

Validierung von Planungsmethodiken unkonventionell betriebener elektrischer Verteilungsnetze

Tim Lüken

EWE NETZ GmbH

Netzmanagement Strom & Telekommunikation

Oldenburg, Germany

tim.lueken@ewe-netz.de

Abstract — Die Energieversorgung in Deutschland befindet sich seit geraumer Zeit im Umbruch. Spätestens jedoch mit dem Energiekonzept der Bundesregierung von September 2010 wurde ein grundlegender Umbau eingeleitet. Ziel ist unter anderem eine deutliche Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien am transportierten Strom. Da der Strom aus erneuerbaren Energien zu großen Teilen weit entfernt von den Verbrauchszentren produziert wird, stellt der Ausbau der Stromnetze eine wesentliche Voraussetzung zur Realisierung dieses Ziels dar. Dieser erscheint jedoch aus heutiger Sicht in dem benötigten Ausmaß nicht realistisch. Daher werden Alternativen zum klassischen Netzausbau gesucht, welche sowohl die Spannungshaltung als auch die Einhaltung der einschlägigen Normen gewährleisten. Eine mögliche Alternative stellt die Entwicklung von innovativen Netzbetriebsstrategien dar. Diese dienen der Nutzung von Reserven der vorhandenen Netzinfrastruktur durch einen unkonventionellen Betrieb des Energiesystems. Die Planung des Einsatzes dieses unkonventionellen Netzbetriebs erfolgt durch die Vorausberechnung mittels herkömmlicher Netzmodelle. Die Funktion und Wirksamkeit des Einsatzes hängt demnach von der Eignung der Netzmodelle zur Planung dieser Strategien ab. Das Paper beschreibt die Eignungsfeststellung herkömmlicher Netzmodelle zur Auslegung und Planung der Netzbetriebsstrategie des 'low-impact operation mode'. Die verwendeten Netzmodelle werden anhand einer experimentellen Validierung im Labormaßstab geprüft und bewertet.

Keywords - *Mittelspannung; Verteilungsnetz; Spannungshaltung; Netzberechnung;*

I. EINLEITUNG

Die Integration von dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA) sowie großen Verbrauchern in das Verteilungsnetz kann die Spannungshaltung stark beeinflussen. Als kostengünstige Alternative zu der bisher üblichen Impedanzreduktion durch Netzausbau kann heute die Blindleistungsstellfähigkeit der DEA zur Verbesserung der Spannungshaltung verwendet werden. Der 'low-impact operation mode' (LOM) ist eine Netzbetriebsstrategie, welche ebenfalls diese Zusatzfunktion der DEA nutzt, um Reserven der vorhandenen Netzinfrastruktur zu erschließen. Durch die gezielte Steuerung von Leistungsflüssen werden in diesem Verfahren die Sensitivitätseigenschaften genutzt mit dem Ziel die quasi-statische Spannungshaltung zu verbessern.

A. Der LOM-Betrieb

Grundlage des LOM-Betriebs bilden Netzbereiche mit Reserven bzgl. der Betriebsmittelauslastung, sodass eine Verbesserung der Spannungshaltung durch die Steuerung von Blindleistung erzielt werden kann. Dabei erfolgt der Einsatz der Blindleistung gezielt, wodurch die Sensitivitätseigenschaften des Netzes hinsichtlich der Spannungsbeträge genutzt werden sollen. Ziel des LOM-Betriebs ist es, durch die Steuerung der Blindleistung in Bezug auf die Wirkleistung eines Netzknotens, einen konstanten Leistungsfaktor (LOM-PF) zu realisieren, für den die Sensitivitäten der Spannungsbeträge in Abhängigkeit der Leistungsgradienten minimal sind. Gelingt dies, so wird der Einfluss der Leistungsänderungen auf die Spannung eines Knotens minimiert und somit die Spannungshaltung verbessert.

Der LOM-Betrieb gehört zu der Klasse rückkopplungsfreier Netzsteuerungsverfahren. Es bedarf daher keiner Maßnahmen zur Gewährleistung der regelungstechnischen Stabilität. Zur Blindleistungssteuerung wird die Stellfähigkeit der vorhandenen DEA genutzt. Somit fallen, wenn überhaupt, nur geringe Kosten an. Es sind lediglich Änderungen der Betriebs-einstellungen vorzunehmen, welche den Wirkungsgrad der Anlagen jedoch nur in geringem Maß beeinflussen. Das Verfahren ist somit sowohl auf aktuelle Bestandsanlagen als auch auf zukünftige Neuanlagen anwendbar.

Die Effizienz sowie die Robustheit des Verfahrens sind bereits sowohl im Demonstratormaßstab in Forschungsarbeiten von Prof. Dr. Diedrichs als auch im operativen Netzbetrieb der EWE NETZ GmbH nachweislich erprobt. Es besitzt großes Potential zur flächendeckenden Verbesserung der Spannungshaltung sowie zur Schaffung neuer Anschlusskapazitäten.

