



Fachgebiet Elektrische
Energieversorgungsnetze



Diplomarbeit

Analyse und Validierung der Netzmodellierung bei unsymmetrischen Lasten oder fehlerbehafteten Daten und Optimierung der Messtopologie in Niederspannungsverteilsnetzen

Maik Naumann

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen	4
2.1	Grundlagen des <i>IRENE</i> Projektnetzes	4
2.1.1	Beschreibung des Netzgebietes	4
2.1.2	Beschreibung des Testnetzes	6
2.2	Messinfrastruktur	10
2.2.1	Beschreibung des Messgeräts	10
2.2.2	Anwendung der Messtechnik im <i>IRENE</i> Projekt	12
2.2.3	Beschreibung des Leitsystems	14
2.3	Netzmodellierung und Netzberechnung	17
2.3.1	Import der Netzdaten aus <i>SINCAL</i> nach <i>MATLAB</i>	17
2.3.2	Modellierung der Netzdaten	18
2.3.3	Berechnung des Netzes	19
3	Unsymmetrischer Lastfluss	20
3.1	Einführung	20
3.2	Grundlagen der Modellierung	22
3.2.1	Modellierung der Stichleitung	22
3.2.2	Angaben und Annahmen	23
3.2.3	Varianten der Modellierung der Rückleitung	26
3.3	Modellierung und Berechnung in Matlab	29
3.3.1	Transformationen in Symmetrische Komponenten	29
3.3.2	Spannungsberechnung	30
3.4	Auswertung der Ergebnisse	31
3.4.1	Analyse des unsymmetrischen Lastflusses	31
3.4.2	Varianten der Modellierung des Rückleiters	36

3.4.3	Auswertung der Unsymmetrie bei Variation verschiedener Parameter	38
3.4.4	Auswertung der Leitungsverluste	52
3.5	Fazit	56
4	Validierung Admittanzmatrix	58
4.1	Einführung	59
4.1.1	Problemstellung	59
4.1.2	Lösungskonzept	61
4.1.3	Voraussetzungen und Einschränkungen	62
4.2	Auswertungen	66
4.2.1	Analyse der Fehler und Ungenauigkeiten	66
4.2.2	Auswirkungen von Fehlern in Admittanzmatrix auf Netzzustand	75
4.2.3	Schlussfolgerungen	84
4.3	Lösungsverfahren	86
4.3.1	Beschreibung der Verfahren	86
4.3.2	Anwendung der Verfahren mit Testnetz und Testdaten	93
4.4	Fazit	102
5	Bestimmung Messtopologie	104
5.1	Einführung	104
5.1.1	Problemstellung	104
5.1.2	Lösungsansätze	105
5.1.3	Annahmen	106
5.2	Empirischer Ansatz	107
5.2.1	Konzept	107
5.2.2	Klassifizierung der Netzknoten	109
5.2.3	Bewertung der Netzknoten nach Daten und Klassifikation	111
5.2.4	Anwendung mit Testnetz	112
5.3	Optimierungs Ansatz	115
5.3.1	Konzept	115
5.3.2	Implementierung	116
5.3.3	Anwendung mit Testnetz	122
5.4	Fazit	126

6	Zusammenfassung	127
----------	------------------------	------------

7	Literaturverzeichnis	129
----------	-----------------------------	------------

1 Einleitung

Mit der stetig wachsenden dezentralen Energieerzeugung stehen die Niederspannungsverteilstnetze bereits heute vor großen Herausforderungen. Einerseits drohen durch die zunehmende Stromeinspeisung durch Anlagen der erneuerbaren Energien in ländlichen Stromnetzen Grenzwertverletzungen des Spannungsbandes. Andererseits besteht die Gefahr der Überschreitung der thermischen Belastungsgrenzen der Netzbetriebsmittel bei zu großen Energieeinspeisungen und auch des Energieverbrauchs, im Hinblick auf die forcierte zukünftige Nutzung von Elektrofahrzeugen. Dabei können die Verteilnetzbetreiber aktuell nur schwer diesen Herausforderungen begegnen [LEI-10] [ETG-07]. Gründe dafür sind:

