

碩 士 學 位 論 文

풍력발전 시스템이 연계된
배전선로의 전압특성 해석



羅 卿 允

2005年 6月

풍력발전 시스템이 연계된 배전선로의 전압특성 해석

指導教授 金 世 鎬

羅 卿 允

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



2005年 6月

羅卿允의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

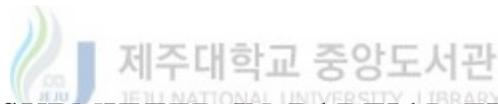
委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2005年 6月

Voltage Characteristic Analysis of the Distribution Line Connected with Wind Turbine Generation System

Kyoung-Yoon Na
(Supervised by professor Se-Ho Kim)



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF
ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

2005. 6.

목 차

| | |
|-----------------------|-----|
| LIST OF FIGURES | i |
| LIST OF TABLES | iii |
| SUMMARY | iv |
| I. 서 론 | 1 |
| II. 이론적 배경 | 4 |
| III. 사례분석 | 9 |
| IV. 결 론 | 31 |
| 참 고 문 헌 | 32 |



LIST OF FIGURES

| | |
|---|----|
| Fig. 1 Model network connected with wind power generation system | 5 |
| Fig. 2 Phase diagram connected with wind power generation system | 5 |
| Fig. 3 Generator, motor and break mode of induction machine on the torque/slip curve | 7 |
| Fig. 4 Stable generating mode | 8 |
| Fig. 5 Unstable generating mode | 8 |
| Fig. 6 Distribution line connected to wind power generation system | 9 |
| Fig. 7 Induction generator model | 10 |
| Fig. 8 Distribution line voltage without wind power generation system | 12 |
| Fig. 9 Distribution line voltage according to connection capacity | 16 |
| Fig. 10 A line voltage | 24 |
| Fig. 11 B line voltage | 27 |
| Fig. 12 waveform during Wind farm's 3-phase fault | 28 |
| Fig. 13 waveform during distribution-line's 3-phase fault | 28 |
| Fig. 14 System that connected the wind farm | 29 |
| Fig. 15 Voltage waveform during three-phase fault | 29 |
| Fig. 16 Voltage waveform during three-phase fault(80ms) | 30 |

Fig. 17 Voltage waveform during three-phase fault(150ms) 30



LIST OF TABLES

| | |
|---|----|
| Table 1 Line impedance | 10 |
| Table 2 Generator parameters | 11 |
| Table 3 Permission range of high tension side in transformer (unit : p.u) | 11 |
| Table 4 Distribution line voltage without wind power generation system | 13 |
| Table 5 Voltage regulation | 17 |
| Table 6 Voltage drop | 19 |
| Table 7 Voltage drop of connection line and neighboring line | 21 |
| Table 8 Critical clearing time according to distribution line's fault location | 28 |

SUMMARY

The use of the wind energy resource is a rapidly growing area world-wide. The number of installed units is continuously increasing, and therefore, it is important to respect and to deal with the impact of wind power generation system. From the view of an electric grid utility, there is a major problem with the impact of the wind system on the voltage of the electric grid, to which a turbine is connected. The problem is rather common in the connection of a wind power system to an already existing grid, since the grid is very seldom designed for the transmission of additional power. In this paper, it is investigated the voltage impact on distribution line, with which wind power generation system is connected.

Connections of wind power system usually occur to voltage drop due to reactive power absorption and sometime result in higher than nominal voltages which may be above the limit in case of light load.

I. 서론

2004년 이라크 전쟁 이후 불안한 국제정세와 중국 등 후발 경제개발도상국의 에너지 수요증가에 따른 국제유가가 고공행진을 계속하고 있으며 기후변화협약의 이행에 따른 이산화탄소 배출을 억제하기 위한 화석에너지의 사용 감소가 전 세계의 현안으로 대두되고 있다. 선진국은 기후변화협약 및 화석에너지 고갈에 대비하여 대체에너지 개발과 보급목표를 정하여 중점 투자하고 있으며 OECD 국가의 에너지원별 이용률 예측전망은 원자력, 수력비중이 감소하고 대체에너지 비중은 1999년 3.9[%]에서 2010년 4.9[%]로 증가가 예상된다(IEA, 2001).

대체에너지원 중 가장 경제성이 있는 풍력발전은 2003년 현재 세계 전력수요의 0.49[%](82.24[TWh])를 차지하고 있으며 2012년 4.11[%], 2020년 11.98[%], 2030년 20.14[%]로 급신장할 전망이다(EWEA, 2004). 현재 독일은 전력수요의 약 6[%], 덴마크는 18[%] 수준에 이르고 있으며 풍력발전 선도국가에서는 풍력발전설비 도입의무화, 투자에 대한 안정된 수익보장 및 전력시장의 장애요인 제거 등의 정책적인 지원으로 보급확대를 추진하고 있다.

국내에서는 1990년 초에 대학과 연구원을 중심으로 기초 및 소형풍력시스템에 대한 연구를 시작하여 1990년대 중반부터 본격적으로 기술개발이 진행되고 있으며 2003년 기준 23,754[kW]가 설치되어 가동 중이며 제주, 전북 새만금, 경북 포항, 강원도 대관령 등에서 상업용 발전이 이루어지고 있다. 국내 풍력발전시설은 대부분 외국에서 도입, 설치됨으로써 건설단가가 선진국의 1.6배 이상 높아 확대보급에 장애가 되었으나 제2차 국가에너지 기본계획에 따라 제정된 “신에너지 및 재생에너지 개발 이용보급 촉진법” 등에 의거해 대체에너지를 이용해 생산된 전기의 우선 구매 및 차액보존제도의 도입으로 풍력발전의 건설이 용이하게 되어 자치단체나 공기업 등에서 상업용으로 풍

력발전소를 건립하였으며 추가 건설을 계획하고 있다. 또한 분산형 전원개발을 촉진하기 위하여 구역전기사업제도를 시행하고 있으며 비교적 소용량의 발전기를 이용하여 전기를 생산, 전력거래소를 통하지 않고 특정한 공급 구역 내의 소비자에게 직접 전기를 원활하게 공급하기 위해 분산형 전원 계통연계 기술기준(안)이 고시되었다(대한전기학회, 2003).

분산형 전원 계통연계 기술기준(안)에 의하면 분산형 전원 발전설비용량이 3,000[kW]까지는 특고압 배전선로에 연계할 수 있으며 전용선로로 연계할 수 있는 분산형 전원 발전설비 출력용량은 10,000[kW] 미만으로 되어있다. 풍력 발전 등 분산형 전원이 배전선로에 연계되는 경우 전압강하, 전압상승, 고조파, 플리커, 역률 등 전기품질이 계통연계기술기준에서 제시한 조건을 만족해야 하며 이 때 전기품질 측정점은 보통 연계점(Point of Common Connection : PCC)을 기준으로 하고 있다.

풍력발전설비가 배전선로에 연계되는 경우 연계점에서의 전기품질은 기준을 만족할 수 있으나 계통연계로 인하여 연계점이외의 선로에서 전압이 규정범위를 유지하지 못하는 현상이 나타날 수 있다. 이는 풍력발전시스템의 유효전력 및 무효전력의 공급관계에서 비롯되고 있으며 배전선로 전압에의 영향은 정상상태 해석과 과도상태 해석을 통하여 확인하게 된다.

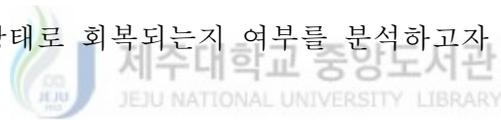
Tande 등(2001)은 풍력발전이 연계되는 경우 풍력발전의 용량에 따른 전압의 크기를 해석하였으며, Nigel C. Scott 등(2002)은 풍력발전시스템이 연계되는 경우 부하를 제어하여 전압을 허용범위로 유지하는 방법을 제안하였다.

A. Bonhomme 등(2001)은 RTU를 설치하여 전압, 유효전력, 무효전력 등에 관한 데이터를 취득하고 해석하여 통제실에서 전압을 조절하도록 하여 전압을 규정범위내로 유지해야 한다고 연구하였고, S. Persaud 등(2000)은 풍력발전시스템이 연계된 방사상 계통의 조류계산 방법과 연계된 풍력발전의 유효전력 및 무효전력을 제어함으로써 연계용량의 증설이 가능하다고 제안하였다.

또한 C. S. Demoulias 등(1996)은 계통에 연계된 풍력발전시스템이 갑자기

트립되는 경우 발전기 전압이나 전류 등의 파형을 고찰하여 높은 고정자 전류가 나타나는 과도현상에 대하여 해석하였으며 Salman K. Salman 등(2001)은 분산형 전원이 동기기인 경우와 유도기인 경우에 대해 임계제거시간을 비교하여 유도기인 경우 임계제거시간이 짧게 되어 보호계전기 정정시 고려해야 된다는 것을 강조하였고, Salman K. Salman 등(2003)은 계통연계형 풍력 발전시스템이 안정도에 미치는 요인들을 분석하였다.

본 논문에서는 계통해석 시뮬레이션 프로그램인 Digsilent power factory를 이용하여 풍력발전시스템이 배전선로에 연계되는 경우 배전선로 전압에의 영향을 고찰하였다. 우선 정상상태 해석으로서 NEG MICON사의 1.5[MW] 풍력발전시스템을 모델로 하여 연계되는 위치, 연계용량 및 풍력발전기 역률에 따라 배전선로 전압에 미치는 영향을 분석하였으며 과도상태 해석으로서 배전선로 보호기기가 순간적인 고장전류를 차단하는 순시요소에 대해 배전선로의 전압이 정상상태로 회복되는지 여부를 분석하고자 한다.



II. 이론적 배경

1. 유도발전기 원리

동기발전기를 계통선과 연계하기 위해서는 발전주파수, 전압, 위상이 계통선과 일치해야 하며 이를 위해서는 정밀한 속도제어와 동기검증, 시스템 감시 등을 위하여 제어 시스템의 규모가 커지게 되고, 가격 또한 비싸지게 된다. 반면에 유도발전기는 역률로 인한 에너지의 손실은 있으나 구조가 간단하여 가격이 싸고 보수가 용이하며 계통선 연계시 동기발전기와 같은 정밀한 제어는 필요하지 않아 계통연계형 풍력발전시스템에 많이 사용된다.

대부분의 상업용으로 운전되고 있는 대용량의 풍력발전기는 유도발전기가 주로 사용되고 있다. 유도발전기를 무부하로 운전하면 회전자는 토크를 발생하여 동기속도보다 약간 낮은 속도로 회전하는데 이때, 전동기축에 기계적 부하를 걸면 유도발전기로서 작동하게 된다. 회전자는 그 소요 토크에 상응한 슬립(S : slip)로 회전하며 고정자에 의해 만들어진 동기속도로 회전하고 있는 회전자계에 추월되는 형태로 자계를 끊고, 이에 의해 2차 전압을 발생하고, 2차 전류를 흘리며 그 2차 전류와 회전자계에 의해서 부하 토크에 상응하는 토크를 발생시키게 된다. 이때 1차 축에 흐르는 전류의 방향도 전동기 운전의 경우와 역방향이 되기 때문에 전동기 운전($1 > S > 0$)에서는 전력을 끌어들이던 것이 발전기 운전($S < 0$)에서는 전력을 전원으로 되돌리게 되어 전기에너지로 변환한다.

