Automatisierte Bewertung transienter Vorgänge in Microgrids — „Autotrans“

Jirko Tegeler*, Edgar Diego Gomez Anccas, Detlef Schulz
Professur für Elektrische Energiesysteme
Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr
Hamburg, Deutschland
*jirko.tegeler@hsu.hamburg

***Kurzfassung* – Dezentrale Energiequellen wie Photovoltaik- und Windenergieanlagen sowie Batteriespeicher und Brennstoffzellen werden über leistungselektronische Bauelemente an das Netz angeschlossen. Diese Bauelemente werden über programmierbare Controller geregelt, um z. B. Aufgaben wie Leistungsmaximierung, Spannungs- und Frequenzregelung zu übernehmen. Dabei spielt die Wahl der Regelparameter der Controller eine wichtige Rolle. Diese bestimmen die Reaktionszeit und Resilienz der Systeme im stationären Betrieb sowie bei transienten Vorgängen. Da leistungselektronische Bauelemente wie Wechselrichter einen nichtlinearen Charakter aufweisen, muss eine Bewertung der Regelparameter über den gesamten Arbeitsbereich erfolgen. In dieser Arbeit wird ein Prototyp vorgestellt, der zur automatisierten Bewertung transienter Vorgänge in Microgrids eingesetzt werden kann. Der Prototyp besteht aus in Gruppen segmentierten Hochlastwiderständen, die über Halbleiterrelais geschaltet werden können. Ein zentraler Echtzeitsimulator dient als Kommunikationsinterface sowie Steuerungsrechner. In einem Niederspannungsinselnetz im Labormaßstab (10 kW) kann die Funktionsweise des Prototyps bei variierenden Lastzuständen und Regelparametern validiert werden.**

Stichworte – Microgrid, Echtzeitsimulator, Transiente Vorgänge, Regelparameter

NOMENKLATUR

C_g in F	Filterkapazität
$\boldsymbol{i}_\mathbf{s}^*$ in A	Referenzstrom
i_d , i_q in A	Gemessener Strom in dq-Koordinaten
k_iid , k_iiq	Regelparameter i-Anteil
k_pid , k_piq	Regelparameter p-Anteil
R in Ω	Wirkwiderstand
Δv_d in V	Spannungsfehler
v_d , v_q in V	Gemessene Spannung in dq-Koordinaten
ω in rad/s	Netzfrequenz

I. EINLEITUNG

In Zeiten des Klimawandels ändert sich auch die Energieversorgung. Dabei führt der Weg von konventionellen zentralen Kraftwerken hin zu dezentralen Stromerzeugern aus erneuerbaren Energien. Der Netzanschluss dieser Anlagen basiert auf leistungselektronischen Bauteilen. Die Regelung dieser Bauteile bestimmt das Verhalten, welches das angeschlossene System definiert. Ein Ziel kann z. B. in der Maximierung der Ausgangsleistung, wie es bei Maximum-Power-Point-geregelten netzgekoppelten PV-Systemen der Fall ist, bestehen [1]. In diesem Fall synchronisiert sich die Anlage mit einem bestehenden Netz und wählt den Betriebspunkt des maximalen Leistungs-Outputs aus. Alternativ kann eine Regelung gewählt werden, die aktiv Spannung oder Frequenz des angeschlossenen Systems stabilisiert, wie es bei netzstützenden oder -bildenden Wechselrichtern der Fall ist [2]. Hierbei wird das System bei transienten Vorgängen durch die Anpassung des Regelaufwands in Abhängigkeit von den Messwerten stabilisiert. Da ein Leistungsstrang aus Quelle und Leistungselektronik ein nichtlineares System darstellt, ist eine ganzheitliche Betrachtung der möglichen Betriebspunkte und Transienten bei der Bewertung der Regelparameter erforderlich. Die Regelparameter können beispielsweise mit dem Verfahren von Ziegler und Nichols oder mit dem von Chien, Hrones und Reswick berechnet werden [3], [4]. Diese Berechnungen sind in der Praxis jedoch nur ein erster Ansatz und müssen häufig noch angepasst werden. Dabei werden die einzelnen Parameter geringfügig geändert und nach dem Trial-and-Error Prinzip getestet. Da dieses Verfahren mit einem hohen Zeitaufwand verbunden ist, wird in dieser Arbeit ein Prototyp entwickelt der zur automatisierten Bewertung der Regelparameter eines Controllers genutzt werden kann. Dieser Beitrag umfasst folgende Punkte:

