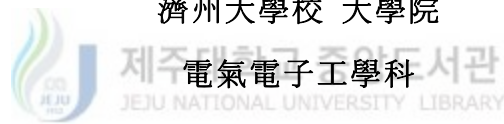


碩 士 學 位 論 文

풍력발전시스템이 연계된  
계통의 과도안정성 고찰



梁 益 準

2004年 12月

# 풍력발전시스템이 연계된 계통의 과도안정성 고찰

指導教授 金 世 鎬

梁 益 準

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



梁益準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

2004年 12月

# Investigation of Transient Stability for the Network Connected with Wind Power Generation Systems

Ik-Jun Yang  
(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

2004年 12月

# 목 차

LIST OF FIGURES .....	i
LIST OF TABLES .....	iii
SUMMARY .....	iv
I. 서 론 .....	1
II. 과도안정성에 대한 이론적 고찰 .....	3
III. 시뮬레이션 .....	8
IV. 시뮬레이션 결과 및 분석 .....	17
V. 결론 .....	22
참고문헌 .....	23



## LIST OF FIGURES

Fig. 1 Generator, motor and break mode of asynchronous machine on the torque/slip curve. ....	5
Fig. 2 Stable generating mode. ....	6
Fig. 3 Unstable generating mode. ....	6
Fig. 4 Variation of electrical torque and mechanical torque following 3-phase short-circuit. ....	7
Fig. 5 Variation of rotor speed following a 3-phase short-circuit. ...	7
Fig. 6 Schematic diagram of the network connected with wind power system. ....	9
Fig. 7 Induction generator model. ....	10
Fig. 8 3-phase short-circuit. ....	11
Fig. 9 2-phase to ground fault. ....	11
Fig. 10 2-phase short-circuit. ....	12
Fig. 11 1-phase to ground fault. ....	12
Fig. 12 Effect of faults on the wind farm CCT. ....	12
Fig. 13 Fault at the wind farm. ....	13
Fig. 14 Fault at the center of the line. ....	13
Fig. 15 Fault at the end of the line. ....	14
Fig. 16 Fault at the load. ....	14
Fig. 17 Effect of fault locations on the wind farm CCT. ....	14
Fig. 18 Variation of wind farm terminal voltage following 3-phase	

short-circuit(fault duration 165[ms]). ..... 15

Fig. 19 Variation of wind farm terminal voltage following 3-phase  
short-circuit(fault duration 170[ms]). ..... 16



# LIST OF TABLES

Table 1 Parameter of model network. ....	8
Table 2 Parameter of induction generator. ....	10
Table 3 Effect of generation capacity on the wind farm CCT .....	17
Table 4 Effect of load capacity on the wind farm CCT .....	18
Table 5 Effect of operating power factor on the wind farm CCT .....	19
Table 6 Effect of load power factor on the wind farm CCT .....	19
Table 7 Effect of line length on the wind farm CCT .....	20
Table 8 Effect of inertia on the wind farm CCT .....	21



## SUMMARY

Generation of electricity using wind power has received considerable attention worldwide in recent years. In order to investigate the impacts of the integration of wind farm into utilities' network, various windmill models have been developed. One such impact is related to the critical clearing time (CCT) of the wind power generators.

This paper reports investigation into the factors that influence the transient behavior of the wind power generators following network fault conditions. It is shown that wind farm CCT can be affected by various factors contributed by the host network. Such factors include capacity of wind power, capacity of load, power factor of the wind generator, power factor of the load, length of the interfacing line, the moment of inertia. Results obtained from several case studies are presented and discussed. This investigation is conducted on a simulated grid-connected wind farm using Digsilent Power Factory.



# I. 서론

청정에너지 중 풍력발전시스템은 전 세계적으로 가장 많은 관심을 받고 있으며, 유럽 풍력에너지협회의 보고서에 따르면 2020년에는 전 유럽 전력수요의 약 10%를 풍력발전기가 담당할 것이며 2040년 까지 설치용량의 증가율은 10~40%를 지속할 것으로 예상되고 있다(EWEA, 2001),(허종철, 2001).

우리나라에서도 풍력발전에 대한 관심은 점점 증가하고 있다. 제주도의 경우 행원지역과 한경면 용당리에 풍력발전 단지가 조성되어 상업운전이 이루어지고 있으며 성산일대에 추가로 70[MW]용량의 풍력발전단지가 조성될 예정이다.

풍력발전단지는 규모가 커짐에 따라 계통에 대한 영향을 경감시키기 위해 기존의 배전선로의 말단이나 중간에서 계통과 연계하던 방식에서 벗어나 전용선을 이용하여 직접 배전용 변전소로 발전전력을 송출하고 있으나 용량이 증가함에 따라 계통에 미치는 영향은 점점 커지게 되어 계통 사고 등에 대한 대책이 충분하게 세워져 있는가를 검토할 필요가 있다.

풍력발전이 연계된 계통에서는 전압변동, 역률변화 등의 문제들이 지적되고 있으며, 계통에서 풍력발전의 영향이 커짐에 따라 사고발생에 따른 과도안정성의 연구들이 지속적으로 수행되고 있다(Salman & Teo, 2001). 대부분의 상업용으로 운전되고 있는 대용량의 풍력발전기는 유도발전기가 주로 사용되고 있으며 유도발전기의 경우 동기발전기에 비하여 가격이 저렴하고 기계적 강도가 강하지만 과도상태에서 안정성이 약하기 때문에 현재 풍력발전이 연계된 계통의 과도안정성에 관한 연구들은 대부분 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 풍력발전이 연계된 계통을 모델링하고, 그 계통에서의 사고발생 후에 정상상태로 복귀될 수 있는 최대의 시간(임계제거시간)을 비교함으로써 안정성을 판별하는 수준에서 진행되고 있다(A. R. Katancevic, 2003), (Demoulias

& Dokopoulos, 1996).

