

# 계통연계형 풍력발전 시스템의 모션전압에의 영향

김 세 호\*

## Influence of Grid-Connected Wind Power Generation System on Bus Voltage

Se-Ho Kim\*

### ABSTRACT

In recent years wind turbine technology has undergone rapid development in response to the demands for increased use of renewable sources of energy. Using a wind turbines for production of electrical energy require reliable operation. The increased share of wind power in electric power 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 systems. The grid-connected wind power stations have many impacts on the power system such as voltage variations, harmonics, flickers and protection. This paper shows the influence of grid-connected wind power generation system on bus voltage. As shown in this paper, it is necessary to develop measurement program and system in order to analysis and ensure the proper operation of grid-connected wind power generation system.

**Key Words** : Grid-connected Wind Power generation System, Power Quality, Bus Voltage

### 1. 서론

에너지 수급과 경제적인 문제 속에서 환경오염을 최소화하면서 부존 에너지 이용확대와 에너지 수입의 존도 축소, 에너지 관련산업 육성을 기할 수 있는 대안으로서 분산형 시스템으로 이용가능한 발전기술 개발과 이용확대에 대한 중요성은 날로 높아지고 있다. 분산형 시스템 중 풍력발전은 90년대부터 대형화되어 경제성있는 MW급 풍력발전시스템이 개발되고 있고

모든 에너지원 중 가장 빨리 보급량이 늘고 있으며 풍속자원이 양호한 지역에 풍력단지 건설이 계획되고 있어 기술개발과 함께 많은 이용량 증가가 예상되고 있다[1].

현재 제주도에 10MW급의 풍력발전단지가 건설되고 있고 제주도내 풍력자원 조사에 관한 연구가 계속 진행 중에 있어 향후 많은 풍력발전단지가 건설될 예정이다[2]. 건설되는 풍력발전 단지는 계통에 연계되어 계통부하의 일부를 담당하고 있으나 풍력발전시스템이 계통에 미치는 영향에 관한 연구는 아직 이루어지지 않고 있다. 풍력발전 시스템은 풍향, 풍속 등에 따라 출력이 직접 영향을 받아 출력변동에 따른 계통

\* 제주대학교 전기전자공학부, 첨단기술연구소  
Faculty of Electrical & Electronic Engineering, Research Institute of  
Advanced Technology, Cheju Nat'l Univ.

의 영향을 검토하여야 하지만 현재까지는 주로 풍력 발전기 자체의 특성분석이나 성능분석에 관해서만 연구가 이루어지고 있다[3,4].

본 연구에서는 풍력발전 시스템의 출력변동에 따른 계통 모션전압의 변화와 계통손실, 전압 강하량 등을 분석하여 계통에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

## II. 풍력발전 시스템의 계통연계

상용 전력계통에 풍력발전기 등과 같은 분산형 전원을 연계하는 것은 예비전력의 확보나 설비의 효율적 이용 등 많은 유리한 점이 있으나 전력계통의 전력품질이나 계통의 보호 등에 대해서는 악영향을 미칠 우려가 있으며 이에 대한 충분한 검토가 이루어져야 한다.

풍력발전기 등 분산형 발전설비를 전력계통에 연계할 경우 필요한 기본적인 사항은 다음과 같다.

- 공급신뢰도(정전 등), 전력품질(전압, 주파수, 역률 등)의 면에서 다른 수용가에 악영향을 미치지 않을 것
- 작업자의 안전확보와 전력공급시설 또는 다른 수용가의 설비보안에 악영향을 미치지 않을 것

### 2.1. 전압변동 문제

전기사업자는 공급전압을 전기사업법에 정한 적정 범위로 유지할 의무가 있으므로 분산형 전원을 도입할 경우에도 공급전압을 규정범위 내에 유지하여야 한다. 배전계통의 전압관리는 변전소에서 부하측으로 전력조류가 단방향이라는 가정하에 부하변동에 의하여 전압변동이 발생하더라도 전압은 변전소로부터 부하측으로 단조감소하는 것으로 생각하여 선로의 전압조정을 주상변압기의 탭으로 조정하고 있다. 그러나 배전선로에 분산형 전원이 도입되면 연계점의 전압이 높아지고 전력조류가 양방향이 되므로 기존의 전압조정 방식으로 전압조정이 제대로 이루어지는지 검토하여야 한다.

