

연계선/그리드 사고시 풍력발전단지의 맥놀이 현상에 대한 정량적 분석

김환철, 이해원, 이상철, 정대영, 강용철

전북대학교 전기공학과, 풍력에너지전력망적응기술연구센터, 스마트그리드연구센터

Quantitative Analysis on Beat Phenomenon of a Wind Farm for Intertie/Grid Faults

Hwan-Cheol Kim, Hye-Won Lee, Sang-Cheol Lee, Tai-Ying Zheng, Yong-Cheol Kang

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

Abstract - Beat is a phenomenon, where the magnitudes and frequencies of the voltage and the current fluctuate. This paper describes a quantitative analysis of the beat phenomenon of a wind farm using the envelope of a current during intertie/grid fault conditions. In this paper, the ratio of the crest to the trough of the envelope curve and the time interval between adjacent troughs are defined and used to evaluate the beat phenomenon quantitatively. Beat phenomena under various fault and wind conditions are analyzed. The proposed quantitative analysis seems simple but effective in the more understanding of beat phenomenon of a wind farm, and thus can be used as a basis for operation and/or protection of an intertie.

1. 서 론

신재생에너지원 중 가장 경쟁력 있는 에너지원으로 풍력발전이 대두되면서 세계 각국은 대규모 풍력발전단지를 건설하고 있다. 출력이 불규칙한 대규모 풍력발전단지가 전력망에 연계될 경우, 전력망/연계선 사고시 계통에 심각한 영향을 줄 수 있다. 따라서, 전력망의 신뢰성과 안정성을 유지하기 위해 전력망/연계선 사고시 연계선의 전압, 전류에서 발생하는 복잡한 현상 즉 맥놀이와 같은 현상에 대한 분석이 필요하다.

기존 연구[1, 2]에서 전력망/연계선 사고시 연계선의 전압, 전류와 풍력발전단지 내부사고시 풍력발전기 앞단의 전압, 전류에 대한 분석을 하였다. 분석 결과 서로 다른 주파수 성분에 의해 전압, 전류가 흔들리는 맥놀이 현상이 발생하였다. 모든 발전기의 풍속이 다른 경우 맥놀이 현상은 심했으며, 모든 발전기의 풍속이 일정한 경우 맥놀이 현상은 약하게 일어나는 정성적인 분석을 하였다.

본 논문에서는 맥놀이 발생시, 포락선에 대한 정량적인 분석을 기술하였다. 첫 번째는 포락선에서 마루와 골의 크기의 비를 이용하여 맥놀이 현상의 정량적 분석을 하였고, 마루와 골의 비의 증가 여부로부터 맥놀이 현상이 심해지는지 약해지는지 알 수 있다. 두 번째는 이웃하는 골 사이의 주기를 사용하여 분석을 하였고, 이를 통해 맥놀이 주기가 빨라지는지 느려지는지 알 수 있다.

2. 연계선/그리드 사고 발생시 풍력발전단지의 맥놀이 현상에 대한 정량적 분석

2.1 맥놀이 현상과 포락선

풍력발전단지 연계선/그리드에 사고 발생시, 전류의 맥놀이 현상은, 그림 1에 나타난 바와 같이, 병렬로 연결된 두 대의 발전기가 서로 다른 주파수 성분을 가지기 때문에 일어나는 현상이다. 이 경우에 연계선의 전류는 그림 2와 같으며, 발전기 1, 2의 주파수는 식 (1), (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\omega_1 = 2\pi(f_0 + a_1t) \tag{1}$$

$$\omega_2 = 2\pi(f_0 + a_2t) \tag{2}$$

a_1, a_2 는 시간에 따라 주파수가 얼마나 증가하는지를 나타내는 성분으로 즉, 주파수 증가율을 나타낸다. 참고문헌 [1, 2]에 나타난 바와 같이 그리드에 사고가 발생했을 경우에는 그리드와 풍력단지 사이의 주파수 증가율이 달라져서 맥놀이 현상이 발생한다. 또한, 연계선에서 사고가 발생하더라도, 각 발전기의 풍속이 일정하지 않을 경우 각 풍력발전기의 주파수 증가율이 달라짐으로써 맥놀이 현상이 발생하게 된다.

