濟州大學校 尖端技術硏究所 論文集, 第14卷, 1號, pp.25-31, 2003. 6
Cheju Nat'l Univ. Res. Inst. Adv. Tech. Jour., Vol.14, No.1, pp.25-31, 2003. 6

행원풍력발전단지의 과도상태 해석에 관한 연구

김 세 호*

A Study on Transient State Analysis of Hangwon Wind Power Farm

Se-Ho Kim*

ABSTRACT

Generator in wind farm can be either synchronous or asynchronous (induction) types. Induction and synchronous generators behave in a different way when subjected to severe faults. From the point of view of the electromagnetic pair, induction generators does not have an angle stability limit. Short circuit near 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 farm. Several case studies have been conducted to determine the effect of the clearing time of a fault on the network on the stability of embedded generators including synchronous and induction types.

Key Words : transient state analysis, induction generator, synchronous generator, critical clearing time

Ⅰ. 서 론

세계 기후협약이 체결되어 나라마다 이산화탄소를 일정량이상 발생시키지 못하도록 규제하고 있고 이로 인해 화석연료를 대체할 수 있는 청정에너지에 대한 관심과 연구가 해외뿐만 아니라 국내에서도 활발히 이루어지고 있다. 청정에너지 중 풍력발전시스템은 전 세계적으로 보급이 확대되고 있고 독일, 미국, 스웨덴 등 선진국이 더욱 두드러진 보급실적을 나타내고 있다. 선진국 중 유럽 국가들이 풍력발전기 설치 보급을 급속히 확대함에 따라 2020년에는 전 유럽 전력수요의 약 10%를 풍력발전기가 담당할 것이며 이러한 설치용량의 증가율은 다른 어느 에너지보다 성장률이 가장 빠름을 주장하는 보고도 발표되어 있다. 풍력발전시스템은 그 기술력이 점차 첨단화됨에 따라 발전단가가 점차 낮아져 전력생산 단가 면에서도 화석연료와의 경쟁이 가능하게 되었으며 생산된 전력은

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

환경 친화적이며 비 고갈성 무공해 에너지임을 고려할 때 전 세계적으로 보급이 급속히 확대 될 것이다.[1]

우리나라에서도 풍속자원이 풍부한 제주도 행원지역에 풍력발전 단지를 조성하여 상업운전이 이루어지고 있어 풍력에 대한 관심이 점차 고조되고 있다. 그러나 우리나라에 설치된 시스템은 전부 외국에서 수입하여 설치된 것으로써 이 시스템에 대한 정확한 설계 및 운전정보 등이 부족하며 최근에 이르러 풍력발전시스템의 출력특성에 대한 연구가 이루어지고 있다.[2]

풍력발전단지는 발전량이 점점 커지고 있어 계통에 대한 영향을 경감시키기 위해 기존의 배전선로의 말단이나 중간에서 계통과 연계하던 방식에서 벗어나 전용선을 이용하여 직접 배전용 변전소로 발전전력을 송출하고 있으며 전용선은 배전선로로 별도로 건설하여 이용하고 있다. 그러나 발전기의 출력이 증가함에 따라 계통에 미치는 영향은 점점 커지게 되어 계통사고 등에 대한 대책이 충분하게 세워져 있는가를 검토할 필요가 있다.[3-7]

본 연구에서는 풍력발전단지가 연계된 계통에 대해 과도상태를 해석하여 계통의 과도안정성을 검토하고자 한다. 과도상태 해석은 캘리포니아 공대에서 개발된 전력계통 해석을 위한 상업용 프로그램인 Power Tools for Windows를 이용하였으며 우선 풍력발전기로 주로 사용되는 동기기와 유도기에 대하여 사고시 응답특성을 비교하고 부하급변이나 발전기의 트립시 계통이 과도 안정성을 유지할 수 있는 차단기의 차단시간을 구하고자 하였다.

II. 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 전동기 간의 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 과도안정 극한전력 이상의 불안정한 범위로 벗어나면 발전기나 전동기는 탈조하게 되어 안정성을 유지하지 못하게 된다.

동기기에 대한 과도안정도의 동요방정식은 식 (1)과 같다.

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

$\varnothing$: 상차각

ω : 각주파수

P_m : 기계적 입력

P_e : 전기적 출력

H : 관성정수

동요방정식에서 보는 바와 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.