또한 전압변동이 발생하면 기기의 성능 및 효율저하, 부동작, 수명감소, 전력손실 등에 영향을 미치며

로 가급적 전압변동이 없도록 전기를 일정하게 공급해야 하며 분산형 전원 중 특히 풍력발전은 풍속과 풍향에 따른 출력변동이 크므로 수용가에 공급되는 전압을 보다 엄밀하게 관측할 필요가 있다.

전기사업법에 의한 표준전압 및 유지하여야 할 전압은 Table 1과 같다.

Table 1. Standard voltage and permission error

standard voltage	permission error
110V	110 ± 6 V
220V	220 ± 13 V
380V	380 ± 38 V

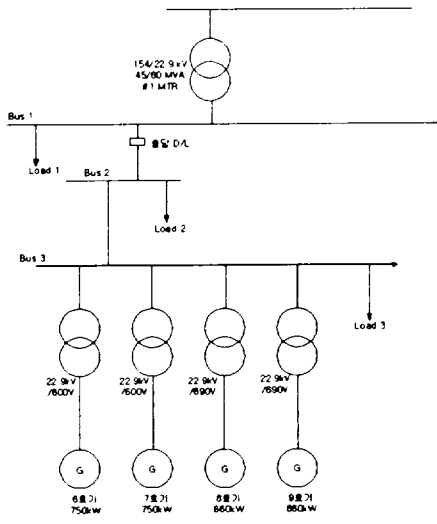
### 2.2. 계통연계형 풍력발전 시스템의 구성

현재 제주지역의 행원 풍력발전 단지에는 총 9기의 풍력발전기가 전력계통에 연결되어 운전되고 있다. 풍력발전기를 계통과 연계시키기 위해서는 풍력발전기의 출력크기와는 관계없이 계통에 적정 전압을 공급할 수 있어야 하며 전압공급은 변압기를 통하여 이루어지고 있다. 배전선의 표준전압은 22,900V이므로 계통선에 연결되는 풍력발전기와 관련된 변압기의 2차 전압은 22,900V로 일정하게 공급되도록 하고 있으며 정전시의 영향을 최소화하기 위해 계통측의 전원이 상실되는 경우에는 풍력발전기의 가동이 중지되도록 유도발전기를 이용한 풍력발전기를 계통과 연계시켜 운전하고 있다.

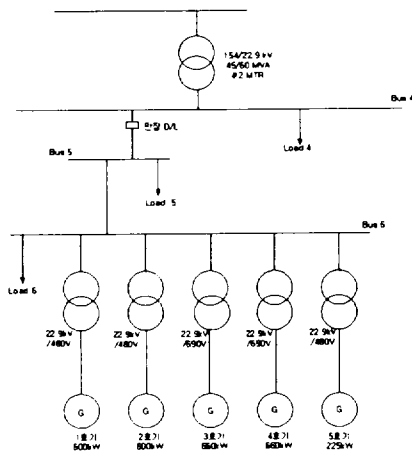
전력계통과 연계된 풍력발전 시스템의 단선도는 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 풍력발전기는 성산 변전소의 만장 D/L과 송당 D/L에 연결되어 운전되고 있으며 Table 2에 성산 변전소의 주변압기(#1, #2)와 만장 D/L, 송당 D/L에 대한 최대, 최소, 평균전력을 표시하였다.

Table 2에 나타난 바와 같이 #1 주변압기에서는 풍력발전기 6-9호기가 연결된 송당 D/L과 신풍 D/L, 성산 D/L에 전력을 공급하고 있으며 #2 주변압기에서는 풍력발전기 1-5호기가 연결되어 있는 만장 D/L을 포함하여 정의 D/L, 온평 D/L에 전력을 공급하고 있다.



(a) In case of Songdang D/L



(b) In case of Manjang D/L

Fig. 1. One-line diagram of wind power.

Table 2. Load data in Sungsan substation(kW)

Load	#1 Mtr	Songdang D/L	#2 Mtr	Manjang D/L
Max.	21,000	8,944	20,200	9,879
Aver.	17,000	3,738	16,800	4,145
Min.	13,500	2,950	13,000	3,200

주변압기의 최대, 평균, 최소 부하를 비교해 보면

최대부하와 최소부하의 중간에 평균부하가 위치에 있지만 풍력발전기가 연결된 송당 D/L이나 만장 D/L의 부하를 비교해 보면 평균부하가 최소부하에 가깝다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 사실은 평상시에 풍력발전기가 연결된 D/L의 부하가 풍력발전기가 연결되지 않은 다른 D/L의 부하에 비해 상당히 적다는 것을 의미한다. 또한 주변압기는 각각 3개의 D/L을 담당하고 있는데 최대부하를 살펴보면 송당이나 만장 D/L 부하가 상당히 큰 것을 알 수 있다.

