

[논문] 한국태양에너지학회 논문집
Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol. 23, No. 3, 2003

풍력발전시스템이 연계된 계통의 과도상태해석

김세호*

* 제주대학교 전기전자공학부(hosk@cheju.ac.kr)

Transient State Analysis of Network Connected to Wind Generation System

Kim, Se-Ho*

* Faculty of Electrical & Electronic Engineering, Cheju National University

Abstract

Generator for wind power can be either synchronous or asynchronous (induction) types. Induction and synchronous generators behave in a different way when subjected to severe faults. Induction generators does not have an angle stability limit and short circuit in the neighborhood of an induction generator causes the demagnetization of the machine. When the fault is cleared, the voltage raises slowly, while the grid contributes with reactive power to the generator and the magnetic flux recovers. On the other hand in the synchronous generators the recovery of the voltage is immediate, since the excitation of the rotor angle comes from an independent circuit. This paper shows the result of the transient state analysis in the network connected to wind generation system. Several case studies have been conducted to determine the effect of the clearing time of a fault on the network stability. It has been found that the critical clearing time can be as low as 61ms in the case of induction generator compared to 370ms in the case of synchronous generator.

Keywords : 과도안정도(Transient stability), 유도발전기(Induction generator), 풍력발전시스템(Wind generation system), 임계제거시간(Critical clearing time)

1. 서 론

청정에너지 중 풍력발전시스템은 전 세계적으로

로 보급이 확대되고 있고 2020년에는 전 유럽 에너지수요의 약 10%를 풍력발전기가 담당할 것이며 이러한 설치용량의 증가율은 다른 어느 에너지

보다 성장률이 가장 빠름을 주장하는 보고서가 발표되어 있다.⁽¹⁾

우리나라에서도 풍속자원이 풍부한 제주도 행원 지역에 풍력발전 단지를 조성하여 상업운전이 이루어지고 있어 풍력에 대한 관심이 점차 고조되고 있으나 최근에 이르러서야 풍력발전시스템의 출력특성에 대한 연구가 이루어지고 있다.⁽²⁾

풍력발전단지는 계통의 영향을 경감시키기 위해 기존의 배전선로의 말단이나 중간에서 계통과 연계하던 방식에서 벗어나 전용선을 이용하여 직접 배전용 변전소로 발전전력을 송출하고 있으나 출력이 증가함에 따라 계통에 미치는 영향은 점점 커지게 되어 계통 사고 등에 대한 대책이 충분하게 세워져 있는가를 검토할 필요가 있다.⁽³⁾⁻⁽⁶⁾

본 연구에서는 풍력발전시스템이 연계된 계통에 대해 캘리포니아 공대에서 개발된 상업용 프로그램인 Power Tools for Windows를 이용하여 과도상태를 해석하고자 한다. 우선 풍력발전시스템이 동기발전기와 유도발전기로 구성된 경우에 대해 임계제거시간을 비교함으로써 동기기와 유도기의 차이점을 살펴보고, 현재 유도발전기로 구성되어 운전하고 있는 계통을 대상으로 3상사고, 부하급변, 풍력발전기 트립 등 외란에 대한 과도상태를 해석하며 안정성의 유지 범위 내에서 최대의 연계운전 허용용량을 고찰하고자 한다.

2. 과도안정성에 대한 이론적 고찰

일반적으로 과도 안정성은 부하가 급격하게 변동하거나 계통에 사고가 발생하는 경우 과도적인 상태에서의 전력-상차각 특성을 시간적인 요소를 고려하면서 결정된다. 정상시의 운전상태에서는 발전기나 전동기의 입, 출력은 서로 같고 양기의 내부전압간의 상차각은 송전전력과 계통 임피던스에 의해서 정해진 값을 유지하면서 운전되고 있다. 이 때 부하가 급변하거나 고장이 일어나서 계통의 평형상태가 깨지게 되면 발전기와 전동기간

의 입, 출력에 차이가 생기고 이 차이에 비례해서 회전자가 가속 또는 감속하게 된다. 그 결과 운전상태는 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 과도 안정 극한전력 이상의 불안정한 범위로 벗어나면 발전기나 전동기는 탈조하게 되어 안정성을 유지하지 못하게 된다.

동기기에 대한 과도안정도의 동요방정식은 식 (1)과 같다.

$$d^2\phi / dt^2 = \omega(P_m - P_e)/2H \quad (1)$$

ϕ : 상차각, ω : 각주파수, H : 관성정수
 P_m : 기계적 입력, P_e : 전기적 출력

동요방정식에서 보는바와 같이 회전기에 우변과 같은 입, 출력의 차가 생겼을 경우에는 회전자가 좌변과 같은 속도변화를 받는 것으로서 과도 안정성은 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 계통의 동요가 계속되어 새로운 평형점에 도달하지 못하면 더 이상 동기를 유지하지 못하므로 계통은 불안정하게 된다. 따라서 안정성을 유지할 수 있는 최대한의 상차각 범위내에서 차단기 등 보호시스템을 통하여 고장을 제거하여야 하며 이 때의 위상각을 임계 제거위상각(critical clearing angle), 시간을 임계 제거시간(critical angle time)이라 한다.

유도기의 경우 동기기와는 달리 계자를 발생시키는 계자권선이 설치되어 있지 않아 외부로부터 계자전류를 공급받지 않으면 유도기는 동작하지 않는다.

