

Analysis of Response of a Wind Farm During Grid/inter-tie Fault Conditions

이혜원* · 김연희** · 정태영** · 이상철* · 강용철†
 (Hye-Won Lee · Yeon-Hee Kim · Tai-Ying Zheng · Sang-Cheol Lee · Yong-Cheol Kang)

Abstract - In a wind farm, a large number of small wind turbine generators (WTGs) operate whilst a small number of a large generator do in a conventional power plant. To maintain high quality and reliability of electrical energy, a wind farm should have equal performance to a thermal power plant in the transient state as well as in the steady state. The wind farm shows similar performance to the conventional power plant in the steady state due to the advanced control technologies. However, it shows quite different characteristics during fault conditions in a grid, which gives significant effects on the operation of a wind farm and the power system stability. This paper presents an analysis of response of a wind farm during grid fault conditions. During fault conditions, each WTG might produce different frequency components in the voltage. The different frequency components result in the non-fundamental frequencies in the voltage and the current of a wind farm, which is called by "beats". This phenomenon requires considerable changes of control technologies of a WTG to improve the characteristics in the transient state such as a fault ride-through requirement of a wind farm. Moreover, it may cause difficulties in protection relays of a wind farm. This paper analyzes the response of a wind farm for various fault conditions using a PSCAD/EMTDC simulator.

Key Words : Wind farm, Beat, Grid fault, Transient state

1. 서론

세계 각국은 지구 온난화 문제를 해결하기 위하여 발표된 교토 의정서의 온실가스 감축 조건을 만족하기 위하여 화석 연료를 대체할 에너지원을 찾기 위해 많은 노력을 경주해 오고 있다[1]. 신재생에너지원 중 풍력에너지를 발전단지는 화력발전단지의 수준에 이르러, 화력발전을 대체할 가장 경쟁력있는 수단으로 주목받고 있다[2]. 따라서, 최근 EU, 미국, 중국, 인도 등 세계적으로 풍력발전용량이 급증하고 있어, 설치용량이 150 GW에 이른다[3]. 풍력에너지를 불규칙성이 그리드에 주는 영향을 최소화하고 발전단지를 감소하기 위하여 대용량의 풍력발전단지가 건설되고 있으며, 육상 풍력의 한계를 극복하기 위해 해상풍력의 관심이 고조되고 있다. 따라서 세계 각국에서는 대규모 해상풍력단지 건설에 집중하고 있으며, 우리나라도 2011년에서 2019년까지 서해안에 2.5 GW 해상풍력단지 건설을 추진하고 있다[4].

불규칙한 출력과 그리드 발전기에 비해 용량이 매우 적은 소용량 풍력발전기의 특성 때문에, 풍력단지의 설치용량이 증가하면 그리드의 안정도와 신뢰도에 큰 영향을 주게 된다. 이러한 문제점을 해결/완화하기 위해 세계 각국에서는

풍력발전단지에 요구되는 전력망 연계기준(grid-code)을 제정하여 운영하고 있다. 이러한 전력망 연계기준을 만족하기 위한 풍력단지를 설계하기 위해서는, 사고 발생 시 다수의 소용량의 풍력발전기로 구성된 대규모 풍력단지의 응답에 대한 자료와 이에 대한 분석이 매우 필요하다. 하지만 기존 풍력발전단지에 대한 연구들[5]은 그리드 사고 시 연계점의 전압, 전류에 대한 분석이 미흡하고, 발전기들이 서로 다른 주파수로 운전할 때 나타나는 현상에 대한 연구의 필요성을 느끼지 못하였고 이러한 현상 또한 부각 되지 않았다.

기존 연구에서는 풍력발전단지를 하나의 대용량 등가발전기로 모델링하였으나 계통사고 시 소용량의 풍력발전기들의 관성이 작기 때문에 대용량 발전기와 다른 특성을 보인다. 또한 각 풍력발전기가 맞이하는 풍속이 다르기 때문에 풍력발전기의 주파수가 달라진다. 따라서 이에 대한 연구가 필요하다.

참고문헌 [6]는 미분방정식법을 이용한 풍력발전단지 연계선 보호용 거리계전 알고리즘을 제안하였다. 하지만 이 논문에서는 다양한 사고위치, 사고종류, 풍력발전단지의 풍황 등에 대한 전압, 전류의 현상에 대해 고려하지 않았다.