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

s : 슬립

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

$$J \, d\omega/dt = Tm - Te \quad (3)$$

J : 관성모멘트

Tm : 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 회전체에 저장된 에너지 보다 크게 되면 회전자 속도는 점차 감속하여 발전기는 약간의 동요 후에 정상상태를 유지하게 된다. 그러나 반대의 경우에는 보호시스템에 의하여 사고가 제거되기 전까지 회전자는 계속 가속되어 결국 발전기의 단자전압은 작아지게 된다. 따라서 사고가 제거되어야 하는 최대한의 시간이 존재하게 되며 이때의 시간을 유도기의 임계 제거시간이라고 한다.

III. 사례연구

풍력발전기로는 동기발전기와 유도발전기가 주로 사용되고 있으며 유도발전기는 자체적으로 자속을 발생시킬 수 없기 때문에 과도특성이 동기기와 유도기가 다르게 나타난다. 사례연구로서 모선 사고시 동기기와 유도기의 차이점을 해석하고 부하가 급변하거나 풍력발전기가 트립되는 경우에 대한 과도상태를 분석하였다.

3.1. 풍력발전단지의 구성

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

2002년 말 현재 행원풍력발전단지에는 12호기의 풍력발전기가 설치되어 총 7,815kW를 발전하고 있고 풍력발전기를 추가로 설치할 계획으로 있어 발전기의 총 출력이 점차 증가하고 있다. 그러나 발전기의 출력이 증가함에 따라 계통에 미치는 영향은 점점 커지게 되어 계통 사고 등에 대한 대책이 충분하게 세워져 있는가를 검토할 필요가 있다.

Fig. 1에 풍력발전단지의 계통을 표시하였다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 풍력발전기의 출력전압은 22,900V의 배전선로 전압으로 변성되어 전용선을 통해 변전소의 23kV모선에 연결되어 부하에 전력을 공급하고 있다. 각 발전기에 대한 출력은 다음과 같다.

1, 2호기 : 1200kW
3 호기 : 660kW
4 호기 : 660kW
5 호기 : 225kW
6 호기 : 750kW
7 호기 : 750kW
8 호기 : 660kW
9 호기 : 660kW
10 호기 : 750kW
11 호기 : 750kW
12 호기 : 750kW

3.2. 모선사고

풍력발전단지가 동기발전기로 구성된다고 가정하고 Fig. 1의 풍력발전단지의 계통도에서 23kV모선에 모선 단락사고가 발생하는 경우에 대해 사고 지속시간을 275ms와 280ms로 나누어서 해석하였다.

Fig. 2에 사고 지속시간이 275ms인 경우 풍력발전 모선과 전압파형을, Fig. 3에 3호기와 4호기의 회전자 위상차를 표시하였다. Fig. 4와 5에는 사고 지속시간

