

풍력발전단지 집합 시스템 사고 시 DFIG의 Shaft Torsion 분석

윤의상, 이진식, 이영귀, 정태영, 강용철

전북대학교 전기공학과, 풍력에너지 전력망적응기술 연구센터, 스마트그리드 연구센터

Analysis of shaft torsion of a DFIG for a wind farm collector system fault

Eui-Sang Yoon, Jin-Shik Lee, Young-Gui Lee, Tai-Ying Zheng, Yong-Cheol Kang

Chonbuk National University, Dept. of Electrical Engineering, WeGAT research center, Smart grid research center

Abstract - This paper analyzes the shaft torsion of a doubly-fed induction generator (DFIG) for a wind farm collector system fault. When a fault occurs, the active power of the DFIG cannot be transmitted to the grid and thus accelerates the rotation of both the blade and the rotor. Due to the different inertia of these, the angle of deviation fluctuates and the shaft torsion is occurred. This becomes much severe when the rotational speed of the blade exceeds a threshold, which activating the pitch control to reduce the mechanical power. The torque, which can be sixty times larger than that in the steady state, may destroy the shaft. The shaft torsion phenomena are simulated using the EMTP-RV simulator. The results indicate that when a wind farm collector system fault occurs, a severe shaft torsion is occurred due to the activation of the pitch control.

1. 서 론

기존의 대용량 화력 발전기를 대체하기 위해 상대적으로 소용량인 유도발전기로 구성된 풍력발전단지를 계통에 연계하는 시도가 국내에서 활발해지고 있다.

풍력발전기에 주된 형태로 사용되는 유도기는 일정부과수, 일정크기의 정현파 전압에서 연속적이고 일정한 토크를 발생하도록 설계된다. 최근 인버터에 의한 유도발전기의 가변속 구동이 증가하면서 유도기 구동 시스템의 축비틀림(Shaft torsion) 현상이 큰 문제가 되고 있다. 회전하는 질량체에 과도한 진동이 발생하게 되면 축에 응력이 인가되고 장기간에 걸친 과도한 응력의 축적으로 회전축의 절단, 도체봉손상, 기어의 과도한 마모 등의 기계적 손상을 초래하게 된다[1]. 축 비틀림은 현상은 그 존재를 감지하고 크기를 측정하기는 대단히 힘들며 기계적 손상이 발생한 이후에야 인지되는 것이 보통이다. 또한 풍력발전단지 구성 시, 소용량인 풍력발전기는 기존의 대용량 화력발전기와 비교하여 관성모멘트가 작고 제한된 지역에 단지를 구성하여 계통에 연계되기 때문에 전력계통의 안정도 및 다이내믹스에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

본 논문에서는 풍력발전단지의 집합 시스템 사고 시, 이중여자 유도발전기(DFIG)의 축비틀림 현상을 Two-mass 모델로 구현하여 EMTP-RV를 이용하여 분석하였다.

2. 본 론

2.1 축 비틀림

과거의 전력계통에서 송전선로의 손실 보상을 위해 선로에 직렬 콘덴서를 설치했다. 이러한 계통에서 외란으로 인해 운전 중인 발전기의 축이 깨지는 Subsynchronous resonance 현상이 발생한다. 이로 인해서 발전기의 보호와 전력계통의 안정도에 관한 연구 분야로 축비틀림 현상을 연구하기 시작하였다. 축비틀림이란, 발전기에서 기계적인 입력 에너지를 전기적인 출력 에너지로 변환과정 중 다중의 질량체간에 회전하는 각각의 각변위(angle of position)가 서로 어긋나는 현상으로 그 정도를 축에 걸리는 일의 단위인 토크(Nm)로 나타낸다.

식 (1)은 그림 1과 같이 두 질량체 $I+1$ 과 I 사이의 축에 걸리는 토크 $T_{I,I+1}$ 에 관한식이다. $k_{I,I+1}$ 은 두 질량체 $I+1$ 과 I 사이의 축의 강성도(stiffness)이며 단위는 Nm/rad이고 $D_{I,I+1}$ 은 축의 댐핑 계수를 나타내며 단위는 Nms/rad이다. δ_i 와 δ_{i+1} 은 두 질량체의 각변위로 단위는 rad이다. 축 비틀림이 생기면 두 질량체의 각변위차(angle of deviation)가 커진다. 따라서 축에 걸리는 토크를 통해 두 질량체 간의 축의 비틀림 정도를 알 수 있다.