본 논문에서는 다양한 사고위치, 사고종류, 풍력발전단지의 풍황 등을 고려하여 풍력발전단지와 그리드가 연결된 연계점의 전압, 전류를 분석하였다. 연계선/그리드에서 사고가 발생하면, 다수의 소용량 풍력발전기의 조건이 다르므로, 각 풍력발전기의 주파수가 달라지고, 이로 인하여 풍력발전단지의 전압, 전류에 주파수가 변동하는 맥놀이 현상이 발생한다. 이러한 맥놀이 현상은 풍속이 다른 경우 더욱 심하게 발생한다. 이러한 현상을 모의하기 위해 PSCAD/EMTDC를

* 준 회원 : 전북대 공대 전기공학과 석사과정
 ** 정 회원 : 전북대 공대 전기공학과 박사과정
 † 교신저자, 시니어회원 : 전북대 공대 전기공학과 교수
 E-mail : yckang@jbnu.ac.kr
 접수일자 : 2011년 1월 6일
 최종완료 : 2011년 5월 16일

이용하여 사고가 발생한 경우 다양한 풍황 조건에 따라 풍력발전단지의 응답을 분석하였다.

2. 맥놀이

그리드 사고 시 풍력발전단지에서 발생하는 맥놀이 현상을 개략적으로 설명하기 위하여 그림 1과 같은 등가회로를 나타내었다. 그림 1은 두 대의 풍력발전기가 병렬로 운전하고 있는 경우, 연계선에서 사고가 발생한 경우를 보여주고 있다. e_1, e_2 는 풍력발전기의 내부전압, i_1, i_2 는 풍력발전기 전류, i 는 연계선 전류이다. v 는 풍력발전단지의 집합모선의 전압이다. r, R_L 는 풍력발전기의 권선저항과 연계선 저항이고 L, L_L 는 풍력발전기와 연계선의 인덕턴스이다. 두 대의 풍력발전기의 내부 전압은 식 (1)과 (2)로 표현할 수 있다.

$$e_1 = A_1 \cos(\omega_1 t + \theta_1) \tag{1}$$

$$e_2 = A_2 \cos(\omega_2 t + \theta_2) \tag{2}$$

사고가 발생하기 전 각 풍력발전기의 주파수 ω_1 과 ω_2 는 60 Hz로 같으나 풍속이 다른 경우 사고가 발생하였을 때 파도 기간에 각 풍력발전기의 주파수는 달라진다. 그림 1에서, e_1, e_2 와 v 를 구하면 식 (3)~(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$e_1 = r i_1 + L \frac{di_1}{dt} + v \tag{3}$$

$$e_2 = r i_2 + L \frac{di_2}{dt} + v \tag{4}$$

$$v = R_L i + L_L \frac{di}{dt} \tag{5}$$

식 (5)의 i 는 i_1, i_2 의 합을 나타내며, e_1, e_2 의 합을 구하면 식 (6)과 같다.

$$e_1 + e_2 = r i + L \frac{di}{dt} + 2v \tag{6}$$

식 (6)에 식 (5)를 대입하면 식 (7)과 같다.

$$e_1 + e_2 = (2R_L + r) i + (2L_L + L) \frac{di}{dt} \tag{7}$$

1계 비제차 미분방정식인 식 (7)의 해를 구하면 식 (8)과 같다. 식 (5)에 식(8)을 대입하면 v 를 구할 수 있다.

$$i = A \sin(\omega_1 t + \theta_1) + B \cos(\omega_1 t + \theta_1) + C \sin(\omega_2 t + \theta_2) + D \cos(\omega_2 t + \theta_2) + e^{-at} \tag{8}$$

여기서,

$$A = \frac{A_1 a}{(2L_L + L)(\omega_1^2 + a^2)}, \quad B = \frac{A_1 \omega_1}{(2L_L + L)(\omega_1^2 + a^2)},$$

$$C = \frac{A_2 a}{(2L_L + L)(\omega_2^2 + a^2)}, \quad D = \frac{A_2 \omega_2}{(2L_L + L)(\omega_2^2 + a^2)},$$

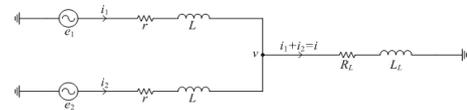
$$a = \frac{2R_L + r}{2L_L + L}$$

식 (8)에서 $\omega_1 = 60$ Hz, $\omega_2 = 61$ Hz로 하였을 때 i 의 그래프를 그림 2에 나타내었다. 연계선/그리드에서 사고 발생 시, 각 풍력발전기의 주파수에 1 Hz의 차이가 생겼을 때, 연계선에 흐르는 전류에 주파수와 크기가 달라지는 맥놀이 현상이 일어남을 확인 할 수 있다.

