Diss. ETH 14416

Investigating BWR Stability with a New Linear Frequency-Domain Method and Detailed 3D Neutronics

A Dissertation Submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY
ZURICH

for the Degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by

PHILIPP HÄNGGI

Dipl. Phys. ETH
born December 19, 1968
Citizen of Rickenbach (SO), Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. G. Yadigaroglu, examiner
Prof. Dr. J. Blomstrand, co-examiner
PD Dr. J. Halin, co-examiner

2001

Abstract

Using frequency-domain methods, sparse matrix techniques and advanced numerical algorithms a new computer program MATSTAB has been developed to predict the core stability characteristics of a boiling water nuclear reactor. The code uses the same thermal-hydraulic model as the transient code RAMONA-3B and the same neutronic model as the online steady-state core simulator POLCA. This includes three-dimensional neutronics and an individual representation of each fuel assembly (no lumping).

The very large set of equations is linearized and leads to a generalized eigenvalue problem which is solved iteratively using a combination of Newton's method and sub-space decomposition. The tailor-made algorithm calculates the first few dominating eigenvalues (decay ratios) and their left and right eigenvectors. MATSTAB not only predicts global, but also regional oscillations. A comparison between the decay ratios of the two oscillation types allows to judge which mode will occur.

Using MATSTAB and the interface to the online steady-state core simulator POLCA, it is possible to predict the stability of the reactor core in its present state. A calculation with full spatial resolution (all fuel assemblies, 25 axial nodes) is performed within a few minutes on a standard personal computer.

The eigenvalues and eigenvectors may not only be used to calculate the decay ratio and oscillation frequency, but also to analyze the stability behavior of the coupled neutronic/thermal-hydraulic system. A new method is introduced which allows to calculate and display the contribution to (in)stability of any part of the reactor model (fuel assembly, neutronics, thermal-hydraulics, riser, pumps, etc.). It is also possible to display the contribution to (in)stability of any physical quantity (power-density distribution, void, pumps etc.). This allows to enter a new territory and possibly to gain new insights into the mechanisms behind instabilities. This new method is not yet explored in depth, but some simple judgments were already used to optimize the core design and control rod sequence with respect to stability during start up procedures in Forsmark.

The results of the code have been successfully validated against numerous stability measurements from the Forsmark, Oskarshamn (both in Sweden) and Leibstadt (Switzerland) plants. The predictions show good agreement with the measured data for all global oscillations in all the plants. The regional oscillations in Cycle seven of Leibstadt were clearly predicted by MATSTAB, but the specific values for the decay ratios were underestimated in a systematic way.

Zusammenfassung

Um die Kernstabilität eines Siedewasserreaktors vorherzusagen, wurde unter Einbezug von Frequenz-Raum-Methoden, schwach besetzten Matrizen und fortgeschrittenen numerischen Algorithmen das Computer Programm MATSTAB entwickelt. Das Programm benutzt die gleichen thermodynamischen Modelle wie das Transienten-Programm RAMONA-3B und das gleiche Neutronik-Modell wie der Online-Kernsimulator POLCA. Dies beinhaltet eine dreidimensionale Neutronik und eine explizite Modellierung jedes Brennelementes (keine Gruppenbildung).

Das sehr grosse Gleichungssystem wird linearisiert und führt zu einem verallgemeinerten Eigenwertproblem, das unter Verwendung der Newton-Methode und der Zerlegung in Unterräume iterative gelöst wird. Der eigens entwickelte Algorithmus berechnet die dominierenden Eigenwerte und deren zugeordnete linke und rechte Eigenvektoren. Dadurch ist MATSTAB in der Lage, nicht nur die globalen, sondern auch die regionalen Schwingungen vorherzusagen. Ein Vergleich der Dämpfungskonstanten (DR) der beiden Schwingungstypen erlaubt es zudem abzuschätzen welcher Schwingungstyp auftreten wird.

Verwendet man das in MATSTAB eingebaute Interface zum Online-Kernsimulator POLCA, kann man die aktuelle Kernstabilität berechnen. Ein Rechenlauf mit voller räumlicher Auflösung (alle Brennelemente, 25 axiale Knoten) dauert auf einem Standard Personal-Computer nur wenige Minuten.

Die Eigenwerte und Eigenvektoren dienen nicht nur zur Berechnung der Dämpfungskonstanten und der Frequenz der Schwingungen, sondern können auch zur Analyse des Stabilitätsverhaltens des gekoppelten Schwingungssystems (Thermohydraulik/Neutronik) herangezogen werden. Eine neue Methode wird eingeführt, die es erlaubt, den Beitrag von jedem Modellteil (Brennelement, Neutronik, Thermohydraulik, Pumpen usw.) zur (In)stabilität abzuschätzen und grafisch darzustellen. Es ist zusätzlich möglich, den Beitrag einzelner physikalischer Grössen (Leistungsdichte, Dampfblasen Anteil, Brennstofftemperatur usw.) zur (In)stabilität zu berechnen. Dadurch wird ein neues Forschungsfeld erschlossen, das möglicherweise zu neuen Erkenntnissen über den Mechanismus hinter den Instabilitäten führt. Die neuen Methoden sind derzeit noch nicht in voller Tiefe umgesetzt, aber erste einfache Ansätze wurden angewandt. Die Resultate sind in Forsmark eingesetzt worden, um die Kernbeladung und die Kontrollstab-Sequenz während des Anfahrens zu optimieren.

Die Resultate von MATSTAB wurden erfolgreich anhand zahlreicher Messungen in Forsmark, Oskarsham (beide Schweden) und Leibstadt (Schweiz) überprüft. Die Vorhersagen zeigten in allen Kernkraftwerken gute Übereinstimmung, mit den gemessenen Daten für globale Schwingungen. Die regionalen Schwingungen, die im siebten Zyklus in Leibstadt aufgetreten sind, wurden qualitativ zwar eindeutig vorhergesagt, quantitativ jedoch auf systematische Art und Weise unterschätzt.

Contents

List of Tables