

## 행원풍력발전단지의 계통연계기술기준 적합성 분석

김 세 호\*

### Suitability Analysis of Hangwon Wind Power Generation Farm by Network Interconnection Technology Standard

Se-Ho Kim\*

#### ABSTRACT

The number of wind generation installations are growing substantially in Jeju, Korea. Many of these installations are significant in size and directly connected to the distribution system. 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. Therefore, utility grid interconnection standards for interconnecting non-utility distributed generation systems are essential to both power system company and generation company. These interconnection standards are important to utilities, customers, wind generation manufactures and nation. In this paper, it is investigated suitability of Hangwon wind power generation farm by network interconnection technology standard.

**Key Words** : Wind power generation, network interconnection technology standard, harmonic, voltage variation, power factor

#### 1. 서 론

우리나라의 전력공급은 설비특성상 대형 발전소가 주로 해안에 위치한 반면 전력수요의 40% 이상이 수도권에 편중되어 수도권 이외의 지역에서 1,000만 kW정도를 송전받고 있다. 따라서 대도시 지역의 분산형 전원개발을 촉진하기 위하여 구역전기사업제도를 시행하고 있으며 이는 비교적 소용량의 발전기를

이용하여 전기를 생산, 전력거래소를 통하지 않고 특정한 공급구역내의 소비자에게 직접 전기를 공급하는 새로운 형태의 전기사업(발전, 배전, 전기판매를 겸업)이며 발전소 건설의 입지난 해소, 안정적 전력수급 지원, 송전선로 건설비용 및 송전선로 손실 절감 효과를 기대하고 있다. 또한 설비용량 200kW 이하의 소규모 대체에너지 발전사업자가 생산한 전력을 전력거래소를 통하지 않고 직접 한전에 판매할 수 있도록 허용함으로써 발전사업자의 경제적 부담을 덜어 주고 있다. 따라서 분산전원의 계통연계에 따라 예상되는 전기이용고객들의 전력품질 저하와 신뢰도 저하에 대한 불안을 없애고 발전사업자에게는 명확한 기술검토

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

기준을 제공하기 위한 분산전원 계통연계 기준(안)이 제정되기에 이르렀다[1-3].

제주지역에는 현재 제주도청에서 조성한 행원풍력 발전단지과 (주)남부발전에서 조성한 한경풍력발전단지가 있으며 600kW, 660kW, 750kW 등 총 15기의 풍력발전시스템으로 구성된 행원풍력발전단지는 총 용량 10MW로서 궁장 24.6km의 전용선로(풍력 D/L)로 성산변전소에 연계되어 있으며 북제주군 한경면 용수리에 위치한 한경풍력단지는 1.5MW × 4대의 총 6MW의 용량으로 한림복합발전소의 구내에 있는 한림변전소에 연결되어 있다[4].

대체에너지 이용 발전가격의 차액보존제도와 제주도의 풍속자원에 대한 우수성으로 향후 2년 이내에 제주도는 70MW까지 풍력발전설비의 증설이 계획되어 있어 풍력발전시스템의 출력이 계통연계기술기준에 적합한지를 판단해야 하는 중요한 시점이 되었다[3]. 따라서 본 논문에서는 풍력발전시스템의 출력인 전기품질에 대해 전압변동, 송출전압 유지범위, 전류고조파, 역률 등이 풍력발전 계통연계 기준에 적합한지 분석하고자 한다.

## II. 본 문

### 2.1. 계통연계기술기준

#### 2.1.1. 연계의 구분

풍력발전설비를 전력계통에 연계하고자 할 경우, 공공 인축과 설비의 안전, 전력공급 신뢰도 및 전력 품질을 확보하기 위한 기술적인 제반 조건이 우선 충족되어야 하며, 계통에 연계할 수 있는 발전설비 용량은 다음과 같이 권장한다.