유도기에서 토오크는 전압의 제곱에 비례하여 식 (2)로 표현된다.

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

s : 슬립 T_e : 전기적 토오크

토오크는 사고의 조건에 따라 변하게 되며 회전하는 식 (3)의 동요방정식에 의해 특성지어진다.

$$J d\omega/dt = T_m - T_e \quad (3)$$

J : 관성모멘트 T_m : 기계적 토오크

ω : 회전자 속도

사고가 발생하여 전기적 토오크가 감소하게 되면 회전자는 가속하게 되며 이는 회전체의 운동에너지를 증가시키게 된다. 사고가 제거되어 계통전압이 회복되면 새롭게 자장이 형성되며 이 때 저장된 에너지가 회전체의 저장 에너지 보다 크게 되면 회전자 속도는 점차 감속하여 발전기는 약간의 동요 후에 정상상태를 유지하게 되지만 반대의 경우 보호시스템에 의하여 사고가 제거되기 전까지 회전자는 계속 가속되어 결국 발전기의 단자전압은 작아지게 된다. 따라서 사고가 제거되어야 하는 최대한의 시간이 존재하게 되며 이때의 시간을 유도기의 임계제거시간이라 한다.

3. 풍력발전시스템과 연계계통의 구성

풍력시스템에 사용되는 동기발전기는 계통선과의 연계를 위해 주파수, 전압, 위상이 계통선과 일치해야 하므로 정밀한 제어 및 동기검증 등 제

어시스템의 규모가 커지게 된다. 유도발전기는 역률로 인한 에너지 손실이 있으나 구조가 간단하고 가격이 저렴하며 계통선 연계시 정밀한 제어가 필요하지 않아 계통 연계형 풍력발전 시스템으로 많이 사용되고 있다.

풍력발전시스템은 배전선로의 중간이나 말단에 연결될 수 있지만 배전선로에 직접 연결시 연결계통에 직접적인 영향을 주게 되므로 최근에는 대규모로 조성하여 전용선으로 계통에 연결시킴으로써 계통에의 영향을 줄이고 있는 실정이다.

제주 행원지역에는 약 10MW의 용량으로 풍력발전시스템이 집단화되어 상업운전이 이루어지고 있으며 풍력발전시스템과 연계계통을 그림 1에 표시하였다. 그림 1에서 보는바와 같이 풍력발전시스템은 총 15호기의 유도발전기로 구성되어 22,900V의 전용선을 이용하여 변전소로 직접 전력을 송출하고 있다. 유도발전기에 대한 파라미터를 표 1에 수록하였다.

풍력발전시스템과 변전소간의 전용선로는 강심 알루미늄연선(ACSR)160(mm²)의 배전선로로서 공장은 24.6km이고 변전소의 부하는 하루 중 최소 35MW, 최대 47MW 이다.

풍력발전모선에는 계통보호를 위해 차단기가 설치되어 있으며 전압에 따른 차단기의 정격차단시간을 표 2에, 시험 성적서를 표 3에 수록하였다.

표 1. 유도발전기 파라미터

| 항 목 | 정 수 값 |
|----------|---------------------|
| 고정자저항 | 0.0048 ohm |
| 고정자 리액턴스 | 0.0816 ohm |
| 회전자 저항 | 0.004 ohm |
| 회전자 리액턴스 | 0.108 ohm |
| 자화 리액턴스 | 3.72 ohm |
| 회전자 관성 | 29 kgm ² |

