한국소음진동공학회 창립 20주년 기념 2010년 춘계학술대회논문집, pp.236~237

블레이드의 비대칭적 구성을 고려한 대형 풍력 터빈의 안정성 해석

Stability Analysis of Large-scale Wind Turbines Considering Non-symmetric Blades Configuration

김경택† · 이종원* · 박종포**

Kyung-Taek Kim, Chong-Won Lee and Jong-Po Park

1. 서 론

다중 블레이드 좌표변환(multi-blade coordinate transformation)기법은 전형적인 선형 주기 시변계(linear periodically time-varying system)로 간주되는 풍력 터빈의 동적 해석에 활용되는 대표적인 시불변 매개변수 변환 해석 기법이다. 이 기법은 블레이드의 구성(configuration)이 대칭성을 가지는 회전체에 한하여 시불변계로의 변환을 가능하게 한다. 그리고 모든 블레이드들과 정지구조물의 연성 진동현상을 규명하는데 매우 효과적이기 때문에 풍력 터빈의 동적 특성 해석 및 제어 분야에서 지금까지도 핵심적인 해석기법으로 활용되고 있다. 그러나 이 좌표변환 기법은 회전체 블레이드들의 구성이 대칭성을 만족하지 못하는 경우에는 시불변계로의 변환이 불가능하다는 내재적인 제한점을 갖고 있다. 비록 비대칭성의 정도가 작은 경우에 한하여 파라메터 변환 후 잔류하는 시변 매개변수의 평균치를 취하여 해석을 수행하는 것이 일반적이나, 이러한 방법은 블레이드 구성의 비대칭성이 무시하지 못할 정도로 커질 경우에는 해석 결과에 큰 오차를 발생 시킬 수 있다. 이 논문에서는 Hill 의 무한차원 행렬을 이용하여 효율적으로 주기 시변계의 근사해를 구하는 매개변수 변환 기법을 제안하고, 이를 블레이드의 비대칭적 구성을 고려한 풍력 터빈의 안정성 해석에 적용하여다중 블레이드 좌표변환만을 이용한 해석보다 정확한 해석결과를 얻을 수 있음을 보인다.

2. 본 론

2.1 풍력 터빈 해석 모형

여러 형태의 풍력 터빈 중에서도 구조물의 대형화에 유리하고 출력 효율이 큰 수평축 풍력 터빈(HAWT, horizontal axis wind turbine)은 근래의 생산되는 대형 풍력 터빈의 대부분을 차지하고 있기 때문에 이 논문에서는 세개의 블레이드를 갖는 수평축 풍력 터빈만을 해석 모형으로 고려하도록 한다. 풍력 터빈 모형은 타워, 나셀, 드라이브 트레인, 회전체 허브 그리고 세개의 블레이드에 대한 자유도를 가지며 모든 구성요소들은 서로 힌지 및 비틀림 집중 강성요소로 연결된 강체 구조물로 모형화 하였다. 라그랑지 방정식으로부터 식(1)과 같이 운동방정식을 구할 수 있고, T(=2π/Ω) 를 주기로 하는 주기 시변 시스템으로 모형화 됨을 확인할 수 있다.

$$\mathbf{M}(t)\ddot{\mathbf{q}}(t)+\mathbf{C}(t)\dot{\mathbf{q}}(t)+\mathbf{K}(t)\mathbf{q}(t)=\mathbf{f}(t) \quad (1)$$

여기서

$$\mathbf{M}(t)=\sum_{m=-2}^{2}\mathbf{M}_m e^{jm\Omega t},\ \mathbf{C}(t)=\sum_{m=-2}^{2}\mathbf{C}_m e^{jm\Omega t},\ \mathbf{K}(t)=\sum_{m=-2}^{2}\mathbf{K}_m e^{jm\Omega t}$$

그리고 $\mathbf{q}(t)$ 는 일반화 좌표 벡터를 나타내며 블레이드의 구성이 완전히 대칭인 풍력 터빈의 경우 위 식의 계수 행렬에서 주기 시변항은 나타나지 않는다.

