

풍력발전단지의 임계제거시간 고찰

김 세 호*, 양 익 준*

Investigation of the Critical Clearing Time for Network connected to Wind Generation System

Se-Ho Kim*, Ik-Jun Yang*

ABSTRACT

Generation of electricity using wind power has received considerable attention worldwide in recent years. In addition, the concern about the stability of wind power increases more and more, because most of the wind generators are induction generators that have shorter critical clearing times than those of synchronous generators. This paper investigates factors influencing the transient stability of the system connected to wind generation system.

Key Words : Critical Clearing Time, Wind Generation Farm

1. 서론

청정에너지 중 풍력발전시스템은 전 세계적으로 보급율과 설치용량의 증가율 등에서 다른 어느 에너지보다 성장률이 빠름을 주장하는 보고서가 발표되어 있다[1].

우리나라에서도 풍력발전에 대한 관심은 점점 증가하고 있고 제주도의 경우 행원지역과 한경면 용당리에 풍력발전 단지가 조성되어 상업운전이 이루어지고 있으며 그 용량 또한 더 증가

될 계획이다. 이처럼 풍력발전의 비중이 커짐에 따라 풍력발전이 계통에 미칠 수 있는 영향에 대한 우려 또한 높아지고 있다. 본 연구에서는 풍력발전시스템이 연계된 계통에 대해 전력계통 시뮬레이션 프로그램인 Digsilent Power Factory를 이용하여 과도상태를 해석하여 풍력발전이 연계된 계통내의 과도안정도에 영향을 미칠 수 있는 요소들에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 임계제거시간

일반적으로 과도 안정성은 부하가 급격하게 변동하거나 계통에 사고가 발생하는 경우 과도적인 상태에서의 전력-상차각 특성을 시간적인 요

* 제주대학교 대학원 전자전기공학과, 첨단기술연구소
Electronic & Electrical eng. Research Institute of
Advanced Technology, Cheju Nat'l Univ.

소를 고려하면서 결정된다. 정상시의 운전 상태에서는 발전기나 전동기의 입·출력은 서로 같고 양기의 내부전압간의 상차각은 송전전력과 계통 임피던스에 의해서 정해진 값을 유지하면서 운전한다. 이 때 부하가 급변하거나 고장이 발생하여 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.

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

ϕ : 상차각, ω_s : 동기각속도
 P_m : 기계적 입력, P_e : 전기적출력
 H : 관성정수

동요방정식에서 보는바와 같이 회전기에 우변과 같은 입, 출력의 차가 생겼을 경우에는 회전자가 좌변과 같은 상차각의 변화를 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 clearing 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.

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

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

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

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

식 (2)에 의해 사고가 발생하여 단자 전압이 낮아지면 전기적 토오크가 감소하게 되고 회전자는 가속하게 된다. 그 후 사고가 제거되어 계통전압이 회복되면 새롭게 자장이 형성되며 전기적 토오크 역시 새롭게 형성된다. 식 (3)에 의해 이 때 새로 형성된 전기적 토오크가 그 때의 기계적 토오크 보다 크다면 회전자의 속도는 점점 감속하여 정상상태로 돌아오지만 반대의 경우 보호시스템에 의하여 사고가 제거되기 전까지 회전자는 계속 가속하게 되어 정상상태를 유지할 수가 없게 된다. 따라서 사고가 제거되어야 하는 최대한의 시간이 존재하게 되며 이때의 시간을 유도기의 임계제거시간이라고 한다[2-4].

3. 사례연구

유도발전기로 구성된 풍력발전시스템에 대해 부하측의 22.9kV의 모선에 3상 단락사고를 주었을 때의 과도 상태를 해석해 봄으로써 계통의 임계제거시간을 고찰하고 계통의 부하용량, 부하역률, 전용선의 길이 및 종류, 발전용량 등에 변화를 주어 이러한 요소들이 계통의 임계제거시간에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 살펴보고자 한다. 모델계통은 행원풍력단지를 기준으로 하여 발전기는 660kW급의 유도발전기 15대가 병렬로 연결된 형태이며, 부하는 30MW, 부하역률은 0.9, 배전용변전소까지 22.9kV 전용선을 사용하여 연결되어 있으며 그 길이는 30km로 하였다. 연계계통의 구성도는 Fig. 1에 나타내었고, 계통 데이터들은 Table 1에 표시하였다. 표 1의 데이터로 계통의 부하측 3상 단락사고에 대한 과도상태를 해석한 파형은 그림 2에 나타내었다. Fig. 2에서 보면 사고 지속시간이 50ms인 경우는 사고 제거 이후 정상상태로 복귀하지만 사고지속시간이 55ms인 경우는 정상상태로 복귀하지 못하여 이때의 임계제거시간은 50ms가 된다. Table 1과 Fig 2의 파형을 기본으로 하여 풍력발전계통에서 부하용량, 부하역률, 전용선의 길이 및 종류, 발전용량 등을 변화시켜 임계제거시간에의 영향을 고찰하였다[5-6].

