

AUSWIRKUNG VON TRÄGHEITSLILOSEN NETZEINSPEISUNGEN AUF PENDELSPERREN VON DISTANZSCHUTZGERÄTEN

Markus MAYER*, Wolfgang GAWLIK¹, Matthias KERIT²

¹ Technische Universität Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe, Gusshausstraße 25, 1040 Wien, +43 1 58801 370101, markus.mayer@student.tuwien.ac.at, wolfgang.gawlik@tuwien.ac.at

² Siemens AG, Energy Management Division, Digital Grid, Development Innovation, EM DG PRO LM&D ID D, Wernerwerkdamdamm 5, 13629 Berlin, Deutschland, matthias.kerit@siemens.com

* Nachwuchsautor

Kurzfassung:

Infolge von betrieblichen oder fehlerbedingten Schalthandlungen im Übertragungsnetz treten transiente Ausgleichsvorgänge auf, welche die lokal gemessenen Größen von Strom und Spannung am Einbauort eines Schutzrelais beeinflussen. Da bei Verfahren zum Distanzschutz die aus diesen Messgrößen gebildete Impedanz am Ort der Messung zur Erkennung von Fehler- und Überlastzuständen verwendet wird, zeigen sich diese Ausgleichsvorgänge auch in der Impedanz-Ebene, z.B. als Pendelungen. Durch diese Pendelvorgänge kann die lokal gemessene Impedanz in die Anrege- und Auslöseflächen des Distanzschutzes hineinlaufen. Die Blockierung der Auslösung des Schutzrelais wird durch Erkennungsalgorithmen, sog. Pendelsperren erreicht, welche z.B. den Unterschied in der Änderungsgeschwindigkeit der Impedanz bei transienten Ausgleichsvorgängen und im plötzlichen Übergang in Fehlerzuständen zur Erkennung nutzen. Im Zuge der immer höheren Durchdringungsrate von wechselrichterbasierten Einspeisungen ändert sich die Netzdynamik, da diese im Vergleich zu generatorbasierten Anlagen oft keine rotierende Masse haben und dadurch Einfluss auf die Erkennung von transienten Vorgängen haben können.

Im Rahmen einer simulationsbasierten Analyse werden die Änderungen des Pendelverhaltens durch den zunehmenden Anteil an trägheitslosen Einspeiseanlagen ermittelt und die Auswirkungen auf die Funktion von Pendelsperren beschrieben. Dazu wird ein Modellnetz in verschiedenen Ausbaustufen der trägheitslosen Einspeisung verwendet und hinsichtlich der transienten Vorgänge nach Heraustrennen eines Betriebsmittels (im Beispiel eine Leitung einer Doppelleitung) simuliert. Aus den simulierten Werten von Strom und Spannung können dann die Impedanz-Werte bestimmt und die Veränderungen im Verlauf der Impedanz in der komplexen Ebene analysiert werden. Außerdem wird die für die Funktion von Pendelsperren entscheidende Durchtrittsrate durch Impedanz-Blinder bzw. die Impedanz-Änderungsrate während transienter Ausgleichsvorgänge ermittelt.

Aus den Analysen geht hervor, dass durch die Einbindung von trägheitslosen Einspeisungen Pendelungen schneller, dafür aber schwächer ablaufen. Für die Funktion der Pendelsperren, welche Durchtrittsdauern oder Impedanz-Änderungsraten auswerten, wird keine negative Beeinträchtigung durch trägheitslose Einspeisung erwartet, da insgesamt betrachtet die Durchtrittsdauer durch Impedanz-Blinder steigt bzw. die Impedanz-Änderungsrate sinkt.

Keywords: Distanzschutz, Pendelsperre, Leistungspendelung, Impedanzpendelung

1 Einleitung

Gängige Verfahren zum Distanzschutz überwachen die gemessene Impedanz am Einbauort des Schutzrelais und verwenden als Auslösekriterium die Bedingung, dass sich die Impedanz von hohen resistiven Werten (Lastbereich) durch einen Netzkurzschluss schnell zu niedrigen induktiven Werten (Auslösebereich) ändert. Durch geeignete Wahl der Auslöseflächen in der Impedanzebene („Zonen“) und die mit diesen Zonen verbundenen gestaffelten Auslösezeiten kann in vermaschten Netzen durch Distanzschutzrelais die Selektivität des Schutzsystems gewährleistet werden. Ausgelöst durch den Netzfehler und ihm nachfolgende (möglichst selektive) Schalthandlungen kommt es im Netz zu dynamischen Ausgleichsvorgängen und Leistungspendelungen, während derer die gemessene Impedanz ebenfalls temporär, und vergleichsweise langsam in den Bereich der Anrege- und Auslöseflächen wandern kann. Um eine Überfunktion des Netzschutzes in diesem Fall zu verhindern, werden Pendelsperren eingesetzt. Diese blockieren das Auslösesignal ausgewählter Zonen, wenn eine Pendelung erkannt wird.

