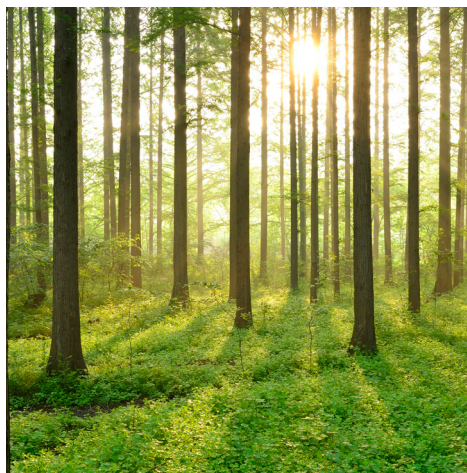


DYNAMISK MODELLERING AV ELASTISKA GENERATOR-KOMPONENTER FÖR VATTENKRAFTSROTORER

RAPPORT 2019:569



Dynamisk modellering av elastiska generatorkomponenter för vattenkraftsrotorer

JAN-OLOV AIDANPÄÄ, FLORIAN THIERY OCH ROLF GUSTAVSSON

ISBN 978-91-7673-569-5 | © Energiforsk mars 2019

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Den här rapporten är resultatet från ett postdoktoralt projekt vid Luleå tekniska universitet (LTU). Projektets titel var Dynamisk modellering av elastiska generatorkomponenter i vattenkraftsrotorer. Projektet utfördes av Florian Thiery och Jan-Olov Aidanpää båda vid LTU samt Rolf Gustavsson, vid Vattenfall Research and Development.

Projektet genomfördes inom ramen för Svenskt vattenkraftcentrum, SVC som är ett centrum för utbildning och forskning inom vattenkraft och gruvdammar. Syftet med SVC är att säkerställa kunskapen för en effektiv och tillförlitlig vattenkraftproduktion och en trygg dammsäkerhet i Sverige.

Svenskt vattenkraftcentrum etablerades av Energimyndigheten, Energiforsk och Svenska Kraftnät tillsammans med Luleå tekniska universitet, Kungliga Tekniska Högskolan, Chalmers tekniska högskola och Uppsala universitet.

Medverkande organisationer är: Andritz Hydro, Falu Energi & Vatten, Fortum Generation, GE Renewable Energy, Holmen Energi, Jämtkraft, Jönköping Energi, Karlstads Energi, Mälarenergi, Norconsult, Rainpower, Skellefteå Kraft, Sollefteåforsens, Statkraft Sverige, Sweco Energuide, Sweco Infrastructure, SveMin, Umeå Energi, Uniper, Vattenfall Research and Development, Vattenfall Vattenkraft, VG Power, WSP Samhällsbyggnad och ÅF Industry.

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Sammanfattning

Inom rotordynamiken har generatorer tidigare modellerats som stela objekt utsatta för magnetisk dragningskraft och obalanslast. Mätningar och haverier har dock visat att utmattningsproblem kan förekomma i vissa komponenter samt stora vibrationer på grund av deformationer i generatorn. Projektets syfte var att utveckla modeller för simulering och analys av elastiska generatorkomponenter.

Modeller har tagits fram i projektet för dynamisk simulering av obalans, statisk- och dynamisk excentricitet. Dessa modeller kan framöver användas för analys av vibrationer och utmattningsproblem. I ett exempel visas hur modellerna kan användas för att bedöma vibrationer och utmattningsproblem.

En journalartikel är under beredning och kommer att slutföras under 2019.

Summary

In rotor dynamics the generator is usually modeled as a rotating rigid body subjected to magnetic forces and unbalance. Measurements and failures have shown that fatigue can occur due to high vibrations in the generator. The aim of this project was to develop models for simulation and analysis of elastic generator components.

In this project models presented for dynamic simulation of unbalance together with static and dynamic eccentricity. These models can in future be used for analysis of vibrations and fatigue. In an example it is shown how the models can be used for evaluation of vibrations and fatigue in and hydropower generator. A journal paper is under preparation and will be submitted during 2019.

