

Durchgerüttelt und durchgeschüttelt

Wie Simulationen dabei helfen, die Erdbebenfestigkeit von Betriebsmitteln zu verbessern und Geräuschpegel zu senken

ROBERT PŁATEK, GRZEGORZ JUSZKIEWICZ, MICHAŁ KOZUPA, GRZEGORZ KMITA, PER LINDHOLM, ROMAIN HAETTEL, MUSTAFA KAVASOGLU, ANDERS DANERYD, JOHAN EKH – Die gründliche Evaluierung komplexer elektrischer Systeme erfordert die Durchführung verschiedener Prüfungen zur Gewährleistung optimaler Designs. Vor ihrer Auslieferung müssen Produkte und Systeme unter verschiedenen Betriebs- und Umgebungsbedingungen geprüft werden,

um ihre Grenzen zu bestimmen. Ein wichtiger Aspekt bei der Konstruktion energietechnischer Produkte sind Geräusche und Schwingungen. Da viele energietechnische Produkte von ABB geräuscharm und erdbebensicher sein müssen, ist es wichtig nachzuweisen, dass das Design nicht nur effizient und zuverlässig ist, sondern auch die Kundenanforderungen und Umweltvorschriften erfüllt.

Besonders in erdbebengefährdeten Regionen ist die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Stromversorgung von der seismischen Festigkeit der Betriebsmittel abhängig.

Seismische Belastungen sind dynamische Lasten, die nicht nur Gebäuden, sondern auch energietechnischen Komponenten gefährlich werden können. Die Richterskala, mit der die Stärke eines Erdbebens gemessen wird, sagt wenig über die Boden-

Sind Rütteltischprüfungen aufgrund des hohen Gewichts der Ausrüstung nicht möglich, sind numerische Analysen die einzige Möglichkeit zur Bestimmung der dynamischen Eigenschaften des Systems.

bewegung aus, die unter anderem von den Frequenzen der Oberflächenwellen und den Bodeneigenschaften abhängt. Besonders in erdbebengefährdeten Regionen ist die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Stromversorgung von der seismischen Festigkeit der Betriebsmittel abhängig. Aufgrund der unmittelbaren Auswirkungen, die verheerende Erdbeben auf die Elektrizitätswirtschaft haben können, sollten alle energietechnischen Produkte, die in seismisch aktiven Bereichen betrieben

werden, auf eine hohe Erdbebenfestigkeit ausgelegt und geprüft werden.

Die Entwicklung erdbebensicherer energietechnischer Produkte ist keine einfache Aufgabe. Die langjährige Erfahrung von ABB auf diesem Gebiet hilft jedoch dabei, seismische Ereignisse besser zu verstehen. Effiziente Analysen seismischer Belastungen auf der Grundlage von Industriestandards leisten einen erheblichen Beitrag zur Entwicklung innovativer Ansätze für diese Art von Problemen.

Seismische Normen und Prüfungen

Die beiden wichtigsten internationalen Normengruppen für die Überprüfung der Erdbebensicherheit sind die IEEE 693 [1] und IEC 61463 [2]. Die IEEE 693-2005 „Recommended Practice for Seismic Design of Substations“ ist ein kürzlich überarbeitetes Dokument, das sich mit Verfahren zur Qualifikation von Ausrüstungen elektrischer Schaltanlagen für verschiedene Erdbebensicherheitsstufen befasst. Laut IEEE 693 wird dringend empfohlen, die betreffende Ausrüstung auf der Tragkonstruktion zu qualifizieren, die später in der Anlage zum Einsatz kommt. Rütteltischprüfungen von Durchführungen haben für diese Komponenten ein gutes allgemeines Antwortverhalten gemäß der IEEE 693 ergeben → 1. Obwohl Rütteltischprüfungen für die seismi-

sche Qualifikation von kritischen Komponenten empfohlen werden, können numerische Analysen bei der Bestimmung der Erdbebenfestigkeit dieser Produkte sehr hilfreich sein. In einigen Fällen, in denen solche Prüfungen aufgrund des hohen Gewichts der Ausrüstung nicht mög-

lich sind (z. B. bei Leistungstransformatoren), ist dies die einzige Möglichkeit zur Bestimmung der dynamischen Eigenschaften des Systems.