Für die Planung des LOM-Betriebs wird ein optimaler Leistungsfaktor berechnet, welcher der verwendeten Blindleistungsquelle als Sollwert vorgegeben wird. Dieser Wert entspricht dem besten rechnerischen Kompromiss hinsichtlich der Spannungsbeeinflussung und der Begrenzung der Verlustleistung aus diversen Last- und Einspeiseszenarien. Bei signifikanten Änderungen im Netz, z.B. durch Umschaltung der Topologie, ist dieser Leistungsfaktor neu zu berechnen.

Im Standard des LOM-Betriebs wird die Beeinflussung der Spannung am Anschlussknoten des Verursachers selbst betrachtet. Dieser Betrieb dient insbesondere der Schaffung neuer

Anschlusskapazitäten. Grundsätzlich ist jedoch auch die Betrachtung anderer Knoten denkbar. Diese Erweiterung des LOM-Betriebs ermöglicht eine flächendeckende Verbesserung der Spannungshaltung durch die Nutzung der Blindleistungstellfähigkeit entfernter DEA. Zu beachten ist jedoch, dass die Effizienz des Verfahrens mit zunehmender elektrischer Distanz abnimmt.

In dem Netz des Versorgungsnetzbetreibers EWE NETZ im Nordwesten Deutschlands wird das Verfahren erfolgreich angewandt. Durch den LOM-Betrieb wurde der Anschluss einer Eisengießerei in dem 20kV-Netz möglich. Diese stellt durch zwei Hochöfen mit einer Leistung von je 5MW einen atypisch großen Verbraucher für das Mittelspannungsnetz dar. Üblicherweise erfolgt der Anschluss eines Verbrauchers mit ähnlich großem Einfluss auf die Spannungshaltung in dem vorgelagerten Hoch- bzw. Höchstspannungsnetz. Mithilfe des LOM-Betriebs konnten jedoch die ursprünglichen Spannungseinbrüche bei Betrieb der Hochöfen von 6% auf unter 2% gesenkt werden.

Da alle Betrachtungen des LOM-Betriebs die Sensitivitäten hinsichtlich der Spannungsbeträge thematisiert, sind im Folgenden alle Ausführungen zu Sensitivitäten im Kontext der Spannungsbeträge zu verstehen.

B. Problemstellung

Voraussetzung für den LOM-Betrieb ist, neben der physikalischen Eignung des Netzbereichs, die Kenntnis des LOM-PF, d.h. des Leitungsfaktors mit den geringsten Sensitivitäten der Spannungsbeträge bzgl. eines Netzknotens. Der LOM-PF ist in der Planung des Verfahrens vorzuberechnen. Bisher ist jedoch nicht bekannt von welchen Modelleigenschaften das Berechnungsergebnis abhängig ist. Eine Bewertung der zur Verfügung stehenden Netzmodelle ist somit bislang ebenfalls nicht möglich. Für die Effizienz des LOM-Betriebs ist eine hinreichend genaue Vorausberechnung des LOM-PF jedoch essentiell.

II. ZIELSTELLUNG UND METHODIK

Die im operativen Netzbetrieb zur Verfügung stehenden Netzmodelle sind hinsichtlich der Abbildungsgüte des Verfahrens zu bewerten. Eine Bewertung kann jedoch erst nach Kenntnis der für den LOM-Betrieb dominierenden Netzeigenschaften erfolgen. Es sind daher die folgenden Fragen zu klären:

- Steigt die Abbildungsgüte hinsichtlich der Sensitivitätseigenschaften mit der Granularität der Netzmodelle?

- Ist die Abbildungsgüte hinsichtlich der Sensitivitätseigenschaften von elektrischen Kenngrößen bzw. Eigenschaften abhängig?
- Ist die Verwendung eines Netzäquivalents unter Berücksichtigung dieser Kenngrößen ausreichend?

Zur Klärung dieser Fragen wird ein Laborenergiesystem im Demonstratormaßstab verwendet. Dieses Laborenergiesystem, welches am Netz- und Kraftwerkssimulator (NuK) im Labor für elektrische Energiesysteme an der Jade-Hochschule in Wilhelmshaven realisiert wurde, ist einem realen 20kV-Netzbereich der EWE NETZ GmbH nachempfunden. Des Weiteren wurde dieses in der Netzberechnungssoftware PowerFactory durch zwei Netzmodelle unterschiedlicher Detailtiefe abgebildet.

Mithilfe der beiden Netzmodelle werden die Spannungssensitivitäten des Laborenergiesystems vorausberechnet. Im Anschluss erfolgt die experimentelle Feststellung dieser am Laborenergiesystem. Nach dem Vergleich der Messergebnisse mit den Berechnungsergebnissen der beiden Netzmodelle unterschiedlichen Informationsgehalts, erfolgt eine Eignungsbewertung der Netzmodelle bzgl. der Abbildung der Sensitivitätseigenschaften des Laborenergiesystems.