유도발전기의 기동은 우선 전동기로 동기속도 부근까지 상승시킨 후 발전기 출력 개폐기를 투입하는데, 이때 과전류가 흐르게 된다. 그 최대치는 구속 전류의 최대 2배 정도이고, 수사이클에서 수십사이클 지속된 후 정상상태로 안정되지만, 투입했을 때의 회전수가 동기속도로부터 떨어져 있으면 동기속도

까지 가속 혹은 감속하여 동기속도로 안정된다. 기동 완료 후 서서히 구동기의 출력을 높여 가면 발전기의 출력도 그에 상응하여 상승한다.

2. 정상상태 전압해석

배전계통은 수지상(방사상) 구조로 되어 있으며 변전소로부터 수용가로 한 방향으로 조류가 흐르도록 설계, 운영되고 있다. 배전계통에 풍력발전시스템이 연계되는 경우 풍력발전시스템의 용량 및 부하에 따라 일부 수용가는 역방향의 조류를 경험하게 되어 정상시의 전압변동범위와는 다른 형태가 될 수 있으며 전압강하의 방향도 역으로 되어 적정치를 유지하지 못할 가능성도 있다.



Fig. 1 The model network connected to wind power generation system

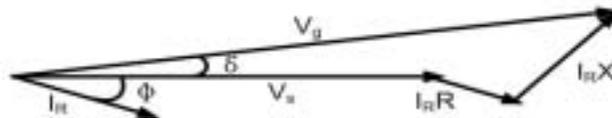


Fig. 2 Phase diagram connected to wind power generation system

Fig. 1에 풍력발전기가 연계된 모델계통을 나타내었다. Fig. 1에서 풍력발전기의 유효전력 및 무효전력은 P_g 와 Q_g 이고, 선로 임피던스는 $Z = R + jX$, 전류는 I_{R1} 이다. 풍력발전이 연계되는 지점의 전압 및 풍력발전기의 전압은 각각 V_s 와 V_g 이다. 여기서,

$$S_R = P_R + jQ_R = P_g - jQ_g \quad (1)$$

그리고, $S_R = V_g I_R^*$, $I_R = (P_R - jQ_R)/V_g^*$ 이므로

$$\begin{aligned} V_g &= V_s + I_R Z \\ &= V_s + (R + jX)(P_R - jQ_R)/V_g^* \\ &= V_s + (P_R R + XQ_R)/V_g^* + j(P_R X - Q_R R)/V_g^* \end{aligned} \quad (2)$$

가 된다. Fig. 2의 페이저도에서,

$$V_g \sin \delta = (P_R X - Q_R R)/V_s \quad (3)$$

이다. 식 (3)에서 전압각 δ 가 매우 작기 때문에 $(P_R X - Q_R R)/V_s$ 값 또한 매우 작은 값이 되기 때문에 식 (2)를 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_g = V_s + (P_R X + XQ_R)/V_g^* \quad (4)$$

계통의 전압변동을 ΔV 라고 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta V = (P_R X + XQ_R)/V_g^* = (P_g R - XQ_g)/V_g^* \quad (5)$$

식 (5)에서 보는 바와 같이 풍력발전시스템이 연계되는 경우 연계점의 전압은 풍력발전량 P_g , Q_g 와 선로 임피던스 R , X 에 따라 전압상승이나 전압강하가 발생할 수 있다.

3. 과도상태 전압해석

유도기의 경우 동기기와는 달리 계자자속을 발생시키는 계자권선이 설치되어 있지 않아 외부로부터 계자전류를 공급받아야 한다. 또한 Fig. 3에서와 같이 회전자의 속도 범위에 따라 플러깅 작용($1 < S$), 전동기 작용($0 < S < 1$), 발전기 작용($S < 0$)의 세 가지 동작으로 구분되며, 풍력발전의 경우 회전자의 속도를 동기속도 보다 빨리 회전시키는 발전기 작용을 이용하게 된다. 이처럼 유도기는 동기기와 달리 회전자 속도가 일정하지 않기 때문에 사고발생시 회전자의 속도가 변화하게 되며 과도안정도는 회전자의 속도변화를 고찰하여 판별할 수 있다.

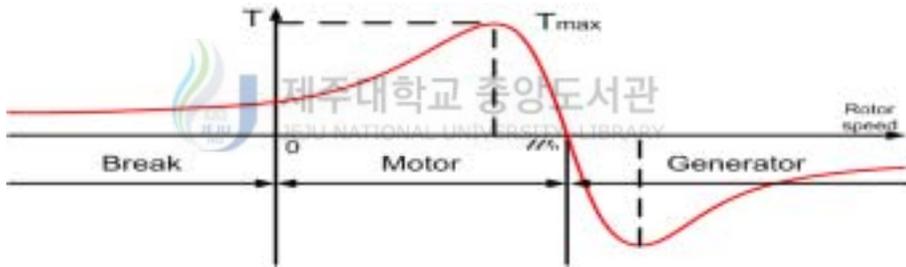


Fig. 3 Generator, motor and break mode of induction machine on the torque/slip curve.

유도기에서 토크는 전압의 제곱에 비례하여 식 (6)으로 표현된다.

$$T_e \propto V^2 \tag{6}$$

토크는 사고의 조건에 따라 변하게 되며 회전자의 속도는 식 (7)의 동요방정식(swing equation)에 의해 특성지어진다

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_m - T_e}{J} \quad (7)$$

여기서,

ω : 회전자 속도, J : 관성모멘트, T_m : 기계적 토오크 T_e : 전기적 토오크

정상상태에서는 Fig. 4에서와 같이 전기적 토르크가 큰 값을 갖게 되며 기계적 토르크와 전기적 토르크의 크기가 같은 지점에서 등속도로 운전하게 된다. 하지만 사고가 발생하여 단자전압이 낮아지면 식 (6)에 의해 전기적 토르크가 감소하게 되고 식 (7)에 의해 회전자는 가속하게 된다. 사고가 제거되어 계통전압이 회복되면 새롭게 자장이 형성되며 이 때 새로 형성된 전기적 토르크가 기계적 토르크 보다 크다면 회전자는 다시 감속하여 정상상태로 회복하겠지만 Fig. 5에서와 같이 전기적 토르크가 기계적 토르크보다 작다면 회전자는 감속하지 못한다. 따라서 사고가 제거되어야 하는 최대한의 시간이 존재하게 되며 이때의 시간을 유도기의 임계 제거시간이라고 한다.

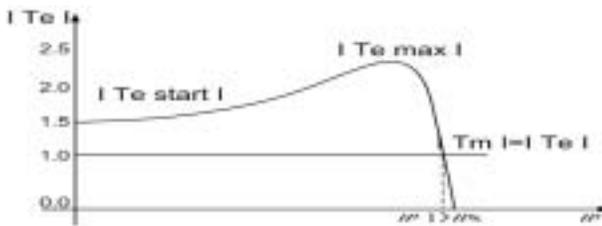


Fig. 4 Stable generating mode.

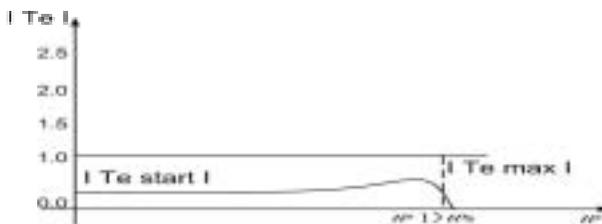


Fig. 5 Unstable generating mode.

Ⅲ. 사례분석

1. 모델 시스템

풍력발전시스템이 배전선로에 연계되는 경우 배전선로 전압에의 영향을 고찰하기 위해 1.5[MW]의 풍력발전시스템을 모델로 하여 연계되는 위치, 연계 용량 및 풍력발전기 역률에 따른 배전선로 전압을 분석하였으며 과도상태 해석으로서 배전선로 보호기기가 순간적인 고장전류를 차단하는 순시요소에 대해 배전선로가 적정전압을 유지하는지 여부를 분석하였다.

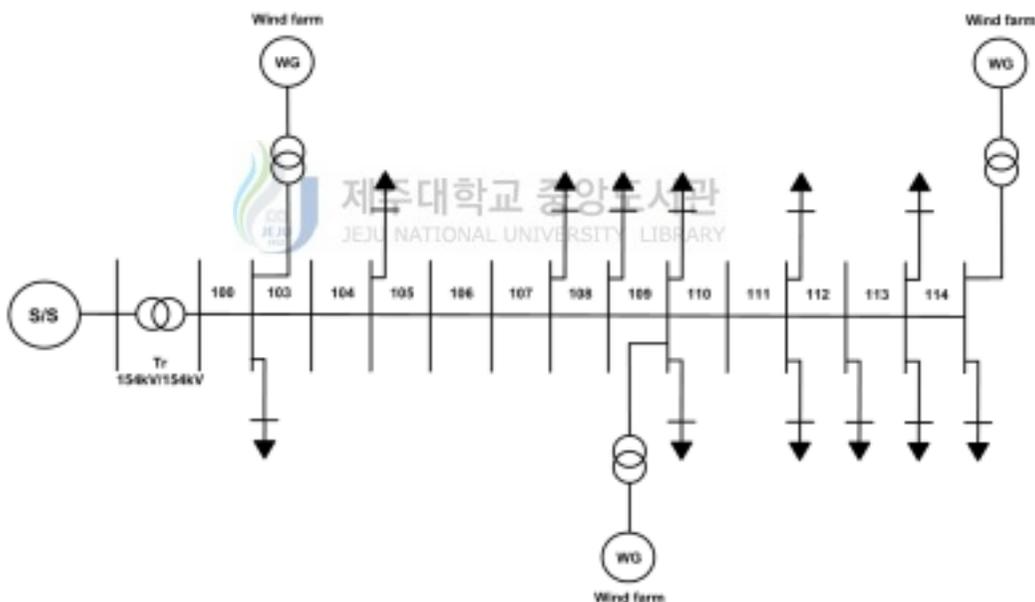


Fig. 6 Distribution line connected with wind power generation system

Fig. 6에 풍력발전시스템이 연계된 배전선로의 단선도를 나타내었다. 배전선로와 풍력발전시스템은 Y- Δ , 22900/690[V]의 변압기로 연계되어 있고 배전선로는 22.9[kV] 계통으로 CNCV 325[mm²], 60[mm²]와 ACSR 160[mm²], 95[mm²], 58[mm²], 32[mm²] 그리고, OCW100[mm²], 60[mm²], 38[mm²] 등으로 구성되어 있다.