Modellierungsmethoden für seismische Analysen

Zur seismischen Verifizierung elektrischer Betriebsmittel werden verschiedene Analysen verwendet. Dazu gehören normalerweise statische Berechnungen, um die während eines Erdbebens bei einer

Titelbild

Die Erdbebenfestigkeit und der Umgebungslärm von energietechnischen Produkten können durch numerische Analysen verbessert werden.



1a Seismische Prüfung einer RIP-Durchführung für 230 kV

bestimmten Bodenbeschleunigung auftretenden Kräfte abzuschätzen und diese mit der Belastbarkeit der Ausrüstung zu vergleichen. Bei starren Strukturen, deren niedrigste Eigenfrequenzen bei über 30 Hz liegen, findet keine Verstärkung der Bodenbewegung statt, und die höchste Belastung entspricht der Bodenbeschleunigung. In diesem Fall reicht eine statische Evaluierung aus. Bei größeren Strukturen liegen die Eigenfrequenzen für gewöhnlich bei unter 30 Hz. Die gängigste Methode zur Berechnung der seismischen Belastung ist die Analyse des Antwortspektrums, bei der die Reaktion der verschiedenen Eigenmoden im strukturellen Aufbau summiert wird. Sie basiert auf einer Modalanalyse der Eigenfrequenzen und Eigenmoden der Struktur. Eine weitere beliebte Methode ist die Sinusimpuls-Simulation, bei der die Struktur einer bestimmten Anzahl von Sinuswellen ausgesetzt wird, deren Frequenzen den ersten Eigenfrequenzen unter 33 Hz entsprechen. Der nächste Schritt dieser zeitbasierten Methode ist der „Verlauf“, bei dem die Struktur zufälligen Beschleunigungslasten mit einer Dauer von mindestens 20 Sekunden ausgesetzt wird, was der Definition des Spektrums entspricht. Am Ende werden Verformungen, Dehnungen und Spannungen analysiert, um die seismische Festigkeit zu beurteilen. Die Untersuchung von erdbebensicheren RIP-

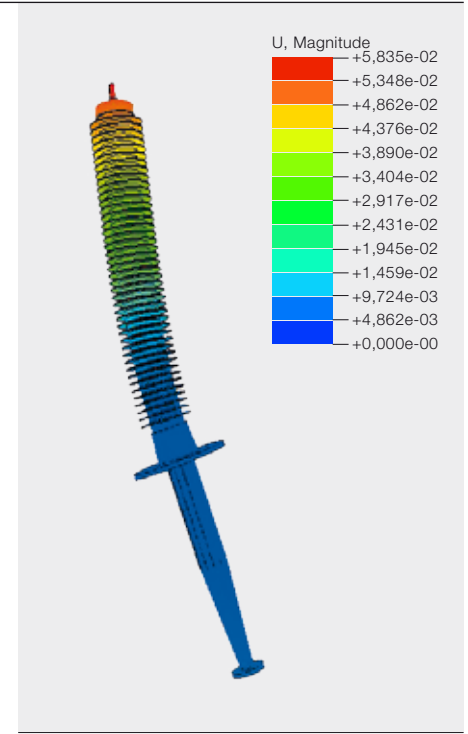
Durchführungen mit harzprägniertem Papier (Resin Impregnated Paper, RIP) zeigt, welches Potenzial die Methodik zur

Die Reduzierung der Lärmbelastung gewinnt weltweit immer mehr an Bedeutung.

genauen Vorhersage der relativen Beschleunigung und Auslenkung für seismische Qualifikationen bietet [3]. Um noch einen Schritt weiterzugehen, ist jedoch ein Verständnis der seismischen Wechselwirkungen zwischen Schaltanlagenkomponenten und Fluiden erforderlich.

