

**풍력발전시스템이 연계된 계통의 과도안정성에 영향을 미치는 요소**

김세호\*, 오성보\*, 고성민\*, 안재현\*, 이수목\*\*, 장시호\*\*\*, 이효상\*\*\*  
 제주대학교 전기전자공학부\*, 한국전력공사\*\*, 한국전력거래소\*\*\*

**Factors Influencing Transient Stability in Network  
 Connected to Wind Power Generation System**

Se-Ho Kim\*, Sung-Bo Oh\*, Seoung-Min Ko\*, Jae-Hyun Ahn\*, Soo-Mook Lee\*\*, Si-Ho Jang\*\*\*, Hyo\_Sang Lee\*\*\*  
 Cheju National Univ.\*, KEPCO\*\*, KPX\*\*\*

**Abstract** - This paper reports investigation into the factors that influence the transient behavior of the wind power generation system following network fault conditions. It is shown that the critical clearing time(CCT) can be affected by various factors contributed by the host network. Such factors include capacity of wind power, power factor, the length of the interfacing line, etc. This investigation is conducted on a simulated grid-connected wind farm using Digsilent Power Factory.

**1. 서 론**

풍력발전단지는 규모가 커짐에 따라 계통에 대한 영향을 경감시키기 위해 기존의 배전선로의 말단이나 중간에서 계통과 연계하던 방식에서 벗어나 전용선로이용하여 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 등의 문제점이 지적되고 있으며 계통에의 영향이 커짐에 따라 사고발생에 따른 과도 안정성 연구가 수행되고 있다[1-6].

상업용으로 계통에 연계되어 운전되는 대부분의 풍력발전기는 유도발전기가 주로 사용되고 있으며 동기발전기와 다른 양상을 보이고 있어 계통에서의 사고발생 후 정상상태로 복구할 수 있는 최대의 시간(임계제거시간)을 이용하여 과도상태를 해석하고 있다[1-3].

동기발전기로 구성된 계통의 안정성은 발전기간의 위상차를 이용하여 판별되지만 유도발전기가 연계된 계통은 적정전압으로의 회복여부가 안정성 판별기준이 된다. 적정전압으로의 회복여부는 사고발생에 대해 차단기의 차단시간이 중요한 역할을 담당하며 안정성을 유지하기 위한 차단기의 동작시간은 동기발전기에 비해 유도발전기가 훨씬 작게 된다.

본 연구에서는 풍력발전시스템이 연계된 계통에 대해 임계제거시간에 미치는 요인을 분석하였으며 계통해석 프로그램인 Digsilent Power Factory를 이용하였다. 임계제거시간에 미치는 요인으로는 연계되는 계통의 단락용량(단락전류), 풍력발전 용량, 풍력발전기 역률, 풍력발전시스템과 연계되는 계통사이의 전용선 길이 등이 있으며 이들의 변화에 대한 임계제거시간의 영향을 분석하였다.

**2. 본 론**

**2.1 임계제거시간**

계통에서 부하가 급격하게 변동하거나 계통에 사고가 발생하는 경우 과도적인 상태에서의 전력-상차각 특성은 시간적인 요소를 고려하면서 결정된다. 정상시의 운전에서는 발전기나 전동기의 입, 출력은 서로 같고 양기의 내부전압간의 상차각은 송전전력과 계통 입피던스에 의해서 정해진 값을 유지하면서 운전되고 있다. 이 때 계통의 평형상태가 깨지게 되면 발전기와 전동기 간의 입, 출력에 차이가 생기고 이 차이에 비례해서 회전자속이 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.

동기기에 대한 동요방정식은 식 (1)과 같다.

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

$\phi$ : 상차각,  $\omega_s$ : 동기각속도  
 $P_m$ : 기계적 입력,  $P_e$ : 전기적출력  $H$ : 관성정수

동요방정식에서 보듯이와 같이 회전기에 우변과 같은 입, 출력의 차가 생겼을 경우에는 회전자속이 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 최대의 상차각 범위내에서 차단기 등 보호시스템을 통하여 고장을 제거하여야 하며 이때의 위상각을 임계 제거위상각(Critical Clearing Angle; CCA), 시간을 임계 제거시간(Critical Clearing Time; CCT)이라 한다.

유도기는 슬립의 범위에 따라 플러깅 작용( $1 < slip$ ), 전동기 작용( $0 < slip < 1$ ), 발전기 작용( $slip < 0$ )의 세 가지 동작으로 구분된다. 풍력발전의 경우 회전자속을 도달하는 경우 계통은 안정하다고 한다. 그러나 발전기 작용을 이용하게 된다.

유도기의 경우 동기기와는 달리 계차를 발생시키는 계차권선이 설치되어 있지 않아 외부로부터 계차전류를 공급받지 않으면 유도기는 동작하지 않는다.

유도기에서 토오르크는 전압의 제곱에 비례하여 식 (2)로 표현된다.