가) 풍력발전설비의 사업장마다 전력용량(수전전력의 용량 또는 계통연계에 관련된 풍력발전설비의 출력용량 중 어느 큰 쪽을 말한다. 이하 같다.)이 원칙적으로 100kW 미만인 풍력발전설비 공통사항과 저압 배전선로 연계에 정해진 기술조건을 만족시키는 경우 저압배전선로 연계할 수 있다.

- ① 단상 220V : 5kW 까지
- ② 3상 380V : 15kW 까지

③ 저압전용선로 : 15kW 초과 100kW 미만

나) 공통사항과 저압 배전선로 연계에 정해진 기술 조건을 만족시키는 경우, 3,000kW 까지는 풍력발전설비를 특고압 배전선로에 연계할 수 있다. 또 이 경우, 전용선로로 연계할 수 있는 풍력발전설비 출력용량은 원칙적으로 풍력발전 사업장마다 10,000kW 미만으로 한다.

다) 원칙적으로 154kV 이상의 송전선로와 연계하는 경우, [송전용 전기설비 이용규정]에 따른다.

#### 2.1.2. 협의 및 기술기준 해석

이 기술기준은 계통연계에 필요한 기술조건외의 표준적인 지표이며, 실제 연계시 풍력발전설비의 설치자와 한국전력공사는 성의있게 협의하여야 한다. 본 기술기준을 적용하면서 불분명한 사항이 발생할 경우, IEEE Standard 1547등을 참고로 하여 한국전력공사의 판단에 따른다.

#### 2.1.3. 연계 기술기준

##### 가) 전력 품질

###### ① 직류 주입 한계

풍력발전설비는 전력계통 연계 지점에서, 정격 최대 전류의 0.5% 이상인 직류 전류를 전력계통으로 주입하여서는 안 된다.

###### ② 역률

㉞ 역조류가 없을 경우, 풍력발전설비 설치자의 수전점 역률은 원칙적으로 90% 이상으로 유지한다.

㉟ 역조류가 있는 경우, 풍력발전설비 설치자의 수전점 역률은 원칙적으로 90%이상으로 유지하며, 전압상승을 방지하기 위하여 불가피한 경우에는 수전점 역률을 80%까지 제어할 수 있다.

###### ③ 플리커

풍력발전설비의 빈번한 출력변동과 빈번한 병렬 분리에 의한 플리커 가혹도 지수는, 전력계통 연계지점에서, 단시간(10분) Epsti는 0.35 이하로, 장시간(2시간) Eplti는 0.25 이하로 제한시켜야 한다.

$$Epsti \leq 0.35$$

$$Eplti \leq 0.25$$

④ 고조파 전류

고조파 차수	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
비율 (%)	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0

풍력발전설비로부터 전력계통에 유입되는 고조파 전류는, 10분 평균한 40차까지의 종합 전류왜형률이 5%를 초과하지 않도록 각 차수별로 제어하여야 한다.

㉒ 풍력발전을 제외한 국부 연계 계통이 1년 중 15분 최대 부하전류, 또는 (풍력발전기와 계통 연계 점 사이에 변압기가 있을 경우 이 변압기를 통과하는) 풍력발전 정격 전류 용량 중 큰값에 대한 고조파 전류의 비율이 위 표의 값 이하이어야 한다.

㉓ 짝수 고조파는 위의 각 구간별로 홀수 고조파의 25% 이하로 한다.

나) 전압변동

① 풍력발전설비의 연계로 인한 특고압 계통의 상시 전압변동(10분 평균값)은 2%이하, 순시 전압변동(2초 이하)은 2%이하로 한다.

② 풍력발전설비의 빈번한 출력변동과 빈번한 병렬 분리에 의한 전압변동으로 인하여, 특고압 계통의 상시전압이 한국전력공사의 [변전소 송출전압 유지기준]에 의한 선로별 공급전압 변동범위인 (23.5kV~22.4kV)와 (23.8kV~22.7kV)를 벗어날 우려가 있을 때는, 풍력발전설비의 설치자가 출력전압을 조정하고, 출력전압의 변동을 억제하면, 병렬 분리의 빈도를 저감하는 대책을 실시한다.

