.413
22~23	2.714234	3.596	2.268
23~24	2.322456	2.673	1.965

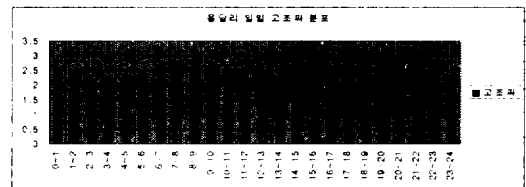


Fig. 8. Harmonic graph per time in Yongdang
(May 11th)

Table 10. Harmonic per section in Yongdang (May 11th)

Bound	measure-ment No.	% measurement rate (measurement No. / Sample No.)
1.5% below	0	0
1.5~2.0%	896	1.037037
2.0~2.5%	51,606	59.72917
2.5~3.0%	29,286	33.89583
3.0% over	4,611	5.336806

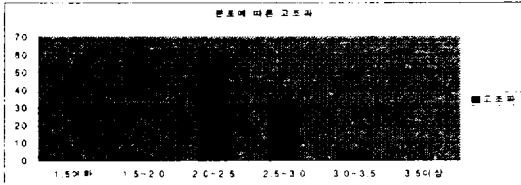


Fig. 9. Harmonic graph per section in Yongdang (May 11th)

Table 11. Harmonic per time in Panpo(May 22th) (Unit : V)

Time	Average	Max.	Min.
0~1	1.662580	2.036	1.299
1~2	1.510134	1.771	1.190
2~3	1.451484	1.698	1.149
3~4	1.472801	1.744	1.184
4~5	1.475666	1.737	1.178
5~6	1.629476	1.977	1.260
6~7	1.895507	2.221	1.537
7~8	2.016393	2.319	1.726
8~9	2.030997	2.351	1.730
9~10	2.075244	2.363	1.775
10~11	1.949276	2.282	1.68
11~12	2.001492	2.317	1.648
12~13	2.101907	2.427	1.793
13~14	2.206078	2.484	1.925
14~15	2.241623	2.489	1.970
15~16	2.268613	2.499	2.004
16~17	2.250925	2.499	1.967
17~18	2.177340	2.470	1.921
18~19	2.133533	2.391	1.859
19~20	2.216353	2.456	1.935
20~21	2.382064	2.797	2.063
21~22	2.410132	2.721	2.073
22~23	2.243823	2.603	1.854
23~24	1.911997	2.364	1.466

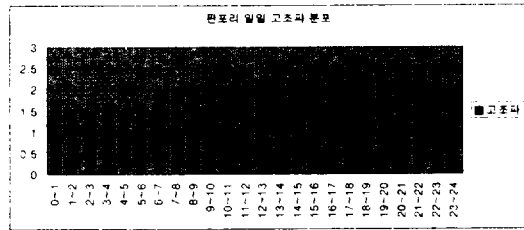


Fig. 10. Harmonic graph per time in Panpo (May 22th)

Table 12. Harmonic per section in Panpo (May 22th)

Bound	measure-ment No.	% measurement rate (measurement No. / Sample No)
1.5% below	8,918	10.32176
1.5~2.0%	27,580	31.9213
2.0~2.5%	48,599	56.24884
2.5~3.0%	1,303	1.508102
3.0% over	0	0

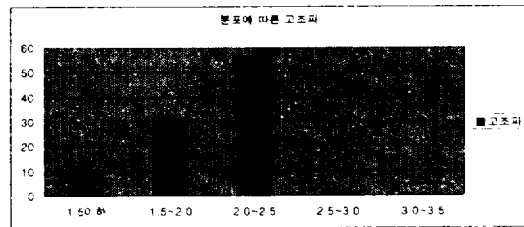


Fig 11. Harmonic graph per section in Panpo (May 22th)

Table 13에는 고조파 왜형율을 날짜별, 구간별로 나누어서 고조파 전압의 분포를 쉽게 파악할 수 있도록 하였으며 3일간 1 사이클로 샘플링 한 데이터를 이용하여 순시전압저하, 순시전압상승, 순시정전율 검토하였으나 해당 이벤트가 기록되지 않아 생략하였다.

Table 13. THD distribution per date of Household

Point	Date	THD (%)				
		1.5 below	1.5 ~2.0	2.0 ~2.5	2.5 ~3.0	3.0 over
Gosan	4/21	0.015	18.494	18.840	37.119	25.505
Gosan	4/22	0.104	22.187	11.075	43.283	23.337
Gosan	4/23	0.008	19.755	14.240	45.369	20.613
Gosan	4/24	0.000	10.093	18.261	42.099	29.515
Gosan	4/25	0.000	0.685	30.971	29.028	39.273
Gosan	4/26	0.000	1.531	22.951	13.535	61.961
Gosan	4/27	0.000	0.000	14.023	19.123	66.836
Gosan	4/29	0.000	0.038	21.605	48.731	29.589
Gosan	4/30	0.000	0.680	30.369	41.391	27.532
Gosan	5/1	0.070	24.638	10.106	28.800	36.348
Gosan	5/2	0.519	27.136	29.394	14.623	28.319
Gosan	5/3	0.519	23.488	9.126	21.224	45.625
Gosan	5/4	0.002	10.248	21.134	31.423	37.165
Gosan	5/5	0.001	17.415	15.532	46.310	20.684
Yongdang	5/7	0.000	0.461	68.115	28.092	3.329
Yongdang	5/8	0.000	4.938	34.349	58.197	2.512
Yongdang	5/9	0.000	1.067	34.548	57.192	7.192
Yongdang	5/10	0.001	9.284	37.818	44.884	8.002
Yongdang	5/11	0.000	1.037	59.729	33.895	5.336
Yongdang	5/12	0.028	20.557	36.483	37.831	5.098
Yongdang	5/13	0.017	10.446	44.914	40.459	4.162
Yongdang	5/14	0.000	2.673	74.012	18.247	5.065
Yongdang	5/15	0.000	4.087	34.435	54.071	7.392
Yongdang	5/16	0.000	0.947	34.878	55.979	8.190
Yongdang	5/17	0.000	5.318	75.134	13.732	5.814
Yongdang	5/18	0.005	33.480	51.219	12.194	3.099
Yongdang	5/19	0.017	19.137	65.500	14.574	0.770
Yongdang	5/20	0.013	22.431	58.719	17.057	1.776
Panpo	5/22	10.32	31.921	56.248	1.508	0.000
Panpo	5/23	9.040	24.843	57.218	8.896	0.000