- Entwicklung eines Laboraufbaus aus konventionellen Hochlastwiderständen, segmentiert in umschaltbare Lastzustände über Halbleiterrelais.
- Flexibles Simulationsmodell zum Programmieren von Lastsequenzen und Regelparameteränderungen.
- Zentrale Steuerungseinheit, die automatisiert die programmierten Lastsequenzen und Parameteränderungen implementiert.
- Experimentelle Validierung des Prototyps in einem Niederspannungsinselnetz für vier Lastzustände und fünf Regelparameter.

In Abschnitt II werden die genutzte Hardware und Software vorgestellt. Zusätzlich wird neben der erforderlichen Schnittstelle zur zentralen Steuerung aller Elemente auch das Programm beschrieben. Eine Reihenfolge aufeinander

DOI: 10.24405/17150

aufbauender Einzeltests der einzelnen Komponenten des Prototyps sowie die Ergebnisse des Gesamtsystemtests werden in Abschnitt III präsentiert. Abschließend gibt Abschnitt IV eine Zusammenfassung und einen Ausblick für zukünftige Arbeiten wieder.

II. GRUNDLAGEN

A. Testumgebung

Der Versuchsaufbau ist in Hardware- und Softwareebenen unterteilt. Die Hardwareebene setzt sich aus einem schwarzstartfähigen Leistungsstrang, der ein 230 V AC-Netz bildet, und dem Prototyp zusammen [5]. Das 230 V AC Netz stellt gleichzeitig die Versorgung des Prototyps sicher. Der Leistungsstrang besteht aus drei parallelen 300 V DC Quellen, die jeweils über einen Aufwärtswandler an einen gemeinsamen Zwischenkreis geschaltet sind. Die Aufwärtswandler regeln den Zwischenkreis auf 700 V DC. Ein dreiphasiger Wechselrichter wird über einen Controller mit einer Schaltfrequenz von 20 kHz gesteuert und nimmt die 700 V DC im Zwischenkreis als Grundlage, um ein AC-Netz mit 230 V_{rms} und 50 Hz aufzubauen.

Dies geschieht nach [6] über netzbildende Regelung sowie Spannungs- und Stromregelkaskaden in der folgenden Form:

$$\boldsymbol{i}_{\mathbf{s}}^{*} = \begin{bmatrix} k_{\mathrm{pid}}\Delta v_{\mathrm{d}} + k_{\mathrm{iid}} \int_0^t \Delta v_{\mathrm{d}}\,\mathrm{d}\tau + i_{\mathrm{d}} - v_{\mathrm{q}} C_{\mathrm{g}} \omega \\ k_{\mathrm{piq}}\Delta v_{\mathrm{d}} + k_{\mathrm{iiq}} \int_0^t \Delta v_{\mathrm{d}}\,\mathrm{d}\tau + i_{\mathrm{q}} + v_{\mathrm{d}} C_{\mathrm{g}} \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

Wobei k_{pid}, k_{iid}, k_{piq} und k_{iiq} als Regelparameter, $\boldsymbol{i}_{\mathbf{s}}^{*}$ als Referenzstrom am Ausgang, v_{d} und v_{q} als gemessene Spannung und i_{d} und i_{q} als gemessener Strom in dq-Koordinaten, Δv_{d} als Spannungsfehler, C_{g} als Filterkapazität und ω als Netzfrequenz definiert werden. Die Nennleistung des gesamten Leistungsstrangs ist auf 10 kW beschränkt. Als Lasten stehen elektronische Lasten und konventionelle Hochlastwiderstände zur Verfügung. Die elektronischen Lasten haben den Vorteil, dass sie frei programmierbar sind. Allerdings sind diese Lasten keine reinen Wirkwiderstände, sondern haben zusätzlich kapazitive und induktive Anteile, die die Regelung der Wechselrichter im Aufbau zusätzlich beeinflussen.

