



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna | Austria



Diplomarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs (Dipl.-Ing.)

der Studienrichtung Elektrotechnik und Informationstechnik
an der Technischen Universität Wien

Untersuchung des Einflusses kapazitiver Spannungswandler auf den Distanzschutz

eingereicht am
Institut für Energiesysteme und elektrische Anlagen

Hauptbetreuer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang GAWLIK
Mitbetreuung: Dipl.-Ing. Benjamin COX

von

Florian Feiel, BSc
1525323

Wien, November 2021

Abstract

Capacitive voltage transformers are often used in high voltage systems. However, under certain circumstances, the capacitive voltage transformer experiences severe transient responses for some system conditions.

The main cause for these transient responses is the energy, that is stored in the active components of the capacitive voltage transformer such as capacitors and inductances. In case of a fault these elements must discharge first, before a steady state can be achieved.

A poor transient response also influences the trajectory of the fault impedance. This can lead to faults outside a certain zone, being detected as “in zone” faults, which will cause an overreach situation.

In order to study the effect of the transient response of capacitive voltage transformers some models were created. Fault simulations were run with different parameters to show the influence of certain parameters, such as the source impedance ratio or the type of ferroresonant suppression circuits on the response of the capacitive voltage transformer.

Zusammenfassung

Kapazitive Spannungswandler werden weltweit sehr häufig zur Spannungsmessung in Hochspannungsanlagen eingesetzt. Im Vergleich zu klassischen induktiven Wandlern, wie Transformatoren, haben kapazitive Wandler den Vorteil, dass sie auch bei einem etwaigen Isoliersversagen des Dielektrikums zwischen einzelnen kapazitiven Elementen noch funktionieren, jedoch ist die Genauigkeit, auf die der kapazitive Spannungswandler ausgelegt ist, nicht mehr gegeben. Bei einem Windungskurzschluss in einem Transformator ist hingegen die Funktionalität in der Regel nicht mehr gegeben.

Kapazitive Spannungswandler haben jedoch kein ideales Verhalten und so kommt es nach einem Fehlereintritt zu transienten Vorgängen, bevor ein stationäres Verhalten erreicht wird. Hauptverantwortlich dafür ist die Energie, die in den aktiven Elementen, sprich Kapazitäten und Induktivitäten gespeichert ist und die sich im Fehlerfall zunächst entladen muss.

Die transienten Schwingungen haben einen großen Einfluss auf das Einlaufen der Fehlerimpedanz zum stationären Endwert. Teilweise läuft der Fehler auch von unten in den Endwert ein, was dazu führen kann, dass Fehler, die außerhalb der Zone auftreten als Fehler, innerhalb der Zone erkannt werden. Dieses Verhalten kann zu einer Überfunktion des Schutzrelais führen.

Um das Verhalten von kapazitiven Spannungswandlern untersuchen zu können, wurden Modelle aufgestellt, an denen diverse Fehlersituationen untersucht wurden. Das Ziel dieser Simulationen ist aufzuzeigen, welche Faktoren einen starken Einfluss einerseits auf den kapazitiven Spannungsteiler und andererseits auch auf den Distanzschutz haben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
2	Komponenten eines kapazitiven Spannungswandlers	8
2.1	Kapazitiver Teiler	8
2.2	Kompensationsdrossel	9
2.3	Zwischenwandler	9
2.4	Filter zur Ferroresonanzunterdrückung	9
2.4.1	Aktive Ferroresonanzfilter	10
2.4.2	Passive Ferroresonanzfilter	11
3	Ersatzschaltbild des kapazitiven Spannungsteilers	13
4	Eigenschaften von kapazitiven Spannungsteilern	15
4.1	Frequenzgang von kapazitiven Spannungswandlern	15
4.1.1	Frequenzgang von kapazitiven Spannungsteilern mit passiver Filterung	15
4.1.2	Frequenzgang von kapazitiven Spannungsteilern mit aktiver Filterung	19
4.2	Fehlereintrittswinkel	24
4.3	Source impedance ratio	25
5	Problemstellung	28
6	Methodik	32
6.1	Berechnung der Fehlerimpedanz mittels Effektivwertzeiger	33
6.2	Berechnung der Fehlerimpedanz durch numerisches Lösen der Leitungsdifferentialgleichungen	33
6.3	Berechnung der Impedanz mittels Filter	34
7	Ergebnisse und Diskussion	35
7.1	Einfluss des SIR auf die Trajektorie der Fehlerimpedanz	35
7.1.1	Einfluss des SIR auf die Trajektorie der Fehlerimpedanz bei aktiver Ferroresonanzfilterung	35
7.1.2	Einfluss des SIR auf die Trajektorie der Fehlerimpedanz bei passiver Ferroresonanzfilterung	43
7.2	Einfluss des Fehlerwinkels auf die Fehlerimpedanz	48
7.3	Einfluss der Kapazität auf die Fehlerimpedanz	54
8	Fazit und Ausblick	63
9	Anhang	65
9.1	CVT Modell mit passiver Filterung	65
9.2	CVT mit aktiver Filterung	66

1 Einleitung

In der Energietechnik spielen Spannungswandler eine wichtige Rolle, da die Betriebsgrößen für diverse Anwendungszwecke transformiert werden müssen. Viele Messeinrichtungen und Schutzeinrichtungen arbeiten nicht auf der Spannungsebene des Betriebsmittels sondern auf einer niedrigeren Spannungsebene.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, das Spannungsniveau zu variieren. So gibt es einerseits induktive Spannungsteiler, welche nach dem Prinzip des Transformators funktionieren. Bei diesen ist die Sekundärspannung gegenüber der Primärspannung dem Windungsverhältnis der Primär- und Sekundärspulen proportional.

Diese Art der Wandler werden vor allem zur Spannungsmessung in Hochspannungsfreiluftanlagen in Europa eingesetzt, da induktive Wandler eine sehr hohe Genauigkeit aufweisen. Des Weiteren ist ein induktiver Wandler, bei dem ein Fehler wie bspw. ein Windungskurzschluss auftritt in der Regel defekt.

Andererseits gibt es kapazitive Spannungsteiler (CVT; englisch für „capacitive voltage transformer“). Diese bestehen aus einem kapazitiven Teiler, der die Eingangsspannung zunächst auf ein niedrigeres Niveau transformiert, in der Regel auf etwa 5 kV-15 kV. Eine Kompensationsdrossel hat die Aufgabe jegliche Phasenverschiebung zwischen Primär- und Sekundärspannung auf der Betriebsfrequenz zu unterdrücken.

Die Kapazitäten bestehen aus mehreren identen kapazitiven Elementen, die in Serie geschaltet sind. Ein Zwischenwandler transformiert in einem weiteren Schritt die Zwischenspannung von 5 kV-15 kV auf die gewünschte Ausgangsspannung. Außerdem finden sich noch häufig Resonanzfilter in kapazitiven Spannungswandlern, welche Ferroresonanzerscheinungen unterdrücken sollen.

Kapazitive Spannungswandler werden zur Spannungsmessung in Hochspannungsanlagen wesentlich häufiger eingesetzt als induktive. Ein entscheidender Unterschied liegt darin, dass kapazitive Spannungswandler auch noch funktionsfähig sind, wenn einzelne Kondensatorelemente durch ein Isoliersversagen durchschlagen. Dabei ändert sich jedoch die Genauigkeit des Spannungswandlers.

Weitere Möglichkeiten der Spannungswandlung sind widerstandsbasierte Spannungswandler und optische Spannungswandler.

In dieser Arbeit wird ausschließlich auf die kapazitiven Spannungsteiler eingegangen. Im Besonderen darauf, wie sich transiente Vorgänge, wie sie beim Entladen von aktiven Elementen, wie Induktivitäten und Kapazitäten zustande kommen, auf die Fehlerimpedanz auswirken. Hier kann es nämlich dazu kommen, dass die transienten Vorgänge dazu führen, dass die Trajektorie der Fehlerimpedanz temporär Werte annimmt, die kleiner als der stationäre Endwert sind, was eine Überfunktion des Distanzschutz begünstigt. In Folge dessen kann es vorkommen, dass Fehler die außerhalb einer Zone sind, als Fehler innerhalb dieser erkannt werden.

2 Komponenten eines kapazitiven Spannungswandlers

Wie Eingangs erwähnt setzt sich ein kapazitiver Spannungswandler aus mehreren Komponenten zusammen, die alle eine unterschiedliche Aufgabe bei der Spannungswandlung absolvieren. Die Hauptkomponenten sind ein kapazitiver Teiler, eine Kompensationsdrossel, ein Zwischentransformator und eine Filtereinheit zur Unterdrückung von Ferroresonanzerscheinungen.

2.1 Kapazitiver Teiler

Die Aufgabe des kapazitiven Teilers ist es, die Betriebsspannung auf das Niveau der Zwischenspannung zu transformieren. Dieses liegt typischerweise bei 5 kV-15 kV. Folgend, in Abbildung 1, findet sich das einfache Ersatzschaltbild dieser Schaltung. Wie daraus zu erkennen ist, setzt sich die Spannung V_m , also jene, die sowohl an der Kompensationsdrossel, als auch am Zwischentransformer liegt, durch anwenden der Spannungsteilerregel folgendermaßen zusammen

$$V_m = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_q \quad (1)$$

Die Kondensatoren C_1 und C_2 sind dabei in der Regel als Reihenschaltung mehrerer Kondensatorelemente ausgeführt. Dies hat zur Folge, dass auch bei einem Isolationsversagen des Dielektrikums in einem oder mehreren Kondensatorelementen nicht gleich die gesamte Schaltung versagt, sondern der Spannungsteiler noch funktionsfähig ist. Die Ausgangsspannung wird dadurch jedoch verfälscht. [7]

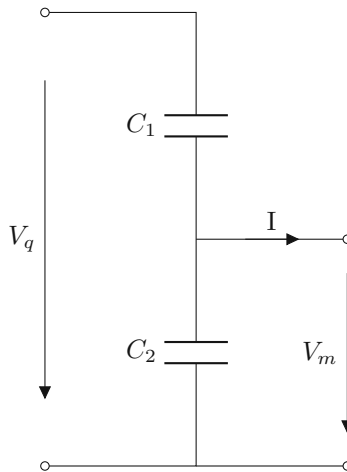


Abbildung 1: Ersatzschaltbild des kapazitiven Teilers.

2.2 Kompensationsdrossel

Die Kompensationsdrossel besteht aus einem ringförmigen Eisenkern. Für diesen wird in der Regel ein Schnittbandkern verwendet. Die Wicklung setzt sich aus mehreren tausend Windungen zusammen. Des Weiteren wird ein Luftspalt von etwa 1 mm, zur Linearisierung der magnetischen Kennlinie eingebaut.

Die Kompensationsdrossel hat die Aufgabe sämtliche Phasenverschiebungen, hervorgerufen durch den kapazitiven Spannungsteiler zu kompensieren. Vor allem bei der Systemfrequenz ist dies wichtig, um eine Verfälschung des Messergebnisses auszuschließen.

Da die Kompensationsdrossel nicht als ideal angenommen wird, sind zusätzlich parasitäre Effekte in Form eines Parallelkondensators und eines Reihenwiderstandes zu modellieren.

Die Kompensationsdrossel muss mit dem kapazitivem Spannungsteiler abgestimmt sein, um in der Lage zu sein die Phasenverschiebung zu kompensieren. Nach [11] wird dies mit einer Induktivität der Drossel von

$$L_{komp} = \frac{1}{(C_1 + C_2)(2\pi f)^2} \quad (2)$$

erreicht.

2.3 Zwischenwandler

Der Zwischenwandler hat die Aufgabe, die vom kapazitivem Spannungsteiler auf 5 kV-15 kV hinuntergeregelte Spannung auf das gewünschte Niveau der Ausgangsspannung zu transformieren. Der Transformator kann, je nach Anwendungsfall mehr als eine Sekundärwicklung besitzen. In der Regel besitzt er eine Dämpfungswicklung, an der Filter zur Unterdrückung von Ferroresonanzerscheinungen angebracht werden können.

2.4 Filter zur Ferroresonanzunterdrückung

Im Normalbetrieb transformiert der kapazitive Spannungsteiler die Betriebsspannung auf ein Zwischenniveau und ein Transformator übersetzt diese Spannung auf einen niedrigeren Wert für Mess- und Überwachungszwecke. Tritt ein Fehler auf, so kann dies zu starken Änderungen bei der Spannung führen. Dies resultiert eventuell in einer Sättigung des Eisenkerns des Transformators und unter Umständen auch im Auftreten von Ferroresonanzerscheinungen.

Ferroresonanz ist ein nichtlineares Resonanzphänomen, welches stark von der Hysterese im Eisenkern beeinflusst wird und zu Überspannungen und Überströmen führen kann, welche für elektrische Geräte gefährlich werden können. Aus diesem Grund werden in der Praxis Filter bei kapazitiven Spannungsteilern eingesetzt, die dieses Phänomen unterdrücken sollen. Man unterscheidet dabei aktive und passive Ferroresonanzfilter.

2.4.1 Aktive Ferroresonanzfilter

In Abbildung 2 ist die Schaltung für ein aktives Ferroresonanzfilter dargestellt. Auf der Eingangsseite V_i wird diese Schaltung an die Sekundärseite des Zwischenwandlers angeschlossen und am Ausgang V_o kann die Ausgangsspannung des kapazitiven Spannungsteilers abgegriffen werden.

Wie man in Abbildung 2 sehen kann, bestehen aktive Ferroresonanzfilter unter anderem aus einem Schwingkreis aus Induktivität L und Kapazität C . Dieser Schwingkreis ist so ausgelegt, dass seine Resonanzfrequenz bei der Grundfrequenz des Systems liegt, also 50 Hz bzw. 60 Hz.

Des Weiteren ist ein Widerstand R an der Mittelanzapfung der Spule angeschlossen. Dieser hat die Aufgabe dämpfend auf Überspannungen, wie sie beim auftreten von Ferroresonanzen vorkommen, zu wirken.

Im Normalbetrieb stellt dieser aktive Filter eine hohe Impedanz gegenüber der Grundfrequenz dar und erfährt deshalb auch keine Ladeeffekte. Bei Frequenzen, welche von der Grundfrequenz abweichen, egal ob zu hoch oder niedrig, nimmt die Impedanz des Schwingkreises ab und die Gesamtimpedanz des Filters nähert sich jener des Dämpfungswiderstandes an. So kann im Störfall die Energie von Spannungsüberhöhungen abgeführt werden.