Durch den zunehmenden Anteil von Erzeugungsanlagen, die nicht über eine klassische Synchronmaschine mit rotierender Masse in das Netz einspeisen, verändert sich die Netzdynamik. Während sie bisher und damit auch bzgl. der Pendelungen durch die elektromagnetischen Ausgleichsvorgänge in den Wicklungen der Generatoren sowie die elektromechanischen Schwingungen der Maschinen am Netz geprägt war, beeinflusst zunehmend die Regelung der Wechselrichter von ansonsten trägheitslosen Einspeisern wie HGÜ-Strecken, Photovoltaikanlagen und ggf. auch Windkraftanlagen mit leistungselektronischer Einspeisung die Netzdynamik.

Diese Änderung der Dynamik, im Besonderen infolge von betrieblichen oder außerbetrieblichen Schalthandlungen, wird im Zuge dieses Beitrages betrachtet. Dazu wird in einem vereinfachten Netzmodell eine Schalthandlung als Folge eines Fehlers simuliert und die lokal gemessenen Größen von Strom und Spannung während des darauf folgenden transienten Ausgleichsvorgangs aufgezeichnet. Diese werden dann äquivalent zu einem Verfahren zum Distanzschutz in die Impedanz-Ebene transformiert und analysiert. Alle gewählten Parameter (Abtastung der Werte, Fensterlänge in Fourier-Verfahren) orientieren sich an gängigen Verfahren. Insgesamt werden vier Fälle mit verschiedenen Ausbaustufen der trägheitslosen Einspeisung betrachtet, welche unterschiedliche Zeithorizonte und Entwicklungspfade in Bezug auf die Durchdringung von wechselrichterbasierter Einspeisung in Netz darstellen. Aus diesen Analysen werden dann Schlussfolgerungen über die Beeinflussung der Ausgleichsvorgänge nach Schalthandlungen und daraus folgend den Einfluss auf die Funktionalität von Pendelsperren gezogen.

2 Methodik

In den folgenden Absätzen werden die einzelnen Betrachtungsfälle zur Analyse des Einflusses von tr agheitsloser Einspeisung auf die Funktion von Pendelsperren vorgestellt und ein kurzer Überblick über das Berechnungsmodell gegeben.

Für die Analyse wird ein vereinfachtes Netzmodell bestehend aus einem Synchrongenerator, einem Blocktransformator, einer Doppelleitung und dem restlichen Netz verwendet. Diese Betriebsmittel-Konfiguration stellt den Referenzfall dar, in welchem noch keine signifikante Durchdringung von wechselrichterbasierter Einspeisung vorhanden ist. Dieses Modell wird dann um eine wechselrichterbasierte (und damit tr agheitslose) Einspeisung in verschiedenen Ausbaustufen erweitert. Gleichzeitig wird die installierte Leistung des Synchrongenerators bzw. dessen Arbeitspunkt variiert, wodurch eine Substitutionswirkung von konventionellen durch leistungselektronische Einspeisungen nachgebildet werden soll. Das Modellnetz und die Parameter der einzelnen Analysef lle sind in Abbildung 1 und Tabelle 1 gezeigt.