Table 1에 전선의 종류에 따른 선로의 임피던스를 나타내었다.

Table 1 Line impedance

| Section | Positive sequence impedance | | Zero sequence impedance | |
|----------|-----------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
| | R(Ω/m) | X(Ω/m) | R(Ω/m) | X(Ω/m) |
| ACSR 160 | 0.2024 | 0.3891 | 0.3350 | 1.1847 |
| ACSR 95 | 0.4043 | 0.4845 | 0.5176 | 1.1889 |
| ACSR 58 | 0.6959 | 0.5144 | 0.8112 | 1.4148 |
| ACSR 32 | 1.2302 | 0.5212 | 1.1495 | 1.6277 |
| CNCV 325 | 0.0751 | 0.1245 | 0.2343 | 0.0819 |
| CNCV 60 | 0.3874 | 0.1632 | 1.1340 | 0.3553 |
| OCW 100 | 0.1767 | 0.4269 | 0.5687 | 1.3900 |
| OCW 50 | 0.3009 | 0.4468 | 0.6705 | 1.3973 |
| OCW 38 | 0.4835 | 0.4688 | 0.8950 | 1.4298 |

연계되는 풍력발전기 모델은 NEG MICON사의 AMH 500L6L BAH 1.5[MW] 모델을 사용하였으며 등가모델은 Fig. 7, 발전기 사양은 Table 2에 나타내었다.

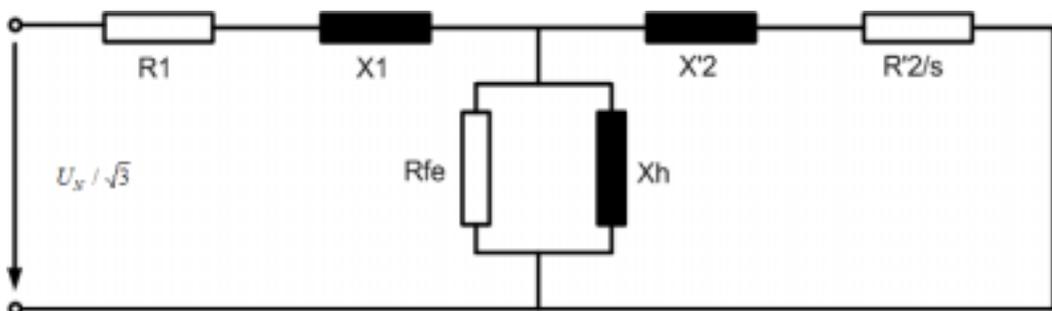


Fig. 7 Induction generator model

Table 2 Generator parameters

| | |
|------------------------------|---------------------|
| Rated power output | 1.5[MW] |
| Voltage | 690[V] |
| Number of poles | 6 |
| Power factor | 0.9 |
| Stator resistance(R1) | 0.0012 [Ω] |
| Stator leakage reactance(X1) | 0.0302 [Ω] |
| Magnetizing reactance(Xh) | 0.8730 [Ω] |
| Rotor reactance(X'2) | 0.0198 [Ω] |
| Rotor resistance(R'2/s) | 0.0026 [Ω] |
| Magnetizing resistance(Rfe) | 35.2 [Ω] |

2. 정상상태 전압해석

1) 전압유지범위 제주대학교 중앙도서관 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

국내의 저압 수용가에 대한 전압허용범위는 207 ~ 233[V] 이지만, 주상변압기로부터 수용가에 이르기까지 주상변압기, 저압선 및 인입선에서 전압강하가 발생하게 되며 전압강하를 고려한 주상변압기 1차 전압 허용범위를 Table 3에 나타내었다. 배전선로의 각 구간에 설치되어 있는 주상변압기의 변압비는 전압강하가 5[%] 이하의 지역에서는 5[%]의 변압비를, 5[%] 초과 지역에서는 10[%]의 변압비를 사용한다.

Table 3 Permission range of high tension side in transformer (unit : p.u)

| Section | | Heavy load | Light load |
|-----------------|-----------|------------|------------|
| Minimum voltage | 5[%] Tap | 0.9784 | 0.9385 |
| | 10[%] Tap | 0.9339 | 0.8958 |
| Maximum voltage | 5[%] Tap | 1.0513 | 1.0314 |
| | 10[%] Tap | 1.0036 | 0.9845 |

2) 풍력발전시스템 연계 이전의 배전선로 전압

풍력발전설비가 연계되지 않은 배전선로의 각 모선에 대한 전압을 경부하(5[MW])와 중부하(10[MW])로 구분하여 Fig. 8에 나타내었으며 Table 4에 전압크기를 나타내었다. 전압강하는 선로 말단에서 가장 심하게 발생하므로 선로말단에 대해 전압강하를 계산하였으며 경부하시 4.3%, 중부하시 8.9%의 전압강하가 발생하고 있다. 전압강하에 대한 식은 다음과 같다.

$$\text{전압강하율} = \frac{V_S - V_R}{V_R} \times 100(\%) \quad (8)$$

여기서, V_S : 변전소 인출구 전압, V_R : 선로 말단 전압

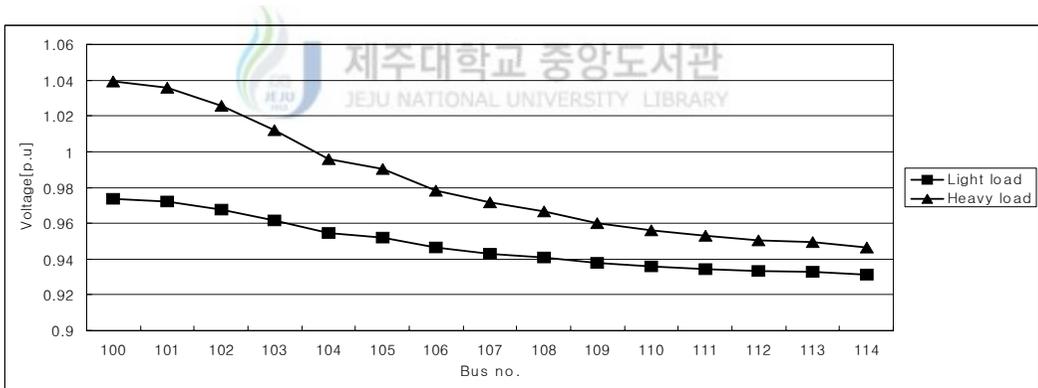


Fig. 8 Distribution line voltage without wind power generation system

Table 4 Distribution line voltage without wind power generation system

| Bus no. | Distance(km) | Light load(p.u) | Heavy load(p.u) |
|---------|--------------|-----------------|-----------------|
| 100 | 0 | 0.9738 | 1.0393 |
| 101 | 0.45 | 0.9724 | 1.036 |
| 102 | 1.9 | 0.9678 | 1.0258 |
| 103 | 4 | 0.9616 | 1.012 |
| 104 | 6.65 | 0.9544 | 0.996 |
| 105 | 7.65 | 0.9518 | 0.9901 |
| 106 | 9.75 | 0.9464 | 0.9781 |
| 107 | 11.15 | 0.943 | 0.9715 |
| 108 | 12.4 | 0.9407 | 0.9665 |
| 109 | 13.9 | 0.9378 | 0.9599 |
| 110 | 15.6 | 0.936 | 0.956 |
| 111 | 17.05 | 0.9344 | 0.9529 |
| 112 | 18.2 | 0.9334 | 0.9507 |
| 113 | 19.55 | 0.9329 | 0.9495 |
| 114 | 25.6 | 0.9315 | 0.9463 |



3) 풍력발전설비 용량에 따른 배전선로의 전압

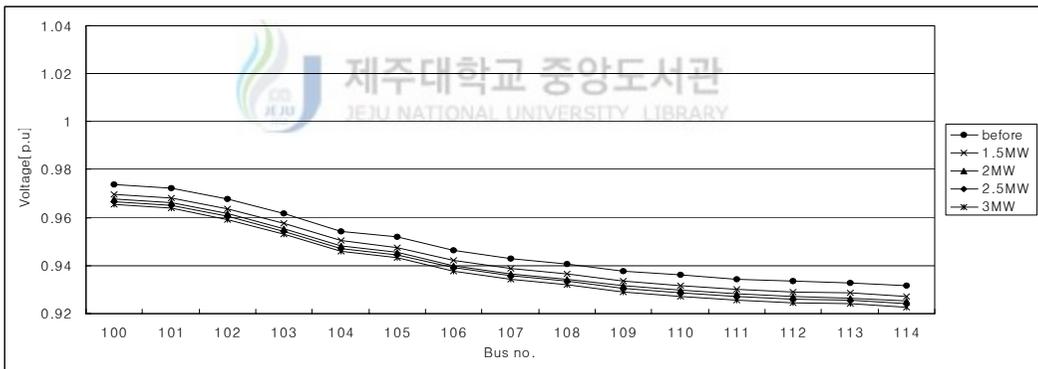
배전선로의 변전소 인출지점과 배전선로 중간, 말단에 1.5[MW], 2[MW], 2.5[MW], 3[MW]용량의 풍력발전시스템을 연계하여 경부하일 때와 중부하일 때의 배전선로 전압을 분석하였으며 각 모선의 전압을 Fig. 9에 나타내었다. 모선전압의 그림을 보면 풍력발전시스템이 도입됨에 따라서 배전선로의 전압이 전체적으로 약간씩 감소하는 것을 알 수 있는데, 이는 풍력발전단지에서 유효전력을 출력시켜 일부 전압을 상승시키는 요인이 되지만 무효전력을 받아들이므로써 전압을 전체적으로 감소시키는 요인이 되기 때문이다. 풍력발전시스템의 배전선로 연계 전후에 대한 전압변동율은 다음의 식을 사용하였다.

$$\text{전압변동율} = \frac{V_{WG, before} - V_{WG, after}}{V_{WG, before}} \times 100(\%) \quad (9)$$

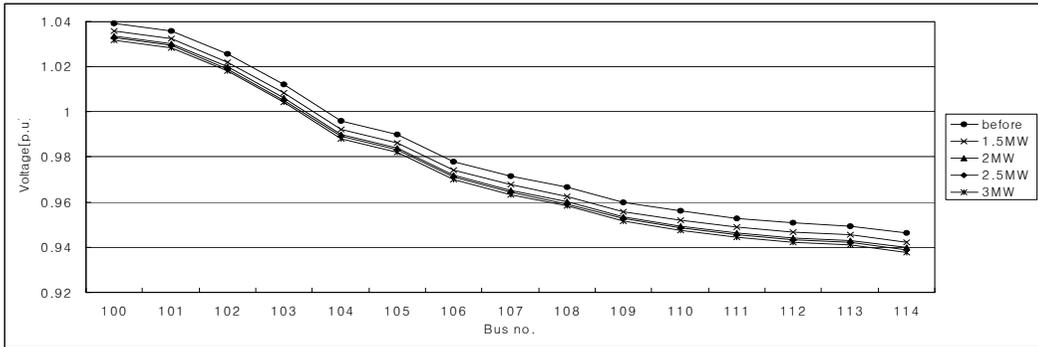
여기서, $V_{WG, before}$: 풍력발전설비가 도입되기 전에 대한 계통의 전압