Herausforderungen der seismischen Modellierung

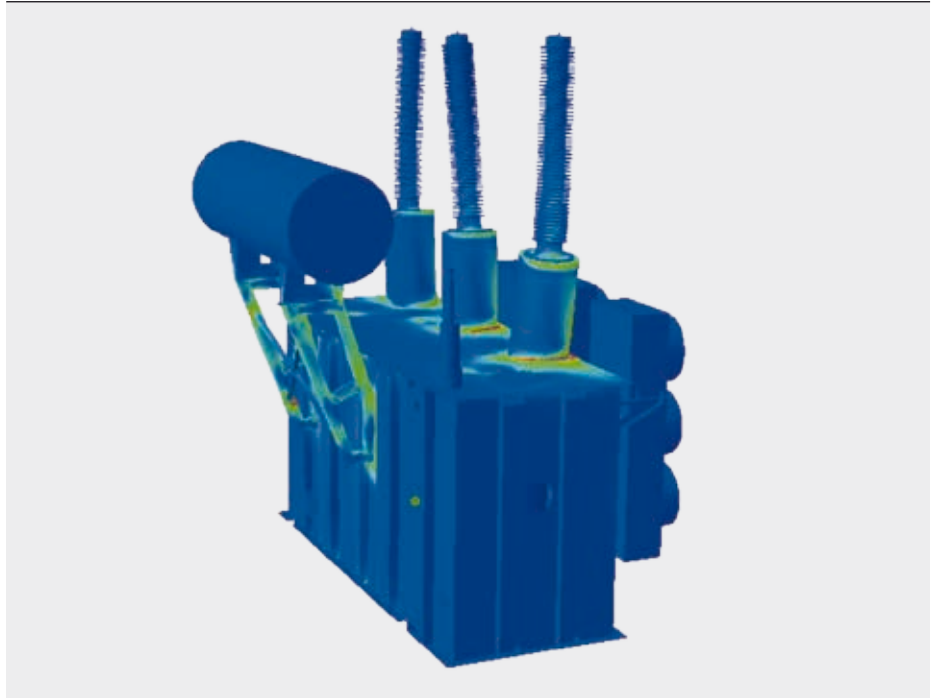
Viele Experten sind der Meinung, dass das seismische Verhalten des Systems Transformator-Durchführung durch die Kopplung der Komponenten verkompliziert wird [4, 5]. Außerdem können Schäden durch Montageverbindungen (Schrauben, Nieten, Schweißnähte) verursacht werden. Daher werden bei seismischen Prüfungen von Durchführungen mit einem starren Rahmen nicht alle kritischen Situa-



1b Berechnete erste Harmonische der Eigenfrequenz der Durchführung

tionen berücksichtigt, und es sind weitere Untersuchungen notwendig. Simulationen eines Transformatorbuchsels und seiner Komponenten zeigen, dass für umfassende seismische Analysen das gesamte System aus Transformator und Durchführung betrachtet werden sollte → 2. Außerdem sollte bei mit Flüssigkeit (Öl) gefüllten Produkten der Einfluss der Flüssigkeit auf die seismische Belastung überprüft werden. Da heute höhere Rechenleistungen zur Verfügung stehen, kann die Komplexität der Strukturmodelle um detailliertere Beschreibungen der Geometrie und multiphysikalische Faktoren erweitert werden. Der Einfluss der Flüssigkeit auf die dynamischen Eigenschaften wurde mithilfe der sogenannten Fluid-Struktur-Interaktion (FSI) bestimmt. Die FSI-Methode basiert auf dem Austausch von Daten zwischen den Werkzeugen zur Simulation der Fluidströmung und des mechanischen Verhaltens. In numerischen Strömungsanalysen (Computational Fluid Dynamics, CFD) wird der mit Flüssigkeit gefüllte Kessel modelliert, während in Strukturberechnungen lediglich die statische Komponente betrachtet wird. Die CFD-Analyse ist verantwortlich für die Berechnung der Fluidströmung. Die dabei ermittelten, auf die Wände der Struktur wirkenden Kräfte werden an das Strukturanalysewerkzeug übergeben und als Lasten und Randbedingungen verwendet. Die neue Form

Die Schallpegel müssen frühzeitig mit ausreichender Genauigkeit vorhergesagt werden, um die am besten geeignete Strategie zur Geräuschunterdrückung wählen zu können.



der Struktur geht zurück an das CFD-Werkzeug, wo das Gitter für das nächste Zeitinkrement entsprechend aktualisiert wird. Auf diese Weise können Spannun-

derungen und Umweltvorschriften zu erfüllen. Dazu müssen die Schallpegel frühzeitig mit ausreichender Genauigkeit vorhergesagt werden, um die am besten geeignete Strategie zur Geräuschunterdrückung wählen zu können.

