

## 풍력발전시스템 연계 전/후의 배전선로 전압 분석

김 세 호\*

### Voltage Analysis of Distribution Line with/without Interconnection of Wind Generation System

Se-Ho Kim\*

#### ABSTRACT

The number of wind generation installations are growing substantially in the Korea. Many of these installations are significant in size and directly connected to the distribution system. However, as wind generation costs continue to decline, distributed installations of one or more large turbines are becoming more common. In these distributed applications, it is not uncommon for the turbines to be connected near the end of a long rural distribution feeder from which end-users are served. In this paper, it is analyzed voltage variation, voltage unbalance, voltage harmonic and power factor of distribution line with/without wind generation system. With interconnection of wind generation, connection point is located 17.2km from the utility substation.

**Key Words :** Wind generation, voltage variation, voltage unbalance, voltage harmonic, power factor

#### 1. 서 론

최근 세계 환경보존과 지구 온난화 등에 관심이 고조됨에 따라 범세계적 온실가스 저감대책가스 거래제도 등의 도입을 국제사회에서는 거의 기정사실화 하고 있는 실정이며 이미 OECD 가입국으로서 우리나라는 국제사회에서의 지구환경에 대한 일정부분의 강제부담 및 온실가스 저감에 대한 의무할당 등이 예상

되고 있다.

이에 따라 국내에서도 가장 효율적인 대처방안으로서 풍력산업을 포함한 대체 에너지산업 및 대체 에너지의 개발을 위해 꾸준한 기술개발과 보급 확대를 꾀하고 있으며 산업자원부는 풍력 등의 대체에너지를 이용하여 전력을 생산한 경우 생산가격과 전력시장에서 거래되는 판매가격과의 차액을 지원하는 "대체에너지이용 발전전력의 기준가격 지침"을 고시하여 풍력발전의 경우 107.6원/kWh으로 차액을 보전하고 있다. 이와 같은 차액보전제도의 시행으로 안정적으로 풍력발전 사업에 대한 투자여부를 결정할 수 있게 되었으며 풍부한 풍력자원과 초기 건설사업비의 저감을

\* 제주대학교 전기전자공학부, 첨단기술연구소  
Faculty of Electrical & Electronic Eng., Cheju Nat'l Univ., Res. Inst. of Adv. Tech.

통해 풍력발전 산업도 상업적으로 자리 매길 수 있는 계기가 되고 있다[1,2]. 이러한 풍력발전시스템은 용량 3,000kW까지는 배전선로로 접속될 수 있으며 3,000kW를 초과하는 경우에는 계통의 영향을 고려하여 전용선로를 통하여 변전소로 직접 연계하도록 하고 있다[3,4].

본 논문에서는 풍력발전시스템이 배전선로의 전압에 미치는 영향을 분석하기 위하여 동일한 배전선로에 풍력발전시스템이 직접 연계된 경우와 연계되지 않은 경우에 대해 전압변동, 전압불평형, 고조파, 역률 등을 비교, 분석하였다.

## II. 본 론

### 2.1. 전기품질 기준

전기품질은 전력공급의 연속성과 전압의 여러 가지 특성의 관점에서 전력의 속성을 정의하는 여러 가지 파라미터의 집합을 뜻한다. 전력회사의 측면에서는 공급신뢰도에 관계되고 수용가의 측면에서는 전기설비에 공급되는 전력의 상태로 말할 수 있다.

현재 우리나라의 전력품질관리는 전기사업법에 근거하여 전력회사 측에서는 정전시간 및 정전횟수, 30분 평균 전압유지율, 주파수 유지율에 대한 목표 관리치를 부여함으로써 적정하게 유지되고 있다. 그리고 최근 정보·통신·제어기술의 발달에 따라 정보통신기기, 정밀제어 기기, 사무자동화 기기, 전산기기, 자동생산 라인 등에 마이크로프로세서 및 전력용 반도체소자가 많이 도입되고 있고 고효율 속도제어용 모터와 역률 보상용 콘덴서의 사용, 그리고 경제발전과 산업 활성화 등으로 인한 고정밀 단일대형부하의 증가, 도시중심으로의 변화에 따른 대규모 아파트단지의 등장, 단상 220V 가전제품의 대형화 등이 기존에는 그다지 문제가 되지 않았던 주파수 변동, 역률의 변동, 전압·전류의 고조파성분, 순간전압변동, 고주파의 영향, 플리커 등과 같은 사항들이 전기품질을 크게 위협하고 있다[5,6].

#### 2.1.1. 전압변동

불특정 다수의 수용가에 전력을 공급하는 배전계통

에 있어서 전압의 운용·관리는 전력이 변전소에서부터 수용가 측에 단방향으로 흐르는 것을 전제로 하여 중·경부하의 전압강하를 감안하면서 변전소의 송출전압조정, 주상변압기의 전압 Tap 조정 등을 행하여 계통 각 부분의 저압수용가 전압을 적정치에 유지시키고 있다.

전압유지는 저압 수용가의 전압을 표준전압 220V에 대해서는 207V~233V 이내로 유지하는 것으로서 규정전압 이내로 전압을 유지하기 위해 변전소에서는 송출전압의 유지범위를 정해놓고 있으며 현재 한전의 변전소 송출전압 유지 범위 및 상시/순시 전압변동의 기준은 다음과 같다.

- 변전소 송출전압 유지기준  
: 23.5kV ~ 22.4kV 또는 23.8kV ~ 22.7kV
- 특고압 계통의 상시 전압변동(10분 평균값)  
: 2 %이하
- 순시 전압변동(2초 이하) : 2 %이하

#### 2.1.2. 전압불평형

3상 전력계통에서 발전기, 변압기, 송전선과 배전선의 전기적 특성은 평형을 이루고 있어 평형부하전류가 흐르게 되면 계통상태는 평형을 이룬다. 부분적으로 송전선이나 배전선의 선로정수가 불평형을 이루고 있는 경우가 있으나, 불평형 정도가 매우 작아 실제적으로 평형을 이루고 있다고 가정하고 있다. 한편 전력계통에서 발전, 송전 및 배전계통은 평형을 취하고 있으나 전기를 사용하는 말단에서는 3상 유도전동기나 3상 전기로를 제외하고는 거의 단상부하를 사용한다. 따라서 각 상에 걸려 있는 이러한 단상부하들이 크기가 같고 역률이 같지 아니하면 부하불평형을 발생시키게 된다.

