

Forschungsberichtsblatt

| | |
|----------------------|---|
| Thema: | Versorgungsqualität und -sicherheit in der industriellen Produktion bei Einspeisung aus Erneuerbaren Energien (VIPEEER) |
| Zuwendungsempfänger: | Universität Stuttgart, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH) |
| Projektleiter: | Prof. Dr.-Ing. Krzysztof Rudion |
| Projektbearbeitung: | M.Sc. Adrian Eisenmann |
| Projektlaufzeit: | 01.04.2017 bis 31.12.2020 |
| Förderkennzeichen: | BWSGF 17001 |

1. Kurzbeschreibung der Forschungsergebnisse

Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse des Forschungsprojektes VIPEEER zusammengefasst:

- Das Projekt wurde vollumfänglich umgesetzt.
 - Eine Ist-Analyse zum Status Quo der Forschung im Bereich Spannungsqualität,
 - Modellentwicklung für die Spannungsqualität,
 - eine Zustandsschätzung für die Spannungsqualität,
 - ein Monitoringsystem zur Überwachung der Spannungsqualität,
 - der Batteriebetrieb einer Industrieanlage

wurden erfolgreich entwickelt, analysiert und ausgewertet.

- Durch die erstmalige ganzheitliche Betrachtung der Spannungsqualität im derzeit genormten Frequenzbereich bis 2 kHz konnten Interdependenzen der messtechnischen Erfassung, der simulativen Abbildung, der datenbasierten Analyse und der präventiven Vorhersagbarkeit von Phänomenen der Spannungs- und Stromqualität herausgearbeitet werden. Die evaluierten Zusammenhänge ermöglichen eine tiefgehende Analyse der normativ definierten und darüberhinausgehender Phänomene sowie die Evaluierung neuer Forschungsfragen für anschließende Folgeprojekte. Durch den Kompetenzgewinn im Zuge des Forschungsprojekts am Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik konnte ein breites Forschungsfeld erschlossen und weitere, spannende Forschungsfragen definiert werden.
- Der Forschungserfolg und der Wissenstransfer konnte durch zahlreiche Veröffentlichungen mit peer-review auf internationalen Konferenzen und Fachtagungen belegt und gefördert werden. Folgende Veröffentlichungen sind in mittel- und unmittelbarem Zusammenhang mit dem Forschungsauftrag zum Projekt VIPEEER im Zeitraum 04/2017 – 12/2020 entstanden:

2018:

- A. Eisenmann, T. Streubel, K. Rudion, "Power Quality Monitoring und Prognose in Verteilnetzen", Ingenieurspiegel 4/2018

2019:

- A. Eisenmann, T. Streubel, K. Rudion, "*PQ classification by way of parallel computing-A sensitivity analysis for a real-time LSTM approach using waveform and RMS data*", 13th IEEE PES PowerTech Conference, Mailand, Italien, Juni 23 - 27, 2019, Paper No. 777.
- A. Eisenmann, T. Streubel, K. Rudion, "*Development of handy tools for Power Quality analysis*", 10th PAC World Conference, Glasgow, UK, Juni 18 - 20, 2019, Paper No. PW68.
- A. Eisenmann, T. Streubel, K. Rudion, "*PQ prediction by way of parallel computing - benchmark and sensitivity analysis for classical ML approaches*", 25th International Conference & Exhibition on Electricity Distribution - CIRED, Madrid, Spanien, Juni 3 - 6, 2019, Paper No. 2049.
- A. Eisenmann, T. Streubel, K. Rudion, "*Power Quality Prediction by way of Parallel Computing - A New Approach Based on a Long Short-Term Memory Network*", The 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe 2019), September 29 – Oktober 02, 2019, Bukarest, Rumänien, Paper No. 410.

