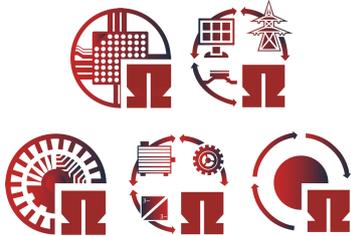


ELSYS Note



Aktive Schwingungsdämpfung

Diese ELSYS Note gibt einen Einblick in die Thematik der aktiven Dämpfung von mechanischen Schwingungen im Bereich der Industrieanwendungen und zeigt eine mögliche Lösung, um den Betrieb von Motoren auf elastischen Fundamenten, wie sie in der Industrie üblich sind, im kompletten Drehzahlstellbereich zu ermöglichen.

Einleitung

Mechanische Schwingungen spielen im industriellen Bereich in vielen Anwendungen eine Rolle. Im Bereich von Verdichtern, Pumpen, Ventilen, Turbinen, Motoren, Dampfkesseln und Wärmeübertragern sind Schwingungen unerwünscht und der Betrieb bei zu großen Schwingungsamplituden untersagt. Bei allen rotierenden Maschinen treten mechanische Schwingungen zwangsläufig auf. Besonders kritisch ist, wenn die Rotordrehfrequenz die Resonanzfrequenzen des Motors als gesamtes, des Rotors oder des Unterbaus (Fundament), trifft. Die eingängigste Ursache hierfür ist die Unwucht des Rotors, wobei der Massenschwerpunkt des Rotoraktivteils nicht mittig liegt. Weitere Ursachen sind magnetische Kräfte, die zwischen Rotor und Stator wirken und bei einer 2-poligen Maschine dazu führen, dass Schwingungen mit doppelter Speisefrequenz der Resonanzfrequenz angeregt werden. Bei 2-poligen Maschinen ist der Effekt besonders ausgeprägt.

Schwingungsbedingte Drehzahlsperrbereiche

Elektrische Maschinen werden vom Hersteller meist für einen Betrieb

auf starrem Fundament nach IEC 60034-14 ausgelegt. Der Anlagenbauer als Hersteller ganzer Antriebslösungen platziert den Motor jedoch oft zusammen mit Pumpen, Lüftern, Verdichtern, etc. auf einem gemeinsamen Stahlrahmenfundament. In Abhängigkeit von der Elastizität des Stahlrahmenfundamentes müssen Drehzahlsperrbereiche ausgewiesen werden, wie das beispielhafte Campbell Diagramm (Abb. 1) zeigt. Diese ergeben sich aus den Schnittpunkten der Anregungen (x_1 und x_2) und der Resonanzfrequenzen (f_0 und f_1) mit einem Sicherheitsabstand von 10%–15%.

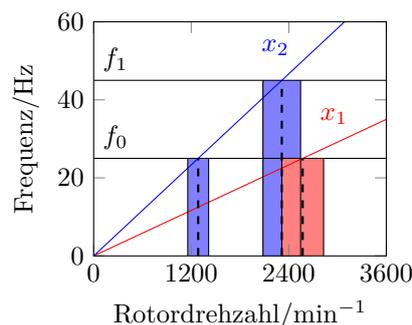


Abb. 1 Campbell Diagramm

Die verbleibenden u.U. schmalen Drehzahlbänder, in denen der Motor betrieben werden kann, können weit entfernt vom Wirkungsgradoptimum der Gesamtanlage sein. Ein drehzahlvariabler Betrieb ist dann oft nur noch bedingt sinnvoll.

Schwingungsdämpfung im Labormaßstab

Um diese Aufgabe mittels aktiver Schwingungsdämpfung unter leichter zu identifizierbaren Randbedingungen zu begegnen wurde zunächst ein Prüfstand (Abb. 2) aufgebaut, der vergleichbare Eigenschaften besitzt, wie ein industrieller Aufbau für Motoren <1 MW und das Stahlrahmenfundament so designt, dass die ersten 6 Starrkörpermoden im Drehzahlstellbereich des Motors liegen.

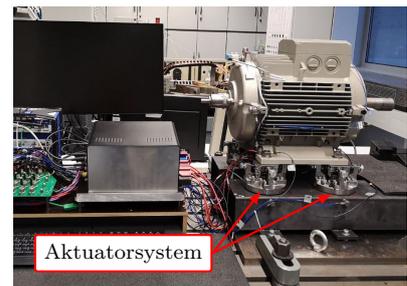


Abb. 2 Prüfstand – Aktive Dämpfung

Das entwickelte Aktuatorsystem ist zwischen Stahlrahmenfundament und Motor platziert. Das Aktuatorsystem besteht aus Tragfedern, die das statische Gewicht des Motors tragen, vertikal eingebauten Voice-Coil-Aktuatoren (VCA) und Dämpfungselemente im ursprünglichen Aufbau [1].