Innehåll

1	Bakgrund	8
2	Modell	10
3	Resultat	13
4	Slutsats	16
5	Referenser	17

1 Bakgrund

I rotordynamiska beräkningar modelleras en generator vanligen som en stel kropp vid utvärdering av dynamiska effekter. Modellerna fungerar för små generatorer medan vattenkraftens stora maskiner medför att elasticiteten blir betydande. I dessa generatorer finns det ofta en flytande rotorring som kopplas till axeln via flexibla kopplingar enligt figur 2. Dessa kopplingar har till syfte att minska spänningar på grund av termisk expansion, men de kan utsättas för mekanisk utmattning på grund av rotation då rotorringen är elastisk. Se figur 1.

Under de senaste årtiondena har dynamiken hos synkrona generatorer undersökts med hjälp av styva rotor- eller Jeffcott-modeller för att utvärdera påverkan av magnetisk dragning. I tidigare analyser togs endast den radiella UMP-kraften i beaktande [1, 2]. Senare arbete har dock beaktat både de radiella och tangentiella UMP-krafterna. Guo et al. [3] utvärderade effekten av excentricitet på rotorns vibrationer genom att uttrycka luftgapets permeans som en Fourier-serie. Genom att använda en liknande modell, utvärderade Wu et al. rotorns stabilitet i det roterande koordinatsystemet [4]. Gustavsson och Aidanpää [5] inkluderade den radiella UMP-komponenten genom att integrera Maxwell-spänningen över generatoren med hänsyn till rotorns lutning. Calleecharan och Aidanpää [6] utvärderade dynamiken hos en Jeffcott-rotor utsatt för både radiella och tangentiella UMP-komponenter under olika "whirling" förhållanden.

Lundström et al. undersökte magnetisk dragnings påverkan på en generator med formel i rotorringen [7]. Nackdelen med dessa artiklar är att samtliga behandlar en stel rotor varför ingen information om utmattning eller detaljerad dynamik i generatoren kan fångas.

Som en följd av detta initierades ett licentiatprojekt inom SVC som avslutades i förtid. För att ta tillvara på utvecklade modeller och generera användbara resultat initierades ett 8 månaders projekt där en tidigare doktorand, Florian Thiery, fick i uppdrag att utveckla modellerna. Efter flera samtal med programleverantörer kom vi fram till att inget program idag kan användas för att simulera den roterande dynamiken i en elastisk rotorring varför egna program har utvecklats. Fria ringar har studerats tidigare [8,9,10] men den elektromagnetiska kopplingen mellan rotor och stator har ej modellerats.

I detta projekt undersöks dynamiken hos flytande rotorring och dess infästning till axeln under nominell drift. Även om krökta balkelement finns beskrivna har vi valt normala 2D balkelement på grund av att det blir enklare att koppla ringen till rotoraxeln. I resultaten visas hur de nya modellerna kan användas för att utvärdera dynamik och utmattning i generatorkomponenter. Resultaten kommer att presenteras i mer detalj i en kommande artikel (2017) och ligger till grund för nya projekt framöver.



Figur 1: Kopplingselement mellan rotorringen och rotoraxeln som utsatts för utmattningsbrott.