2021:

- A. Eisenmann, T. Streubel, K. Rudion, "*An Investigation on Feature Extraction and Feature Selection for Power Quality Classification with High Resolution and RMS Data*", The 9th International Conference on Renewable Power Generation – IET RPG, März 01 - 02, 2021, Online/Dublin, Irland, Paper No. 0130.
- Im Folgenden Erläuterungen zu den wesentlichen Erkenntnissen der Arbeitspakete.
 - Bei der Ist-Analyse wurden Vorarbeiten zum Themenfeld zusammengetragen und analysiert sowie die Randbedingungen der notwendigen Messinfrastruktur festgesetzt. Weiter fand eine Auswahl einer geeigneten Rechnerinfrastruktur zur Bearbeitung des simulativen Teils statt. Zusätzlich wurden bereits geleistete Vorarbeiten am Institut untersucht sowie deren Übertragbarkeit auf die gegebene Problemstellung evaluiert. Ein geeignetes Messsystem, das dem in Arbeitspaket 4 zu entwickelnden Monitoring System zugrunde liegt, konnte identifiziert und installiert werden. Dabei konnte von der frühzeitigen Berücksichtigung der Messeinrichtungen in der Planungsphase des Neubaus der Forschungsfabrik ARENA2036 profitiert werden. Die Installation des Messsystems fand in der Niederspannungshauptverteilung des Gebäudes statt. Als Rechnerplattform wurde ein Tandemsystem aus zwei vernetzten, baugleichen Recheneinheiten mit je 32 virtuellen Kernen, 128 GB Arbeitsspeicher, 3 graphischen Rechensystemen und 19 TB Datenspeicher umgesetzt.
 - Bei der Modellentwicklung für die Spannungsqualität konnten verschiedene industrielle Verbraucher in der Forschungsfabrik ARENA2036 vermessen und charakterisiert werden. Damit wurde für jede Maschine ein virtuelles Abbild der elektrischen Betriebszustände erstellt. Die virtuellen Zwillinge der Maschinen wurden zu einem Abbild eines virtuellen Maschinenparks zusammengefügt.

Dieser kann vom Anlagenbetreiber frei zusammengestellt werden. Als Messmittel wurde hierbei ein hochauflösendes Messgerät mit einer maximalen Auflösung von 409,6 kHz verwendet. Zusätzlich wurde die auf dem Dach der Forschungsfabrik befindliche Photovoltaikanlage mit einer installierten Leistung von 77,8 kW_p erfasst und in die Simulation mit aufgenommen. Fokus lag hierbei auf der Beeinflussung des Netzzustandes und damit des Maschinenparks durch die Netzzurückwirkungen der Photovoltaikanlage.

- Bei der Zustandsschätzung für die Spannungsqualität wurde zunächst untersucht, inwiefern klassische Ansätze zur Netz-Zustandsschätzung auf den Anwendungsfall und die besonderen Erfordernisse des Forschungsfeldes Spannungsqualität anwendbar sind. Eine direkte Übertragbarkeit besteht nach Analyse nicht, da das zugrundeliegende Modell einer Zustandsschätzung für Spannungsqualität eine höhere Anzahl an Freiheitsgraden birgt und der Komplexitätsgrad im Vergleich zu einer klassischen Zustandsschätzung, beispielsweise über die etablierte Methode der gewichteten kleinsten Fehlerquadrate (engl. weighted least square (WLS)), stark zunimmt. Dies korreliert unmittelbar mit der Genauigkeit der Zustandsschätzung, was zu nicht hinreichenden Ergebnissen führt. Deshalb wurde ein Ansatz aus dem Bereich des maschinellen Lernens gewählt, der gut mit der Erfassung von Spannungsqualitätsproblemen kombiniert werden kann. Zur Klassifikation der Spannungsprobleme und zur zeitreihenbasierten Vorhersage von Spannungsqualitätsproblemen wurden dabei Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens sowie des tiefen Lernens wie der k-Nächste-Nachbarn-Algorithmus, Entscheidungsbaum-basierte Verfahren, Stützvektormethoden und langes Kurzzeitgedächtnis implementiert und getestet. Die Ergebnisse der Verfahren im Vergleich zueinander hängen dabei stark von der zugrundeliegenden Datenbasis ab.
- Beim Monitoringsystem zur Überwachung der Spannungsqualität wurde gemäß den normativen Vorgaben der EN 50160, der EN 61000-2-2, der EN 61000-4-7 und der EN 61000-4-30 eine Benutzeroberfläche zur Darstellung des aktuellen Netzzustandes entwickelt. Mit der Benutzeroberfläche steht ein anschauliches und einfach zu bedienendes Werkzeug zur Verfügung, das zusätzlich zur Abbildung und Analyse der aktuellen Spannungsqualität im Netz eine flexible Einbindung verschiedener Datenquellen und eine laufende Analyse historischer Datensätze ermöglicht. Eine erweiterte Anbindung aktiver Elemente wie steuerbarer Verbraucher oder eines aktiven Filters zur Bereitstellung von zusätzlichen Flexibilitäten im Netz ist für zukünftige Projekte vorgesehen.
- Beim Batteriebetrieb der Industrieanlage wurde anhand eines realen Fallbeispiels der Inselbetrieb einer industriellen Verbraucherstruktur getestet und analysiert. Als Batteriesystem kam hierbei ein Li-NMC System mit einer Kapazität von 28 kWh und einer Spitzenlast von 20 kVA zur Bereitstellung des Inselnetzes zum Einsatz. Vorab wurde ein Verfahren zur simulativen Abschätzung kritischer Netzzustände entwickelt und ausgewertet. Dieses Verfahren beruht auf der Auswertung der Knotenadmittanzmatrix zur Bestimmung auftretender Resonanzen und des Nyquist Kriteriums zur Bestimmung von Instabilitäten im Netz. Die Ergebnisse dieser analytischen Evaluierung der Netzzustände wurde mit Messergebnissen anhand definierter Betriebszustände des Inselsystems evaluiert.