맥놀이 현상의 심한 정도를 전압, 전류의 그래프만으로 분석하기 어렵기 때문에, 본 논문에서는 포락선을 이용하여 맥놀이 현상의 정량적 분석을 수행하였다. 포락선이란 일정한 조건을 만족하는 한 무리의 직선이나 곡선에 접하는 곡선이다. 그림 1의 연계선 전류의 포락선을 그리면 그림 3과 같다. 맥놀이 현상 발생시 포락선에 마루와 골이 반복됨을 알 수 있다.

2.2 맥놀이 현상의 정량적 분석 방법

2.2.1 포락선의 마루와 골의 비

본 논문에서는 포락선의 마루와 골의 비를 이용하여 맥놀이 현상을 정량적으로 분석하였다. 그림 4에 나타난 것과 같이 포락선의 최대값을 Y_{peak} , 최소값을 $Y_{offpeak}$ 라 하면, 마루와 골의 비를 α 라 정의하며 이를 식 (3)에 나타내었다.

$$\frac{Y_{peak}}{Y_{offpeak}} = \alpha \tag{3}$$

맥놀이 현상이 발생하지 않은 경우에는 α 는 1이 되며, 맥놀이 현상이 발생하면 1보다 큰 값을 갖는다. α 가 큰 값을 가질수록 맥놀이 현상이 심하게 일어남을 알 수 있으며, α 를 이용하면 맥놀이 현상의 심한 정도 뿐만 아니라 맥놀이 현상의 발생여부도 알 수 있다.

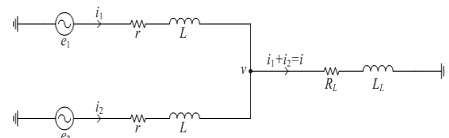
2.2.2 이웃하는 골 사이의 주기

맥놀이 현상은 시간이 지날수록 주기가 짧아지는 특징이 있다. 따라서 본 논문에서는 이웃 골 사이의 주기를 통해 맥놀이 현상을 정량적으로 분석하였다. 포락선의 이웃하는 골의 시간 간격 즉, 주기를 $\Delta t(n)$ 라 정의했으며, 이를 식으로 표현하면 식 (4)와 같다.

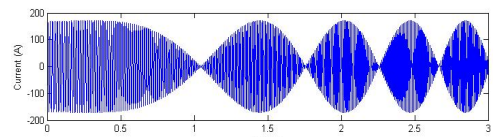
$$t_{n+1} - t_n = \Delta t \tag{4}$$

$$\Delta t(n+1) - \Delta t(n) = \Delta T(n) \tag{5}$$

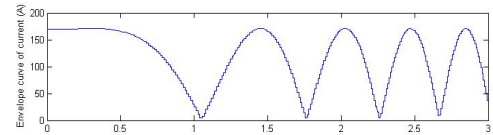
그림 4에 나타난 것과 같이 n번째 골과 (n+1) 번째 골 사이의 Δt 값과 (n+1)번째 골과 (n+2)번째 골 사이의 Δt 값의 차를 $\Delta T(n)$ 이라 하며 식 (5)와 같다. $\Delta T(n)$ 값이 클수록, 시간이 지남에 따라 맥놀이 주기가 짧아지는 맥놀이 현상의 특성을 알 수 있다. 또한, 맥놀이 현상의 주기가 짧아지는 속도가 증가한다는 것은 시간에 따른 주파수 증가율이 증가함을 의미한다. 주파수 증가율 클수록 맥놀이 현상은 심하게 발생한다.



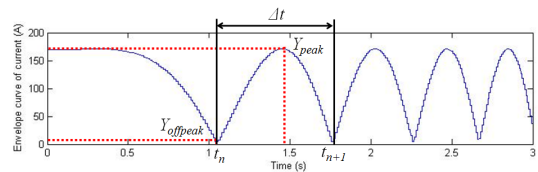
<그림 1> 연계선 사고시 풍력발전단지와 연계선의 간략화한 등가회로



<그림 2> 연계선 전류



<그림 3> 연계선 전류의 포락선



<그림 4> 맥놀이 현상의 정량적 분석에 사용된 요소

3. 사례연구

3.1 모델계통

백놀이 현상의 정량적 분석을 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 그림 5와 같이 모델링하여 백놀이 현상을 모의하였다. 풍력발전단지는 2 MW 동기발전기 20대로 발전용량은 40 MW이다. 풍력발전단지와 A모선 사이의 길이는 8 km이고, A 모선에서 등가 전원 사이의 길이는 각각 50 km이다. 사고 위치, 풍속 등 다양한 조건에 대한 백놀이 현상을 모의하였다. 사고위치는 연계선(F1), 그리드(F2), 전원의 주파수는 60 Hz이다. F1, F2 지점 사고 시 R1 지점에서 백놀이 현상을 확인하였다. 샘플링 비율은 주기 당 64샘플이다. 본 논문에서는 모든 사례 중 가장 대표적인 3가지 사례에 대한 정량적 분석을 나타내었다.

