

WIND-KRAFT

Journal & Natürliche Energien

Ausgabe 6/2020
40. Jahrgang
Preis : 5 Euro

Messeausgabe
WindEnergy
Hamburg
Digital

DEME und
Herrenknecht :
Die neue
Offshore
Foundation
Drilling
Machine



Adaptiver Schwingungstilger für die Errichtungsphase von Windenergieanlagen

ESM Energie- und Schwingungstechnik Mitsch GmbH

Große Turmhöhen ermöglichen eine weitestgehend laminare Anströmung großer Rotorflächen. Darüber hinaus steigt die durchschnittliche mittlere Windgeschwindigkeit mit zunehmender Höhe und steigert somit den Ertrag.

Das treibt die Hersteller von Windenergieanlagen an, ihre Türme „schlanker“, also mit weniger Materialeinsatz, und höher zu bauen.

Hohe und schlanke Türme stellen große Anforderungen an die schwingungstechnische Auslegung der Anlage. Insbesondere die erste und zweite Biegeigenfrequenz der verhältnismäßig weichen Türme können durch bestimmte Betriebszustände und gleichmäßige Anströmung zu schädlichen Resonanzschwingungen angeregt werden.

Offshore kommt die Anregung von Wellen und Strömungen hinzu.

Einsatz von Turmtilgern

Die Reduzierung von betriebsbedingten und durch Windströmung (z.B. Karmannsche Wirbel) verursachten Schwingungen kann durch den Einsatz von Turmtilgern für die erste und zweite Turmeigenfrequenz erfolgen.

Dies hilft z. B. Ermüdungsschäden an Decks von Errichtungsschiffen beim stehenden Transport von Türmen zum Installationsort zu vermeiden. On- und Offshore erweitern Errichtungstilger Installationsfenster für die Blattmontage. Aufgrund der zusätzlichen Turmdämpfungen kann die Installation von Rotorblättern bei größeren Windgeschwindigkeiten als üblich erfolgen.

Weltweit betrachtet, entstehen immer größere Windparks, deren Erschließung und Errichtung sich über lange Zeiträume erstrecken. Die Ausweitung der klassischen jahreszeitlich bedingten Errichtungsfenster führt sowohl onshore, als auch offshore zu Unterbrechungen, bei denen die teilstallierten Windenergieanlagen über erhebliche Zeiträume sich selbst überlassen werden.

Für diese Betriebszustände entwickeln sich zunehmend Bedarfe für Turmtilger, die bei der Errichtung von Windparks zum Einsatz kommen. Bei der Auslegung dieser Tilger ist die Begleitung der wesentlichen logistischen Teilschritte für den Offshore und den Onshoreeinsatz zu berücksichtigen.

Bei Türmen von deutlich über 100 m können bereits teilerstellte Türme durch Wirbelanregung schwingen.

Die Turmeigenfrequenzen während der Errichtung des Turmes liegen je nach Baufortschritt bei teilweise über 0,5 Hz und sinken dabei mit zunehmendem Baufortschritt der Anlage. Während bei fast fertig erstellten Anlagen (beispielsweise bei der Montage des letzten Rotorblattes) nur noch Eigenfrequenzen von kleiner 0,2 Hz bedämpft werden müssen. Somit sind Errichtungstilger für den Einsatz im Frequenzbereich von 0,15 Hz bis 0,6 Hz erforderlich. Gleichzeitig sollen diese Tilger kompakt ausgeführt werden. Eine optimale Wirkung mit vertretbarer Tilgermasse ist jedoch nur zu erreichen, wenn der Schwingungstilger möglichst exakt auf die jeweilige Eigenfrequenz abgestimmt wird.

Nach dem Stand der Technik benötigen Schwingungstilger zum Beruhigen von Schwingungen mit 0,15 Hz eine Pendellänge von bis zu 11 m.

Arbeitet man bei den kleinen Turmeigenfrequenzen mit höheren Tilgerfrequenzen, so ist eine sehr große Tilgermasse erforderlich.