$$T_{I,I+1} = k_{I,I+1}(\delta_{i+1} - \delta_i) + D_{I,I+1} \left(\frac{d\delta_{i+1}}{dt} - \frac{d\delta_i}{dt} \right) \quad (1)$$

DFIG의 기계적 파라미터 결정시 이상적인 기어박스로 간주하여 그림 2와 같이 나타내었다. 식 (1)에서 댐핑계수는 축비틀림에 토크에 큰 영향을 주지 않으므로 0으로 무시하여 식 (2)와 같은 Two-mass 모델에서 블레이드와 로터사이의 축에 걸리는 토크 식을 얻을 수 있다[2-4]. $K_{rotor,blade}$ 값을 1.76×10^5 Nm/rad로 정하였다.

$$T_{rotor,blade} = K_{rotor,blade}(\delta_{blade} - \delta_{rotor}) \quad (2)$$

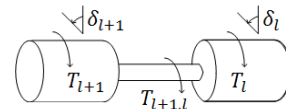
2.2 사고 시 풍력발전기의 응동

발전기는 정상상태 입력 값인 기계적 토크 T_m 과 출력 값인 전기적 토크 T_e 가 서로 일치하여 가속토크 T_a 가 0값일 때 아래의 식 (3)에 의해 발전기가 가속하지 않고 일정한 출력을 낼 수 있다. 풍력발전단지의 선로사고가 발생하면 발전기의 전기적인 출력이 나가지 못하고 가속토크가 양의 값이 되면서 발전기의 로터가 가속한다. 사고 시, 가속하는 로터를 감속하기위해 풍력발전기는 피치제어로 기계적인 입력을 감소시킨다.

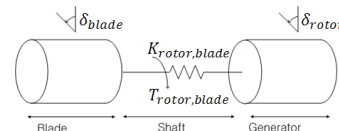
$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e = T_a \quad (3)$$

3. 사례연구

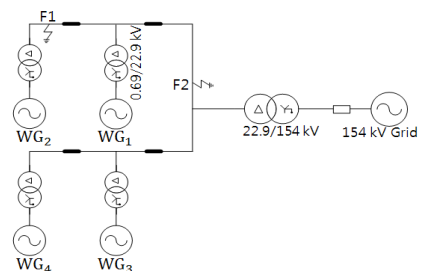
그림 3과 같이 풍력발전단지를 EMTP-RV에 구현 하였다. DFIG의 정격 출력은 2 MW이고 총 4대를 사용하여 8 MW 풍력발전단지를 구성하였다. 풍력발전기 앞단의 변압기는 0.69/22.9 kV 변압기를 사용하였고 연계선의 변압기는 22.9/154 kV를 사용 하였다. 풍력발전단지를 154 kV 그리드에 연계 하였다. F1지점과 F2지점에 선로 3상 사고를 발생시켰다. 사고발생 시간은 9초이며 영구사고를 발생하였고 풍력발전단지로 들어오는 바람의 속도는 15 m/s로 가정하였다. 풍력발전기의 Two-mass 모델에서 블레이드와 발전기사이의 축비틀림을 관찰하였다.