본 논문에서는 풍력발전시스템이 연계된 계통에 대해 전력계통 시뮬레이션 프로그램인 Digsilent Power Factory를 이용하여 계통을 모델링하고, 계통에 사고가 발생했을 경우에 대해 프로그램 상에서 전압과형을 비교해봄으로써 과도상태를 해석해 보았다. 우선 이론적 부분에서 동기발전기와 유도발전기의 경우에 대해 과도안정성의 차이를 살펴보고, 현재 유도발전기로 구성되어 운전하고 있는 계통을 구성하여 계통에서 발생될 수 있는 사고(3상 단락, 2상 지락, 2상 단락, 1상 지락사고)들에 대하여 비교하였으며, 사고의 위치(풍력발전단지, 전용선의 중간지점, 전용선의 말단지점, 부하측 선로)들의 경우에 대하여 비교해봄으로써 가장 가혹하다고 판정되는 사고와 사고지점을 선정하였다. 그리고 풍력발전이 연계된 계통의 과도안정성에 영향을 미칠 수 있는 요소들 즉, 풍력발전용량, 부하용량, 풍력발전기의 역률, 부하의 역률, 전용선의 길이, 풍력발전기의 관성모멘트의 변화에 대하여 임계제거시간을 비교함으로써 이러한 요소들의 변화가 계통의 과도안정에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

## II. 과도안정성에 대한 이론적 고찰

### 1. 전력계통의 과도안정도

계통에서 과도안정도는 부하가 급격하게 변동하거나 계통에 사고가 발생하는 경우 과도적인 상태에서의 전력-상차각 특성을 시간적인 요소를 고려하면서 결정된다. 정상시의 운전에서는 발전기나 전동기의 입·출력은 서로 같고 내부전압간의 상차각은 송전전력과 계통 임피던스에 의해서 정해진 값을 유지하면서 운전된다. 이 때 부하가 급변하거나 고장이 일어나서 계통의 평형상태가 깨지게 되면 발전기와 전동기 간의 입·출력에 차이가 생기고 이 차이에 비례해서 회전자가 가속 또는 감속하게 된다. 그 결과 운전 상태는 변화가 일어나기 전의 평형상태로부터 변화 후의 새로운 평형상태로 옮겨가서 안정하게 된다. 그러나 실제로는 발전기나 전동기에 관성이 있기 때문에 새로운 평형점에 이동한 순간 즉시 그 점에서 안정되는 것이 아니고 한 동안 평형점을 중심으로 상차각이 동요하게 되는 것이 보통이다. 만일 이 때 상차각의 크기가 동요 중에 과도안정 극한전력 이상의 불안정한 범위로 벗어나면 발전기나 전동기는 탈조하게 되어 안정성을 유지하지 못하게 된다.

### 2. 기기의 과도안정도

#### 1) 동기기의 과도안정도

동기기에 대한 과도안정도의 동요방정식(swing equation)은 식 (1)과 같다.

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} = \frac{\omega_s}{2H}(P_m - P_e) \quad (1)$$

여기서

$\phi$ :상차각,  $\omega_s$ :동기각속도

$P_m$ :기계적 입력,  $P_e$ :전기적출력

$H$ :관성정수

이다.

동요방정식에서 보는바와 같이 회전자에 우변과 같은 입·출력의 차가 생겼을 경우 좌변에서와 같이 상차각이 변동되며, 과도안정성은 시간에 따른 상차각의 추이를 고찰함으로써 판별할 수 있다.

부하가 급변하거나 사고가 발생하는 경우 기계적인 입력은 일정하지만 전기적인 출력은 감소하게 되어 상차각은 가속되면서 동요가 발생하지만 새로운 평형점에 도달하는 경우 계통은 안정하다고 한다. 그러나 사고지속시간이 길어져 계통의 동요가 계속되어 새로운 평형점에 도달하지 못하면 더 이상 동기를 유지하지 못하므로 계통은 불안정하게 된다. 따라서 안정성을 유지할 수 있는 최대한의 상차각 범위 내에서 차단기 등 보호시스템을 통하여 고장을 제거하여야 하며 이때의 위상각을 임계 제거위상각(Critical Clearing Angle ; CCA), 시간을 임계 제거시간(Critical Clearing Time ; CCT)이라 한다.

## 2) 유도기의 과도안정도

유도기의 경우 동기기와는 달리 계자자속을 발생시키는 계자권선이 설치되어 있지 않아 외부로부터 계자전류를 공급받아야 한다. 또한 Fig. 1에서와 같이 회전자의 속도 범위에 따라 플러깅 작용( $1 < slip$ ), 전동기 작용( $0 < slip < 1$ ), 발전기 작용( $slip < 0$ )의 세 가지 동작으로 구분되며, 풍력발전의 경우 회전자의

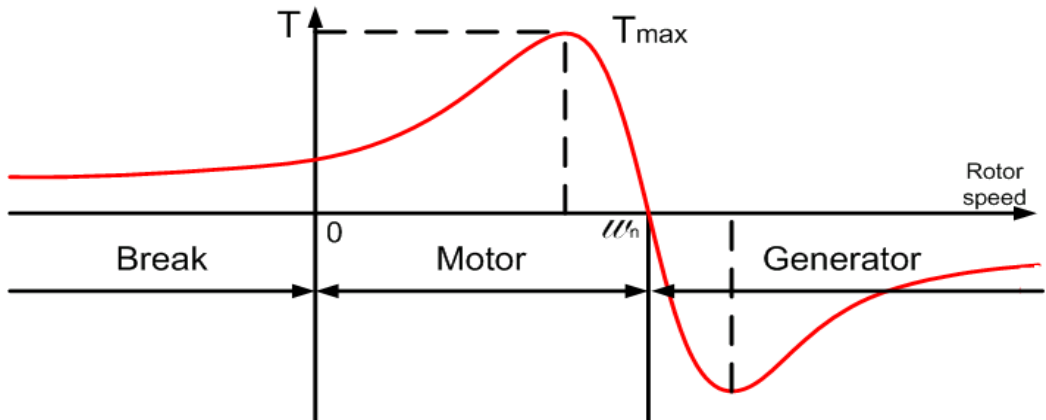


Fig. 1 Generator, motor and break mode of asynchronous machine on the torque/slip curve.

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.