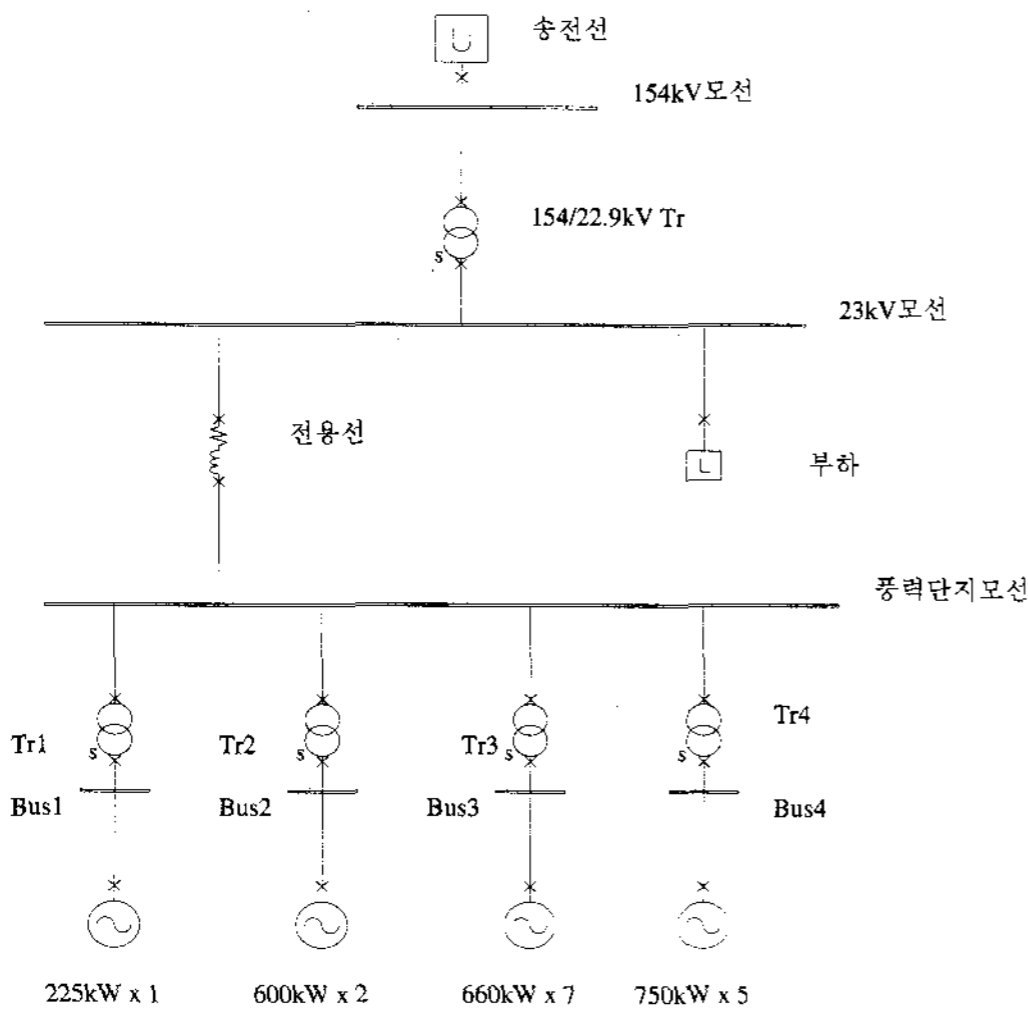


그림 1. 풍력발전시스템과 연계계통의 구성도

표 2. 차단기의 정격차단시간

| 정격전압(kV) | 정격차단시간(Hz) |
|----------|------------|
| 7.2 | 8 |
| 25.8 | 5 |
| 72.5 | 5 |
| 170 | 3 |
| 362 | 3 |

표 3. 풍력발전모선의 차단기 시험성적서

| 동작구분/ 상별 | A상 | B상 | C상 |
|---------------|---------|---------|---------|
| Closing Time | 44.5 ms | 44.6 ms | 43.8 ms |
| Tripping Time | 45.9 ms | 45.9 ms | 46.2 ms |

4. 사례연구

유도발전기는 자체적으로 자속을 발생시킬 수 없기 때문에 과도특성이 동기기와 유도기가 다르게 나타난다.

사례연구로서 풍력발전 시스템이 동기발전기와 유도발전기로 구성된 경우에 대해 임계제거시간을 비교하고 현재 유도발전기로 구성되어 운전하고 있는 계통을 대상으로 3상사고, 부하급변, 풍력발전기의 트립시 등 외란에 대한 과도상태를 해

석하며 안정성을 유지할 수 있는 범위 내에서 최대의 연계운전 허용용량을 고찰하고자 한다.

4.1 풍력발전시스템의 용량 10MW

(1) 풍력발전시스템이 동기발전기로 구성된 경우
 풍력발전시스템이 동기발전기로 구성된다고 가정하고 그림 1의 23kV모선에 모선 단락사고가 발생하는 경우에 대해 사고 지속시간을 370ms와 370ms 보다 큰 400ms로 나누어서 과도상태를 해석하였으며 그림 2와 3에 풍력단지모선의 전압, 발전기의 전기적 출력파형을 표시하였다.

그림 2와 3에서 보는바와 같이 370ms 동안 사고가 지속되는 경우 모선전압과 발전기 출력은 사고 이전상태로 복귀하여 정상적으로 운전되고 있지만 370ms 보다 큰 400ms인 경우에는 계통이 불안정하다는 것을 알 수 있으며 동기발전기로 풍력발전시스템이 구성되는 경우 임계제거시간은 370ms이다.

(2) 풍력발전시스템이 유도발전기로 구성된 경우
 풍력발전시스템이 유도발전기로 구성된 경우에 대해 모선사고, 부하급변, 발전기 트립 등 외란에 대한 과도상태를 해석하였다.

그림 4와 5에 모선사고의 지속시간이 61ms와 61ms 보다 큰 100ms인 경우에 대한 해석결과를 수록하였으며 사고가 61ms를 초과하여 지속되면 모선의 전압이나 발전기속도 등이 고장전의 상태로 복귀하지 못함에 따라 계통은 불안정하게 된다. 따라서 모선사고에 대한 최대한도의 고장제거시간은 61ms가 되며 이 시간 내에 사고가 신속히 제거되어야 한다.

그림 6에 변전소의 부하가 35MW에서 50MW로 급변하는 경우에 대한 과도상태 해석결과를 나타내었으며 부하 급변시에 계통안정성은 유지됨을 알 수 있다.