$V_{WG, after}$: 풍력발전설비가 도입된 후에 대한 계통의 전압

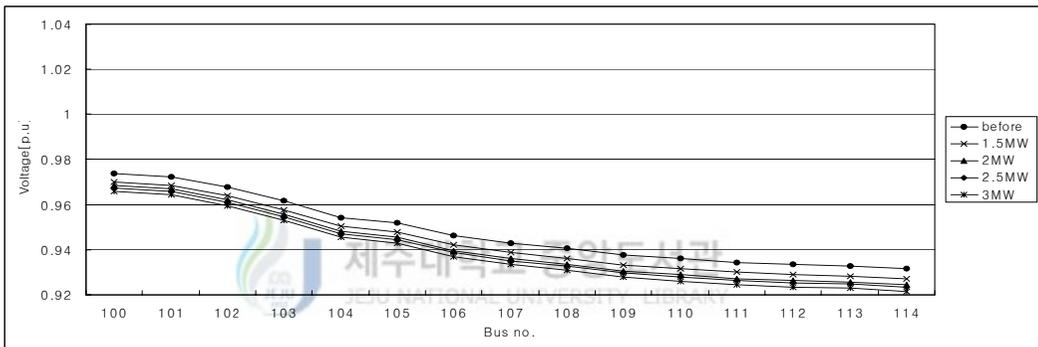
Table 5에는 1.5[MW], 2[MW], 2.5[MW], 3[MW]용량의 풍력발전시스템이 각각 변전소 인출지점과 배전선로 중간, 말단에 연계되는 경우 경부하일 때와 중부하일 때의 변전소 인출구 및 선로말단의 전압변동율을 나타내었고, Table 6에는 선로말단의 전압강하율을 나타내었다. 전압변동률 및 전압강하율에 관한 Table로부터 배전선로에 연계되는 풍력발전시스템의 용량이 커질수록 전압변동율과 전압강하율이 증가하는 경향이 있으며 변전소 전원단보다는 선로 말단 지점에 연계하는 것이 적음을 알 수 있다.



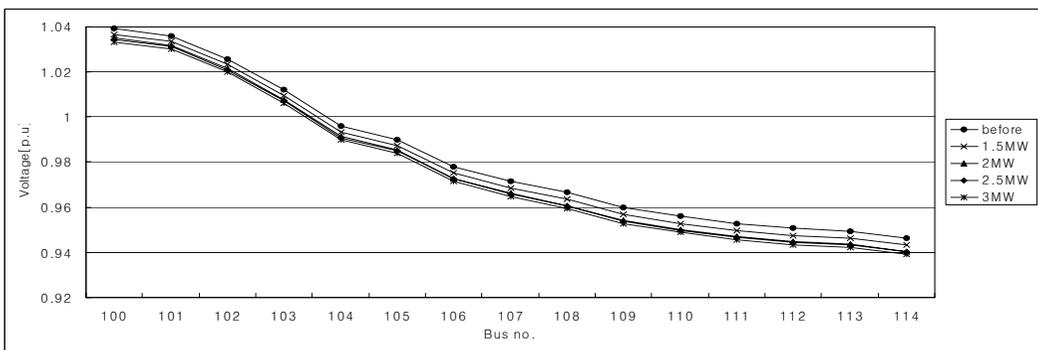
(a) Case1 : beginning line connection, light load



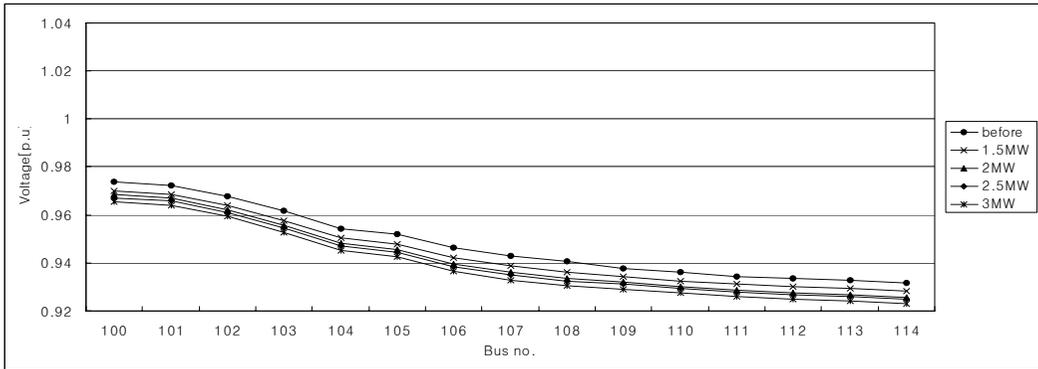
(b) Case2 : beginning line connection, heavy load



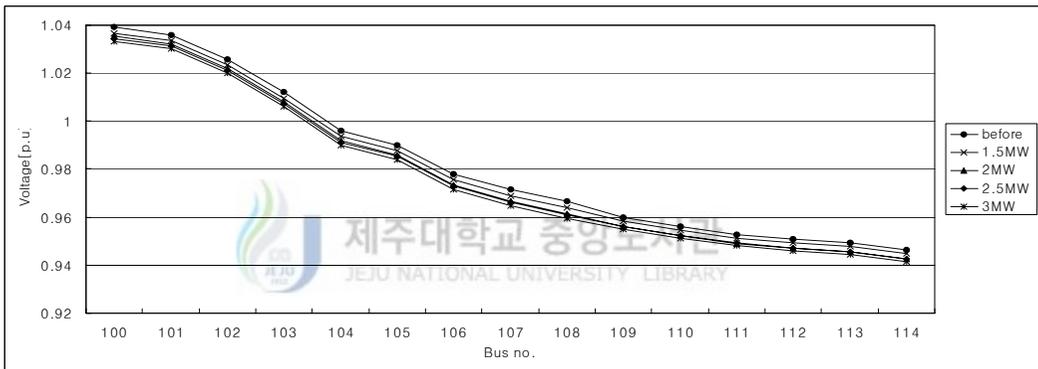
(c) Case3 : middle line connection, light load



(d) Case4 : middle line connection, heavy load



(e) Case5 : end line connection, light load



(f) Case6 : end line connection, heavy load

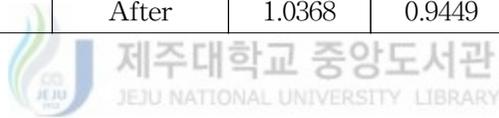
Fig. 9 Distribution line voltage according to connection capacity

Table 5 Voltage regulation

(a) connection capacity : 1.5[MW]

(- : voltage down, +: voltage rise)

| Section | | | Voltage(p.u) | | Regulation(%) | |
|---------|------------------|--------|--------------|--------|---------------|---------|
| Load | Connection point | WG | Beginning | End | Beginning | End |
| Light | Beginning | Before | 0.9738 | 0.9315 | -0.4108 | -0.4616 |
| | | After | 0.9698 | 0.9272 | | |
| | Middle | Before | 0.9738 | 0.9315 | -0.3800 | -0.4831 |
| | | After | 0.9701 | 0.927 | | |
| | End | Before | 0.9738 | 0.9315 | -0.3800 | -0.3650 |
| | | After | 0.9701 | 0.9281 | | |
| Heavy | Beginning | Before | 1.0393 | 0.9463 | -0.3464 | -0.4333 |
| | | After | 1.0357 | 0.9422 | | |
| | Middle | Before | 1.0393 | 0.9463 | -0.2502 | -0.3276 |
| | | After | 1.0367 | 0.9432 | | |
| | End | Before | 1.0393 | 0.9463 | -0.2405 | -0.1479 |
| | | After | 1.0368 | 0.9449 | | |



(b) connection capacity : 2[MW]

(- : voltage down, +: voltage rise)

| Section | | | Voltage(p.u) | | Regulation(%) | |
|---------|------------------|--------|--------------|--------|---------------|---------|
| Load | Connection point | WG | Beginning | End | Beginning | End |
| Light | Beginning | Before | 0.9738 | 0.9315 | -0.6161 | -0.6870 |
| | | After | 0.9678 | 0.9251 | | |
| | Middle | Before | 0.9738 | 0.9315 | -0.5545 | -0.7622 |
| | | After | 0.9684 | 0.9244 | | |
| | End | Before | 0.9738 | 0.9315 | -0.5545 | -0.6333 |
| | | After | 0.9684 | 0.9256 | | |
| Heavy | Beginning | Before | 1.0393 | 0.9463 | -0.5580 | -0.6868 |
| | | After | 1.0335 | 0.9398 | | |
| | Middle | Before | 1.0393 | 0.9463 | -0.4041 | -0.6129 |
| | | After | 1.0351 | 0.9405 | | |
| | End | Before | 1.0393 | 0.9463 | -0.3848 | -0.4015 |
| | | After | 1.0353 | 0.9425 | | |

(c) connection capacity : 2.5[MW]

(- : voltage down, +: voltage rise)

| Section | | | Voltage(p.u) | | Regulation(%) | |
|---------|------------------|--------|--------------|--------|---------------|---------|
| Load | Connection point | WG | Beginning | End | Beginning | End |
| Light | Beginning | Before | 0.9738 | 0.9315 | -0.7291 | -0.8051 |
| | | After | 0.9667 | 0.924 | | |
| | Middle | Before | 0.9738 | 0.9315 | -0.6674 | -0.8695 |
| | | After | 0.9673 | 0.9234 | | |
| | End | Before | 0.9738 | 0.9315 | -0.6777 | -0.6977 |
| | | After | 0.9672 | 0.925 | | |
| Heavy | Beginning | Before | 1.0393 | 0.9463 | -0.6350 | -0.7819 |
| | | After | 1.0327 | 0.9389 | | |
| | Middle | Before | 1.0393 | 0.9463 | -0.4714 | -0.6446 |
| | | After | 1.0344 | 0.9402 | | |
| | End | Before | 1.0393 | 0.9463 | -0.4618 | -0.3804 |
| | | After | 1.0345 | 0.9427 | | |

(d) connection capacity : 3[MW]