Abschließend wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus den Laborexperimenten auf den operativen Betrieb thematisiert, um die Eignung herkömmlicher Netzmodelle des operativen Betriebs zur Vorausberechnung des LOM-PF zu bewerten.

III. CHARAKTERISIERUNG DES LABORENERGIESYSTEMS

Das realisierte Laborenergiesystem, welches ein 20kV-Mittelspannungsnetz abbildet, wurde für ein industrielles Forschungsprojekt zur Thematik des LOM-Betriebs konzipiert und in der Laborumgebung umgesetzt (Abbildung 1). Im Anschluss an dieses konnten die beschriebenen Experimente zur Thematik der Spannungssensitivitäten an dem bestehenden Versuchsaufbau durchgeführt werden. In Abbildung 2 ist das Prinzipschaltbild des Experimentalnetzes abgebildet.

Die Auslegung des Experimentalnetzes erfolgte in Anlehnung an einen realen 20kV-Netzbereich der EWE NETZ GmbH. Eine qualitative Nachbildung dieses Netzbereichs ist insbesondere durch die Umsetzung des Netztyps, einem Maschenetz mit Schwerpunkt-Schaltanlagen, gegeben. Weiterhin konnte eine Vergleichbarkeit durch die Realisierung ähnlicher X/R-Verhältnisse sowie vergleichbarer Kurzschlussleistungsrelationen (SCR) gewährleistet werden.



Abbildung 1: Versuchsaufbau im Labor für elektrische Energiesysteme an der Jade Hochschule in Wilhelmshaven

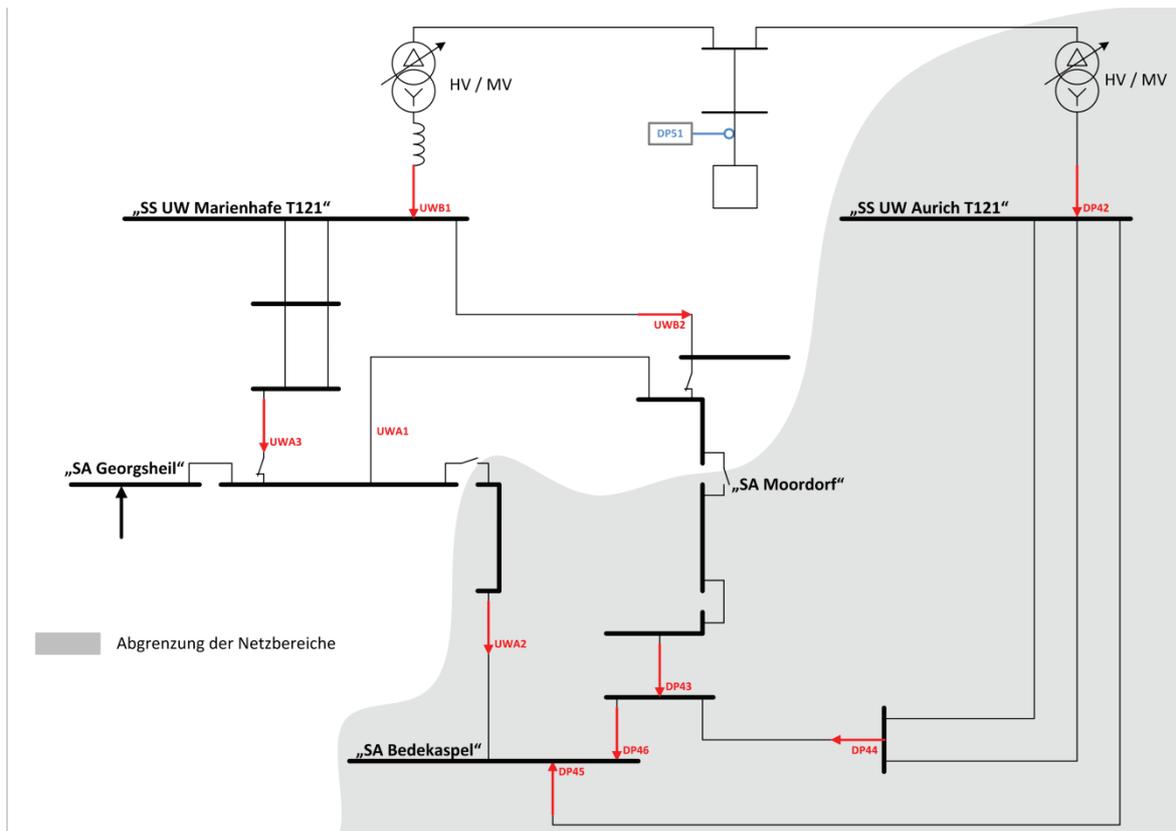


Abbildung 2: Prinzipschaltbild des Experimentalnetzes

Zum Zweck der messtechnischen Erfassung des Laborenergiesystems wurde ein auf Messumformern (MUF) basierendes Messsystem verwendet, welches die Erfassung der RMS Werte der relevanten Größen (U, I, P, Q) jeder Masche ermöglicht. Die großflächige Abdeckung durch das Messsystem (s. rote Markierungen in Abbildung 2) ist, verglichen mit der messtechnischen Ausstattung im Freifeld auch im Sinne der zeitlichen Auflösung, atypisch.