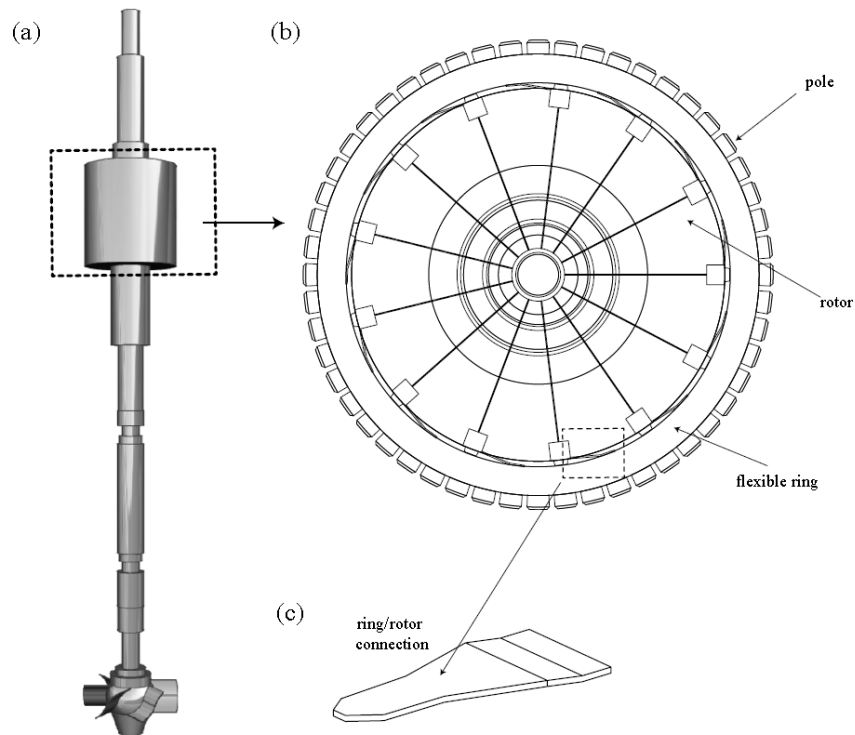
2 Modell

En översikt över den simulerade generatoren visas på figur 2. Den flytande rotringen med poler är fäst via flexibla kopplingar (rotor connections) till rotoraxeln. Dessa flexibla kopplingar är vanligtvis plåtar som svetsas direkt på rotoraxeln. Deras huvudsyfte är att undvika höga spänningar i generatoren på grund av termisk expansion. Dimensionerna i Fig. 2 är överdrivna, eftersom avståndet mellan rotoraxel och rotor ring normalt är ca 1/100 av rotor diametern. Parametrarna som använts för generatoren anges i tabell 1. Den flexibla rotorringen diskretiseras med 52 noder kopplade med balkelement, medan massan av varje pol läggs till varje nod.

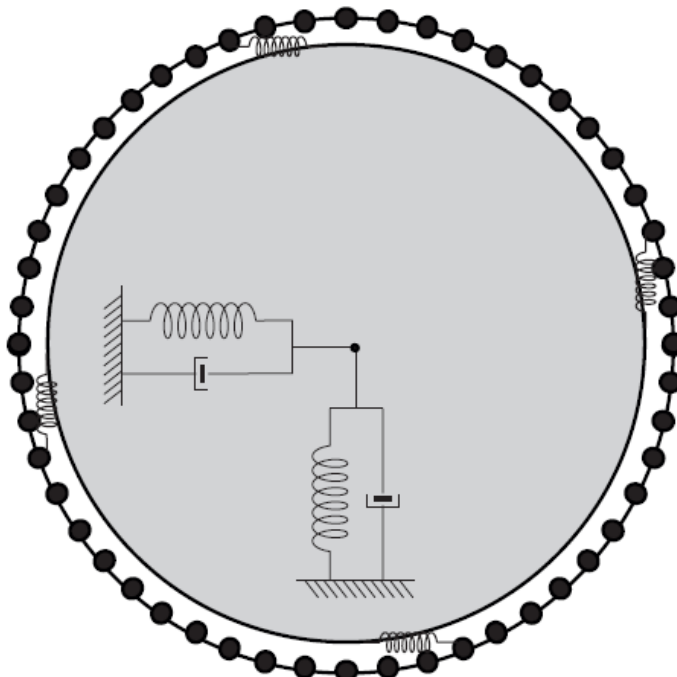
Rotormodellen förenklas till en Jeffcott-rotor med isotropa lageregenskaper. Antalet flexibla kopplingar kan ändras i modellen om dess tangentiella styvhet antas vara 1×10^8 [N/m] medan den radiella kan försummas. Massan av dessa element kan försummas.