NEMA, MGI 규격에 의하면 전압불평형율이 발생하면 일반적으로 3상권선을 갖는 회전기는 모두 영향을 받는다고 할 수 있고, 가장 영향을 많이 받는 기기는 3상 유도 전동기이며, 3.5%의 전압불평형율은 전동기의 출력 약 15% 감소, 온도상승 10℃ 이상 상승 및 손실 4% 정도 증가로 나타난다.

IEC 관련규격에서는 저압계통에서 2%, 회전기의 정격과 성능에서는 1% 또는 수분동안 1.5%이하로 규정하고 있으며, 우리나라의 전기설비기준령에서는 3%로 정하고 있으나, 전력계통에 있어서 전압불평형의

영향은 광범위하므로 기준치를 강화시킬 필요가 있다.

- 국내의 전압불평률 기준 : 3% 이하

2.1.3. 역률

역조류가 있는 경우 발전장치에 의한 전압조정을 유효하게 행하기 위해 수전점 역률을 85%이상으로 하고 진상 역률(계통 측에서 볼 때 진상 무효전력으로 되는 상태)로 되지 않는 것으로 하고 있다. 또 역조류가 있는 경우에는 전압변동 대책상 할 수 없을 때는 역조류의 역률을 80%까지 제어 가능한 것으로 한다.

역조류가 없는 대체에너지전원 중에 역변환장치를 이용하여 연계하는 발전장치에 있어서는 수전점에서의 역률조정을 행하기 위해 수용가 전체의 부하, 가전기기의 증감에 대응한 무효전력의 조정을 발전장치에 담당시키는 것은 무리이므로 발전장치 자체의 운전 역률로 규정한다. 발전장치 내의 자여자식 역변환장치는 역률 100% 운전을 원칙으로 하고 타여자식의 역변환장치에 있어서는 역률 개선용 콘덴서를 설치하여 역률 100% 운전을 행하는 것으로 한다. 이것에 의하여 발전장치내의 기기 자체 역률을 가미하여도 발전장치의 종합 역률은 95% 이상으로 유지 가능한 것으로 생각된다.

동기발전기를 전력계통에 연계할 경우에는 운전 시에 역률의 조정이 가능하여 계통의 역률을 적정하게 유지할 수 있지만 유도발전기는 운전 시에 역률 조정이 불가능하여 계통 역률의 저하를 낳는다. 또한 일반적으로 자여자식 역변환장치는 역률 조정이 가능하지만 타여자식의 역변환 장치는 역률 조정이 불가능하다. 이 때문에 역률 조정용 콘덴서를 설치하며 수전점에서의 역률을 85%이상으로 합과 동시에 진상 역률로 되지 않도록 유지하는 것으로 한다. 또한 역률 개선용 콘덴서를 설치하면 유도발전기의 자기여자현상(이상전압의 발생 등)을 생기게 할 우려가 있으므로 해당 자가용발전설비 설치 수용가에는 연계용 차단기 개방시에 역률 개선용 콘덴서를 개방하는 등 적절한 제어방식으로 한다.

- 역률유지 기준 : 90%이상

2.1.4 고조파

공급계통의 정현파 전압을 비선형부하에 인가하면

비정현파의 부하전류가 계통내로 흐르게 되며, 이 전류는 전원임피던스에 의해 전압강하를 발생하게 되고 이와 같은 전압강하에 의해 정현파의 전원전압은 왜곡된 파형을 갖게 된다. 이러한 주기성을 갖는 왜형파는 Fourier 급수로 전개하여 기본 주파수와 정수배의 주파수 성분으로 분해하여 해석할 수 있으며, 이 정수배 성분을 고조파라 일컫는다.

계통의 부하와 기기의 비선형적인 특성에 의하여 발생되며, 이 왜형은 각차 조파성분의 크기와 위상각으로 표현되는 고조파 스펙트럼에 의해 나타내어지며, 고조파왜형의 정도를 나타내는 것으로서 종합왜형(Total Harmonic Distortion)이라는 단위가 많이 사용되고 있다.

현재 국내의 고조파 관리기준의 경우 전압 THD로 제한하고 있으며 3% 이하를 기준하고 있다.

- 전압고조파 관리기준 : 3% 이하

2.2. 배전선로 전기품질분석

2.2.1. 풍력발전시스템이 연계된 경우

한경풍력발전단지는 전용선로로 한림변전소에 연결되기 이전에 임시로 배전선로에 중간에 접속되어 있었으며 배전선로 중간에 연계된 계통을 Fig. 1에 표시하였다. 연계된 배전선로는 변압기 용량 24,882kVA, 최대부하 7,500kW, 공장 47.3km의 선로로서 일반 농촌 마을을 포함하고 있다.

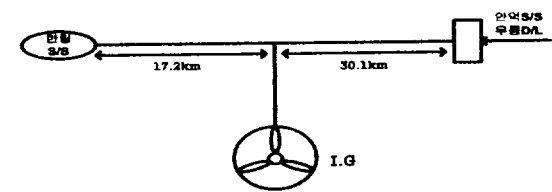


Fig. 1 Distribution line connected with wind power generation system

1) 전압변동

한경풍력발전단지가 연계된 배전선로의 인출점에서 데이터를 취득하였으며 취득한 데이터를 이용하여 모선의 상시전압이 한국전력공사의 변전소 송출전압 유지기준을 만족하는지 알아보기 위하여 8월12일 모선

전압의 전압파형을 Fig. 2에 나타내었고, 한경 D/L 모선의 날짜별 평균, 최대, 최소 전압을 Table 1에 나타내었다. 모선전압 파형 및 날짜별 전압 데이터로부터 모선전압의 크기는 규정범위내로 유지되고 있음을 알 수 있다.