Das Laborenergiesystem wird über die 400V-Einspeisung des Labors versorgt. Diese Versorgung bildet in Kombination mit einer variablen Netzimpedanz das vorgelagerte 110kV-Netz ab. Über zwei Stufentransformatoren in den Umspannwerken 'UW Aurich' und 'UW Marienhafe' erfolgt die Einspeisung in den Netzbereich, welcher als Nachbildung des 20kV-Mittelspannungsnetzes fungiert. Die Bemessungsspannung dieses Netzbereichs beträgt im Demonstratormaßstab 230V. In der vorliegenden Konfiguration ist das Laborenergiesystem in zwei voneinander getrennte Netzbereiche aufgeteilt (s. Schattierung in Abbildung 2). Diese Konfiguration des Laborenergiesystems wird für alle weiteren Betrachtungen verwendet.

IV. MODELLIERUNG DES LABORENERGIESYSTEMS

Das Laborenergiesystem wurde mit der Netzberechnungssoftware PowerFactory der Firma DlgSILENT in zwei Varianten modelliert.

A. Netzmodell auf Basis von Typenschilddaten

Grundidee für das Netzmodell auf der Basis von Typenschilddaten ist die Modellierung anhand von Informationen,

welche dem Netzbetreiber im operativen Betrieb zur Verfügung stehen. Generell beschränken sich diese Informationen auf die Angaben des Betriebsmittelherstellers (Typenschilddaten). Zur Modellierung der Stufentransformatoren wurden die Herstellerangaben, wie es in der Praxis üblich ist, durch Erfahrungswerte ergänzt. Hier fanden insbesondere Kennwerte aus dem ABB Schaltanlagen-Handbuch Verwendung [1]. Lediglich zur Modellierung der Laborversorgung (Slackknoten) sind hinsichtlich der Kurzschlussleistung und -impedanz Messdaten verwendet worden.

B. Netzmodell auf Basis von Detailinformationen

Die Entwicklung eines Netzmodells auf Grundlage von Detailinformationen ist für den operativen Netzbetrieb nicht realistisch. Ein solches Netzmodell, welches ausschließlich auf Messdaten basiert, kann nur für ein Energiesystem im Demonstratormaßstab mit begrenztem Aufwand angefertigt werden. Die Möglichkeit der messtechnischen Erfassung eines jeden Betriebsmittels wäre im operativen Netzbetrieb zu zeitaufwändig.

Alle im Typenschildmodell aufgeführten Betriebsmittel basieren in dem Detailmodell auf Messdaten. Neben den verwendeten Betriebsmitteln sind außerdem die Kontakt- und Schaltwiderstände der Schalter und Sammelschienensysteme des Demonstrators messtechnisch erfasst und in das Netzmodell aufgenommen worden. Die Einbeziehung dieser Impedanzen, welche in Netzmodellen des operativen Betriebs nicht berücksichtigt werden, erhöht die Komplexität des angefertigten

Netzmodells deutlich, hat jedoch einen erheblichen Einfluss auf die Qualität des Netzmodells.

C. Validierung der Netzmodelle

Im Anschluss an die Modellierung wurden die Netzmodelle durch zwei Validierungstests am Laborenergiesystem bzgl. der Abbildungsgüte der Systemeigenschaften bewertet.

In einem ersten Schritt wurde ein üblicher Kurzschlussstest durchgeführt. Parallel zu dem Experiment erfolgte die Kurzschlussberechnung anhand der beiden Netzmodelle in PowerFactory. Im Anschluss wurden die Berechnungs- und Messergebnisse verglichen.

Für den zweiten Validierungstest befand sich das Laborenergiesystem im gekuppelten Zustand, d.h. die Unterteilung in zwei Netzbereiche wurde für diesen Test aufgelöst und das Netz im Verbund betrieben. Anschließend wurde der Stufentransformator im 'UW Marienhaf' in einem Intervall von 10s herabgestuft, wobei die Stufe des Transformators im 'UW Aurich' konstant gehalten wurde. Durch die Kupplung des gesamten Versuchsnetzes bilden sich in diesem Kreisleistungsflüsse aus. Die messtechnische Erfassung erfolgte durch die in Kapitel III beschriebenen Messumformer. Die Vorausberechnung der Zweigströme und Lastflüsse dieses Tests stellt durch die starke Vermaschung des Laborenergiesystems eine große Herausforderung an die erstellten Netzmodelle.