또한 이로써도 대응할 수 없을 경우에는 풍력발전설비의 설치자가 한류리액터 등을 설치하거나, 배전선로를 증강하건, 전용선로로 연계하거나, 단락용량이 큰 상위 전압의 계통에 연계한다.

③ 동기발전기를 이용하는 경우 재동권선을 설치(제동권선과 동등 이상의 난조방지효과를 갖춘 동기발전기를 포함한다.)함과 동시에 자동동기점정장치를 설치한다.

2.2. 전력품질분석

풍력발전단지가 변전소 모선의 전압에 미치는 영향을 분석하기 위해 성산변전소 구내의 풍력 D/L과 다른 변압기뱅크에 속해 있는 D/L의 인출점에 계측장비를 설치하여 지속적으로 데이터를 취득하였다. 계측장치는 (주)피에스디테크의 PQM(Power Quality Monitoring)장비로서 데이터 취득은 10초마다 컴퓨터에 저장되도록 하였으며 순시정전이나 순간전압강하, 순간전압상승 등 전기품질의 이상징후 발생시에는 이벤트로서 지장이 된다.

전기품질에 대해 전압변동, 송출전압 유지범위, 전압고조파, 전류고조파, 역률 등을 풍력발전 계통연계기준에 적합한지 분석하였다.

2.2.1. 전압변동

성산변전소의 두 군데 D/L 인출점에서 취득한 데이터를 이용하여 모선의 상시전압이 한국전력공사의 변전소 송출전압 유지기준에 의한 선로별 공급전압 변동범위인 (23.5kV~22.4kV)와 (23.8kV~22.7kV)를 유지하고 있는지를 알아보기 위하여 출력변동이 심하거나 고출력인 경우에 해당하는 10월 1일, 10월 2일에 대한 풍력발전량 및 모선전압의 전압파형을 Fig. 1 - 4에 표시하였다. Fig. 1 - 4에서 보는 바와 같이 전압의 크기는 규정범위내로 유지되고 있음을 알 수 있으며 전압변화가 급격한 곳은 Table 1에 표시된 바와 같이 ULTC가 동작한 경우에 해당한다.

풍력D/L의 모선전압이 규정범위내로 유지되는 것을 나타내기 위해 10월 1일부터 15일까지 모선전압 데이터의 일별 평균, 최대, 최소 전압을 Table 2에 표시하였다.

풍력 D/L과 풍력발전시스템이 연계되지 않은 성산 D/L의 상시전압변동을 분석하기 위하여 10분 평균전압이 전압변동을 규정을 위반한 횟수를 Table 3과 4에 나타내었으며 Table로부터 풍력발전시스템이 연계되지 않은 모선의 전압변동도 일부 규정을 위반하고 있음을 알 수 있다.

10분 평균전압 데이터로부터 일부 2%의 규정을 벗어나는 부분이 나타나지만 전체 측정 데이터 수에 비하여 상당히 적은 편으로서 전압변동률은 대체적으로

기준을 만족한다고 평가할 수 있다.

### 2.2.2. 전류고조파

전류고조파를 해석하기 위해 10월 1일 0시와 03시 10분의 풍력D/L 전류고조파를 그래프로 Fig. 5와 6에 나타내었으며 고조파 규정 위반의 정량적 분석을 위해 10월과 1월에 대해 규정을 벗어난 횟수를 Table 5과 6에 표시하였다. 고조파 규정 위반의 해석은 계통연계기술기준에서 제시하고 있는 조파별로 위반여부를 판정하여 종합하였으며 단락전류와 부하전류의 비율에 따른 IEEE 519 규정을 함께 비교, 분석하였다.

