



Bilder: Swissgrid

Innovative Ansätze für koordinierte Netzsicher- heitsrechnungen

Opteso – eine Lösung für
Übertragungs- und Verteilnetze

Das Schweizer Stromsystem steht im grössten Wandel seiner Geschichte. Dekarbonisierung, Dezentralisierung und Digitalisierung verändern alles: Fossile Energieträger gehen zurück, erneuerbare Energien übernehmen, Wärmepumpen und Elektromobilität treiben den Strombedarf in die Höhe. Gleichzeitig wird Strom zunehmend dezentral produziert, etwa durch Solar- und Windanlagen, während digitale Technologien für mehr Automatisierung und Effizienz, aber auch für mehr Nachfrage (Datenzentren), sorgen. Die Komplexität des Netzbetriebs hat deshalb in den letzten Jahren erheblich zugenommen.

Systeme, die ursprünglich für die Verteilung von Energie aus zentralen Kraftwerken zu den Verbrauchern ausgelegt wurden, erleben nun zeit- und wetterabhängige Richtungswechsel der Lastflüsse. Manchmal wird sogar Strom aus dem Niederspannungsnetz in das Übertragungsnetz zurückgespeist. Um die Netzstabilität sicherzustellen, sind zunehmend mehr Gegenmassnahmen erforderlich, wie das Öffnen oder Schliessen von Sammelschienenkupplungen, um die Lastflüsse gezielt zu steuern. Immer öfter müssen diese Massnahmen in Abstimmung mit den Verteilnetzbetreibern (VNB) erfolgen.

Ein vermaschtes Netz mit mehreren Betreibern

Jeder VNB auf Netzebene 3 ist über mehrere Transformatoren mit Swissgrid verbunden. Dadurch bilden die Netzebenen 1 und 3 ein grosses, vermaschtes Netz. Ohne Koordination können Massnahmen von Swissgrid – wie das Öffnen einer Sammelschienenkupplung oder das Stufen eines Transformators – dazu führen, dass Lastflüsse ins Verteilnetz verlagert werden und dort zu Engpässen führen, oder umgekehrt. Daher müssen Massnahmen, die Nachbarsysteme beeinflussen könnten, vorgängig koordiniert werden.

Während die Aufgabe, Massnahmen zur Behebung von Engpässen und Spannungsproblemen zu finden, zunehmend durch Optimierungstools

IN KÜRZE



unterstützt wird, bleibt die Koordination weiterhin ein zeitaufwendiger, nicht automatisierter Prozess – sofern sie überhaupt stattfindet. In der Schweiz wird das Verteilnetz von über 600 VNB betrieben, die jeweils mit eigenen Tools und Daten arbeiten. Daher ist eine robuste, dezentralisierte und skalierbare Lösung erforderlich.

Opteso (OPTimality with limited data Exchange between System Operators, Optimalität mit begrenztem Datenaustausch zwischen Netzbetreibern) wurde zu diesem Zweck von Swissgrid gemeinsam mit zwei Schweizer VNB auf Netzebene 3 entwickelt, die oft an koordinierten Entlastungsmassnahmen mit Swissgrid beteiligt sind. Um die Anforderungen an die praktische Implementierung von Opteso zu bewerten, wurden Umfragen mit Vertretern Schweizer VNB auf Netzebene 3 durchgeführt. Die VNB-Vertreter bestätigten die Bedeutung dieser Herausforderung und sind an einer dezentralen, koordinierten Optimierung von Entlastungsmassnahmen interessiert.

Lokale Berechnungen – Optimierung des gesamten Systems

Swissgrid und die VNB setzen für betriebliche Entscheidungen zunehmend auf Modelle und Optimierung [1]. Diese unterstützenden Systeme reflektieren die spezifischen Tätigkeiten des jeweiligen Betreibers und unterscheiden sich stark voneinander. Die Schnittstellen zu anderen Systembetreibern werden in der Regel als statische Lasten (Verteilnetz-Äquivalent im Übertragungsnetzmodell) oder als Generatoren (Übertragungsnetz-Äquivalent im Verteilnetzmodell) modelliert.