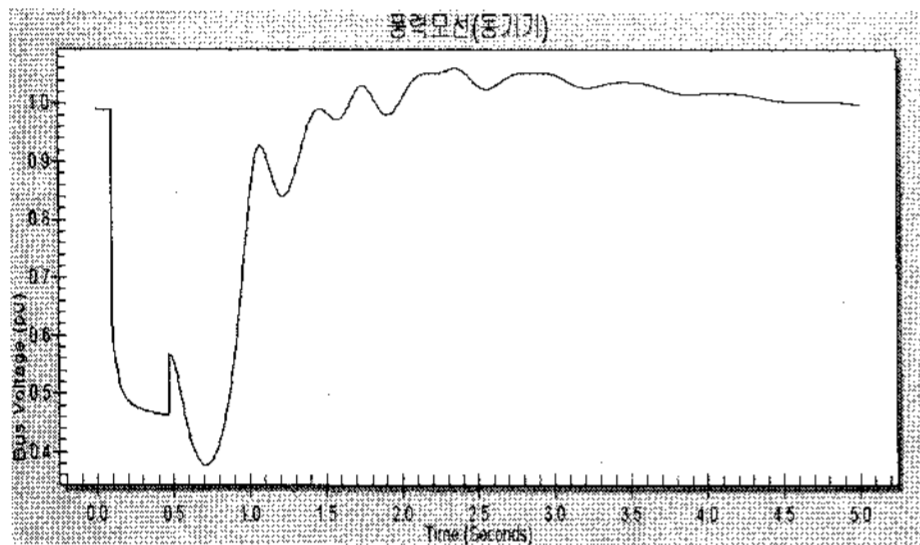
또한 풍력발전시스템을 구성하는 유도발전기 4대가 차례로 트립되는 경우에 대한 전압파형을 그림 7에 표시하였으며 이 경우에도 계통의 안정성

은 유지된다.

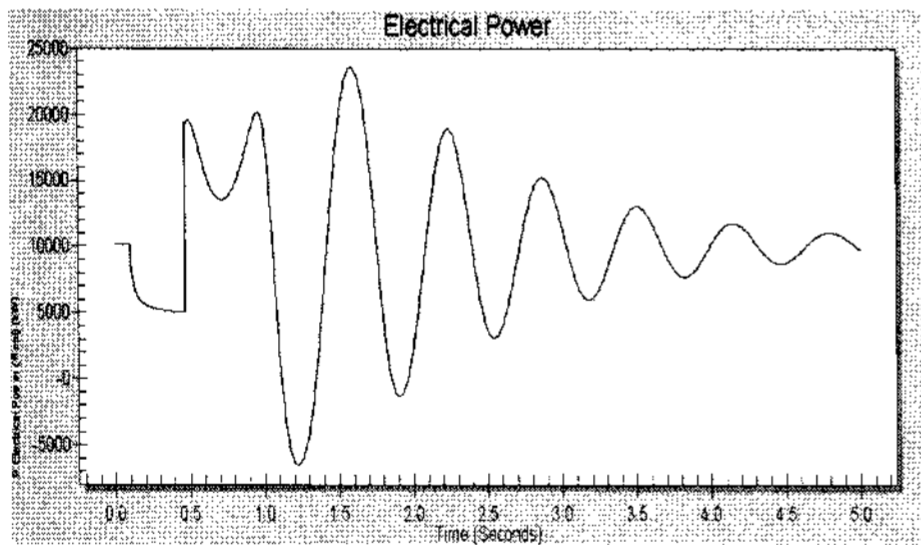
4.2 풍력발전시스템의 용량 12MW

10MW의 풍력발전시스템에 발전기가 증설되어 총 용량 12MW가 된 경우에 대하여 과도상태를 검토하고자 한다.

23kV 모선에 고장이 51ms동안 지속되다가 고장이 차단된 경우와 부하급변에 대한 과도상태 해석결과를 그림 8과 9에 표시하였다.

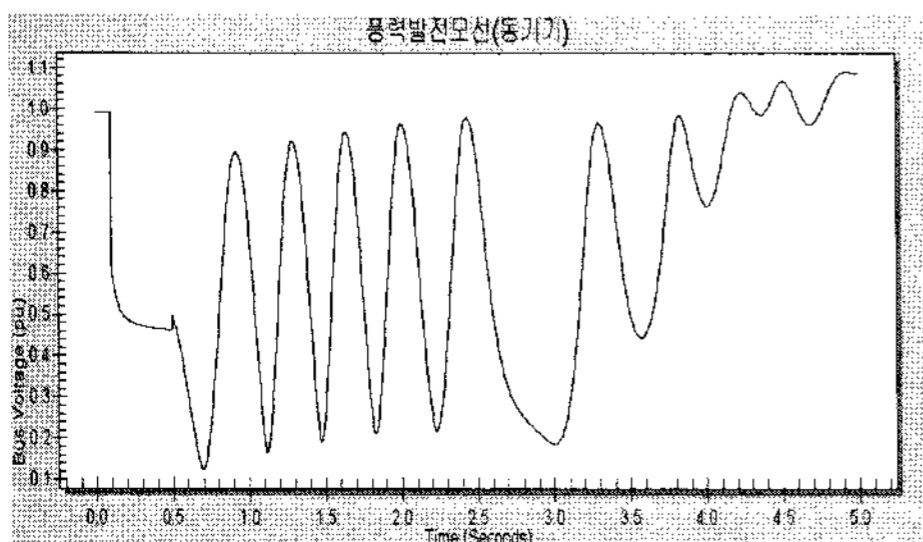


(a) 풍력단지모선의 전압파형(동기기)