유도기에서 토크는 전압의 제곱에 비례하여 식(2)로 표현된다.

$$T_e \propto V^2 \quad (2)$$

토크는 사고의 조건에 따라 변하게 되며 회전자의 속도는 식 (3)의 동요방정식(swing equation)에 의해 특성지어진다.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_m - T_e}{J} \quad (3)$$

여기서

ω: 회전자 속도, J: 관성모멘트, T<sub>m</sub>: 기계적 토크, T<sub>e</sub>: 전기적 토크 이다.

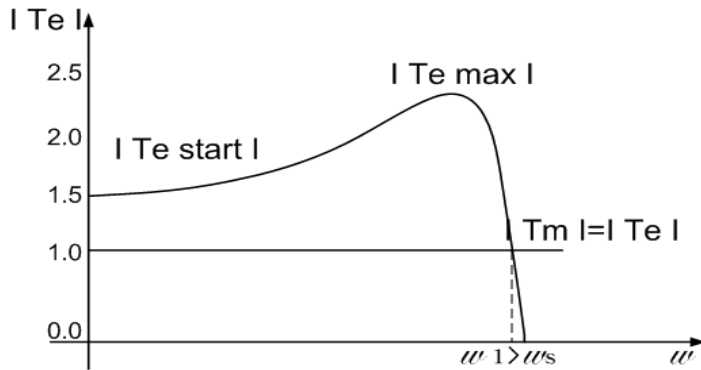


Fig. 2 Stable generating mode.

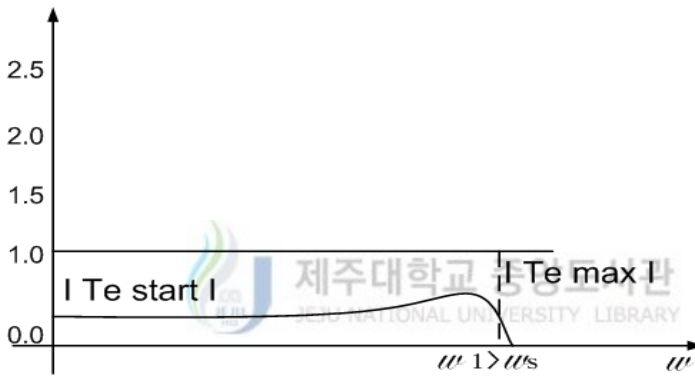


Fig. 3 Unstable generating mode.

정상상태에서는 Fig. 2에서와 같이 전기적 토크가 큰 값을 갖게 되며 기계적 토크와 전기적 토크의 크기가 같은 지점에서 등속도로 운전하게 된다. 하지만 사고가 발생하여 단자전압이 낮아지면 식(2)에 의해 전기적 토크가 감소하게 되고 식(3)에 의해 회전자는 가속하게 된다. 사고가 제거되어 계통전압이 회복되면 새롭게 자장이 형성되며 이 때 새로 형성된 전기적 토크가 기계적 토크 보다 크다면 회전자는 다시 감속하여 정상상태로 회복하겠지만 Fig. 3에서와 같이 전기적 토크가 기계적 토크보다 작다면 회전자는 감속하지 못한다. 따라서 사고가 제거되어야 하는 최대한의 시간이 존재하게 되며 이때의 시간을 유도기의 임계 제거시간이라고 한다. 안정영역 내에서 사고를 제거했

을 때 전기적 토크와 기계적 토크의 파형을 Fig. 4에 나타내었고, 이때 회전자의 가속파형을 Fig. 5에 나타내었다(Aleksandar, 2003).

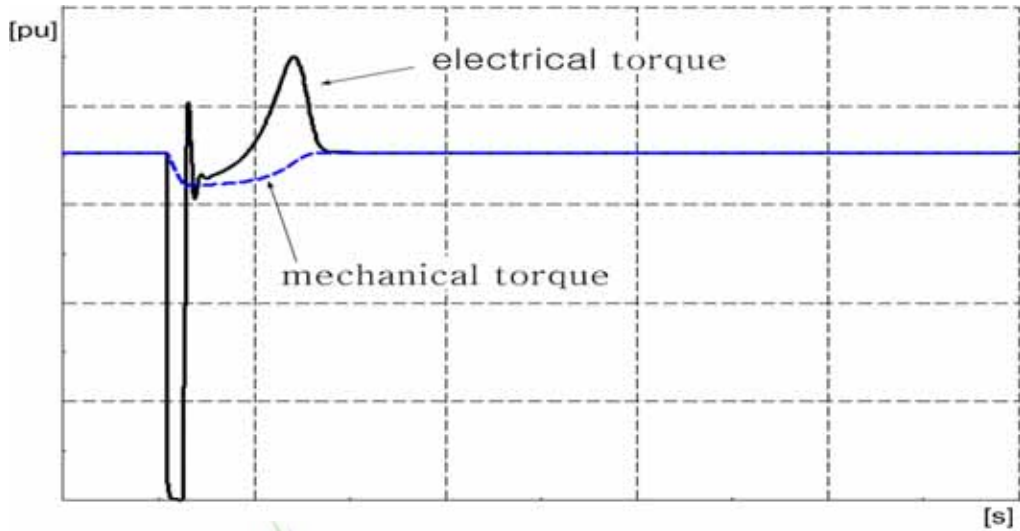


Fig. 4 Variation of electrical torque and mechanical torque following 3-phase short-circuit.