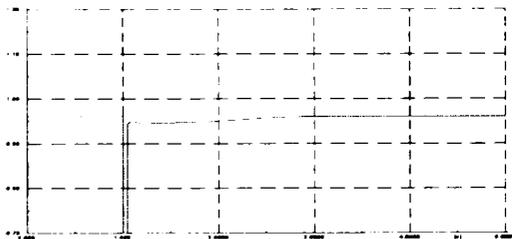


Fig. 2(a) Variation of wind farm terminal voltage following a 50ms 3-phase short circuit

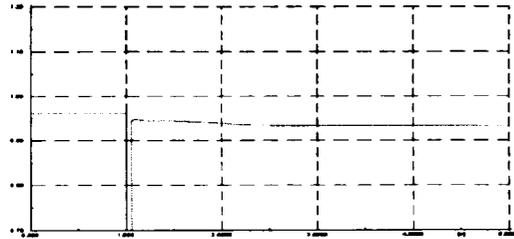


Fig. 2(b) Variation of wind farm terminal voltage following a 55ms 3-phase short circuit

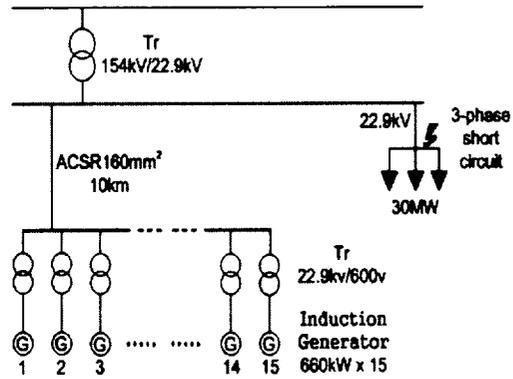


Fig. 1 Schematic diagram of the network connected with wind power system

Table 1 Modeling parameter

Generation capacity (Power factor)	Line	Load capacity (Power factor)
660[kW] (0.9) × 15	ACSR(160[mm ²]) 30[km] $R=0.2024 [\Omega/km]$ $X=0.3891 [\Omega/km]$	30[MW] (0.9)

3.1 부하용량에 따른 CCT의 변화

부하를 20MW, 40MW로 변화시켜 과도상태를 해석해본 결과는 다음과 같다.

Fig. 3은 부하가 20MW인 경우에 대해 풍력단지모선의 전압을 사고 지속시간이 60ms와

65ms인 경우로 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 3의 (a)와 (b)를 비교해 보면 임계제거시간은 60ms라는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 부하가 40MW인 경우이며 이때의 임계제거시간은 86ms라는 것을 알 수 있다.

위와 같이 부하가 20MW로 감소한 경우에는 50ms에서 60ms로 10ms증가하였고, 부하가 40MW로 증가하면 임계제거시간은 10ms감소하여 40ms가 되는 것을 볼 수 있었다. 즉 전부하에 대한 3상 단락사고에서는 부하가 증가할수록 임계제거시간은 짧아지게 되는 것을 알 수 있었다.

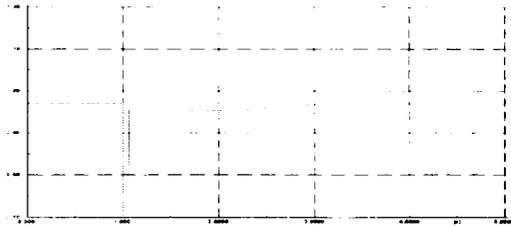


Fig. 3(a) Variation of wind farm terminal voltage following a 60ms 3-phase short circuit