För att modellera rotorringens vibrationer används 2D-balkelement med 3 frihetsgrader per nod, motsvarande respektive axiell förskjutning x , tvärförskjutning y och rotation kring axiella koordinaten z . Massan antas lumpad i noderna och genom Lagranges ekvation tas ekvationerna fram för mass- och Coriolismatrisen (figur 3).

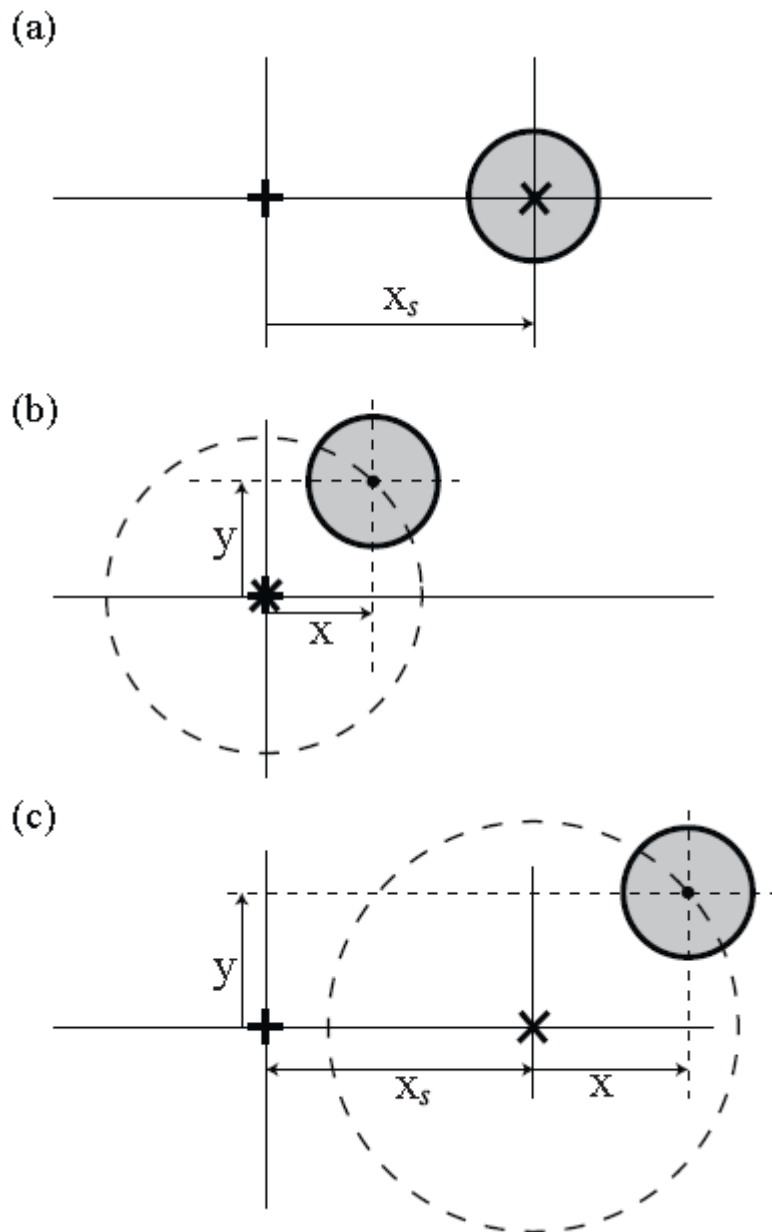
Laster på modellen är centrifugallast, elektromagnetiska laster och obalanskrafter. Studier genomförs för statisk och dynamisk excentricitet vilket tillsammans med den elastiska ringens rörelser ger upphov till icke-symmetriska laster på grund av den elektromagnetiska dragningen. Elektromagnetisk dragning modelleras som negativa styvheter verkande på varje pol. Se figur 4.



Figur 2: Beskrivning av en typisk Kaplan turbin med flytande rotorring: (a) typisk rotormodell till vänster där generatoren beskrivs med ett styvt balkelement (b) en mer detaljerad beskrivning av generator med flytande rotorring (c) kopplingselement mellan rotorring och axel.