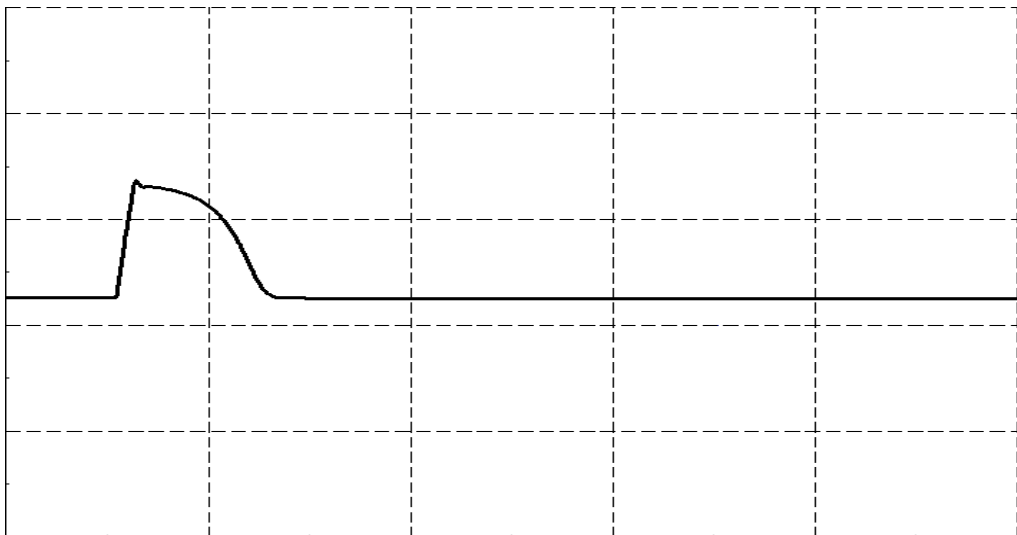


Fig. 5 Variation of generator rotor speed following a 3-phase short-circuit.

### Ⅲ. 시뮬레이션

유도발전기로 구성된 풍력발전시스템에 대해 풍력발전단지의 22.9[kV]의 모선에 3상 단락사고를 주었을 때의 과도 상태를 해석해 봄으로써 계통의 임계 제거시간을 고찰하였다.

#### 1. 풍력발전이 연계된 계통의 모델

본 논문에서 풍력발전이 연계된 계통의 모델은 Fig. 7에 나타내었고 풍력발전단지의 기본 데이터는 Table 1에 나타내었다. 풍력발전의 규모는 약 10[MW]규모의 풍력발전단지 5개가 22.9[kV]의 전용선로를 통하여 변전소에 연계된 형태이고 전용선로는 ACSR 160[mm<sup>2</sup>]로 그 선로임피던스 값은 Table 1에 나타내었다. 각 풍력발전단지는 660[kW]용량의 발전기 15대가 병렬로 연결되어 약 10[MW]로 구성된 형태이며 변전소 내의 부하용량은 50[MW]로 하였다.

Table 1 Modeling parameters.

Capacity of the generator (Power factor)	Line (Between wind farm and station)	Capacity of the load (Power factor)
660[kW]× 15 (0.9)	ACSR(160[mm <sup>2</sup> ]) 10[km] R=0.2024[Ω/km] X=0.3891[Ω/km]	50[MW] (0.9)



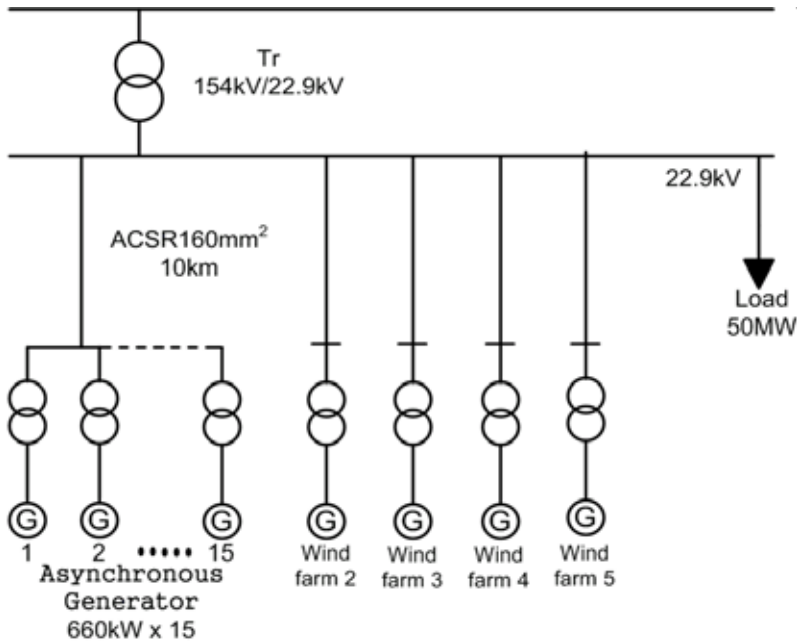


Fig. 6 Schematic diagram of the network connected with wind power system.



## 2. 발전기 모델

일반적으로 풍력발전기가 정격출력을 내는 경우는 거의 없지만 본 논문에서는 일정하게 정격출력을 내는 것으로 가정하였다. 이는 풍력발전이 연계된 계통에서 풍력발전이 담당하는 비중이 클 때가 사고발생시 충격이 가장 크기 때문이다. 또한 유도발전기는 계통에서 무효전력을 공급받기 때문에 자체적으로 커패시터를 통해 단계적으로 역률을 보상하게 된다. 따라서 출력에 따라 역률이 변화하지만 여기서는 항상 정격출력에 따른 일정한 역률을 내는 것으로 가정하였다. 풍력발전기 모델은 행원에 설치된 Vestas V47-660[kW]모델을 사용하였으며 등가모델을 Fig. 8에 나타내었고, 발전기 정수는 Table 2에 나타내었다(Vestas, 2000), (Digsilent, 2003).

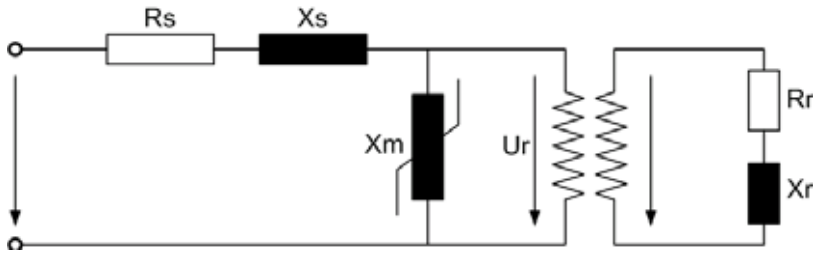


Fig. 7 Induction generator model.

Table 2 Generator parameters.

