

# ENTWICKLUNG UND VALIDIERUNG EINES OPTIMALEN PLATZIERUNGsalGORITHMUS FÜR $\mu$ PMUS IM NIEDERSpannungsNETZ

Michael KELKER<sup>1</sup>, Armina BERRADA<sup>1</sup>, Katrin SCHULTE<sup>1</sup>, Jens HAUBROCK<sup>1</sup>

## Einleitung

Die deutsche Bundesregierung plant, dass bis zum Jahr 2025 40 bis 45 % des in Deutschland verbrauchten Stroms aus erneuerbaren Energien bezogen wird [1]. Die immer stärkere Einspeisung von dezentralen Energie-Systemen (DES) und erneuerbaren Energien in das Verteilnetz und der geplante Kohle-Ausstieg der deutschen Bundesregierung im Jahr 2038 stellen die Verteilnetz-Betreiber vor neue Herausforderungen. Neben der Energieerzeugung durch DES stellen auch Elektrofahrzeuge (EFZ) mit ihrer hohen Ladeleistung von bis zu 22 kW und in Zukunft voraussichtlich noch höher, ein Risiko für einen zuverlässigen Verteilnetzbetrieb dar. Die Sektorenkopplung zwischen dem Stromnetz und den EFZs ist ein wichtiger Schritt der Energiewende [2]. Um die Spannungsqualität auf allen Netzebenen, den sicheren und zuverlässigen Betrieb der elektrischen Netze und den kostspieligen Ausbau der elektrischen Netze zu gewährleisten, müssen die volatilen DES und EFZs innerhalb einer Netzzelle informativ miteinander verbunden und intelligent gesteuert werden. Da jedoch überwiegend keine Messtechnik auf Niederspannungsebene installiert ist, fehlen die notwendigen Eingangsdaten für eine solche Steuerung. Ein flächendeckender Ausbau der NS-Netze mit Messtechnik an jeden Knoten ist nicht wirtschaftlich. Im Folgenden wird die Entwicklung und Validierung eines neuartigen optimalen Platzierungsalgorithmus (OPA) für  $\mu$ -Phasor-Measurement-Units ( $\mu$ PMUs) im NS-Netz vorgestellt. Durch den Algorithmus wird ein Optimum zwischen Wirtschaftlichkeit, Anzahl der eingesetzten  $\mu$ PMUs und ein Maximum der Beobachtbarkeit eines NS-Netzes erreicht.

## Entwicklung und Validierung eines optimalen Platzierungsalgorithmus (OPA)

$\mu$ PMUs messen die Spannungszeiger an den Knoten, an denen sie installiert sind, und die Stromzeiger der an den Knoten angeschlossenen Leitungen, synchronisieren die Messdaten zeitlich mittels GPS und übertragen die Daten in Echtzeit. Aus den Leitungsdaten lässt sich die Spannung der benachbarten Knoten bestimmen. Um ein Optimum zwischen Maximum an Beobachtbarkeit im NS-Netz und wirtschaftlich eingesetzte Messtechnik zu erhalten, werden verschiedene Kriterien betrachtet und darauf basierend ein OPA für  $\mu$ PMUs im NS-Netz entwickelt und validiert: Netzknoten dürfen maximal von einer  $\mu$ PMU messtechnisch erfasst werden und das größte Verhältnis von gemessenen Knoten zu eingesetzten  $\mu$ PMUs soll erreicht werden.

### Beschreibung Algorithmus

Der entwickelte Algorithmus lässt sich in mehreren Schritten aufteilen. Als erster Schritt wird zu einem elektrischen Netz mit  $k$  Knoten eine Matrix  $(\zeta)_n$  mit  $k \times k$  Dimensionen gebildet, welches die Topologie der Knoten-Zweig Matrix beschreibt. In  $(\zeta)_n$  wird ein Wert gleich 1 gesetzt, wenn eine Verbindung der Knoten besteht und 0 wenn nicht. Anschließend erfolgen  $n-1$  Iterationsschritte entsprechend der Anzahl an gewählten  $\mu$ PMUs, welche in dem Netz eingesetzt werden. Im ersten Iterationsschritt  $n-1 = 0$  werden die Werte der Spalten aufsummiert, sodass eine Matrix  $(\sigma)_n$  mit  $1 \times (k-n)$  Dimensionen entsteht.  $(\sigma)_n$  beschreibt pro Netzknoten die Anzahl an benachbarten Netzknoten im zu betrachtenden NS-Netz. Nun wird der Knoten  $k_{\max,n}$  mit der höchsten Anzahl an benachbarten Knoten ausgewählt. An diesen Knoten wird die erste  $\mu$ PMU platziert. Da über den Stromphasor und den Leitungsdaten die benachbarten Knoten bestimmt werden können, wird die Zeile und Spalte des Knoten  $k_{\max,n}$  in  $(\zeta)_n$  gelöscht, sodass die Dimension von  $(\zeta)_n$  nun  $(k-n) \times (k-n)$  beträgt. Im nächsten Iterationsschritt werden wieder die Werte der Spalten in der Matrix  $(\zeta)_n$  aufsummiert, dass eine neue Matrix  $(\sigma)_n$  entsteht und der Knoten bestimmt wird, wo die nächste  $\mu$ PMU im Netz platziert wird. Wenn mehrere Knoten  $k_{\max,n}$  die höchste Anzahl an benachbarten Netzknoten aufweisen werden nach dem Algorithmus entsprechend viele