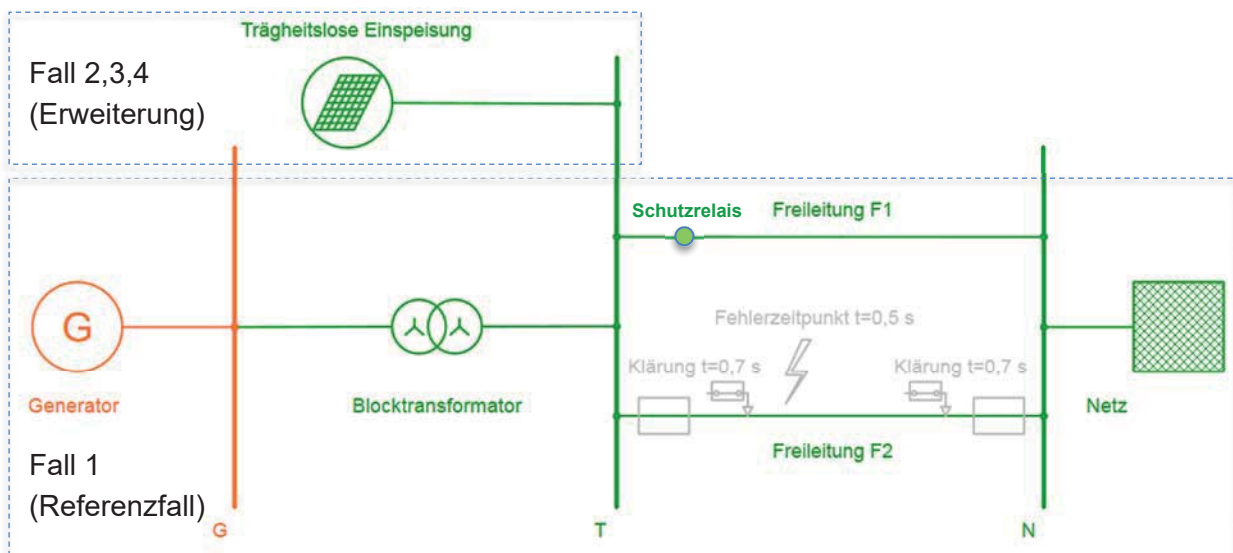


Abbildung 1 - Modellnetz für die Analyse der Auswirkungen von tr agheitsloser Einspeisung auf Pendelsperren

Für die einzelnen Fälle werden, wie bereits zuvor erwähnt, verschiedene Ausbaustufen der tr agheitslosen Einspeisung angenommen. So sind die einzelnen Fälle im Detail wie folgt angenommen:

- Fall 1 stellt den Referenzfall dar, in welchem keine signifikante Durchdringung von wechselrichter-basierten Anlagen vorhanden ist. Die Einspeisung der Leistung erfolgt durch eine Anlage mit rotierender Masse (herkömmliche Situation).
- In Fall 2 wird angenommen, dass die Hälfte der Wirkleistungseinspeisung des konventionellen Generators aus Fall 1 von einer tr agheitslosen Einspeisung übernommen wird. Gleichzeitig wird die installierte Leistung des Generators  quivalent reduziert, was auch eine dementsprechende Reduktion der rotierenden Masse bedeutet (Hohe Durchdringungsrate mit gleichzeitigem Rückbau konventioneller Anlagen).

- Fall 3 stellt eine Vorstufe von Fall 2 dar, bei welcher die Hälfte der Wirkleistungseinspeisung des Generators von einer trägheitslosen Einspeisung übernommen wird, jedoch kein Rückbau der Leistung des Ersatz-Generators erfolgt. Die rotierende Masse bleibt somit konstant, lediglich der Arbeitspunkt des Generators wird durch die Substitution reduziert (Hohe Durchdringungsrate ohne Rückbau konventioneller Anlagen, die dann in Teillast betrieben werden).
- In Fall 4 wird angenommen, dass der Bedarf an elektrischer Energie um die von der trägheitslosen Einspeisung gelieferte Menge steigt, also ein Mehrbedarf besteht. Infolge dessen bleiben die Parameter des Generators konstant, und die trägheitslose Einspeisung speist zusätzlich zur bestehenden konventionellen Anlage ein (Hohe Durchdringungsrate bei gleichzeitigem Anstieg des Strombedarfs).