2.2 Hill 의 무한차원 행렬을 이용한 변조좌표 변환

풍력 터빈 블레이드의 비대칭 구성을 고려한 경우 운동방정식은 식(1)에서와 같이 주기 시변 매개변수를 포함하게 된다. 그러나 식(2)와 같이 무한 차원으로 확장된 변조 좌표를 정의함으로써 식(3)으로 표현되는 무한차원의 등가 시불변 시스템으로 변환하는 것이 가능하다.

$$\mathbf{q}_\infty(t)=\begin{bmatrix}\cdots & \mathbf{q}_{;-1}(t)^T & \mathbf{q}_{;0}(t)^T & \mathbf{q}_{;+1}(t)^T & \cdots\end{bmatrix}^T \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_\infty\ddot{\mathbf{q}}_\infty(t)+\mathbf{C}_\infty\dot{\mathbf{q}}_\infty(t)+\mathbf{K}_\infty\mathbf{q}_\infty(t)=\mathbf{f}_\infty(t) \quad (3)$$

여기서

$$\mathbf{M}_\infty=\begin{bmatrix}\ddots & \vdots & \vdots & \vdots & ⋰\\ \cdots & \mathbf{M}_0 & \mathbf{M}_{+1} & \mathbf{M}_{+2} & \cdots\\ \cdots & \mathbf{M}_{-1} & \mathbf{M}_0 & \mathbf{M}_{+1} & \cdots\\ \cdots & \mathbf{M}_{-2} & \mathbf{M}_{-1} & \mathbf{M}_0 & \cdots\\ ⋰ & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots\end{bmatrix},\ \mathbf{C}_\infty=\begin{bmatrix}\ddots & \vdots & \vdots & \vdots & ⋰\\ \cdots & \mathbf{C}_{0;-1} & \mathbf{C}_{+1;0} & \mathbf{C}_{+2;+1} & \cdots\\ \cdots & \mathbf{C}_{-1;-1} & \mathbf{C}_{0;0} & \mathbf{C}_{+1;+1} & \cdots\\ \cdots & \mathbf{C}_{-2;-1} & \mathbf{C}_{-1;0} & \mathbf{C}_{0;+1} & \cdots\\ ⋰ & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots\end{bmatrix},$$

† 김경택; KAIST 기계공학과
E-mail: ktkim80@kaist.ac.kr
Tel: (042) 350-3056, Fax: (042) 350-8220
* KAIST 기계공학과
** 두산 중공업

$$
\mathbf{K}_\infty = \begin{bmatrix} \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \iddots \\ \cdots & \mathbf{K}_{0;-1} & \mathbf{K}_{+1;0} & \mathbf{K}_{+2;+1} & \cdots \\ \cdots & \mathbf{K}_{-1;-1} & \mathbf{K}_{0;0} & \mathbf{K}_{+1;+1} & \cdots \\ \cdots & \mathbf{K}_{-2;-1} & \mathbf{K}_{-1;0} & \mathbf{K}_{0;+1} & \cdots \\ \iddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}_\infty(t) = \begin{Bmatrix} \vdots \\ \mathbf{f}_{;-1} \\ \mathbf{f}_{;0} \\ \mathbf{f}_{;+1} \\ \vdots \end{Bmatrix},
$$

$$
\mathbf{C}_{m;n} = \mathbf{C}_m - j2n\Omega\mathbf{M}_m, \ \mathbf{K}_{m;n} = \mathbf{K}_m - jn\Omega\mathbf{C}_m - n^2\Omega^2\mathbf{M}_m,
$$

$$
\mathbf{q}_{;n} = \mathbf{q}e^{jn\Omega t}, \ \mathbf{f}_{;n} = \mathbf{f}e^{jn\Omega t} \quad (m = 0, \pm1, \pm2, \ n = 0, \pm1, \pm2, \cdots)
$$

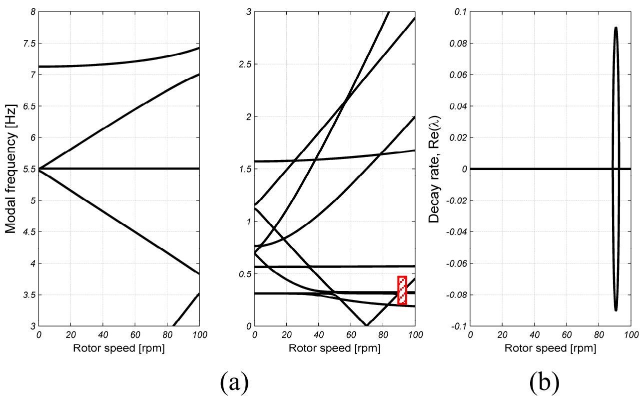
변환된 시불변계는 무한 차원을 갖기 때문에 유한 차원으로 근사함으로써 일반 고유치 해석기법을 적용할 수 있으며 근사된 계의 차수를 크게 하여 충분히 정확한 근사해를 얻을 수 있다.