전류고조파가 규정을 벗어난 Table을 분석해 보면 다소 많은 부분에서 규정에 위반되고 있으며 이런 현상이 풍력발전시스템에 의한 것인가를 분석하기 위해 풍력발전 출력이 없는 11월 4일 11시 10분, 11월 5일 23시 20분에 대한 전류고조파 분석 데이터를 Fig. 7과 8에 나타내었으며 풍력발전의 출력이 없는 날에 대해 규정을 위반한 횟수에 대한 분석을 Table 7에 수록하였다.

풍력발전이 출력을 발생시키지 않는 경우에 대해서도 전류 고조파가 발생하는 것으로 보아 성산변전소의 부하에서도 고조파를 발생하고 있음을 알 수 있다.

### 2.2.3. 역률

풍력발전기의 출력에 따른 역률의 변화를 알아보기 위하여 풍력발전기의 유효전력을 풍력발전기의 정격으로 나눈 값 즉, 풍력발전기의 출력을 X축으로 하고 백분율로 계산한 역률의 변화를 Y축으로 하여, 풍력발전기의 출력에 따른 역률특성 곡선을 10월 1일과 2일에 대하여 Fig. 9와 10에 나타내었으며 10월 1일부터 8일까지의 풍력발전기의 출력에 따른 평균역률 값을 Table 8에 나타내었다.

풍력발전기의 출력에 따른 역률특성 곡선 및 평균역률 데이터로부터 풍력발전기의 출력이 저출력인 경우를 제외하면 역률이 90% 이상이 되는 것을 알 수가 있다.

### 2.2.4. 660kW 풍력발전기의 고조파 분석

개별적인 풍력발전기의 고조파 특성을 분석하기 위

해 660kW 풍력발전기가 고출력인 경우(2005년 3월 5일), 저출력인 경우(2005년 3월 7일), 출력변동이 심한 경우(2004년 11월 2일)에 대한 발전기 출력 및 전류 고조파 분석 과정을 Fig. 11 - 16에 나타내었다.

풍력발전기가 고출력인 2005년 3월 5일의 경우 11차, 12차 고조파, 저출력인 2005년 3월 7일인 경우, 3차, 11차 고조파, 출력변동이 심한 2004년 11월 2일의 경우 전반적으로 전류고조파가 많이 발생하였다.

각 차수에 대한 전류고조파의 규정위반 횟수를 Table 9에 표시하였으며 저출력인 경우 고조파가 가장 많이 발생하며 다음으로 출력변동이 심한 경우, 고출력의 순으로 전류 고조파가 발생하고 있다.

전류 고조파의 위반횟수는 10분 평균에 고조파 차수를 50차까지 비교한 것으로 1일에 대한 전체 샘플수는 7200(=10분×24시간×50차)개이므로 전체적으로 전류고조파가 나타나지만 규정 위반률은 크지 않은 편이다.

## II. 결 론

660kW 풍력발전기, 10MW의 풍력발전단지의 출력 및 전기품질에 대한 데이터를 측정하여 전기품질이 계통연계기준에 적합한지 여부를 분석한 결과는 다음과 같다.

- 전압크기는 변전소 송출유지기준을 항상 만족하고 있으며 상시전압 전압변동률은 일부 규정에 위반되는 사례가 발생하였으나 대체적으로 2%이하를 유지하고 있다.
- 고조파는 풍력발전기가 저출력인 경우가 고출력에 비해 많이 발생하고 있으며 대체적으로 고조파 규정을 위반하는 사례가 발생하고 있어 지속적인 분석 및 저감대책이 행해져야 한다.
- 분산형전원 계통연계 기술기준(안)의 고조파 전류에 대해서는 단락전류 대 정격전류의 비율에 따라 차수별로 적용시키는 IEEE 519의 전류왜형률 기준을 적용시키는 것이 적당하다고 생각된다.
- 풍력발전기의 역률은 저출력의 경우를 제외하면 90%이상을 항상 유지하고 있다.