Daraus ergeben sich folgende Parameter für die einzelnen Fälle

	Fall 1 (Referenz)	Fall 2 (Rückbau)	Fall 3 (Teillast)	Fall 4 (Ausbau)
Generator	$S_{Max}= 520MVA$ $P_{AP}= 500MW$ $Q_{AP}= 113MVA$	$S_{Max}= 260MVA$ $P_{AP}= 250MW$ $Q_{AP}= 82MVA$	$S_{Max}= 520MVA$ $P_{AP}= 250MW$ $Q_{AP}= 67MVA$	$S_{Max}= 520MVA$ $P_{AP}= 500MW$ $Q_{AP}= 113MVA$
Transformator	$S_{Max}= 520MVA$	$S_{Max}= 260MVA$	$S_{Max}= 520MVA$	$S_{Max}= 520MVA$
Netz	$S_k''= 3\ 820MVA$	$S_k''= 3\ 820MVA$	$S_k''= 3\ 820MVA$	$S_k''= 3\ 820MVA$
Trägheitslose Einspeisung	-	$P_{AP}= 250MW$	$P_{AP}= 250MW$	$P_{AP}= 250MW$

Tabelle 1 - Parameter der einzelnen Analysefälle

Besonderer Fokus wird auf die Ähnlichkeit des Leistungsflusses am Ort des Schutzrelais vor dem Fehlereintritt gelegt, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Durch einen dreipoligen Kurzschluss auf einer der Leitungen und dem anschließenden beidseitigen Abschalten dieser Leitung werden die daraus angeregten transienten Vorgänge am Schutzrelais der parallelen Leitung ermittelt (Siehe Abbildung 1). Anhand dieser werden entsprechend dem Verfahren zum Distanzschutz Impedanzwerte in der komplexen Ebene bestimmt. Die Fehlerklärungszeit wird konstant belassen, um auch hier die Vergleichbarkeit der Werte zu ermöglichen. Die Ergebnisse von Simulation und Analyse werden in den folgenden Absätzen erläutert.

3 Simulationsergebnisse

Durch die Simulation werden Zeitreihenwerte der Größen Spannung und Strom, sowie Wirk-, Blind- und Scheinleistung über die Simulationsdauer ermittelt. Deren Darstellung und Auswertung zeigt bereits, dass sich durch die Einbindung einer trägheitslosen Einspeisung ein deutlich veränderter Verlauf der einzelnen Größen nach Klärung des dreipoligen Kurzschlusses ergibt.

Im Folgenden werden repräsentativ für die betrachteten Fälle nur die Verläufe von Fall 2 (Rückbau) in Gegenüberstellung zu Fall 1 (Referenz) betrachtet.

