

Diss. ETH No. 19097

Bidirectional Interfacing of Compressed-Air and Electric Power Employing Ultra-High-Speed Drives and Turbomachinery

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
DOCTOR OF SCIENCES

presented by
DANIEL KRÄHENBÜHL
Dipl. El. Ing. ETH Zurich
born 5. August 1982
citizen of Zäziwil, Bern

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Johann W. Kolar, examiner
Prof. Dr. Michael V. Casey, co-examiner

2010

Abstract

In pressure reduction devices, such as valves, conventional throttles or turbo expanders, the ability to obtain work from the pressure drop is usually sacrificed. A mesoscale system for converting pressurized gas flow into electric power is a promising solution for recovering energy from pressure reduction processes and thereby increasing the efficiency of such plants considerably.

Such a device could also supply power to sensors and actuators on industrial robots and thereby reduce the drawbacks in the distribution of electrical energy, like wire attrition through mechanical exposure, loose connection problems and limited mobility.

The trend in compressors for fuel cells, domestic heat pumps, aerospace and automotive heating, ventilation and air conditioning systems, is towards ultra-compact size, low massflow rate, high compression ratio and high efficiency. This can be achieved by using turbocompressors instead of scroll, lobe or screw compressors. Therefore, the reversal of a compressed-air-to-electric-power system (e.g. electric power to compressed gas) is also considered in this thesis.

Several of the above mentioned applications require ultra-compact systems. Power density in both turbomachinery and electrical machines increases with increasing rotational speed. Therefore, to achieve highest power density, these systems operate at rotational speeds between 100 000 rpm and 1 Mrpm at power levels of up to several kilowatts.

The novel system presented in this thesis is a ultra-high-speed, ultra-compact compressed-air-to-electric-power demonstrator that produces an electrical output of 100 W while operating from a compressed air input source with a pressure of 300 kPa to 600 kPa. The demonstrator has to

ABSTRACT

supply a constant dc voltage and must be able to follow load changes; this implies the integration of power electronics, a throttling valve and a DSP based control. Analytical models and simulations for the individual parts (turbine, generator, power electronics, valve and control) have been developed, with the goal of achieving an optimal, i.e. most compact and efficient overall system. This includes the mechanical, thermal, thermodynamic, rotor dynamic and electromagnetic design as well as the control and the coupling of these domains. The results are verified on the basis of two prototype turbine generator systems and power and control electronics.

This research has also resulted in a miniature two-stage electrically driven turbocompressor system with a rotational speed of 500 000 rpm (tested up to 600 000 rpm) for a measured air pressure ratio of 2.25 and a mass flow of 0.5 g/s to 2.5 g/s at ambient conditions for temperature and inlet pressure. The system is the continuation of the development of the one-stage electrically driven turbocompressor and is designed for the cabin air pressurization system of the Solar Impulse airplane.

Kurzfassung

Allgemein geht bei Druckreduzierprozessen, z.B. bei Drosselventilen in Autos, Druckreduzierventilen in Gaspipelines oder Turboexpandern in Kälteanlagen die durch die Druckdifferenz vorhandene potentielle Energie durch Reibungsverluste verloren. Mit kompakten Entspannungsanlagen welche aus der vorhandenen potentiellen Energie elektrische Energie erzeugen, könnte diese zurückgewonnen werden die sonst als Reibungsverlust verpufft, und so die Effizienz solcher Anlagen beträchtlich gesteigert werden. Eine weitere Anwendung ist in der Automatisierungstechnik, wo die Kommunikation zunehmend drahtlos erfolgt, und ein System, das aus sowieso vorhandener Druckluft lokal elektrische Energie erzeugt, die störanfällige Verkabelung ersetzen könnte.

Der Trend bei Kompressoren für Brennstoffzellen, Wärmepumpen, Heizungen, Klimaanlageanlagen oder Lüftungen für z.B. die Luftfahrt oder den Automobilbereich ist hin zu kompakten Abmessungen, geringem Masse-durchfluss bei hohem Kompressionsverhältnis und hoher Effizienz. Dies kann erreicht werden durch die Benützung von Turbokompressoren statt Scroll-, Kolben- oder Schraubenkompressoren. Daher wird in dieser Dissertation auch auf die Umkehrung, eines Systems welches Strom produziert während ein Gas expandiert, also auf die Nutzung elektrischer Leistung zur Komprimierung von Gasen näher eingegangen.

Applikationen im Automobilbereich oder auf Robotern in Fertigungsanlagen brauchen hochkompakte Systeme. Die Leistungsdichte von Turbomaschinen sowie elektrischen Maschinen steigt mit zunehmender Drehzahl, es sind daher möglichst hohe Drehzahlwerte zu wählen. Deshalb sind für Systeme mit höchster Leistungsdichte, in der Leistungsklasse von 100 W bis zu einigen Kilowatt, Drehzahlen an den technologischen Grenzen zwischen 100 000 U/min und 1 000 000 U/min zu wählen.

Der Schwerpunkt dieser Dissertation liegt in der Konzeption und theoretischen und experimentellen Analyse eines 100 W Turbinen-Generator-System welches aus Druckluft (300 kPa bis 600 kPa) unter Hinzunahme einer Leistungselektronik eine elektrische Gleichspannung erzeugt. Die Einzelteile Turbine, Generator, Elektronik, Ventil und Regelung werden mit dem Ziel eines optimalen, d.h. möglichst kompakten und effizienten Gesamtsystems evaluiert und analysiert. Dazu gehören die mechanische, thermische, aerodynamische, rotordynamische, elektromagnetische und regelungstechnische Modellierung und die Koppelung dieser Modelle. Die Resultate werden anhand zweier Prototypen von Turbinen-Generator-Systemen und einer Leistungs- und Steuerelektronik verifiziert.

In dieser Dissertation wird auch ein zweistufiger, elektrisch angetriebener Turboverdichter mit einer Nenndrehzahl von 500 000 U/min (bis zu 600 000 U/min getestet), einem gemessenem Druckverhältnis von 2,25 und einem Massenstrom von 0.5 g/s bis 2.5 g/s bei Umgebungsbedingungen für Temperatur und Eingangsdruck realisiert. Das System ist eine Weiterentwicklung eines einstufigen Turboverdichters und wurde speziell für die Regulierung des Luftdruckes in der Kabine des Solar Impulse Flugzeuges entwickelt.