3. 사례 연구

연계선/그리드 사고 시 풍력발전단지의 맥놀이 현상을 확인하기 위해 그림 3과 같은 154 kV급 송전계통에 연계된 40 MW 풍력발전단지를 모델링 하였다. PSCAD/EMTDC를 사용하였으며 풍력발전단지와 A 모선 사이의 연계선 길이는 8 km, A 모선에서 등가전원 사이의 송전선의 길이는 50 km이다. 측정점은 풍력발전단지 앞단의 PCC 지점이다.

풍력발전기는 2 MW의 동기발전기를 사용하였다. 사고 위치는 그리드 사고(F2 지점)와 연계선 사고(F1 지점)로 3상 단락 사고, 3상 고저항사고, A상 지락사고에 대해 시뮬레이션을 실시하였다. 사례연구의 풍속과 사고위치, 사고종류는 표 1에 정리하였다. 각 풍력발전기의 풍속은 일정하다고 가정하였다. 사고 발생시간은 0.1초이며 샘플링 비율은 주기당 64샘플이다.



e_1, e_2 : 풍력발전기의 내부전압
 i_1, i_2, i : 풍력발전기 전류와 연계선 전류
 r, R_L : 풍력발전기의 권선저항과 연계선 저항
 L, L_L : 풍력발전기와 연계선의 인덕턴스

그림 1 사고 시 병렬 연결된 풍력발전기의 등가회로
 Fig. 1 Equivalent circuit connected in parallel at fault

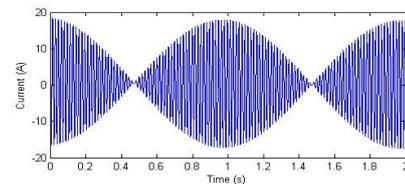


그림 2 $\omega_1 = 60$ Hz, $\omega_2 = 61$ Hz 일 때 전류파형
 Fig. 2 Current waveform at $\omega_1 = 60$ Hz and $\omega_2 = 61$ Hz

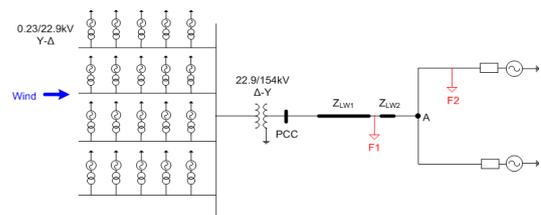


그림 3 모델 계통
 Fig. 3 Model system

표 1 사례연구

Table 1 Case Study

| 사례연구 | 풍속[m/s] | 사고종류 | 사고위치 |
|------|---------|-------|-----------|
| 사례 1 | 15 | 3상 단락 | 그리드사고(F2) |
| 사례 2 | 15 | 3상 단락 | 연계선사고(F1) |
| 사례 3 | 15 | A상 지락 | 연계선사고(F1) |
| 사례 4 | 12.5~15 | 3상 단락 | 그리드사고(F2) |
| 사례 5 | 12.5~15 | 3상 단락 | 연계선사고(F1) |

3.1 사례 1: 풍속(15 m/s), 3상 단락 사고, F2(그리드사고)

사례 1은 모든 풍력발전기의 풍속이 같은(15 m/s) 경우 그리드 F2 지점에서 3상 단락 사고가 발생한 경우이다. 그림 4는 사례 1의 결과를 나타낸다. 그림 4(a), 4(c)는 풍력발전단지 PCC 지점의 A상 전압, 전류이다. 그림 4(b), 4(d)는 A상 전압, 전류를 확대한 그림이다. 그리드(F2 지점)에서 사고가 발생하면, 그림 4(e)에 나타난 바와 같이, 그리드 주파수는 일정한 반면, 각 풍력발전기간의 주파수는 풍속이 같기 때문에 같은 기울기로 증가한다. 그리드와 풍력발전단지의 주파수가 달라지기 때문에 PCC지점의 전압, 전류의 크기와 주파수가 달라지는 맥놀이 현상이 발생함을 알 수 있다.

3.2 사례 2: 풍속(15 m/s), 3상 단락 사고, F1(연계선사고)

사례 2는 풍속이 같은(15 m/s) 경우 연계선(F1 지점)에서 3상 단락 사고가 발생한 경우이다. 그림 5(a), 5(c)는 풍력발전단지 PCC 지점의 A상 전압, 전류이며, 그림 5(b), 5(d)는 A상 전압, 전류를 확대한 그림이다. 그림 5(e)는 각 풍력발전기의 주파수와 그리드의 주파수를 나타낸 그림이다. 풍속이 같은(15 m/s) 경우 F1 지점에서 3상 단락 사고가 발생한 경우, 사례 1과 같이 그리드의 주파수는 일정한 반면, 각 풍력발전기의 주파수는 같은 기울기로 증가한다. 하지만, 이 경우에는 연계선에서 3상 단락 사고가 발생하였기 때문에 그리드와 풍력발전단지가 완전히 분리되어, 각 풍력발전기의 풍속이 같아서 풍력단지만의 풍력발전기는 같은 주파수가 되기 때문에 맥놀이가 발생하지 않는다.