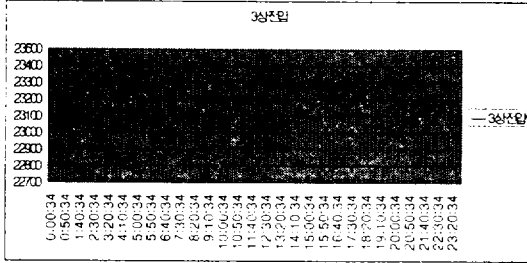


Fig. 2 Bus Voltage(04/8/12)

Table 1. Bus Voltage[V]

Date	Max.	Min.	Average
8/12	23368.92	22931.75	23174.88
8/13	23414.83	22859.17	23187.91
8/14	23454.25	22920.75	23248.48
8/15	23423.5	22924	23216.72
8/16	23390.08	22907.83	23186.8
8/17	23384.5	22867.42	23145.22
8/18	23371.92	22907.92	23155.32
8/19	23410.42	22876	23175.71
8/20	23445	22906	23189.08
8/21	23454.92	22895.08	23230.18

한경D/L의 8월 12일 전압변동률 데이터를 Fig. 3에 나타내었고, Table 2에는 8월 12일에서 18일까지 전압변동률이 규정범위를 벗어난 횟수를, Table 3에는 8월 12일에서 14일까지의 데이터를 10분 평균으로 계산한 전압변동률 값을 표시하였다.

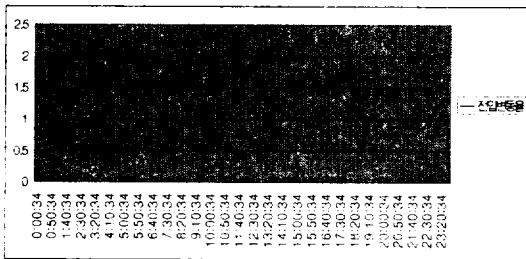


Fig. 3 Voltage Variation Rate(04/8/12)

Table 2. Voltage Variation Rate

Date	8/12	8/13	8/14	8/15	8/16	8/17	8/18
violation no.(%)	1 (0.7)	13 (9.0)	14 (9.7)	23 (16)	2 (1.4)	4 (2.7)	1 (0.7)

Table 3. Voltage Variation Rate('04 August, %)

date time	12	13	14	date time	12	13	14	date time	12	13	14
0:00	0.9	0.3	0.6	8:00	0.5	0.5	0.8	16:00	1.6	1.5	1.6
0:10	0.7	0.1	0.5	8:10	0.6	0.2	1.5	16:10	1.5	1.5	1.6
0:20	0.9	0.5	0.6	8:20	1.0	1.3	1.7	16:20	1.6	1.5	1.6
0:30	1.0	1.1	0.6	8:30	0.9	1.3	1.7	16:30	1.5	1.4	1.6
0:40	1.3	1.2	0.7	8:40	0.8	1.4	1.4	16:40	1.5	1.4	1.7
0:50	1.2	1.6	0.9	8:50	0.9	1.4	1.1	16:50	1.6	1.5	1.6
1:00	0.7	1.7	1.1	9:00	0.6	1.5	0.9	17:00	1.6	1.6	1.7
1:10	0.8	1.7	1.3	9:10	0.5	1.6	1.1	17:10	1.5	1.5	1.6
1:20	0.9	1.7	1.4	9:20	0.4	1.6	1.4	17:20	1.6	1.5	1.7
1:30	0.9	1.2	1.3	9:30	0.3	1.6	1.5	17:30	1.6	1.7	1.6
1:40	0.9	1.2	1.4	9:40	0.4	1.5	1.6	17:40	1.6	1.8	1.6
1:50	1.0	1.3	1.5	9:50	0.5	1.8	1.7	17:50	1.8	1.9	1.6
2:00	1.1	1.4	1.7	10:00	0.5	1.6	1.7	18:00			1.7
2:10	1.3	1.5	1.9	10:10	0.7	1.5	1.7	18:10	1.5	1.9	1.7
2:20	1.4	1.5		10:20	0.7	1.5	1.6	18:20	1.1	1.0	1.7
2:30	1.4	1.6		10:30	0.9	1.2	1.6	18:30	1.1	0.9	1.6
2:40	1.5	1.8		10:40	0.8	0.9	1.8	18:40	1.1	0.9	1.5
2:50	1.5	1.9		10:50	1.0	0.9	1.8	18:50	1.1	0.9	1.6
3:00	1.7	1.9		11:00	1.2	0.9	1.8	19:00	1.0	0.9	1.5
3:10	1.8			11:10	1.2	0.8	1.9	19:10	0.8	0.8	1.3
3:20	1.7			11:20	1.2	0.8	1.9	19:20	0.6	0.8	1.2
3:30	1.5		1.5	11:30	1.2	0.8		19:30	0.5	0.5	1.1
3:40	1.4	1.9	1.4	11:40	1.3	0.9		19:40	0.5	0.3	1.1
3:50	1.4	1.9	1.5	11:50	1.5	1.2	1.6	19:50	0.3	0.1	1.4
4:00	1.4	1.9	1.6	12:00	1.8	1.4	1.5	20:00	0.4	0.1	1.3
4:10	1.5	2.0	1.6	12:10	1.8	1.6	1.5	20:10	0.5	0.1	1.3
4:20	1.5	1.9	1.7	12:20	1.8	1.6	1.5	20:20	0.5	0.0	1.4
4:30	1.4		1.8	12:30	1.8	1.5	1.5	20:30	0.5	0.0	1.5
4:40	1.5		1.8	12:40	1.8	1.7	1.4	20:40	0.6	0.4	1.6
4:50	1.5		1.7	12:50	1.7	1.7	1.4	20:50	0.7	0.4	1.7
5:00	1.5		1.8	13:00	1.6	1.6	1.4	21:00	0.7	0.3	1.9
5:10	1.5		1.9	13:10	1.3	1.4	1.2	21:10	0.8	0.2	1.9
5:20	1.5		1.9	13:20	1.3	1.1	1.3	21:20	1.0	0.3	1.9
5:30	1.5			13:30	1.2	0.9	1.3	21:30	1.0	0.4	1.9
5:40	1.5			13:40	1.2	0.9	1.2	21:40	0.9	0.6	
5:50	1.5		1.7	13:50	1.5	0.9	1.2	21:50	1.1	0.4	
6:00	1.3	1.8	1.5	14:00	1.4	1.0	1.2	22:00	1.2	0.3	
6:10	1.1	1.7	1.4	14:10	1.4	1.3	1.1	22:10	1.1	0.4	1.7
6:20	1.0	1.6	1.2	14:20	1.4	1.3	1.1	22:20	1.1	0.7	0.9
6:30	0.7	1.4	1.1	14:30	1.5	1.3	1.2	22:30	0.9	0.8	1.0
6:40	0.5	1.2	0.9	14:40	1.5	1.3	1.3	22:40	0.9	0.9	1.2
6:50	0.2	1.0	0.6	14:50	1.5	1.3	1.3	22:50	1.0	0.7	1.1
7:00	0.4	0.7	0.2	15:00	1.5	1.3	1.5	23:00	1.2	0.4	1.1
7:10	0.9	0.8	0.1	15:10	1.6	1.4	1.5	23:10	1.2	0.5	1.0
7:20	1.1	0.7	0.2	15:20	1.6	1.4	1.6	23:20	1.2	0.7	1.0
7:30	0.9	0.5	0.9	15:30	1.6	1.4	1.5	23:30	1.3	0.9	1.2
7:40	0.7	0.3	0.7	15:40	1.7	1.4	1.5	23:40	1.1	0.7	1.1
7:50	0.6	0.1	0.4	15:50	1.6	1.3	1.5	23:50	0.1	0.3	1.3