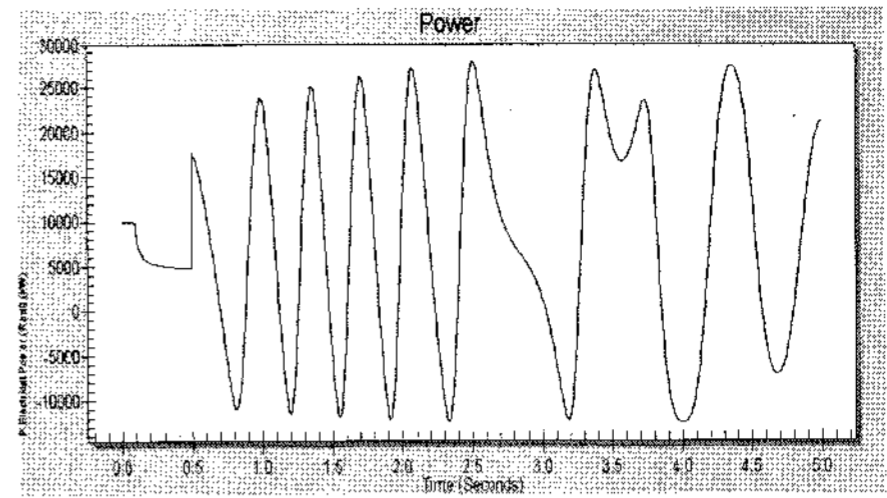


(b) 발전기 출력파형(동기기)

그림 2. 전압 및 발전기출력(370ms 사고지속)



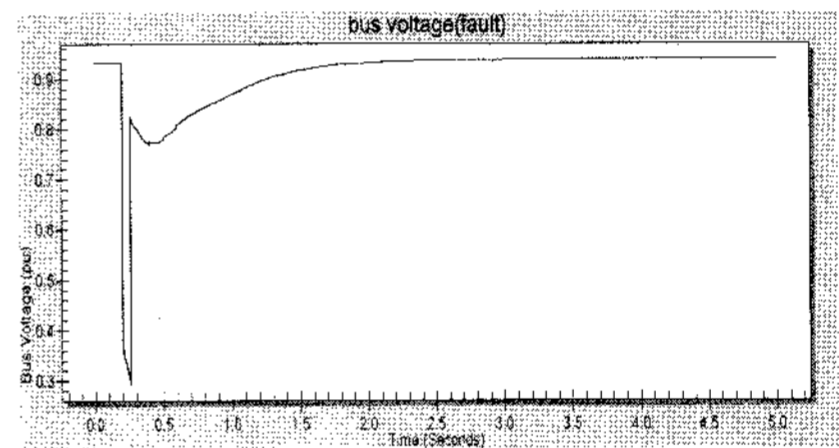
(a) 풍력단지모선의 전압파형(동기기)



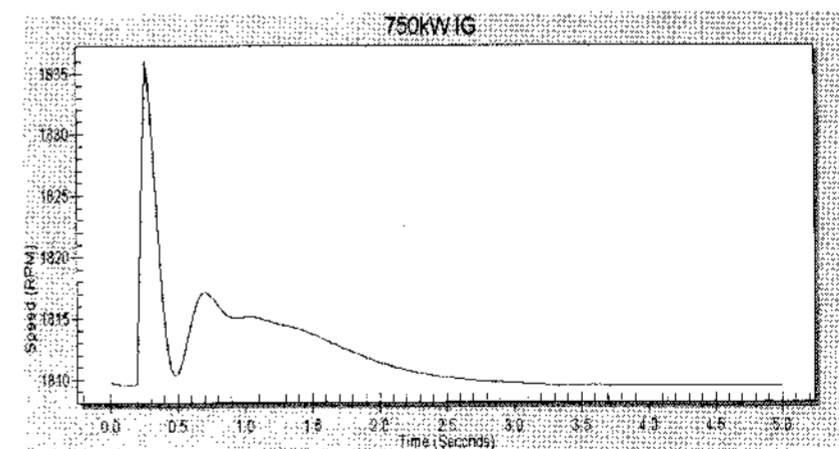
(b) 발전기 출력 파형(동기기)

그림 3. 전압 및 발전기출력(400ms 사고지속)

풍력발전시스템의 용량이 12MW인 경우 모선 사고에 대해서는 51ms이내에 차단기가 동작하면 계통의 안정성은 유지되지만 부하급변시에는 전압이 저하되고 발전기 속도가 증가되어 과도 안정성을 유지하지 못하게 된다.