3.2 사례 1: F2 지점의 3상단락사고, 풍속 동일 15m/s

그림 6은 사례 1의 결과를 나타낸다. 그림 6a는 모든 풍력발전기의 풍속이 15 m/s로 같은 경우 F2지점에서 3상단락사고가 발생한 경우 전류의 파형이다. 그림 6b는 그림 6a에 나타낸 전류파형에 대한 포락선을 나타낸다.

사례 1은 모든 풍력발전기의 풍속이 15 m/s로 같은 경우 F2지점에서 3상 단락 사고가 발생한 경우 그리드와 풍력발전단지 사이에 서로 다른 주파수 성분에 의해 백놀이가 발생하였다. 그림 6b의 전류파형의 포락선을 이용하여 크기비를 구한 결과 1.615, 1.644, 1.669로 평균 1.642값이 나왔다. 각 크기비를 계산한 시간간격은 0.233 s, 0.15 s, 0.117 s로 시간이 지날수록 간격이 짧아졌다. 따라서 백놀이 현상이 발생한 경우 시간 간격은 짧아지고, 크기비가 1보다 점점 커질 것을 알 수 있다.

3.3 사례 2: F1 지점의 3상단락사고, 풍속 동일 15m/s

사례 2는 백놀이 현상이 일어나지 않은 경우로 사례 2의 결과는 그림 7과 같다. 그림 7a는 풍속이 15 m/s, F1 지점에서 3상 단락사고가 발생한 경우 전류의 파형이다. 그림 7b는 그림 7a의 포락선을 나타낸다.

풍속이 같은 경우 F1 지점에서 사고가 발생했을 시 서로 다른 주파수 성분이 존재하지 않아 백놀이 현상이 일어나지 않았다. 각 구간의 포락선의 최대, 최소 크기비와 시간간격을 이용하여 정량적 분석을 한 결과 크기비는 1, 시간간격은 0 s이 되었다. 포락선의 최대, 최소 크기비가 1인 경우 파형의 진동이 발생하지 않았음을 알 수 있다. 또한 시간 간격이 0 s인 경우 역시 백놀이 현상이 일어나지 않았음을 알 수 있다.

3.4 사례 3: F1 지점의 3상단락사고, 다른 풍속 12.5~15 m/s

사례 3은 풍속이 12.5~15 m/s이고 F1 지점에서 3상 단락 사고가 발생한 경우이다. 그림 8은 사례 3의 결과를 나타내며 그림 8a는 측정점 R1의 전류파형이고, 그림 8b는 그림 8a의 포락선을 나타낸다. 사례 3은 F1 지점의 사고이지만 각 풍력발전기의 풍속이 달라짐으로써 각각의 풍력발전기의 주파수 증가율이 달라 백놀이가 발생하는 사례이다. 사례 3의 경우 풍속이 달라 서로 다른 증가율로 증가하는 주파수 성분이 많아 백놀이 현상이 심하게 발생하였다.

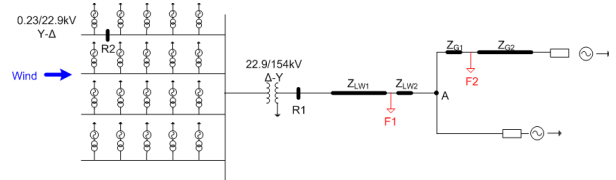
사례 3의 전류파형의 포락선의 최대, 최소 크기비는 1.754, 2.288, 6.128로 평균 3.39의 값이 나왔다. 각 크기비를 계산한 시간간격은 0.221 s, 0.196 s, 0.232 s로, 불규칙하였다. 사례 1과 비교하여 크기비의 평균 값이 사례 3이 더 크므로 사례 3에서 발생한 백놀이 현상이 더 큼을 알 수 있다. 또한 백놀이 현상이 심할수록 시간간격이 불규칙하게 변화하였다. 그림 8a에서도 알 수 있듯이 그래프의 진동이 불규칙하지만 진동폭이 그림 6a보다 큼을 알 수 있다. 따라서 사례 3의 정량적 분석결과 사례 1보다 백놀이 현상이 심함을 정량적으로 알 수 있다.