Numerische Analysen sind das wichtigste Werkzeug, wenn es darum geht, das Entstehen von Schallproblemen zu verstehen und wirksame Lösungen zur Geräuschminderung zu entwickeln.

gen, Dehnungen und Verformungen der Struktur unter Berücksichtigung der Fluid-dynamik ermittelt werden.

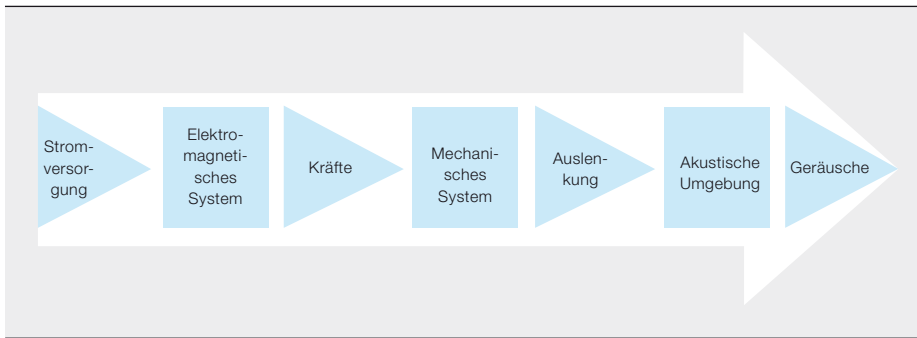
Vibroakustik

Die Reduzierung der Lärmbelastung gewinnt weltweit immer mehr an Bedeutung. Deshalb müssen bei der Konstruktion von energietechnischen Produkten niedrige Schall- und Schwingungspegel sichergestellt werden, um Kundenanfor-