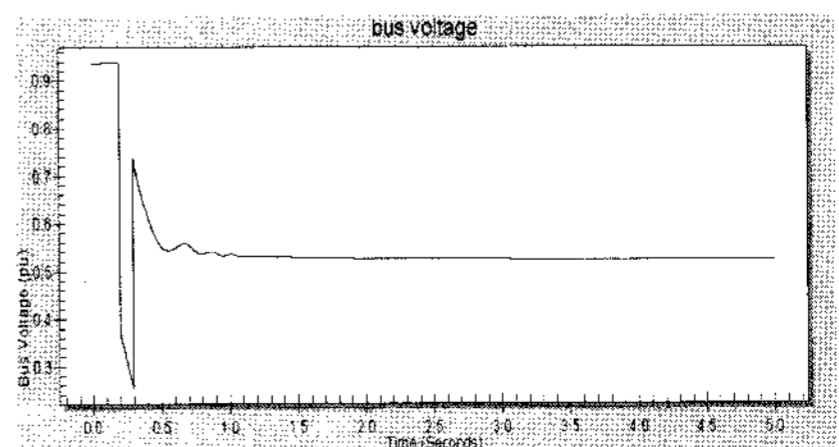


(a) 풍력단지모선의 전압파형

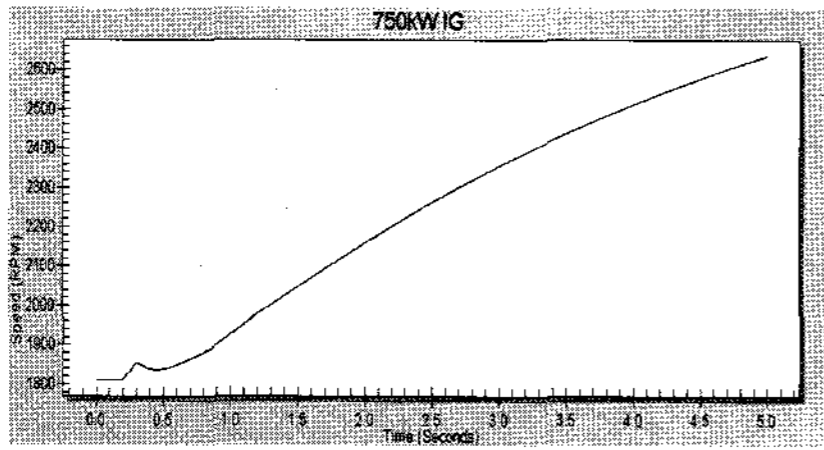


(b) 발전기의 속도파형

그림 4. 전압 및 속도파형(61ms 사고지속)



(a) 풍력단지모선 전압파형

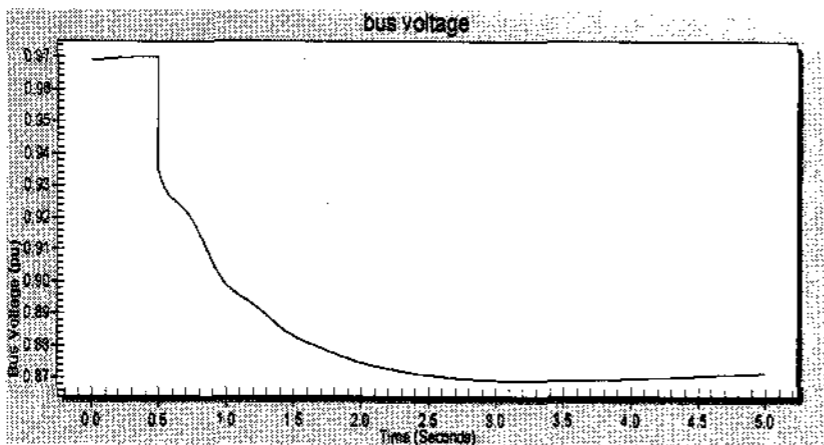


(b) 발전기 속도파형

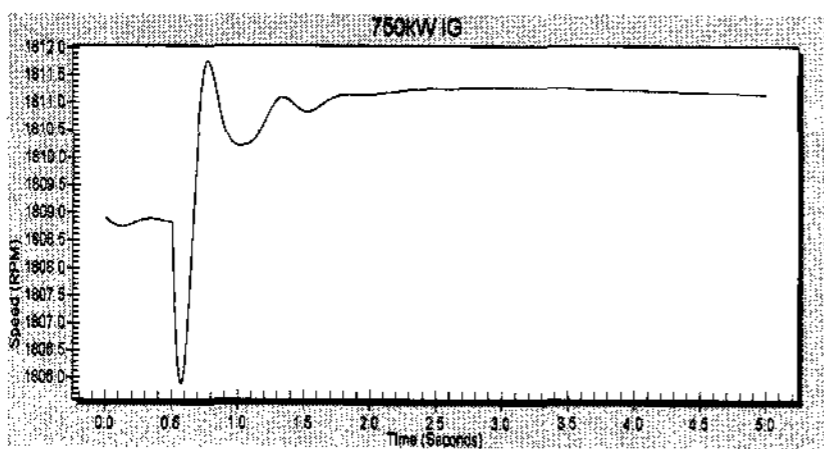
그림 5. 전압 및 속도파형(100ms 사고지속)

4.3 결과고찰

동기발전기로 이루어진 계통의 임계제거시간은 370ms, 유도발전기인 경우 61ms로서 동기발전기인 경우보다 더욱 신속하게 고장을 차단하여야만 안정도가 유지됨을 알 수 있으며 이러한 사실은 배전선로 보호기기간의 협조에도 영향을 미치게 된다.