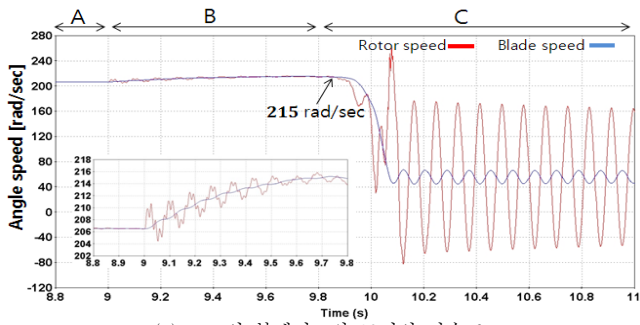
〈그림 1〉 두 질량체간의 축에 걸리는 토크



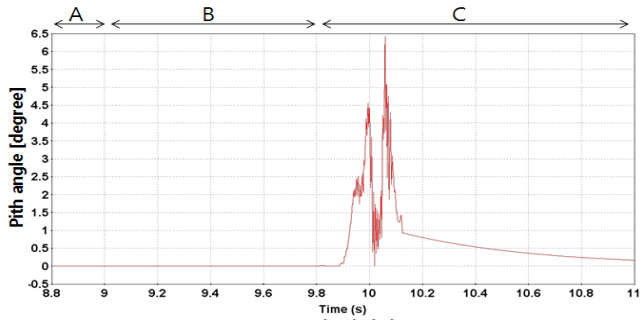
〈그림 2〉 Two-mass 모델



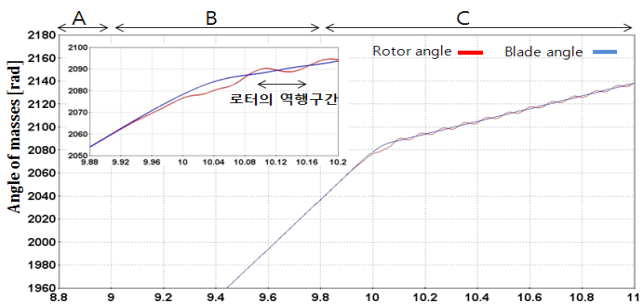
〈그림 3〉 풍력발전단지 모델링



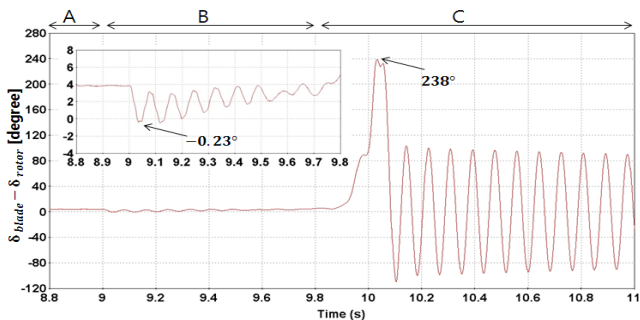
(a) WG₁의 블레이드와 로터의 각속도



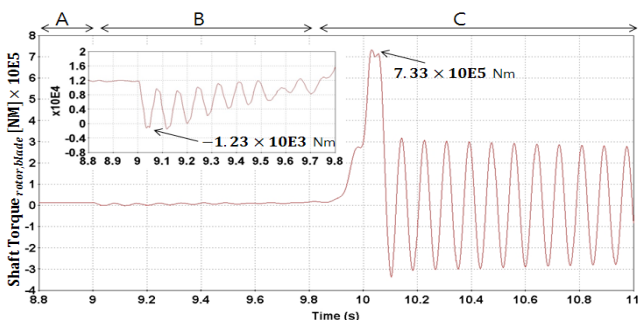
(b) WG₁의 피치각



(c) WG₁의 블레이드와 로터의 각변위



(d) WG₁의 블레이드와 로터의 각변위차



(e) WG₁의 축에 걸리는 토크
〈그림 4〉 사례 1의 결과

3.1 사례 1

사고의 위치는 그림 3에서의 F1지점이고 3상 사고를 발생하였다. 사고는 9초에서 영구사고를 발생시켰다. 그림 4a는 WG₁의 블레이드와 발전기 로터의 각속도를 나타내며 그림 4b는 블레이드의 피치각, 그림 4c는 블레이드와 로터의 각변위, 그림 4d는 블레이드와 로터의 각변위차, 그림 4e는 두 질량체의 축에 걸리는 토크를 나타낸다. 사례 1의 결과는 사고전 9초까지를 A구간, 사고 후인 9초부터 9.8초까지를 B구간, 9.8초 이후를 C구간으로 나누어서 설명하였다.

A구간: 그림 4a와 같이 두 질량체의 각속도는 206.6 rad/sec로 그림 4b와 같이 피치각은 0°이다. 정상상태에서는 두 질량체의 속도는 일정하다. 그림 4d와 같이 두 질량체의 각변위차가 4°로 블레이드가 로터보다 각변위가 앞서고 그림 4e와 같이 두 질량체의 축에 걸리는 토크는 0.12×10^5 Nm이다.

B구간: 그림 4a와 같이 두 질량체는 가속하는데 이는 사고이후에 풍력발전기의 전기적인 출력이 나가지 못하고 바람에너지에 의해 가속하기 때문이다. 또한 로터는 블레이드보다 더 빠르게 가속하며 진동한다. 그림 4b와 같이 피치각은 정상상태와 같은 0°이다. 두 질량체의 각변위차는 그림 4d와 같이 정상상태보다 낮은 값에서 진동하는데 로터가 블레이드의 각변위보다 앞서는 경우와 각변위차가 0°인 경우가 발생한다. 이때 로터는 블레이드보다 각변위가 최대 0.23°앞선다. 그림 4e와 같이 축에 걸리는 토크는 정상상태 보다 최소 -1.23×10^3 Nm로 낮아지는데 두 질량체의 각변위차가 작아졌기 때문이다.