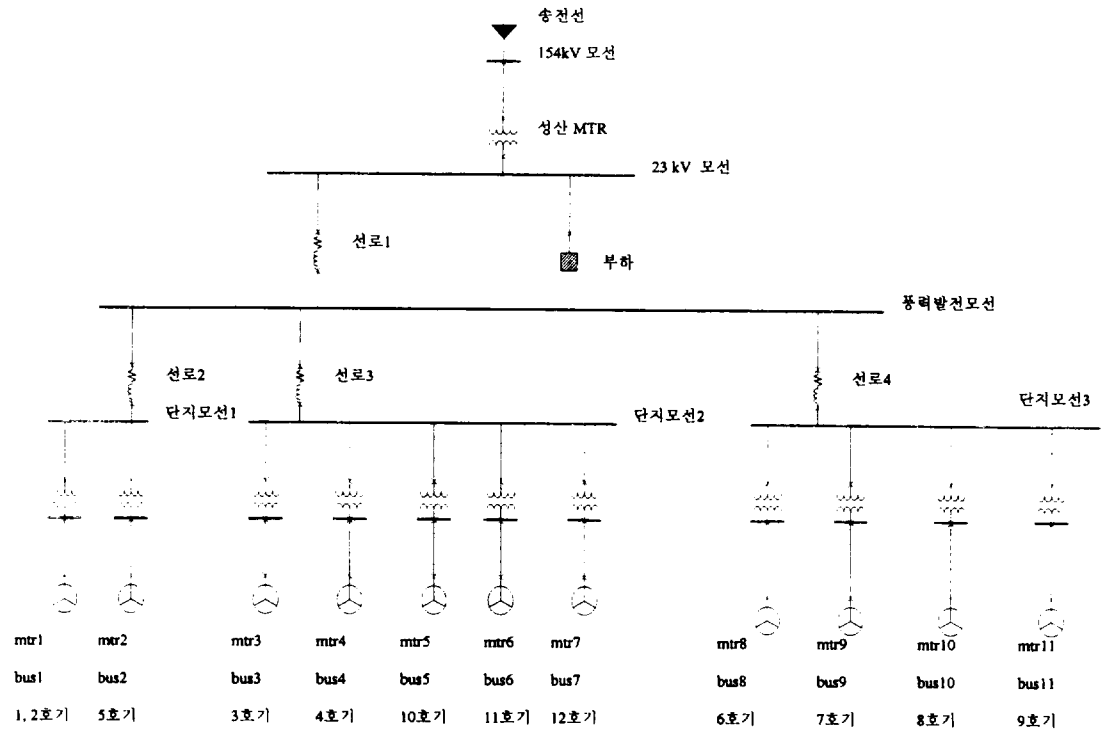

Fig. 1. Network configuration of wind farm

이 280ms인 경우에 대한 모선전압과 위상각 파형을 나타내었다. Fig. 2와 4, Fig. 3과 5를 비교하여 보면 고장 지속시간에 따라 과도 안정도가 유지되는지 또는 불안정한지를 파악할 수 있으며 동기발전기로 풍력발전단지가 구성될 경우 임계제거시간은 275ms임을 알 수 있다.

풍력발전단지가 유도발전기로 구성된 경우 고장 지속시간을 120ms와 150ms로 나누어서 과도상태를 해석하였으며 해석결과에 대한 파형은 Fig. 6-13에 나타내었다.

해석결과 파형을 비교해 보면 고장지속시간이 120ms를 초과하는 경우 계통의 전압이 회복되지 못하고 회전자는 계속 속도가 증가하고 전기적 출력은 계속 감소하여 정상적인 발전이 되지 않음을 알 수 있다. 즉 유도기로 구성된 풍력발전단지의 경우 임계제거시간은 120ms임을 알 수 있으며 동기기인 경우에 비해 신속하게 고장이 제거되어야 한다.

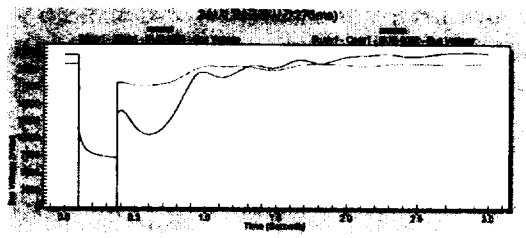

Fig. 2. Voltage waveform of wind bus and bus 1 for bus fault(in case of synchronous generator, fault duration: 275ms).

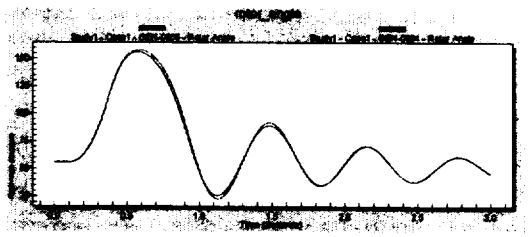

Fig. 3. Rotor angle waveform of generator 3 and 4 for bus fault(in case of synchronous generator, fault duration : 275ms).

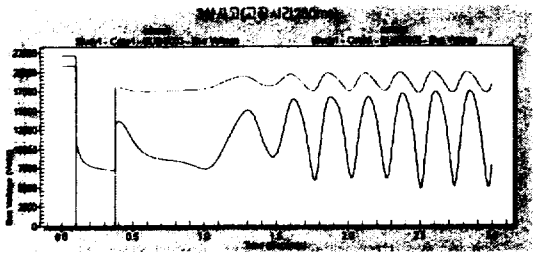

Fig. 4. Voltage waveform of wind bus and bus 1 for bus fault(in case of synchronous generator, fault duration : 280ms).

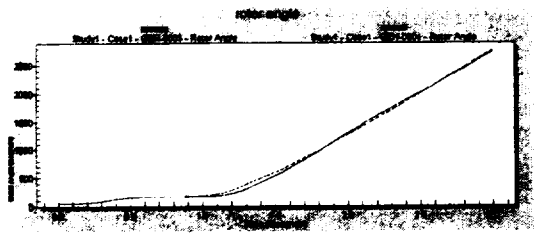

Fig. 5. Rotor angle waveform of generator 3 and 4 for bus fault(in case of synchronous generator, fault duration : 280ms).