(a) 풍력단지모선 전압파형



(b) 발전기 속도파형

그림 6. 전압 및 발전기 속도파형(부하급변)

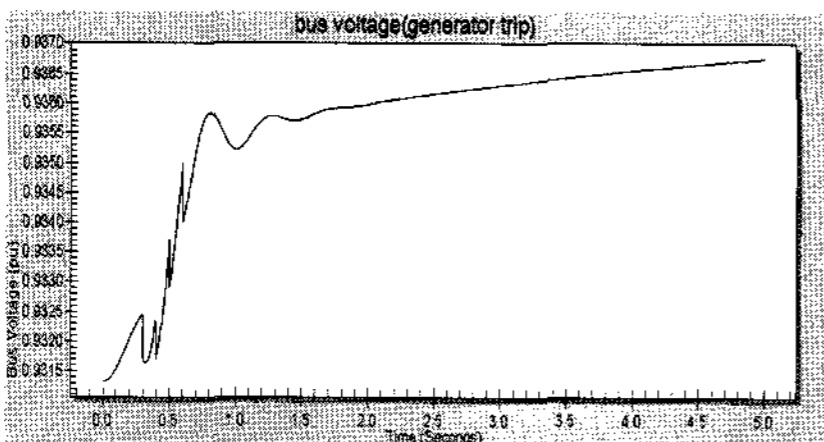


그림 7. 전압파형(발전기트립)

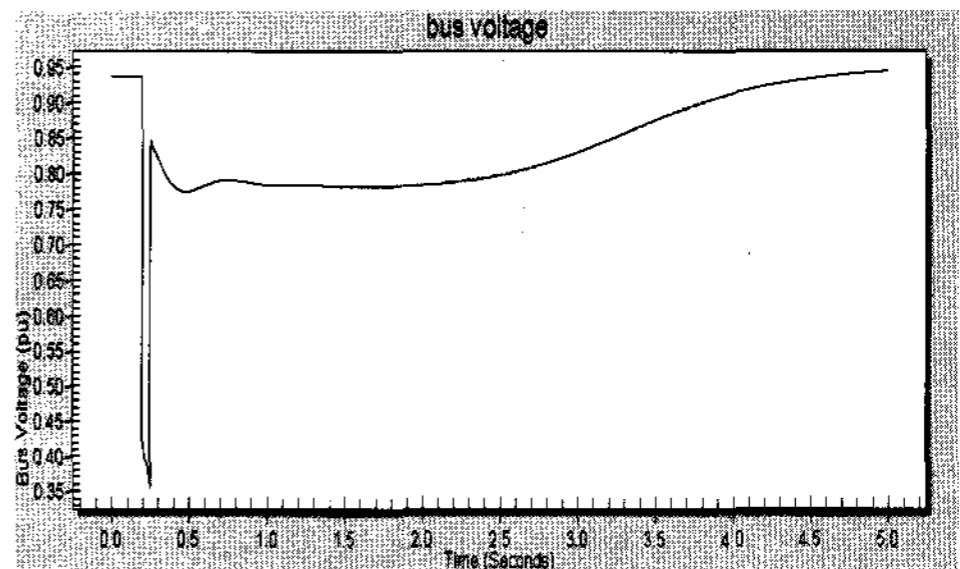
현재 운전되고 있는 제주 행원의 풍력발전시스템의 계통은 안정성을 유지하면서 운전되고 있음을 알 수 있었으며 풍력발전시스템의 용량에 따른 과도상태 해석결과를 표 4에 수록하였다.

표 4. 용량별 과도상태해석

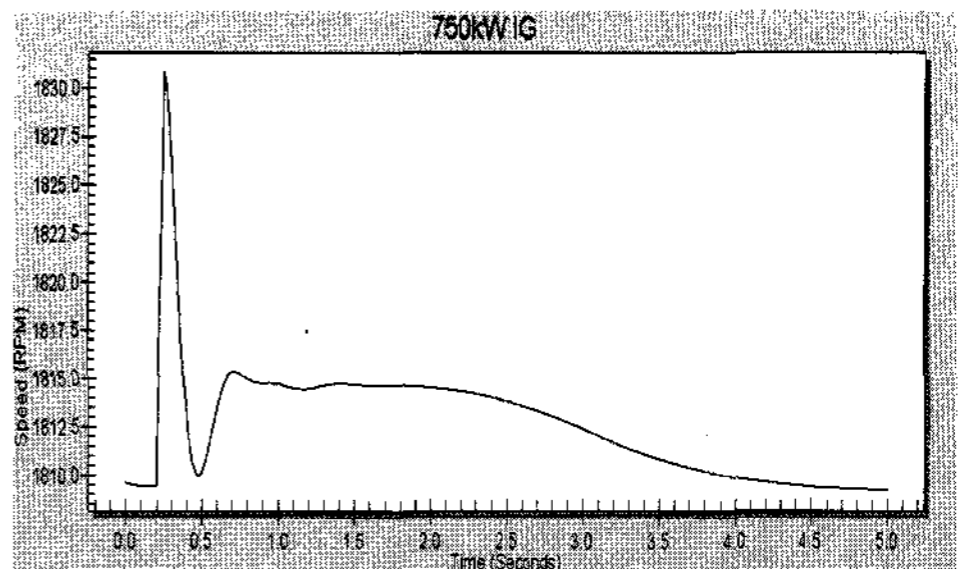
| 용량 | 임계제거시간 | 부하급변 | 발전기트립 |
|------|--------|------|-------|
| 10MW | 61ms | 안정 | 안정 |
| 11MW | 57ms | 안정 | 안정 |
| 12MW | 51ms | 불안정 | 안정 |

5. 결 론

현재 운전 중인 제주 행원 풍력발전시스템이 연계된 계통에 대해 과도상태 해석을 통한 결론은 다음과 같다.