전압변동률이 규정범위를 벗어난 횟수가 전체 측정 데이터 수의 비하여 적은 수이며 벗어나는 경우의 전압변동률도 2%대로서 대체적으로 전압변동률은 규정을 만족한다고 할 수 있다.

2) 전압고조파

8월 12일에 대한 고조파 전압의 왜곡정도를 10분 평균 그래프로 Fig. 4에 나타내었고 Table 4에는 8월 12일에서 14일까지의 데이터를 10분 평균으로 계산한 전압왜곡률을 표시하였으며 Fig. 4 및 Table 4로부터 전압고조파 문제는 크지 않은 것으로 판단된다.

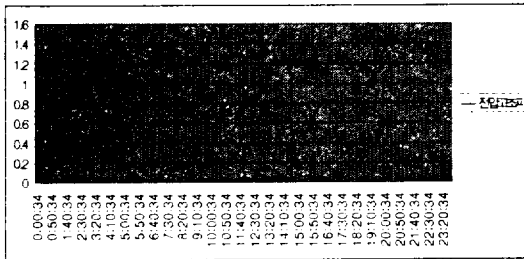


Fig. 4 Voltage Harmonic(04/8/12)

3) 전압불평형 및 역률

Table 5에 한경D/L의 8월 12일에서 21일까지 2시간 평균 전압불평형 데이터를 나타내었으며 모든 데이터가 3%이하로서 한국전력공사의 전압불평형률 기준을 만족하였다. 또한 평균역률을 표시한 Table 6으로부터 90% 이상의 역률이 유지됨을 알 수 있다.

Table 5. Voltage Unbalance Rate(August, %)

date time	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
0~2	0.22	0.22	0.24	0.22	0.22	0.23	0.20	0.24	0.21	0.22
2~4	0.21	0.21	0.23	0.21	0.21	0.21	0.20	0.20	0.20	0.22
4~6	0.22	0.21	0.23	0.21	0.24	0.22	0.22	0.20	0.20	0.20
6~8	0.23	0.22	0.25	0.22	0.23	0.24	0.20	0.33	0.20	0.21
8~0	0.22	0.21	0.25	0.24	0.26	0.23	0.19	0.17	0.22	0.22
10~2	0.23	0.22	0.23	0.24	0.23	0.23	0.25	0.22	0.23	0.22
12~14	0.21	0.20	0.22	0.21	0.24	0.22	0.28	0.12	0.21	0.22
14~16	0.22	0.21	0.23	0.21	0.23	0.22	0.28	0.14	0.20	0.22
16~18	0.23	0.20	0.22	0.21	0.22	0.20	0.18	0.17	0.20	0.20
18~20	0.23	0.20	0.21	0.21	0.21	0.18	0.27	0.20	0.20	0.21
20~22	0.21	0.22	0.20	0.20	0.21	0.16	0.22	0.20	0.22	0.20
22~24	0.17	0.22	0.20	0.20	0.20	0.19	0.19	0.18	0.20	0.21

Table 4. Voltage Harmonic(August, %)