Mittels der Validierungstests konnte die Abbildung der qualitativen Systemeigenschaften des Laborenergiesystems durch das Detailmodell bestätigt werden. Das Netzmodell nach Typenschilddaten kann diese Eigenschaften nicht aufweisen. Die Auswertung der Ergebnisse zeigt, dass die Ursache in der Abbildung der X/R Verhältnisse des Laborenergiesystems liegt. Dieses wird von dem Netzmodell auf Basis von Detailinformationen wiedergegeben, jedoch nicht durch das Typenschildmodell.

In dem operativen Netzbetrieb steht dem Netzbetreiber nur ein auf Typenschilddaten basierendes Modell zur Verfügung. Da derartige Modelle für die gesamte Netzplanung im operativen Betrieb herangezogen werden, scheint eine Abbildung der Systemeigenschaften durch dieses Modell für das Energiesystem im Gegensatz zu dem verwendeten Laborenergiesystem gegeben zu sein. Zur Beurteilung dieser Vermutung wird das Typenschildmodell trotz der Ergebnisse aus den Validierungstests für die weiteren Untersuchungen verwendet.

V. BERECHNUNG DER SENSITIVITÄTEN

Nach der Modellierung des Laborenergiesystems sowie der Validierung der erstellten Netzmodelle folgt die Berechnung der Spannungssensitivitäten.

A. Theoretischer Hintergrund

Die Grundüberlegungen zur Berechnung der Sensitivitäten von Knotenspannungen sowohl in Bezug auf den Betrag U als auch auf den Winkel δ basieren auf den sogenannten Netzgleichungen. Diese Netzgleichungen entstehen durch die Anwendung der Kirchhoffschen Gesetze auf ein Admittanznetzwerk. Die Lösung der Netzgleichungen erfolgt mittels einer Taylor-Entwicklung mit Abbruch nach dem ersten Glied.

Die in Gleichung (1) zusammengefasste Notation stellt das linearisierte Gleichungssystem dar, welches die Basis zur Berechnung der Spannungssensitivitäten bildet. Die Koeffizientenmatrix J wird allgemein als Jacobimatrix bezeichnet [2].

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} = J \cdot \begin{bmatrix} \Delta U_j \\ \Delta \delta_j \end{bmatrix} \text{ mit } i, j = 1, \dots, n \quad (1)$$

Die Lösung des linearisierten Modells bzgl. des Knotenspannungsbetrags und -winkels lautet dann:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_j \\ \Delta \delta_j \end{bmatrix} = J^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

Die Elemente der inversen Jacobimatrix entsprechen den Sensitivitäten des Spannungsbetrags und -winkels in Abhängigkeit einer Variation von Wirk- bzw. Blindleistung. Für den LOM-Betrieb werden jedoch die Sensitivitäten bzgl. der Knotenscheinleistung benötigt. Es bedarf daher einer Modifizierung der inversen Jacobimatrix zur Herleitung der speziellen Lösung für den LOM-Betrieb.

Voraussetzung der speziellen Lösung für den LOM-Betrieb stellt die Annahme eines konstanten Leistungsfaktors (PF) für die betrachtete Leistungsänderung eines Systemarbeitspunktes (Index i) vom ursprünglichen Arbeitspunkt (Index i_0) dar:

$$PF_i = \cos\left(\arctan\left(\frac{P_i}{Q_i}\right)\right) \equiv \cos\left(\arctan\left(\frac{P_{i_0}}{Q_{i_0}}\right)\right) \quad (3)$$

Unter der Annahme des konstanten Leistungsfaktors (s. Gleichung (3)) entsteht durch die Umrechnung mit diesem die benötigte modifizierte Form der inversen Jacobimatrix, wie in Gleichung (4) dargestellt. Die ursprünglichen Elemente der Jacobimatrix, d.h. die Spannungssensitivitäten bezüglich der Wirk- und Blindleistung liegen nun hinsichtlich der betragsmäßigen Variation der Knotenscheinleistungen vor. Dies entspricht somit der Lösung des LOM-Betriebs (s. Gleichung (4)). Die dargestellte Herleitung der modifizierten Jacobimatrix basiert auf Forschungsarbeiten von Prof. Dr. Diedrichs.

$$[J_S^{-1}]_{i,j} = [J^{-1}]_{i,j} \cdot PF_j + [J^{-1}]_{i,n+j} \cdot \sin(\arccos(PF_j)) \quad (4)$$

$$\text{mit } i = 1, \dots, 2n \text{ und } j = 1, \dots, n$$

B. Durchführung

Die Sensitivitätsberechnungen beschränken sich auf den Leerlaufbetrieb des Laborenergiesystems. Berechnet wurden für beide Netzmodelle die Sensitivitäten der Spannungsbeträge eines jeden Netzknotens bzgl. der Änderung von Wirk-/Blindleistung am Netzknoten 'SA Georgsheil'. Diese Berechnung wurde für diverse P/Q-Arbeitspunkte dieses Netzknotens durchgeführt. Durch die in Abschnitt A beschriebene Umrechnung mit dem konstanten Leistungsfaktor liegen die Sensitivitäten in Abhängigkeit des Betrags der Knotenscheinleistung vor.