2. Welche Fortschritte ergeben sich für die Wissenschaft und/oder Technik durch die Forschungsergebnisse?

Die erarbeiteten Kompetenzen des Instituts für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart im Bereich der Spannungsqualität industrieller Elektrizitätsnetze bei Einspeisung aus erneuerbaren Energien können einen Mehrwert in den Teilgebieten der störungsfreien Integration Erneuerbarer Energien in zukünftige Elektrizitätsnetze sowie dem sicheren Betrieb moderner Prozesstechnik mit hoher leistungselektronischer Durchdringung in zukunftssicheren Industrie 4.0 Umgebungen liefern.

Die fortschreitende Automatisierung industrieller Prozesstechnik bietet mit dem steigenden Bedarf an Digitalisierung und damit dem erhöhten Datenaufkommen zugleich neue Chancen und Herausforderungen. Insbesondere im Bereich der datengestützten Analyse und Vorhersage von Spannungsqualitätsproblemen konnten über den Stand der Technik hinausgehende Erkenntnisse gewonnen werden.

Die Feststellung und Zuordnung von Spannungsqualitätsproblemen wurde hierbei anhand von Methoden und Konzepten untersucht, die dem Stand der Technik im Bereich des maschinellen- und des tiefgehenden Lernens entsprechen. Besonders erfolgreiche und etablierte Ansätze aus dem Bereich der Sprach- und Bilderkennung wurden hierbei zunächst auf das Aufgabenfeld der Spannungsqualität angepasst und miteinander verglichen. Dieser Vergleich stellt quantitativ den anwendungsbezogenen Stand der Technik im Bereich des maschinellen Lernens dar. Zusätzlich wurden weitergehende Ansätze mit methodischen Erweiterungen zur Flexibilisierung und Erweiterung der Algorithmen entwickelt.

Ziel dieser Erweiterungen war zum einen eine erhöhte Flexibilisierung der Algorithmen zur Entkopplung der Methoden von den bestimmenden Randbedingungen, um die Implementierung eines autonom arbeitenden Optimierungsverfahrens zur Verarbeitung von Echtzeitdaten zu ermöglichen und zum anderen ein selbstlernender Ansatz im Bereich der intelligenten Einsatzplanung elektrischer Maschinen für eine störungsfreie Interaktion elektrischer Verbraucher und Erzeugerstrukturen.

Die gewonnenen Erkenntnisse, Methoden der datengetriebenen Analyse des Systemzustandes und zugehörigen Simulationstools können auf andere Systeme übertragen werden und bilden somit die Grundlage für Folgeprojekte. Die Vorbereitung einer umfassenden und vollständig autarken Inselnetzbildung für die Forschungsfabrik ARENA2036 konnte dabei bereits vorbereitend in Angriff genommen werden. Entscheidende Stellen im universitären und im erweiterten Projektumfeld wurden hierbei miteinbezogen und Abstimmungen zur konkreten Umsetzbarkeit des Vorhabens konnten bereits durchgeführt werden. Diese vorbereitenden Maßnahmen sollen als Grundlage für unmittelbar anschließende Untersuchungen dienen und eine zeitnahe Realisierung bei Minimierung der Vorlaufzeiten für solch ein planungsintensives Vorhaben ermöglichen.