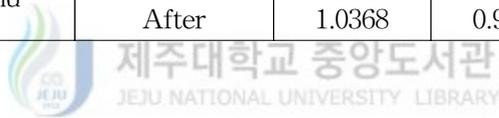
(- : voltage down, +: voltage rise)

| Section | | | Voltage(p.u) | | Regulation(%) | |
|---------|------------------|--------|--------------|--------|---------------|---------|
| Load | Connection point | WG | Beginning | End | Beginning | End |
| Light | Beginning | Before | 0.9738 | 0.9315 | -0.8626 | -0.9554 |
| | | After | 0.9654 | 0.9226 | | |
| | Middle | Before | 0.9738 | 0.9315 | -0.8215 | -1.0735 |
| | | After | 0.9658 | 0.9215 | | |
| | End | Before | 0.9738 | 0.9315 | -0.8421 | -0.9018 |
| | | After | 0.9656 | 0.9231 | | |
| Heavy | Beginning | Before | 1.0393 | 0.9463 | -0.7313 | -0.8982 |
| | | After | 1.0317 | 0.9378 | | |
| | Middle | Before | 1.0393 | 0.9463 | -0.5773 | -0.7714 |
| | | After | 1.0333 | 0.939 | | |
| | End | Before | 1.0393 | 0.9463 | -0.5677 | -0.4967 |
| | | After | 1.0334 | 0.9416 | | |

Table 6 Voltage drop

(a) connection capacity : 1.5[MW]

| Section | | | Voltage(p.u) | | Voltage drop(%) |
|---------|------------------|--------|--------------|--------|-----------------|
| Load | Connection point | WG | Beginning | End | |
| Light | Beginning | Before | 0.9738 | 0.9315 | 4.3438 |
| | | After | 0.9698 | 0.9272 | 4.3927 |
| | Middle | Before | 0.9738 | 0.9315 | 4.3438 |
| | | After | 0.9701 | 0.927 | 4.4428 |
| | End | Before | 0.9738 | 0.9315 | 4.3438 |
| | | After | 0.9701 | 0.9281 | 4.3295 |
| Heavy | Beginning | Before | 1.0393 | 0.9463 | 8.9483 |
| | | After | 1.0357 | 0.9422 | 9.0277 |
| | Middle | Before | 1.0393 | 0.9463 | 8.9483 |
| | | After | 1.0367 | 0.9432 | 9.0190 |
| | End | Before | 1.0393 | 0.9463 | 8.9483 |
| | | After | 1.0368 | 0.9449 | 8.8638 |



(b) connection capacity : 2[MW]

| Section | | | Voltage(p.u) | | Voltage drop(%) |
|---------|------------------|--------|--------------|--------|-----------------|
| Load | Connection point | WG | Beginning | End | |
| Light | Beginning | Before | 0.9738 | 0.9315 | 4.3438 |
| | | After | 0.9654 | 0.9226 | 4.4121 |
| | Middle | Before | 0.9738 | 0.9315 | 4.3438 |
| | | After | 0.9658 | 0.9215 | 4.5436 |
| | End | Before | 0.9738 | 0.9315 | 4.3438 |
| | | After | 0.9656 | 0.9231 | 4.4197 |
| Heavy | Beginning | Before | 1.0393 | 0.9463 | 8.9483 |
| | | After | 1.0317 | 0.9378 | 9.0663 |
| | Middle | Before | 1.0393 | 0.9463 | 8.9483 |
| | | After | 1.0333 | 0.939 | 9.1392 |
| | End | Before | 1.0393 | 0.9463 | 8.9483 |
| | | After | 1.0334 | 0.9416 | 8.9636 |

(c) connection capacity : 2.5[MW]

| Section | | | Voltage(p.u) | | Voltage drop(%) |
|---------|------------------|--------|--------------|--------|-----------------|
| Load | Connection point | WG | Beginning | End | |
| Light | Beginning | Before | 0.9738 | 0.9315 | 4.3438 |
| | | After | 0.9654 | 0.9226 | 4.4170 |
| | Middle | Before | 0.9738 | 0.9315 | 4.3438 |
| | | After | 0.9658 | 0.9215 | 4.5384 |
| | End | Before | 0.9738 | 0.9315 | 4.3438 |
| | | After | 0.9656 | 0.9231 | 4.3631 |
| Heavy | Beginning | Before | 1.0393 | 0.9463 | 8.9483 |
| | | After | 1.0317 | 0.9378 | 9.0829 |
| | Middle | Before | 1.0393 | 0.9463 | 8.9483 |
| | | After | 1.0333 | 0.939 | 9.1067 |
| | End | Before | 1.0393 | 0.9463 | 8.9483 |
| | | After | 1.0334 | 0.9416 | 8.8738 |



(d) connection capacity : 3[MW]

| Section | | | Voltage(p.u) | | Voltage drop(%) |
|---------|------------------|--------|--------------|--------|-----------------|
| Load | Connection point | WG | Beginning | End | |
| Light | Beginning | Before | 0.9738 | 0.9315 | 4.3438 |
| | | After | 0.9654 | 0.9226 | 4.4334 |
| | Middle | Before | 0.9738 | 0.9315 | 4.3438 |
| | | After | 0.9658 | 0.9215 | 4.5869 |
| | End | Before | 0.9738 | 0.9315 | 4.3438 |
| | | After | 0.9656 | 0.9231 | 4.4014 |
| Heavy | Beginning | Before | 1.0393 | 0.9463 | 8.9483 |
| | | After | 1.0317 | 0.9378 | 9.1015 |
| | Middle | Before | 1.0393 | 0.9463 | 8.9483 |
| | | After | 1.0333 | 0.939 | 9.1261 |
| | End | Before | 1.0393 | 0.9463 | 8.9483 |
| | | After | 1.0334 | 0.9416 | 8.8833 |

4) 인접 배전선로의 전압분석

3[MW]용량의 풍력발전시스템이 배전선로 말단에 연계되는 경우 인접한 다른 배전선로의 전압강하율을 분석하여 Table 7에 나타내었다. 풍력발전시스템 연계 전, 후의 전압강하율을 비교해보면 변동폭이 큰 중부하시 연계 전 9.0865, 연계 후 9.2096으로 변동폭은 0.2[%] 이하로 인접한 배전선로의 전압에는 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

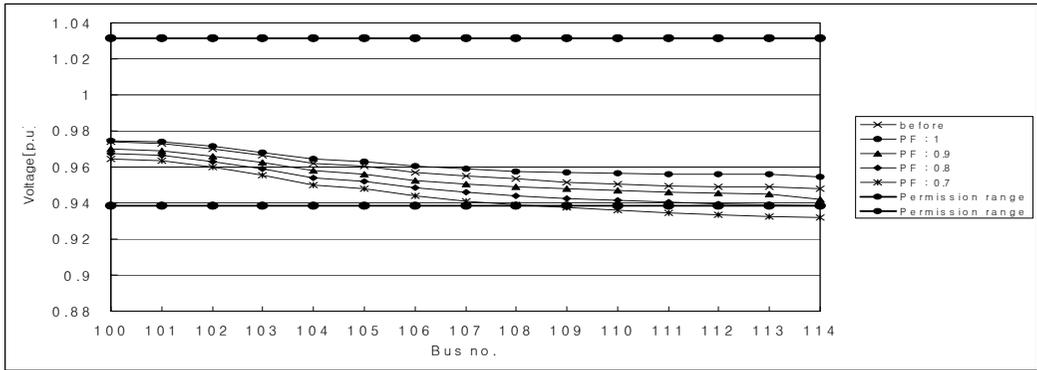
Table 7 Voltage drop of connection line and neighboring line

| Section | | | Voltage(p.u) | Voltage(p.u) | Voltage drop(%) |
|------------------|------------|--------|--------------|--------------|-----------------|
| | | | Beginning | End | End |
| Connection line | Light load | Before | 0.9738 | 0.9314 | 4.3541 |
| | | After | 0.966 | 0.9235 | 4.3996 |
| | Heavy load | Before | 1.0393 | 0.9465 | 8.9291 |
| | | After | 1.0343 | 0.9426 | 8.8659 |
| Neighboring line | Light load | Before | 0.9697 | 0.9272 | 4.3828 |
| | | After | 0.9619 | 0.919 | 4.4599 |
| | Heavy load | Before | 1.0312 | 0.9375 | 9.0865 |
| | | After | 1.0261 | 0.9316 | 9.2096 |

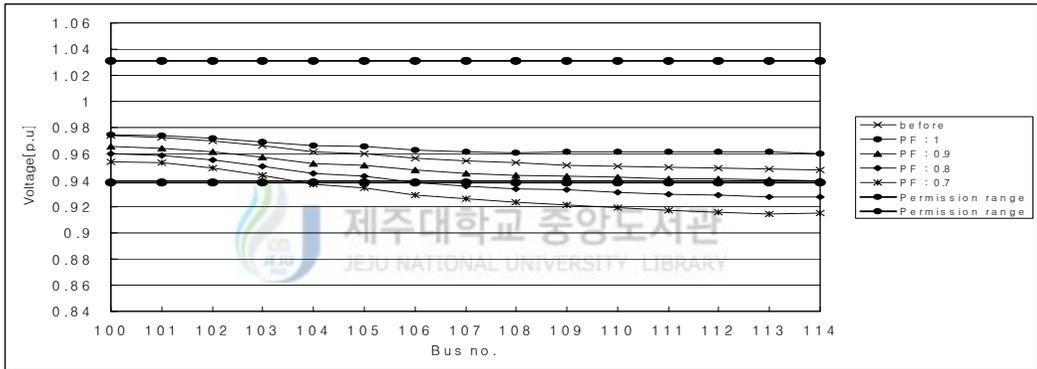
5) 풍력발전기 역률에 따른 배전선로 전압분석

전압강하가 적은 배전선로(A선로, 길이 38.1[km])와 큰 배전선로(B선로, 길이 68.58[km])에 대해 선로 중간과 말단에 1.5[MW] 및 3[MW]용량의 풍력발전설비를 연계하여 풍력발전기의 역률변화에 따른 배전선로 전압을 분석하였으며 Fig. 10 ~ Fig. 11에 선로전압을 나타내었다. 전압강하가 적은 A선로에 대해서는 전압의 허용범위가 인출점이나 말단에서 동일하지만 전압강하가 큰 B선로에 대해서는 전압의 허용범위가 변압비 5[%], 10[%] 지점에 따라 전압의 허용범위가 다르게 설정되어 있다.

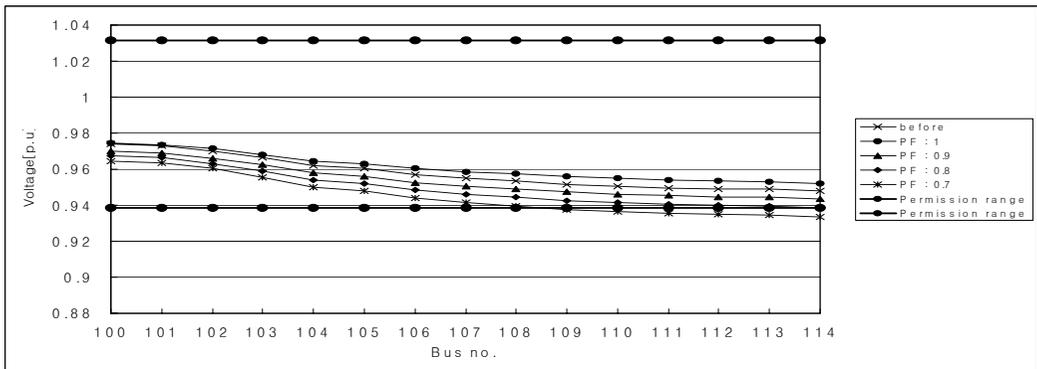
풍력발전기의 역률변화에 따른 전압을 해석해 보면 역률 1.0으로 운전시 전압상승으로 인하여 과전압의 우려가 있으며 역률이 낮을 경우에는 선로 말단 부분에서는 저전압의 우려가 있음을 알 수 있다.