Figur 3: Diskretiserad modell av generatoren med 52 noder i rotorringen och en nod för rotoraxeln. Styvheter i kopplingsdonen och lagren för Jeffcott-rotorn visas även i figuren.



Figur 4: Beskrivning av olika typer av excentricitet: (a) statisk excentricitet med en fast förskjutning X_s (b) dynamisk excentricitet med en "whirl"-ande rotor på en fix radie (c) kombinerad statisk och dynamisk excentricitet.

3 Resultat

3.1. Frekvenser

Avsikten med resultaten är att visa hur modellerna kan användas i framtida detaljstudier. Därför har t ex antalet kopplingselement begränsat till fyra för att enklare kunna validera resultaten. Modellen i detta avsnitt motsvarar modellen i figur 3 med 52 noder och 4 kopplingselement om inte annat anges. För att validera modellen har först egenfrekvenser jämförts mot elementarfall [11].

Genom att ansätta kopplingselementens styvhet $k_t = 0$ och bortse från extramassorna i polerna kan modellen jämföras mot elementarfallen. I tabell 2 visas de fria svängningarna analytiskt och numeriskt från den framtagna modellen. Tabellen visar att modellen har god överensstämmelse mot analytiska lösningar men dock en något större avvikelse då systemet roterar.

Tabell 2: Egenfrekvenser i rotorringen

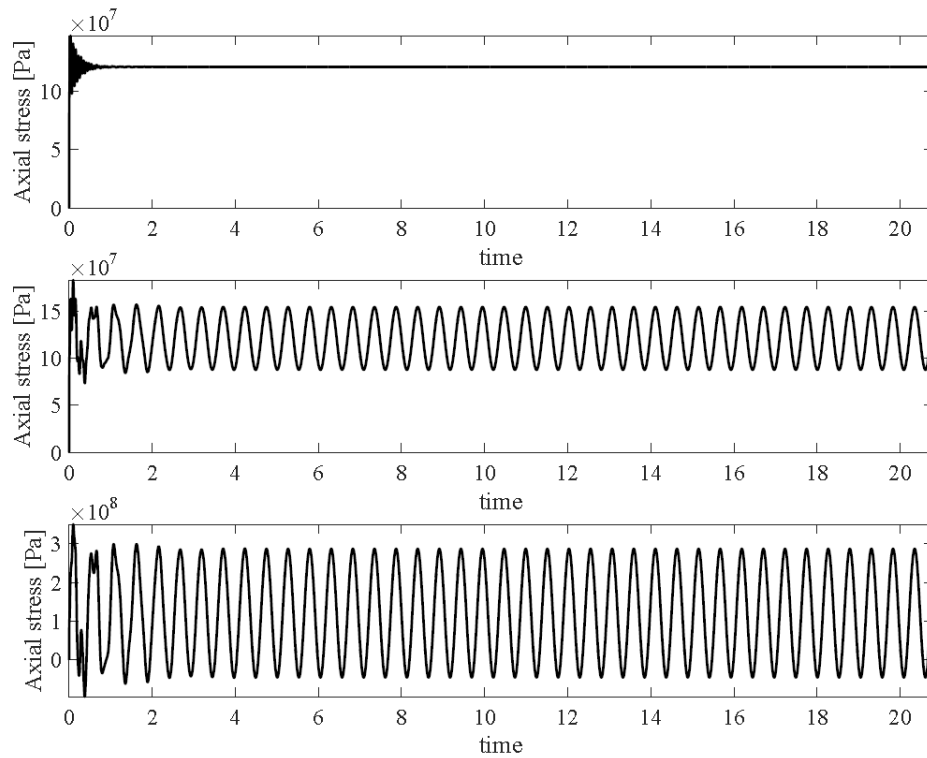
Speed	At $\Omega = 0$		At $\Omega = \Omega_{nom}$	
Mode	Analy.	Num.	Analy.	Num.
1st in-plane bending	20.76	20.71	19.35	19.18
1st in-plane bending	-	-	22.43	22.24
Jeffcott mode	24.54	24.54	24.54	24.54
2nd in-plane bending	58.73	58.07	57.76	56.91
2nd in-plane bending	-	-	60.07	59.19