풍력발전시스템의 전기품질은 전압크기, 전압변동률, 변전소 송출유지기준, 역률 등은 기준에 적합하다고 분석할 수 있으나 고조파 부분에 대해서는 규정을 위반하는 사례가 다수 발생하고 있고 특히 저출력인 경우에 대해서는 규정위반이 심하므로 고조파 저감 대책을 시행해야 한다. 또한 전압변동을 정성적으로 표현하는 플리커에 대해서는 측정이 이루어지지 않아 분석에서 제외되었지만 향후 플리커에 대한 분석이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- [1] 대한전기학회, 2005. 3, 전기의 세계, pp. 33 - 43.
- [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] 한국남부발전, 2002. 7. 제주풍력건설 타당성 보완조사, pp. 71 - 138.

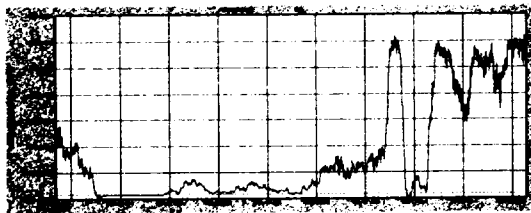


Fig. 1 Power Generation Graph (October 1)

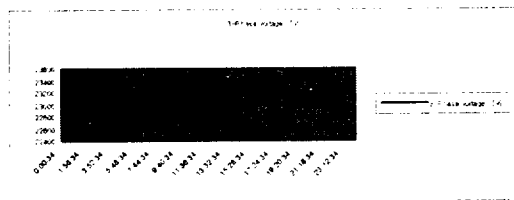


Fig. 2 Pungryok Bus Voltage (October 1)

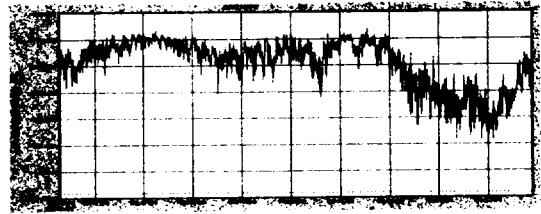


Fig. 3 Power Generation Graph (October 2)

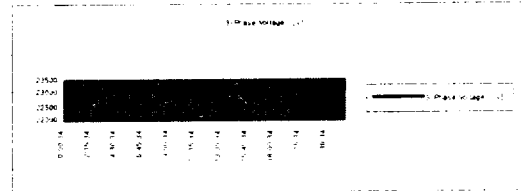


Fig. 4 Pungryok Bus Voltage (October 2)

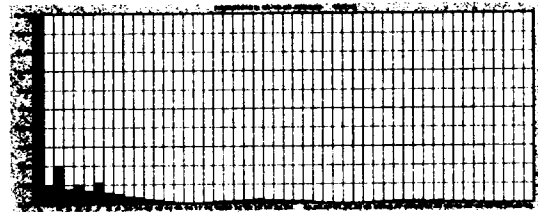


Fig. 5 Current Harmonic Graph (August 1, 00:00)

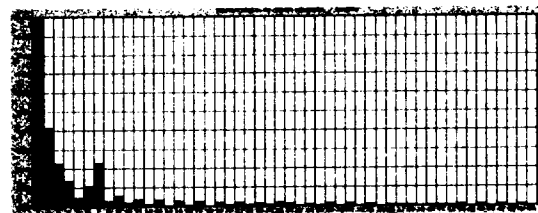


Fig. 6 Current Harmonic Graph (August 1, 03:10)

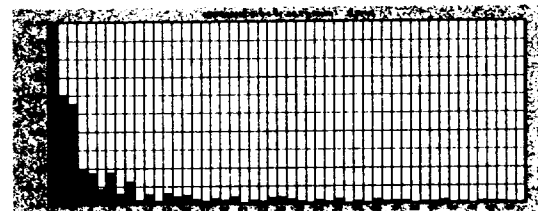


Fig. 7 Current Harmonic Graph of Zero Generation (Nov. 4. 11:10)