Die Fortschritte im Bereich der datengetriebenen Algorithmen konnten anhand zahlreicher wissenschaftlicher Publikationen auf internationalen Konferenzen veröffentlicht werden. Dabei wurden die entwickelten, neuartigen Methoden im internationalen Umfeld besprochen und mit dem internationalen Forschungsstand abgeglichen sowie neue Möglichkeiten zur Erweiterung des Einsatzfeldes ermittelt.

3. Nutzen, insbesondere praktische Verwertbarkeit der Ergebnisse und Erfahrungen

Die erarbeiteten Lösungen des Instituts für Energieübertragung und Hochspannungstechnik der Universität Stuttgart zur Identifikation, Klassifizierung, Vorhersage und Auslöschung von Störfällen der Spannungsqualität können einen Beitrag zum sicheren Betrieb zukünftiger Elektrizitätsnetze mit hoher erneuerbarer Einspeisung, insbesondere im Hinblick auf ein hochautomatisiertes, industrielles Umfeld, leisten.

Dies gewinnt für zukünftige Netze zunehmend an Bedeutung, da durch die zunehmende Automatisierung der Anteil nicht-linearer Verbraucher im industriellen Sektor steigt. Dieser Anstieg drückt sich ohne entsprechende Gegenmaßnahmen unmittelbar in einer erhöhten Gesamtverzerrung der Spannung und damit einer verringerten Netzqualität aus. Konsequenz daraus können erhöhte Netzverluste, Beeinträchtigungen der Funktionsweise von Steuer- und Schutzelementen bis hin zum Ausfall von einzelnen Maschinen und ganzen Produktionsstraßen sein.

Verstärkt wird dieser Effekt durch eine zunehmende Integration von erneuerbaren Energien, auch in industriellen Elektrizitätsnetzen. Besonders Photovoltaik Anlagen im kleinen und mittleren Gewerbe, aber auch in Kombination mit Windenergieanlagen bei größeren industriellen Standpunkten tragen zu einer Erhöhung der Spannungsverzerrung bei.

Zu diesem Zweck wurde unter anderem eine Mensch-Maschine-Schnittstelle entwickelt, anhand derer eine Einsatzplanung für einen virtuellen Maschinenpark erstellt werden kann. Nach Erstellung eines elektrischen Fingerabdrucks des Maschinenparks mittels hochauflösender Messtechnik kann ein virtuelles Abbild der Maschinen erstellt werden. Insbesondere die Netzurückwirkungen bei jedem Betriebspunkt werden hierbei charakterisiert und quantifiziert. Diese Netzurückwirkungen werden dem Algorithmus zur Einsatzplanung übergeben. Unter Berücksichtigung der vom Anlagenbetreiber vorgegebenen Einsatzpläne bestimmt der Algorithmus Flexibilitätsoptionen (zeitlich und Betriebspunkt) für Betrieb der Maschinen und versucht diese so einzusetzen, dass eine gegenseitige Auslöschung der Netzurückwirkungen nach dem Superpositionsprinzip stattfindet und damit die Netzqualität erhöht wird. Selbstverständlich können auch weitere Optimierungsziele und Stellgrößen definiert werden.

Ziel ist hierbei also eine intelligente Anlagensteuerung mit definierbarem Automatisierungsgrad, um negative Netzurückwirkungen der Maschinen zu vermeiden. Nach üblichem Stand der Technik wird in Fällen stark beeinträchtigter Netzqualität ein Filter verbaut, das je nach Bauart eine passive oder aktive Spannungsglättung zum Ziel hat. Die Führungsstrategie der Anlagen ist als Ergänzung und/oder Substitution der klassischen Filterinstallation konzipiert. Die Mensch-Maschine Schnittstelle bietet somit auch einen Verknüpfungspunkt der simulativen Abbildung der Netzgegebenheiten zu realer Aktorik und Sensorik.