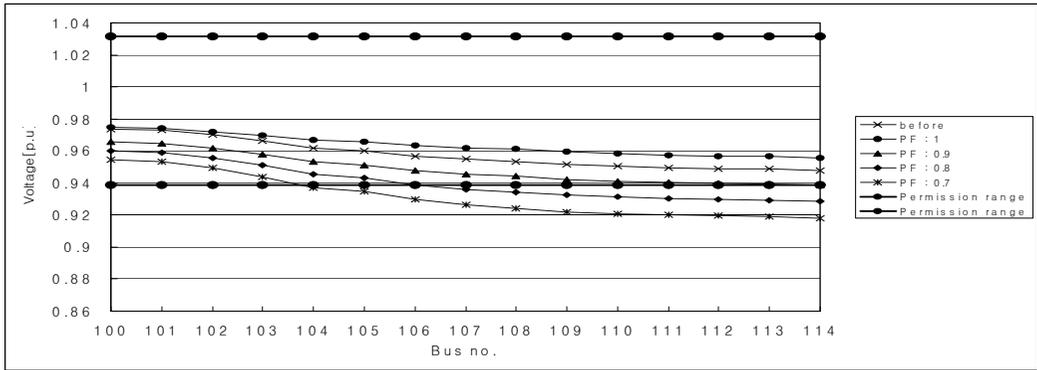
(a) end line connection, light load, 1.5[MW] connection



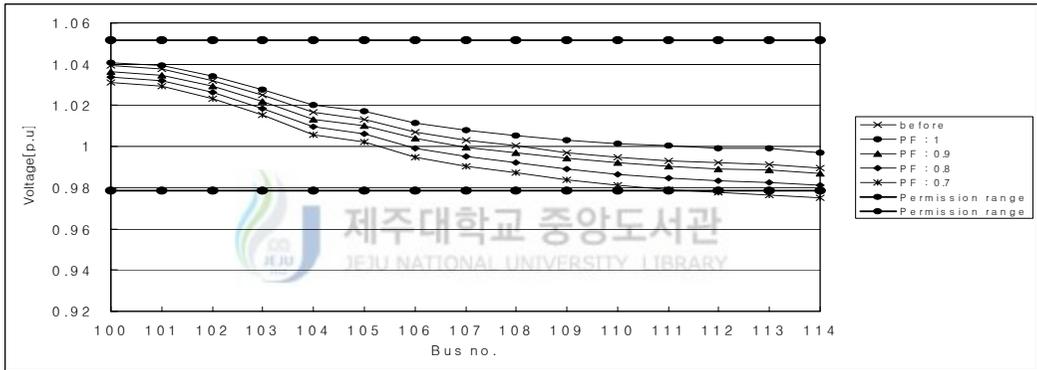
(b) end line connection, light load, 3[MW] connection



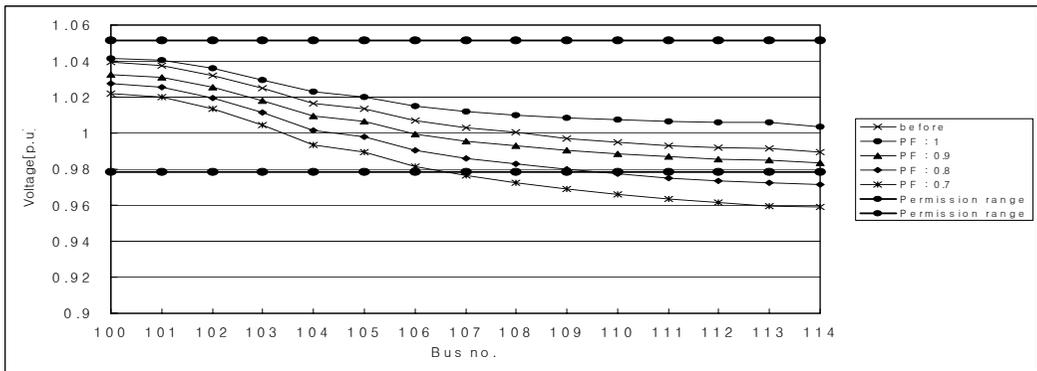
(c) middle line connection, light load, 1.5[MW] connection



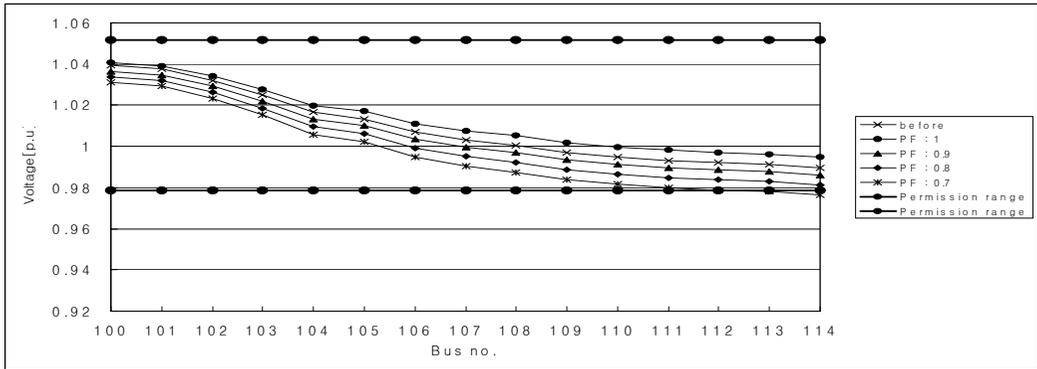
(d) middle line connection, light load, 3[MW] connection



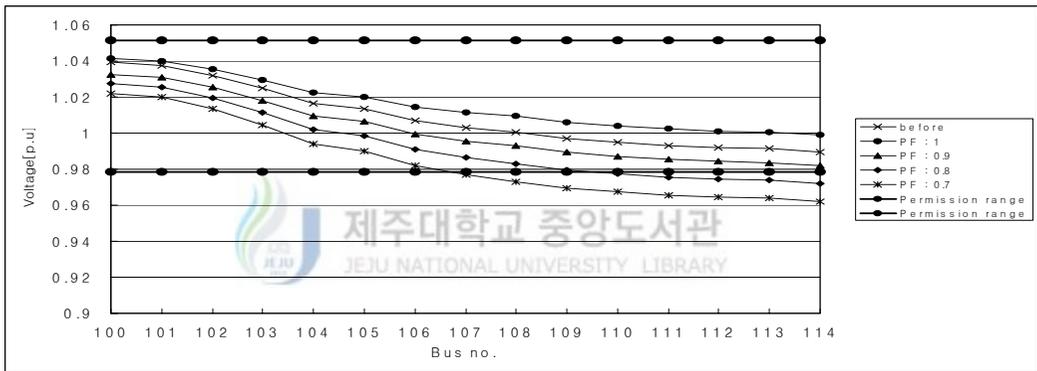
(e) end line connection, heavy load, 1.5[MW] connection