- Gesetzliche Rahmenbedingungen fördern Ausbau dezentraler Einspeisung und verpflichten Verteilnetzbetreiber diese zu integrieren [BUN-12]
- Programme und Maßnahmen fördern die Verbreitung und Nutzung von Elektrofahrzeugen [BUN-11]
- Verteilnetzbetreiber sind alleine in der Verantwortung, die Netze nach den Vorschriften zu betreiben und können nur finanzielle Anreize setzen, um die Belastung zu beeinflussen
- Niederspannungsverteilstnetze werden aktuell kaum messtechnisch beobachtet und passiv betrieben. Als Folge ist keine aktive Beeinflussung des Netzes hinsichtlich der Herausforderungen möglich
- Netzausbau ist eine oft praktizierte, aber nicht optimale und dazu kostenintensive Lösung der Herausforderungen, da stets die langfristige Entwicklung der Belastung bei dem Ausbau als Reserve berücksichtigt werden muss

Im Pilotprojekt *Integration regenerativer Energien und Elektromobilität* (IRENE) sollen für diese Herausforderungen technische und wirtschaftliche Lösungen untersucht und

entwickelt werden. Für dieses gemeinschaftliche Forschungsprojekt stellt die *Allgäuer Überlandwerk GmbH* (AÜW) einen Teil seines Stromnetzes um die Gemeinde Wildpoldsried, nahe Kempten im Allgäu, zur Verfügung. Das AÜW-Netzgebiet eignet sich dabei ideal, um die zukünftigen Probleme schon heute zu untersuchen, da der Ausbau dezentraler Energieerzeugungsanlagen in und um Wildpoldsried, im Vergleich zu der durchschnittlichen Entwicklung des Ausbaus von EE-Anlagen in Deutschland, bereits sehr fortgeschritten ist. Als Technologiepartner ist die *Siemens AG* für die Ausstattung des Projektnetzes mit Messeinrichtungen und Regelsystemen verantwortlich. Im Laufe des Projekts soll der Betrieb eines selbstorganisierenden Energieautomatisierungssystem erprobt und an die Herausforderungen in der Praxis angepasst werden. Mit diesem Energieautomatisierungssystem soll durch ein verbessertes wirtschaftliches und technisches Energiemanagement die zeitliche Diskrepanz von Stromerzeugung und Stromverbrauch besser auf einander angepasst werden können. So müssen die Netzbetreiber weniger Leistungskapazität vorhalten, um Verbrauchs- und Angebotsspitzen abfangen zu können. Ziel ist somit, dass auf den kostenintensiven Netzausbau trotz steigender dezentraler Energieerzeugung verzichtet werden kann. Eine mögliche Folge wäre eine Reduzierung der Netzentgelte und damit eine netzbedingte Entlastung des Strompreises [IRE-12].

Voraussetzung für diesen aktiven und optimierten Netzbetrieb, der im *IRENE* Projekt technisch entwickelt und in der Praxis erprobt wird, ist der durch die Messtechnik zu erfassende Netzzustand. Nur mit einem kompletten und ausreichend genau bestimmten Netzzustand können die Regeleinrichtungen der Ortsnetztrafos, PV-Anlagen oder Speicher die Netzstabilität und die Energiebalance gewährleisten.

In dieser Diplomarbeit sollen die Grundlagen für die richtige Erfassung und Bestimmung des Netzzustands untersucht werden. Im ersten Kapitel **Grundlagen** soll zunächst das Projektnetz, die Messinfrastruktur und die Netzberechnung beschrieben werden, auf dem die weiteren Kapitel aufbauen. In den darauf folgenden drei Kapiteln werden einzelne Fragestellungen im Bezug auf das Ziel der korrekten Netzzustandserfassung behandelt:

Im Kapitel **Unsymmetrischer Lastfluss** soll einerseits untersucht werden, in welcher Form in der digitalen Netzmodellierung die Rückleitung berücksichtigt werden muss.

Andererseits wird analysiert, wie die in Niederspannungsverteilsnetzen vorkommende unsymmetrische Energieerzeugung und -verbrauch den Netzzustand beeinflusst und ab welchen Grenzen diese unsymmetrische Belastung in der Netzberechnung berücksichtigt werden muss.

Die Fragestellung des zweiten Kapitels [Validierung Admittanzmatrix](#) ist, inwiefern sich eventuelle Differenzen zwischen den realen Netzdaten und denen im digitalen Netzmodell erkennen und korrigieren lassen.

Im Kapitel [Bestimmung Messtopologie](#) soll die Problemstellung beantwortet werden, welche Anzahl und lokale Verteilung von Messgeräten in Niederspannungsverteilsnetzen für den aktiven und optimierten Netzbetrieb nötig ist.