date time	12	13	14	date time	12	13	14	date time	12	13	14
0:00	1.1	1.1	1.0	8:00	1.1	1.0	1.2	16:00	1.3	1.2	1.2
0:10	1.1	1.0	1.2	8:10	1.1	1.1	1.2	16:10	1.1	1.2	1.1
0:20	1.1	1.1	1.1	8:20	1.2	1.2	1.2	16:20	1.0	1.3	1.1
0:30	1.1	1.0	1.0	8:30	1.2	1.3	1.2	16:30	1.1	1.2	1.1
0:40	1.2	1.1	1.0	8:40	1.2	1.2	1.2	16:40	1.1	1.3	1.1
0:50	1.2	1.1	1.1	8:50	1.1	1.1	1.1	16:50	1.2	1.3	1.3
1:00	1.1	1.0	1.1	9:00	1.2	1.1	1.2	17:00	1.1	1.2	1.4
1:10	1.0	1.0	1.1	9:10	1.2	1.1	1.3	17:10	1.1	1.2	1.4
1:20	0.9	1.1	1.0	9:20	1.2	1.2	1.3	17:20	1.2	1.3	1.2
1:30	0.9	1.0	0.9	9:30	1.3	1.2	1.3	17:30	1.2	1.2	1.2
1:40	1.0	0.9	0.9	9:40	1.3	1.2	1.3	17:40	1.2	1.2	1.2
1:50	0.9	0.9	1.0	9:50	1.2	1.1	1.2	17:50	1.2	1.3	1.2
2:00	0.9	0.9	1.1	10:00	1.2	1.1	1.3	18:00	1.2	1.3	1.2
2:10	0.9	0.9	1.2	10:10	1.1	1.1	1.3	18:10	1.1	1.3	1.2
2:20	1.0	0.9	1.1	10:20	1.2	1.1	1.3	18:20	1.1	1.3	1.2
2:30	0.9	0.9	0.9	10:30	1.2	1.1	1.3	18:30	1.2	1.2	1.2
2:40	1.0	1.0	0.9	10:40	1.2	1.2	1.3	18:40	1.1	1.2	1.3
2:50	0.9	1.1	0.9	10:50	1.2	1.3	1.3	18:50	1.1	1.2	1.4
3:00	1.0	1.1	0.9	11:00	1.2	1.3	1.4	19:00	1.2	1.3	1.3
3:10	1.0	1.0	1.0	11:10	1.2	1.3	1.2	19:10	1.2	1.3	1.3
3:20	1.0	0.9	1.2	11:20	1.3	1.2	1.2	19:20	1.2	1.4	1.4
3:30	1.0	1.1	1.1	11:30	1.3	1.2	1.3	19:30	1.2	1.3	1.4
3:40	1.2	1.0	1.1	11:40	1.2	1.2	1.3	19:40	1.3	1.4	1.3
3:50	1.2	0.9	1.2	11:50	1.3	1.2	1.3	19:50	1.4	1.4	1.4
4:00	1.2	0.9	1.2	12:00	1.2	1.2	1.2	20:00	1.3	1.4	1.4
4:10	1.2	0.9	1.2	12:10	1.3	1.2	1.3	20:10	1.4	1.4	1.5
4:20	1.1	0.9	1.2	12:20	1.3	1.2	1.2	20:20	1.3	1.4	1.4
4:30	0.9	0.9	1.1	12:30	1.2	1.2	1.2	20:30	1.4	1.5	1.4
4:40	0.9	0.9	1.0	12:40	1.2	1.2	1.3	20:40	1.4	1.4	1.4
4:50	0.9	0.9	0.9	12:50	1.3	1.2	1.4	20:50	1.4	1.5	1.3
5:00	1.0	1.0	0.9	13:00	1.3	1.2	1.2	21:00	1.4	1.4	1.3
5:10	1.1	1.2	0.9	13:10	1.3	1.3	1.2	21:10	1.3	1.5	1.3
5:20	1.1	1.2	0.9	13:20	1.3	1.3	1.4	21:20	1.4	1.5	1.3
5:30	1.1	1.0	1.0	13:30	1.3	1.3	1.4	21:30	1.4	1.5	1.4
5:40	1.1	0.9	0.9	13:40	1.3	1.2	1.2	21:40	1.4	1.4	1.4
5:50	1.1	0.9	0.9	13:50	1.2	1.3	1.2	21:50	1.4	1.4	1.3
6:00	0.9	0.9	0.9	14:00	1.2	1.1	1.2	22:00	1.3	1.5	1.4
6:10	0.9	1.0	1.0	14:10	1.2	1.1	1.2	22:10	1.3	1.3	1.3
6:20	0.9	1.2	1.0	14:20	1.2	1.2	1.2	22:20	1.2	1.3	1.2
6:30	1.0	1.1	1.0	14:30	1.1	1.2	1.2	22:30	1.4	1.3	1.2
6:40	1.0	1.0	1.0	14:40	1.1	1.2	1.3	22:40	1.3	1.3	1.4
6:50	1.3	1.1	1.3	14:50	1.2	1.1	1.4	22:50	1.2	1.3	1.3
7:00	1.3	1.0	1.3	15:00	1.1	1.1	1.4	23:00	1.2	1.3	1.2
7:10	1.1	1.1	1.1	15:10	1.2	1.2	1.3	23:10	1.2	1.3	1.2
7:20	1.0	1.3	1.1	15:20	1.3	1.2	1.3	23:20	1.2	1.3	1.1
7:30	1.1	1.2	1.2	15:30	1.1	1.2	1.3	23:30	1.1	1.2	1.1
7:40	1.3	1.1	1.2	15:40	1.1	1.1	1.3	23:40	1.3	1.1	1.1
7:50	1.1	1.1	1.2	15:50	1.1	1.0	1.4	23:50	1.1	1.1	1.3

Table 6. Power Factor(August)

date	12	13	14	15	16	17
p.f.	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.94

2.2.2. 풍력발전시스템이 연계되지 않은 경우

1) 전압변동

한경 D/L 모선전압의 최대, 최소, 평균값(2005년 1월~2월)을 Table 7에, 2005년 1월(1일, 2일, 3일, 4일)의 전압변동률 데이터를 Table 8에, 규정을 벗어난 횟수를 Table 9에 나타내었다. 또한 1월(10일, 20일), 2월(1일)에 대한 전압변동률을 시각적으로 Fig. 5 - Fig. 7에 표시하였다.

Table 7. Bus Voltage(Jan. - Feb., V)

date	max	min	ave	date	max	min	ave
1/01	23590	22900	23277	1/23	23570	22950	23343
1/02	23540	23000	23333	1/24	23560	22910	23257
1/03	23560	22900	23162	1/25	23520	22950	23333
1/04	23520	22890	23215	1/26	23540	22920	23199
1/05	23460	22910	23153	1/27	23550	22950	23238
1/06	23520	22870	23282	1/28	23530	22960	23291
1/07	23520	22960	23226	1/29	23570	22910	23270
1/08	23550	22890	23231	1/30	23800	22940	23296
1/09	23570	22880	23292	1/31	23530	22920	23287
1/10	23530	22880	23187	2/01	23570	22850	23242
1/11	23570	22880	23258	2/02	23570	22920	23328
1/12	23510	22880	23233	2/03	23580	22930	23343
1/13	23560	22890	23260	2/04	23570	22940	23289
1/14	23560	22930	23243	2/05	23580	22910	23289
1/15	23510	22900	23241	2/06	23520	22900	23326
1/16	23550	22910	23344	2/07	23530	22870	23190
1/17	23530	22910	23244	2/08	23340	22970	23130
1/18	23580	22930	23263	2/09	23560	22860	23216
1/19	23600	22910	23167	2/10	23560	22900	23270
1/20	23550	22900	23249	2/11	23630	22900	23208
1/21	23550	22910	23240	2/12	23540	22920	23268
1/22	23550	22930	23269				

Table 8. Voltage Variation Rate(Jan. %)