B. Entwickelter Prototyp

Der Prototyp muss prinzipiell aus einer Steuerung, mehreren Relais und einer Last bestehen. Die Steuerung dient zur Programmierung der Sequenzen, der Übergabe der Regelparameter sowie der Ansteuerung der Relais. Die Relais werden zum Zu- und Abschalten der Lasten verwendet. Als Relais können elektromechanische Relais oder Halbleiterrelais verwendet werden. Elektromechanische Relais besitzen mechanische Kontakte und können große Lasten schalten. Halbleiterrelais sind elektronische Schaltgeräte ohne bewegliche Teile. Das heißt, dass es keine mechanischen Kontakte gibt, wodurch sie deutlich schnellere Schaltzeiten im Vergleich zu elektromechanischen Relais aufweisen. Deshalb werden bei dem Prototyp vier dreiphasige Halbleiterrelais verwendet. Um die kapazitiven und induktiven Effekte elektronischer Lasten bei der Bewertung des Reglers vernachlässigen zu können, werden konventionelle Hochlastwiderstände für den Aufbau des Prototyps genutzt. Die Hochlastwiderstände sind einfache Wirkwiderstände von jeweils 13,3 Ω. Sie sind weder verstellbar noch programmierbar. Sie haben jedoch keine kapazitiven oder induktiven Anteile. Der Prototyp setzt sich aus zwei Hochlastwiderständen mit jeweils 16 einzelnen 13,3 Ω-Elementen zusammen (vgl. ABBILDUNG 1). Um vier Betriebspunkte des Leistungsstrangs abzutasten, werden die 13,3 Ω-Elemente über die dreiphasigen Halbleiterrelais in vier Zustände segmentiert. Pro Phase werden jeweils acht Elemente benötigt. Die Zustände, Widerstands-, Strom- und Leistungswerte pro Phase sind in TABELLE I aufgeführt.

TABELLE I: PARAMETER DER ZUSTÄNDE PRO PHASE.

Zustand	*Widerstand in* Ω	*Strom in* A	*Leistung in* kW
R1	106,4	2,16	0,50
R2	79,8	2,88	0,66
R3	53,2	4,32	0,99
R4	39,9	5,76	1,33

C. Hardwareschnittstelle

Die Softwareebene des Prototyps bilden ein Programm zur Steuerung des Prototyps sowie eines für die Kommunikation zwischen den Komponenten des Versuchsaufbaus. Die Kommunikation benötigt zudem Hardwareschnittstellen. Als Kommunikations- und Steuerungsnexus dient ein OPAL-RT OP5707 XG Echtzeitsimulator. Sowohl die Halbleiterrelais, als auch der Wechselrichter-Controller werden zentral über den Echtzeitsimulator koordiniert, sodass Lastzustände und Regelparameter über diesen übergeben werden. Der Anschluss der Ausgänge des Echtzeitsimulators an die Relais wird mit einer I/O-Karte über die Analogschnittstelle des Echtzeitsimulators realisiert. Die Parameterübergabe an den Wechselrichtercontroller erfolgt über Ethernet.

ABBILDUNG 1: HOCHLASTWIDERSTÄNDE.

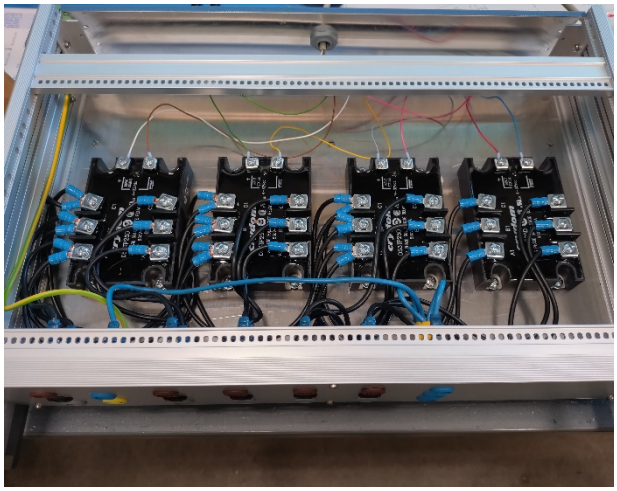

ABBILDUNG 2: HALBLEITERRELAIS VERBAUT.