Eine Erweiterung des LOM-Betriebs beinhaltet die Betrachtung von Spannungssensitivitäten entfernter Netzknoten. Dieser Betriebsmodus wurde ebenfalls untersucht. Das Ergebnis für den Standard des LOM-Betriebs ist auf diese Erweiterung

nung übertragbar. Es konnten durch den betrachteten Netzknoten keine Auswirkungen auf das Ergebnis dieser Untersuchung festgestellt werden. Die folgenden Ausführungen beschränken sich daher auf den Standard des LOM-Betriebs.

C. Darstellung der Berechnungsergebnisse

Die Sensitivitäten der Spannungsbeträge sind von dem jeweiligen Systemarbeitspunkt abhängig. Werden die Sensitivitäten flächendeckend für die Systemarbeitspunkte eines Bereichs berechnet, so können diese dreidimensional gegenüber den P/Q-Arbeitspunkten dargestellt werden. Eine kubische Interpolation durch die einzelnen Arbeitspunkte liefert die dargestellte Interpolationsfläche. Wirk- und Blindleistung der Arbeitspunkte sind auf der x,y-Achse, die Sensitivitäten auf der z-Achse abgebildet. Die Darstellung erfolgt im Erzeugerzählpeilsystem.

In Abbildung 3 ist das Berechnungsergebnis des Typenschildmodells zu sehen. Die Berechnung mittels des Detailmodells (s. Abbildung 4) weist augenscheinlich große Unterschiede zu diesem Ergebnis auf. In beiden Interpolationsflächen ist ein Bereich minimaler Sensitivitäten zu erkennen, jedoch weicht die Lage dieses Bereichs stark voneinander ab.

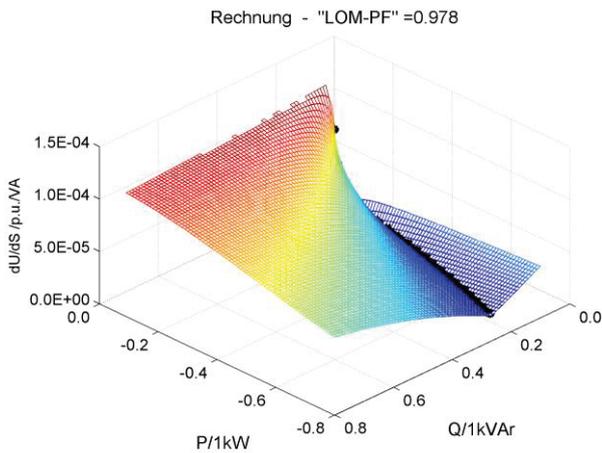


Abbildung 3: Berechnung durch Typenschildmodell

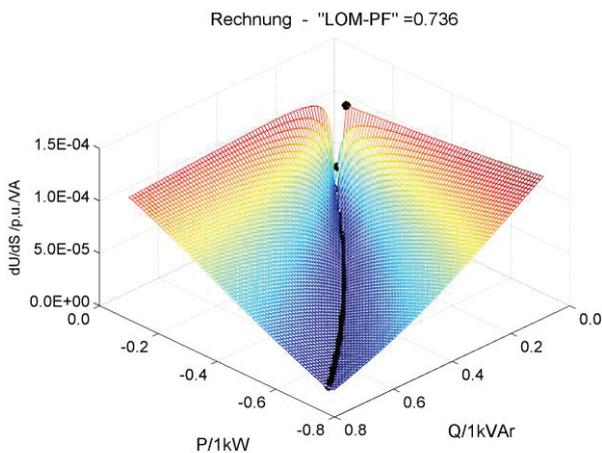


Abbildung 4: Berechnung durch Detailmodell

Des Weiteren sind in den Ergebnisdarstellungen die Minima der Interpolationsflächen durch schwarze Markierungen dargestellt. Aus diesen Arbeitspunkten leitet sich der gesuchte LOM-PF ab. Dieser beläuft sich für das Typenschildmodell auf 0,978 und für das Detailmodell auf 0,736.

VI. EXPERIMENTELLE FESTSTELLUNG DER SENSITIVITÄTEN

Mittels einer Störgröße am Netzknoten 'SA Georgsheil' (s. Abbildung 2) konnten diverse P/Q-Arbeitspunkte realisiert werden. Durch die Variation von Wirk- und Blindleistung um den Arbeitspunkt mit dem Leistungsfaktor von diesem, entsteht eine Änderung des Betrags der Knotenscheinleistung, welche, je nach Sensitivitätseigenschaft des Laborenergiesystems, einen Einfluss auf die Spannungsbeträge der anderen Netzknoten hat. Die Änderung der Störgrößenleistungen sollen ca. 10% der Leistungen des P/Q-Arbeitspunktes betragen.