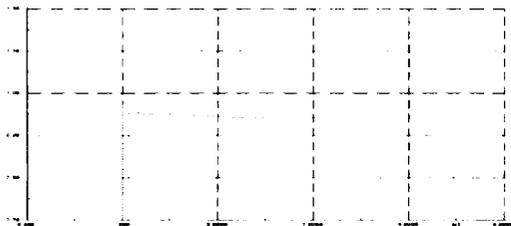


Fig. 3(b) Variation of wind farm terminal voltage following a 65ms 3-phase short circuit

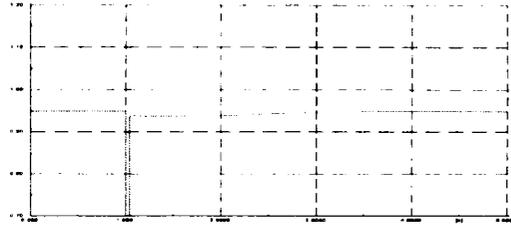


Fig. 4(a) Variation of wind farm terminal voltage following a 40ms 3-phase short circuit

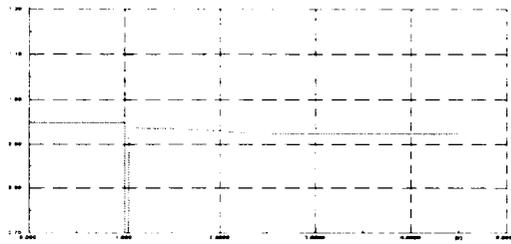


Fig. 4(b) Variation of wind farm terminal voltage following a 45ms 3-phase short circuit

3.2 부하의 역률에 따른 CCT의 변화

부하의 역률을 0.8, 0.85, 0.95, 1로 변화를 주어 임계제거시간을 비교해 본 파형은 다음과 같다. Fig. 5는 역률0.8, Fig. 6은 0.85, Fig. 7은 0.95, Fig. 8은 1인 경우이다.

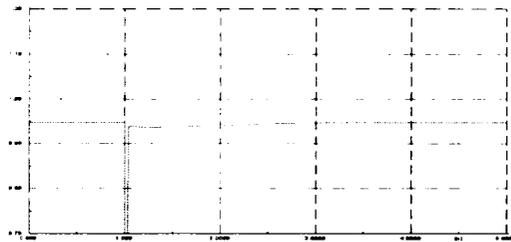


Fig. 5(a) Variation of wind farm terminal voltage following a 35ms 3-phase short circuit

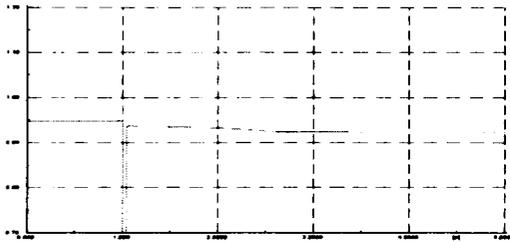


Fig. 5(b) Variation of wind farm terminal voltage following a 40ms 3-phase short circuit

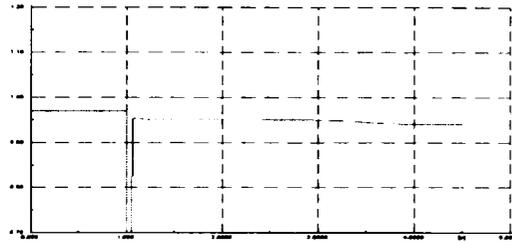


Fig. 7(b) Variation of wind farm terminal voltage following a 60ms 3-phase short circuit

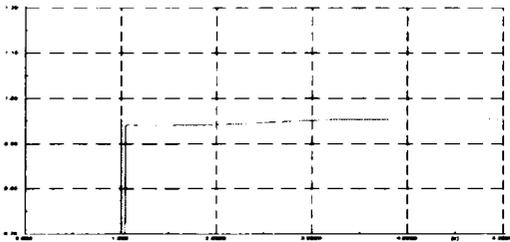


Fig. 6(a) Variation of wind farm terminal voltage following a 45ms 3-phase short circuit

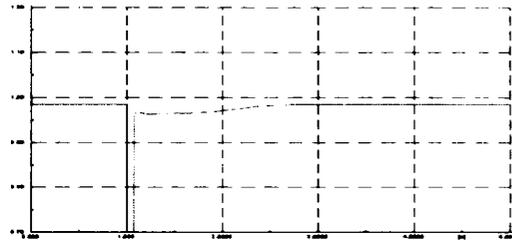


Fig. 8(a) Variation of wind farm terminal voltage following a 70ms 3-phase short circuit