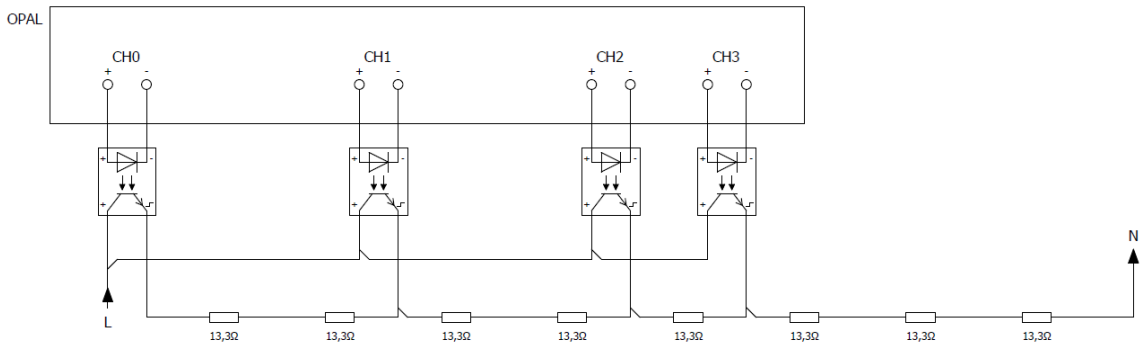

ABBILDUNG 3: EINPHASIGE DARSTELLUNG DES SCHALTPLANS AUS ECHTZEITSIMULATOR (OPAL), HALBLEITERRELAIS UND LASTWIDERSTÄNDEN.

Die Programmierung der Ausgänge und Sequenzen erfolgt mithilfe der Software RT-LAB sowie MATLAB. Die Halbleiterrelais sind in einem 19 Zoll Gehäuse (ABBILDUNG 2) verbaut. Über ein LiYCY 8x 0,5 mm²-Kabel sind die Relais mit der Analogkarte des Echtzeitsimulators verbunden. Die Schaltkontakte der Relais sind durch Laborbuchsen nach außen geführt. Mithilfe von Laborleitungen werden die Hochlastwiderstände angeschlossen. Die Verdrahtung erfolgt nach dem in ABBILDUNG 3 dargestellten Schaltplan.

D. Steuerungsprogramm

Zur Bewertung der Eignung von Regelparametern für transiente Vorgänge ist die Reproduzierbarkeit dieser Vorgänge für unterschiedliche Parameter unabdingbar. Für die Reproduzierbarkeit sind als Anfangsbedingungen der Zeitpunkt und die Leistung wichtig. Als Anfangsbedingung

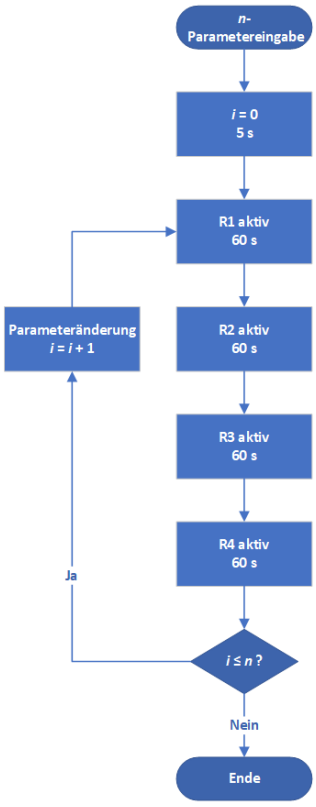

ABBILDUNG 4: SEQUENZ ZUR DURCHFÜHRUNG DER AUTOMATISIERTEN SCHALTUNG UND PARAMETERVARIATION.

gilt der Zustand des Systems vor dem transienten Vorgang, da die Systemantwort bei gleicher Anregung vom Anfangszustand abhängt.