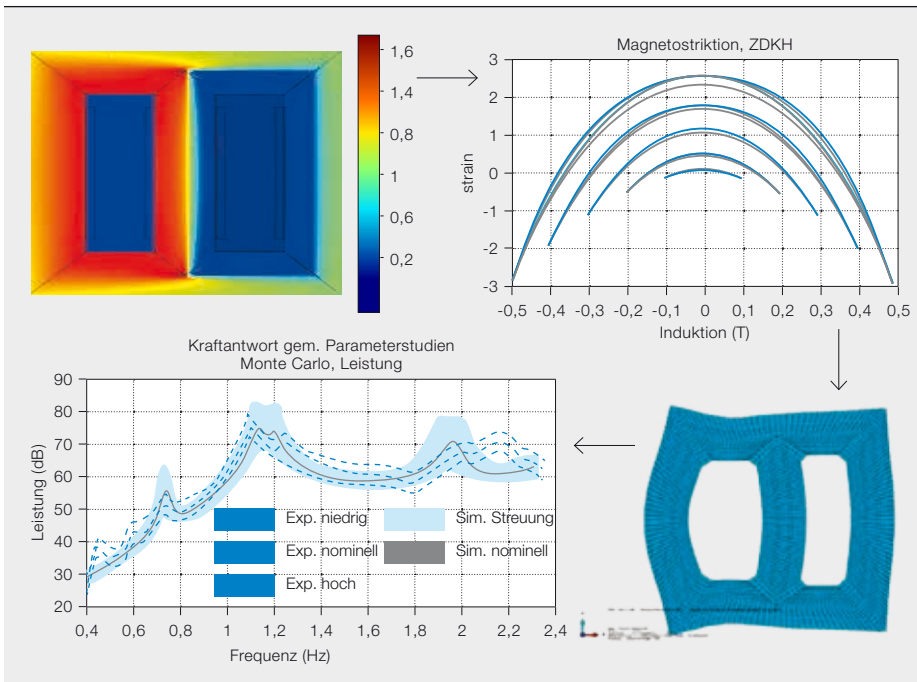
Schallentstehung

Der Mechanismus, der in vielen ABB-Produkten Schall und Schwingungen verursacht, kann mit der Energieumwandlungskette erklärt werden → 3. Die Energieumwandlung ist ein typisches multiphysikalisches Phänomen, bei dem Elektromagnetismus, Mechanik und Akustik eine Rolle spielen. Die Wechselwirkung zwischen dem Wechselstrom und den damit verbundenen Magnetfeldern führt zu wechselnden Kräften und damit zu Schwingungen in der Struktur, die schließlich als Schall abgestrahlt werden. Der beschriebene multiphysikalische Mechanismus ist in vielen ABB-Produkten wie Transformatoren oder Kondensatoren zu beobachten. Aufgrund der relativen Komplexität dieser Produkte sind zur präzisen Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Designparametern und der Kopplung zwischen den physikalischen Phänomenen fortschrittliche Prognosewerkzeuge erforderlich. Numerische Analysen sind das wichtigste Werkzeug, wenn es darum geht, das Entstehen von Schallproblemen zu verstehen und wirksame Lösungen zur Geräuschminderung zu entwickeln.

3 Energieumwandlungskette: von der Stromversorgung bis zum Schall



4 Kerngeräuschprognose und Validierung eines Kerns im Labormaßstab



Beispiele für vibroakustische Simulationen

In den Forschungszentren von ABB wird mithilfe von Finite-Elemente- und Randelementmethoden das vibroakustische Verhalten verschiedener ABB-Produkte simuliert. Ein typisches Beispiel für Multiphysik- und Multiskalensimulationen ist die Geräuschentwicklung in ölgefüllten Leistungstransformatoren, bei der zwischen zwei Schallquellen unterschieden werden kann: Kerngeräusche (sogenannte „Leerlaufgeräusche“) und Wicklungsgeräusche („Lastgeräusche“).

Sobald die Transformatorwicklungen von einem Strom durchflossen werden, entsteht im Transformator Kern ein magnetischer Fluss. Kornorientierter Elektro Stahl, der Hauptwerkstoff für Transformatorkerne, besitzt eine nichtlineare anisotrope Eigenschaft (die sogenannte Magnetostraktion), die sich im Wesentlichen durch

eine Veränderung der Kernabmessungen aufgrund des punktwise wechselnden oder sich drehenden magnetischen Flusses bemerkbar macht [6]. Diese frequenzabhängigen Magnetostraktionskräfte erzeugen Schwingungen im Kern, die zu Leerlaufgeräuschen führen. → 4 zeigt die magnetische Flussdichte im Kern, die Dehnung durch Magnetostraktion aufgrund unterschiedlicher Flussdichten, eine typische Deformationsform der Transformator kernstruktur sowie die Schalleistungspegel, die weitgehend mit den gemessenen Werten übereinstimmen.