date time	1	2	3	date time	1	2	3	date time	1	2	3
0:00	1.7	1.2	1.0	8:00			1.2	16:00	1.1	1.8	1.0
0:10	1.5	1.3	1.1	8:10			1.1	16:10	1.0	1.9	0.9
0:20	1.6	1.4	1.2	8:20			1.2	16:20	1.0	1.8	0.7
0:30	1.4	1.2	1.2	8:30			1.2	16:30	0.8	1.7	0.6
0:40	1.4	1.3	1.2	8:40			1.1	16:40	0.6	1.9	0.8
0:50	1.5	1.6	0.7	8:50			0.9	16:50	0.8	1.8	1.1
1:00	1.5	1.6	1.5	9:00			0.8	17:00	1.1	1.7	1.4
1:10	0.9	1.6	1.7	9:10	1.6		0.9	17:10	1.0	1.4	1.2
1:20	1.0	1.7	1.7	9:20	1.2		0.8	17:20	0.8	1.1	0.9
1:30	1.0	1.9	1.8	9:30	1.0		0.8	17:30	0.6	0.7	0.4
1:40	1.1			9:40	1.2		0.6	17:40	0.5	1.3	0.7
1:50	1.4	1.9		9:50	1.3	1.8	0.6	17:50	0.4	1.5	0.7
2:00	1.6	1.7		10:00	1.3	1.8	0.5	18:00	1.0	1.3	0.9
2:10	1.7	1.7		10:10	1.4	1.8	0.4	18:10	1.4	1.3	0.8
2:20	1.7	1.8		10:20	1.2	1.7	0.2	18:20	1.3	1.2	1.0
2:30	1.8	1.9		10:30	1.3	1.7	0.2	18:30	1.2	1.4	1.2
2:40	1.9	1.9		10:40	1.3	1.6	0.1	18:40	1.2	1.4	1.2
2:50				10:50	1.2	1.7	0.2	18:50	1.1	1.5	1.2
3:00		1.9		11:00	1.2	1.6	0.1	19:00	1.1	1.5	1.1
3:10			1.7	11:10	1.2	1.5	0.1	19:10	1.0	1.5	1.2
3:20			1.6	11:20	1.2	1.6	0.1	19:20	1.1	1.5	1.3
3:30			1.5	11:30	1.1	1.6	0.3	19:30	1.1	1.7	1.4
3:40			1.4	11:40	1.2	1.6	0.4	19:40	1.2	1.7	1.4
3:50			1.1	11:50	1.2	1.6	0.6	19:50	1.2	1.7	1.5
4:00			1.0	12:00	1.2	1.6	0.9	20:00	1.2	1.8	1.5
4:10			1.2	12:10	1.3	1.6	1.2	20:10	1.4	1.8	1.5
4:20			1.1	12:20	1.3	1.6	1.3	20:20	1.4	1.9	1.5
4:30			1.1	12:30	1.2	1.7	1.3	20:30	1.5		1.5
4:40			1.1	12:40	1.1	1.6	1.3	20:40	1.4		1.7
4:50			1.1	12:50	1.1	1.7	1.3	20:50	1.6		1.8
5:00			1.1	13:00	1.2	1.6	1.0	21:00	1.6		1.8
5:10			1.0	13:10	1.2	1.6	0.8	21:10	1.7		
5:20			1.1	13:20	1.2	1.6	0.8	21:20	1.8		
5:30			1.0	13:30	1.2	1.6	0.7	21:30	1.9		
5:40			0.9	13:40	1.2	1.6	0.6	21:40	1.9		1.6
5:50			0.8	13:50	1.2	1.6	0.6	21:50			1.4
6:00			0.8	14:00	1.1	1.6	0.6	22:00	1.9		1.4
6:10			0.7	14:10	1.1	1.6	0.6	22:10	1.7		1.1
6:20		1.9	0.5	14:20	1.2	1.7	0.6	22:20			0.8
6:30			0.6	14:30	1.3	1.7	0.5	22:30			0.9
6:40			0.4	14:40	1.2	1.7	0.5	22:40			0.9
6:50		1.9	0.3	14:50	1.3	1.7	0.8	22:50			0.9
7:00		1.9	0.6	15:00	1.3	1.7	0.9	23:00			0.9
7:10		1.9	1.3	15:10	1.3	1.7	1.0	23:10			0.8
7:20			1.3	15:20	1.3	1.7	1.0	23:20		1.3	0.7
7:30			1.4	15:30	1.2	1.8	1.1	23:30		1.2	0.8
7:40			1.3	15:40	1.3	1.8	1.2	23:40	1.8	1.1	0.9
7:50			1.2	15:50	1.2	1.8	1.1	23:50	1.9	1.1	0.9

Table 9. Violation of Voltage Variation

date	no	%	date	no	%
1/01	47	32.6	1/23	50	34.7
1/02	55	38.2	1/24	31	21.5
1/03	12	8.3	1/25	64	44.4
1/04	21	14.6	1/26	19	13.2
1/05	10	6.9	1/27	22	15.3
1/06	18	12.5	1/28	42	29.2
1/07	8	5.6	1/29	30	20.8
1/08	20	13.9	1/30	23	16.0
1/09	20	13.9	1/31	32	22.2
1/10	8	5.6	2/01	22	15.3
1/11	32	22.2	2/02	50	34.7
1/12	22	15.3	2/03	60	41.7
1/13	20	13.9	2/04	48	33.3
1/14	26	18.1	2/05	37	25.7
1/15	10	6.9	2/06	33	22.9
1/16	66	45.8	2/07	7	4.9
1/17	22	15.3	2/08	0	0.0
1/18	32	22.2	2/09	17	11.8
1/19	9	6.3	2/10	17	11.8
1/20	16	11.1	2/11	5	3.5
1/21	17	11.8	2/12	34	23.6
1/22	35	24.3			

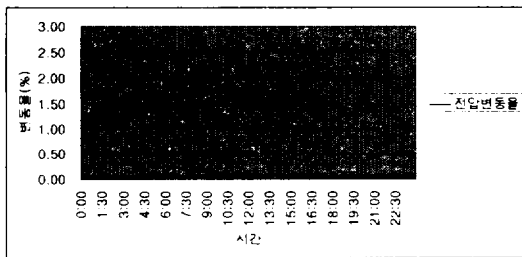


Fig. 5 Voltage Variation Rate(05/1/10)

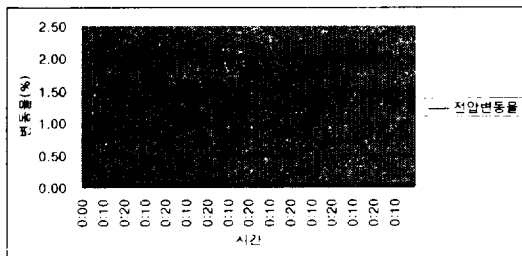


Fig. 6 Voltage Variation Rate(05/1/20)

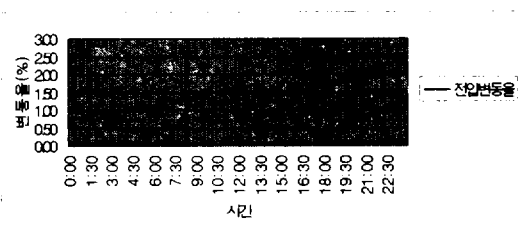


Fig. 7 Voltage Variation Rate(05/2/01)

한경D/L 모선전압이 변전소 송출기준을 만족한다 하더라도 전압변동률이 기준 2%를 벗어나는 경우가 발생하는 것은 모선전압이 대체적으로 높게 나타난 결과로 이해할 수 있다.