Um die Anfangsbedingungen konstant zu halten, muss vor jedem Vorgang ein stationärer Zustand herrschen. Der Schaltzeitpunkt bestimmt, zu welchem Zustand innerhalb der Periodendauer der Sinusschwingungen im AC-Netz der Vorgang eingeleitet wird. Da unterschiedliche Punkte innerhalb der Periodendauer zu einer unterschiedlichen Antwort führen, muss hier ebenfalls auf Einheitlichkeit geachtet werden. Abschließend muss die Anregung die gleiche sein, um reproduzierbare transiente Vorgänge zu verursachen. Um diese Bedingungen zu vereinen, wird ein Programm definiert, welches in einer automatisierten Sequenz eine beliebige Anzahl an transienten Vorgängen durchführt, die in Betrag, Zeitpunkt, Anzahl und Regelparametervariation flexibel sind. Der Programmablauf der Sequenz wird in ABBILDUNG 4 dargestellt. Zunächst werden die Anzahl der Parameter (n) sowie die einzelnen Parameter definiert und an den Echtzeitsimulator übergeben. Ein Zähler (i), der als Endbedingung für das Programm gilt, wird zu Beginn auf 0 gesetzt. Nach einer Wartezeit von 5 s wird die erste Last R1 zugeschaltet. Nach 60 s wird auf die Last R2 umgeschaltet. Weitere 60 s später erfolgt die Umschaltung auf die Last R3. Auf die letzte Last R4 wird nach weiteren 60 s umgeschaltet. Ist Zähler (i) kleiner gleich der Anzahl der Parameter (n), wird der nächste auszuwertende Regelparameter an den Wechselrichtercontroller übergeben. Die Sequenz startet von vorne und fährt die einzelnen Zustände ab. Dies geschieht so lange, bis die Anzahl der Durchläufe (i) größer als die Anzahl der Parameter (n) ist. Die 60 s nach dem Zuschalten einer Last dienen dazu, das System einschwingen zu lassen.

III. TESTS ZUR VALIDIERUNG

Die Validierung besteht aus verschiedenen Tests, um die einzelnen Teilbereiche und abschließend das Gesamtsystem zu prüfen.

A. Test der Sequenz in der Simulationsumgebung

Bevor das System unter Spannung geprüft wird, erfolgt eine Simulation der programmierten Sequenz gemäß ABBILDUNG 4. Dabei wird darauf geachtet, dass die einzelnen Schritte in der richtigen Reihenfolge durchlaufen und keine Relais gleichzeitig zugeschaltet werden. Wichtig ist hierbei ein zeitgleiches Umschalten, da die Leistung während des Durchlaufs nicht auf null fallen darf. Deshalb erfolgt die Umschaltung der Lasten während des Nulldurchgangs der Phase L1. Damit wird der vollständige Lastabwurf verhindert. Das zeitgleiche Zuschalten mehrerer Relais wird durch eine

softwareseitige Verriegelung verhindert. Zudem ist damit gewährleistet, dass eine Zustandsveränderung immer am gleichen Punkt einer Periode erfolgt, wodurch die Zustandsübergänge bei unterschiedlichen Regelparametern vergleichbar werden.

B. *Test der Sequenz am Netz*

Nach erfolgreicher Validierung der Sequenz in der Simulationsumgebung wird die Verbindung zwischen dem Echtzeitsimulator und der Lasten, welche über die Relais gesteuert werden, geprüft. Dafür wird ein 4-Quadranten-Spannungsverstärker der Firma Spitzenberger Spies an den Prototypen angeschlossen. Am Netzsimulator wird eine Spannung von 230 V AC / 50 Hz eingestellt. Nun werden mithilfe der RT-Lab-Software die einzelnen Relais und damit die Lasten nacheinander zugeschaltet. Nach dem erfolgreichen Test der Verbindungen wird die Sequenz bei konstanten Parametern getestet. Dabei werden die richtige Reihenfolge der Laständerungen sowie das automatische Umschalten getestet.

