

Optimization of Power Flow Computation Methods

Von der Fakultät
Informatik, Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Christoph Kattmann
aus Hannover

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen

Mitberichter: Univ.-Prof. DDipl.-Ing.
Dr. Robert Schürhuber

Tag der mündlichen Prüfung: 19.07.2022

Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik
der Universität Stuttgart

2022

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie, detaillierte bibliografische Daten sind im
Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Universität Stuttgart
Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik, Band 39
D 93 (Dissertation der Universität Stuttgart)

Optimization of Power Flow Computation Methods

© 2022 Kattmann, Christoph

Herstellung und Verlag: BoD – Books on Demand, Norderstedt

ISBN: 978-3-75-629545-6

Abstract

Power flow computations are a cornerstone of many simulations regarding the electric grid. With the recent developments in distributed generation and the continuing electrification of mobility and residential heating, a targeted grid operation and expansion is more important than ever to ensure reliability and sustainability. At the same time, these developments change the preconditions of electric grid simulations and often necessitate large-scale simulations with millions of individual scenarios. This thesis evaluates the landscape of power flow computation methods with a focus on practical computational performance in large-scale simulations, as they occur in modern distribution grid planning. For this purpose, a number of power flow methods are investigated. In order to enable a wider range of applications, a selection of complicating grid elements and factors like multiple slack nodes, transformers, and asymmetric conditions are investigated for their effect on complexity and performance.

The main finding of this thesis is that the Z_{BUS} Jacobi method, an often-neglected power flow algorithm, can be magnitudes faster than the other methods, especially the established Y_{BUS} Newton-Raphson method. An important factor in the computational performance of all power flow methods is an implementation guided by the requirements of modern CPUs, which requires a mathematical formulation that leverages CPU features like caching, instruction pipelining and branch prediction.

In addition to the solution methods, the thesis presents a series of acceleration methods like static acceleration factors, grid reduction and parallelization, which can be applied to power flow problems for a further performance boost.

Finally, the thesis presents three real-world example problems and investigates the most performant solution method as well as the effect of the various acceleration strategies.

Kurzfassung

Lastflussberechnungen sind der zentrale Baustein vieler Simulationen, die das elektrische Netz betreffen. Entwicklungen im Rahmen der Energiewende wie dezentrale Erzeugungsanlagen, elektrische Mobilität und elektrische Wärmepumpen erfordern einen gezielten Netzbetrieb und -ausbau, um die Zuverlässigkeit und Nachhaltigkeit der Energieversorgung sicherzustellen. Gleichzeitig ändern diese Entwicklungen die Anforderungen an Netzsimulationen und machen teilweise umfangreiche Simulationen mit Millionen von einzelnen Berechnungsfällen notwendig. Die vorliegende Arbeit untersucht gängige Lastflussmethoden mit einem besonderen Fokus auf die Berechnungsgeschwindigkeit bei umfangreichen Simulationen, wie sie in der modernen Verteilnetzplanung vorkommen. Dazu werden eine Anzahl von Lastflussmethoden vorgestellt. Um eine breite Anwendbarkeit sicherzustellen, werden weiterhin eine Reihe von komplexeren Netzelementen und -umständen wie mehrere Slack-Knoten, Transformatoren und asymmetrische Bedingungen untersucht und ihr Einfluss auf die Komplexität der Modelle und die Berechnungsgeschwindigkeit analysiert.

Die Schlüsselerkenntnis der Arbeit ist die Effektivität der Z_{BUS} -Jacobi-Methode, einer oft vernachlässigten Lastflussmethode, die aber um Größenordnungen schneller als andere Methoden sein kann, insbesondere der Y_{BUS} -Newton-Raphson-Methode. Ein wichtiger Einfluss auf die praktische Performance ist die Implementierung gemäß den Anforderungen moderner Prozessoren unter Berücksichtigung von Caches, Instruction Pipelining und Branch Prediction.

Zusätzlich zu den Lastflussmethoden präsentiert diese Arbeit mehrere Beschleunigungsmethoden wie statische Beschleunigungsfaktoren, Netzreduktion und Parallelisierung, die die Lösung praktischer Probleme weiter beschleunigen können.

Abschließend untersucht die Arbeit drei reale Netzsimulations-Probleme im Hinblick auf die performanteste Lösungsmethoden und den Effekt der vorgestellten Beschleunigungsstrategien.

Contents

Abstract	iii
Kurzfassung	v
Table of Abbreviations	xi
Nomenclature	xiii
1 Introduction	1
1.1 Motivation	1
1.2 History and State of the Art	3
1.3 Contributions of the Thesis	10
1.4 Structure of the Thesis	12
2 Computational Performance	15
2.1 A Performance Comparison Comparison	15
2.2 Modern CPU Architecture	17
2.3 Guidelines for the Design of Performant Numerical Algorithms	22
2.4 Benchmarking Methodology	24
3 Principles of Power Flow Computations	27
3.1 The Power Flow Model	27
3.2 The Y_{BUS} Formulation of the Power Flow Model	33
3.3 Handling of Slack Nodes	37
3.4 Convergence Criteria	40
4 Power Flow Solution Methods	43
4.1 Y_{BUS} Fixed-Point Methods	44
4.1.1 Principle	44
4.1.2 The Y_{BUS} Jacobi Method	47
4.1.3 The Y_{BUS} Gauss-Seidel Method	50
4.1.4 The Y_{BUS} Relaxation Method	52

4.2	The Y_{BUS} Newton-Raphson Method	55
4.3	The Z_{BUS} Jacobi Method	63
4.4	Backward/Forward Sweep Method	67
4.5	Performance Characteristics	71
4.6	Power Flow Complications	78
4.6.1	Load Characteristics	78
4.6.2	Multiple Slack Nodes	80
4.6.3	PV Nodes	84
4.6.4	Shunt Elements	86
4.6.5	Asymmetry	88
4.6.6	Multiple Voltage Levels	91
4.6.7	Transformers	92
4.7	Handling of Convergence Problems	94
5	Computational Optimization Approaches	99
5.1	Acceleration Factors	100
5.1.1	Acceleration of the Y_{BUS} Gauss-Seidel method	100
5.1.2	Acceleration of the Y_{BUS} Newton-Raphson method	102
5.2	Exploiting Sparsity	104
5.2.1	Sparse Z_{BUS} Jacobi Method	106
5.2.2	Sparse Y_{BUS} Newton-Raphson Method	107
5.3	Grid Reduction Methods	108
5.3.1	Lossless Grid Reduction Methods	108
5.3.2	Lossy Grid Reduction Methods	110
5.4	Weak Load Detection	112
5.4.1	Separate Weak Load Detection	113
5.4.2	Modified Convergence Criterion	116
5.5	Parallelization	118
6	Power Flow Case Studies	123
6.1	Time-Series Power Flow Computations in the European LV Feeder	123
6.2	Monte Carlo Simulation of EV Penetration in a Low- Voltage Grid	131
6.3	n-2 Contingency Analysis in a High Voltage Grid	138
7	Summary	143
	Bibliography	146

A	Operation Counts of BLAS, LAPACK, and MKL routines	163
B	Benchmarks of BLAS and LAPACK Operations	165
C	Grid Data	167
C.1	Low-voltage grid from section 4.5	167
C.2	Medium voltage test grid from section 5.1.2	169
C.3	European Low Voltage Test Feeder	170
C.4	Low voltage grid from section 6.2	171
C.5	High voltage grid from section 6.3	175