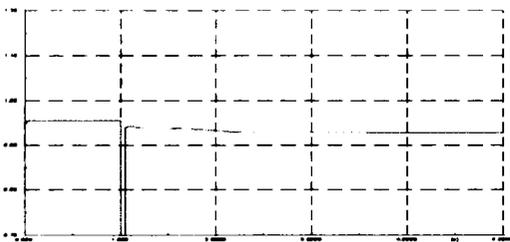


Fig. 6(b) Variation of wind farm terminal voltage following a 50ms 3-phase short circuit

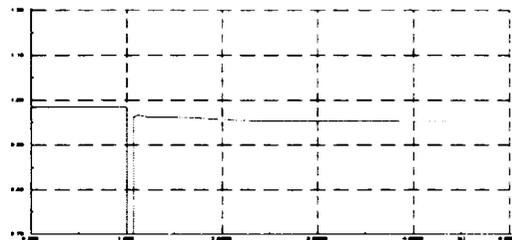


Fig. 8(b) Variation of wind farm terminal voltage following a 75ms 3-phase short circuit

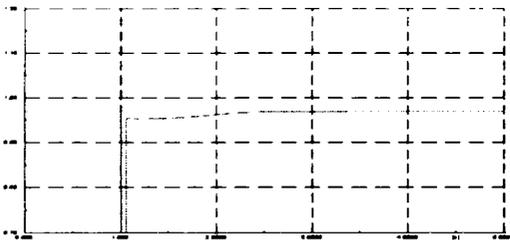


Fig. 7(a) Variation of wind farm terminal voltage following a 55ms 3-phase short circuit

Fig. 5에서 8은 부하의 역률이 각각 0.8, 0.85, 0.95, 1인 경우에 대해 임계제거시간을 비교한 파형이다. Fig. 5에서 8을 보면 부하의 역률 Table 2와 같음을 알 수 있다. 즉 부하역률이 좋아질수록 임계제거시간은 길어진다.

Table 2 Effect of load power factor on the wind farm CCT

Power factor	0.8	0.85	0.9	0.95	1
CCT	35ms	45ms	50ms	55ms	70ms

3.3 전용선의 길이 및 종류에 따른 CCT의 변화

전용선은 ACSR 160mm²이고 전선의 길이가 10km, 15km, 20km, 25km, 30km의 경우에 대하여 임계제거시간을 비교하였으며 ACSR 160mm²의 R과 X의 값은 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Impedance of ACSR 160mm² and ACSR 95mm²

	ACSR 160mm ² [Ω/km]
R	0.2024
X	0.3891

Fig. 9에서 12는 전용선의 변화에 따른 CCT의 변화를 나타낸 파형들이며 그 데이터와 임계제거시간은 Table 4에 나타내었다. Table 4에서 보면 선로가 길이가 길어질수록 CCT가 짧아지는 것을 볼 수 있는데 이것은 전용선의 길이가 길어짐에 따라 선로의 임피던스가 증가하게 되고 사고제거 후 정상상태로 복귀하기 위한 모선의 전력공급을 지연시키기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 9는 전용선의 길이가 10[km], Fig. 10은 15[km], Fig. 11은 20[km], Fig. 12는 25[km]인 경우이다.

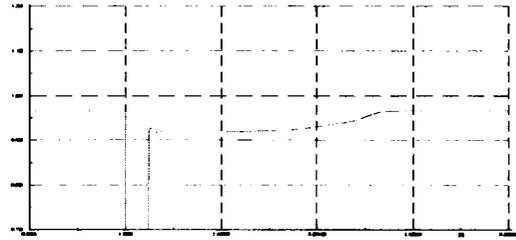


Fig. 9(a) Variation of wind farm terminal voltage following a 240ms 3-phase short circuit

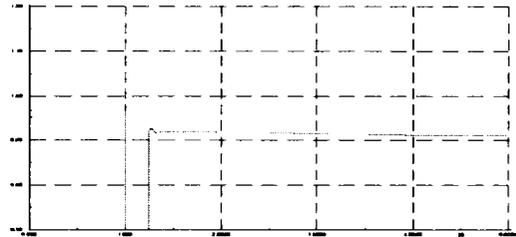


Fig. 9(b) Variation of wind farm terminal voltage following a 245ms 3-phase short circuit