Opteso ist ein Koordinationsmechanismus, der sicherstellt, dass die von Entscheidungsunterstützungssystemen vorgeschlagenen Massnahmen mit den angeschlossenen Verteilnetzbetreibern über deren eigene Unterstützungssysteme abgestimmt werden (Bild 1). Das globale Optimum für das Gesamtsystem wird mit begrenztem Datenaustausch zwischen den Netzbetreibern gefunden, denn es müssen nur Daten ausgetauscht werden, die die gemeinsamen Systemgrenzen betreffen. Dadurch kann jeder Netzbetreiber seine eigenen Unterstützungstools und Netzmodelle verwenden, wobei nur eine zusätzli-

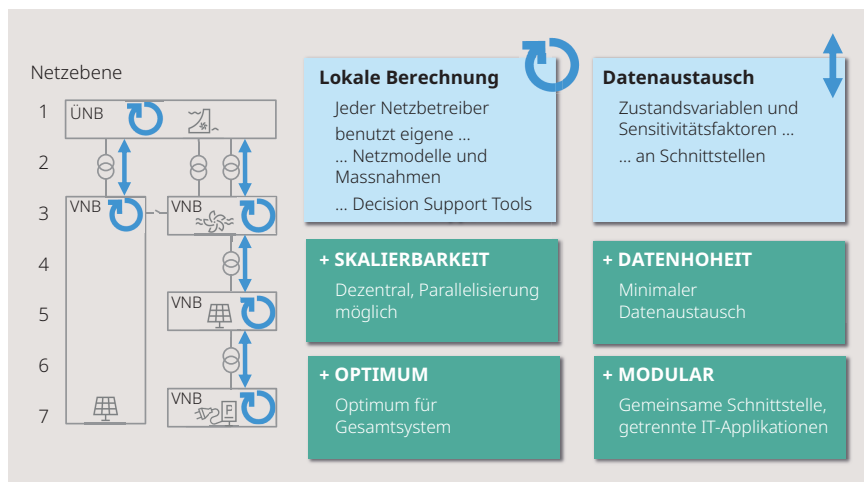


Bild 1 Opteso auf einen Blick.

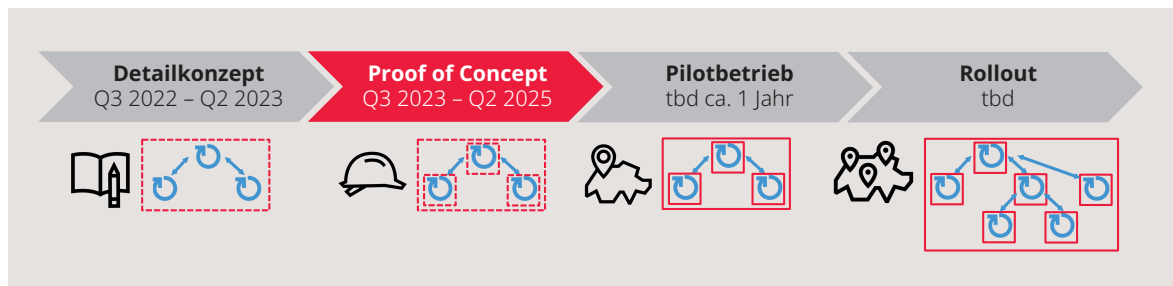


Bild 2 Roadmap des Opteso-Projekts.

che Schnittstelle zum Austausch von Grenzvariablen mit einem zentralen Nachrichtenkoordinator nötig ist. Dazu müssen weder die Netzmodelle zusammgeführt noch die Berechnungen zentralisiert werden.

Vom akademischen Ansatz zu echten Netzen

Opteso basiert auf der Alternating Direction Method of Multipliers (ADMM) [2], einer in der wissenschaftlichen Literatur etablierten Methode, und wendet diese auf die Berechnung des optimalen Lastflusses in realen Netzen an. Dabei wird das Entscheidungsunterstützungssystem jedes Netzbetreibers um einen Term erweitert, der die Abweichung der Lösung an den Netzanschlussstellen zu den von den Nachbarn gefundenen Werten minimiert. Gleichzeitig werden mittels der sogenannten «Multiplikatoren» die Kosten für das Gesamtsystem angenähert, die entstehen würden, falls das Nachbarsystem seine Lösung an die neu berechneten Werte anpasst. Die ADMM wiederholt die folgenden drei Schritte so lange, bis die Differenzen an den Netzgrenzen unterhalb einer bestimmten Toleranz liegen oder eine gegebene Anzahl Iterationen erreicht ist:

- Zuerst wird die Lösung für das Übertragungsnetzmodell berechnet. Dann werden die Werte an den gemeinsamen Netzgrenzen in die Koordinationsterme der Modelle der Verteilnetzbetreiber auf Netzebene 3 eingetragen.
- Anschliessend werden die Lösungen der Modelle der Verteilnetzbetreiber berechnet und in die Koordinationsterme des Übertragungsnetzmodells übernommen.
- Zum Schluss werden die Multiplikatoren aktualisiert und sowohl in das Übertragungsnetzmodell als auch in die Verteilnetzmodelle eingetragen.

Wenn die Differenzen an der Netzgrenze nach dem Erreichen der maximalen Anzahl Iterationen noch zu gross sind, kann eine kompatible Lösung mit dem folgenden Verfahren gefunden werden:

- In der Iteration für das Übertragungsnetz werden die Werte für Wirk- und Blindleistungsflüsse an den Netzanschlussstellen zu den Verteilnetzen auf die entsprechenden Werte des Verteilnetzmodells gesetzt. Die Verteilnetze werden somit wie feste Lasten behandelt.

- In der Verteilnetz-Iteration werden die Werte für Spannung und Phasenwinkel an den Grenzen zum Übertragungsnetz auf die entsprechenden Werte des Übertragungsnetzmodells gesetzt.

Dieser Recovery-Modus ist von der Methode der Optimal Condition Decomposition (OCD, [3]) inspiriert, garantiert jedoch im Gegensatz zur ursprünglichen OCD keine Optimalität.

Proof of Concept

Opteso wurde mit statischen Daten von Swissgrid und zwei Schweizer VNB getestet, die auf Netzebene 3 zu den grössten des Landes gehören und zusammen etwa 8 % der Spitzenlast der Schweiz abdecken. Der Remedial Action Optimizer (RAO) von Swissgrid wurde für die lokale Optimierung jedes Teilnetzes verwendet. Dabei handelt es sich um ein Optimierungsmodell, das auf einer sequenziellen Linearisierung der Lastflussgleichungen basiert [4]. Ein Prototyp basierend auf ADMM wurde ebenfalls in Python entwickelt, um die Entlastungsmassnahmen der drei Netzbetreiber zu koordinieren.

Auf Basis der Netzmodelle von Swissgrid und den beiden VNB wurden synthetische Szenarien erstellt. Zusammen umfassen die drei Netzmodelle 1164 Knoten und 1318 Leitungen und Transformatoren. Sieben Knoten stellen die Grenzen zwischen dem Übertragungsnetz und einem Verteilnetz dar. Ausgehend von einem Basisszenario ohne Spannungsverletzungen oder Überlastungen wurden 14 Szenarien definiert. In jedem Szenario wurde eine der sieben Netzgrenzen ausgewählt und entweder die Nennleistungen aller dortigen Transformatoren auf 70 % der Belastung im Basisszenario reduziert, was zu einer Überlastung führte, oder die Spannungsgrenzen der jeweiligen Netzanschlussstelle so eingeschränkt, dass der Eingangswert die Grenzen um 2 % der Nennspannung überschreitet. Die erstellten Szenarien führen zu einem überlasteten Netz und zu Spannungsverletzungen an den Netzanschlussstellen zwischen zwei Netzbetreibern, wodurch eine Koordination nötig wird.

Die Ergebnisse sind vielversprechend: In allen 14 Szenarien konnten durch die koordinierten Lösungen Engpässe und Spannungsprobleme entweder völlig behoben oder deutlich reduziert werden.

Die Differenzen an den Netzanschlussstellen nahmen bereits nach wenigen Iterationen stark ab, was es ermöglichte, die maximale Anzahl an Iterationen auf 10 festzulegen und eine gesamte Rechenzeit von unter 30 Minuten zu erreichen. Bei einer Divergenz wurde der Recovery-Modus aktiviert, der die Lücke rasch schloss. Er könnte auch in Szenarien mit langsamer Konvergenz angewendet werden.