풍력발전기의 출력과 각 D/L의 부하를 비교해 보면 송당 D/L에 연결된 풍력발전기(6-9호기)들의 출력 합은 2,820 kW, 만장 D/L에 연결된 풍력발전기(1-5호기)들의 출력 합은 2,745kW로서 각 D/L의 최소부하(2,950kW, 3,200kW)보다 적은 값이므로 풍력발전기의 출력이 다른 D/L에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

### III. 컴퓨터 해석 및 결과고찰

풍력발전시스템이 전압에 미치는 영향을 고찰하기 위해 4군데의 수용가에 대해 전압을 측정하였으며 또한 컴퓨터 해석을 통하여 계통 모선전압에 미치는 영향을 검토하였다.

#### 3.1. 수용가 전압에의 영향

풍력발전시스템이 전기를 직접 사용하는 수용가에 미치는 영향을 고찰하기 위해 풍력발전기가 설치된 인접지역의 4개소 수용가에 대해 전압을 측정하였다.

수용가는 풍력발전기 1호기 - 5호기가 연결된 성산 변전소의 만장 D/L 2개소, 6호기 - 9호기가 설치된 송당 D/L 2개소를 선정하였으며 각 D/L의 2개소 중 1개소는 1분 간격, 다른 1개소는 30분 간격으로 4월 17일부터 5월 3일 까지 전압을 측정하였다.

측정대상 수용가에서 측정된 전압에 대한 최대, 최소, 평균 전압 등을 Table 3과 4에 표시하였으며 Table에서 보는 바와 같이 풍력발전기의 인근 지역에 대한 전압을 측정된 결과 전압의 변동범위가 ± 13V 이내의 범위에 들어있어 풍력발전기가 수용가

전압크기에는 큰 영향을 미치지 않고 안정된 전압을 공급함을 알 수 있다.

**Table 3.** Voltage data(Songdang D/L) unit: V

category	time		customer 1	customer 2
daytime	06:00-19:59		218.3	219.5
nighttime	20:00-21:59		218.5	219.7
dead of night	22:00-05:59		219.3	220.5
a.m.	00:00-11:59		219.0	220.4
p.m.	12:00-23:59		218.7	219.8
average			218.9	220.1
maximum	5/02/03:47	5/02/04:30	224.6	224.8
minimum	4/30/09:23 4/30/09:24 4/30/09:25	4/30/09:30	212.0	215.0

**Table 4.** Voltage data(Manjang D/L) unit: V

category	time		customer 1	customer 2
daytime	06:00-19:59		219.2	220.1
nighttime	20:00-21:59		217.2	218.8
dead of night	22:00-05:59		218.0	219.2
a.m.	00:00-11:59		219.0	220.1
p.m.	12:00-23:59		219.0	220.0
average			219.0	220.0
maximum	4/24/12:38 4/24/12:39	4/26/12:30	228.5	227.7
minimum	5/01/00:42	5/02/20:00	208.2	211.4

### 3.2 계통모선에서의 영향

실제로 배전선의 부하는 배전선 전압에 걸쳐 골고루 분포되어 있으나 해석의 편리성을 위하여 배전선의 부하가 집중되어 있는 것으로 가정하였다. #1 주변압기에는 송당 D/L을 포함하여 Load1, Load2, Load 3의 부하가 연결되어 있으며 #2 주변압기에는 만장 D/L을 포함하여 Load4, Load5, Load6의 부하가 포함되어 있는 것으로 계통을 구성하였다. 현재 풍력발전기가 설치된 지역의 인근에는 양어장 등 고압 수용가가 밀집되어 있으며 고압수용가들의 계약전

력은 풍력발전기가 연결된 송당이나 만장 D/L 최대 부하의 약 50% 정도로 구성되어 있어 송당이나 만장 D/L에 속한 Load2, Load3 또는 Load5, Load6의 부하는 각 D/L 부하의 절반으로 구성된다고 가정하였다. Load1이나 Load4는 주변압기의 부하에서 송당이나 만장 D/L의 부하를 제외한 부하들로 구성되어 있으며 Load1은 신평 D/L과 성산 D/L을 Load4는 정의 D/L과 온평 D/L의 부하를 표시하게 된다. 또한 각 부하의 역률은 90%를 유지하는 것으로 하였다.