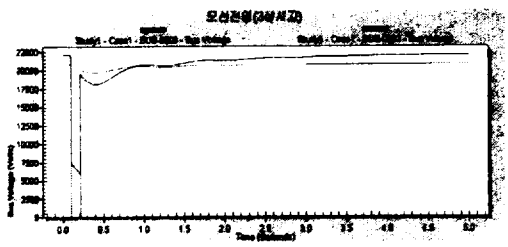

Fig. 6. Voltage waveform of wind bus and bus 1 for bus fault(in case of induction generator, fault duration : 120ms).

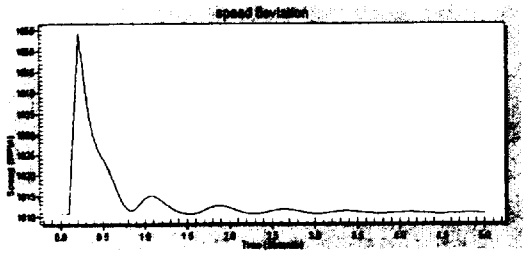

Fig. 7. Rotor speed waveform of generator 3 for bus fault(in case of induction generator, fault duration : 120ms).

Fig. 8. Rotor angle waveform of generator 3 for bus fault(in case of synchronous generator, fault duration : 120ms).

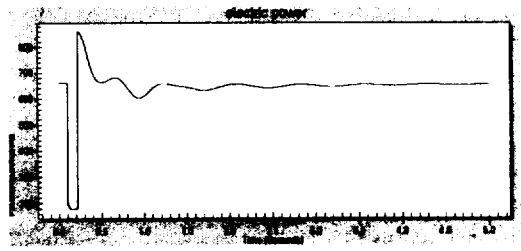

Fig. 9. Electrical power waveform of generator 3 for bus fault(in case of induction generator, fault duration : 120ms).

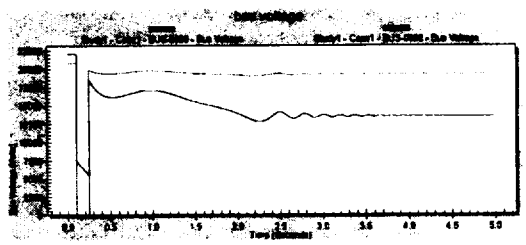

Fig. 10. Voltage waveform of wind bus and bus 1 for bus fault(in case of induction generator, fault duration : 150ms).

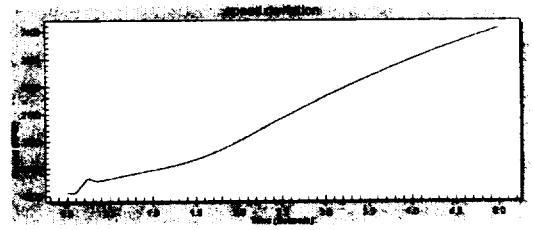

Fig. 11. Rotor speed waveform of generator 3 for bus fault(in case of induction generator, fault duration : 150ms).

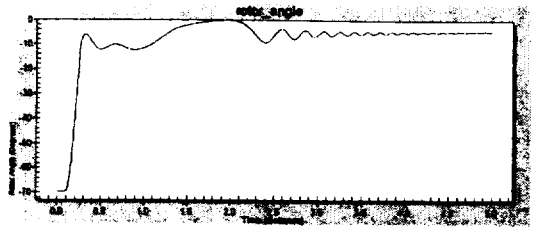

Fig. 12. Rotor angle waveform of generator 3 for bus fault(in case of induction generator, fault duration : 150ms).

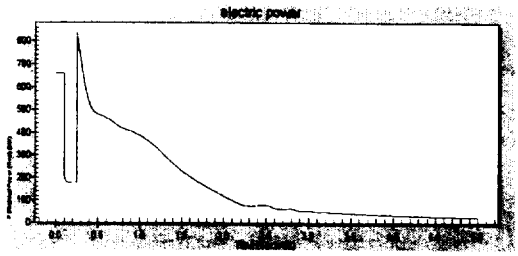

Fig. 13. Electric power waveform of generator 3 for bus fault(in case of induction generator, fault duration : 150ms).

3.3 부하급변 및 풍력발전기 트립

부하가 급변하는 경우 풍력발전지가 연계된 계통의 과도상태를 해석하였다. 부하는 평균부하 30,000kW에서 최대 부하 45,000kW로 갑자기 변화하는 것으로 가정하여 풍력발전모선과 발전단지 1의 전압파형을 Fig. 14와 15에 표시하였다. Fig에 나타난 바와 같이 부하가 급변하는 경우에도 최대부하시의 계통전압으로 수렴함으로써 계통의 과도 안정성이 유지됨을 알 수 있다.