ESM hat für den Errichtungsfall ein neues Tilgersystem entwickelt, um einen Tilger bei vertretbarer Baugröße und Masse bereitzustellen. (Bild 2)

Bei besonders hohen Türmen ist es erforderlich, bereits während der Errich-



Die erste und zweite Turmeigenfrequenz einer Windenergieanlage.

tungsphase der Türme bei Bauzuständen über 100 m Höhe Schwingungsdämpfungsmaßnahmen zu ergreifen. Das zweitletzte Turmsegment, welches längst in Höhen von über 120 m hinausragt, benötigt bei kritischen Windverhältnissen schon einen Schwingungstilger.

Es ist vorteilhaft, wenn das jeweilige Turmsegment bereits am liegenden Turm mit einem Tilger bestückt wird, so dass keine Zeit mit ungünstigen Windverhältnissen während der Montage des Tilgers ohne zusätzliche Dämpfung verstreicht.

Somit werden die oberen Turmsegmente idealerweise mit bereits angehängtem Tilger montiert. Weitere zu tilgende Montagezustände sind der komplette Turm. Je nach Tragkraft des Kranes und Masse der Gondelteile kommt es vor, dass die Gondel und der integrierte Maschinenbau einzeln montiert werden. Der Rotor wird entweder als kompletter Stern mit Nabe oder bei der Einzelblattmontage stückweise montiert.

Mit zunehmendem Baufortschritt wird die Turmhöhe und die Masse stückweise erhöht, was entsprechend dem Baufortschritt zu niedrigeren Eigenfrequenzen der teilerrichteten Anlage führt. Um die Funktion des Schwingungstilgers optimal nutzen zu können, ist es vorteilhaft die Arbeitsfrequenz des Schwingungstilgers an die jeweilige Eigenfrequenz des Bauzustandes anzupassen.

Bild 2 zeigt einen möglichen, durch den adaptiven ESM Schwingungstilger unterstützten Errichtungsablauf.



Funktionsweise des adaptiven Systems

Ein passiver Schwingungstilger ist ein gedämpftes Feder-Masse-System, das mit dem zu beruhigenden System – in diesem Fall mit dem Turm oder der Windenergieanlage – verbunden ist. Der passive Schwingungstilger baut infolge der Anregung des schwingenden Systems eine Gegenschwingung auf. Damit reduziert er die Amplitude eines in seiner Resonanzfrequenz schwingenden Bauteils. Diese Funktionsweise ist bei klassi-

schen passiven Tilgern in der Regel an eine feste, auf die Eigenfrequenz des zu tilgenden Systems abgestimmte Frequenz beschränkt.

Die kontinuierliche Dämpfung unterschiedlicher Errichtungsstadien mit jeweils diskret veränderter Eigenfrequenz der teilstallierten Turmsegmente erfordert eine adaptive Arbeitsweise des eingesetzten Tilgers.

Adaptiv bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Wirkfrequenz des Tilgers in Abhängigkeit der sich für jeden Errichtungsschritt ergebenden Eigenfrequenz eingestellt werden kann.

Im Fall des hier vorgestellten Tilgers handelt es sich um einen Pendeltilger. Die Länge des Pendels bestimmt die jeweilige Arbeitsfrequenz des Tilgers. Ein adaptives Pendeltilgersystem erfordert also die Möglichkeit, die wirksame Länge des Pendels zu verändern.

Hierbei gilt klassisch: Kleine Frequenzen, lange Pendel und hohe Frequenzen, kurze Pendel.

Das Ziel der Entwicklung war es, die Abmessungen der Bauteile nicht zu verändern (den Bauraum konstant und kompakt zu belassen) und gleichzeitig die wirksame Pendellänge zu variieren.

Eine Varianz der Frequenzen bei gleichbleibender geometrischer Anordnung lässt sich über eine veränderte Zusammensetzung der wirkenden Kraftvektoren erreichen.

Während das klassisch frei schwingende Pendel seine Schwingfrequenz über die sich periodisch ändernde Kombination aus potentieller und kinetischer Energie definiert, lässt sich bei dem adaptiven ESM-Pendel die Frequenz durch den Einsatz einer zusätzlichen, entgegen der Erdschwere „g“ auf die Masse gerichteten veränderbaren Kraft einstellen.