Rated power output	660[kW]
Voltage	690[V]
Number of poles	4
Rated speed	1890[rpm]
Power factor	0.9
Efficiency	95[%]
Rotor inertia	29[kgm <sup>2</sup> ]
Stator resistance( $R_s$ )	0.0048[ $\Omega$ ]
Stator reactance( $X_s$ )	0.0816[ $\Omega$ ]
Rotor resistance( $R_r$ )	0.0040[ $\Omega$ ]
Rotor reactance( $X_r$ )	0.108[ $\Omega$ ]
Magnetizing reactance( $X_m$ )	3.72[ $\Omega$ ]

### 3. 사고의 종류 및 사고지점

#### 1) 사고의 종류

과도안정성을 평가하기 위한 사고의 종류를 선정하기 위해서 3상 단락, 2상 지락, 2상 단락, 1상 지락사고를 풍력발전단지 측에 발생시켰고 이때 각 위치

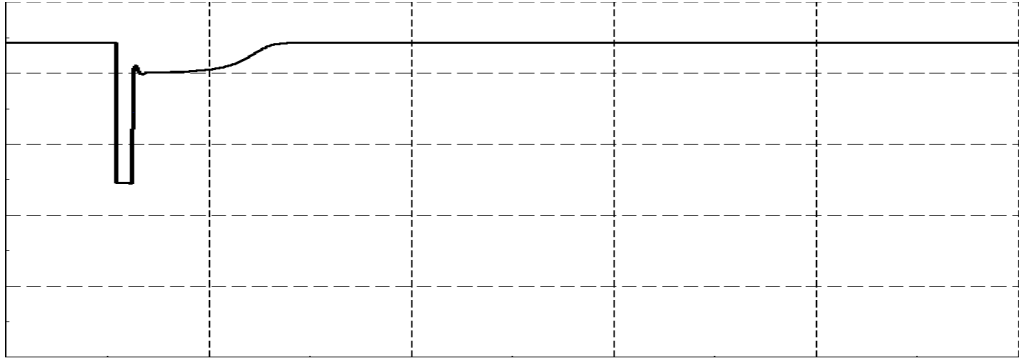


Fig. 8 3-phase short-circuit.



Fig. 9 2-phase to ground fault.

에서 임계제거시간에 대한 시뮬레이션 파형을 Fig. 8~Fig. 11에 나타내었으며 각 사고에 대한 임계제거시간을 Fig. 12에서 비교하였다. Fig. 12를 보면 사고들 중에서 3상 단락사고가 임계제거시간이 가장 짧은 것을 알 수 있다. 때문에 사고의 종류는 3상 단락사고를 가장 가혹한 사고로 판정하여 이 후 과도안정성을 평가하기 위한 사고를 3상 단락사고로 선정하였다.

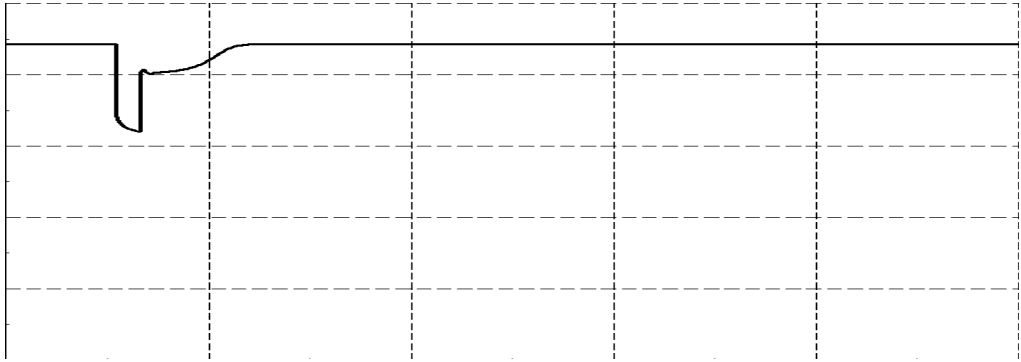


Fig. 10 2-phase short-circuit.

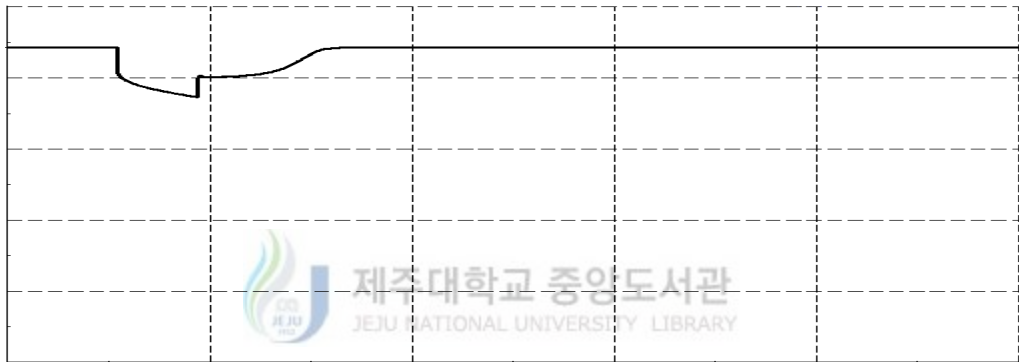


Fig. 11 1-phase to ground fault.

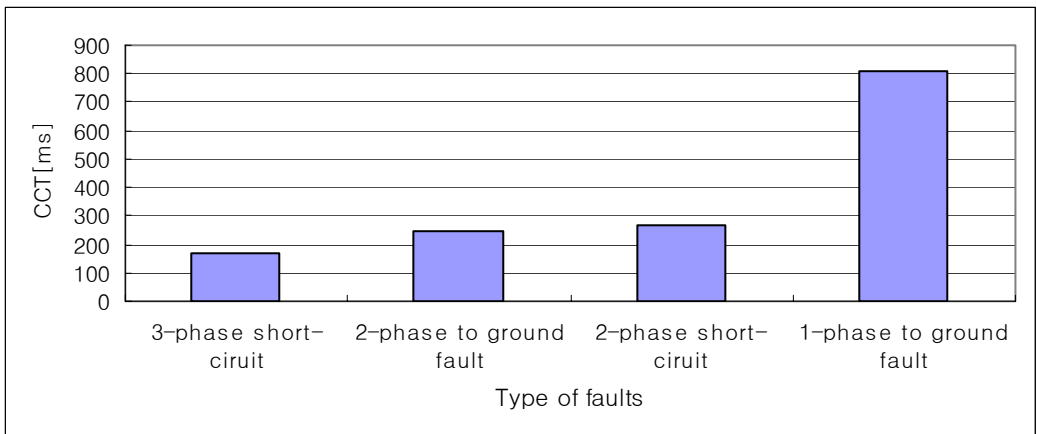


Fig. 12 Effect of type of faults on the wind farm CCT.