3.3 사례 3: 풍속(15 m/s), A상 지락사고, F1(연계선사고)

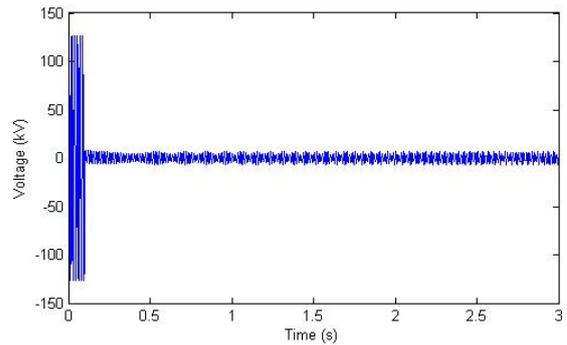
사례 3은 풍력발전기의 풍속이 15 m/s로 같고 연계선(F1 지점)에서 A상 지락사고가 발생한 경우이며, 사고의 종류만 다르고 사례 2와 같다. 그림 6은 사례 3의 결과이다. 그림 6(e)는 각 풍력발전기의 주파수와 그리드의 주파수를 나타낸 그림이다. 이 경우에도 그리드 주파수는 일정하다. 하지만, 풍력발전기의 주파수는 적은 양이지만 진동한다. 따라서, 사례 3은 연계선 사고임에도 불구하고, 사례 2와 다르게, 맥놀이가 발생함을 알 수 있다. 하지만, 사고 난 상이 한 상이므로, 맥놀이 현상은 사례 1의 결과와 비교하면 정도가 미약함을 알 수 있다.

3.4 사례4: 풍속(12.5~15 m/s), 3상 단락 사고, F2(그리드사고)

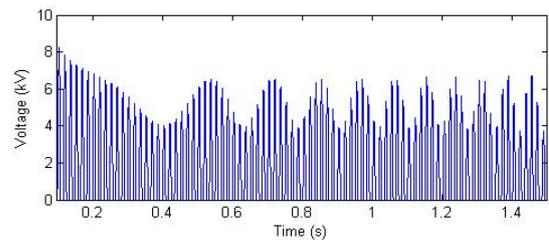
사례 4는 풍속이 다른(12.5~15 m/s) 경우 그리드(F2 지점)에서 3상 단락 사고가 발생한 경우이며, 풍속이 다른 조건을 제외하고는 사례 1과 같은 조건이다. 그림 7(e)에서 나타난 바와 같이, 사고가 발생하면, 각 풍력발전기의 풍속이 다르기 때문에 주파수는 다른 기울기로 증가함을 알 수 있다. 그림 4(a)와 그림 7(a)를 비교해 보면, 전압에 맥놀이 현상이 발생하지만, 파형이 다르다. 또한, 그림 4(c)와 그림 7(c)를 비교해 보면, 전류에도 맥놀이 현상이 발생하지만, 사례 4의 파형의 맥놀이 현상의 정도가 매우 심함을 알 수 있다. 따라서, 그리드에 3상 단락 사고가 발생한 경우, 각 풍력발전기의 풍속이 다른 경우에는 PCC 지점의 전압, 전류에서 맥놀이가 심하게 발생함을 확인하였다.

3.5 사례5: 풍속(12.5~15 m/s), 3상 단락 사고, F1(연계선사고)