Die Ergebnisse wurden erfolgreich mithilfe eines kommerziellen, auf Wechselstrom basierenden Lastfluss-Simulationstools validiert. Die geringen Spannungsverletzungen und Leitungsüberlastungen, die das Simulationstool noch zeigte, sind auf unterschiedliche interne Modellierungen des Tools und der RAO-Engine zurückzuführen und sollen in der nächsten Projektphase durch die Ergänzung von Sicherheitsfaktoren in den lokalen Optimierungsmodellen behoben werden.

Ausblick

Der Proof of Concept hat die Anwendbarkeit von Opteso für die dezentralisierte Optimierung von Entlastungsmassnahmen zwischen drei Netzbetreibern (einem Übertragungsnetzbetreiber und zwei VNB auf Netzebene 3) bestätigt. Die Ergebnisse sind vielversprechend: Die Inkonsistenzen an den gemeinsamen Netzgrenzen nehmen sehr schnell ab. Es sind nur wenige Iterationen nötig und die Rechenzeit für die Vorbereitung des Betriebs am Vortag genügt. In allen getesteten Szenarien konnten durch die koordinierten Lösungen Engpässe und Spannungsprobleme entweder vollständig behoben oder deutlich reduziert werden.

Opteso kann eine effiziente Koordination von Entlastungsmassnahmen zwischen Netzbetreibern ermöglichen und somit einen entscheidenden Beitrag zu systemweiten Spannungshaltung und Besei-

tigung von Kapazitätsengpässen leisten. Swissgrid verbessert derzeit seine Prognose- und Entscheidungsunterstützungstools und wird in den kommenden Jahren für ein Pilotprojekt bereit sein. Nach einer Pilotphase mit begrenzter Teilnehmerzahl könnten schrittweise alle Verteilnetzbetreiber der Schweiz, beginnend mit Netzebene 3 und bei Bedarf bis zur Netzebene 7, an Opteso teilnehmen (Bild 2).

Die Transformation des Stromsystems ist im Gange und bringt rasche Veränderungen mit sich. Swissgrid steht im Zentrum dieses Umbruchs. Dank Opteso können die Stromflüsse zwischen den Netzebenen optimiert werden. Damit ist das Stromnetz besser auf die Herausforderungen der Zukunft vorbereitet. Swissgrid setzt sich dafür ein, digitale Lösungen und neue Technologien nahtlos in das Stromsystem zu integrieren. Unser Ziel ist es, Innovationen aktiv zu fördern und gemeinsam mit unseren Partnern die Grundlage für ein zukunftsfähiges, stabiles, sicheres und nachhaltiges Energiesystem zu schaffen.

Referenzen

- [1] Philippe Rothermann, Maurice Ramackers, Juan-Pablo Fernandez, Romain Yerly, Lukas Eggimann, «Den Netzbetrieb mit Modellen optimieren», Bulletin Electrosuisse 8/2025, S. 30–32, 2025.
- [2] Stephen Boyd, Neal Parikh, Eric Chu, Borja Peleato, Jonathan Eckstein, «Distributed Optimization and Statistical Learning via the Alternating Direction Method of Multipliers», Foundations and Trends in Machine Learning, Vol. 3, Nr. 1, S. 1–122, 2011.
- [3] Francisco Nogales, Francisco Prieto, Antonio Conejo, «A Decomposition Methodology Applied to the Multi-Area Optimal Power Flow Problem», Annals of Operations Research 120, S. 99–116, 2003.
- [4] Conor O'Malley, «Coordination of Gas-Electric Networks: Modeling, Optimization and Uncertainty», Dissertation ETH Nr. 27785, 2021.

Autoren

Dr. Ambra Toletti ist Principal Specialist Research & Digitalisation bei Swissgrid.

> Swissgrid AG, 5001 Aarau
> ambra.toletti@swissgrid.ch

Dr. Raphael Wu ist Principal Specialist Market Strategy bei Swissgrid.

> raphael.wu@swissgrid.ch

ANZEIGE

9

dossier | it für evu



**GIRSBERGER
INFORMATIK**

**SOFTWARE
FÜR ENERGIE
UND EFFIZIENZ**

Girsberger Informatik AG
Bahnhofstrasse 53
CH-6440 Brunnen
+41 41 822 00 00 giag.ch

swiss made software