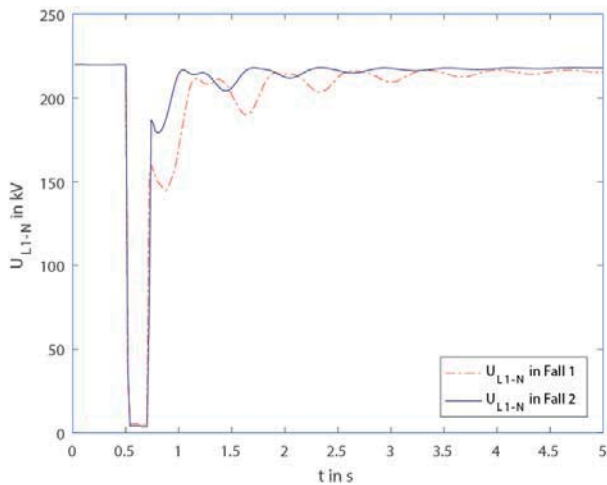


Abbildung 2 – Verlauf des Spannungs-Effektivwerts

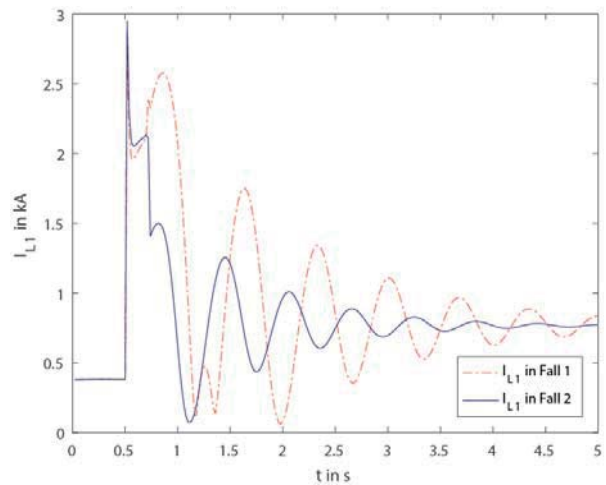


Abbildung 3 – Verlauf des Strom-Effektivwerts

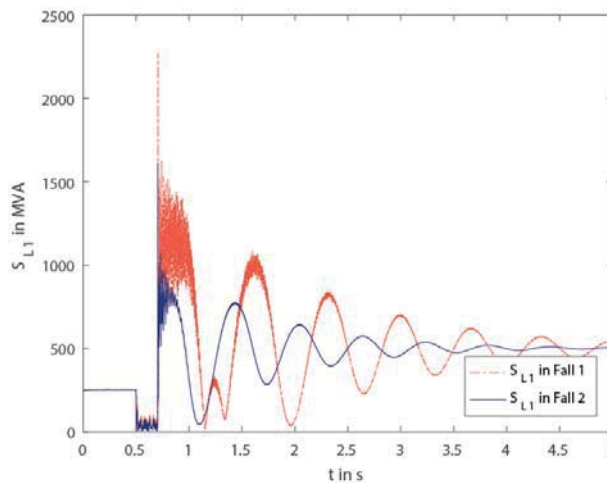


Abbildung 4 – Verlauf der Scheinleistung

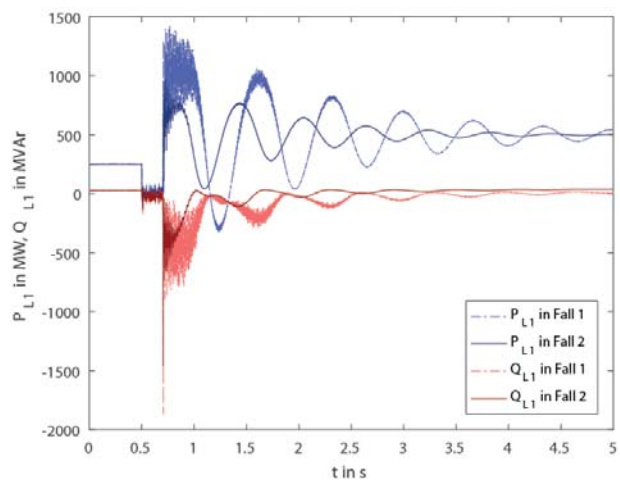


Abbildung 5 – Verlauf der Wirk- und Blindleistung

Wie in Abbildung 2 bis Abbildung 5 bereits zu erkennen wird das Pendelverhalten durch die Einbindung der trägheitslosen Einspeisung in allen betrachteten Größen geringer. Dies ist im gezeigten Fall 2 bei Rückbau der konventionellen Erzeugungsanlagen durch eine Verringerung der schwingungsfähigen Masse bezogen auf die konstante Leistung im System zu erklären. Weiterhin ist zu erkennen, dass sich die Zeitpunkte der Minima und Maxima der Leistungspendelung verändern. Hier im Fall 2 werden diese früher erreicht, was auf eine Beschleunigung des Pendelvorgangs hindeutet.

Im Fall 3 wird ein ähnliches Verhalten beobachtet, jedoch ist hier die Verringerung der Minima und Maxima bzw. die Beschleunigung des Pendelvorgangs nicht durch die Reduktion der schwingungsfähigen Masse im System bedingt, sondern durch die Verringerung des Arbeitspunkts des Ersatz-Generators. Durch den größeren Abstand zur Bemessungsleistung bei gleich bleibender Fehlerklärungszeit wird der Generator in geringerem Ausmaß beschleunigt, wodurch die Pendelung abgeschwächt wird und schneller abklingt.

Bei Betrachtung des Falles 4 wird aufgrund der konstant belassenen Generator-Parameter ein vergleichbares Pendelverhalten wie in Fall 1 festgestellt,

4 Analyse in der Impedanzebene

Zur Übersetzung der simulierten Größen in die Impedanzebene wird ein auf orthogonalen Fourier-Filtern basierendes Verfahren nach den Gleichungen (1) und (2) angewandt, mittels dem Phasoren der Größen Spannung und Strom berechnet werden, welche anschließend in die Berechnungsvorschrift zur Impedanzermittlung (3) eingesetzt werden (vgl. [ZIE11]):

$$\operatorname{Re}\{\underline{U}\} = \frac{1}{T_N} \cdot \int_{t-T_N}^t u(\tau) \cdot \cos(\omega_N \cdot \tau) d\tau \quad \operatorname{Im}\{\underline{U}\} = \frac{1}{T_N} \cdot \int_{t-T_N}^t u(\tau) \cdot \sin(\omega_N \cdot \tau) d\tau \quad (1)$$