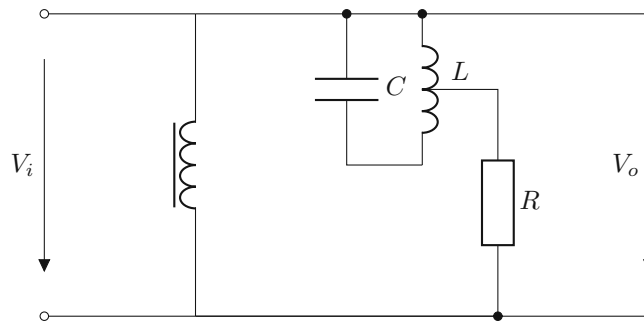


Abbildung 2: Schaltung eines aktiven Ferroresonanzfilters

In Abbildung 3 ist die Impedanz des Filters bei diversen Frequenzen dargestellt. Es ist sehr gut erkennbar, wie im vorherigen Absatz angemerkt, dass bei der Netzfrequenz ($f = 60 \text{ Hz}$) das Filter eine sehr hohe Impedanz annimmt. Jenseits dieser Frequenz nimmt die Impedanz exponentiell ab und nähert sich dem Wert des Dämpfungswiderstandes an - In diesem Fall 37.5Ω . Dieses Verhalten ist jedoch auch zu erwarten, wenn man bedenkt, dass bei der Netzfrequenz das Filter in Resonanz ist.

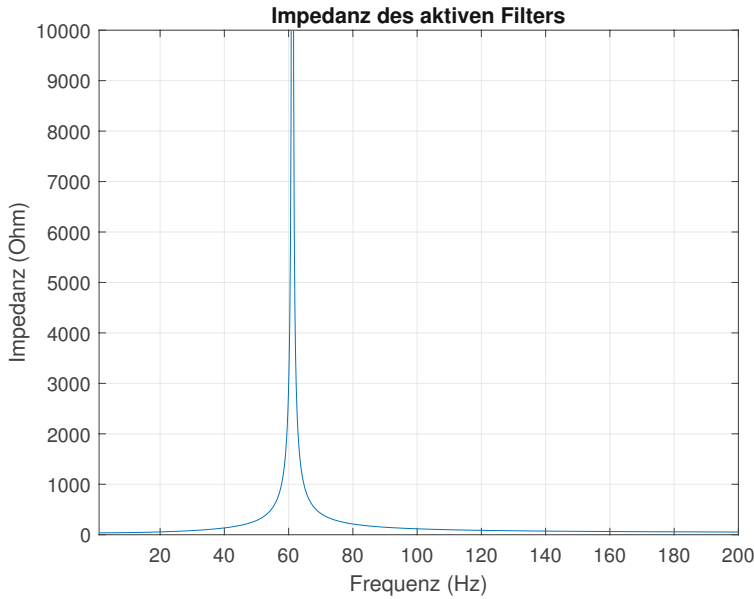


Abbildung 3: Impedanz des aktiven Filters.

Die Kapazität und Induktivität des Filters sind Energiespeicher und tragen daher zur Höhe der transienten Vorgänge bei. Das heißt, dass aktive Ferroresonanzfilter die Antwort des kapazitiven Spannungsteilers im Fehlerfall beeinflussen. Des Weiteren wirkt diese Art der Filterung wie ein Bandpass und führt zu einer Zeitverzögerung beim Ausgangssignal, [2][8].

2.4.2 Passive Ferroresonanzfilter

In Abbildung 4 ist die Schaltung eines passiven Ferroresonanzfilters zu sehen. Wie beim aktiven Filter ist die Eingangsseite V_i des Filters sekundärseitig an den Zwischenwandler angeschlossen und am Ausgang kann die Ausgangsspannung V_o des kapazitiven Spannungsteilers abgegriffen werden.

Das Filter besteht aus einer Induktivität L_f die bei einer Spannung von 150% der Nennspannung sättigt, sowie einem Parallelwiderstand R_f , außerdem einer Funkenstrecke, die mit einem weiteren Widerstand R verbunden ist.

Im Normalbetrieb sättigt weder die Induktivität, noch ist die Betriebsspannung so hoch, dass sie die Funkenstrecke durchschlagen kann. Treten nun Ferroresonanzerscheinungen auf, so kann die Überspannungen die Funkenstrecke schließen. Der nun verbundene Widerstand R trägt zur Dämpfung der Überspannung bei.

Sättigt die Induktivität L_F bei einer Überspannung, wirkt der Serienwiderstand R_f ebenfalls dämpfend und trägt zur Stabilisierung der Spannung bei.

Passive Ferroresonanzfilter haben im Vergleich zu den aktiven kaum einen Ein-

fluss auf den transienten Spannungsverlauf nach einem Fehlereintritt. Dies kommt daher, dass im normalen Betrieb das passive Filter keinen nennenswerten Einfluss auf die Ausgangsspannung besitzt und die meisten Komponenten lediglich bei Spannungsüberhöhungen aktiv werden, [2][8].

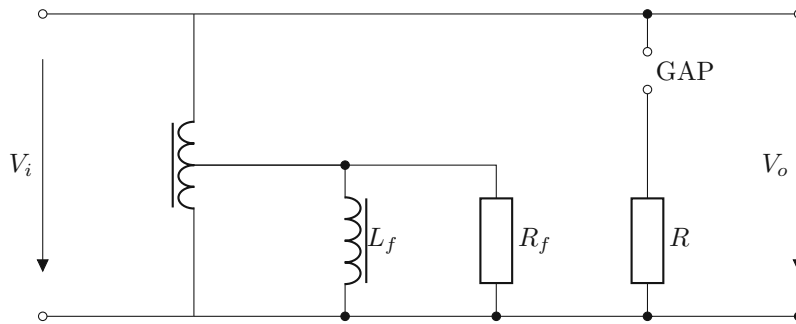


Abbildung 4: Schaltung eines passiven Ferroresonanzfilters.

3 Ersatzschaltbild des kapazitiven Spannungsteilers

Das Ersatzschaltbild eines kapazitiven Spannungsteilers kann in Abbildung 5 betrachtet werden. Hier kann man sehr gut die im vorherigen Kapitel beschriebenen Komponenten erkennen. Auf der linken Seite befindet sich der kapazitive Teiler, bestehend aus C_1 und C_2 . An diesem ist die Kompensationsdrossel L_c angeschlossen, welche ihrerseits einen parasitären Widerstand R_c und eine parasitäre Streukapazität C_c aufweist. Außerdem ist der Zwischenwandler bestehend aus einer Induktivität L_p einem Widerstand R_p und einer Parallelkapazität C_p und eine Blackbox für die Ferroresonanzfilter („FRSC“) erkennbar.

Die Systemspannung V_s wird von dem kapazitiven Teiler, bestehend aus den beiden Kapazitäten C_1 und C_2 , auf etwa 5 kV-15 kV gewandelt. Diese Spannung liegt an der Kompensationsdrossel sowie dem Zwischenwandler an.

L_p stellt die Induktivität des Zwischenwandlers dar, R_p seine Kupferverluste und C_p die Streukapazität.

Die Box mit der Aufschrift „FRSC“ symbolisiert den Ferroresonanzfilter (engl. ferroresonance-suppression circuit). Diese Blackbox ist ein Platzhalter für einen aktiven oder passiven Ferroresonanzfilter wie im Unterpunkt 2.4 beschrieben.

Die Bürde R_b ist häufig rein resistiv. Für das Testen der transienten Antwort des kapazitiven Spannungsteilers ist es laut ANSI C93.1-1990 Standard erforderlich, dass eine Parallelschaltung eines Widerstandes mit einer Serienschaltung aus Widerstand und Induktivität verwendet wird [8].

Eine andere Darstellungsform des Wandlers ist in Abbildung 6 zu sehen. Wie man erkennen kann, wurde der kapazitive Teiler durch eine Ersatzkapazität C_e ersetzt.

Es handelt sich dabei um eine Ersatzschaltung nach dem Thévenin Theorem. Um die Ersatzkapazität bestimmen zu können, wird die Eingangsspannung V_s kurzgeschlossen, so erkennt man, dass die beiden Kapazitäten C_1 und C_2 parallel geschaltet sind. Daraus ergibt sich auch die Ersatzkapazität zu

$$C_e = C_1 + C_2. \quad (3)$$

Die Eingangsspannung der Thévenin Ersatzschaltung kann nach

$$V_m = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_s \quad (4)$$

berechnet werden.

Ein detailliertes Modell des nach [8] erstellten und in dieser Arbeit verwendeten Modells ist im Anhang zu finden. Dort finden sich auch sämtliche Parameter der einzelnen Komponenten.

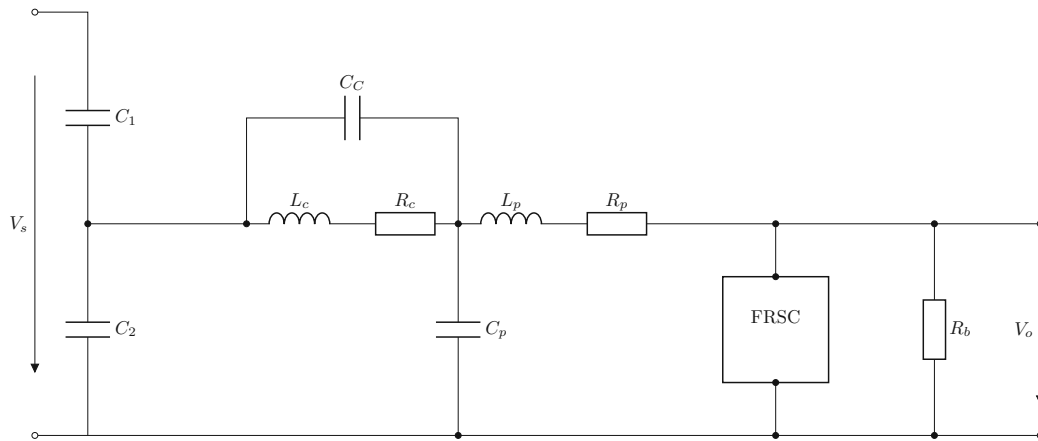


Abbildung 5: Ersatzschaltbild eines kapazitiven Spannungsteilers.

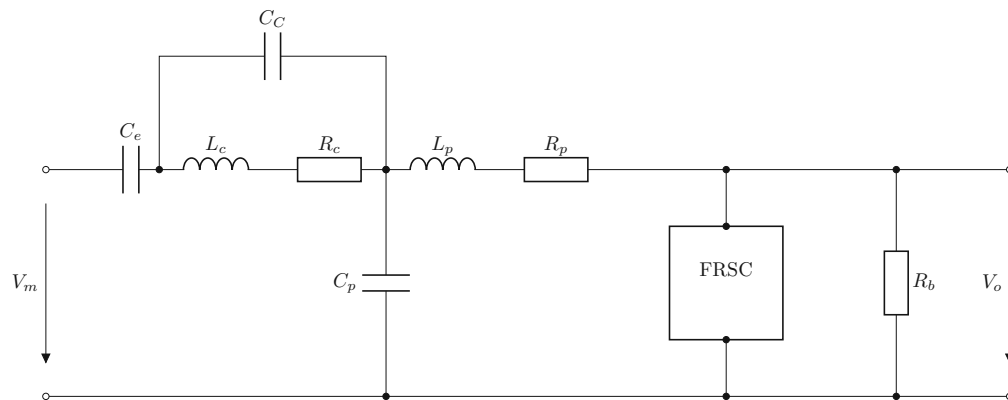


Abbildung 6: Ersatzschaltbild eines kapazitiven Spannungsteilers nach dem Thévenin Theorem.

4 Eigenschaften von kapazitiven Spannungsteilern

In diesem Kapitel sollen die diversen Eigenschaften, wie bspw. der Frequenzgang angeführt und diskutiert werden.

4.1 Frequenzgang von kapazitiven Spannungswandlern

Der Frequenzgang von kapazitiven Spannungswandlern wird von mehreren Faktoren beeinflusst. So wirkt sich auch die Art des Ferroresonanzfilters drastisch auf den Verlauf des Frequenzgangs aus. Im folgenden Kapitel soll aufgezeigt werden, wie unterschiedlich sich die aktive und passive Ferroresonanzunterdrückung auswirken, und welche Bauteile bei gewissen Frequenzen ausschlaggebend für den Frequenzgang sind.

4.1.1 Frequenzgang von kapazitiven Spannungsteilern mit passiver Filterung

In Abbildung 7 ist der Frequenzgang eines kapazitiven Spannungsteilers mit passivem Ferroresonanzfilter zu sehen. Dieser Plot ist so normiert, dass der Betragsfrequenzgang bei Netzfrequenz, in diesem Fall 60 Hz, bei 0 dB zu liegen kommt. Auf diese Weise erscheint die 60 Hz-Komponente ungedämpft, da dies die Hauptfunktion des kapazitiven Spannungsteilers ist, und man so gut erkennen kann, wie stark andere Frequenzen gegenüber der Grundfrequenz gedämpft werden. Prinzipiell gilt, dass der kapazitive Spannungsteiler sämtliche Frequenzen ungedämpft durchlassen soll, da auf diese Weise die Ausgangsspannung ein genaues Abbild der Eingangsspannung ist. Der ideale Frequenzgang wäre eine konstante Linie bei 0 dB. Wie man jedoch in den folgenden Abbildungen sieht, wirkt ein realer kapazitiver Spannungsteiler bei unterschiedlichen Frequenzen unterschiedlich stark dämpfend. In diesen ist jeweils der Betrag und das Argument des Verhältnisses der Ausgangsspannung (V_o in den Abbildungen 5 bzw. 6) zur Eingangsspannung (V_s bzw. V_m in den Abbildungen 5 bzw. 6) des kapazitiven Spannungsteilers dargestellt.

Wie man erkennen kann, ist der Frequenzgang bei passiver Filterung eher flach, lediglich zwei Extremstellen bei etwa 500 Hz und 4000 Hz fallen auf. Diese treten einerseits auf Grund der Resonanzfrequenz der Kompensationsdrossel auf und andererseits Grund der Eigenfrequenz des Zwischentransformators auf.

Betrachtet man den Parallelschwingkreis des Ersatzschaltbildes der Kompensationsdrossel (Abbildung 6) etwas genauer, so gilt für die Resonanzfrequenz

folgender Zusammenhang

$$\omega_R^2 = \frac{1}{L_c C_c} \quad (5)$$

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{L_c C_c}} \quad (6)$$

$$f_R = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_c C_c}} \quad (7)$$

Setzt man nun die Parameter der Kompensationsdrossel ein - $C_c = 1.16 \text{ nF}$ und $L_c = 101.2 \text{ H}$ - so führt dies auf eine Resonanzfrequenz von 464.516 Hz sprich jener Stelle, an der die erste Extremstelle in Abbildung 7 auftritt. Die Werte die hier angeführt sind, sind im Anhang dargestellt.