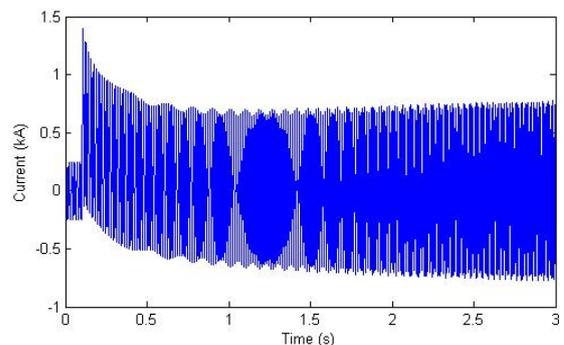
사례 5는 풍속이 다른(12.5~15 m/s) 경우 연계선(F1 지



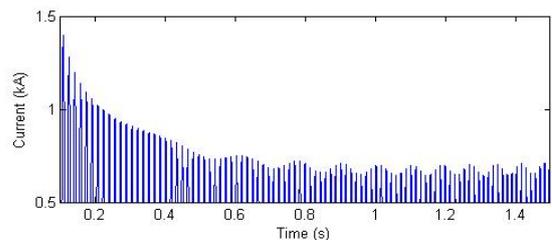
(a) A상 전압



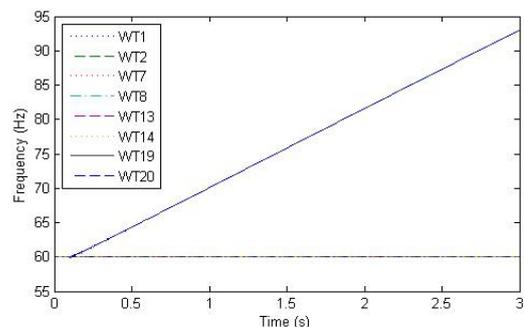
(b) 확대한 A상 전압



(c) A상 전류

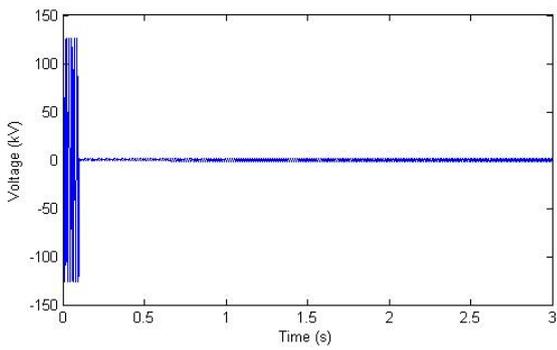


(d) A상 전류 확대

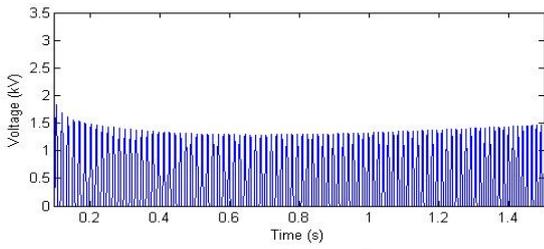


(e) 그리드와 풍력발전기 주파수

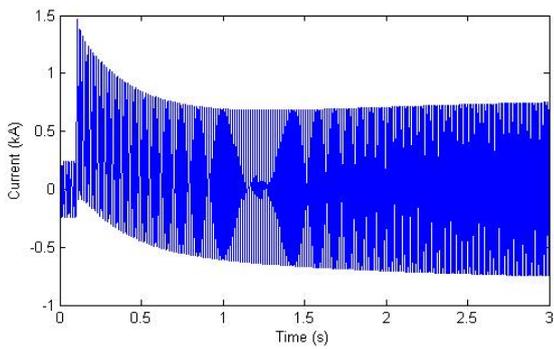
그림 4 사례 1 결과
Fig. 4 Results for case 1



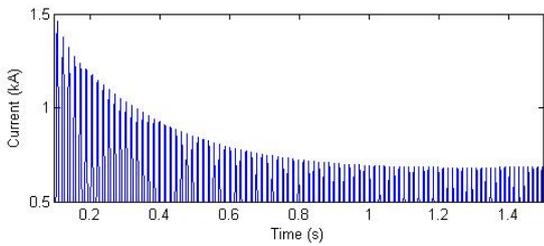
(a) A상 전압



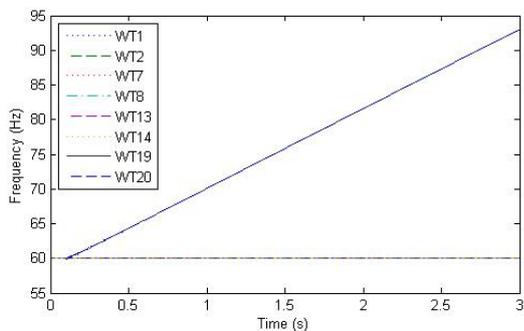
(b) 확대한 A상 전압



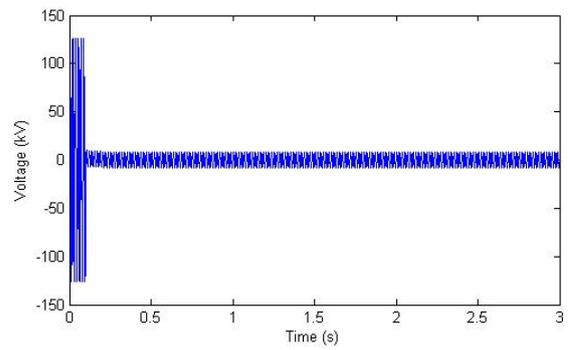
(c) A상 전류



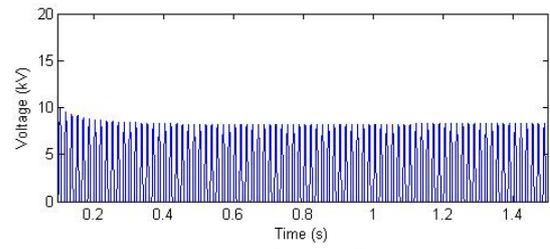
(d) 확대한 A상 전류



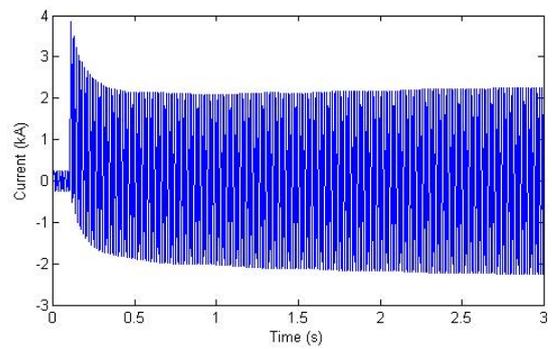
(e) 그리드와 풍력발전기 주파수



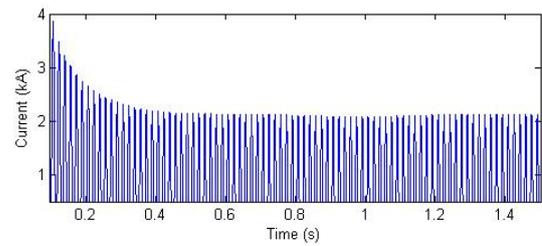
(a) A상 전압



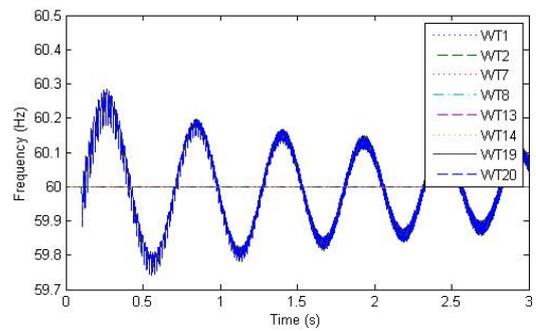
(b) 확대한 A상 전압



(c) A상 전류



(d) 확대한 A상 전류



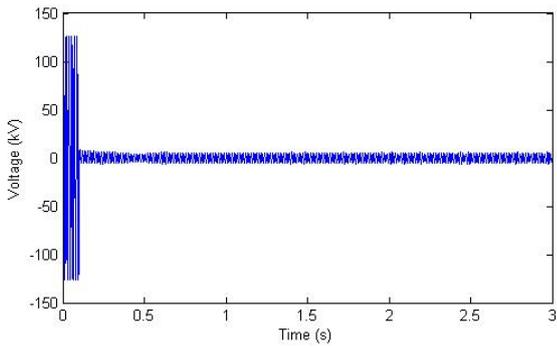
(e) 그리드와 풍력발전기 주파수

그림 5 사례 2 결과

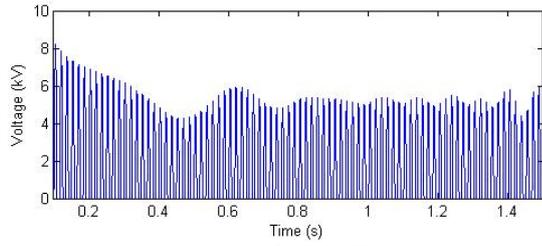
Fig. 5 Results for case 2

그림 6 사례 3 결과

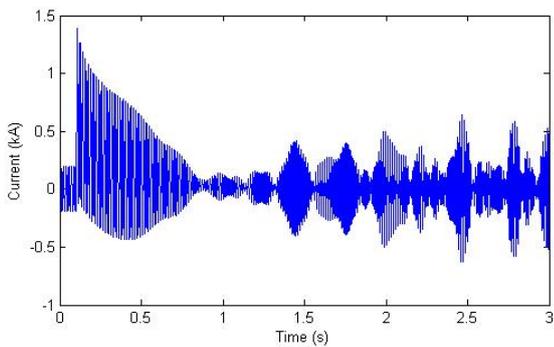
Fig. 6 Results for case 3



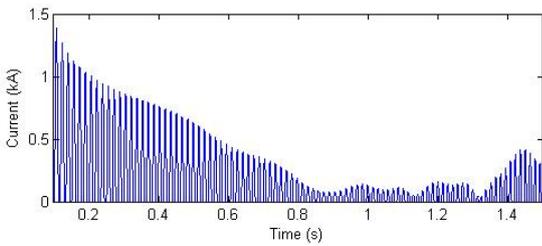