$$\operatorname{Re}\{\underline{I}\} = \frac{1}{T_N} \cdot \int_{t-T_N}^t i(\tau) \cdot \cos(\omega_N \cdot \tau) d\tau \quad \operatorname{Im}\{\underline{I}\} = \frac{1}{T_N} \cdot \int_{t-T_N}^t i(\tau) \cdot \sin(\omega_N \cdot \tau) d\tau \quad (2)$$

$$R_L = \frac{\operatorname{Re}\{\underline{U}\} \cdot \operatorname{Re}\{\underline{I}\} + \operatorname{Im}\{\underline{U}\} \cdot \operatorname{Im}\{\underline{I}\}}{\operatorname{Re}\{\underline{I}\}^2 + \operatorname{Im}\{\underline{I}\}^2} \quad X_L = \frac{\operatorname{Im}\{\underline{U}\} \cdot \operatorname{Re}\{\underline{I}\} - \operatorname{Re}\{\underline{U}\} \cdot \operatorname{Im}\{\underline{I}\}}{\operatorname{Re}\{\underline{I}\}^2 + \operatorname{Im}\{\underline{I}\}^2} \quad (3)$$

Durch Anwendung dieses Verfahrens wird eine Zeitreihe an Impedanzwerten berechnet, welche nun in die Impedanz-Ebene abgebildet und analysiert wird.

Im Folgenden wird wieder repräsentativ für die Ergebnisse der anderen Fälle nur Fall 2 in Gegenüberstellung zu Fall 1 gezeigt und analysiert. Für die Abbildungen in der Impedanz-Ebene wird ein Betriebsbereich für die Leitung von $S_{\text{Max}} = 750\text{MVA}$, $\phi_{\text{Max}} = \pm 30^\circ$ angenommen, welcher in den Abbildungen eingezeichnet ist. Weiterhin wird für die Ermittlung von Leistungspendelungen ein Blinder-Verfahren verwendet, bei welchem die Impedanz-Änderungsrate durch fiktive Blinder ermittelt wird. Da Kurzschlüsse eine hohe Impedanz-Änderungsrate aufweisen, was bei Pendelvorgängen nicht der Fall ist, ist dies das entscheidende Kriterium zur Unterscheidung von Pendelungen und Kurzschlüssen.

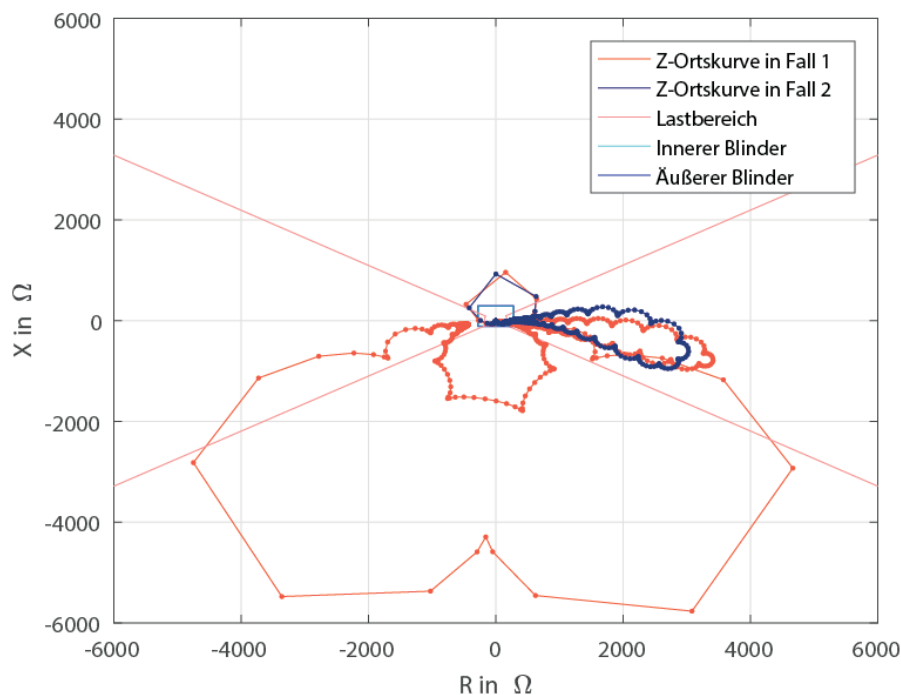


Abbildung 6 - Impedanz-Verlauf im Fall 2 und Fall 1 (Übersicht)

