



Doctoral Thesis

## Optimization Methods to Manage Uncertainty and Risk in Power Systems Operation

**Author(s):**

Roald, Line A.

**Publication Date:**

2016

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010811397> →

**Rights / License:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 23918

# Optimization Methods to Manage Uncertainty and Risk in Power Systems Operation

A thesis submitted to attain the degree of

DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

LINE ALNÆS ROALD

MSc ETH ME

born on 6 April 1987

citizen of

Norway

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Göran Andersson, examiner

Prof. Dr. Louis Wehenkel, co-examiner

Prof. Dr. Gabriela Hug, co-examiner

2016

# Abstract

Electricity from renewable energy sources is essential for a sustainable energy future. One inherent property of renewable generation is however that it is partially unpredictable, with uncertainty arising from forecast errors and real-time fluctuations. As the share of renewable generation grows, this uncertainty challenges existing practices for electric grid operation.

In the past, the operation of the electric grid was deemed secure if the system could withstand any credible contingency, typically defined as the failure of any single component. With increasing levels of forecast uncertainty, the system experiences larger deviations from the planned operating point. It therefore becomes more important to account for possible adverse impacts of those deviations to ensure that the system will remain secure in real time operation. This thesis is concerned with the development of optimal power flow methods that help system operators manage uncertainty and mitigate risk in day-to-day operational planning.

In the first part of the thesis, we focus on chance-constrained optimal power flow, which limits the probability of constraint violation. We propose to formulate the problem using separate chance constraints, which are reformulated using an analytical reformulation based on either full or partial knowledge about the uncertainty distribution. The approach allow us to model policy-based control actions in reaction to uncertainty realizations, which contribute to managing and mitigating possible adverse impacts. The method is applied to selected cases in power system operations, including investigations of different reserve activation policies and corrective control by HVDC connections and phase shifting transformers. These studies show that a more flexible system decreases

the cost of handling uncertainty. We also develop and demonstrate a solution algorithm that allow us to solve the problem for large systems.

While the above mentioned applications are based on the linear DC power flow equation, we also suggest an extension based on the non-linear AC power flow equations. We model the system using the full AC equations for the nominal operating point, but apply a linearization around this point to represent the impact of uncertainty. Due to the linear dependence on the uncertain variables, we can apply the analytical chance constraint reformulation, which allows for a tractable optimization problem. We further suggest different solution approaches, including an iterative approach which leverages scalability of existing solvers to tackle large problems, and compare the suggested analytical reformulation method with two sample-based methods. We find that the proposed method provides a good performance at low computational cost.

In the second part of the thesis, we focus on risk-based optimal power flow, where risk functions are used to model how the size of constraint violations influence risk. First, we suggest a method to define risk functions for post-contingency overloads based on system properties such as cost and availability of remedial actions, and provide a comparison with the N-1 criterion to argue for the choice of risk limits. We further combine the proposed risk functions with a chance constrained optimal power flow to limit the probability of high risk events.

Second, we introduce the weighted chance constraints, which measure and limit the expected risk of constraint violations, as defined by the probability distribution of the forecast errors and the chosen risk function. It is shown that the weighted chance constraint remains convex for convex risk functions and general control policies. We investigate how the choice of a risk function influences the number and size of constraint violations, and apply the method to a situation where tertiary control is activated during large wind deviations. Further, we investigate the optimal use of active power control from wind turbines, including reserve provision and enforcement of output caps.

# Kurzfassung

Elektrizität aus erneuerbaren Energieträgern ist essentiell für eine nachhaltige Zukunft. Die produzierte Leistung aus erneuerbaren Energiequellen hängt allerdings stark von den momentan herrschenden Wetterverhältnissen, wie zum Beispiel der vorhandenen Sonneneinstrahlung und Windstärke, ab. Da diese aufgrund von kurzfristigen Schwankungen und Prognosefehlern nicht perfekt vorhergesagt werden können, ist die Elektrizitätsproduktion aus erneuerbaren Energien mit Unsicherheiten behaftet. Mit dem steigenden Anteil erneuerbarer Elektrizitätsproduktion, wird die Unsicherheit zur Herausforderung für den Betrieb des elektrischen Energiesystems.

Traditionell wurde der Netzbetrieb als N-1 sicher eingestuft, wenn das System jede wahrscheinlich auftretende Störung, typischerweise definiert als der Ausfall einer einzelnen Komponente, überstehen konnte. Da der zukünftige Systemzustand zunehmend durch Unsicherheiten beeinflusst wird, wird es wichtiger, dass nicht nur Komponentenausfälle, sondern auch mögliche Entwicklungen in der Einspeisung aus erneuerbaren Energien in der Betriebsplanung mitberücksichtigt werden, um einen sicheren Netzbetrieb zu garantieren. Diese Dissertation befasst sich mit der Entwicklung stochastischer Optimierungsmethoden für Lastflussberechnungen. Die Methoden erlauben es dem Netzbetreiber, die im Netz vorhandene Unsicherheit zu erkennen und das damit verbundene Risiko zu minimieren.