Führt man die selbe Überlegung auch mit dem Zwischentransformator durch, so ergibt sich die Eigenfrequenz des Zwischentransformators zu 3871.478 Hz , also der zweiten Extremstelle.

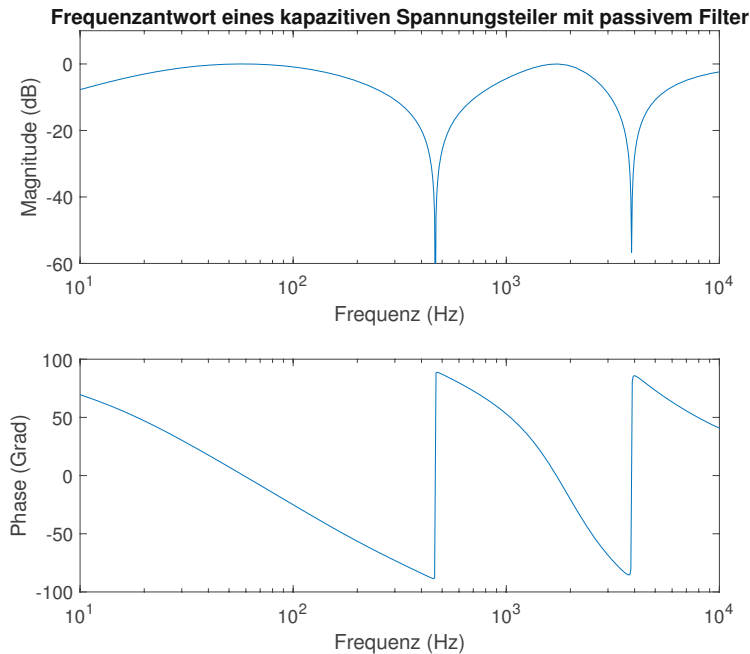


Abbildung 7: Frequenzantwort eines kapazitiven Spannungsteilers mit passivem Ferroresonanzfilter.

Folgend sollen nun die Auswirkungen diverser Komponenten des CVTs auf den Frequenzgang aufgezeigt werden. So ist in Abbildung 8 bspw. zu sehen, wie sich der Frequenzgang bei verschiedenen Werten der Streukapazität der Kompensationsdrossel verhält.

Der Standardwert der Streukapazität liegt bei 1.16 nF . Es sind neben diesem

Fall auch noch die Verläufe für eine um 300 pF bzw. 600 pF größere bzw. kleinere Kapazität angeführt.

Es ist zu erkennen, dass sich eine veränderte Streukapazität C_c bei sonst gleichbleibenden Parametern auf die erste Extremstelle auswirkt. Dies kann anhand von Gleichung 7 erklärt werden. Ein größeres oder kleineres C_c führt automatisch zu einer veränderten Resonanzfrequenz.

Eine kleinere Streukapazität führt dazu, dass der Frequenzgang bei niedrigen Frequenzen schwächer gedämpft wird als dies bei höheren Streukapazitäten der Fall ist. Dies geht auch mit der unterschiedlichen Eigenfrequenz einher.

Für den Frequenzgang bis etwa 200 Hz, also auch bei der Netzfrequenz sind die Auswirkungen der Streukapazität der Kompensationsdrossel vernachlässigbar.

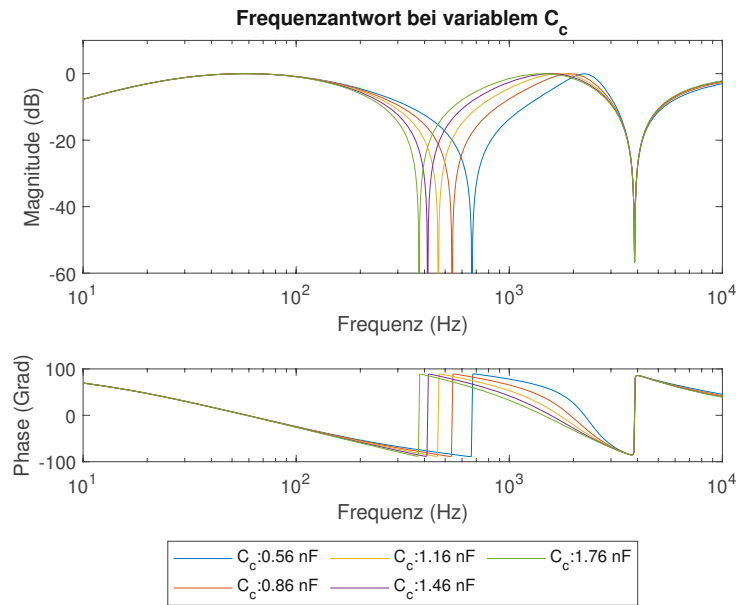


Abbildung 8: Frequenzantwort eines kapazitiven Spannungsteilers mit passivem Ferroresonanzfilter bei diversen Werten der Streukapazität C_c der Kompensationsdrossel.

In Abbildung 9 sind die Auswirkungen der Streukapazität C_p des Zwischentransformators auf den Frequenzgang dargestellt. Der Ausgangswert liegt bei 0.26 nF und es wurden die Fälle einer Änderung um $\pm 30 \text{ pF}$ und $\pm 60 \text{ pF}$ betrachtet. Die Auswirkungen sind die gleichen wie sie bei veränderter Streukapazität der Kompensationsdrossel beobachtet werden konnten, jedoch liegen die Effekte dieses Mal bei der zweiten Extremstelle des Frequenzganges, also bei etwa 4 kHz.

Wie Abbildung 8 und 9 zeigen, haben die Streukapazitäten einen nennenswerten Einfluss auf den Frequenzgang und damit auch auf die Ausgangsspannung des kapazitiven Spannungsteilers. Jedoch wirken sich diese Parameter nicht ersichtlich auf Signale mit der Systemfrequenz von 60 Hz aus.

Um den Fehler in der Simulation so gering wie möglich zu halten, ist es daher erforderlich die kapazitiven Streueffekte mit zu simulieren.

Des Weiteren konnte durch die Variation identifiziert werden, welches Bauteil bzw. Komponente für welche Resonanzfrequenz verantwortlich ist und somit die berechnete Resonanzfrequenz bestätigt werden.

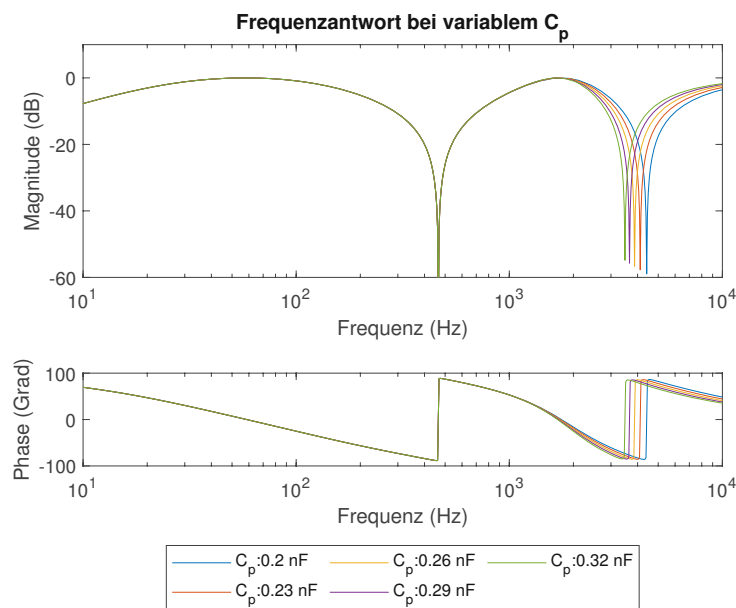


Abbildung 9: Frequenzantwort eines kapazitiven Spannungsteilers mit passivem Ferroresonanzfilter bei diversen Werten der Streukapazität C_p des Zwischentransformators.

Abbildung 10 zeigt wie sich der Frequenzgang verändert, wenn die nach dem Thévenin Theorem berechnete Ersatzkapazität größere bzw. kleinere Werte annimmt. Man kann sehr gut erkennen, dass bei großen Werten der Ersatzkapazität der Verlauf des Graphen wesentlich flacher ist. Dies bedeutet, dass der kapazitive Spannungswandler die Ausgangsspannung nicht so stark verfälscht, indem verschiedene Frequenzen unterschiedlich stark gedämpft werden. Dadurch finden sich in der Ausgangsspannung des CVT auch weniger transiente Schwingungen. Wie sich in Kapitel 7.3 noch zeigen wird, haben kapazitive Spannungswandler mit einer hohen Kapazität - man spricht auch von high capacitance CVT- ein

wesentlich besseres Verhalten als jene mit einer geringen Kapazität (low capacitance).

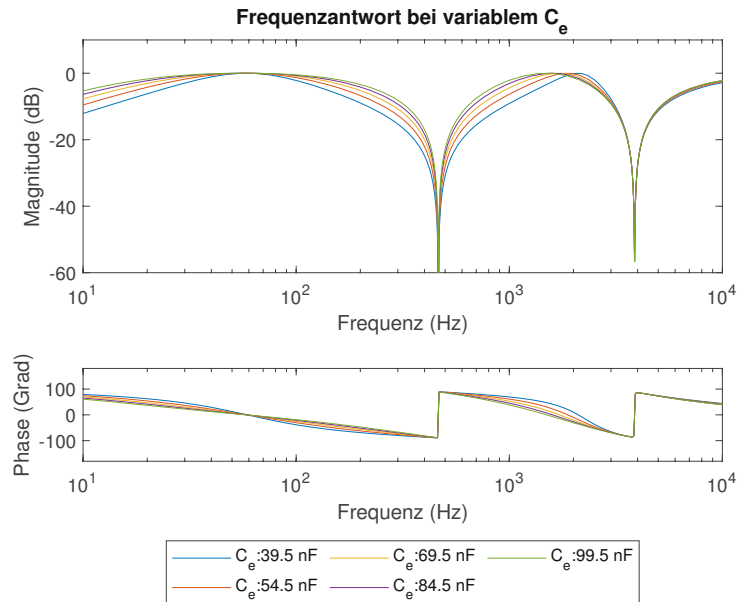


Abbildung 10: Frequenzantwort eines kapazitiven Spannungsteilers mit passivem Ferroresonanzfilter bei diversen Werten der Ersatzkapazität C_e des kapazitiven Teilers.

4.1.2 Frequenzgang von kapazitiven Spannungsteilern mit aktiver Filterung

Das aktive Filter eines kapazitiven Spannungsteilers besteht, wie im Abschnitt 2.4 beschrieben aus einem LC-Parallelschwingkreis, welcher seine Resonanzfrequenz bei der Netzfrequenz besitzt. Auf diese Weise hat das Filter eine hohe Impedanz gegenüber der Grundschiwingung und beeinflusst diese kaum. Niedrigere oder höhere Frequenzen erfahren eine geringere Impedanz, die sich jener des Dämpfungswiderstandes annähert und dadurch Oberschwingungen dämpft. Dieser Schwingkreis wirkt jedoch wie ein Bandpassfilter und führt Transiente ein.

In Abbildung 11 ist der Frequenzgang eines kapazitiven Spannungsteilers mit aktiver Filterung dargestellt. Die vorhin erwähnte Bandpasscharakteristik, die deutlich die Netzfrequenz von 60 Hz durchlässt aber an den Seiten stark abfällt ist zu erkennen.

Wie bei der passiven Filterung sind auch hier zwei Extremstellen zu erkennen.

Es handelt sich ebenso um die Eigenfrequenzen der Kompensationsspule und des Zwischentransformators.

Die Resonanzfrequenz der Kompensationsspule kann mit Hilfe der Gleichungen 7 berechnet werden und ergibt sich zu $f_{R,L_C} = 1692.754 \text{ Hz}$. Die Eigenfrequenz des Zwischentransformators ergibt sich zu $f_{R,L_P} = 8038.535 \text{ Hz}$.

Vergleicht man nun den Frequenzgang bei aktiver Filterung mit jenem bei passiver Filterung, so fällt auf, dass bei kapazitiven Spannungswandlern mit passiver Filterung der Frequenzgang im Bereich der Systemfrequenz wesentlich flacher ist. Dies geht einher mit der Tatsache, dass die Ausgangsspannung bei aktiver Filterung mit mehr transienten Schwingungen beaufschlagt ist als bei passiver.