또한 발전기가 어떤 원인으로 인하여 트립되는 경우에 대한 과도상태를 해석하였다. 우선 발전기 1, 2호기가 0.2초에 트립되기 시작하여 200ms 의 간격으로 모든 발전기가 트립되는 경우에 대한 발전단지 1의 전압파형을 Fig. 16에 표시하였다. 전압파형에서 알 수 있는 바와 같이 각 발전기가 트립되는 순간마다 전압이 강하되어 최종적으로는 계통선만에 의한 전압으로 수렴이 된다.

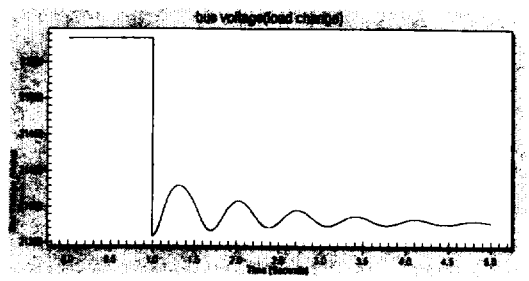

Fig. 14. Voltage waveform of wind bus for load change.

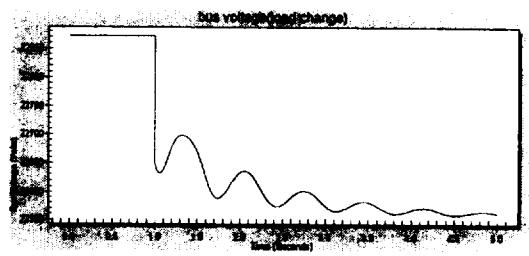

Fig. 15. Voltage waveform of bus 1 for load change.

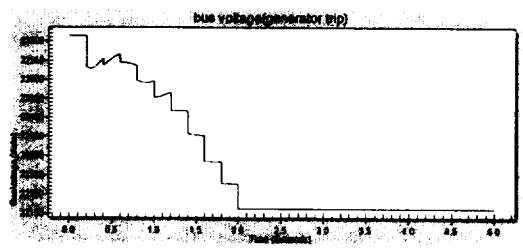

Fig. 16. Voltage waveform of bus 1 for load change.

IV. 결 론

풍력발전단지가 연계된 계통의 단락 모선사고에 대한 동기기와 유도기의 경우를 비교하였으며 부하급변시나 풍력발전기가 트립되는 경우에 대하여 과도상태를 해석하여 다음의 결과를 얻었다.

- 동기기로 풍력발전단지가 구성된 경우의 임계 제거시간은 275ms, 유도기로 구성된 경우에는 120ms로서 유도기로 발전단지가 구성되는 경우에는 고장을 더 신속하게 차단하여야 한다.
- 부하가 갑자기 변하는 경우에도 계통은 과도 안정

성을 유지하고 있다.

- 발전단지를 구성하는 모든 발전기가 차례로 트립되는 경우에도 계통은 과도 안정성을 유지하고 있다.
- 계통을 보호하는 차단기의 정격차단시간은 3-5 cycles로서 2002년 말 현재 총 12호기의 발전기로 7,815kW의 출력을 내는 행원 풍력발전단지의 계통은 과도안정성을 유지하면서 운전되고 있다.

참고문헌

1) 제주도, 2001, 제주도내 풍력자원 조사에 관한 연구용역.
2) 김용현, 김일환, 2000, 전력전자학회 논문지, Vol. 5, No. 5, pp. 451-458.
3) Salman K. Salman, Ibrahim M. Rida, 2001, Investigating of embedded generation on relay settings of utilities' electrical feeders, IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 16, No. 2, pp. 246-251.
4) Pablo Ledesma, Julio Usaola, 2001, Minimum voltage protections on fixed speed wind farms, Proceeding of the European Wind Energy Conference, Denmark, pp. 1075-1077.
5) C.D. Vournas, G. A. Manos, etc, 2001, Voltage security assessment of greek interconnected power system with large wind penetration, Proceeding of the European Wind Energy Conference, Denmark, pp. 1154-1157.
6) Marcus 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.
7) Vladislav Akhmatov, Hans Knudsen, etc, 2001, Short-term stability of large-scale wind farms, Proceeding of the European Wind Energy Conference, Denmark, pp. 1182-1186.
8) SKM Systems Analysis, 1996, Power tools for windows reference manual.