## 2) 사고지점

가장 가혹한 사고의 위치를 선정하기 위해서 3상 단락사고를 풍력발전단지, 전용선의 중간지점, 전용선의 말단지점, 부하측 선로에서 발생시켰고 이때 각 위치에서 임계제거시간에 대한 시뮬레이션 파형을 Fig. 13~Fig. 16에 나타내었으며 각 위치에서 임계제거시간을 Fig. 17에서 비교하였다. Fig. 17에서 보면 풍력발전단지에서의 사고가 임계제거시간이 가장 짧은 것을 알 수 있다. 때문에 풍력발전단지 측의 사고가 가장 가혹한 사고의 위치로 판정하였고 이후 시뮬레이션에서의 사고를 풍력발전단지에서의 3상 단락사고로 선정하였다.



Fig. 13 Fault at the wind farm.

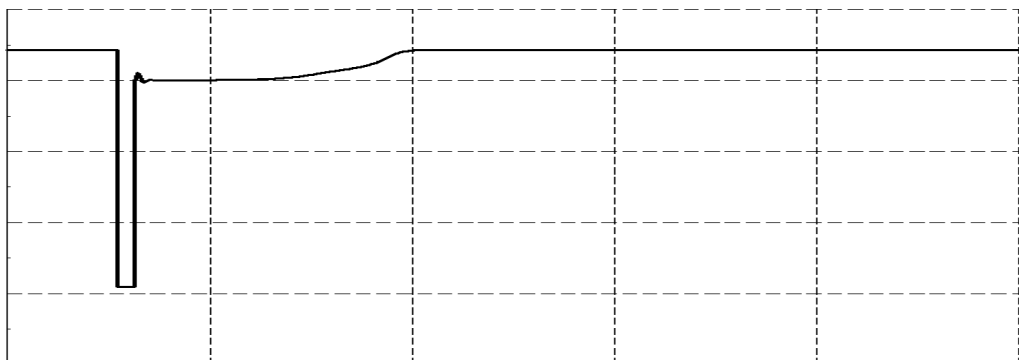


Fig. 14 Fault at the center of the line.

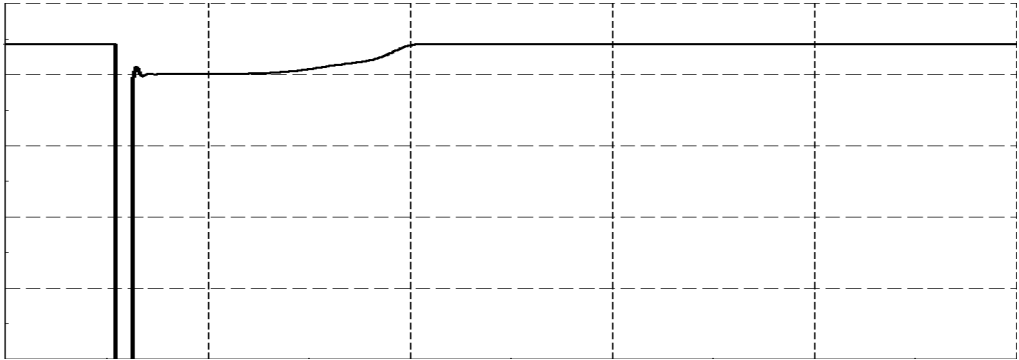


Fig. 15 Fault at the end of the line.

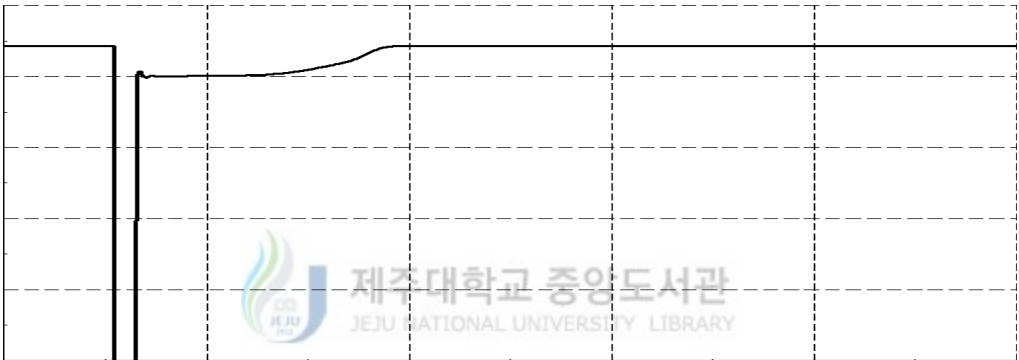


Fig. 16 Fault at the load.

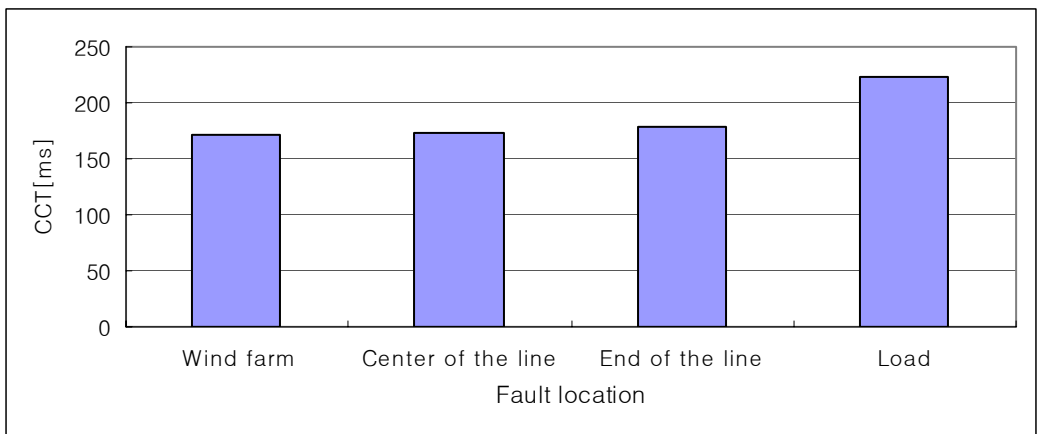


Fig. 17 Effect of type of fault locations on the wind farm CCT.