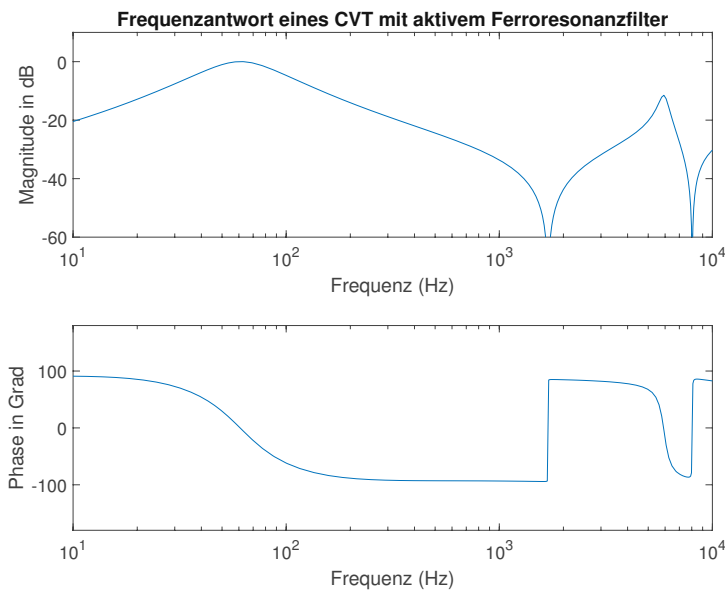
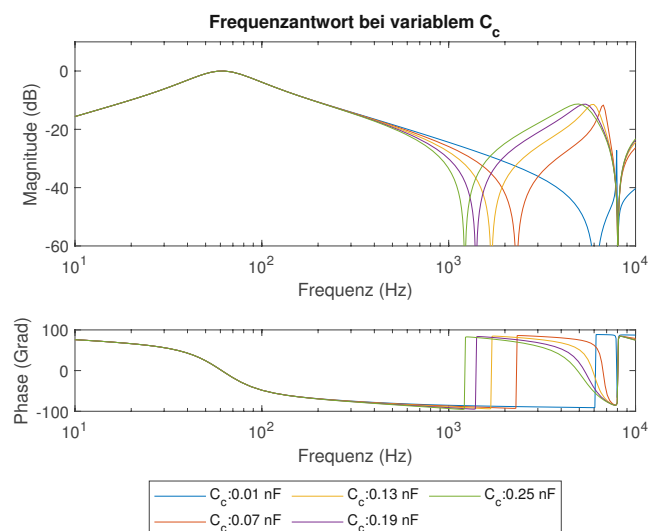
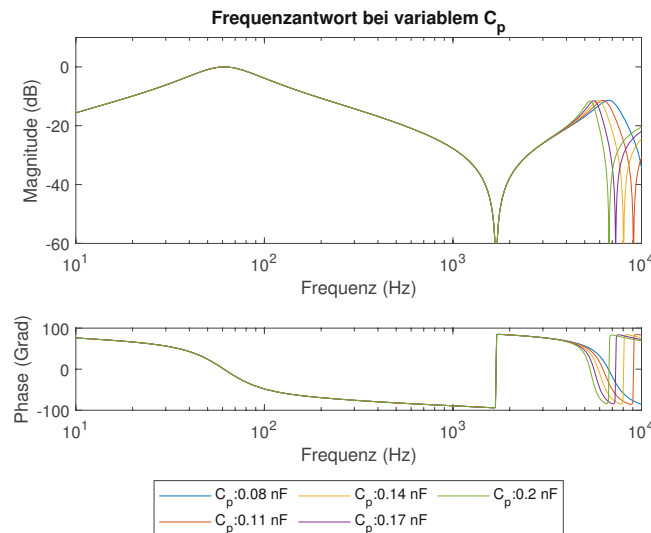


Abbildung 11: Frequenzantwort eines kapazitiven Spannungsteilers mit aktivem Ferroresonanzfilter.

In den Abbildungen 12a und 12b ist der Einfluss der parasitären Streukapazitäten C_c und C_p auf den Frequenzgang dargestellt. Wie es schon beim passiven Filter der Fall war, beeinflussen diese Kapazitäten hauptsächlich den Verlauf, bei Frequenzen nahe der Resonanzfrequenz der Kompensationsdrossel bzw. des Zwischentransformators.



(a) Frequenzantwort eines kapazitiven Spannungsteilers mit aktivem Ferroresonanzfilter bei variabler Streukapazität C_c der Kompensationsdrossel.



(b) Frequenzantwort eines kapazitiven Spannungsteilers mit aktivem Ferroresonanzfilter bei variabler Streuinduktivität C_p des Zwischentransformators.

Abbildung 12: Auswirkungen der parasitären Kapazitäten auf den Frequenzgang.

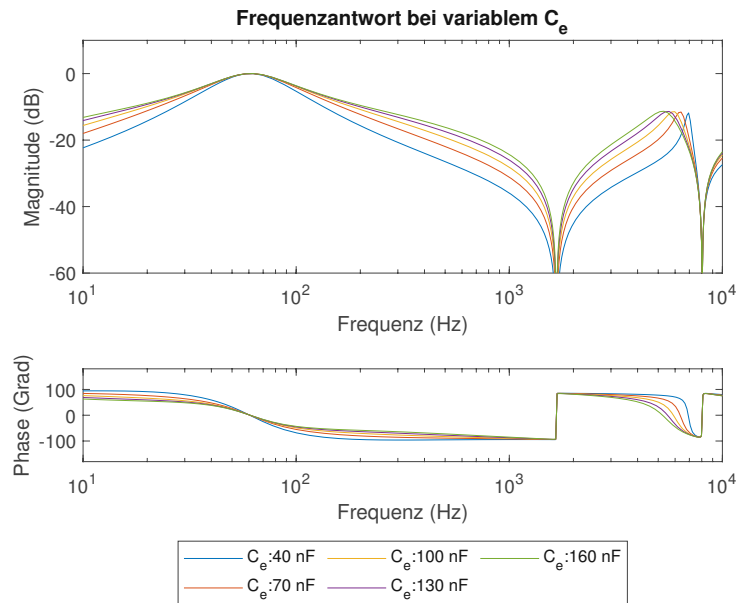


Abbildung 13: Frequenzantwort eines kapazitiven Spannungsteilers mit diversen Werten der Ersatzkapazität C_e des Spannungsteilers.

In Abbildung 13 ist der Frequenzgang bei verschiedenen Werten der Ersatzkapazität C_e des kapazitiven Spannungsteilers dargestellt. Wie sich gut erkennen lässt, ist die Dämpfung der Ausgangsspannung jenseits der Netzfrequenz bei niedrigen Werten wesentlich stärker. Aus diesem Grund ist bei diesen Kapazitätswerten auch mit höheren Transienten zu rechnen.

In den letzten beiden Unterkapiteln hat sich gezeigt, dass viele Bauteile eines kapazitiven Spannungsteilers mitunter einen deutlichen Einfluss auf den Frequenzgang bzw. auf die Ausgangsspannung haben. Auch die parasitären Kapazitäten der Kompensationsdrossel und dem Zwischentransformator sind zu berücksichtigen, wenn die transienten Abläufe eines CVT realitätsnahe dargestellt werden sollen.

In Abbildung 14 ist zum Vergleich auch der Frequenzgang bei Vernachlässigung der parasitären Kapazitäten dargestellt. Vergleicht man dies mit Abbildung 11, so fällt sofort auf, dass die Extremstellen zwischen 1 kHz und 10 kHz verschwunden sind. Dies lässt sich auf das Vernachlässigen der parasitären Kapazitäten der Kompensationsdrossel und des Zwischenwandlers zurückführen, da an diesen Stellen die Resonanzfrequenzen dieser Elemente lag.

Des Weiteren hat die gewählte Filterung zur Ferroresonanzunterdrückung einen deutlichen Einfluss auf den Verlauf des Frequenzganges. Die aktive Filterung

führt größere Transiente, ein als es bei der passiven der Fall ist.

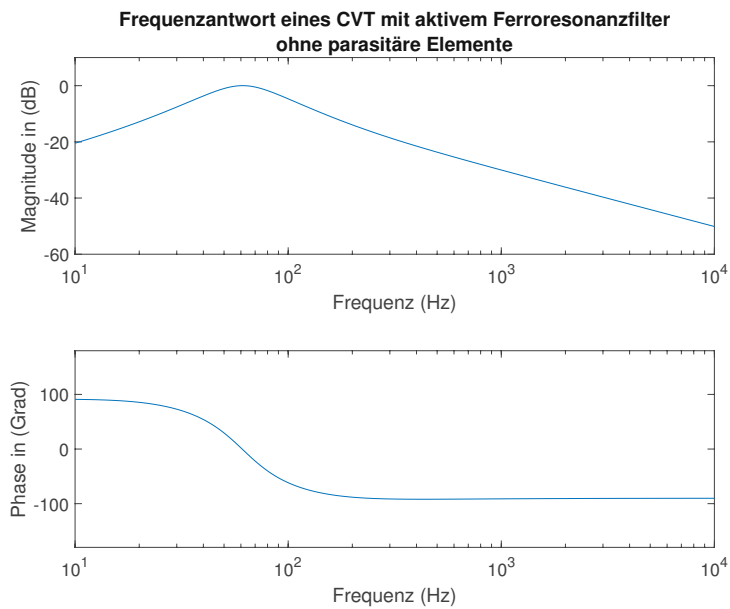


Abbildung 14: Frequenzantwort eines kapazitiven Spannungsteilers mit aktivem Ferroresonanzfilter bei Vernachlässigung der parasitären Kapazitäten C_c und C_p .

4.2 Fehlereintrittswinkel

Ein weiterer wichtiger Aspekt der die Ausgangsspannung eines kapazitiven Spannungsteilers beeinflusst, ist der Zeitpunkt zu dem der Fehler eintritt. Die Spannung am Ausgang eines CVT unterscheidet sich, je nachdem wie groß der Fehlereintrittswinkel ist. Die größten transienten Verläufe treten dann auf, wenn der Fehler in einem Spannungsnulldurchgang stattfindet und die geringsten bei einem Fehler am Scheitelpunkt der Spannung.

Grundlegend dafür ist, wo die Energie zum Fehlereintritt gespeichert ist. Bei einem Fehler im Nulldurchgang der primären Spannung, ist die Spannung am Kondensator maximal. Für die gespeicherte Energie gilt

$$E_{kap} = \frac{1}{2} C \cdot U_c^2 \quad (8)$$

mit der Kapazität C des Kondensators und der Kondensatorspannung U_c . Ist nun im Spannungsnulldurchgang die Spannung am Kondensator maximal, so ist auch die gespeicherte Energie am größten und im Fehlerfall entlädt sich jene Energie, was zu transienten Verläufen führt.

Die Spannung ist an der Induktivität am größten, jedoch ist die Energie am geringsten. Deshalb tragen induktive Elemente nicht wesentlich zu den transienten Vorgängen bei einem Fehler im Spannungsnulldurchgang bei.

Während im Scheitelpunkt der Primärspannung die Spannung an den resistiven Elementen maximal ist, ist sie an den kapazitiven und induktiven Elementen null. Da bei Kapazitäten und Induktivitäten die Phase bei Spannung und Strom um $\mp 90^\circ$ verschoben sind, ist der Strom maximal, wenn die Spannung minimal ist.

Für die Energie, die in Induktivitäten gespeichert ist gilt

$$E_{ind} = \frac{1}{2} L \cdot I_c^2. \quad (9)$$

Diese Energie ist im Spannungsmaximum der Primärspannung am größten.

Die Energie die in den Extrempunkten, entweder in den kapazitiven Elementen oder den induktiven gespeichert wird, ist gleich groß. Daher ist die Menge der Energie, die sich während der transienten Verläufe entlädt für beide Fälle gleich groß. Ausschlaggebend ist hingegen die Zeitkonstante, mit der sich die Kapazitäten bzw. Induktivitäten entladen. Für Kapazitäten gilt $\tau_C = RC$ während für Induktivitäten $\tau_L = \frac{L}{R}$ gilt.

Die längere Zeitkonstante tritt bei den kapazitiven Elementen auf. Daher ist in diesem Fall auch mit längeren transienten Vorgängen zu rechnen. Das bedeutet, im Spannungsnulldurchgang der Primärspannung ist der Einfluss des kapazitiven Spannungswandlers auf die Ausgangsspannung am stärksten.

In Abbildung 15 sind die Ausgangsspannungen des kapazitiven Spannungsteilers bei einem Fehler im Spannungsnulldurchgang sowie im Spannungsmaximum

dargestellt. Zum Vergleich ist ebenfalls eine Referenzspannung in gelb abgebildet. Diese beschreibt das Verhalten eines idealen CVT. Der Fehler im Spannungsnulldurchgang tritt bei etwa 2.016 s ein und jener im Maximum bei 2.02 s. Es ist ersichtlich, dass sich die transienten Verläufe stark unterscheiden je nach Fehlereintrittswinkel.

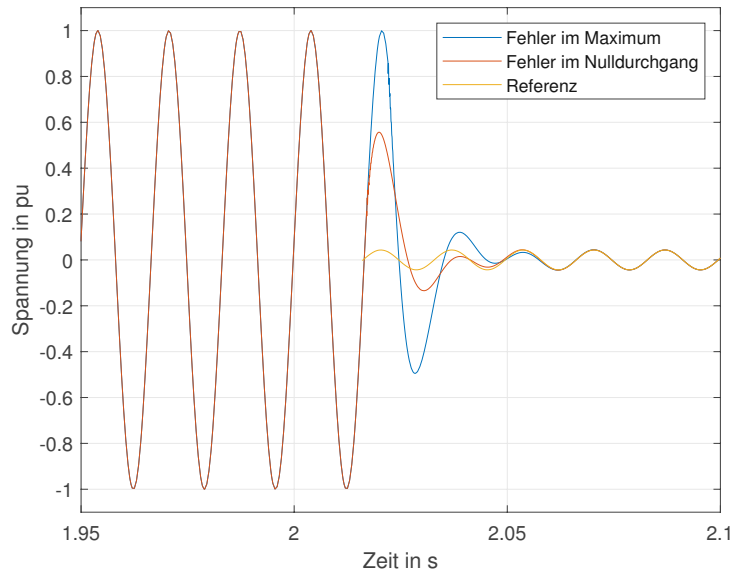


Abbildung 15: Verlauf der Transienten bei einem Fehler im Spannungsmaximum bzw. Spannungsnulldurchgang.

4.3 Source impedance ratio

Das „source impedance ratio“ kurz auch SIR, wird neben anderen Methoden wie der Impedanz oder der physischen Länge häufig zur Beschreibung der Länge einer Leitung verwendet. Für Schutzeinrichtungen wie zB. den Distanzschutz ist es äußerst wichtig, die Länge des zu schützenden Elements zu kennen, denn nur so kann ein zuverlässiger Schutz erreicht werden. Die physische Länge einer Leitung ist zwar ein wichtiger Parameter, jedoch eignet er sich weniger zur Berechnung von Relaiseinstellung.

Wie der Name schon suggeriert beschreibt das source impedance ratio das Verhältnis der Quellenimpedanz zur Leitungsimpedanz.

$$SIR = \frac{Z_{Quelle}}{Z_{Leitung}} \quad (10)$$

Dieses Verhältnis kann auch als Spannungsteiler interpretiert werden, siehe Abbildung 16.

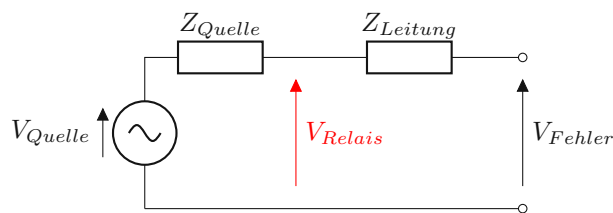


Abbildung 16: Einfaches Ersatzschaltbild zur Definition des SIR

Wie sich in den Abbildungen 17 und 18 zeigt ist die Spannung V_{Relais} , die am Relais gemessen wird wesentlich geringer als die Quellenspannung V_{Quelle} . Dieses Verhalten ist besonders bei hohen source impedance ratios ausgeprägt. So ist bspw. bei einem SIR von vier die Spannung V_{Relais} , die am Relais gemessen wird lediglich 20% der Quellenspannung, wohingegen sie bei einem SIR von 1 bei 50% liegt.