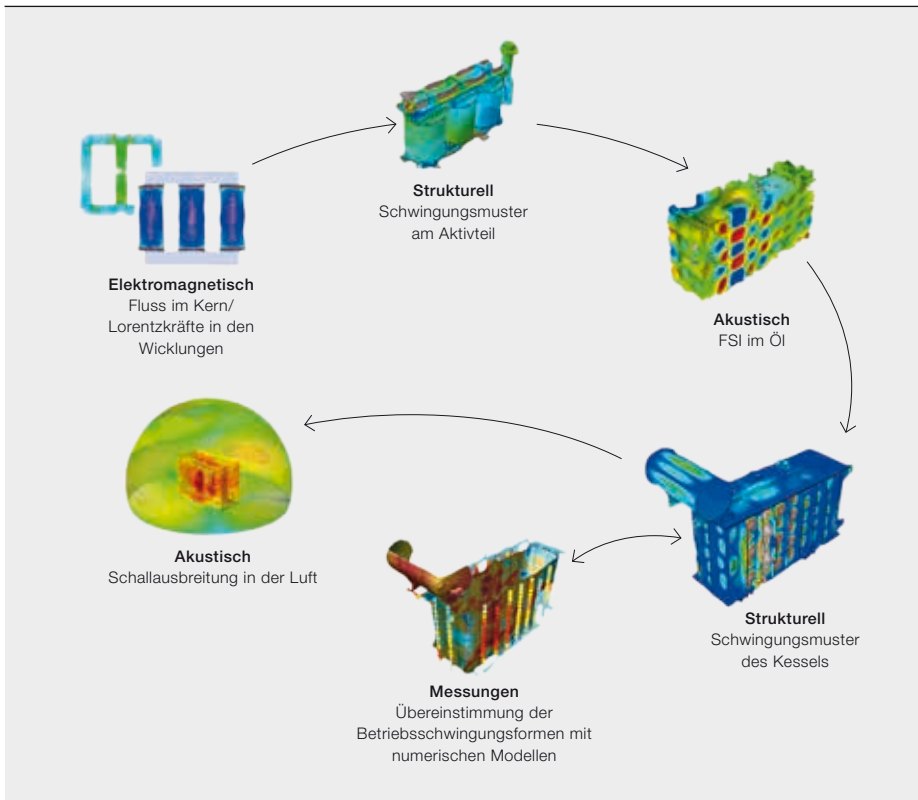
Lastgeräusche sind auf die Wechselwirkung zwischen dem Streufeld und dem in den Wicklungen fließenden Strom zurückzuführen. Diese erzeugen Lorentz-Kräfte, die wiederum Schwingungen in der Wicklung verursachen [7, 8].

Dieses einfache Modell ermöglicht eine Vorhersage des von den Kondensatoren vor Ort erzeugten Schalls mit einer Genauigkeit von $\pm 1,5$ dB lange vor dem Bau einer Komponente.

Die Schwingungen von Kern und Wicklung werden durch das Isolieröl, die Kernhalterung und die Presskonstruktion auf die Kesselwände übertragen, von wo sie als Schallwellen in die Umgebung gelangen. Aus dieser Kesselschwingung können durch Berechnung der akustischen Intensität der Oberfläche Rückschlüsse auf die abgegebene Schalleistung gezogen werden.

→ 4 zeigt einen typischen Ansatz für ein transformatorähnliches Produkt. Das Verfahren beginnt mit den elektromagnetischen Berechnungen, die die auf die Struktur wirkenden mechanischen Kräfte liefern. Entscheidend für ein richtiges Schwingungsbild am Kessel ist der Struktur-Fluid-Struktur-Pfad einschließlich der Schnittstellen und der im Öl selbst stattfindenden Phänomene. Ein wohldefiniertes Schwingungsmodell der äußeren Flächen liefert nicht nur ein entsprechendes akustisches Strahlungsmuster, sondern auch Informationen über Bereiche großer Amplituden, die gedämpft werden können.

Hochspannungs-Leistungskondensatoren, die in Blindleistungskompensatoren und in der Hochspannungs-Gleichstromübertragung (HGÜ) eingesetzt werden, stellen eine erhebliche Geräuschquelle dar. Deshalb wurde ein Prognosewerkzeug zur Abschätzung des von Kondensatoren abgegebenen Schallpegels entwickelt. Die Übertragungsfunktion zwischen der Eingangsspannung und der Schall-



leistung kann analytisch berechnet werden, indem der Kondensator als ein in Längsrichtung schwingender Balken beschrieben wird, der wechselnden Coulomb-Kräften ausgesetzt ist. In Verbindung mit den geschätzten Betriebsstromspektren für das geplante Kraftwerk ermöglicht dieses einfache Modell eine Vorhersage des von den Kondensatoren vor Ort erzeugten Schalls mit einer Genauigkeit von $\pm 1,5$ dB lange vor dem Bau einer Komponente.