C. *Test der Parametervariation am Controller*

Im nächsten Schritt wird das Übertragen der PID-Regel-Parameter vom Echtzeitsimulator zum Controller getestet. Die Schnittstelle zwischen Echtzeitsimulator bildet ein Power-Hardware-in-the-Loop (PHiL)–Interface [7].

D. *Test am Gesamtsystem*

Nach Abschluss der Tests wird die Implementierung am Gesamtsystem getestet. Dazu bildet der in Kapitel II.A vorgestellte Aufbau ein 230 V AC Inselnetz, das den Prototyp versorgt. Der Spannungsregler der Quelle ist nach (1) implementiert. Der Parameter k_{pid} wird entsprechend der Werte in Tabelle II als Input für die Sequenz in ABBILDUNG 4 genutzt. Während der gesamten Sequenz werden Daten mit einer Abtastrate von 200 kHz aufgenommen. In ABBILDUNG 5 werden die Strom-Zeit-Kurven des RMS-Stroms für die unterschiedlichen k_{pid}-Werte während der Lastumschaltung dargestellt.

TABELLE II: REGELPARAMETER.

Nr.	*1*	*2*	*3*	*4*	*5*
k_{pid}	1	2	4	6,25	12,5

Für alle aufgeführten Variationen stabilisiert sich das System. Das gilt auch für den Übergang von R4 zu R1, was einem Lastabwurf von mehr als 50 % entspricht. Insbesondere für die Parameter $k_{\mathrm{pid}} = 1$ und $k_{\mathrm{pid}} = 2$ werden Unterschiede zu den anderen Werten deutlich. Eine Erhöhung des Wertes führt zu einem glatteren Verlauf.

IV. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der nichtlineare Charakter von Wechselrichtern erfordert eine Bewertung der Regelparameter über den gesamten Arbeitsbereich. Dieser kann über elektronische Lasten abgetastet werden. Dabei kann es jedoch vorkommen, dass die Leistungselektronik der elektronischen Lasten, insbesondere bei Transienten, Probleme bei der Auswertung verursachen. Um eine möglichst störungsfreie Auswertung der Betriebspunkte zu gewährleisten, wurde ein Prototyp entwickelt. Der Prototyp umfasst:

1. Konventionelle Hochlastwiderstände, die über Halbleiterrelais in Zustände unterschiedlicher Last unterteilt sind.
2. Eine Kommunikationsstruktur zur zentralen Steuerung und Anpassung der Halbleiterrelais und Wechselrichterregler-Parameter.
3. Ein Programm, das definierte Betriebspunkte für ausgewählte Regelparameter in einer automatisierten Sequenz abtastet und Messwerte aufnimmt.

Die Funktion des Prototyps konnte in einem Niederspannungsinselnetz validiert werden. Obwohl in diesem Beitrag die Sequenz vorgegeben ist, kann diese flexibel angepasst werden, um beliebige Betriebspunkte oder Parameter abzutasten.