(f) end line connection, heavy load, 3[MW] connection

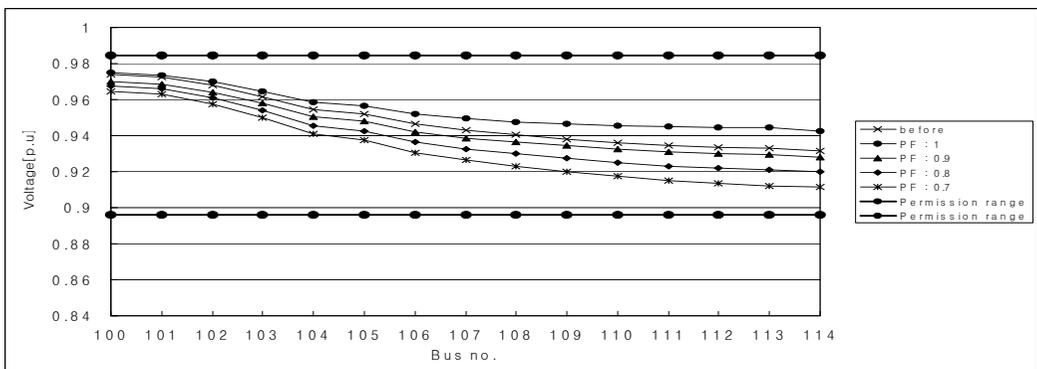


(g) middle line connection, heavy load, 1.5[MW]connection

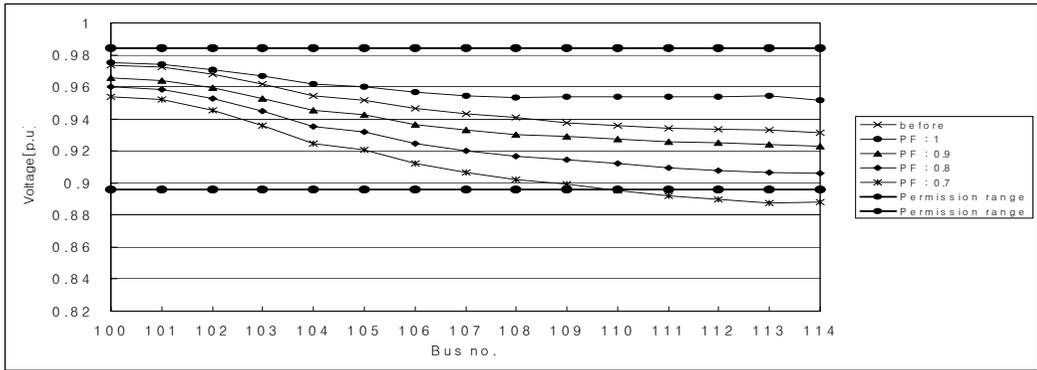


(h) middle line connection, heavy load, 3[MW] connection

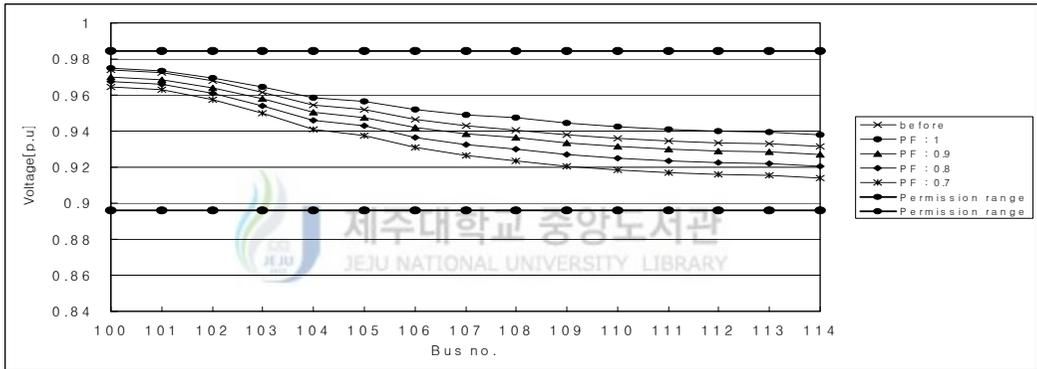
Fig. 10 A line voltage



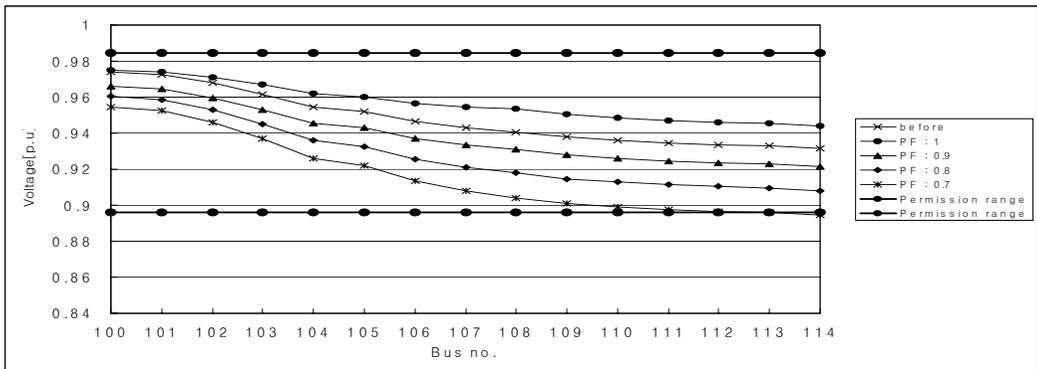
(a) end line connection, light load, 1.5[MW] connection



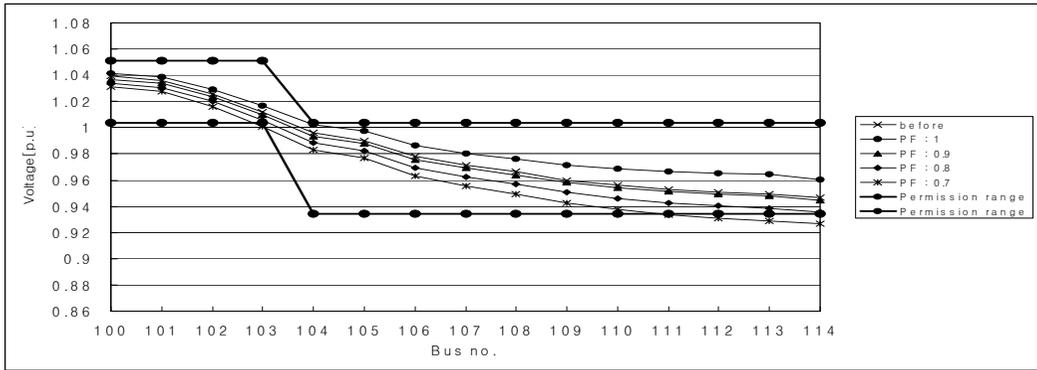
(b) end line connection, light load, 3[MW] connection



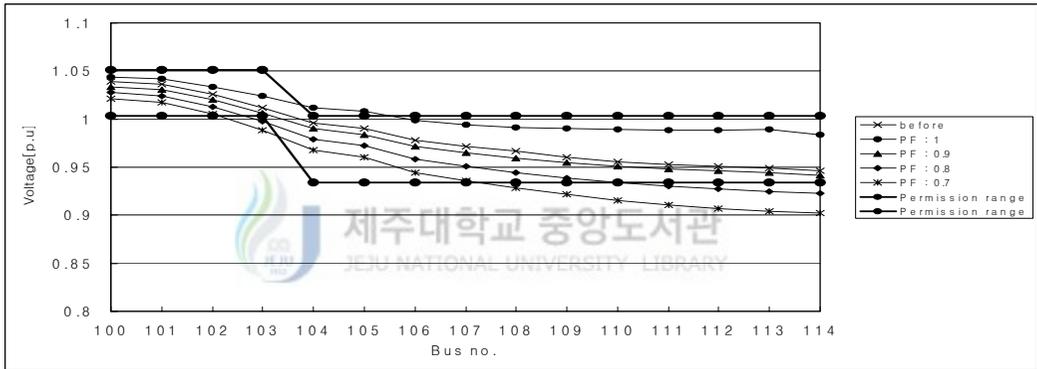
(c) middle line connection, light load, 1.5[MW] connection



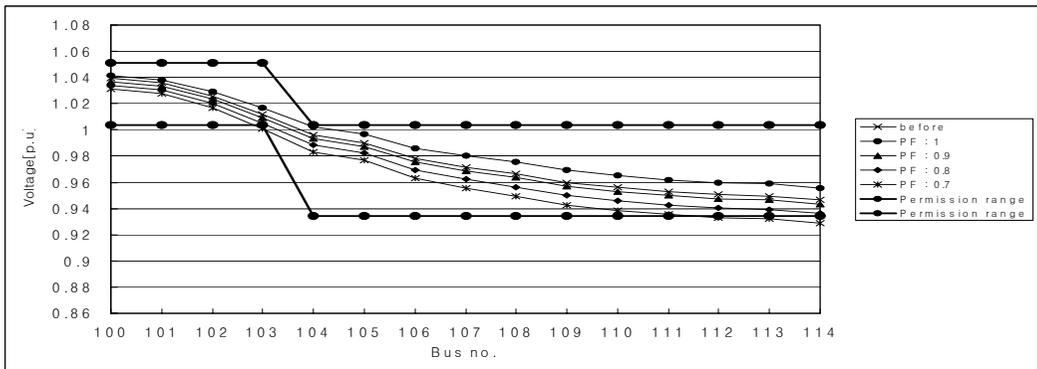
(d) middle line connection, light load, 3[MW] connection



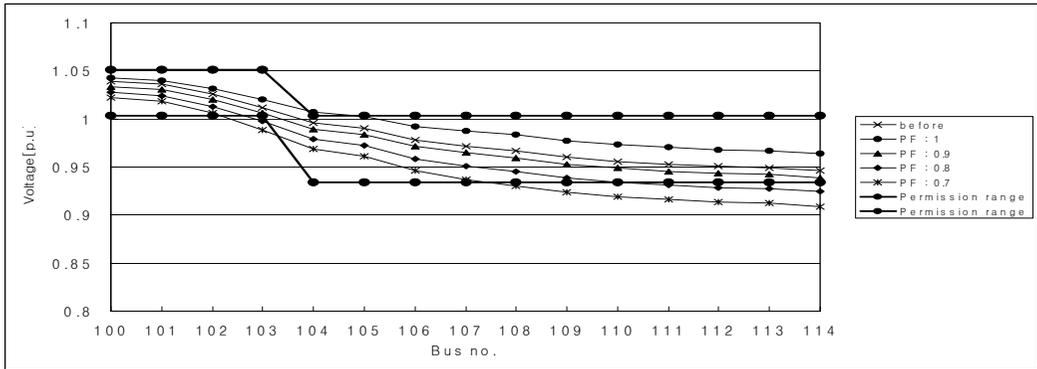
(e) end line connection, heavy load, 1.5[MW]connection



(f) end line connection, heavy load, 3[MW]connection



(g) middle line connection, heavy load, 1.5[MW]connection



(h) middle line connection, heavy load, 3[MW]connection

Fig. 11 B line voltage

3. 풍력발전설비가 연계된 계통의 과도상태 해석

변전소의 차단기(CB)나 배전선로의 보호기기 중 리클로우저는 전위와 후위 보호기기간에 보호협조를 유지하는 중추적 역할을 하고 있다. 리클로우저는 순간고장과 영구고장을 구별할 수 있는 기능을 갖고 있으며 순시동작과 지연 동작을 가지고 있기 때문에 배전선로에 설치되어 순간고장시 선로를 순시 차단한 후 자동으로 재폐로 시킬 수 있을 뿐만 아니라 영구고장시 미리 설정된 동작 시퀀스를 수행한 후 고장구간을 선로로부터 분리시킬 수 있다. 배전선로 사고의 70 ~ 80%가 일시적인 사고이며 이러한 순시적인 사고가 발생하는 경우 변전소의 CB나 리클로우저는 3 ~ 7사이클 정도에서 고장전류를 차단하게 되는 데 풍력발전시스템의 차단기가 트립되기 전에 재폐로가 이루어지면 풍력발전시스템으로부터 커다란 전류가 유입되어 전압이 원래대로 복귀하지 못하는 현상이 발생한다.

Fig. 12와 같은 배전선로의 ① ~ ⑤ 지점에서 사고가 발생했을 경우에 풍력발전기를 제거하지 않을 경우 전압이 원상회복될 수 있는 보호기기의 차단 시간(임계제거시간 : Critical clearing time, CCT)을 사고위치별로 Table 8에

나타내었다. Table 8을 보면 풍력발전시스템의 연계지점에 가까운 사고일수록 임계제거시간이 짧아 보호기기의 신속한 차단이 요구된다.

Table 8 Critical clearing time according to distribution line's fault location

| Fault location | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ |
|----------------|------|------|------|------|------|
| CCT | 49ms | 46ms | 45ms | 56ms | 73ms |

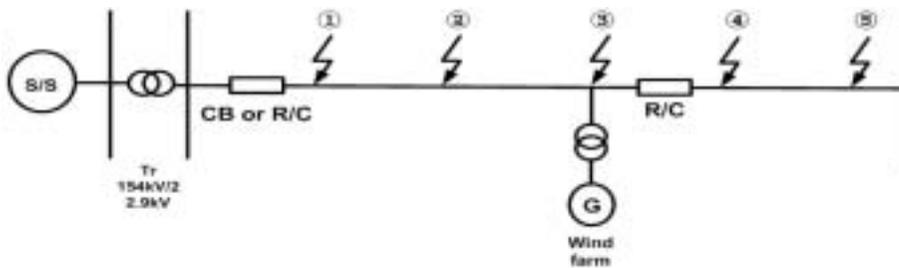


Fig. 12 Distribution line connected to wind power generation system



Fig. 12에서와 같이 3[MW]의 풍력발전시스템이 선로중간에 연계되는 경우 연계점 및 지점 ⑤에서 사고가 발생하는 경우의 전압파형을 Fig. 13과 Fig. 14에 표시하였으며 임계제거시간은 지점 ⑤ 사고인 경우 73[ms] 이며, 연계지점 사고의 경우 45[ms]로 연계점 사고가 더 가혹하다.