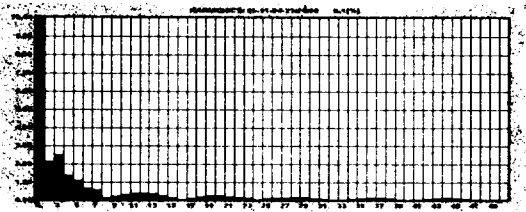


Fig. 8 Current Harmonic Graph of Zero Generation (Nov. 5 23:20)

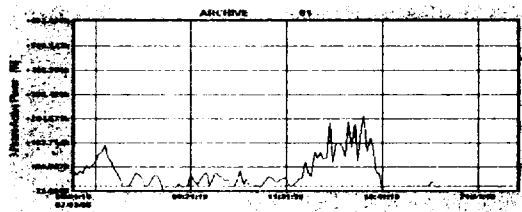


Fig. 13 Low Generation Power (2005/03/07)

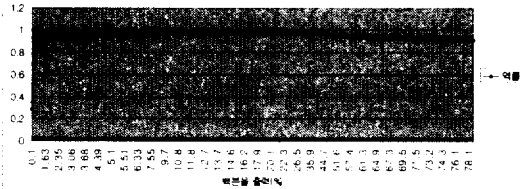


Fig. 9 Power Factor (August 1)

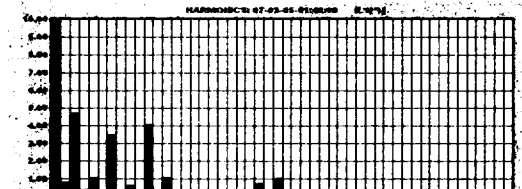


Fig. 14 Current Harmonic (2005/03/07)

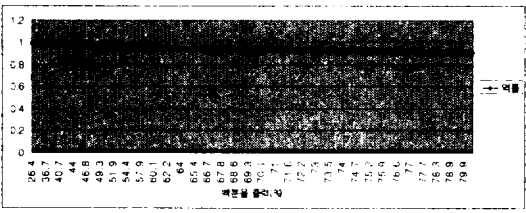


Fig. 10 Power Factor (August 2)

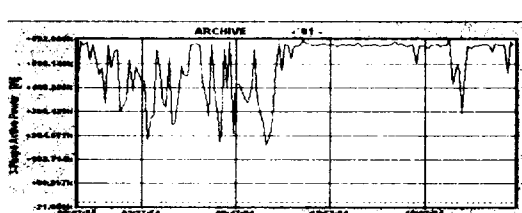


Fig. 15 High Fluctuation Generation Power (2004/11/02)

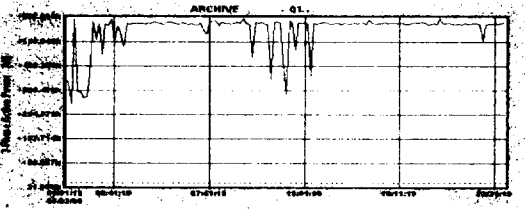


Fig. 11 High Generation Power (2005/03/05)

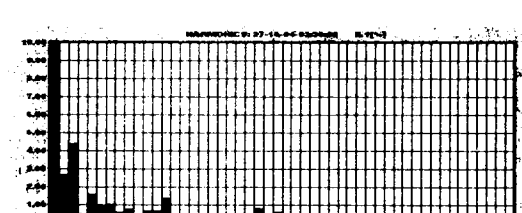


Fig. 16 Current Harmonic (2004/11/02)

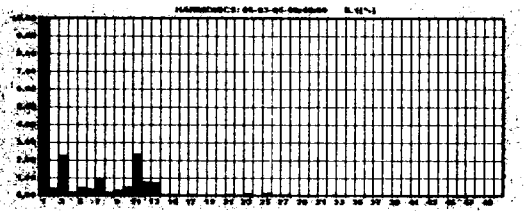


Fig. 12 Current Harmonic (2005/03/05)