(a) A상 전압



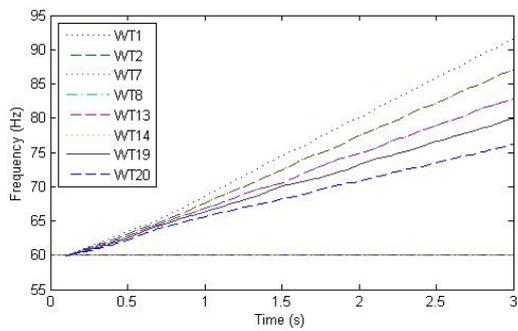
(b) 확대한 A상 전압



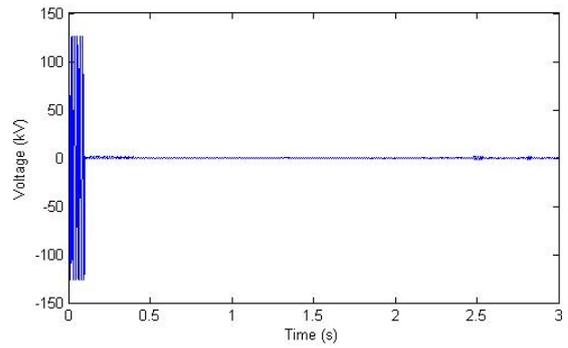
(c) A상 전류



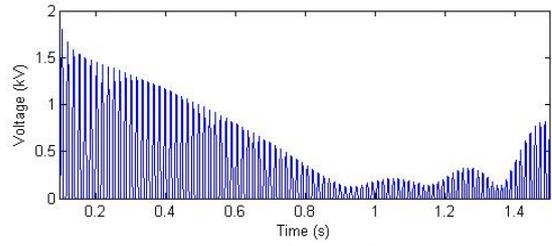
(d) 확대한 A상 전류



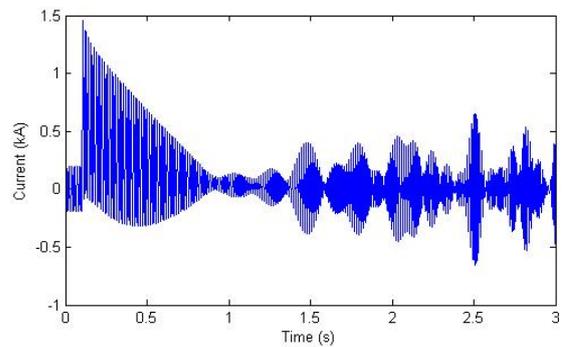
(e) 그리드와 풍력발전기 주파수



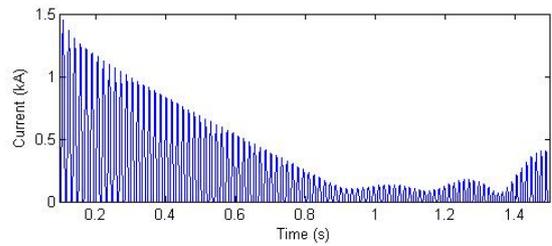
(a) A상 전압



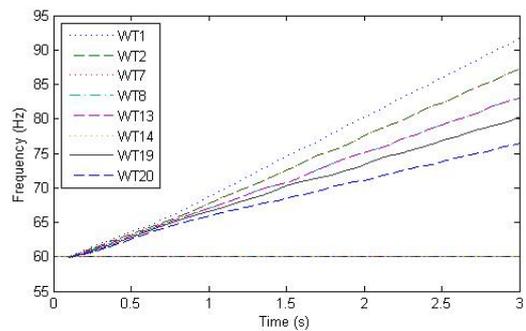
(b) 확대한 A상 전압



(c) A상 전류



(d) 확대한 A상 전류



(e) 그리드와 풍력발전기 주파수

그림 7 사례 4 결과
Fig. 7 Results for case 4

그림 8 사례 5 결과
Fig. 8 Results for case 5

점)에서 3상 단락 사고가 발생한 경우이며, 사례 2와 다른 조건은 동일하고, 각 풍력발전기의 풍속이 다른 조건이다. 그림 8에서 나타난 바와 같이, 사례 5의 결과는 사례 2와 달리 F1 지점의 3상 단락 사고임에도 불구하고 맥놀이 현상이 발생하였다. 그림 5는 맥놀이 현상이 발생하지 않은 반면, 그림 8을 비교해 보면 전압, 전류에 심한 맥놀이 현상이 발생함을 알 수 있다. 이는 각 풍력발전기의 풍속이 달라 사고 후 주파수가 달라지기 때문이다. 그림 8(e)는 각 풍력발전기의 주파수와 그리드의 주파수를 나타낸 그림이며, 그림 7(e)와 같이, 각 풍력발전기의 풍속이 다르므로 인해 사고 후 주파수가 달라짐을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 그리드와 연계선에서 사고 발생시 풍력발전단지의 응답 즉, 각 풍력발전기의 주파수 및 PCC 지점의 전압과 전류를 분석하였다.

그리드 사고 시, 풍속이 같은 경우에는, 그리드와 풍력발전단지의 주파수가 달라져 맥놀이 현상이 발생하였다. 하지만, 풍속이 다른 경우에는 각 풍력발전기의 주파수가 달라져 전압, 전류의 맥놀이 현상은 더욱 심해짐을 알 수 있었다.