Dämpfung des Systems

Nach DIN ISO 20816-3 sind die maximal zulässigen Schwingwerte für den Dauerbetrieb am Lagerschild in Abhängigkeit der Aufstellungsart definiert. Ziel ist es demnach, die Schwingamplituden am Lagerschild so weit zu reduzieren, dass ein schadensfreier Dauerbetrieb möglich ist. Aufgrund der steifen Verbindung zwischen Motorstator und -fuß und der vergleichsweise weichen Aufstellung des Motors auf dem Aktuatorssystem kann die Einleitung der dämpfenden Aktuatorkraft ebenso am Motorfuß stattfinden. Zweckmäßigerweise wird eine kollokierte Sensor-Aktor Anordnung gewählt und die Schwingungen an den Motorfüßen erfasst.

Regelkreis

Die Regelung besteht im Wesentlichen aus vier unabhängig voneinander arbeitenden einschleifigen Regelkreisen (Abb. 3). Hierbei wird zunächst die am Fuß gemessene Beschleunigung, als analoges Spannungssignal auf den Eingangsspannungsbereich des Reglers in Form eines digitalen Controllers, angepasst.

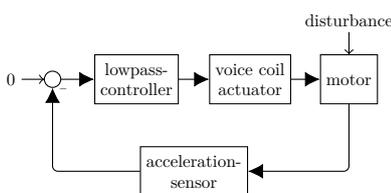


Abb. 3 Vereinfachter Regelkreis

Die im Mikrocontroller hinterlegte Übertragungsfunktion des Reglers als Darstellung im Laplace-Bereich zeigt Gleichung 1. Die beiden ersten Terme beschreiben einen Tiefpassregler, der das Eingangssignal verstärkt, integriert und höherfrequente Signale unterdrückt. Der letzte Term, ein weiterer Hochpassfilter, unterdrückt zudem niederfrequente Signale.

$$R(s) = \frac{K_I}{s} \cdot \frac{s}{s + \omega_{c1}} \cdot \frac{s}{s + \omega_{c2}} = \frac{K_I \cdot s}{(s + \omega_{c1}) \cdot (s + \omega_{c2})} \quad (1)$$

Die errechnete Stellgröße wird analog verstärkt und die angeschlossenen Voice-Coil Aktuatoren spannungsgesteuert betrieben [2].

Hochlaufmessung

Typischerweise wird das Schwingungsverhalten großer elektrischer Maschinen auf einem Prüfstand anhand von Hochlauf-, Leerlauf- und Auslaufmessung bewertet. Nachfolgend zeigt Abb. 4 eine Hochlaufmessung des Prüfstandsmotors auf elastischem Stahlrahmen und Aktuatorssystem mit ausgeschalteter Regelung (passiv) und aktiver Regelung, wobei die Schwingungen am Lagerschild in verschiedenen Achsen erfasst wird. Es zeigt sich, dass die Schwingungsamplituden aller Schwingungsmoden mit vertikalen Bewegungsanteilen stark reduziert werden können. Neben den

rein unwuchterregten Schwingungen, werden auch Schwingungen mit doppelter Speisefrequenz (siehe bspw. Peak bei ≈ 8 Hz) bedämpft werden. Einzig Schwingungsmoden, ohne jegliche vertikalen Schwingungsanteile, begünstigt durch eine symmetrische Aufstellung, können in dieser Konfiguration nicht bedämpft werden (Peak bei ≈ 45 Hz).

Schwinggeschwindigkeiten über Rotordrehfrequenz Lagerschild - Driveside

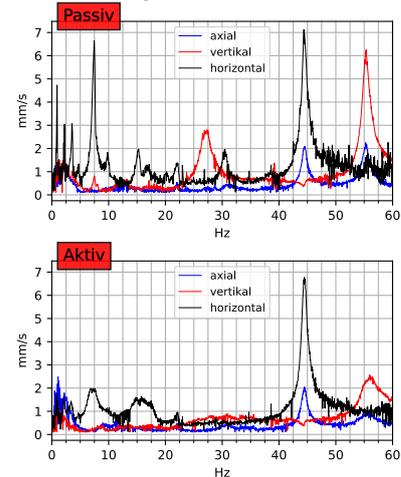


Abb. 4 Hochlaufmessung mit passiver (oben) und aktiver (unten) Regelung

Ausblick

Nach der Erprobung und Optimierung des Prüfstandes bzgl. der Dämpfung von Schwingungsmoden ohne horizontale Auslenkungen, muss das Verhalten mit gekoppelter Lastmaschine getestet werden. Die positiven Ergebnisse am Laborprüfstand ließen eine Weiterentwicklung an einem Prüfstand mit einer Maschine im MW - Bereich (2 MW) zu.

Literatur

- [1] Raimund Wachter, Ulrich Werner, Hans-Georg Herzog und Christian Bauer. „1D-Simulation and experimental validation of active vibration damping of an induction motor mounted on an elastic steel frame foundation using modified integral controllers“. *Proceedings of ISMA2022 - International Conference on Noise and Vibration Engineering*. 2022.
- [2] Ulrich Werner. „Generalized mathematical formulation for active vibration control of rotating machines with voltage-driven electrodynamic actuators between machine feet and steel frame foundation“. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* (2023).