2) 전압고조파

2005년 1월(1일, 4일)에 대한 전압고조파 왜형률을 Fig. 8, Fig. 9에 표시하였으며 Table 10에 2005년 1월(1일, 2일, 3일)의 10분 당 전압왜형률 값을 나타내었다. 전압고조파에 대한 그래프와 표로부터 전압고조파 부분은 크지 않은 것으로 분석할 수 있다.

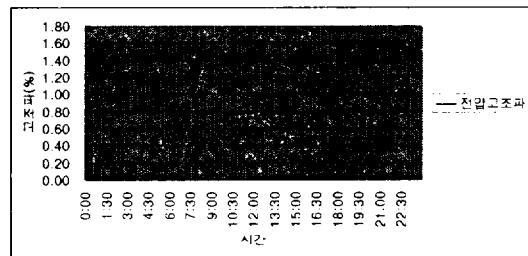


Fig. 8 Voltage Harmonic(05/1/01)

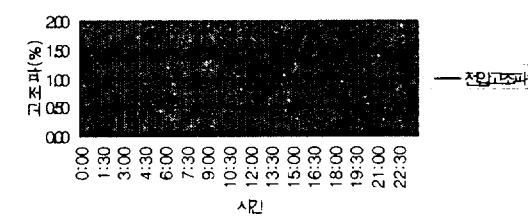


Fig. 9 Voltage Harmonic(05/1/04)

Table 10. Voltage Harmonic(Jan, %)

date time	1	2	3	date time	1	2	3	date time	1	2	3
0:00	1.4	1.3	1.4	8:00	1.5	1.4	1.4	16:00	1.4	1.2	1.2
0:10	1.3	1.4	1.5	8:10	1.5	1.4	1.3	16:10	1.3	1.2	1.1
0:20	1.3	1.4	1.5	8:20	1.6	1.5	1.4	16:20	1.4	1.2	1.2
0:30	1.3	1.4	1.3	8:30	1.5	1.4	1.3	16:30	1.3	1.2	1.3
0:40	1.3	1.3	1.2	8:40	1.4	1.4	1.3	16:40	1.3	1.2	1.3
0:50	1.3	1.3	1.2	8:50	1.4	1.4	1.3	16:50	1.4	1.3	1.4
1:00	1.3	1.4	1.2	9:00	1.5	1.4	1.3	17:00	1.4	1.3	1.3
1:10	1.4	1.4	1.3	9:10	1.5	1.4	1.2	17:10	1.4	1.3	1.3
1:20	1.3	1.4	1.4	9:20	1.5	1.4	1.2	17:20	1.4	1.3	1.3
1:30	1.3	1.4	1.3	9:30	1.4	1.4	1.2	17:30	1.4	1.3	1.3
1:40	1.3	1.5	1.3	9:40	1.4	1.4	1.2	17:40	1.5	1.3	1.3
1:50	1.4	1.4	1.3	9:50	1.4	1.4	1.2	17:50	1.4	1.3	1.3
2:00	1.4	1.4	1.3	10:00	1.4	1.4	1.3	18:00	1.4	1.3	1.4
2:10	1.3	1.4	1.3	10:10	1.4	1.3	1.4	18:10	1.5	1.4	1.4
2:20	1.3	1.3	1.3	10:20	1.4	1.3	1.4	18:20	1.5	1.4	1.3
2:30	1.4	1.4	1.3	10:30	1.3	1.3	1.4	18:30	1.5	1.3	1.3
2:40	1.4	1.4	1.3	10:40	1.4	1.3	1.4	18:40	1.4	1.4	1.3
2:50	1.4	1.4	1.3	10:50	1.4	1.3	1.3	18:50	1.4	1.4	1.3
3:00	1.4	1.4	1.4	11:00	1.3	1.3	1.2	19:00	1.4	1.4	1.3
3:10	1.4	1.4	1.4	11:10	1.4	1.3	1.2	19:10	1.5	1.4	1.3
3:20	1.4	1.5	1.3	11:20	1.4	1.4	1.2	19:20	1.4	1.5	1.4
3:30	1.4	1.4	1.3	11:30	1.4	1.4	1.2	19:30	1.5	1.4	1.4
3:40	1.4	1.4	1.3	11:40	1.4	1.4	1.2	19:40	1.5	1.4	1.3
3:50	1.5	1.3	1.3	11:50	1.3	1.3	1.2	19:50	1.5	1.5	1.3
4:00	1.4	1.4	1.3	12:00	1.3	1.3	1.2	20:00	1.5	1.4	1.5
4:10	1.4	1.4	1.3	12:10	1.3	1.3	1.2	20:10	1.5	1.5	1.5
4:20	1.3	1.4	1.3	12:20	1.4	1.3	1.2	20:20	1.6	1.5	1.5
4:30	1.3	1.4	1.3	12:30	1.5	1.3	1.2	20:30	1.5	1.5	1.4
4:40	1.3	1.4	1.3	12:40	1.5	1.3	1.2	20:40	1.6	1.5	1.4
4:50	1.4	1.4	1.4	12:50	1.3	1.3	1.2	20:50	1.5	1.6	1.4
5:00	1.4	1.4	1.3	13:00	1.4	1.3	1.2	21:00	1.5	1.6	1.4
5:10	1.4	1.4	1.3	13:10	1.4	1.3	1.3	21:10	1.5	1.6	1.4
5:20	1.4	1.4	1.3	13:20	1.4	1.3	1.3	21:20	1.6	1.5	1.3
5:30	1.5	1.4	1.4	13:30	1.4	1.4	1.2	21:30	1.5	1.4	1.4
5:40	1.3	1.4	1.4	13:40	1.3	1.4	1.2	21:40	1.5	1.4	1.5
5:50	1.4	1.4	1.4	13:50	1.4	1.4	1.3	21:50	1.5	1.4	1.5
6:00	1.4	1.4	1.3	14:00	1.3	1.3	1.3	22:00	1.5	1.4	1.4
6:10	1.4	1.5	1.3	14:10	1.3	1.3	1.2	22:10	1.5	1.4	1.5
6:20	1.4	1.5	1.4	14:20	1.4	1.3	1.3	22:20	1.5	1.4	1.5
6:30	1.4	1.5	1.3	14:30	1.3	1.3	1.2	22:30	1.5	1.4	1.4
6:40	1.4	1.5	1.3	14:40	1.4	1.2	1.2	22:40	1.5	1.4	1.3
6:50	1.5	1.5	1.6	14:50	1.4	1.2	1.3	22:50	1.5	1.4	1.3
7:00	1.5	1.5	1.7	15:00	1.4	1.2	1.3	23:00	1.5	1.4	1.3
7:10	1.5	1.5	1.6	15:10	1.4	1.3	1.3	23:10	1.4	1.4	1.3
7:20	1.5	1.5	1.5	15:20	1.4	1.3	1.3	23:20	1.4	1.4	1.3
7:30	1.5	1.5	1.4	15:30	1.5	1.3	1.3	23:30	1.4	1.3	1.3
7:40	1.5	1.5	1.5	15:40	1.4	1.3	1.2	23:40	1.4	1.3	1.3
7:50	1.6	1.5	1.5	15:50	1.4	1.2	1.2	23:50	1.4	1.3	1.3