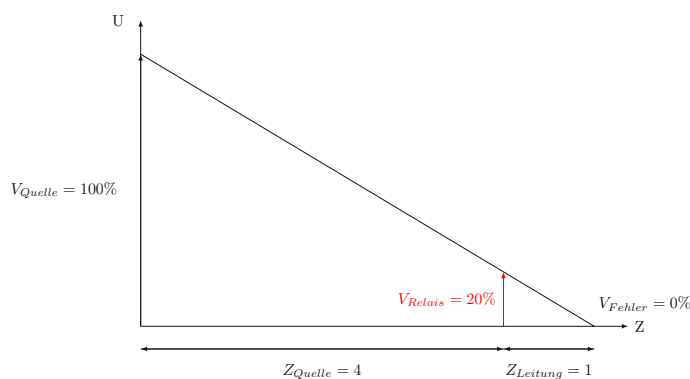


Abbildung 17: Relaisspannung bei einem SIR von 4.

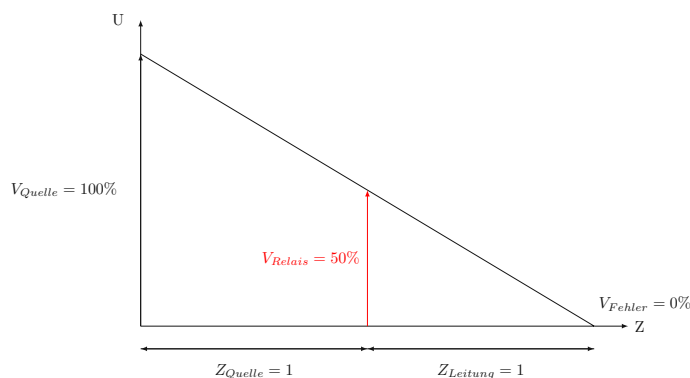


Abbildung 18: Relaisspannung bei einem SIR von 1.

Je geringer die Spannung am Relais ist, desto stärker wirken sich Messfehler und Toleranzen aus. Ein typischer kapazitiver Spannungsteiler hat durchaus eine Toleranz von 1% im eingeschwungenen Zustand und einen Fehler von bis zu 5% während transienter Vorgänge [16]. Vor allem bei sehr geringen Spannungen und bei Berücksichtigung der Toleranzen ist es oftmals sehr schwierig zu unterscheiden, ob der Fehler innerhalb der Zone oder außerhalb liegt.

Des Weiteren ist die Amplitude der CVT Spannung, ein entscheidender Faktor für den Einfluss der Transienten. Bei geringen Spannungen wirken sich transiente Vorgänge wesentlich stärker aus [8][16].

5 Problemstellung

Der Distanzschutz wird häufig zum Schutz von Leitungen eingesetzt. Er ist äußerst selektiv und benötigt keinerlei Hilfsleitungen entlang des geschützten Objekts.

Das Auslösekriterium wird beim Distanzschutz durch einen Vergleich der gemessenen Leitungsimpedanz mit einer Referenzimpedanz gebildet. Ist die gemessene Impedanz geringer als die Referenzimpedanz löst das Relais aus, da ein Fehler entdeckt wurde.

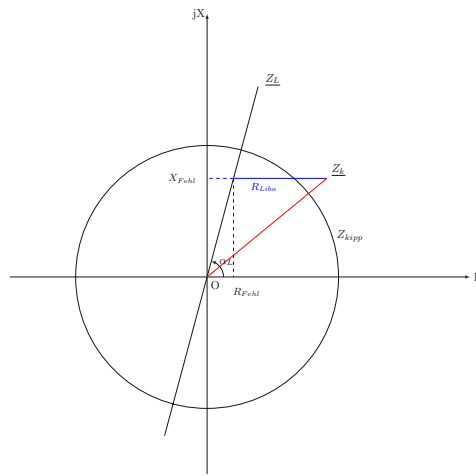


Abbildung 19: Leitungsgerade und Kippimpedanz in der komplexen Ebene.

Die Leitungsimpedanz wird durch das Schutzgerät aus Strom und Spannung berechnet. Tritt ein Fehler ein, so verändern sich der Strom und die Spannung entlang der Leitung und somit auch die am Anfang der Leitung (dem Einbauort des Relais) gemessene Impedanz. Gemessen wird jedoch häufig nicht die reine Leitungsimpedanz, sondern bei nicht satten Kurzschlüssen handelt es sich um die geometrische Summe der Leitungsimpedanz und des Lichtbogenwiderstandes. In Abbildung 19 ist die tatsächliche Fehlerimpedanz durch $\underline{Z}_{Fehl} = R_{Fehl} + jX_{Fehl}$ gegeben. Der Lichtbogenwiderstand R_{Libo} vergrößert die gemessene Impedanz, sodass diese bei $\underline{Z}_k = \underline{Z}_{Fehl} + R_{Libo}$ zu liegen kommt. Durch den Vergleich der gemessenen Impedanz mit einer sogenannten Kippimpedanz wird nun ein Auslösesignal für den Leistungsschalter erzeugt.

In Abbildung 19 ist die Ortskurve der Leitungsgeraden in der komplexen Ebene dargestellt. Sie hat ein konstantes Verhalten von Reaktanz zu Resistanz. Dadurch ergibt sich für die Leitung eine Gerade durch den Ursprung mit dem Leitungswinkel $\alpha_L = \tan\left(\frac{X}{R}\right)$. Wird die Kippimpedanz konstant angenommen,

so ergibt sich in der komplexen Ebene ein Kreis. Dieser unterscheidet den Normalbetrieb vom Störfall. Findet sich die, vom Schutzgerät ermittelte Impedanz innerhalb des Kreises, löst das Relais aus. Anderenfalls wird ein Normalbetrieb angenommen.

Mit moderner Technik kann prinzipiell fast jede Auslösecharakteristik erreicht werden. Eine Methodik, die sich besonders etabliert hat, sind Polygone als Auslösecharakteristik.

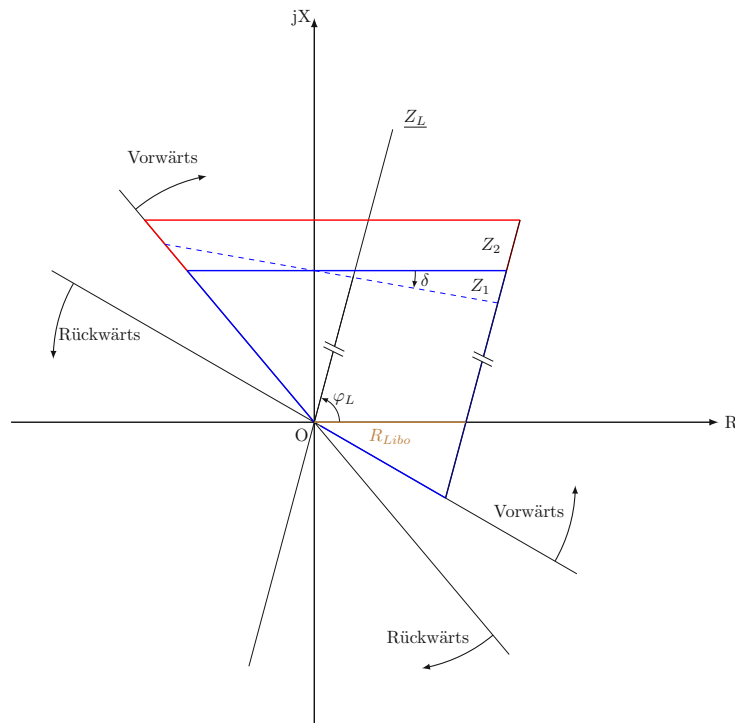


Abbildung 20: Auslösecharakteristik in Form eines Polygons.

In Abbildung 20 sind beispielhaft zwei polygonale Auslösekenlinien in blau und rot dargestellt. In blau ist die Zone 1 dargestellt. Wird ein Fehler der in diese Zone einläuft detektiert, so kommt es zu einer Auslösung des Relais in Schnellzeit, dh. ohne eine Verzögerung zwischen Erkennen des Fehlers und Auslösen hinzuzufügen. Bei einem Fehler in Zone 2 hingegen wird erst nach einer gewissen Zeitkonstante ausgelöst.

Bei der dargestellten Methode das Auslösepolygon zu konstruieren, gibt es zwei Richtungsgeraden, die die komplexe Ebene in eine vorwärts und eine rückwärts Richtung unterteilen. Zwischen diesen Geraden, liegt ein undefinierter Bereich. Wie in Abbildung 20 dargestellt, sind beide polygonalen Auslösekenlinien vorwärts gerichtet.

Das ist - nach einem namhaften Hersteller - eine Möglichkeit die Polygone zu definieren.

Die Neigung des Polygons stimmt in der Regel mit jener der Kennlinie der Leitungsimpedanz überein. Dadurch ist die Lichtbogenreserve konstant, was einen großen Vorteil gegenüber der kreisförmigen Kennlinie aus Abbildung 19 darstellt. Dies ist auch in diesem Beispiel so ausgeführt worden.

Des Weiteren ist in Abbildung 20 eine blau gestrichelte Linie dargestellt. Diese ist um den Winkel δ gegenüber der Horizontalen geneigt. Es handelt sich hierbei um einen Parameter, der die effektive X-Reichweite der Zone verringert oder vergrößert und dadurch eine erhöhte Sicherheit gegenüber einer Überfunktion bzw. Unterfunktion des Relais bietet.

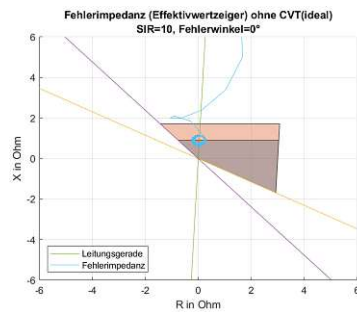
In dieser Arbeit werden ausschließlich polygonale Auslösekennlinien, wie sie in Abbildung 20 dargestellt sind verwendet.

Der kapazitive Spannungswandler, der die Eingangsspannung auf ein niedriges Ausgangsniveau wandelt ist kein idealer Wandler. Er fügt der Ausgangsspannung transiente Schwingungen hinzu, welche durch die Entladevorgänge in den aktiven Bauelementen, hauptsächlich durch die Induktivität der Kompensationsdrossel und die Kapazität des Spannungsteilers, hervorgerufen werden. Diese Vorgänge spiegeln sich auch in der Fehlerimpedanz wieder. Das führt dazu, dass die Trajektorie der Fehlerimpedanz beim Einlaufen zum stationären Endwert kurzzeitig durch einen zu geringen Wertebereich laufen kann.

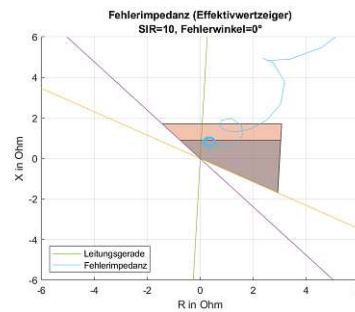
Dieses Verhalten kann man in den Abbildungen 21a und 21b sehen. In Abbildung 21a ist die Trajektorie der Fehlerimpedanz bei Annahme eines idealen Spannungswandlers dargestellt. In Abbildung 21b ist der selbe Fehlerfall, jedoch mit einem Modell eines CVT simuliert worden.

Durch Vergleichen beider Abbildungen ist ersichtlich, dass die Fehlerimpedanz in beiden Fällen zwar von oben ein, im Fall des realen kapazitiven Spannungswandlers, nimmt der Verlauf der Fehlerimpedanz jedoch kurzfristige Werte an, welche geringer als der stationäre Endwert sind.

Dieses Verhalten, welches durch transiente Entladevorgänge im CVT hervorgerufen wird, kann nun dazu führen, dass, sollte in dem Moment indem die Impedanzwerte geringer als der Endwert sind, eine Auslöseentscheidung getroffen werden, diese in der falschen Zone zu liegen kommen kann. Stellt man sich vor, dass der Fehler in Abbildung 21b nicht an der Zonengrenze sondern knapp in der Zone 2 liegt, so nimmt bei Annahme einer ähnlichen Trajektorie die Fehlerimpedanz Werte, die in Zone 1 liegen an. Dies kann nun gegebenenfalls dazu führen, dass der Zone 2 Fehler als Zone 1 Fehler erkannt wird.



(a) Verlauf der Fehlerimpedanz mit einem idealen Spannungswandler ohne die Einflüsse des CVT.



(b) Verlauf der Fehlerimpedanz bei Berücksichtigung der Effekte des CVT.

Abbildung 21: Vergleich der Trajektorie der Fehlerimpedanz bei idealer Spannungswandlung mit jener bei Spannungswandlung mittels kapazitivem Spannungswandler

Das bedeutet, dass die transienten Entladevorgänge dazu führen können, dass es zu einer Überfunktion des Relais kommt. Um dies zu umgehen muss in solchen Fällen verzögert ausgelöst werden, oder auf andere Maßnahmen gesetzt werden, welcher einer Überfunktion entgegen wirken.

Im Fall des idealen Spannungswandlers ist so ein Verhalten nicht zu beobachten. Hier verläuft die Trajektorie der Fehlerimpedanz durch keine so niedrigen Werte, dass eine Überfunktion auftreten kann.

In dieser Arbeit soll nun untersucht werden, wie sich gewisse Parameter des kapazitiven Spannungsteilers, aber auch des Netzes auf die Trajektorie der Fehlerimpedanz auswirken.

Weiters werden Parameter identifiziert, die den Verlauf besonders stark beeinflussen und eine Überfunktion wahrscheinlicher machen, sowie, welche Faktoren die Geschwindigkeit des Einlaufens zum stationären Endwert beeinflussen.

6 Methodik

In Abbildung 22 ist grob der Ablauf, der zur Berechnung der Fehlerimpedanzen verwendet wurde, dargestellt.

Zunächst wird ein Netz, bestehend aus Quelle, Leitung und Last simuliert. Um die Fehlerimpedanz berechnen zu können, wird neben der Spannung, welche mittels des kapazitiven Spannungsteiler auf ein niedrigeres Niveau transformiert wird, auch der Strom benötigt. In der Praxis wird dies mit einem Stromwandler realisiert. Im Modell wird der Strom am Anfang der Leitung gemessen und mittels eines Wandlerverhältnisses auf Sekundärwerte umgerechnet, sofern diese benötigt werden. Die Messung des Stromes erfolgt dabei ideal und es wird kein Modell eines Stromwandlers verwendet.