컴퓨터 해석을 위하여 부하를 최대부하, 평균부하, 최소부하로 나누었으며 풍력발전기가 전체출력(만장 D/L 2,745kW, 송당 D/L 2,820kW)의 100%, 75%, 50%, 30%, 0%등으로 발전되고 있는 경우에 대해 계통에 미치는 영향을 분석하였다. 여기서 100%는 풍력발전기가 정격 운전을 하고 있음을 의미하며 0%는 풍력발전기가 전혀 발전을 하지 않고 한전 계통선 만에 의해 부하에 전원이 공급됨을 나타낸다.

Table 5에 한전의 계통선 만에 의해 부하에 전원이 공급되는 경우 각 모선의 전압을 표시하였으며 Table 6 - 9에는 풍력발전기가 연계된 경우의 각 모선을 전압을 나타내었다.

**Table 5.** Bus voltage(0% wind power generation)

unit: pu

load \ Bus	Bus1	Bus2	Bus3	Bus4	Bus5	Bus6
max.	0.9558	0.8631	0.8115	0.9545	0.7960	0.7144
ave.	0.9720	0.9372	0.9117	0.9715	0.8959	0.8577
min.	0.9823	0.9567	0.9390	0.9822	0.9419	0.9216

**Table 6.** Bus voltage(100% wind power generation)

unit: pu

load \ Bus	Bus1	Bus2	Bus3	Bus4	Bus5	Bus6
max	0.9607	0.8868	0.8507	0.9603	0.8384	0.7859
ave	0.9736	0.9519	0.9388	0.9735	0.9205	0.9031
min	0.9832	0.9695	0.9636	0.9830	0.9617	0.9599

Table 6 - 9의 풍력발전기가 계통에 연계된 경우 각 모선전압을 비교해 보면 풍력발전기의 출력이 정

격의 100%, 75%, 50%, 30%로 각각 변하더라도 모선 전압의 변화량은 크지 않다. 그러나 풍력발전기가 계통에 연계되지 않은 경우와 연계된 경우를 비교해 보면 모선전압의 변화량이 크다.

Table 7. Bus voltage(75% wind power generation)  
unit: pu

load \ Bus	Bus1	Bus2	Bus3	Bus4	Bus5	Bus6
max	0.9600	0.8822	0.8429	0.9595	0.8307	0.7725
ave	0.9735	0.9490	0.9332	0.9733	0.9157	0.8938
min	0.9832	0.9670	0.9586	0.9831	0.9577	0.9519

Table 8. Bus voltage(50% wind power generation)  
unit: pu

load \ Bus	Bus1	Bus2	Bus3	Bus4	Bus5	Bus6
max	0.9589	0.8768	0.8339	0.9583	0.8213	0.7565
ave	0.9732	0.9456	0.9269	0.9729	0.9100	0.8832
min	0.9831	0.9641	0.9528	0.9829	0.9531	0.9429

Table 9. Bus voltage(30% wind power generation)  
unit: pu

load \ Bus	Bus1	Bus2	Bus3	Bus4	Bus5	Bus6
max	0.9579	0.8719	0.8257	0.9570	0.8124	0.7416
ave	0.9728	0.9425	0.9212	0.9725	0.9048	0.8727
min	0.9829	0.9174	0.9476	0.9827	0.9490	0.9349

Table 10에 풍력발전기의 출력변화에 따른 모선전압의 변화량을 나타내었으며 0%는 풍력발전기가 계통에 연계되지 않은 경우를 의미한다.

Table 10에서 보는 바와 같이 풍력발전기가 운전되는 경우를 비교한 모선전압의 변화량은 적은 편이지만 풍력발전기가 운전되는 경우와 운전되지 않고 계통선 만에 의한 모선전압과의 변화량은 상대적으로 큰 편이다. 이런 현상은 풍력발전기와 연결된 변압기가 항상 22900V로 모선에 전압을 공급해 주기 때문이며 풍력발전기가 계통에 연계되는 경우에는 모선의 전압이 상승하므로 오히려 과전압의 우려가

있게 된다.