A. Versuchsaufbau

Die experimenteltechnische Umsetzung der Leistungsvariationen erfolgte durch zwei Komponenten, eine konstante und eine variable.

Die konstante Komponente wird zur Einstellung diverser P/Q-Arbeitspunkte benötigt. Bei der Auswahl der Experimenteltechnik galt es das Auftreten von parasitären Effekten bei der Variation um den Systemarbeitspunkt durch die Auswahl des Lasttyps zu vermeiden, wie sie z.B. durch Zeitkonstanten bei der Verwendung motorischer Lasten zu erwarten wären. Diese Voraussetzungen konnten durch den Einsatz einer Stromrichterlast erfüllt werden. Des Weiteren ermöglichte die Verwendung dieses Lasttyps eine nahezu uneingeschränkte Einstellung der P/Q-Arbeitspunkte. Die Vorgabe der P/Q-Arbeitspunkte erfolgte aus der übergeordneten Leitebene.

Bei der Realisierung der variablen Komponente war ebenfalls darauf zu achten, größere Zeitkonstanten im Vergleich zur Periodendauer einer Störung zu vermeiden. Außerdem wurde eine ausreichende Auflösung benötigt, um die Variation des Arbeitspunkts mit konstantem Leistungsfaktor zu gewährleisten. Mithilfe einer Kombination aus steuerbaren ohmschen und induktiven Lasten konnten diskrete Lastsprünge realisiert und somit die Anforderungen erfüllt werden. Die Steuerung der Lasten war ebenfalls Teil der übergeordneten Leitebene, aus der die Vorgabe von Zeitreihen erfolgen konnte.

B. Durchführung

Aus Zeitgründen wurde das Experiment auf die Betrachtung eines Leistungsquadranten beschränkt. Ausgewählt wurde der Leistungsquadrant, welcher die relevanten Sensitivitäten zur Verbesserung der Spannungshaltung bei großen Lasten beinhaltet. Es sind 49 Arbeitspunkte erfasst worden.

Die messtechnische Erfassung erfolgte mit einem transienten Messsystem. Dieses wurde zum einen zur Strom- und Spannungsmessung der Störgröße und zum anderen zur Aufzeichnung der Knotenspannungen der betrachteten Netzknoten verwendet. Die Abtastrate belief sich auf 1000 Samples/s.

Die Periodendauer einer Störung, d.h. die Zeit in der die Variation um -10% und +10% der Leistung des Arbeitspunkts erfolgt, betrug 10s. Für die Messung eines Arbeitspunkts wurde eine Messdauer von 120s festgelegt.

C. Darstellung der Messergebnisse

Zur dreidimensionalen Darstellung wurden die Messergebnisse kubisch interpoliert. In Abbildung 5 ist die Interpolationsfläche zu erkennen. Die grauen Markierungen stellen die 49 Messergebnisse, die schwarzen die Minima der Fläche dar.

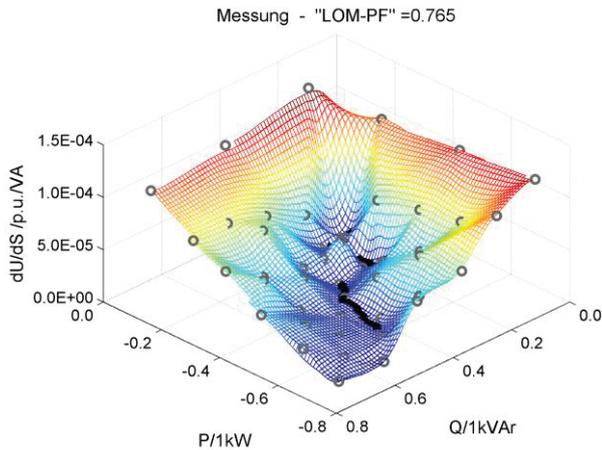


Abbildung 5: Messergebnis

Nach Umrechnung der Minima der Interpolationsfläche ergibt sich der LOM-PF. Dieser beläuft sich auf 0,765. Bei diesem Ergebnis ist zu beachten, dass durch die geringe Anzahl an Stützwerten, durch Ungenauigkeiten während der Messung sowie durch die verwendete Interpolationsmethode, Sprünge in der Interpolationsfläche auftreten, welche nicht zu erwarten waren und die Ermittlung der Minima erschwert.

VII. ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Die Sensitivitäten des verwendeten Laborenergiesystems wurden messtechnisch festgestellt und durch zwei Netzmodelle unterschiedlichen Informationsgehalts vorausberechnet. Durch den Vergleich der Berechnungs- und Messergebnisse wurde die Eignung der angefertigten Netzmodelle zur Vorausberechnung des LOM-PF bewertet.