3.2. Utmattning

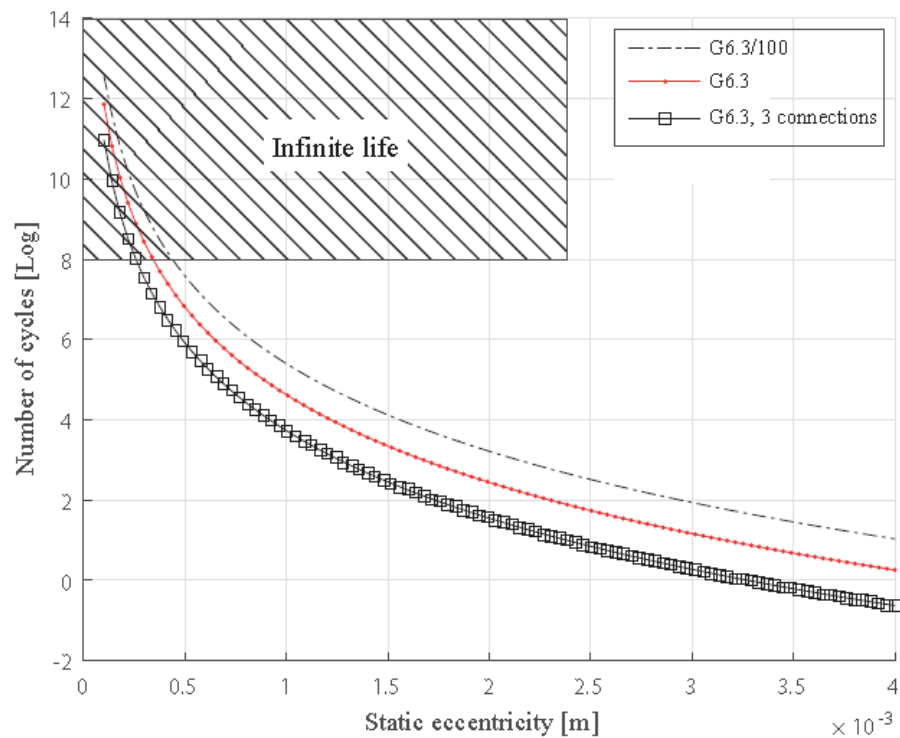
Syftet med detta avsnitt är att utvärdera kopplingselementens livslängd då rotern utsätts för både en statisk och dynamisk excentricitet. Då kommer systemet att utsätts för cykliska laster som beror på förhållandet mellan den statiska och den dynamiska excentriciteten.

I figur 5 visas tre fall av statisk excentricitet (0, 0.2 och 1mm) då den dynamiska excentriciteten är en obalans motsvarande G6.3. Resultaten visas i ett roterande koordinatsystem. Det första fallet (a) visar på en konstant spänning medan b och c visar att de cykliska lasterna ökar med den statiska excentriciteten.

Från simulerad amplitud och mittspänning kan utmattningen beräknas för det specificerade materialet [12]. Figur 7 visar antalet tillåtna cykler för tre olika fall då statiska excentriciteten är konstant 1mm. Första fallet är 1% av G6.3, andra fallet är G6.3 och tredje fallet är G6.3 med ett kopplingselement obelastad. Ett obelastat kopplingselement skulle kunna motsvara ett felaktigt monterat element. Avsikten är att demonstrera olika möjligheter att analysera systemet. I beräkningarna har endast den axiella spänningen beaktats.



Figur 5: Axiell spänning i kopplingselementen för konstant obalans G6.3 och lastfallen: (a) 0 mm (b) 0.2 mm (c) 1 mm.



Figur 6: Utmattningsdiagram av kopplingselementen för tre olika lastfall (1% av G6.3, G6.3 och ett obelastat kopplingselement) då den statiska excentriciteten är konstant 1mm.