3. 수치 예제

수립된 해석 모형을 검증하고 제안된 해석 기법의 효율성을 보이기 위해 풍력 터빈 모형에 대한 고유치 해석을 수행하고 구조적 안정성을 확인한다. 수치 예제에 적용된 풍력 터빈은 NREL(national renewable energy laboratory)에서 공개한 가상의 5MW 급 대형 풍력 터빈의 제원을 적용하였다.

3.1 블레이드의 대칭적 구성을 고려한 해석

풍력 터빈의 모든 블레이드가 대칭적으로 구성된다면 다중 블레이드 좌표변환만으로 등가 시불변계로 변환이 가능하기 때문에 다중 블레이드 좌표로 변환된 운동방정식에 대하여 고유치 해석을 수행할 수 있다. 그림 1 에 0~100rpm 의 회전속도 범위에서의 고유진동수 및 감쇠율을 도시하였다. 여기서 89~92 rpm 사이에서 불안정 영역이 존재하는 것을 확인 할 수 있으며, 이는 타워의 side-to-side 모드와 블레이드 후방향 lead-lag 모드의 상호작용에 기인한다.

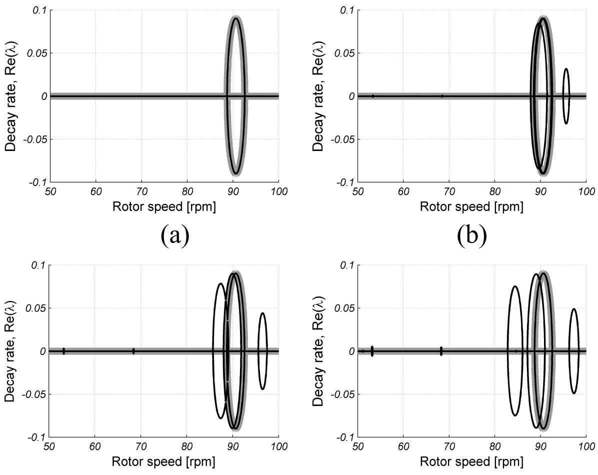


(a) (b)

그림 1. 대칭적으로 구성된 블레이드를 가지는 풍력 터빈의 (a) 고유진동수 및 (b) 감쇠율: ▨, 불안정영역

3.2 블레이드의 비대칭적 구성을 고려한 해석

제안된 Hill 의 무한차원 행렬식을 이용한 좌표변환을 적용하여 등가 시불변계로 변환한 후 고유치 해석을 수행한다. 이때 변환된 무한 차원의 계수 행렬을 유한 차원으로 근사하더라도 안정성 해석 결과는 이론해와 동일하며, 이 수치 예제에서는 축약된 행렬의 차수를 $3N$ 으로 설정하였다. 그리고 한 블레이드의 강성을 기준으로 다른 두 블레이드의 강성을 각각 $\pm\Delta$ (%) 씩 증감시키는 것으로 블레이드 구성에 대한 비대칭성을 부가하였다. 그림 2 에서 비대칭성의 크기가 증가할 수록 제안된 변환기법으로 수행한 안정성 해석결과와 다중 블레이드 변환기법의 결과의 차이가 크게 나타나는 것을 볼 수 있으며 다중 블레이드 변환을 이용한 해석 결과에서는 나타나지 않던 불안정 영역을 확인할 수 있다.



(a) (b) (c) (d)

그림 2. 각 블레이드 사이의 강성 비대칭성 증가에 따른 감쇠율 변화: (a) Δ = 0%, (b) Δ = 10%, (c) Δ = 20%, (d) Δ = 30%); ——, $3N$ 의 차수로 축약된 Hill 행렬; ▬, 다중 블레이드 변환

4. 결 론

풍력 터빈 블레이드의 구성에 있어 구조적 혹은 공기역학적 비대칭성이 존재할 경우 다중 블레이드 좌표변환을 이용한 등가 시불변계로 변환이 불가능하다. 이 연구에서는 비대칭적으로 구성된 블레이드를 갖는 회전체의 안정성 해석을 위하여 Hill 의 무한차원 행렬을 이용한 변조좌표 변환기법을 적용하였고, 수치 예제를 통하여 대형 풍력 터빈의 안정성 해석에 적용될 수 있음을 보였다.

후 기

이 연구는 창원대-KAIST 협력사업의 지원으로 수행되었습니다.