Table 1. ULTC Operation Time

	10월 1일	10월 2일
1	03:28:52	08:26:16
2	07:50:32	09:07:45
3	08:36:22	09:31:55
4	08:57:15	12:49:32
5	09:25:45	13:30:21
6	12:10:23	17:13:25
7	13:11:19	18:14:20
8	17:17:52	18:15:32
9	17:21:10	18:43:51
10	17:26:43	21:13:27
11	21:29:31	21:53:18
12	21:33:25	22:18:42
13	22:33:19	23:14:49
14	22:57:53	23:31:11
15	23:05:17	-
16	23:37:24	-

Table 2. Bus Voltage(October) unit : V

date	maximum	minimum	average
10/01	23395	22925	23187
10/02	23367	22811	23196
10/03	23362	22987	23180
10/04	23320	22936	23087
10/05	23371	22921	23172
10/06	23453	22949	23127
10/07	23399	22916	23180
10/08	23329	22952	23104
10/09	23397	22937	23162
10/10	23383	22958	23188
10/11	23401	22890	23151
10/12	23385	22914	23145
10/13	23369	22955	23155
10/14	23360	22975	23207
10/15	23342	22971	23160

Table 3. Pungryok D/L Voltage Violation

date	10/22	10/23	10/24	10/25	12/22	12/23	12/24
no. of violation(%)	5 (3.4)	1 (0.6)	0 (0)	5 (3.4)	0 (0)	0 (0)	0 (0)

Table 4. Sungsan D/L voltage Violation

date	10/22	10/23	10/24	10/25	12/22	12/23	12/24
no. of violation(%)	35 (24)	18 (12)	16 (11)	19 (13)	32 (22)	14 (9)	21 (14)

Table 5. Current Harmonic(August)

standard	date	no. of violation
IEEE 519 (ISC/IL<20)	10/01	61
	10/02	67
	10/08	113
IEEE 519 (50<ISC/IL<100)	10/01	26
	10/02	32
	10/08	83

Table 6. Current Harmonic(January)

standard	date	no. of violation
IEEE 519 (ISC/IL<20)	1/01	67
	1/02	55
	1/03	71
	1/04	66
IEEE 519 (50<ISC/IL<100)	1/01	37
	1/02	32
	1/03	40
	1/04	30

Table 7. Current Harmonic of Zero Generation

standard	date	no. of violation
IEEE 519 (ISC/IL<20)	11/04	56
	11/05	49
	11/08	27
IEEE 519 (50<ISC/IL<100)	11/04	34
	11/05	27
	11/08	27

Table 8. Average Power Factor

% output	10/01	10/02	10/03	10/04
0 ~ 1%	0.77	×	0.42	×
1% ~ 2%	0.92	×	0.84	0.90
2% ~ 3%	0.95	×	0.92	0.97
3% ~ 4%	0.95	×	0.96	0.97
4% ~ 5%	0.96	×	0.97	0.98
> 5%	0.96	0.94	0.97	0.98
% output	10/05	10/06	10/07	10/08
0 ~ 1%	0.79	0.77	0.79	0.84
1% ~ 2%	0.89	0.91	0.90	0.92
2% ~ 3%	0.94	0.95	0.94	0.96
3% ~ 4%	0.96	0.96	0.95	0.96
4% ~ 5%	0.97	0.97	0.96	0.97
> 5%	0.98	0.98	0.99	0.98

Table 9. No of Current Harmonic Violation  
(660kW WT)

standard degree date	ISC/IL < 20					remark
	h<11	11≤h <17	17≤h <23	23≤h <35	35≤h	
2005/03/05	5	167	0	3	12	High Power
2005/03/12	2	137	0	0	7	
2004/10/29	92	8	4	221	75	Low Power
2005/03/07	196	144	5	247	129	
2004/11/02	11	24	3	16	26	Fluctuation
standard	50 < ISC/IL < 100					
2005/03/05	1	12	0	0	0	High Power
2005/03/12	1	7	0	0	0	
2004/10/29	3	3	3	25	25	Low Power
2005/03/07	69	79	0	133	67	
2004/11/02	2	4	3	7	16	Fluctuation