Die CVT Blackbox in Abbildung 22 ist Platzhalter für einen kapazitiven Spannungsteiler mit aktiver oder passiver Filterung, wie sie im Kapiteln 2 dieser Arbeit beschrieben wurden. Als Ausgang erhält man mit V_{CVT} jene Spannung, die durch den CVT auf Sekundärgröße transformiert wurde.

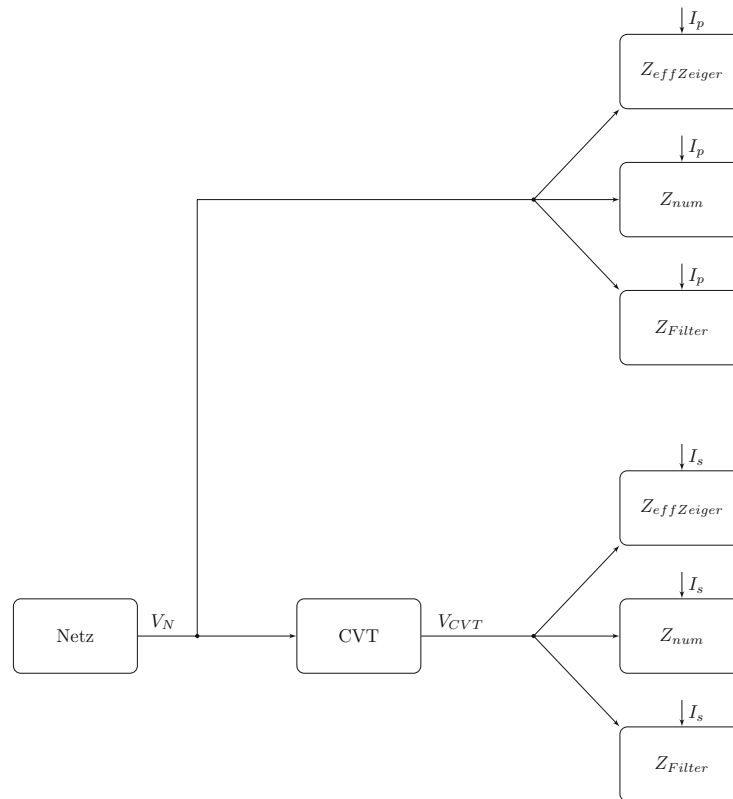


Abbildung 22: Diagramm des Ablaufes zur Berechnung der Fehlerimpedanz.

Wie man erkennen kann, besteht einerseits die Möglichkeit die Fehlerimpedanz direkt aus den Strom und Spannungsdaten, welche direkt im Netz gemessen werden, zu berechnen. Diese Methode dient dazu, die Fehlerimpedanz ideal, also ohne die Einflüsse des kapazitiven Spannungswandlers zu berücksichtigen, berechnet zu können.

Auf der anderen Seite kann die im Netz gemessene Spannung an das Modell des CVT übergeben werden, welches die Sekundärspannung des kapazitiven Spannungswandlers ausgibt. Wird die Fehlerimpedanz auf diese Art berechnet, so spiegelt die Fehlerimpedanz das nicht ideale Verhalten des CVT wieder. Hier sei noch angemerkt: Da der Ausgang des kapazitiven Spannungswandler in Sekundärgröße vorliegt, muss der im Netz gemessene Strom ebenfalls mit dem Wandlerverhältnis auf Sekundärgröße I_S umgerechnet werden.

Auf diese Weise kann man erkennen welches Verhalten durch den kapazitiven Spannungswandler eingeführt wird und welches Verhalten durch das Netz oder die Fehlerart bedingt ist.

Des Weiteren wird die Fehlerimpedanz auf drei verschiedene Arten berechnet:

- $Z_{eff, Zeiger}$: zur Berechnung werden die Effektivwertzeiger von Spannung und Strom herangezogen, siehe Abschnitt 6.1
- Z_{num} : zur Berechnung werden die Leiterdifferentialgleichungen numerisch gelöst, siehe Abschnitt 6.2
- Z_{Filter} : mit Hilfe von speziellen Filtern werden aus den Zeitdaten von Strom und Spannung komplexe Zeiger gebildet, siehe Abschnitt 6.3

6.1 Berechnung der Fehlerimpedanz mittels Effektivwertzeiger

Bei dieser Methode wird ausgehend von den Zeitverläufen $u(t), i(t)$ des Strom- bzw. Spannungssignals, welche am Stromwandler bzw. am Ausgang des kapazitiven Spannungsteiler gemessen werden die Effektivwertzeiger $\underline{U}, \underline{I}$ berechnet. Für ein sinusförmiges Wechselsignal gilt

$$\underline{f(t)} = \hat{f} e^{j(\omega t + \varphi)}. \quad (11)$$

Formt man Gleichung 11 um und setzt die Datenpunkte des Zeitsignals ein, so kann daraus ein komplexer Zeiger berechnet werden.

Des Weiteren wird ein Fenster von 20 ms verwendet, wodurch die Effektivwertzeiger glatter erscheinen. Aus den Effektivwertzeigern von Strom und Spannung kann nun die Impedanz $\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}}$ berechnet werden.

6.2 Berechnung der Fehlerimpedanz durch numerisches Lösen der Leitungsdifferentialgleichungen

Betrachtet man ein vereinfachtes Leitungsmodell, bestehend aus Induktivität und Widerstand so ergibt sich die Spannung, als Differenzgleichung ange-

schrieben zu

$$U = R \cdot I + \frac{\Delta I}{\Delta t} L \quad (12)$$

Mit Hilfe des zentralen Differenzenquotienten ergeben sich nun zwei Gleichungen

$$U_{i+1} = I_{i+1}R + \frac{I_{i+2} - I_i}{2\Delta t} L \quad (13)$$

$$U_{i+2} = I_{i+2}R + \frac{I_{i+3} - I_{i+1}}{2\Delta t} L \quad (14)$$

Wobei U_i und I_i Datenpunkte des Zeitsignals sind und Δt den Zeitabstand zweier aufeinanderfolgenden Datenpunkte beschreibt. Setzt man diese Werte nun in die Gleichungen 13 und 14 ein, so erhält man ein Gleichungssystem mit den beiden Unbekannten R und L , welches eindeutig lösbar ist. Berechnet man nun noch die Reaktanz aus der Induktivität nach $X = \omega L$, so erhält man eine Impedanz, welche in die komplexe Impedanzebene eingezeichnet werden kann.

6.3 Berechnung der Impedanz mittels Filter

Bei dieser Methode werden spezielle extern entwickelte Filter zum Vergleich herangezogen, welche aus dem Zeitsignal von Strom und Spannung ein komplexes Signal erstellen. Es werden unterschiedliche Filter mit diversen Fensterlängen verwendet.

Direkt nach dem Fehlereintritt werden Filter mit einer kurzen Fensterlänge abgetastet. Die Fensterlänge der Filter wird länger, je mehr Zeit seit Fehlereintritt vergangen ist.

Bei dieser Methode erhält man alle 2 ms einen Datenwert und ab 27 ms nach dem Fehlereintritt wird ausschließlich ein Langzeitfilter mit einer Filterlänge von 25 ms abgetastet. Diese Filter sind allesamt optimiert, sodass die negativen Effekte des kapazitiven Spannungswandlers so gut wie möglich unterdrückt werden.

Aus den komplexen Signalen für Strom und Spannung wird anschließend die Impedanz berechnet.

7 Ergebnisse und Diskussion

7.1 Einfluss des SIR auf die Trajektorie der Fehlerimpedanz

7.1.1 Einfluss des SIR auf die Trajektorie der Fehlerimpedanz bei aktiver Ferroresonanzfilterung

Abbildungen 23 bis 29 sind allesamt mit dem Modell des kapazitiven Spannungsteilers mit aktiver Filterung simuliert worden. In diesen Abbildungen wird der Effekt, des source impedance ratio (SIR) auf den Verlauf der Fehlerimpedanz untersucht.

Die erste Abbildung (jeweils Abbildung a) stellt die Fehlerimpedanz dar, die sich ergibt, wenn die Leitungsgleichungen mittels des zentralen Differenzenquotienten gelöst werden und aus dem Ergebnis für die Resistanz und Reaktanz die Impedanz gebildet wird; siehe Abschnitt 6.2. Diese Methode benötigt lediglich 8 Datenpunkte - vier des Strom- und vier dazugehörigen Spannungszeitsignals - und liefert damit die „reinste“ Form der Fehlerimpedanz, da hier der schwächste Filterungsprozess stattfindet.

Die zweite Abbildung (jeweils Abbildung b) stellt die Fehlerimpedanz dar, die sich ergibt, wenn zur Berechnung Effektivwertzeiger für Strom und Spannung herangezogen werden; siehe Abschnitt 6.1. Diese werden aus den Zeitsignalen von Strom und Spannung berechnet und um starke Schwankungen zu vermeiden, wird ein Fenster mit der Größe 20 ms verwendet. Da durch dieses Fenster ein „averaging“ Effekt auftritt, sind die Trajektorien glatter und haben weniger Ausreißer.

Letztlich stellen die dritten Grafiken (Abbildungen c) die Ergebnisse, welche durch Anwenden der speziellen Filter zustande gekommen sind dar. Diese Filter sind so optimiert, dass sie die Effekte der transienten Vorgänge bestmöglich unterdrücken können.

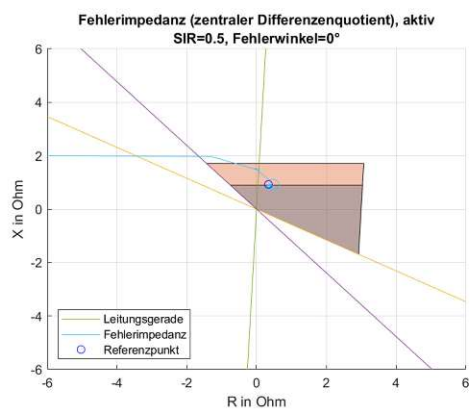
In all diesen Abbildungen sind eine violette, sowie eine gelbe Linie dargestellt. Diese stellen die Richtungsgeraden dar, und trennen die Vorwärts- von der Rückwärtsrichtung. Der Bereich zwischen diesen Linien stellt einen undefinierten Bereich dar.

Außerdem sind zwei Polygone dargestellt. Diese stellen die Auslösepolygone des Distanzschutzes dar, wobei das bläuliche Polygon Zone 1 darstellt und das rötliche für Zone 2 steht.

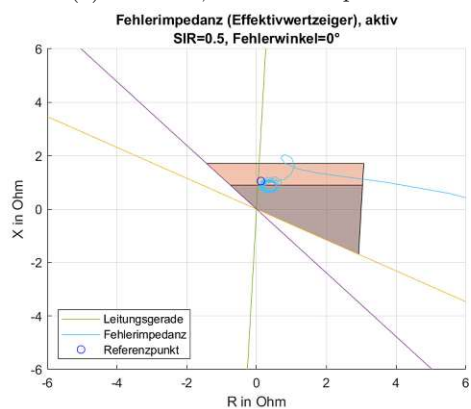
In den Unterabbildungen a und b wird die Fehlerimpedanz durch eine blaue Trajektorie dargestellt. In den Unterabbildungen c setzt sich die Fehlerimpedanz aus zwei verschiedenen Kurven, einer roten und einer schwarzen zusammen. Die erstere wird durch Datenpunkte, welche aus mehreren Filtern mit kleinen Fenstern gewonnen werden, erstellt. Diese Filter mit dem kurzen Fenster werden nur direkt nach dem Fehlereintritt ausgelesen. Nach einer Zeit von 27 ms nach dem Fehlereintritt wird ein Langzeitfilter mit einer Fenstergröße von 25 ms, welches alle 2 ms einen Wert berechnet, ausgelesen. Diese Werte werden durch die

schwarze Trajektorie abgebildet.

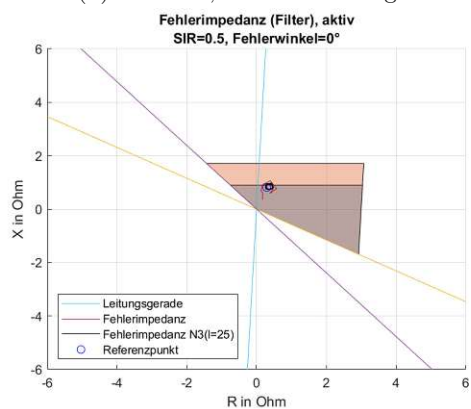
Der blaue Kreis, welcher bei der Fehlerimpedanz am Übergang von den schnelleren Filtern zu dem Langzeitfilter (bspw. in Abbildung 23c) gezeigt ist, dient als Referenzpunkt, um zeitlich den selben Punkt nach Fehlereintritt in den Diagrammen, in denen die Fehlerimpedanz über Effektivwertzeiger oder den Differenzenquotient berechnet wurde, finden zu können. Dies dient dazu, um zu erkennen wie schnell die Fehlerimpedanz im Vergleich zu den anderen Methoden in den stationären Endwert einläuft.