모선 1과 모선 2(또는 모선 3)과의 전압 변화량을 비교하면 모선 2(또는 모선 3)의 변화량이 상대적으로 크다. 그 이유로서는 모선 2와 모선 3이 연결된 배전선에 풍력발전기가 연결되어 있어 모선 2와 모선 3에 더 큰 영향을 미치기 때문이다.

Table 10. Bus voltage Variation  
unit: pu

load	Bus no.	bus voltage variation			
		100% -75%	75% -50%	50% -30%	30% -0%
max	Bus1	0.0007	0.0011	0.0010	0.0021
	Bus2	0.0046	0.0054	0.0048	0.0089
	Bus3	0.0078	0.0090	0.0082	0.0142
	Bus4	0.0008	0.0012	0.0013	0.0025
	Bus5	0.0077	0.0094	0.0089	0.0164
	Bus6	0.0134	0.0160	0.0149	0.0272
ave	Bus1	0.0001	0.0003	0.0004	0.0008
	Bus2	0.0029	0.0034	0.0031	0.0053
	Bus3	0.0056	0.0063	0.0057	0.0095
	Bus4	0.0002	0.0004	0.0004	0.0010
	Bus5	0.0048	0.0057	0.0052	0.0089
	Bus6	0.0093	0.0106	0.0095	0.0160
min	Bus1	0.0000	0.0001	0.0002	0.0006
	Bus2	0.0025	0.0029	0.0027	0.0047
	Bus3	0.0050	0.0058	0.0052	0.0086
	Bus4	0.0001	0.0002	0.0002	0.0005
	Bus5	0.0040	0.0046	0.0041	0.0071
	Bus6	0.0080	0.0090	0.0080	0.0133

또한 모선 2에 비해 모선 3의 전압 변화량이 더 큰 이유는 모선 3에 풍력발전기가 변압기를 통해 직접 연결되어 모선 2에 비해 더 큰 영향을 미치기 때문이다.

다음으로는 풍력발전기의 발전량에 따라 변전소에 유입되는 전력의 변화량을 살펴보기 위해 Table 11에 풍력발전기의 출력에 따른 변전소 유입전력을 표시하였다.

Table 11에서 보는바와 같이 풍력발전기가 계통에 연계됨으로써 변전소로 유입되는 전력은 풍력발전기의 출력이 증가함에 따라 감소하는 현상을 볼 수 있다. 그러나 발전기의 출력이 유효전력의 유입감소에

는 큰 영향을 미치나 무효전력의 유입은 크게 감소되지 않는다.

Table 11. Incoming power of substation

load	wind power generation	P[KW]	Q[KVar]
maximum	100%	36,953	24,120
	75%	38,563	24,425
	50%	40,239	24,895
	30%	41,635	25,405
	0%	43,838	26,443
average	100%	28,447	17,949
	75%	29,876	17,946
	50%	31,339	18,042
	30%	32,534	18,192
	0%	34,374	18,551
minimum	100%	20,414	13,441
	75%	21,793	13,349
	50%	23,199	13,340
	30%	24,344	13,395
	0%	26,098	13,585

그 이유로는 풍력발전기는 단지 유효전력만을 생산할 뿐 무효전력은 발생시키지 못하기 때문이며 이러한 현상은 변전소 인출점의 역률을 악화시키는 요인이 되고 있다.

변전소 인출점의 역률을 좋게 하기 위해서는 무효전력의 공급이 이루어져야 하며 무효전력의 공급은 부하와 병렬로 콘덴서 뱅크를 설치함으로써 해결할 수 있다. 그러나 콘덴서 뱅크를 설치하는 경우 풍력발전기의 출력에 따른 단계적인 뱅크 투입이 이루어져야 하며 풍력 발전기의 발전량이 없는 경우에는 뱅크를 계통에서 분리하는 등 부하의 변동추이와 풍력발전기의 출력변동 추이 등을 복합적으로 고려하여야 한다.

풍력발전기의 출력변화에 따른 계통손실의 변화를 살펴보기 위해 Table 12에 유효손실과 무효손실을 표시하였다.

Table 12에 나타난 손실은 풍력발전기가 연결된 변전소 전체 손실을 표시하는 것이며 풍력발전기의 출력이 증가함에 따라 손실이 점차로 감소됨을 알 수

있다. 그 이유로는 풍력발전기가 설치됨에 따라 전원의 공급이 다양하게 이루어져 부하가 골고루 분포되는 효과가 있기 때문이다.