4 Slutsats

Vid rotordynamiska simuleringar modelleras vattenkraftsgeneratorer som stela kroppar. För fallet flytande rotorring kommer dock de elastiska egenskaperna att vara betydande varför en god modell bör inkludera elastiska element. Mätningar har visat att ringen i vissa fall kan deformeras på grund av de magnetiska lasterna och kopplingselement mellan rotorring och axel kan utsättas för utmattningsbelastning som leder till haveri.

Avsikten med projektet var att ta fram modeller för att kunna simulera dynamiska effekter i generatorer med flytande rotorring. Vi har tagit fram dessa modeller och visat hur de kan användas för att studera dynamiska effekter och även beräkna utmattningsbelastningen på ingående komponenter. En utförligare beskrivning kommer att skickas till journal under 2017 där modellerna beskrivs i detalj. Arbetet kommer även att ligga till grund för nya doktorandprojekt framöver.

5 Referenser

- [1] H. Ohishi, S. Sakabe, K. Tsumagari, and K. Yamashita. Radial magnetic pull in salient pole machines with eccentric rotors. IEEE Transactions on Energy Conversion, EC-2(3):439–443, Sept 1987.
- [2] R. Belmans, A. Vandenput, and W. Geysen. Influence of unbalanced magnetic pull on the radial stability of flexible-shaft induction machines. IEE Proceedings B - Electric Power Applications, 134(2):101–109, March 1987.
- [3] F. Chu D. Guo and D. Chen. The unbalanced magnetic pull and its effects on vibration in a three-phase generator with eccentric rotor. Journal of Sound and Vibration, 254(2):297 – 312, 2002.
- [4] Baisheng Wu, Weipeng Sun, Zhengguang Li, and Zhihe Li. Circular whirling and stability due to unbalanced magnetic pull and eccentric force. Journal of Sound and Vibration, 330(21):4949 – 4954, 2011.
- [5] Rolf. K. Gustavsson and Jan-Olov Aidanpää. The influence of nonlinear magnetic pull on hydropower generator rotors. Journal of Sound and Vibration, 297:551 – 562, 2006.
- [6] Y Calleecharan and J-O Aidanpää. Dynamics of a hydropower generator subjected to unbalanced magnetic pull. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 225(9):2076–2088, 2011.
- [7] Niklas Lundstrom and Jan-Olov Aidanpää. Dynamic consequences of electromagnetic pull due to deviations in generator shape. Journal of Sound and Vibration, 301:207 – 225, 2007.
- [8] Giancarlo Genta. Dynamics of Rotating Systems (Mechanical Engineering Series). Springer, 2005.
- [9] W.B. Bickford and E.S. Reddy. On the in-plane vibrations of rotating rings. Journal of Sound and Vibration, 101(1):13 – 22, 1985.
- [10] Giancarlo Genta and Mario Silvagni. On centrifugal softening in finite element method rotordynamics. Journal of Applied Mechanics, 81(1):011001–011001–10, August 2013.
- [11] J.L. Lin and W. Soedel. On general in-plane vibrations of rotating thick and thin rings. Journal of Sound and Vibration, 122(3):547 – 570, 1988.
- [12] Norman Dowling. Mechanical behavior of materials : engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. Pearson Education, Boston, Mass. London Harlow, 2013.

MODELLERING AV ELASTISKA GENERATORKOMPONENTER

Inom rotordynamiken beskrivs generatorer som stela kroppar vilket inte alltid är lämpligt. Vattenkraftsgeneratorer har genom sin storlek och de stora lasterna en betydande elasticitet som man måste ta hänsyn till för att undvika vibrationer och haverier.

Här har forskarna utvecklat modeller för att studera dynamik och spänningar i stora generatorer med flytande rotorring. Resultaten visar att utmattning och dynamik kan analyseras för att utveckla säkrare konstruktioner. Arbetet kommer att presenteras i vetenskapliga artiklar och ligga till grund för kommande forskningsprojekt där modellerna utvecklas vidare.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk