Diss. ETH No. 15240

Multi-Objective Evolutionary Optimization of Gas Turbine Components

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZÜRICH

for the degree of
DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

presented by

Dirk Büche

Dipl.-Ing. (Universität Stuttgart)
born on March 8th, 1974
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. P. Koumoutsakos, examiner
Prof. Dr. R. Abhari, co-examiner
Dr. P. Jansohn, co-examiner
2003

Berichte aus der Energietechnik

Dirk Büche

Multi-Objective Evolutionary Optimization of Gas Turbine Components

Shaker Verlag
Aachen 2004

Bibliographic information published by Die Deutsche Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data is available in the internet at http://dnb.ddb.de.

Zugl.: Zürich, ETH, Diss., 2003

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2800-4
ISSN 0945-0726

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen
Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9
Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Abstract

The world-wide increasing demand for energy is one of the key challenges of our century. However, this demand is in conflict to the Kyoto protocols of 1997 and 2001 that contain an international agreement for reducing green house gases. Energy generation concepts involving alternative energy sources and innovative technologies with high thermodynamical efficiencies are needed in order to address these issues.
Gas turbines are one of the key energy producing devices of our generation. Improved designs of gas turbine components are necessary in order to address the increasing demands of high performance and reduced emissions. The design of gas turbine components is a complex and time-consuming engineering task that involves meeting of several design objectives and constraints. This task is usually addressed in an iterative process. Advances in domain knowledge and in areas such as information technology offer the possibility of accelerating and improving this design cycle through automated optimization procedures.
This thesis addresses the key issue of automated optimization by presenting optimization algorithms that are implemented in realistic design processes of gas turbine components. The results of this work include algorithmic advances and the development of new and efficient designs for turbine components. The proposed optimization algorithms are analyzed and enhanced so that they are applicable to the design of compressor blades and burners. The thesis addresses a number of optimization difficulties such as multiple design objectives and constraints, high sensitivity of the objectives, and noise in the evaluation of the objectives.
Automated optimization requires a blend of efficient algorithms and information technology tools from in order to find optimal solutions in limited time frames. We find that it is not sufficient to use existing tools but that extensive, problem specific modifications of the algorithms are required. In this thesis, several new algorithms for single and multi-objective Pareto optimization are presented. The focus is on evolutionary algorithms, as they are robust optimization algorithms suitable for engineering applications where pointwise information is only available. In the context of Pareto optimization, several well known evolutionary algorithms are analyzed with regards to their convergence properties and convergence limits.

Furthermore, the efficiency of certain algorithms is enhanced by defining adaptive mutation and recombination operators based on self-organizing maps. The robustness to noisy objective functions is improved by defining a dominance dependent re-evaluation interval. In the field of single objective optimization, a new optimization algorithm is proposed that is suitable for engineering problems with relatively few decision variables but expensive cost function evaluations. The algorithm relies on the construction of an empirical model of the objective function. The model is then used to predict function values in order to reduce the number of function evaluations.

For the compressor optimization, an optimization procedure is defined that addresses the relevant design objectives and constraints. The procedure comprises a new blade parameterization and tools for the aerodynamical and mechanical analysis. For the aerodynamical analysis, an inexpensive method for estimating off-design behavior is presented. Four compressor blades of adjacent mid-stages of a gas turbine are optimized and the resulting profile shapes are discussed.

The gas turbine burner is optimized in an experimental test-rig. The objectives are to minimize thermo-acoustic pulsations and NO_x emissions. Both objectives are noisy as they result from measurements with limited time averaging. The Pareto optimization results in an approximation of the Pareto set, comprising a number of different trade-off solutions for the two conflicting objectives.

The thesis concludes by identifying a number of open questions and outlines directions for future work.

Zusammenfassung

Der weltweit steigende Bedarf an Energie ist eine der zentralen Herausforderungen unseres Jahrhunderts. Die Bereitstellung der Energie ist schwierig angesichts des in den Kyoto Protokollen von 1997 und 2001 unterzeichneten internationales Abkommens zur Reduzierung der Treibhausgase. Deshalb werden zur Energiegewinnung alternative Energiequellen und innovative Kraftwerke mit hohem thermodynamischen Wirkungsgrad benötigt.

Gasturbinen sind eine der zentralen Kraftwerkstechnologien unserer Zeit. Kontinuierlich verbesserte Gasturbinenkomponenten werden benötigt um die steigenden Anforderungen an Wirkungsgrad und Emissionen zu erfüllen. Die Entwicklung von Gasturbinenkomponenten ist eine komplexe und zeitintensive Ingenieursaufgabe, die zahlreiche Zielfunktionen und Zwangsbedingungen enthält. Diese Aufgabe wird in der Regel in einem iterativen Prozess gelöst. Fortschritte im Bereich der Physik von Gasturbinen und in Bereichen wie der Informationstechnologie ermöglichen den Entwicklungsprozess zu beschleunigen und durch automatische Optimierungsverfahren zu verbessern.

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit diesem zentralen Problem der automatischen Optimierung und präsentiert Optimierungsverfahren, die in reale Entwicklungsprozesse von Gasturbinenkomponenten implementiert werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit beinhalten Verbesserungen der Verfahren und die Entwicklung von neuen und effizienten Komponentendesigns. Dabei werden die entwickelten Optimierungsalgorithmen analysiert und verbessert, sodass sie auf die Entwicklung von Kompressorschaufeln und Brenner angewandt werden können. Herausforderungen an die Optimierung sind u.A. die Vielzahl der Zwangsbedingungen und Zielfunktionen, die hohe Senitivität und das Rauschen in den Zielfunktionen.

Automatische Optimierung benötigt eine Auswahl effizienter Algorithmen und Werkzeuge der Informationstechnologie, um optimale Lösungen in vorgeschriebenen Zeitgrenzen zu erhalten. Wir erachten es als unzureichend existierende Optimierungsverfahren zu verwenden, sondern erachten aufwendige und problemspezifische Modifikationen als Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Optimierung. In dieser Arbeit werden mehrere neue Optimierungsalgorithmen für die Ein-

und Mehrkriterienoptimierung vorgestellt. Dabei liegt der Schwerpunkt auf evolutionären Algorithmen, welche sich als robust und effizient in Ingenieursanwendungen erweisen. Im Bereich der Mehrkriterienoptimierung werden Standardalgorithmen bezüglich ihrer Konvergenzeigenschaften und Konvergenzbeschränkungen analysiert. Des weiteren wird die Effizienz dieser Algorithmen durch die Entwicklung adaptiver Mutations- und Rekombinationsoperatoren auf Basis von selbstorganisierenden Netzwerken verbessert. Die Robustheit der Algorithmen gegenüber verrauschten Zielgrössen wird durch die Definition von dominanzabhängigen Reevaluationsintervallen verbessert. Im Bereich der Einkriterienoptimierung wird ein neuer Optimierungsalgorithmus vorgeschlagen, welcher empirische Modelle der Zielfunktion konstruiert. Dieser Algorithmus eignet sich insbesondere für Optimierungsprobleme mit einer geringen Zahl freier Variablen bei gleichzeitig teuren Funktionsauswertungen. Das Modell wird zur Vorhersage von Funktionswerten verwendet, um die Zahl der Auswertungen zu reduzieren.

Für die Kompressoroptimierung wird eine Prozedur definiert, welche alle relevanten Zielfunktionen und Zwangskriterien eines realistischen Entwurfsprozesses beachtet. Die Prozedur beinhaltet eine neue Schaufelparametrisierung und Berechnungsprogramme für die Aerodynamik und die Mechanik der Schaufel. Für die Bewertung der Aerodynamik ausserhalb des Betriebspunktes wird eine kostengünstige Methode entwickelt. Insgesamt werden vier Kompressorschaufeln aus benachbarten Reihen des mittleren Kompressorbereichs optimiert und die Ergebnisse diskutiert.

Der Gasturbinenbrenner wird in einem experimentellen Aufbau optimiert. Ziel der Optierung ist die Minimierung der thermoakustischen Pulsationen und der NO_x Emissionen. Beide Zielfunktionen werden durch zeitlich gemittelten Messungen erfasst, welche verrauscht sind. Die Pareto-Optimierung findet eine Approximation der Pareto-Front, welche aus Kompromisslösungen für die beiden widersprüchlichen Zielgrössen besteht.

Diese Dissertation schliesst mit einer Identifikation offener Fragen für zukünftige Forschungsarbeiten.

Acknowledgments

This thesis results from 3 1/4 interesting years as a PhD student at the Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) in Zürich, Switzerland. My PhD project was part of a cooperation with the Alstom Power Technology Center (APT) in Dättwil, Switzerland and showed me both the academic and the industrial view on research. In principle, these two views are conflicting and need to be balanced. However, both sides gave me the necessary freedom to do efficient research and I benefited by finding on both sides open people that were interested in my project and supported me greatly. While ETH gave me inspiration on optimization algorithms, APT provided applications to optimize. The following acknowledgment is far from being complete and hopefully nobody feels offended by not being mentioned or since only some aspects are acknowledged.

First of all, I wish to thank my supervisor Prof. Petros Koumoutsakos for giving me the opportunity of doing a PhD, for his support, and for teaching me how to work efficiently. Gratitude goes also to my two co-referents Prof. Abhari from ETH and Dr. Peter Jansohn from the APT for agreeing to do this important task. Furthermore, I wish to thank Dr. Peter Jansohn for the constructive and open work atmosphere in his department. Special thanks to my supervisors from APT, Dr. Rolf Dornberger, Dr. Peter Stoll, and Dr. Gianfranco Guidati who subsequently took over this position. Dr. Rolf Dornberger motivated me to do a dissertation and set up the contact to Prof. Koumoutsakos. Dr. Peter Stoll introduced me to programming clean and object-oriented Java code. Dr. Gianfranco Guidati developed the compressor blade parameterization and promoted optimization within APT.

I would like to thank also all people within APT that promoted me. Especially the executive Dr. Tony Kaiser, who gave me the feeling of being part of APT and not an external employee. Dieter Winkler and Camille Pedretti for inspiring discussions. Dr. Bruno Schuermans for the realization of the burner optimization. Dr. Christian Oliver Paschereit for several useful discussions, as well as providing the burner test-rig.

Gratitude goes to all my colleges from the Institute of Computational Science at ETH. Especially to Dr. Sibylle Müller for discussions, cooperations, and proof-readings of my papers and thesis, Dr. Michele Milano for introducing me to self-organizing networks, Dr. Nicol Schraudolph for teaching me machine learning and discussing Gaussian processes, Dr. Jens Walther for providing technical administration and solving many hard- and software problems that I encountered, Dr. Nikolaus Hansen for fundamental and theoretical discussions about optimization and proof-reading my thesis, and Stefan Kern for proof-reading.

Financial support is acknowledged from ETH, from the Swiss Commission for Technology and Innovation (CTI), Project 4817.1, and from APT.

I would like to thank my parents for greatly supporting all projects and ideas that I had and my brother Marcus for great understanding and help. Finally I thank my wife Stefanie and my daughter Alida. My wife, for supporting me and understanding all positive and negative aspects of doing a PhD. My daughter, for reminding me of the funny way of life and that many things are really not so important as they might appear.

Contents