Die Frequenz eines frei schwingenden Pendels berechnet sich gemäß der Gleichung $f=1/(2\cdot\pi)\cdot\sqrt{g/l}$

Reduziert man die wirkende Erdschwere durch eine variable entgegenwirkende Kraft, so verändert man die Frequenz des adaptiven Systems.

Bei der technischen Umsetzung gilt es zu beachten, dass die Einleitung einer zusätzlichen Kraft die freie Schwingung des Pendels nicht behindert.

ESM setzt Elemente ein, die das Pendel mit einer definierten Kraft in vertikaler Richtung unterstützen und gleichzeitig in den horizontalen Schwingrichtungen keine Zusatzkraft auf die Masse des Pendels bringen.

Die zusätzliche Vertikalkraft lässt sich innerhalb des Definitionsbereiches stufenlos auf jeden erforderlichen Wert einstellen und ermöglicht so die Anpassung der



Bild 3: Adaptiver Errichtungstilger auf dem ESM Prüfstand, zwei Ansichten

Schwingfrequenz auf den erforderlichen Bereich von 0,15 Hz bis 0,6 Hz der jeweiligen Turmfrequenzen.

Die durch äußere Anregung in das System gebrachte Energie muss durch den Tilger vernichtet werden. Ein Pendelgelenk, ausgeführt als Kardangelenkdamper führt diese Energie im System ab. Der Kardangelenkdamper besteht aus einem Kardangelenk, an dem zwei Übersetzungsgetriebe angebracht sind, welche die kleine Pendelbewegung des Gelenks in eine größere Geschwindigkeit übersetzen. An den schnellen Ausgängen der beiden Getriebe sind Rotationsdämpfer angebracht, die die Schwingungsenergie in Wärme umwandeln. Für die unterschiedlichen Errichtungszustände und Frequenzen ist, zum optimalen Betrieb des Tilgers, eine unterschiedliche Dämpfung erforderlich. Diese lässt sich

über eine Verstellereinheit am Rotationsdämpfer modifizieren. Für den Fall eines Stromausfalls versetzt sich die Verstellereinheit selbstständig in den Zustand der größten einstellbaren Dämpfung. Auf diese Weise ist ein „Fail-Safe-Betrieb“ des Tilgers gewährleistet.

Längere Stromausfälle überbrückt ein in der Steuerung verbauter Akku. Die Bereitstellung der erforderlichen Stellenergie erfolgt durch einen entsprechenden Kraftspeicher für den stromautarken Betrieb.

Ein Regler ermöglicht die Einstellung der erforderlichen Eigenfrequenz. Dieser gibt den Sollwert an das Stellglied weiter, welches die erforderliche Kraft zur Anpassung der Tilgerfrequenz und -dämpfung erzeugt.

Die Aufhängevorrichtung des Tilgers ist so gestaltet, dass dieser bereits an den

Bild 4 : Ein Kardangelenk und ein Dämpfer aus dem ESM-Baukasten für Pendeltilger.



Bild 5: Ein großer 1. Turmeigenfrequenz-Pendeltilger für eine 6 MW Offshore Windenergieanlage





Bild 6a und b zeigen ein ausgeführtes Beispiel für einen 2. Turmeigenfrequenz-Pendeltilger, der sich kompakt in die bestehende Einbausituation des Turmes einpasst.