Abbildung 6 zeigt, dass sich der Verlauf der Impedanz in Fall 2 stark von jenem im Fall 1 unterscheidet. Die Pendelung verläuft stark abgeschwächt und es erfolgt hier auch keine Umkehr des Wirkleistungs-Flusses, wie in Fall 1 anhand der negativen Resistanz zu erkennen ist.

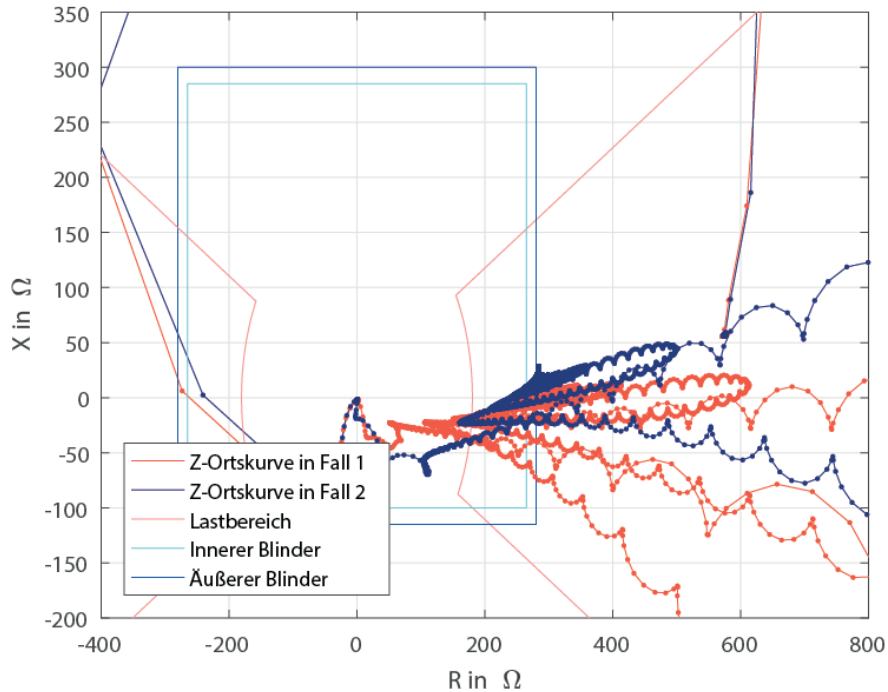


Abbildung 7 - Impedanz-Verlauf im Fall 2 und Fall 1 (Detail)

Bei detaillierter Betrachtung kann auch eine Phasenänderung durch die trägheitslose Einspeisung während der Pendelung erkannt werden. Die für die Unterscheidung zwischen Pendelung und Kurzschluss entscheidende Durchtrittszeit durch die Blinder wird anhand der Messdaten wie in Tabelle 2 angeführt ermittelt:

Ausgewertete Daten	1. Impedanz-Pendelung		2. Impedanz-Pendelung		3. Impedanz-Pendelung	
	Fall 1	Fall 2	Fall 1	Fall 2	Fall 1	Fall 2
Durchtrittsdauer in ms	2 / 7	4 / 9	5 / 9	7 / 14	10 / 13	20 / 32
Impedanz-Änderungsrate in Ω/ms	4 / -3,3	4 / -1,8	3,9 / -2	2,2 / -1,1	1,7 / -1,2	0,8 / -0,5

Tabelle 2 – Durchtrittsdauern und Impedanz-Änderungsraten durch die Blinder im Fall 2 und Fall 1

Anhand der in Tabelle 2 gezeigten Werte ist ersichtlich, dass sich durch die trägheitslose Einspeisung die Durchtrittsdauer durch die Blinder verlängert, bzw. die daraus resultierende Impedanz-Änderungsrate verringert. Der linke Wert steht jeweils für ein Durchlaufen der Blinder in Richtung des Ursprungs (d.h. in Richtung Fehlerbereich), der rechte Werte vice versa gegenläufig zum Ursprung (d.h. in Richtung Lastbereich). Dies kann bei Betrachtung der Impedanz-Änderungsrate über den gesamten transienten Vorgang auch verallgemeinert werden, wie in Abbildung 8 dargestellt ist.