3) 전압불평형 및 역률

한정D/L의 전압불평형을 및 평균 역률을 Tabel 11, Table 12에 나타내었으며 분석결과 전압불평형을

은 극히 적은 값이며 역률은 대부분 90%이상을 유지하고 있고 일부 90%보다 적게 나타난 것은 부하특성에 의한 것으로 판단된다.

Table 11. Voltage Unbalance Rate(Jan., %)

date time	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0 ~ 2	0.18	0.19	0.20	0.19	0.16	0.19	0.17	0.17	0.18
2 ~ 4	0.19	0.19	0.18	0.20	0.18	0.20	0.19	0.19	0.19
4 ~ 6	0.26	0.19	0.17	0.21	0.19	0.20	0.19	0.20	0.20
6 ~ 8	0.21	0.21	0.18	0.21	0.21	0.20	0.19	0.20	0.20
8 ~ 10	0.20	0.20	0.18	0.18	0.19	0.19	0.17	0.20	0.18
10~12	0.18	0.20	0.19	0.16	0.20	0.18	0.23	0.25	0.19
12~14	0.21	0.20	0.18	0.16	0.22	0.19	0.22	0.21	0.18
14~16	0.22	0.20	0.16	0.18	0.22	0.18	0.24	0.24	0.17
16 ~ 8	0.11	0.20	0.18	0.14	0.21	0.17	0.20	0.21	0.18
18~20	0.12	0.19	0.18	0.15	0.20	0.19	0.14	0.11	0.18
20~22	0.12	0.19	0.17	0.12	0.20	0.19	0.11	0.10	0.17
22~24	0.19	0.20	0.16	0.13	0.21	0.18	0.13	0.14	0.20

Table 12. Power Factor

date	p.f.	date	p.f.	date	p.f.
12/20	0.86	1/01	0.93	2/01	0.97
12/21	0.90	1/02	0.96	2/02	0.97
12/22	0.92	1/03	0.93	2/03	0.97
12/23	0.93	1/04	0.90	2/04	0.97
12/24	0.93	1/05	0.95	2/05	0.97
12/25	0.91	1/06	0.94	2/06	0.97
12/26	0.92	1/07	0.93	2/07	0.97
12/27	0.90	1/08	0.93	2/08	0.97
12/28	0.82	1/09	0.91	2/09	0.97
12/29	0.80	1/10	0.94	2/10	0.97
12/30	0.93	1/11	0.93	2/11	0.97
12/31	0.91	1/12	0.93	2/12	0.97

III. 결 론

본 논문에서는 풍력발전시스템이 배전선로의 전압에 미치는 영향을 분석하기 위하여 동일한 배전선로에 풍력발전시스템이 직접 연계된 경우와 연계되지 않은 경우에 대해 전압변동, 전압불평형, 고조파, 역률 등을 비교한 결과는 다음과 같다.

- 풍력발전시스템이 배전선로의 중간에 연계된 경우
  - 모선의 상시전압이 한국전력공사의 변전소 송



출전압 유지기준을 만족하고 있다.

- 전압변동률이 규정범위를 벗어난 횟수가 전체 측정 데이터 수의 비하여 적은 수이며 벗어나는 경우의 전압변동률도 2%대로서 대체적으로 전압변동률은 규정을 만족하고 있다.
- 전압고조파 문제는 크지 않은 것으로 판단된다.
- 90% 이상으로 역률이 유지되고 있다.

○ 풍력발전시스템이 연계되지 않은 경우

- 모선전압이 변전소 송출기준을 만족하고 있지만 전압변동률은 기준 2%를 벗어나는 경우가 발생하고 있으며 이는 모선전압이 대체적으로 높게 나타난 결과이다.
- 전압고조파 부분은 크지 않은 것으로 판단된다.
- 전압불평형률은 극히 적게 나타나고 있으며 역률은 대부분 90%이상을 유지하고 있고 일부 90%보다 적게 나타난 것은 부하특성에 의한 것으로 판단된다.

풍력발전시스템이 연계된 경우와 연계되지 않은 경우에 대해 동일 배전선로의 모선전압 상시변동 및 전압불평형, 고조파, 역률 등을 비교해 본 결과 풍력발전시스템이 연계된 경우가 오히려 연계되지 않은 경우에 비해 전기품질이 좋게 유지되는 것을 볼 수 있으며 전기품질의 문제는 부하의 특성에 따라 좌우됨을 알 수 있다.

Sons, pp. 110 - 130.

[6] W. E. Kazibwe and M. H. Sendaula, 1993, Electric Power Quality Control Techniques, Van Nostrand Reinhold, pp. 1 - 31.

본 연구는 에너지 관리공단의 지원으로 수행된 결과의 일부입니다.

### 참고문헌

[1] 한국남부발전, 2002. 7, 제주풍력건설 타당성 보완 조사, pp. 71 - 138.

[2] 한전전력연구원, 2004. 8, 풍력발전 계통연계 기술 지침 및 연계선로 운영기준 제정에 관한 연구, pp. 4 - 11.

[3] 대한전기협회, 2004. 4, 신재생에너지분야의 기술 기준 개발방안 워크샵 및 계통연계기준(풍력) 공청회, pp. 59 - 91.

[4] 대한전기학회, 2005. 3, 전기의 세계, pp. 33 - 43.

[5] A. Arrillaga, D. A. Bradley and P. S. Bodger, 1985, Power System Harmonics, John Wiley &