Bild 7: Ein Rollbahntilger bei der Endabnahme – 9 t

Rollbahntilger ermöglichen die Montage des Tilgers in oder auf der Gondel. Der Tilger leitet die Dämpfungskräfte damit an der höchsten möglichen Position einer WEA ein. So lässt sich die beste Leistung bei geringer beweglicher Masse einsetzen. Der Einsatz bietet sich an, wenn eine Vorzugsschwingrichtung gedämpft werden soll. Für eine Schwingungsdämpfung in alle Richtungen der Turmbiegung kommen zwei im 90°-Winkel zueinander platzierte Tilger zum Einsatz.



liegenden Turmsegmenten befestigt werden kann. Die Turmsegmente werden somit gemeinsam mit dem bereits angehängten Tilger errichtet. Eine andere Möglichkeit ist die Positionierung des Tilgers an den bereits stehenden Turm mit Hilfe des vor Ort verfügbaren Krans. Das System wurde bei ESM in einer großen Testreihe auf einem dafür entwickelten Prüfstand erprobt und geht im Herbst erstmalig in Betrieb. (Bild 3) Das für die Errichtung von Windenergieanlagen entwickelte System lässt sich auch gut für die Bedämpfung der 1. Turmeigenfrequenz einsetzen.

Während bisherige Tilgersysteme bei heutigen Anlagen zur Dämpfung der 1. Turmeigenfrequenz lange Pendel benötigen, beansprucht der adaptive ESM-Tilger einen im Vergleich geringen Bauraum. Somit ist es möglich, den Tilger weiter oben in der Gondel oder auch in der Turmspitze zu platzieren. Dies verbessert die Tilgerwirkung bei gleicher Tilgerschwingmasse deutlich oder spart anders herum bei gleicher Wirkung Masse. Gleichzeitig kann die Tilgerfrequenz exakt an die am Turm gemessene Eigenfrequenz angepasst werden. Tilger und schwingendes System arbeiten auf diese

Weise optimal in dem vorherrschenden Frequenzpunkt. Die Auslegung erfordert keine zusätzliche Masse, um Abweichungen zwischen Systemeigenfrequenz und Tilgerfrequenz zu kompensieren.

Zusammenfassung

Die Anforderungen an Tilgersysteme für Türme von Windenergieanlagen sind vielfältig. In der Regel dominieren Vorgaben für den Einbaubereich, die rechnerischen Annahmen und die Anforderungen an die erwartete Dämpfungsleistung die Ausführung von Tilgern. Die erforderliche Leistung eines Tilgers hängt stark von der eingesetzten Masse und dem nutzbaren Bauraum ab.

Diese Anforderungen haben sehr kundenspezifische Lösungen zur Folge. ESM kann auf ein reichhaltiges Erfahrungswissen und eine Vielzahl von Grundkonzepten sowie Standardbaugruppen zurückgreifen. Auf diese Weise lassen sich flexibel angepasste und serientaugliche Lösungen innerhalb relativ kurzer Zeit anbieten.

Der von ESM entwickelte adaptive Errichtungstilger bietet eine effiziente Möglichkeit, zusätzliche Systemdämpfung flexibel für unterschiedliche Plattformen, Betriebs- und Errichtungszustände zu realisieren.

Neben dem adaptiven Tilgerkonzept bietet ESM unterschiedliche Pendeltilger, Impulstilger und sogenannte Rollbahntilger für verschiedene Einsatzzwecke an.

Impulstilger lassen sich kompakt in bestehende Strukturen integrieren und sichern schädliche Turmschwingungen der zweiten Turmeigenfrequenz ab. Der Arbeitsbereich startet sobald entsprechende Turmamplituden und Beschleunigungen auftreten. Impulstilger wirken nicht kontinuierlich. Sie verhindern die schädlichsten und für den Turm dimensionierenden Schwingzustände. Sie reduzieren damit einen Großteil der auslegungstechnisch relevanten Lasten.

Rollbahntilger und Pendeltilger lassen sich für dauerhaften kontinuierlichen Betrieb auslegen. Sie entnehmen dem System kontinuierlich Schwingungsenergie und reduzieren so über die gesamte Betriebsdauer der Windenergieanlagen Ermüdungslasten auf den Turm. Bei entsprechender Auslegung reduzieren diese Tilger ebenfalls die schädlichsten Schwingzustände aus Extremlastsituationen und ermöglichen eine materialsparende Auslegung der Türme.

ESM Energie- und Schwingungstechnik Mitsch GmbH
Energiestraße 1, 64646 Heppenheim
Tel.: +49 (0) 6252 / 68 93 - 0
info@esm-gmbh.de