---

<sup>1</sup> Fachhochschule Bielefeld Institut für Technische Energie-System (ITES), Interaktion 1 33619 Bielefeld, +49.521.106-70352, michael.kelker@fh-bielefeld.de, fh-bielefeld.de

Varianten gebildet. Die Iterationen wiederholen sich bis  $n-1$ , welches die Anzahl der einsetzenden  $\mu$ PMUs beschreibt, erreicht ist. Nach Durchlauf aller Iterationen bestehen verschiedene Auslegungsmatrizen  $(\mathbf{A})_m$  mit einer Dimension von  $1 \times n$ . Abschließend wird die optimale Auslegungsmatrix  $(\mathbf{A})_{m,\max}$  bestimmt, welche die Netzknoten darstellt, wo die Messtechnik optimal zu platzieren ist, um mit einer gewählten Anzahl an  $\mu$ PMUs die maximale Anzahl an Netzknoten messtechnisch zu erfassen.

### Betrachtetes NS-Testnetz

Zu Prüfung und Validierung des entwickelten OPA ist ein Niederspannungsnetz mit 219 Knoten, das ein reales lokales Netz darstellt, in MATLAB/Simulink modelliert worden [3]. Das Netz beinhaltet 199 Einfamilienhäuser, 25 EV-Ladestationen mit unterschiedlichen Ladekapazitäten und 10 PV-Anlagen.

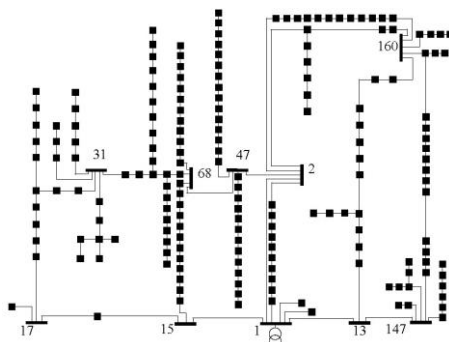


Abbildung 1: Schematische Darstellung des verwendeten NS-Netzes zur Validierung des entwickelten OPA

## Ergebnisse

Der entwickelte OPA ist mit verschiedenen Anzahlen an  $\mu$ PMUs an dem beschriebenen NS-Netz mit 219 Knoten validiert worden. Folgend sind die beispielhaften Ergebnisse für 3, 5 und 7  $\mu$ PMUs in Tabelle 1 dargestellt, wobei das Verhältnis die gemessenen Knoten zu allen Netzknoten beschreibt.

Tabelle 1: Ergebnisse des OPA bei 3, 5, 7  $\mu$ PMUs

Anzahl $\mu$ PMUs	3	5	7
$(\mathbf{A})_{m,\max}$	(1,31,147)	(1,2,31,147,160)	(1,2,31,42,68,147,160)
Verhältnis	8,67 %	13,24 %	16,89 %

Wie gefordert ergeben sich durch den OPA verschiedene Auslegungsmöglichkeiten für  $\mu$ PMUs im betrachteten Netz, um mit möglichst wenig Messtechnik eine maximale Anzahl an Netzknoten zu überwachen.

## Zusammenfassung und Ausblick

Es ist ein OPA entwickelt und anhand eines 219 Knotigen NS-Netzes validiert worden. Die Ergebnisse zeigen, dass der Algorithmus nach gewählten Optimierungsansatz gute Ergebnisse liefert. Für ein gewähltes Netz werden verschiedene Platzierungsmöglichkeiten von  $\mu$ PMUs definiert und die optimale Platzierung bestimmt. Künftig wird basierend auf der optimalen  $\mu$ PMU-Platzierung ein künstliches neuronales Netz zur Zustandsabschätzung in Verteilnetzen entwickelt werden. Zusätzlich wird der OPA nach weiteren Optimierungsansätzen, wie zum Beispiel Anteil an DES an einen Netzstrang und auch Genauigkeit der geplanten Zustandsabschätzung, erweitert werden.

## Referenzen

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), "Erneuerbare Energien in Zahlen", Druck- und Verlagshaus Zarbrock, September 2018
- [2] P. Komarnicki, J. Haubrock, Z. A. Styczynski, "Elektromobilität und Sektorenkopplung", Springer Verlag, 2018