Table 12. System loss

load	wind power	P <sub>L</sub> [KW]	Q <sub>L</sub> [KVar]
max	100%	1,430	5,254
	75%	1,655	5,636
	50%	1,948	6,194
	30%	2,238	6,784
	0%	2,793	7,962
ave	100%	265	2,194
	75%	306	2,238
	50%	381	2,385
	30%	468	2,581
	0%	645	3,015
min	100%	107	1,219
	75%	97	1,157
	50%	114	1,182
	30%	149	1,267
	0%	238	1,508

Table 13. Percent voltage drop

unit: %

load	wind power	Bus1-> Bus2	Bus2-> Bus3	Bus4-> Bus5	Bus5-> Bus6
max	100%	7.39	3.61	12.19	5.25
	75%	7.77	3.93	12.88	5.82
	50%	8.21	4.29	13.70	6.48
	30%	8.60	4.62	14.46	7.08
	0%	9.27	5.16	15.84	8.17
ave	100%	2.18	1.31	5.29	1.75
	75%	2.45	1.58	5.76	2.19
	50%	2.76	1.88	6.29	2.68
	30%	3.03	2.13	6.76	3.11
	0%	3.48	2.55	7.56	3.82
min	100%	1.36	0.59	2.13	0.18
	75%	1.62	0.85	2.53	0.58
	50%	1.90	1.13	2.98	1.03
	30%	2.15	1.37	3.37	1.40
	0%	2.56	1.76	4.03	2.02

풍력발전기의 출력변동에 따른 각 모선사이의 전압강하율을 변화를 보기 위해 Table 13에 출력변화에 따른 전압강하율을 표시하였다. Table 13에 나타난 바와 같이 풍력발전기의 출력이 증가함에 따라 전압강하율이 적어짐을 알 수 있으며 이는 풍력발전기가 계통에 연계됨에 따라 전압분포 특성이 좋아짐을 나타낸다.

#### IV. 결론

풍력발전기의 출력변동에 따른 계통의 영향을 검토하기 위하여 컴퓨터 해석을 하였으며 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 풍력발전기의 인근 지역에 대한 전압을 측정할 결과 수용가의 전압 크기에는 큰 영향을 미치지 않고 안정된 전압을 공급함을 알 수 있다. 그러나 전압측정 기간이 짧고 적은 시간동안의 크기 변화는 파악하기 어려운 점이 있으므로 지속적인 전압측정을 실시하여 고조파나 전압의 일시적인 상승, 하강 등 전압품질에 대한 검토를 계속하여야 할 것이다.
- 2) 풍력발전기의 출력이 변하더라도 모선전압의 변화량은 크지 않지만 풍력발전기가 계통에 연계되지 않은 경우와 연계된 경우를 비교해 보면 모선전압의 변화량이 크고 모선의 전압이 상승하므로 과전압의 우려가 있게 된다.
- 3) 풍력발전기가 계통에 연계됨으로써 변전소로 유

입되는 전력은 풍력발전기의 출력이 증가함에 따라 감소하는 현상을 볼 수 있지만 무효전력의 유입은 크게 감소되지 않으며 이러한 현상은 변전소 인출점의 역률을 악화시키는 요인이 될 수 있다.

- 4) 풍력발전기의 출력이 증가함에 따라 손실이 감소하고 전압강하율이 적어진다.

풍력발전기가 계통에 연계됨으로써 계통의 전압특성이 좋아지고 계통손실이 감소하는 등 많은 장점이 있으나 전력 품질을 지속적으로 감시하여 수용가에 미치는 영향을 보다 정확하게 분석하고 또한 풍력발전기 용량의 대형화에 따른 대용량 전원의 갑작스런 탈락에 대한 계통영향 등에 관한 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

- 1) 이인영, 2001, 전기학회지, Vol.50, No.6, pp.4-9.
- 2) 허종철, 2001, 제주도내 풍력자원 연구조사 보고서
- 3) 김용현, 김일환, 2000, 전력전자학회지 논문지, Vol. 5, No.5, pp.451-458
- 4) 김일환, 부평국, 2001, 첨단기술연구소논문집, 제12권, 2호, pp.230 -237
- 5) 한국전력배전처, 1995, 배전전압업무관리지침
- 6) 한국전력 송변전처, 2000, 변전운영업무