풍속이 같은 경우 연계점 A상 지락사고 시 맥놀이 현상이 발생한 반면, 3상 단락 사고의 경우에는 맥놀이 현상이 발생하지 않았다. 하지만, 풍력발전기의 풍속이 다른 경우 전압, 전류의 맥놀이 현상이 매우 심해짐을 확인하였다.

그리드 사고뿐만 아니라 연계점 사고 시 발생하는 맥놀이 현상은 풍력발전단지가 FRT의 기능을 구현하거나 연계선 보호 계전기를 구현할 경우 반드시 고려해야할 사항이다. 이에 대해 풍력발전단지에 요구되는 전력망 연계기준(grid-code)에도 맥놀이 현상에 대한 규정이 필요하다. 또한 맥놀이 현상 발생시, FRT 기능을 구현하기 위한 적절한 제어/보호방법에 대한 연구가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업과 지식경제부의 기초전력연구원 주관 수행 과제에 지원을 받아 수행된 것임. (과제번호 : 2010-0029426, 2009T100100597)

참 고 문 헌

- [1] Climate Change 2001 Synthesis Report, IPCC, 2001.
- [2] Renewable at scale, Deutsche Band 2008 Alternative Energy Conference, 2008.
- [3] Global Wind Energy Outlook 2010, GWEC, October 2010.
- [4] “서남해안에 대규모 해상풍력단지 건설 추진”, 지식경제부 보도자료, 2010.11.3.
- [5] Chai Chompoo-inwai, Wei-jen Lee, Pradit Fuangfoo, Mitch Williams, James R. Liao, "System impact study for the interconnection of wind generation and utility system," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no.1, pp.163-168, January 2005.
- [6] 강용철, 강해권, 정태영, 김연희, 이영귀, "Fault ride-through 요구를 고려한 풍력발전단지 연계선 보호 거리계전 알고리즘", 전기학회논문지, vol. 59, no. 6, pp. 1053-1058, Jun 2010.