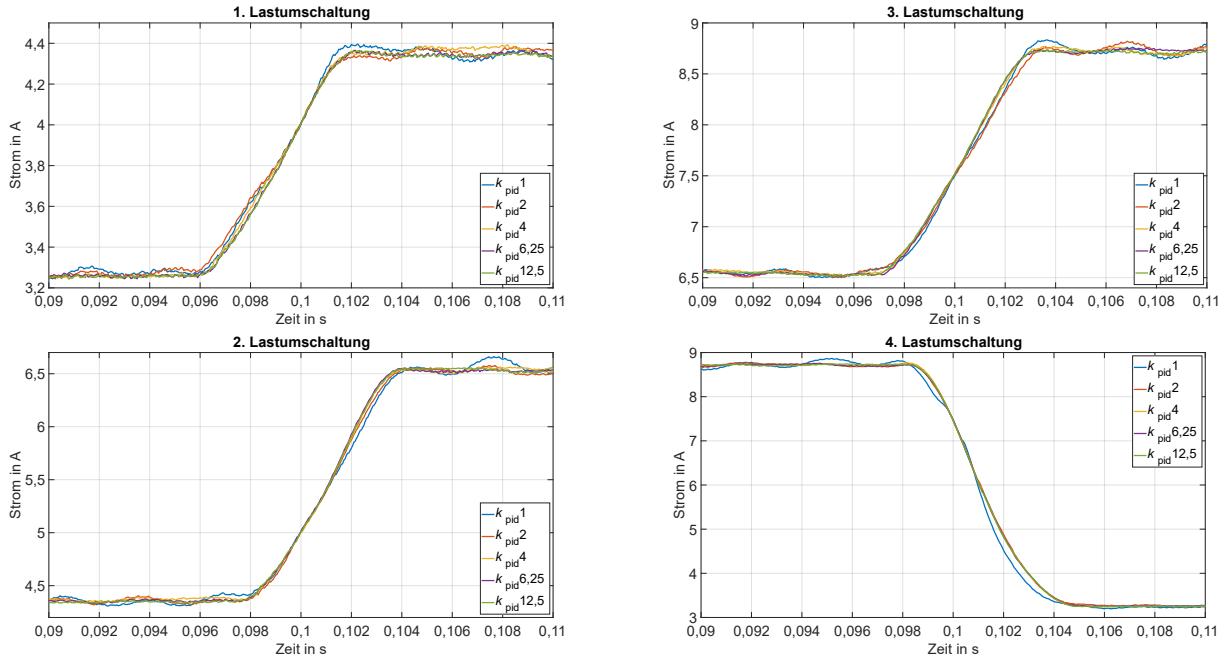

ABBILDUNG 5: TRANSIENTE VORGÄNGE DER ZUSTANDSÄNDERUNGEN VON R1 AUF R2 (1. LASTUMSCHALTUNG), VON R2 AUF R3 (2. LASTUMSCHALTUNG) VON R3 AUF R4 (3. LASTUMSCHALTUNG) UND VON R4 AUF R1 (4. LASTUMSCHALTUNG).

Weitere Untersuchungen werden in der kompakten Bauweise und Erweiterung der Lastzustände des Prototyps liegen.

DANKSAGUNG

Dieser Beitrag im Forschungsprojekt CoupleIT! wird durch dtec.bw – Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr gefördert. dtec.bw wird von der European Union – NextGenerationEU finanziert.

LITERATUR

[1] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo und M. Vitelli, „Optimization of perturb and observe maximum power point tracking method," in *IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, no. 4*, 2005, pp. 963-973.

[2] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg und P. Rodríguez, „Control of Power Converters in AC Microgrids," in *IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 27, no. 11*, 2012, pp. 4734-4749.

[3] J. Ziegler und N. B. Nichols, „Optimum Settings for Automatic Controllers," in *Trans. ASME, vol. 64*, 1942, pp. 759-768.

[4] K. L. Chien, J. A. Hrones und J. B. Reswick, „On the automatic control of generalized passive systems," in *Trans. ASME, vol. 74*, 1952, pp. 175-185.

[5] E. D. Gomez Anccas, K. Pourhossein, D. Becker und D. Schulz, „Detailed Controller Synthesis and Laboratory Verification of a Matching-Controlled Grid-Forming Inverter for Microgrid Applications," in *Energies, 16, 8079*, 2023.

[6] A. Tayyebi, D. Groß, A. Anta, F. Kupzog und F. Dörfler, „Frequency Stability of Synchronous Machines and Grid-Forming Power Converters," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 8, no. 2*, 2020, pp. 1004-1018.

[7] Imperix Ltd., „https://imperix.com/," 2025. [Online]. Available: https://imperix.com/wp-content/uploads/document/Power-Interface_OPAL-RT.pdf. [Zugriff am 11 01 2025].