Daneben bieten die entwickelten Methodiken zur Erfassung und Prognostizierung des Netzzustandes einen essentiellen Baustein zur präventiven Vermeidung von Ausfällen durch eine unzureichende Netzqualität. Je mehr Daten dem Algorithmus hierbei zur Verfügung stehen, desto höher wird die Wahrscheinlichkeit einer ausreichend genauen Prognose und damit eines verminderten Ausfallrisikos.

Die Ergebnisse und Erfahrungen aus VIPEER fließen daneben direkt in die Lehre des Instituts ein. Damit können Studenten in den Lehrveranstaltungen aus erster Hand auf den aktuellsten Stand der Technik gebracht und an aktuelle Forschungsfelder herangeführt werden.

4. Konzept zum Ergebnis- und Forschungstransfer auch in projektfremde Anwendungen und Branchen

Auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf projektfremde Strukturen wurde bei der Umsetzung aller Lösungen ein besonderes Augenmerk gelegt, um einen Mehrwert über die Projektgrenzen hinweg zu heben.

Deshalb wurden neben anwendungsspezifischen Lösungen, wie der Umsetzung des elektrischen Inselsystems anhand einer gegebenen Verbraucherstruktur oder der Vermessung und Charakterisierung spezifischer Verbraucher der Forschungsfabrik ARENA2036 stets verstärkt die Erhöhung der Abstraktionsstufe und Ableitung allgemeingültiger Erkenntnisse fokussiert.

So konnten wichtige und grundlegende Erkenntnisse im Bereich der zeitreihenbasierten Vorhersage von elektrischen Kenngrößen gewonnen werden, die in ihrer Aussage unter Berücksichtigung der geltenden Randbedingungen direkt übertragbar auf andere Messdaten mit ähnlicher Datenstruktur jedweder Art, bspw. Wetter-, Finanz- oder Verkehrsdaten sind.

Durch die Veröffentlichung der Ergebnisse und der entwickelten Methoden können auch Dritte von den Projekterfahrungen profitieren und das gewonnene Wissen unmittelbar auf neue Problemstellungen anwenden. Darüber hinaus stellt der Transfer der Ergebnisse in die Lehre des Instituts einen unmittelbaren Mehrwert für die studentische Ausbildung dar. Durch die besondere Berücksichtigung der Übertragbarkeit der Ergebnisse sowie die anwendungsnahe Implementierung der Ansätze können vielzählige und anschauliche Szenarien generiert werden, die einen studentischen Einstieg in das zukunftsreiche Themenfeld des behandelten Forschungsgebiets erleichtern.

Durch den umgesetzten Grad an Flexibilisierung der Methodiken und der damit einhergehenden Vermeidung von problemspezifischen Insellösungen, ist eine Übertragung der Algorithmen auf andere Problemfelder umsetzbar.

So können die entwickelten Methoden auch in den Bereichen der Netzplanung und insbesondere der Elektromobilität Einsatz finden. Ein denkbare Anwendungsfeld in der Netzplanung ist beispielsweise die störungsarme Integration von dezentralen Erzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz. Durch die leistungselektronische Kopplung der Erzeugungsanlagen an das Niederspannungsnetz kann ein direkter Transfer des Lösungskonzepts unter Berücksichtigung der veränderten Randbedingungen erfolgen. Problematiken wie vorzeitige Alterung von Netzkomponenten, fehlerhaftes Verhalten von angeschlossenen Steuer- Mess- und Regeleinheiten sowie die Verringerung von Netzverlusten durch Minimierung der Spannungs- und Stromverzerrung und damit einhergehend eine Erhöhung der Netzqualität können durch die entwickelten Ansätze adressiert werden.

Besonders im Bereich der Elektromobilität, die im Zuge der aktuell stattfindenden Energie- und Mobilitätswende, ist eine störungsarme Integration der benötigten Ladeinfrastruktur, gestützt durch die entwickelten Methoden, denkbar.

Besonders die rein datenbasierten Methodiken bieten durch den selbstoptimierenden und selbstlernenden Ansatz hierbei den Vorteil, einen völlig branchenunspezifischen Lösungsansatz bereitzustellen. Die entwickelte Methodik bietet somit durch den generalistischen Ansatz einer datengetriebenen, Sensorik und Aktorik umfassenden Plattform zur Analyse und Beeinflussung des Netzzustandes viele Schnittstellen zu vorherrschenden, projektübergreifenden Problemfeldern.