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden verschiedene grundsätzliche Fragestellungen zu dem Thema der Netzzustandserfassung in Niederspannungsverteilnetzen für den aktiven und optimierten Betrieb im Sinne des *intelligenten Stromnetze* behandelt.

Im Kapitel **Unsymmetrischer Lastfluss** wurde die Netzmodellierung und Netzzustandserfassung im Bezug auf unsymmetrische Belastungen untersucht. Es wurde ermittelt, dass der Einfluss der Rückleitung über die Erde in der digitalen Netzmodellierung nicht berücksichtigt werden muss, wenn das Netz als ein Vier-Leiter-System ausgeführt ist. Weiterhin wurde festgestellt, dass nach der in *DIN EN 50160* erlaubten Grenze für die Unsymmetrie im Netz große Spannungsdifferenzen zwischen den einzelnen Phasen möglich sind. Deswegen sollte die Netzberechnung stets dreiphasig erfolgen, da sonst große Ungenauigkeiten bei eventuellen unsymmetrischen Zuständen auftreten. Bei einphasig angeschlossenen Energieerzeugungsanlagen kann der Einfluss der Unsymmetrie vernachlässigt werden, wenn die Leistung der Anlage den erlaubten Werten entspricht. Dabei muss noch mit der Analyse vollständiger Messdaten untersucht werden, welche unsymmetrischen Belastungen in Niederspannungsverteilnetzen in der Realität vorkommen und welchen Einfluss sie auf den Netzzustand haben.

Thema des Kapitels **Validierung Admittanzmatrix** war es, zu analysieren, ob eventuelle Fehler in der digitalen Netzmodellierung mit Messdaten erkennbar und korrigierbar sind. Dazu wurde der Einfluss von möglichen Fehlern in den Leitungsimpedanzen anhand des *IRENE* Testnetzes mit verschiedenen Szenarien überprüft. Es wurde deutlich, dass nur grobe Fehler in einzelnen Leitungsimpedanzen genau genug mit Messdaten herauszufinden sind. Um die Admittanzmatrix eines Netzgebietes mit Messdaten validieren zu können, wurden zwei Verfahren entworfen und anhand Testnetzes und Testdaten ausgewertet. Es wurde festgestellt, dass die Leitungsimpedanzen relativ gut in Richtung der realen Werten korrigiert werden können, wenn fehlerlose Messdaten von

jedem Knoten vorliegen. Mit Beachtung der Messfehler fehlt die Datenredundanz, um die fehlerhaften Leitungsimpedanzen ausreichend verbessern zu können. Allerdings zeigte sich, dass auch bei fehlerbehafteten Messdaten der Netzzustand als Ganzes mit dem Verfahren zur Validierung der Admittanzmatrix besser abgeschätzt werden kann. Offen ist weiterhin, wie groß die realen Abweichungen der digitalen Netzmodellierung im Vergleich zu den realen Leitungsdaten sind. Mit einer ausreichend großen Messdichte, wie sie im Testnetz im *IRENE* Projekt vorgesehen ist, wäre tiefergehende Untersuchungen dieser Fragestellung möglich.

Die Fragestellung nach der für den aktiven und optimierten Betrieb benötigten Messtechnik, wurde im letzten Kapitel [Bestimmung Messtopologie](#) behandelt. Dazu wurden zwei Ansätze vorgeschlagen, um für ein Niederspannungsnetz die Anzahl und den Ort der Messgeräte zu bestimmen. Im empirischen Ansatz wurden allgemeine Kriterien dargestellt, mit denen die Netzknoten je nach Wichtigkeit für die Zustandserfassung und damit als Messpunkte priorisiert werden können. Im Optimierungsansatz wurde ein Verfahren entworfen, das auf Grundlage der Netzzustandsschätzung und der jeweiligen Genauigkeit je nach Messtopologie, die Auswahl der Netzknoten als Messpunkte bestimmt. Mit diesem Verfahren ist es möglich für ein Netzgebiet die Messtopologie nach den beiden konträren Zielen der Minimierung der Anzahl der einzusetzenden Messgeräte und der bestmöglichen Genauigkeit der Zustandserfassung zu optimieren.

Im *IRENE* Projekt werden die hier behandelten Fragestellungen bald aktuell, da mit der fast abgeschlossenen Installation der Mess- und Regelungstechnik die Nutzung des Energieautomatisierungssystems begonnen werden kann. Auf Grundlage der richtigen Erfassung des Netzzustands kann dann mit dem System ein aktiver und optimierter Betrieb des Netzes erprobt werden.