(a) SIR=0.5, Differenzenquotient

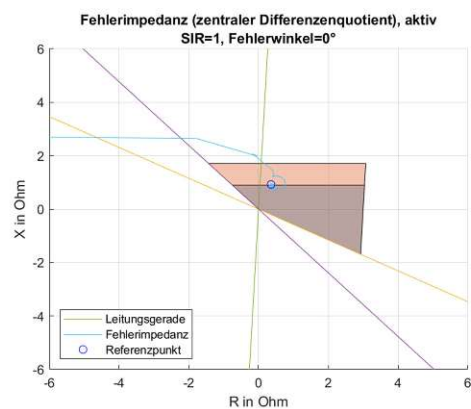


(b) SIR=0.5, Effektivwertzeiger

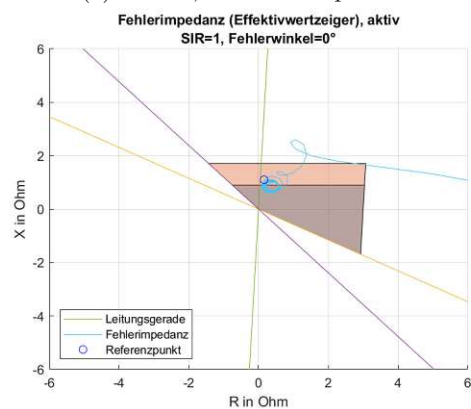


(c) SIR=0.5, Filter

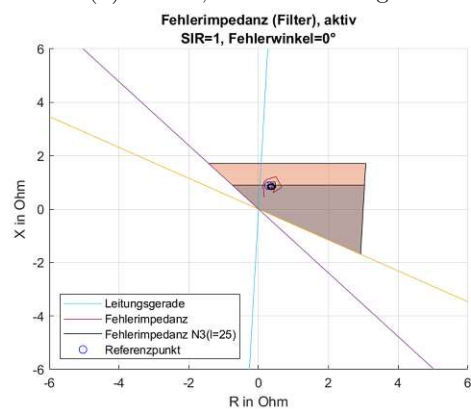
Abbildung 23: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze und einem SIR von 0.5



(a) SIR=1, Differenzenquotient

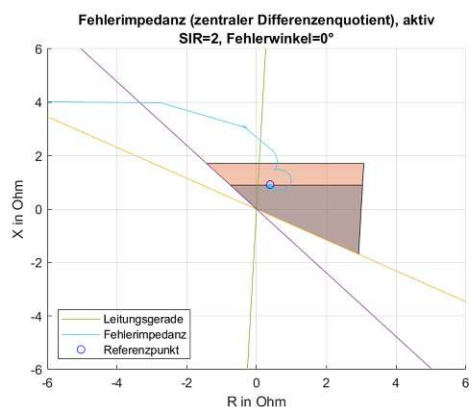


(b) SIR=1, Effektivwertzeiger

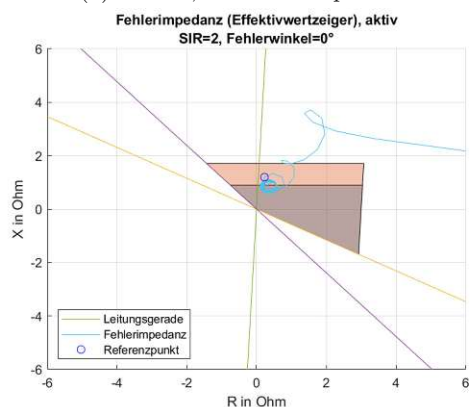


(c) SIR=1, Filter

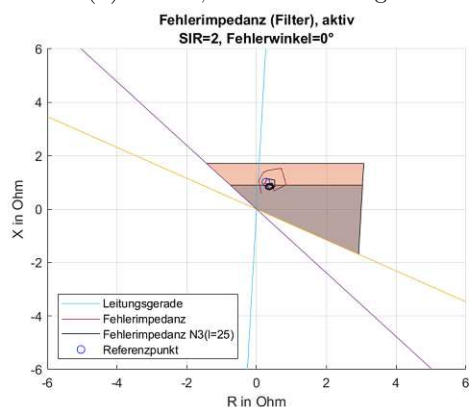
Abbildung 24: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze und einem SIR von 1



(a) SIR=2, Differenzenquotient

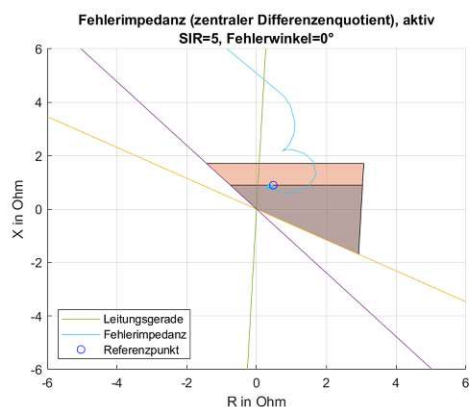


(b) SIR=2, Effektivwertzeiger

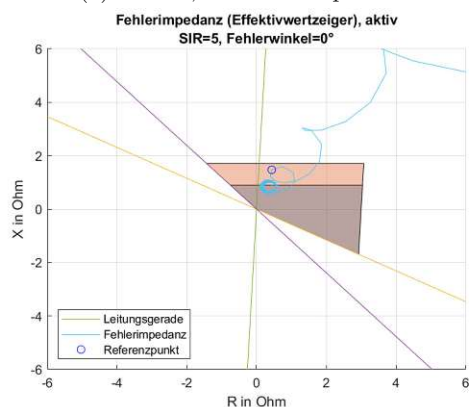


(c) SIR=2, Filter

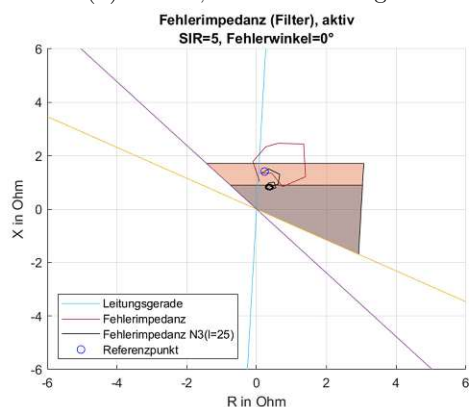
Abbildung 25: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze und einem SIR von 2.



(a) SIR=5, Differenzenquotient

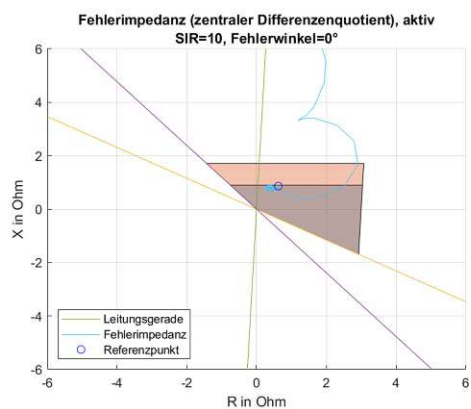


(b) SIR=5, Effektivwertzeiger

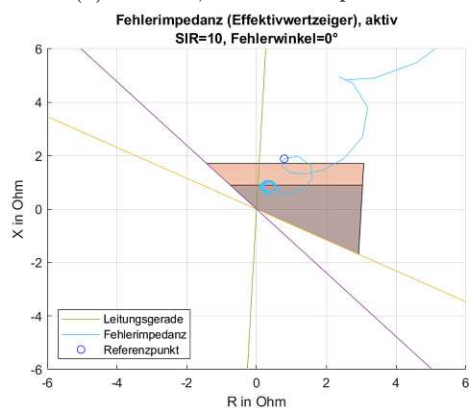


(c) SIR=5, Filter

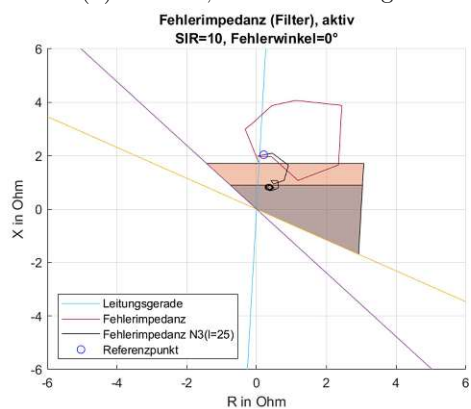
Abbildung 26: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze und einem SIR von 5.



(a) SIR=10, Differenzenquotient

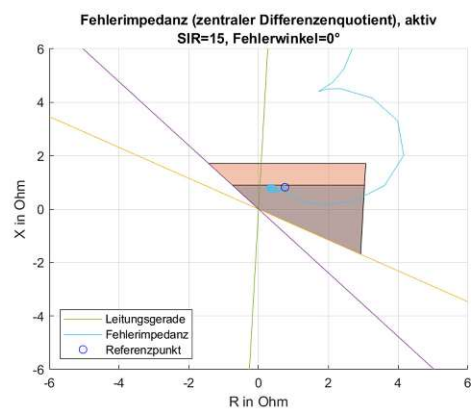


(b) SIR=10, Effektivwertzeiger

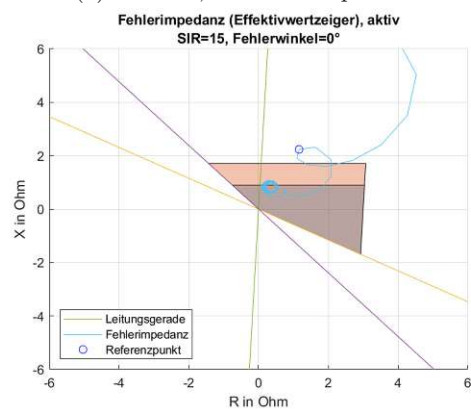


(c) SIR=10, Filter

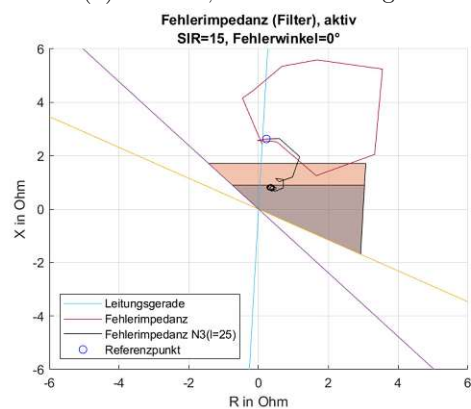
Abbildung 27: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze und einem SIR von 10.



(a) SIR=15, Differenzenquotient



(b) SIR=15, Effektivwertzeiger



(c) SIR=15, Filter

Abbildung 28: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze und einem SIR von 15.

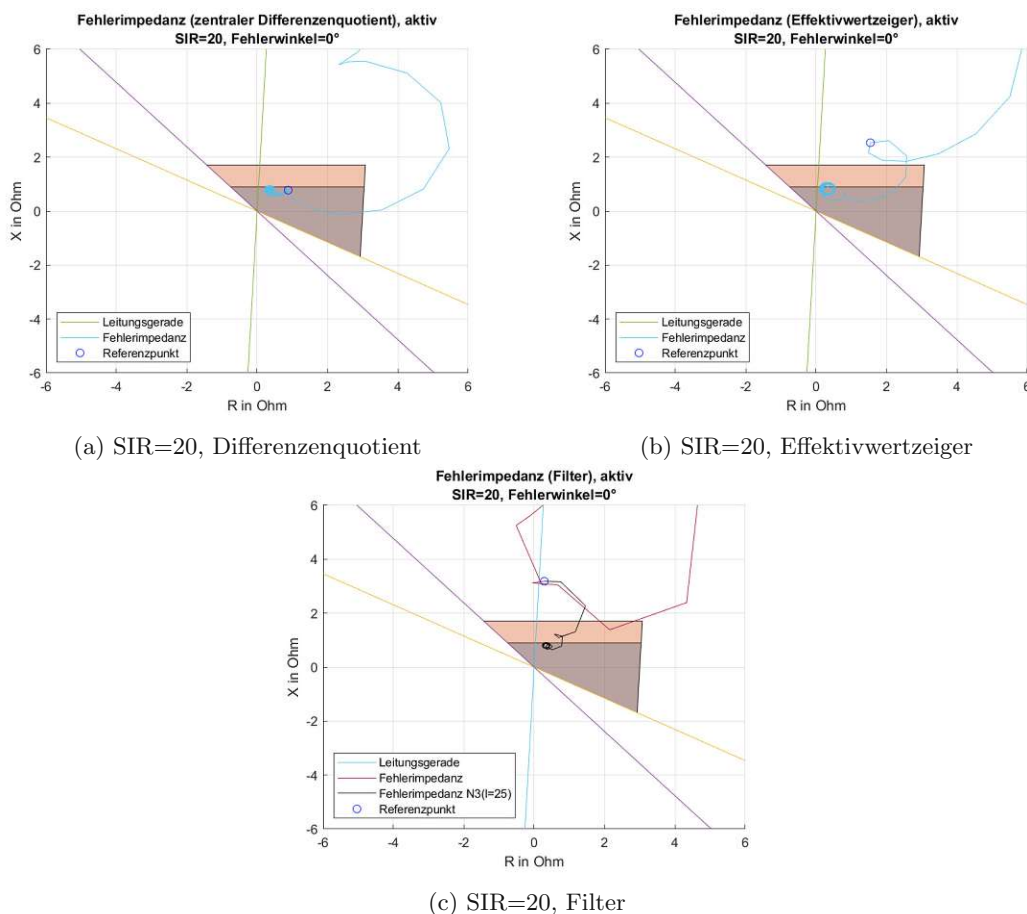


Abbildung 29: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze und einem SIR von 20.

Grundsätzlich kann man sagen, dass, je größer das SIR wird, desto größer ist der Bereich, den die Trajektorie der Fehlerimpedanz durchläuft. Dieses Verhalten, ist unabhängig vom Berechnungsverfahren der Fehlerimpedanz und kann daher sowohl bei der Lösung über die Effektivwertzeiger, als auch bei jenem über die Filter und den Differenzenquotienten beobachtet werden.

Betrachtet man bei hohen SIR Werten die Trajektorien der Fehlerimpedanz genauer, so kann man erkennen, dass diese auf dem Weg zum Endwert, geringe Impedanzwerte annehmen. Dieses Verhalten ist besonders bei der Berechnung mittels Effektivwertzeiger ausgeprägt. In Abbildung 29b bspw. nimmt die Fehlerreaktanz teilweise Werte von etwa 0.45Ω an. Wendet man auf den selben Fall die Filter an, zu sehen in Abbildung 29c, so nimmt die Reaktanz keine Werte, die geringer als 0.7Ω sind an. Berechnet man für den selben Fehlerfall die Fehlerimpedanz mittels des zentralen Differenzenquotienten, zu sehen in Abbildung

29a, so lässt sich sagen, dass das Verhalten einer potentiellen Überfunktion hier am stärksten ist. Hier verläuft die Trajektorie der Fehlerimpedanz kurzfristig sogar durch den vierten Quadranten.

Das beschriebene Verhalten, kann zum Problem werden, wenn ein Fehler der außerhalb der Zone liegt durch die transienten Vorgänge als Fehler innerhalb der Zone erkannt wird.

Stellt man sich bspw. anhand von Abbildung 29b vor, dass der Fehler knapp außerhalb der Zone 1 liegt, also in Zone 2, so kann es durchaus sein, dass die Trajektorie auf ihrem Weg zum Endwert die Zone 1 durchschreitet. Wird in diesem Moment die Fehlerimpedanz gemessen, so kann es in diesem Fall zu einer Überfunktion des Schutzrelais kommen. Das heißt der Fehler in Zone 2 wird als Zone 1 Fehler erkannt und dadurch löst das Relais, verantwortlich für die Zone 1, aus. Da in Abbildung 29b die Trajektorie der Fehlerimpedanz für einen längeren Zeitraum geringer als der stationäre Endwert ist, muss hier eher mit einer Überfunktion gerechnet werden. Aus diesem Grund sind in Situationen, bei denen mit einem hohen SIR zu rechnen ist, spezielle Maßnahmen implementiert, die ein fehlerhaftes Auslösen verhindern sollen.