3.2.2. 국내(한전)기준 분석

일반가정의 전압변동에 대한 국내기준은 220±13V 이내로서 측정지역 3군데 모두 유지범위 내에 속해 있으며 풍력발전시스템의 접속점 인근이나 멀리 떨어진 지점이나 전압변동은 큰 차이가 없는 것으로 분석

할 수 있어 전압유지조건은 만족스러우나 전압 변동은 심한 현상을 보이고 있다. 3%이내가 기준인 고조파 전압 왜형율에 대해서는 기준을 벗어나는 정도가 측정 지점별로 큰 차이가 발생하며 풍력발전시스템의 접속점 인근 지역이라고 기준을 많이 벗어나지는 않는다. 고조파 전압이 기준을 벗어나는 시간은 오전부터 오후까지 꾸준히 나타나므로 수용가에서 활동시간에 고조파를 유발하는 부하를 사용하는 것으로 파악할 수 있으며 풍력발전시스템은 직접적인 영향이 없다고 분석된다.

3.2.3. 국제기준 분석

일본이나 IEEE 등의 국제기준에서 종합왜형율은 국내보다 여유가 있으며 우수나 기수 고조파, 또는 조파별로 개별 왜형율을 따로 설정하고 있으며 국제기준과 측정 데이터를 비교한 결과를 Table 14에 나타내었다. Table 14에서 보는 바와 같이 일본규정은 3고조파에서 IEEE 규정은 6고조파에서 규정을 벗어나는 예가 있으나 전체 측정 데이터 수에 비해 아주 적은 양이므로 일본과 IEEE의 국제기준은 만족하는 것으로 분석하였다.

Table 14. Comparison with international standard

section	Total sample No.	Sample No. over standard	standard overrate(%)
Japanese standard	3,110,400	547 (3 Harmonic)	0.0175
IEEE standard	3,110,400	1 (6 Harmonic)	0.00003215

IV. 결 론

풍력발전시스템과 연계된 배전선로의 수용가 3곳을 측정점으로 하여 전압품질을 분석한 결과는 다음과 같다.

- 규정범위내의 전압 유지는 만족스러우나 전압 변동은 심하므로 플리커 관점에서 연구가 수행되어야 할 것이다.
- 고조파 전압에 대해서는 국내기준과 비교시 수용가에 따라 기준을 초과하는 정도가 심하며 활

동시간대에 주로 초과하고 있다. 이는 고조파 전압이 수용가의 부하와 아주 밀접하다는 것을 의미하며 풍력발전시스템과는 거의 무관한 것으로 파악된다.

- 일본이나 IEEE 등의 국제기준과 비교해서는 기준을 벗어나는 사례가 극소수에 지나지 않아 국내의 종합왜형을 기준이 엄격함을 알 수 있으며 저압에 대한 독립적인 기준과 조파별 왜형율로 기준을 설정하는 것을 고려할 필요가 있다.

한달 정도의 기간에 대해 전압 품질을 분석하여 풍력발전시스템의 영향을 일부 분석할 수 있었으나 1년 이상의 기간동안 측정하여 분석하여야만 계절별 영향을 파악할 수 있으며 고가의 측정 장비와 수용가 내부의 측정으로 해당 수용가의 품질만을 측정할 우려가 있어 차후에는 주상변압기의 2차측에서 측정하는 변압기 단위의 분석이 필요하다고 생각된다.

대용량의 풍력발전시스템이 연계된 배전선로의 수용가에 대한 전압 데이터는 취득하기 어려운 소중한 데이터로서 전용선로로 연계되기 전까지 수시로 데이터를 측정할 계획이다.

본 연구는 에너지 관리공단 (과제번호 : 2003-N-WD03-P-01-0-000-2003)의 지원으로 수행된 결과의 일부이며 한전 제주지사 배전부의 협조에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) J. Arrillaga, D. A. Bradley, P.S. Bodger, 1985, Power System Harmonics, John Wiley & Sons, p. 110 ~ 135.
- 2) Wilson E. Kazibwe, Musoke H. Sendaula, 1993, Electric Power Quality Control Techniques, Van Nostrand Reinhold, p. 1 ~ 31.
- 3) ELECTORTEK CONCEPTS, INC. Knoxville, Tennessee, 1996. 2, An Assessment of Distribution System Power Quality, p. 6-4~7-4
- 4) 한국전력공사 배전처, 2002. 5, Power Quality 기

술 자료집, p. 5 ~ 16.

- 5) 한국남부발전, 2002. 7, 제주 풍력건설 타당성 보완조사, p. 71 ~138
- 6) 제주도, 2003. 6, 제주도내 풍력발전단지 성능 모니터링 및 평가(II), p. 17 ~ 24
- 7) 대한전기협회, 2004. 4, 신재생에너지 분야의 기술 기준 개발방안 워크샵 및 계통연계기준(풍력) 공청회, p. 61 ~ 91