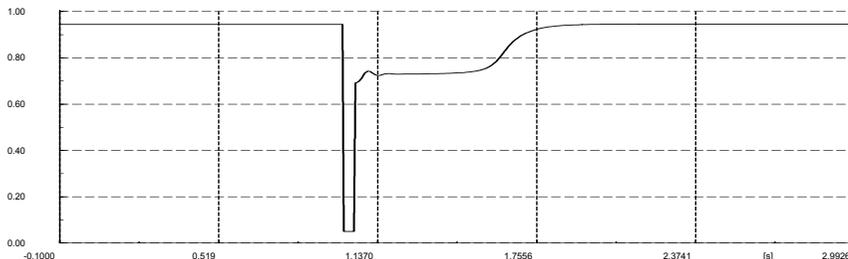


Fig. 13 Waveform during wind farm 's 3-phase fault

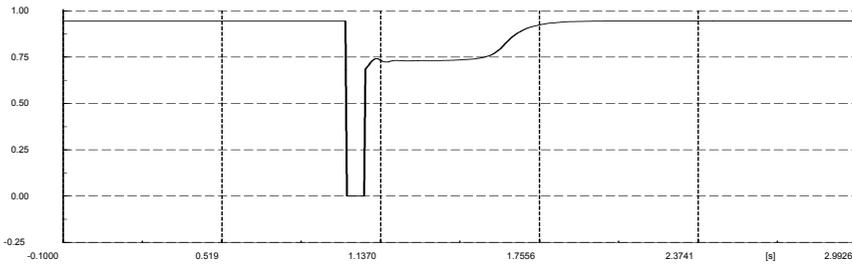


Fig. 14 Waveform during distribution-line's 3-phase fault

Fig. 12의 배전선로에서 ④나 ⑤지점에 1초에 3상사고가 발생하는 경우 보호기기인 리클로우저가 100[ms] 후에 동작하여 사고지점을 차단한다고 가정하는 경우에 대한 ①지점의 파형을 Fig. 15 ~ Fig. 17에 표시하였다. Fig. 15는 풍력발전시스템이 차단되지 않은 경우의 파형이며 Fig. 16은 리클로우저 동작이전에 풍력발전시스템 측의 차단기가 동작(사고발생 후 80[ms]에서 동작) 후 한 경우, Fig. 17은 리클로우저의 순시동작 후 풍력발전시스템 측의 차단기가 동작(사고발생 후 150[ms]에서 동작)한 경우에 해당한다. Fig. 15 ~ Fig. 17에서 보는 바와 같이 정상상태로의 전압회복여부는 풍력발전시스템의 차단기가 중요한 역할을 하며 보호기기의 순시동작 이전에 풍력발전시스템이 차단되어야 한다.

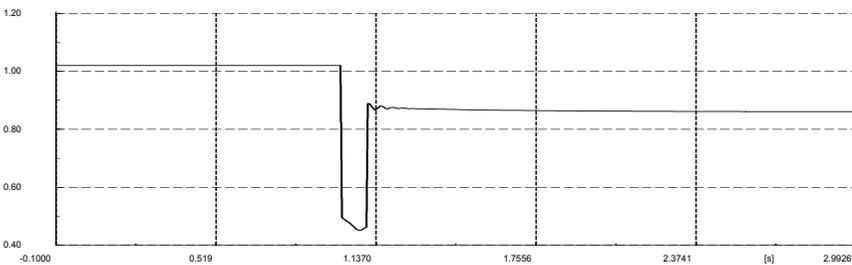


Fig. 15 Voltage waveform after recloser trip

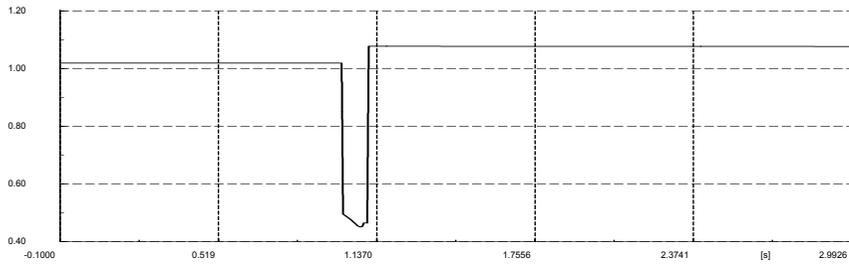


Fig. 16 Voltage waveform after wind power generation trip(80[ms])

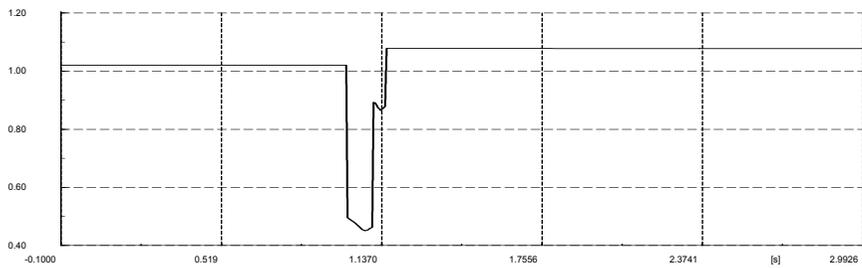


Fig. 17 Voltage waveform after wind power generation trip(150[ms])



IV. 결 론

본 논문에서는 계통해석 시뮬레이션 프로그램인 Digsilent power factory를 이용하여 풍력발전시스템이 배전선로에 연계되는 경우 배전선로 전압에의 영향을 분석하기 위해 1.5[MW]의 풍력발전시스템을 모델로 하여 연계되는 위치, 연계용량 및 풍력발전기 역률에 따른 전압을 분석하였으며 과도상태 해석으로서 배전선로 보호기기가 순간적인 고장전류를 차단하는 순시요소에 대해 배전선로가 정상상태의 전압회복여부를 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 풍력발전시스템이 도입됨에 따라서 전체적으로 전압이 감소하게 되며 이는 유도발전기로 구성된 풍력발전시스템이 무효전력을 흡수하기 때문이다.
- 2) 연계되는 풍력발전시스템의 용량이 커질수록 전압저하가 크게 나타난다.
- 3) 배전선로에 연계되는 풍력발전시스템의 용량이 커질수록 전압변동율과 전압강하율이 증가하는 경향이 있으며 전압변동율과 전압강하율 측면에서 변전소 전원단보다는 선로말단 지점에 연계하는 것이 바람직하다
- 4) 풍력발전시스템이 연계되어도 연계되지 않은 인접 선로의 전압에는 영향을 주지 않는다.
- 5) 풍력발전기의 운전역률에 따라 배전선로 전압상승 또는 전압강하가 발생하여 허용전압범위를 벗어날 우려가 있으므로, 선로의 전압 분포를 파악하여 풍력발전시스템의 연계지점을 결정하여야 한다.
- 6) 풍력발전시스템이 연계된 배전선로에 사고가 발생하는 경우 연계이전에 비해 보다 신속히 고장이 제거되어야 정상상태 전압으로 회복이 가능하다.
- 7) 사고발생시 정상상태 전압으로의 회복여부는 풍력발전시스템의 차단기가 중요한 역할을 하며 보호기기의 순시동작 이전에 풍력발전시스템이 차단되어야 한다.

참 고 문 헌

A. Bonhomme, D. Cortinas, F. Boulanger, 2001, "A New Voltage Control System to Facilitate the Connection of Dispersed Generation to Distribution Networks", IEE Conference, pp. 4.8

C. S. Demoulias, P. Dokopoulos, 1996, "Electrical Transients of Windturbines in a Small Power Grid", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 11, No. 3, pp. 636-642

IEA, 2001, Energy Policies of Countries 2001 Review.

JOG Tande and K Uhlen, 2001, "Wind Turbines in Weak Grids - Constraints and Solutions", IEE Conference, pp. 416

Nigel C. Scott, David J. Atkinson, and James E. Morrell, 2002, "Use of Load Control to Regulate Voltage on Distribution Networks with Embedded Generation", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 17, No. 2, pp. 510-515

S. Persaud, B. Fox and D. Flynn, 2000, "Impact of Remotely Connected Wind Turbines on Steady State Operation of Radial Distribution Networks", IEE Proc. Gener. Trans. Distrib. Vol. 147, No. 3, pp. 157-163.

Salman K. Salman, Ibrahim M. Rida, 2001, "Investigating the Impact of Embedded Generation on Realy Settings of Utilities' Electrical Feeders", IEEE Trans. Power Delivery. Vol. 16, No. 2, pp. 246 - 251

Salman K. Salman, Anita L. J. Teo, 2003, "Windmill Modelling Consideration and Factors Influencing the Stability of a Grid-Connected Wind Power-Based Embedded Generator"

Wind Force 12, 2004, European Wind Energy Association, Greenpeace, BTM Consult Aps.

대한전기학회, 2003. 3, 전기의 세계.



감사의 글

2년이라는 대학원 생활은 짧고도 긴 시간인 것 같습니다. 시작한지 엇그제 같은데 어느덧 지나버린 2년이라는 세월이 아직도 부족한 점이 많은 저에게는 너무나도 짧게만 느껴지고, 한편으론 배움의 과정에서 경험했던 많은 일들을 생각하면 결코 짧지만은 않은 시간인 것 같습니다. 그리고 대학원 생활에서 얻은 지식과 경험들은 저의 인생에서 소중한 밑거름이 될 것이라고 확신하며 이런 배움의 기회를 가질 수 있었던 것에 대해서 진심으로 감사합니다.

먼저 그동안 저를 성심으로 지도해 주시고 따뜻한 격려와 많은 가르침을 주신 김세호 교수님께 감사를 드립니다. 또한 대학원 생활동안 따뜻한 배려와 격려를 아끼지 않으신 좌종근 교수님, 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김호찬 교수님, 김일환 교수님께도 감사드립니다. 그리고 언제나 친형처럼 많은 관심을 갖고 조언해주신 김영환 과장님, 김문찬 과장님께도 감사드립니다.

함께 연구실에서 지내면서 많은 도움을 준 익준이, 재현이, 성민이도 너무나 고맙고, 언제나 도움을 청하면 자기 일처럼 나서서 도와준 부창진 선배님에게도 감사드립니다. 그리고 친구로서 대학원 생활을 함께한 태한이와 과사무실에서 많은 부분을 챙겨준 강시훈, 문태경, 이상민, 현여숙, 문원실에게도 감사의 마음을 전합니다.

마지막으로 오늘이 있기까지 변함없는 관심과 헌신적인 사랑으로 돌보아 주신 부모님과 형, 동생에게도 고개 숙여 감사드리며 이 논문을 드립니다.

비록 석사과정은 끝났지만 배움에 있어서는 시작이라고 생각으로 앞으로도 계속 노력하고 발전하는 사람이 되도록 노력하겠습니다.

2005년 6월
나경윤 올림