Experimentelle Validierung

Eine vollständige Analyse zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften eines Struktursystems muss mit einer Betriebsmodalanalyse und einer guten Übereinstimmung mit den aus realen Testdaten abgeleiteten Eigenwerten des Systems beginnen. Für eine erste detaillierte Validierung sind Messungen in einer kontrollierten Umgebung an maßstabsgetreuen Modellen erforderlich, die einer realistischen Erregung ausgesetzt werden. Nach Abschluss der Laborprüfung und Auswertung der Ergebnisse müssen ergänzende Messungen sorgfältig geplant und an Produkten in Originalgröße durchgeführt werden, um die Validierung abzuschließen. Hierbei können fortschrittliche Messmethoden wie die Laser-Doppler-Vibrometrie (LDV) hilfreich sein. Das LDV-

Verfahren liefert 3-D-Schwingungsmuster des Transformators unter Last oder im Leerlauf in Form sogenannter Betriebschwingungsformen (Operational Deflection Shapes, ODS) \rightarrow 5 [9]. Die ODS-Muster können direkt mit den numerischen Analyseergebnissen verglichen werden, sodass bei Bedarf Verbesserungen am Modell vorgenommen werden können.

Fazit

In Kombination mit der entsprechenden Rechenleistung ermöglichen moderne Prognosewerkzeuge wie Multiphysik-Software detaillierte und effiziente Untersuchungen, die die komplexen Wechselwirkungen der Designparameter und die Auswirkungen der Materialeigenschaften auf die Schallleistungspegel aufzeigen. Entsprechend miteinander verknüpfte numerische Modelle liefern die Grundlage für die Erstellung virtueller Prototypen, d.h. Produkte und Systeme können virtuell getestet und verbessert werden, ohne dass ein realer Prototyp angefertigt werden muss. Solche numerischen Simulationen liefern einen häufig übersehenen, aber wesentlichen Beitrag zur Reduzierung der Lärmbelastung und zur Sicherung einer unterbrechungsfreien Stromversorgung, damit der Endverbraucher ungestört arbeiten und ruhig schlafen kann – auch wenn sich mal die Erde bewegt.

Robert Platek

Grzegorz Juszkiwicz

Michał Kozupa

Grzegorz Kmita

ABB Corporate Research

Krakau, Polen

robert.platek@pl.abb.com

grzegorz.juszkiwicz@pl.abb.com

michal.kozupa@pl.abb.com

grzegorz.kmita@pl.abb.com

Per Lindholm

Romain Haettel

Mustafa Kavasoglu

Anders Daneryd

Johan Ekh

ABB Corporate Research

Västerås, Schweden

per.o.lindholm@se.abb.com

romain.haettel@se.abb.com

mustafa.kavasoglu@se.abb.com

anders.daneryd@se.abb.com

johan.ekh@se.abb.com

Frank Cornelius

ABB Dry Transformer Development Center

Brilon, Deutschland

frank.cornelius@de.abb.com

Literaturhinweise

- [1] IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations. IEEE Standard 693–2005, 2005
- [2] „Bushings – seismic qualifications“. IEC 61463 Technical Report II. Luglio, 1996
- [3] Rocks, J. et al.: „Seismic response of RIP-transformer bushing“. In Insulator News & Market Report (INMR) World Congress on Insulators, Arresters and Bushings. Brasilien, 2007
- [4] Filiatrault, A. et al.: „Experimental seismic response of high-voltage transformer-bushing systems“. Earthquake Spectra. Vol. 21, Nov. 2005: 1009–1025
- [5] Ersoy, S., Saadeghvaziri, M. A. (2004): „Seismic response of transformer-bushing systems“. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 19: 131–137
- [6] Timar, P. L. (1989): „Noise and Vibration of Electrical Machines“. New York, NY: Elsevier
- [7] Kavasoglu, M. et al. (2010): „Prediction of transformer load noise“. Proceedings of the COMSOL Conference, Paris
- [8] Grgis, R. S. et al. (2009): „Comprehensive analysis of load noise of power transformers“. IEEE Power Energy Society General Meeting: 1–7
- [9] Hrkac et al. M. (2012): „Vibroacoustic behavior of SPT transformer“. CIGRE International Colloquium Transformer Research and Asset Management