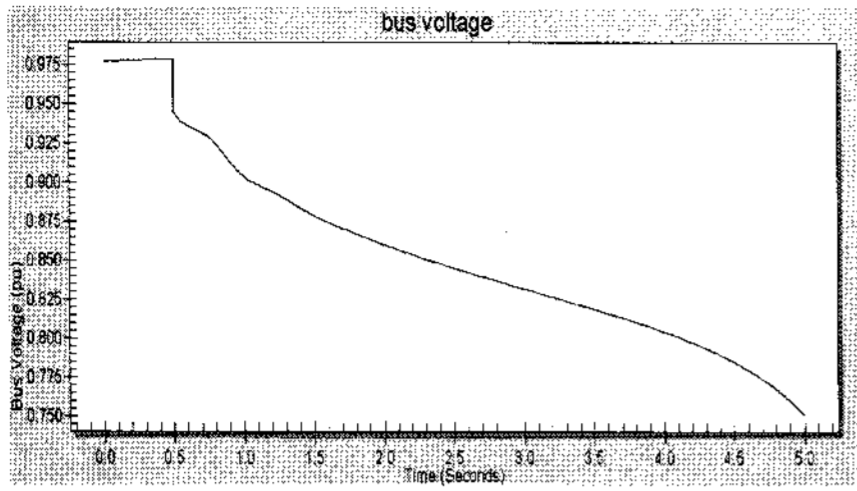


(a) 풍력단지모선 전압파형

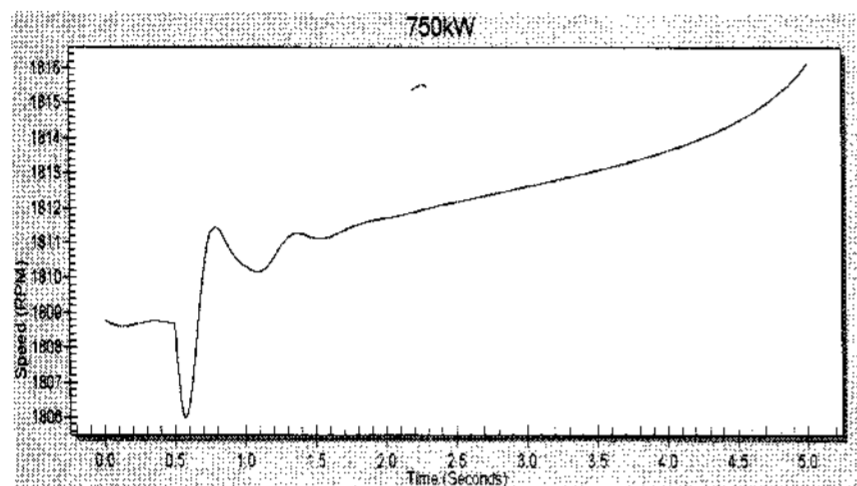


(b) 발전기 속도파형

그림 8. 전압 및 발전기 속도파형 (용량 12MW, 모선사고)



(a) 풍력단지모선 전압파형



(b) 발전기 속도파형

그림 9. 전압 및 발전기속도 파형
(발전용량 12MW, 부하급변)

- 변전소와 풍력발전 단지의 전용선에 대한 용량이 배전선로의 상시 최대운전용량에 근접함에 따라 10MW의 풍력발전단지 용량은 적절한 수준으로서 계통은 안정성을 유지하면서 운전되고 있다.
- 풍력발전시스템의 용량이 12MW 이상이 되면 현재 설치된 차단기의 차단시간에 근접하고 부하 급변 시 계통의 안정성을 유지하지 못하게 된다.
- 23kV에 사용되는 차단기의 차단시간은 5Hz이지만 유도발전기로 구성되는 풍력발전시스템과 연계되는 계통의 안정성을 유지하는 임계차단시간은 61ms이므로 차단기의 선택 시 61ms 이하에서 차단되는 제품을 선택하여야 한다.
- 동기발전기로 구성되는 풍력발전시스템에 비해

유도발전기로 구성되는 풍력발전시스템의 임계 차단시간이 대단히 작으므로 배전선로에 설치된 보호기기들의 협조관계를 충분히 검토하여야 한다.

참고 문헌

- 1) 허종철, 제주도내 풍력자원 조사에 관한 연구용역, 2001.
- 2) 김용현, 김일환, 전력전자학회 논문지, Vol. 5, No. 5, pp. 451-458, 2000.
- 3) Salman K. Salman, Ibrahim M. Rida, Investigating of embedded generation on relay settings of utilities' electrical feeders, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 16, No. 2, pp. 246-251, 2001.
- 4) Pablo Ledesma, Julio Usaola, Minimum voltage protections on fixed speed wind farms, Proceeding of the European Wind Energy Conference, Denmark, pp. 1075-1077, 2001.
- 5) C.D. Vournas, G. A. Manos, etc, Voltage security assessment of greek interconnected power system with large wind penetration, Proceeding of the European Wind Energy Conference, Denmark, pp. 1154-1157, 2001.
- 6) Marcus Helmer, 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, 2001.
- 7) SKM Systems Analysis, Power tools for windows reference manual, 1996.
- 8) Vestas, Electrical operating and maintenance manual, 2000.