Der messtechnisch festgestellte LOM-PF beträgt 0,765 (s. Abbildung 5). Eine Abbildung der Sensitivitätseigenschaften sowie eine Vorausberechnung des LOM-PF ist für das Laborenergiesystem nur durch die Modellierung auf Grundlage von Detailinformationen mit geringen Abweichungen möglich (s. Abbildung 4). Der berechnete LOM-PF beläuft sich auf 0,736. Die Ergebnisse des Typenschildmodells weisen hingegen augenscheinlich erhebliche Abweichungen auf (s. Abbildung 3). Die Interpolationsfläche dieser Berechnung zeigt ebenfalls einen Bereich minimaler Sensitivitäten. Dieser ist jedoch, mit einem LOM-PF von 0,978, stark verschoben.

VIII. KONSEQUENZ FÜR DEN OPERATIVEN NETZBETRIEB

Während die Ergebnisse der Untersuchungen im Demonstratormaßstab eindeutig sind, stellt sich die Frage nach der Übertragbarkeit dieses Ergebnisses auf den operativen Netzbetrieb.

Die Schalt- und Kontaktwiderstände der Schalter und Sammelschienenabbildungen stellen durch die Skalierung auf den Demonstratormaßstab atypisch große Resistenzen dar

und haben somit einen erheblichen Einfluss auf die Impedanzrelationen des gesamten Laborenergiesystems. Da dieser Einfluss nur durch das Detailmodell erfasst wird, bildet nur dieses Netzmodell die korrekten Impedanzrelationen ab. Das Ergebnis spiegelt sich in den Berechnungen der Validierungstests wider.

Der LOM-Betrieb beinhaltet die gezielte Steuerung von Lastflüssen. Es war daher zu vermuten, dass die Vorausberechnung des LOM-PF maßgeblich von der Abbildungsgüte der Lastflüsse und somit der Impedanzrelationen des betrachteten Energiesystems beeinflusst wird. Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen diese Vermutung.

Die wichtigste Kenngröße eines Netzmodells zur Abbildung der Sensitivitätseigenschaften eines Energiesystems und somit zur Vorausberechnung des LOM-PF stellt demnach das X/R-Verhältnis des betrachteten Energiesystems dar.

Was bedeutet das Ergebnis dieser Laborerprobung jedoch für die Verwendung herkömmlicher Netzmodelle zur Vorausberechnung des LOM-PF im operativen Netzbetrieb?

Lassen sich diese Ergebnisse auf den operativen Netzbetrieb übertragen, so wäre die Planung des Verfahrens und somit die Anwendung von diesem unmöglich. Eine Berücksichtigung von Schalt- und Kontaktwiderständen der Schaltanlagen in den Netzmodellen des operativen Netzes ist nicht realistisch.

Die Resistenzen der messtechnisch erfassten Schaltanlagen im Demonstratormaßstab betragen durchschnittlich ca. 300mΩ. Die Resistanz einer 20kV-Mittelspannungsschaltanlage mit vergleichbarer Feldkombination beläuft sich in etwa auf 595μΩ. In Relation zu den jeweiligen Leitungsbelägen weisen die Schaltanlagen im Labor deutlich größere Resistenzen auf, als die 20kV-Mittelspannungsschaltanlagen. Während die Berücksichtigung dieser im Demonstratormaßstab die Impedanzrelationen erheblich beeinflusst, weisen die Übergangswiderstände der Schaltanlagen auf Mittelspannungsebene keinen nennenswerten Einfluss auf die Impedanzrelationen auf.

Eine maßgebliche Beeinflussung der Systemeigenschaften, wie es in den Experimenten am Laborenergiesystem zu beobachten war, ist nicht zu erwarten. Die Modellierung des 20kV-Mittelspannungsnetzes des operativen Betriebs nach Typenschild- bzw. Datenblattangaben ist demnach für die Berechnung der Sensitivitäten sowie für eine belastbare Vorausberechnung des LOM-PF ausreichend.

Als Nachweis für die Eignung der herkömmlichen Netzmodelle zur Berechnung des LOM-PF kann der 20kV-Umspannungsbereich 'Bremervörde' der EWE NETZ GmbH angeführt werden. Die Planung des Einsatzes für den LOM-Betrieb in diesem Netzbereich erfolgte auf Grundlage der vorhandenen Netzmodelle des operativen Betriebs. Der LOM-Betrieb wird in diesem Netzbereich seit 2009 erfolgreich angewendet. Der Einsatz des Verfahrens hat einen klassischen Netzausbau, welcher nötig gewesen wäre, erübrigt.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] ABB Schaltanlagen-Handbuch; 12. Auflage; Kapitel 12
- [2] Prof. Dr. Edmund Handschin; "Elektrische Energieübertragungssysteme"; Teil 1; 1983, Seite 80ff