4. 결 론

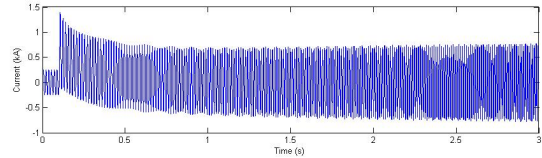
본 논문에서는 포락선을 이용하여 백놀이 현상을 정량적으로 분석하였다. 포락선의 마루와 골의 비와 이웃 골 사이의 시간차를 이용하여 정량적으로 분석하였다.

포락선의 최대, 최소 크기비가 1보다 큰 경우 백놀이 현상이 발생했음을 판단할 수 있고, 또한 크기비가 클수록, 백놀이 현상이 심하게 발생했음을 알 수 있다. 백놀이 현상이 발생하였을 경우 두 골 사이의 계산하는 시간간격은 시간이 지날수록 줄어든다. 왜냐하면 주파수 증가율이 증가하면서 백놀이 현상의 주기가 빨라지기 때문이다. 시간간격은 크기비가 클수록 불규칙하게 나타나며 이러한 백놀이의 특징은 정량적 분석을 이용하여 확인할 수 있다.

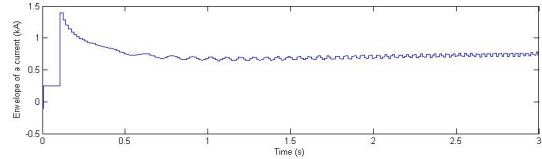
본 논문에서 제안하는 방법은 백놀이 현상에 대한 정량적 분석의 기초연구로 백놀이 현상의 발생여부 판단과 심한 정도를 수치적으로 표현하는데 이용될 수 있다. 백놀이 현상에 대한 정량적 분석 방법 연구는 백놀이 현상의 정확한 분석을 위해 필요하다.



〈그림 5〉 모델계통

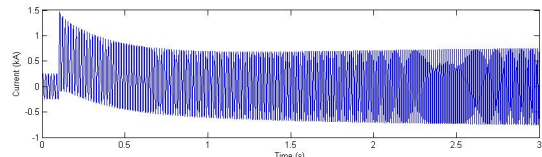


(a) 연계선 전류

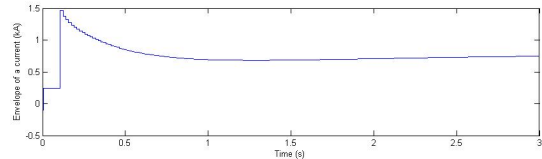


(b) 연계선 전류의 포락선

〈그림 6〉 사례 1의 결과

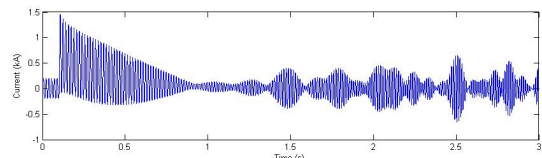


(a) 연계선 전류

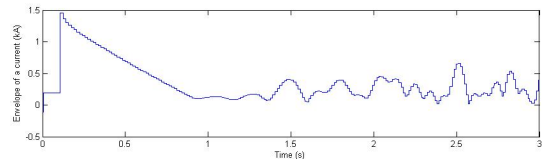


(b) 연계선 전류의 포락선

〈그림 7〉 사례 2의 결과



(a) 연계선 전류



(b) 연계선 전류의 포락선

〈그림 8〉 사례 3의 결과

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

[참 고 문 헌]

- [1] 강용철, 이해원, 이병은, 강해권, "그리드 사고 시 풍력발전단지의 응답 분석," 대한전기학회 전력기술분회 정기총회 및 추계학술대회, 11. 2009.
- [2] 강용철, 이상철, 이해원, 김연희, 정태영, "풍력발전단지 집합 시스템 사고 시 백놀이 현상 분석," 대한 전기학회 전력계통 보호제어 연구회 정기총회 및 추계학술대회, 10. 2010.