#### 4. 임계제거시간의 평가

본 논문에서는 풍력발전단지에 3상 단락사고를 주고, 사고가 제거된 후 다시 정상상태로 복귀될 수 있는가의 여부를 풍력발전단지의 전압과형으로 판별하였으며 이때 정상상태로 복귀될 수 있는 사고의 최대지속시간을 임계시간이라 하였다. Fig. 18은 계통에 10[MW]의 풍력발전단지가 연계되어 있는 시스템에서 풍력발전단지에 3상 단락사고를 165[ms] 지속시켰을 때 풍력발전단지의 전압과형이고, Fig. 19는 사고가 170[ms] 지속되었을 때의 전압과형이다. Fig. 18은 사고제거 후 전압이 다시 정상상태로 회복되지만 Fig.19에서는 사고제거 후에도 전압이 점점 강하하여 정상상태로 회복되지 못하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경우 임계제거시간은 165[ms]로 평가하였다. 시뮬레이션에서 Simulation Step Size는 1[ms]로 하였으며, Simulation Time은 5[s]로 하였다.



Fig. 18 Variation of wind farm terminal voltage following 3-phase short-circuit(fault duration 165[ms]).

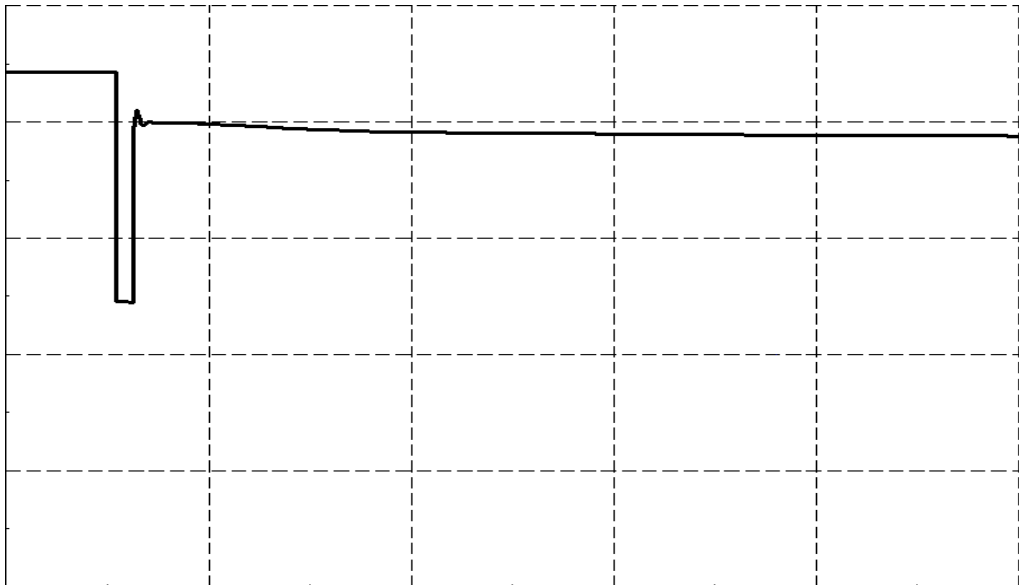


Fig. 19 Variation of wind farm terminal voltage following 3-phase short-circuit(fault duration 170[ms]).



## IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

풍력발전이 연계된 계통에서 사고가 발생했을 경우 계통의 과도안정도에 영향을 미칠 수 있는 요소들에 대하여 (1)변전소에 연계된 풍력발전용량, (2) 변전소의 부하용량, (3)풍력발전기의 역률, (4)부하의 역률, (5)전용선의 길이, (6)풍력발전기의 관성모멘트의 변화의 순서로 분석하였다.

### 1. 풍력발전용량의 변화에 따른 임계제거시간의 변화

변전소에 연계된 풍력발전용량을 10, 20, 30, 40, 50[MW]로 변화시켜 임계 제거시간을 비교하였다. 이때 부하용량은 50[MW], 부하역률은 0.9, 풍력발전기역률은 0.9, 전용선의 길이는 10[km], 풍력발전기의 관성모멘트는 29[kgm<sup>2</sup>]로 하였다. 풍력발전 용량의 변화에 대한 계통의 임계제거시간의 변화는 Table 3에 나타내었으며, Table 3의 결과를 보면 풍력발전의 용량이 증가할수록 임계제거시간은 짧아지는 것을 알 수 있다. 이것은 계통에서 풍력발전이 담당하는 비중이 증가함에 따라 계통의 안정도는 악화되며 풍력발전이 계통에 연계될 수 있는 용량에는 한계가 있다는 것을 의미한다.

Table 3 Effect of wind power capacity on the wind farm CCT.

Capacity of the wind power[MW]	CCT[ms]
10	165
20	125
30	90
40	65
50	45

## 2. 부하용량의 변화에 따른 임계제거시간의 변화

풍력발전이 연계된 변전소의 부하를 30, 40, 50, 60, 70[MW]로 변화시켜 임계제거시간을 비교하였다. 부하의 용량변화에 따른 임계제거시간의 변화는 Table 4에 나타내었으며, Table 4의 결과를 보면 부하의 용량이 증가할수록 임계제거시간은 짧아지는 것을 알 수 있다. 이것은 부하용량이 증가할수록 부하전류가 커지게 되고 사고발생시 고장전류가 커지게 되어 계통에서 사고에 대한 충격이 커지기 때문이다.

Table 4 Effect of load capacity on the wind farm CCT.