Im ersten Teil der Dissertation liegt der Fokus auf dem Thema optimaler Lastfluss mit probabilistischen Nebenbedingungen, mit dem Ziel die Wahrscheinlichkeit von Überlastsituationen im Netz zu limitieren. Um ein lösbares Optimierungsproblem zu erhalten, werden die probabilistischen Nebenbedingungen analytisch in deterministische Nebenbedin-

gungen überführt. Diese analytische Umformulierung kann für Wahrscheinlichkeitsverteilungen angewandt werden, deren Parameter bekannt oder teilweise bekannt sind. Um die Unsicherheit flexibler handhaben zu können und den Einfluss von eventuellen negativen Entwicklungen zu minimieren, werden korrektive Betriebsmassnahmen als Funktion der realisierten Unsicherheiten modelliert. In unterschiedlichen Fallstudien werden verschiedene Massnahmen betrachtet, wie die Aktivierung von Reserven oder Änderungen im Betriebspunkt von Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen bzw. Phasenschiebertransformatoren. Die Studien zeigen, dass die zusätzliche Flexibilität durch korrektive Massnahmen die Kosten des Systembetriebs unter Unsicherheit verringern. Über dieses Modell hinaus wird auch ein Algorithmus formuliert, der stochastische Optimierung auf grosse Systeme anwendbar macht.

Die oben genannte Formulierung beruht auf einer linearen Approximation des Lastflusses (sogenannter DC-Lastfluss). Um eine genauere Beschreibung des Systems zu ermöglichen, wird eine Erweiterung auf die nicht-linearen Gleichungen für einen "vollen" AC-Lastfluss vorgeschlagen. Bei dieser Methode wird der vorhergesagte Systemzustand durch die kompletten AC Gleichungen modelliert, wobei der Einfluss der Unsicherheit durch eine Linearisierung um den prognostizierten Betriebspunkt analysiert wird. Die resultierenden Gleichungen hängen linear von den unsicheren Variablen ab, was es erlaubt, die oben genannte analytische Umformulierung für die probabilistischen Nebenbedingungen zu benutzen. Unterschiedliche Lösungsalgorithmen werden vorgeschlagen und diskutiert, u. a. eine iterative Methode, die in schon vorhandene Algorithmen für optimalen AC-Lastfluss integriert werden kann. Die Eigenschaften der analytischen Umformulierung werden weiter mit zwei szenariobasierten Umformulierungsmethoden verglichen. Die Resultate zeigen, dass die vorgeschlagene analytische Methode gute Resultate mit wenig Rechenaufwand erreicht.

Der zweite Teil der Dissertation befasst sich mit risiko-basierten Methoden für den optimalen Lastfluss. Das Risiko von Überlasten wird durch Risiko-Funktionen modelliert, die nicht nur die Häufigkeit, sondern auch die Grösse einer Überlast berücksichtigen. Wir fokussieren zuerst auf das Risikolevel des Systems nach einem Ausfall, und definieren die Parameter der Risiko-Funktion in Bezug auf die Kosten einer Lastflussreduktion, unter Berücksichtigung der möglichen korrektiven Massnahmen. Ein Vergleich mit dem traditionellen N-1 Kriterium wird genutzt um angemessene Risiko-Grenzen zu setzen. Wir formu-

lieren einen optimalen Lastfluss mit risikobasierten Nebenbedingungen für den Systemzustand nach jedem Ausfall, und integrieren diese Formulierung mit einer stochastischen Nebenbedingung, die Unsicherheiten in den Einspeisungen berücksichtigt und die Wahrscheinlichkeit für gefährliche Systemzustände begrenzt.

In einer weiteren risikobasierten Formulierung führen wir gewichtete Wahrscheinlichkeitsbedingungen ein, die das erwartete Risiko von Überlasten messen und limitieren. Das erwartete Risiko wird durch die Wahrscheinlichkeitsverteilung der unsicheren Variablen und der gewählten Risiko-Funktion evaluiert. Es wird gezeigt, dass die gewichteten Wahrscheinlichkeitsbedingungen konvex sind für konvexe Risikofunktionen und allgemeine korrektive Betriebsmassnahmen. Wir untersuchen wie die Wahl einer Risikofunktion die Häufigkeit und die Grösse von Überlasten beeinflusst, und betrachten eine Situation in der Tertiärreserven bei grossen Abweichungen vom geplanten Betriebspunkt aktiviert werden. Wir untersuchen darüber hinaus wie Kontrollmechanismen von Windturbinen optimal eingesetzt werden können, insbesondere in Bezug auf Reserven und Einspeisegrenzen.