

Abstract

In 2011, the company Danfoss PolyPower A/S initiated a large research project (ATF project) on the development of dielectric elastomer (DE) materials, DE transducers, and high-voltage electrical drives for DE transducers involving four companies and three universities. This Ph.D. project has been a part of a work package of that research project. The final goal of the work package is the development of an engineering tool which facilitates the fast simulation of electromechanical systems consisting of several DE transducers.

This thesis concerns the mathematical modelling of dielectric elastomer transducers, among other things, the development and computational implementation of the transducer models which the engineering tool is founded on.

Firstly, an electromechanically coupled visco-hyperelastic continuum model for a DE material is presented. In order to apply it for modelling a DE transducer, which consists of several electrode-coated DE film layers, as a bulk material, the anisotropic metal electrodes on the DE film supplied by Danfoss PolyPower A/S are modelled by an additional anisotropic energy density to the energy density of the isotropic unmetallized DE material.

A visco-hyperelastic material law for the unmetallized version 3 DE material developed during the ATF project is identified based on uniaxial experiments in the tensile regime. The hysteresis observed in stress-stretch curves is modelled by a stretch- and stretch rate-dependent deviatoric viscosity.

Continuum and lumped parameter models of two DE transducers, a tubular DE transducer and a linear DE transducer, are developed. The effective material parameters of the lumped parameter models depend on the DE material, the transducer geometry, and the electromechanical boundary conditions the transducer is subjected to. They are identified by proper finite element (FE) simulations of the continuum models. The lumped parameter models are the core of the desired engineering tool. The static models for the tubular DE transducer are validated against electromechanical experiments. FE simulations show that the effective elastic material parameters and the static electromechanical performance of a tubular DE transducer depend markedly on the anisotropic stiffening, induced by the metal electrodes, and the transducer's geometric dimensions. The static electromechanical performance is degraded when the transducer geometry approaches an ideal hollow cylinder with a wall thickness which is larger than the radius of its inner cross section. It is improved while the transducer geometry approaches the shape of a single DE laminate. The effective viscous material parameters of a tubular DE transducer do not depend much on the anisotropic stiffening and the transducer's geometric dimensions.

Beside the work on the mathematical models for the engineering tool, the electromechanical efficiency of a loaded tubular DE actuator is investigated theoretically. A general mechanical impedance models the external system which the actuator performs work on. The actuator is driven by a sinusoidal supply voltage in order to ensure a cyclic operation. The actuator's electromechanical efficiency attains a maximum close to the mechanical resonance frequency of the whole system or if the actuator's mechanical impedance matches the external system's mechanical impedance.

Moreover, dynamic models for a bubble-like hydrostatically coupled DE actuator are developed. The impact of the DE's and the fluid's material properties, the actuator's geometric dimensions, and the prestretch ratio of the DE membranes on the actuator's resonance frequency and the actuator's viscous behaviour is investigated.

Resumé

Danfoss PolyPower A/S indledte i 2011 et stort forskningsprojekt (ATF projektet) som et samarbejde mellem fire virksomheder og tre universiteter omkring udviklingen af dielektrisk elastomer (DE) materialer, DE transducere samt elektrisk højspændingsstyring af DE transducere. Denne ph.d. opgave har været en del af en af arbejdsopgaverne i det overordnede forskningsprojekt. Arbejdsopgavens endelige mål er udviklingen af et ingeniørværktøj, der skal gøre det muligt hurtigt at simulere elektromekaniske systemer bestående af flere DE transducere.

Ph.d.-afhandlingen omhandler matematisk modellering af DE transducere, herunder udviklingen og den beregningstekniske implementering af transducermodellerne, som ingeniørværktøjet er baseret på.

Først præsenteres en viskøs hyperelastisk kontinuumsmodel til beskrivelse af elektromekanisk koblede DE materialer. For at kunne anvende den til modellering af en DE transducer, der består af adskillige elektrodebelagte DE filmlag, som et bulk materiale, er de anisotrope metalelektroder på DE filmen, der kommer fra Danfoss PolyPower A/S, modelleret med en ekstra anisotrop energitæthed i forhold til energitætheden i det isotrop u-metalliserede DE materiale. En viskøs hyperelastisk materialelov for den u-metalliserede DE materialeversion 3 udviklet under ATF projektet blev bestemt baseret på en-aksede forsøg i et mekanisk stræk setup. Hysteresen, der observeres i spændings-strækningskurver, modelleres af en deviatorisk viskøsitet som afhænger af strækningen og strækningshastigheden.

Der udvikles kontinuums- og stiv legeme parametermodeller af to DE transducere, en rørformet DE transducer og en lineær DE transducer. Parametermodellernes effektive materialeparametre afhænger af DE materialet, transducergeometrien og de elektromekaniske randbetingelser, som transduceren udsættes for. De identificeres ved finite element (FE) simuleringer af kontinuumsmodellerne. Parametermodellerne udgør selve kernen i det ønskede ingeniørværktøj. De statiske modeller til den rørformede DE transducer valideres via elektromekaniske forsøg. FE simuleringer viser, at de effektive elastiske materialeparametre og en rørformet DE transducers statisk elektromekaniske ydeevne tydeligt afhænger af den anisotrope afstivning, der forårsages af metalelektroderne, og transducerens geometriske dimensioner. Den statiske elektromekaniske ydeevne forringes, når transducergeometrien nærmer sig en ideel udhulet cylinder med en vægtykkelse, der er større end radius af dens inder tværsnit. Den forbedres, når transducergeometrien nærmer sig formen af et enkelt DE laminat. Den rørformede DE transducers effektive viskøse materialeparametre afhænger ikke meget af den anisotrope afstivning og transducerens geometriske dimensioner.

Udover arbejdet med de matematiske modeller i forbindelse med ingeniørværktøjet laves der teoretiske beregninger af den elektromekaniske effektivitet af en belastet rørformet DE aktuator. En generel mekanisk impedans modellerer det eksterne system, hvorpå aktuatoren udfører sit arbejde. Aktuatoren styres af en sinusformet forsyningsspænding for at sikre en periodisk proces. Aktuatorens elektromekaniske effektivitet når sit maksimum tæt på det komplette systems mekaniske resonansfrekvens, eller når aktuatorens mekaniske impedans matcher det eksterne systems mekaniske impedans.

Desuden udvikles dynamiske modeller til en bobleformet hydrostatisk koblet DE aktuator. Påvirkningen af elastomerens og væskens materialeegenskaber, aktuatorens geometriske dimensioner og DE membranens for strækning på aktuatorens resonansfrekvens og aktuatorens viskøse adfærd undersøges.