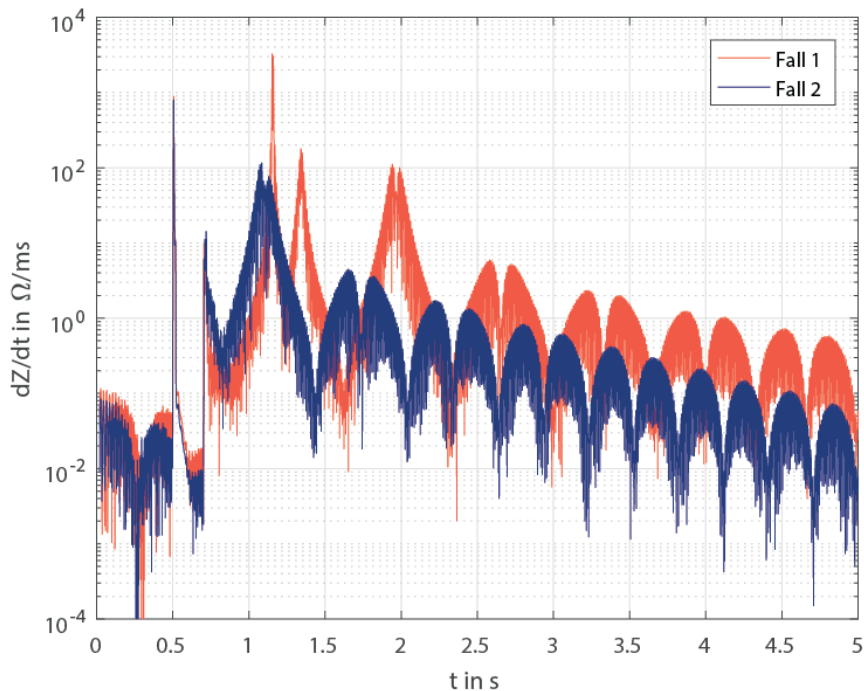


Abbildung 8 - Impedanz-Änderungsrate während des transienten Vorgangs

Bei Pendelsperren, welche Verfahren mit immanenter Überwachung der Impedanz-Änderungsrate verwenden, wird bei trägheitsloser Einspeisung somit auch eine deutlich geringere Änderungsrate nach Klärung des Fehlers, die sicher von Fehlervorgängen unterschieden werden kann, ermittelt.

Das gleiche Resultat lässt sich auch bei Auswertung der Daten im Fall 3 ermitteln, wobei hier die Anschwächung der Pendelung noch ausgeprägter ist als in Fall 2. Im Fall 4 sind der Verlauf der Impedanz und die Impedanz-Änderungsrate während des 1. Maxima und Minima annähernd gleich dem in Fall 1, bei den nachfolgenden Maxima und Minima lässt sich aber auch eine Abschwächung beobachten.

5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammengefasst kann durch die angestellten Analysen die Aussage getroffen werden, dass trägheitslose Einspeisungen jedenfalls einen signifikanten Einfluss auf transiente Ausgleichvorgänge nach betrieblichen oder außerbetrieblichen Schalthandlungen hat. So kann durch die Simulation beobachtet werden, dass der Ausgleichvorgang einerseits gedämpft, andererseits aber auch schneller abläuft, da die Minima und Maxima der Pendelung schneller erreicht werden. Für die Funktion einer Pendelsperre im Distanzschutzrelais sollte das aber unkritisch sein, da die Impedanz-Änderungsrate bei Pendelungen tendenziell geringer wird bzw. die Durchtrittsdauer durch Impedanz-Blinder höher wird. Somit kann sowohl bei Verfahren mit und ohne Impedanz-Blinder davon ausgegangen werden, dass durch eine höhere Durchdringungsrate von trägheitslosen Einspeisungen im Netz keine Beeinträchtigung der Funktion von Pendelsperren zu erwarten ist.

6 Literaturreferenzen

- [ZIE11] G. Ziegler: „Numerical Distance Protection – Principles and Applications“,
4. Erneuerte und erweiterte Auflage, 2001, Publicis Verlag,
ISBN 978-3-89578-381-4