Capacity of the load[MW]	CCT[ms]
30	185
40	175
50	165
60	155
70	140

## 3. 풍력발전기 역률의 변화에 따른 임계제거시간의 변화

Table 5는 풍력발전기의 역률을 지상 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1로 변화시켜 임계제거시간을 비교한 것이다. Table 5의 결과를 보면 발전기의 역률이 낮아질수록 임계제거시간이 길어지는 것을 볼 수 있는데, 이것은 발전기의 역률이 높아지게 되면 단자전압이 상승하고 그만큼 발전기에 저장된 에너지가 높게 되어 사고발생시 충격이 커지게 되기 때문인 것으로 사료된다. 하지만 발전기의 역률이 낮아지게 되면 무효전력이 증가하게 되고 선로에서 전력손실이 많아지기 때문에 풍력발전단지를 설계할 때 발전기의 역률문제는 전용선의 문

제와 동시에 고려되어야 한다.

Table 5 Effect of operating power factor on the wind farm CCT.

Power factor of the wind generator	CCT[ms]
0.8	195
0.85	180
0.9	165
0.95	150
1	135

#### 4. 부하역률에 따른 임계제거시간의 변화

풍력발전이 연계된 계통에서 부하의 역률이 0.8, 0.85, 0.9, 0.95, 1인 경우의 임계제거시간을 비교하였고 그 결과를 Table 6에 나타내었다. Table 6의 결과를 보면 부하의 역률이 낮아질수록 임계제거시간이 짧아지는 것을 볼 수 있으며, 이는 계통에서 부하역률이 낮아지면 부하의 전류가 증가하게 되고 이로 인해 사고발생시 고장전류가 커지기 때문이다.

Table 6 Effect of load power factor on the wind farm CCT.

Power factor of the load	CCT[ms]
0.8	145
0.85	155
0.9	165
0.95	180
1	205

## 5. 전용선의 길이에 따른 임계제거시간의 변화

전용선의 길이가 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30[km]인 경우에 대하여 임계제거시간을 비교해 보았으며 그 결과를 Table 7에 나타내었다. Table 7의 결과를 보면 전용선의 길이가 길어질수록 임계제거시간이 짧아지는 것을 볼 수 있으며, 이는 전용선의 길이가 길어짐에 따라 선로의 임피던스가 증가하게 되고 사고제거 후 정상상태로 복귀하기 위한 모선의 전력공급을 지연시키기 때문인 것으로 사료된다.

Table 7 Effect of the line length on the wind farm CCT.

Length of the line[km]	CCT[ms]
0	380
1	350
5	250
10	165
15	105
20	65
25	35
30	10

## 6. 풍력발전기의 관성모멘트에 따른 임계제거시간의 변화

풍력발전기의 관성모멘트를 9, 19, 29, 39, 49, 59[kgm<sup>2</sup>]인 경우에서 임계제거시간을 비교하였으며, 그 결과를 Table 8에 나타내었다. Table 8의 결과를 보면 관성모멘트가 커질수록 임계제거시간은 길어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 관성모멘트가 클수록 회전자의 가속을 지연시키기 때문이며 용량이 큰 발

전기일수록 관성모멘트가 크게 제작되어야 한다.

Table 8 Effect of inertia on the wind farm CCT.

The moment of inertia[kgm <sup>2</sup> ]	CCT[ms]
9	45
19	100
29	170
39	230
49	290
59	350

## IV. 결 론

풍력발전이 연계된 계통에서 과도안정도에 영향을 미칠 수 있는 요소들에 대하여 분석해 보았다. 발전기의 과도안정도의 평가를 위해 발전기의 동요방정식을 이용하였으며, 계통해석 프로그램은 Digsilent Power Factory를 이용하여 가장 가혹한 사고로 평가되는 풍력발전단지에서의 3상 단락사고에 대하여 시뮬레이션 하였다. 풍력발전이 연계된 계통에서 계통의 과도안정도에 영향을 미칠 수 있는 요소들은 (1)변전소 내에서 풍력발전용량, (2)변전소의 부하용량, (3)풍력발전기의 역률, (4)부하의 역률, (5)전용선의 길이, (6)풍력발전기의 관성모멘트의 변화의 순서로 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 변전소의 풍력발전용량이 증가할수록 임계제거시간은 짧아진다.
- 2) 변전소의 부하용량이 증가할수록 임계제거시간은 짧아진다.
- 3) 풍력발전기의 역률이 낮아질수록 임계제거시간은 길어진다.
- 4) 부하의 역률이 낮아질수록 임계제거시간은 길어진다.
- 5) 전용선의 길이가 길어질수록 임계제거시간은 짧아진다.
- 6) 풍력발전기의 관성모멘트가 커질수록 임계제거시간은 길어진다.

## 참 고 문 헌

A. R. Katancevic, 2003, Transient and Dynamic Stability on Wind Farms, pp.1~98.

C. S. Demoulias, P. Dokopoulos, 1996, Electrical Transients of Wind turbines in a Small Power Grid, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 11, No. 3, pp.636~642.

Digsilent GmbH, 2003, Digsilent PowerFactory reference manual, Technical Ref. pp.67~74.

European Wind Energy Association(EWEA). EWEA Publications, 2001, pp. 1~21.

허종철, 2001, 제주도내 풍력자원 조사에 관한 연구용역.

M. Helmer, 2001, Protection and influence of wind farms from wind turbines and grid point of view, Proceeding of the European Wind Energy Conference, Denmark, pp.1162~1165.

S. K, Salman, A. L. J. Teo, 2001, Improvement of Fault Clearing Time of Wind Farm Using Reactive Power Compensation, pp.1~6

Vestas, 2000, Electrical operating and maintenance manual.

## 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 과장님께도 감사드립니다.

2년간 함께 연구실에서 지내면서 많은 도움을 준 경윤이에게 너무나 고맙고, 언제나 도움을 청하면 자기 일처럼 나서서 도와준 부창진 선배님에게도 감사드립니다. 그리고 친구로서 항상 기쁨과 슬픔을 함께해준 태한이와 과사무실에서 많은 부분을 챙겨준 강시훈, 문태경, 현여숙, 문원실에게도 감사의 마음을 전합니다.

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

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

2004년 12월  
양익준 올림