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

$s$ : 슬립

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

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_m - T_e}{J} \tag{3}$$

$\omega$ : 회전자 속도,  $J$ : 관성모멘트  
 $T_m$ : 기계적 토오르크,  $T_e$ : 전기적 토오르크

정상상태에서는 기계적 토르크와 전기적 토르크의 크기가 같은 지점에서 등속도로 운전하게 된다. 하지만 사고가 발생하여 단락전압이 낮아지면 식 (2)에 의해 전기적 토르크가 감소하게 되고 식(3)에 의해 회전자는 가속하게 된다. 사고가 제거되어 계통전압이 회복되면 새롭게 자장이 형성되며 이 때 새로 형성된 전기적 토르크가 기계적 토르크보다 크다면 회전자는 다시 감속하여 정상상태로 회복하겠지만 전기적 토르크가 기계적 토르크보다 작다면 회전자는 감속되지 않는다. 따라서 사고가 제거되어야 하는 최대한의 시간이 존재하게 되며 이때의 시간을 유도기의 임계 제거시간이라고 한다.

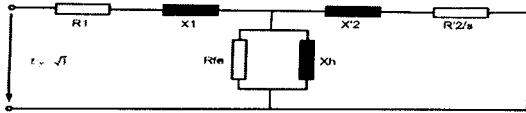
**2.2 사례연구**

풍력발전시스템이 연계된 계통의 임계제거시간에 영향을 미치는 요소를 분석하기 위해 시뮬레이션 프로그램인 Digsilent Power Factory를 이용하였으며 연계되는 풍력발전기 모델은 NEG MICON사의 AMH 500L6L BAH 1.5[MW] 모델을 적용하였다. 풍력발전기에 대한 동가모델은 그림 1. 발전기 사양은 표 1에 나타내었으며 풍력발전시스템이 연계된 계통을 그림 2에 표시하였다.

임계제거시간에 대해 영향을 미치는 요인을 분석하기 위한 기본 데이터로는 풍력발전 용량 10MW, 부하 50MW, 풍력발전시스템의 전용선 길이 30km,를 기준으로 하였으며 부하모선에 가장 가까운 사고인 3상 단락사고가 발생한 것으로 가정하였다.

연계 계통의 단락용량(단락전류), 풍력발전용량, 풍력발전기 역률, 풍력발전의 전용선 길이 등이 임계제거시간에 영향을 미치게 되며 각 요인에 대한 임계제거시간의 영향을 분석하였다.

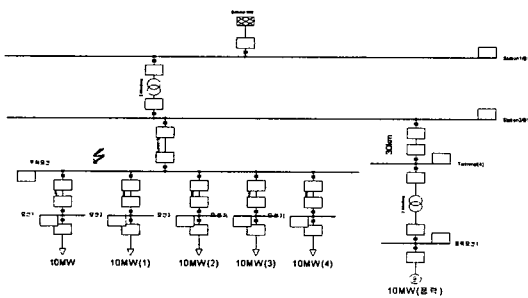
차단기의 동작시간(125ms와 130ms)에 따른 안정성의 유지여부를 살펴보기 위해 그림 2의 계통도에서 풍력발전용량 10MW, 부하 50MW, 풍력발전의 전용선 길이 30km 인 경우 부하모선에 사고가 발생하였을 때 모선전압에 대한 파형을 그림 3,4에 수록하였다. 그림에서 보는 바와 같이 125ms의 차단시간에는 모선의 전압, 전류 등이 정상상태로 복구하지만 130ms의 차단시간에는 원래 상태로 복구하지 못하여 이 경우 125ms가 임계제거시간이 된다.



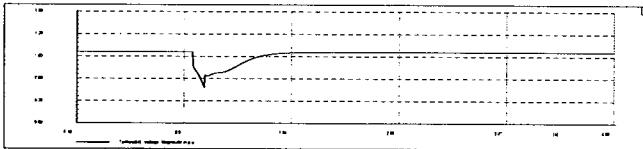
〈그림 1〉 풍력발전기 모델

〈표 1〉 발전기 정수

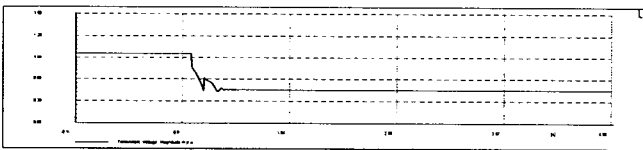
정격출력	1.5 [MW]
전압	690 [V]
극수	6
역률	0.9
고정자 저항(R1)	0.0012 [ $\Omega$ ]
고정자 누설리액턴스(X1)	0.0302 [ $\Omega$ ]
자화 리액턴스(Xh)	0.8730 [ $\Omega$ ]
회전자 리액턴스(X'2)	0.0198 [ $\Omega$ ]
회전자 저항(R'2/s)	0.0026 [ $\Omega$ ]
자화 저항(Rfe)	35.2 [ $\Omega$ ]



〈그림 2〉 풍력발전단지 연계계통의 단선도



〈그림 3〉 풍력발전 모선전압(차단시간 125ms)



〈그림 4〉 풍력발전 모선전압(차단시간 130ms)