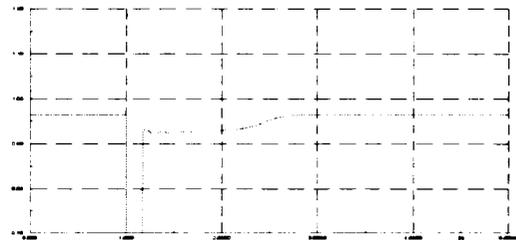


Fig. 10(a) Variation of wind farm terminal voltage following a 170ms 3-phase short circuit

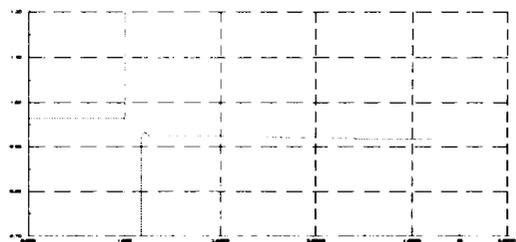


Fig. 10(b) Variation of wind farm terminal voltage following a 175ms 3-phase short circuit

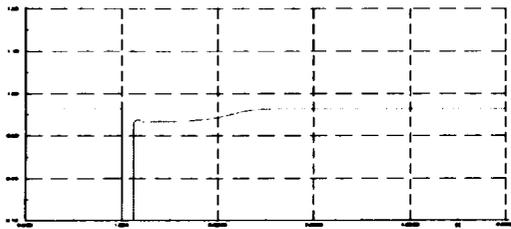


Fig. 11(a) Variation of wind farm terminal voltage following a 120ms 3-phase short circuit

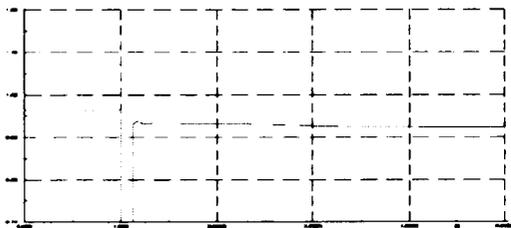


Fig. 11(b) Variation of wind farm terminal voltage following a 125ms 3-phase short circuit

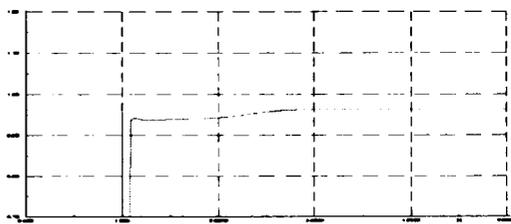


Fig. 12(a) Variation of wind farm terminal voltage following a 85ms 3-phase short circuit

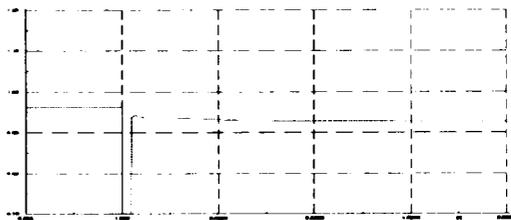


Fig. 12(b) Variation of wind farm terminal voltage following a 90ms 3-phase short circuit

Table 4 Effect of length on the wind farm CCT

Length[km]	10	15	20	25	30
CCT[ms]	240	170	120	85	50

4. 결론

제주 행원 풍력발전시스템을 모델로 한 부하 측 22.9kV 모선의 3상 단락사고 시의 과도상태 해석의 결론은 다음과 같다.

- 부하용량이 증가할 수 록 임계제거시간은 짧아진다.
- 부하역률이 좋아질 수 록 임계제거시간은 길어진다.
- 전용선의 선로저항이 커질 수 록 임계제거시간은 짧아진다.
- 부하 또는 풍력발전단지의 용량 등의 변화가 있을 시에는 계통의 임계제거시간이 고려되어야 하며 이에 맞는 보호시스템의 동작특성의 검토가 필요하다.

본 연구는 에너지 관리공단 (과제번호 : 2003-N-WD03-P-01-0-000-2003)의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

- 1) 허종철, 2001, 제주도내 풍력자원 조사에 관한 연구용역.
- 2) S. K. Salman, A. L. J. Teo, 2002, Investigation into Estimation of the Critical Clearing Time of a Grid Connected Wind Power Based Embedded Generator, IEEE.
- 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) Digsilent GmbH, 2003, Digsilent PowerFactory reference manual.
 - 8) Vestas, 2000, Electrical operating and maintenance manual.