저 자 소 개



이 혜 원 (李 慧 源)

1988년 2월 20일생. 2010년 전북대 공대 전기공학과 졸업. 2010년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정. 스마트그리드 연구센터.

Tel 063-270-2391, Fax 063-270-2394

E-mail : hyewonlee@jbnu.ac.kr



김 연 희 (金 烟 熙)

1979년 4월 10일생. 2006년 전북대 공대 전자정보공학부 졸업. 2008년 동 대학원 졸업(석사). 2009년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 스마트그리드연구센터.

Tel : 063-270-2391, Fax : 063-270-2394

E-mail : love35021@jbnu.ac.kr



정 태 영 (鄭 太 英)

1982년 4월 17일생. 2004년 중국 절강대 전기공학과 졸업. 2006년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 전북대 대학원 전기공학과 박사과정. 스마트그리드연구센터.

Tel : 063-270-2391, Fax : 063-270-2394

E-mail : huanxiong417@jbnu.ac.kr



이 상 철 (李 相 喆)

1986년 12월 7일생. 2005년~현재 전북대 공대 전기공학과 졸업. 2010년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정. 스마트그리드연구센터.

Tel : 063-270-2391, Fax : 063-270-2394

E-mail : yellow@jbnu.ac.kr



강 용 철 (姜 龍 澈)

1964년 8월 2일생. 1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재, 전북대 공대 전기공학과 교수. 스마트그리드연구센터.

Tel : 063-270-2391, Fax : 063-270-2394

E-mail : yckang@jbnu.ac.kr