2.2.1 풍력발전용량에 따른 CCT의 변화

부하 50MW, 풍력발전의 전용선 길이 30km 인 경우 부하모선에 사고가 발생하였을 때 연계되는 풍력발전의 용량에 따른 임계제거 시간을 표 2에 표시하였다. 표에서 보는 바와 같이 풍력발전의 용량이 증가할수록 임계제거시간이 짧게 되어 과도안정성이 가혹해짐을 알 수 있으며 연계되는 계통의 단락용량(단락전류)이 임계제거 시간에 가장 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

〈표 2〉 풍력발전용량에 따른 CCT

풍력용량 [MW]	10	20	30	40	
CCT [ms]	연계계통 단락전류 30kA	125	121	116	111
	연계계통 단락전류 20kA	122	118	114	110
	연계계통 단락전류 10kA	96	94	90	86

2.2.2 풍력발전기 역률에 따른 CCT의 변화

풍력발전용량 10MW, 부하 50MW, 풍력발전의 전용선 길이 30km 인 경우 부하모선에 사고가 발생하였을 때 연계되는 풍력발전기 역률에 따른 임계제거 시간을 표 3에 표시하였다. 표에서 보는 바와 같이 풍력발전기 역률이 증가할수록 임계제거시간이 커지게 되어 과도안정성이 나아짐을 알 수 있다

〈표 3〉 풍력발전기 역률에 따른 CCT

풍력발전기역률	0.8	0.85	0.9	0.95	1.0	
CCT [ms]	연계계통 단락전류 30kA	64	95	125	159	233
	연계계통 단락전류 20kA	68	95	122	152	217
	연계계통 단락전류 10kA	57	77	96	119	163

2.2.3 전용선 길이에 따른 CCT의 변화

풍력발전 용량 10MW, 부하 50MW 인 경우 부하모선에 사고가 발생하였을 때 연계되는 풍력발전의 전용선 길이에 따른 임계제거 시간을 표 4에 표시하였다. 표에서 보는 바와 같이 전용선의 길이가 증가할수록 임계제거 시간이 짧게 되어 과도안정성이 가혹해짐을 알 수 있다.

〈표 4〉 전용선 길이에 따른 CCT

전용선의 길이[km]	10	20	30	40	
CCT [ms]	연계계통 단락전류 30KA	253	179	125	82
	연계계통 단락전류 20KA	229	168	122	74
	연계계통 단락전류 10KA	164	129	96	62

3. 결 론

본 연구에서 계통해석 프로그램인 Digsilent Power Factory를 이용하여 풍력발전시스템이 연계된 계통의 임계제거시간에 미치는 요인을 분석한 결과는 다음과 같다.

- 임계제거시간에는 풍력발전이 연계되는 계통의 단락용량(단락전류)이 가장 큰 영향을 미치게 되며 연계되는 계통이 강할수록 임계제거시간이 길어진다.
- 풍력발전의 용량이 증가할수록 임계제거시간은 짧게 되어 계통의 안정성이 가혹해지게 된다.
- 풍력발전기의 역률이 좋아질수록 임계제거시간은 길어지게 되며 안정성 측면에서도 풍력발전기의 역률은 어느 수준이상으로 유지되어야 한다. (계통연계기준상으로는 0.9이상)
- 풍력발전과 연계되는 계통사이의 전용선의 길이가 증가할수록 임계제거 시간은 줄어들어 가급적 변전소 모선에 근접하여 풍력발전단지가 시설되어야 한다.

전력계통에 연계되는 풍력발전의 규모가 점차 커지는 상황에서 계통의 안정성 관점에서 풍력발전을 고려해야 하는 시점이 되었으며 풍력발전 연계점의 단락용량이나 풍력발전 용량, 전용선 길이 등에 따라 풍력발전의 허용 연계용량을 결정해야 할 것이다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] Salman K. Salman, Ibrahim M. Rida, " Investigating the Impact of Embedded Generation on Relay Settings of Utilities' Electrical Feeders", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 16, No. 2, pp. 246-251, April 2001.
- [2] S. K. Salman, A. L. J. Teo, "Improvement of Fault Clearing Time of Wind Farm using Reactive Power Compensation", IEEE Porto Power Tech Conference, Porto, Portugal, September 2001.
- [3] S. K. Salman, A. L. J. Teo, "Windmill Modeling Consideration and Factors Influencing the Stability of a Grid-Connected Wind Power-Based Embedded Generator", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 18, No. 2, pp. 793-802, 2003.
- [4] C. S. Demoulias, P. Dokopoulos, "Electrical Transients of Wind turbines in a Small Power Grid", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 11, No. 3, PP. 636-642, 1996.
- [5] J. Tamura, T. Yamazaki, "Transient Stability Simulation of Power System Including Wind Generator by PSCAD/EMTDC", 2001 IEEE Porto Power Tech Conference.
- [6] 김세호, " 풍력발전시스템이 연계된 계통의 과도상태 해석", 한국태양에너지학회논문집, Vol. 23, No. 3, pp. 29-36, 2003. 9.
- [7] Thomas Ackermann, " Wind Power in Power Systems", WILEY, 2005