C구간: B구간과 같이 블레이드와 로터의 회전 속도가 계속 증가함에 따라 피치제어를 시작한다. 피치제어는 블레이드의 피치조절을 통해 기계적인 에너지를 감소시켜 전기적인 에너지와 밸런스를 맞추는 제어방법이다. 따라서 블레이드의 회전 속도가 어떤 임계값보다 크면 피치제어를 시작한다. 그림 4a와 같이 두 질량체의 속도가 215 rad/sec까지 가속하면 피치제어를 시작하고, 블레이드가 받는 바람 에너지를 감소시켜 로터와 블레이드의 속도는 감속하게 된다. 그림 4c와 같이 로터가 블레이드보다 각변위가 앞서는 구간과 로터는 블레이드와 회전방향이 다른 역행구간이 발생하며 그림 4d와 같이 각변위차가 최대 238° 발생했다. 이때 축 비틀림에 의해 축이 깨지는 기계적인 영구사고로 간주할 수 있다. 그림 4e와 같이 축에 걸리는 토크는 최대 7.33×10^5 Nm까지 커지는데 이는 두 질량체의 각변위차가 커졌기 때문이다.

풍력발전기는 사고전인 A구간에서 블레이드가 로터보다 각변위가 앞서서 회전하고 사고후인 B구간에서 전기적인 출력이 못나가고 기계적인 입력에 의해 가속하게 된다. 이때 로터가 블레이드보다 각변위가 앞서는 경우가 생긴다. 축에 걸리는 토크는 진동하고 그 크기가 정상상태보다 작아졌다. C구간에서는 피치제어를 통해 두 질량체의 속도가 작아지는데 이때 축에 걸리는 토크가 정상상태보다 60배 커져 축 비틀림 현상이 심해졌다. 또한 로터는 블레이드의 회전방향과 반대로 백스윙하게 된다.

WG₂, WG₃, WG₄의 결과는 사례 1과 같은 특성을 보이므로 본 논문에서는 나타내지 않았다. 또한 F2 사고지점에서 각각의 풍력발전기들은 위와 같은 특성을 보인다.

4. 결 론

본 논문에서는 풍력발전단지에서 사고 시, DFIG의 블레이드와 로터를 Two-mass 모델로 구현하여 축비틀림 현상을 EMT-PV를 통해 분석하였다.

사고 시, 풍력발전기의 전기적인 에너지는 출력되지 않고, 기계적인 에너지의 입력에 의해 발전기의 로터는 가속된다. 그 결과 로터는 블레이드보다 빠르게 가속하며 각변위가 앞서는 경우가 생긴다. 사고 직후 축에 걸리는 토크는 정상상태보다 작고 진동한다. 사고가 지속되면 발전기는 두 질량체의 속도를 감속 하기위해 피치제어를 시작한다. 이로 인해 로터는 블레이드보다 더 빨리 감속하여 두 질량체간의 각변위차가 커져 축이 깨지는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 피치제어 알고리즘에 대한 보완과 더 많은 연구가 필요할 것이다.

본 연구는 전기적인 외란으로 기계를 보호하는 요구조건을 결정하는 연구 분야의 계발이 기대된다.

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임.
과제번호: (2010-0029426)

[참 고 문 헌]

- [1] 홍찬욱, 설승기, “인버터로 구동되는 유도전동기 시스템의 축 비틀림 진동 해석에 관한 연구,” 대한전기학회 논문지, 제42권 제12호 1993년 12월, pp. 32-42
- [2] 이동규, 김형규, 강상희, 주행로, 유영식, “인출선로 제재로에 따른 축비틀림 토크 분석,” 대한전기학회 추계학술대회 논문집 2008년 11월, pp. 56-58
- [3] Norman S. Nise, “Control Systems Engineering,” pp. 78, 2008
- [4] Jan Machowski, Janusz W. Bialek, and James R. Bumby, “Power System Dynamics: Stability and Control,” pp. 259, 2008