Solche Maßnahmen können einerseits eine verzögerte Auslösung für die Zone 1 sein, wobei die Verzögerung größer der Zeitkonstante der transienten Vorgänge sein muss, oder andererseits eine Reduktion der Zone 1, sodass die Trajektorie trotz transienten Vorgängen nicht in die Zone 1 eindringt. Gelegentlich werden diese Maßnahmen nicht permanent angewandt, sondern nur, wenn ein hohes SIR detektiert wird. Hierfür werden Grenzwerte für Spannung und Strom festgelegt und bei Überschreiten dieser Grenzen wird eine Situation mit hohem SIR erklärt. In der Realität ist es jedoch oft sehr schwierig diese Grenzen präzise festzulegen [8].

Der Effekt, dass die Fehlerimpedanz bei hohen SIR tendenziell geringere Werte annimmt, ist auch bei Verwendung der Filter gegeben. Jedoch sind in diesem Fall die Auswirkungen eines hohen SIR auf eine eventuelle Überfunktion des Relais wesentlich geringer. Das kann mit der guten Optimierung der Filter, die zur Berechnung der Fehlerimpedanz herangezogen werden, erklärt werden.

Das SIR wirkt sich jedoch nicht nur auf eine evtl. Überfunktion aus, sondern auch auf die Zeit die benötigt wird, bis der stationäre Endwert erreicht wird. Abbildungen 23 bis 29 stellen alle den selben Fehlerfall dar. Es lässt sich jedoch erkennen, dass der Referenzpunkt, welcher in den Abbildungen immer zur selben Zeit nach dem Fehlereintritt gezeichnet ist, in Situationen mit einem sehr geringen SIR nahe des stationären Endwertes auftritt. Bei hohen SIR Werten ist der Referenzpunkt weiter vom stationären Endwert entfernt. Dies bedeutet, dass man bei einem hohen SIR auch mit einem langsameren Einlaufen der Fehlerimpedanz zum stationären Endwert hin rechnen muss. Es lässt sich jedoch kein nennenswerter Unterschied hinsichtlich dieses Punktes zwischen der Berechnung der Fehlerimpedanz über die Effektivwertzeiger und der Berechnung

der Fehlerimpedanz über die Filter feststellen. Bei der Methode über den Differenzenquotienten ist der Referenzpunkt oft sehr nahe beim stationären Endwert. Dies kann man damit erklären, dass hier lediglich vier Datenpunkte vom Strom und Spannungszeitsignal benötigt werden und dadurch das Impedanzsignal kaum „geglättet“ wird. Bei dem Verfahren über die Effektivwertzeiger wird mit einem Fenster der Größe 20 ms gearbeitet, weshalb hier eine Durchschnittsbildung zustande kommt, die die Trajektorie glatter macht. Man kann erkennen, dass bspw. in Abbildung 29a der Verlauf der Fehlerimpedanz sehr weitläufig ist, wohingegen in Abbildung 29b dieser wesentlich kompakter ist.

7.1.2 Einfluss des SIR auf die Trajektorie der Fehlerimpedanz bei passiver Ferroresonanzfilterung

Abbildungen 30 bis 36 stellen die Auswirkungen unterschiedlicher SIR auf die Trajektorie der Fehlerimpedanz bei einem kapazitiven Spannungsteiler mit passiver Filterung dar.

Wie man in diesen erkennen kann, hat das SIR bei passiver Filterung keinen so gravierenden Einfluss auf die Fehlerimpedanz hinsichtlich einer eventuellen Überfunktion des Relais. Dies gilt einerseits bei den numerischen Verfahren, also jenem mit den Effektivwertzeigern und dem zentralen Differenzenquotienten und andererseits ebenso bei den optimierten Filtern.

Selbst in den Abbildungen 36b und 36c bei einem SIR von 20, nimmt die Reaktanz kaum Werte an, welche geringer als der stationäre Endwert sind.

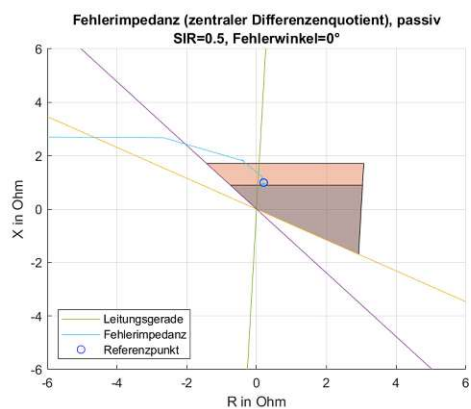
Was man jedoch sehr deutlich erkennen kann ist, dass die Fehlerimpedanz bei hohen source impedance ratio Werten einen wesentlich größeren Bereich beim Einlaufen zum Endwert durchschreitet. So nehmen die Werte der Fehlerimpedanz für die Methode mit den Filtern mit einer kurzen Fensterzeit, dargestellt in rot, in Abbildung 30c keine Werte außerhalb der eingestellten Zonen 1 und 2 an. Im Vergleich dazu bei einem SIR von 20 kann man in Abbildung 36c erkennen, dass die Werte weit außerhalb der Zone 2 liegen.

Der Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem CVT mit passiver Filterung weist das selbe Verhalten wie ein CVT mit aktiver Filterung, hinsichtlich des langsameren Einlaufens zum stationären Endwert hin, auf. Bei höheren Werten des SIR läuft die Fehlerimpedanz wesentlich langsamer ein.

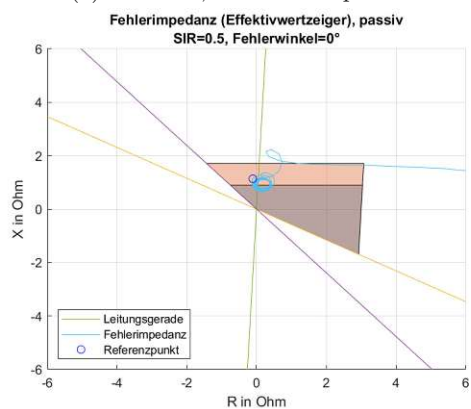
Ein weiterer Aspekt ist jeweils in den Abbildungen welche die Trajektorie der Fehlerimpedanz berechnet, mittels der Differenzenquotienten darstellt. Wie man nämlich erkennen kann, ist bei dem kapazitiven Spannungswandler mit passiver Filterung, der Verlauf wesentlich sprunghafter als dies im vorherigen Unterpunkt bei dem CVT mit aktiver Filterung der Fall war.

Betrachtet man die Auswirkung des SIR auf dieses Verhalten, so lässt sich sagen, dass bei hohen Werten dieses Verhalten wesentlich stärker auftritt als bei geringen Werten.

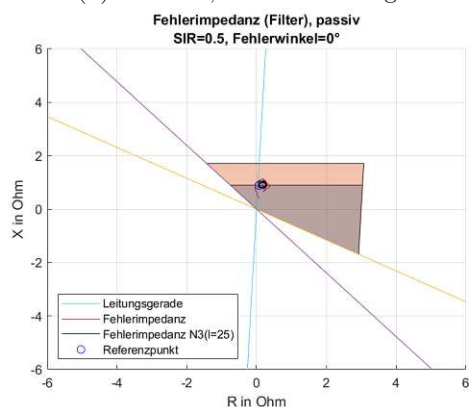
Abgesehen davon, kann man sagen, dass ein CVT mit passiver Filterung wesentlich robuster ist, vor allem was einer eventuellen Überfunktion des Relais angeht, als dies bei einer aktiven Filterung der Fall ist.



(a) SIR=0.5, Differenzenquotient

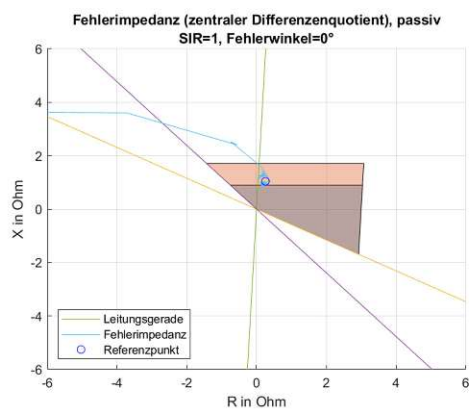


(b) SIR=0.5, Effektivwertzeiger

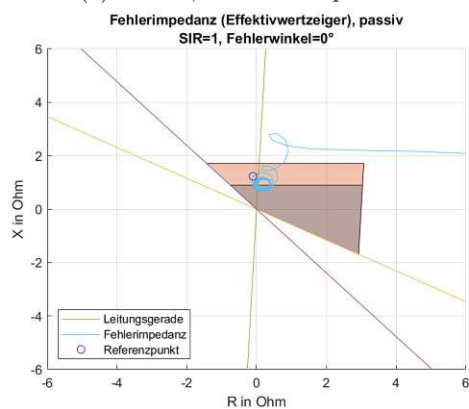


(c) SIR=0.5, Filter

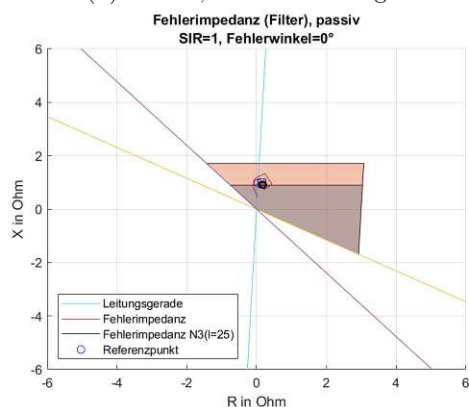
Abbildung 30: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze und einem SIR von 0.5.



(a) SIR=1, Differenzenquotient

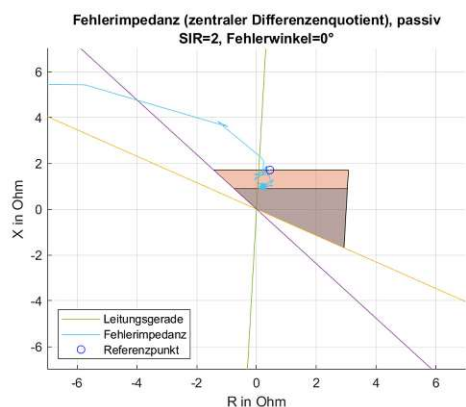


(b) SIR=1, Effektivwertzeiger

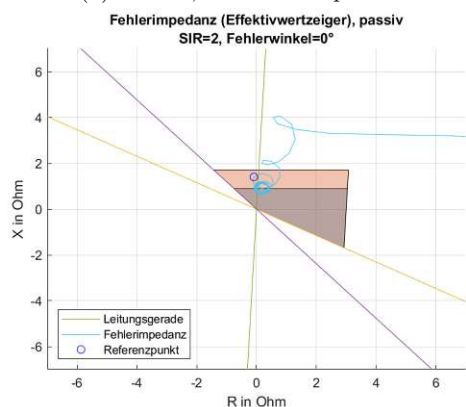


(c) SIR=1, Filter

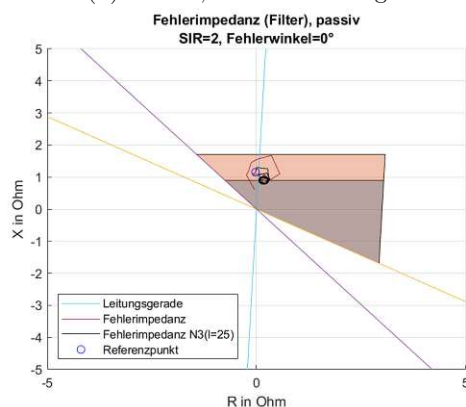
Abbildung 31: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze und einem SIR von 1.



(a) SIR=2, Differenzenquotient

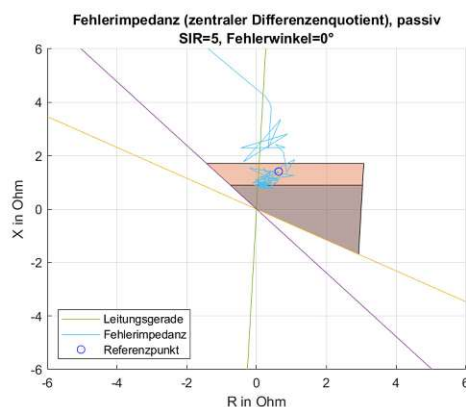


(b) SIR=2, Effektivwertzeiger

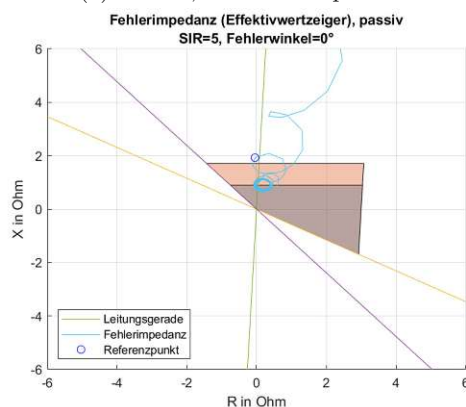


(c) SIR=2, Filter

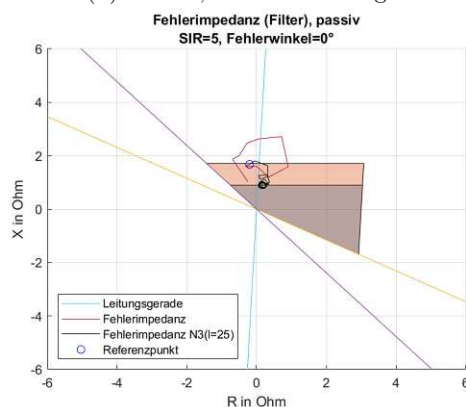
Abbildung 32: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze und einem SIR von 2.



(a) SIR=5, Differenzenquotient

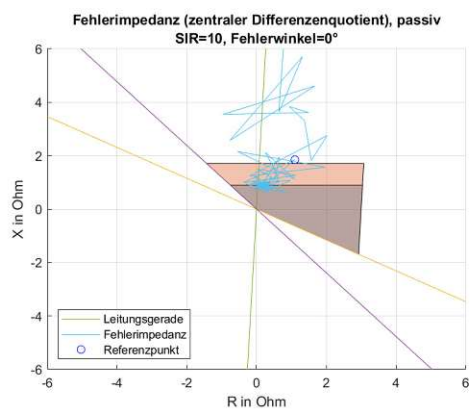


(b) SIR=5, Effektivwertzeiger

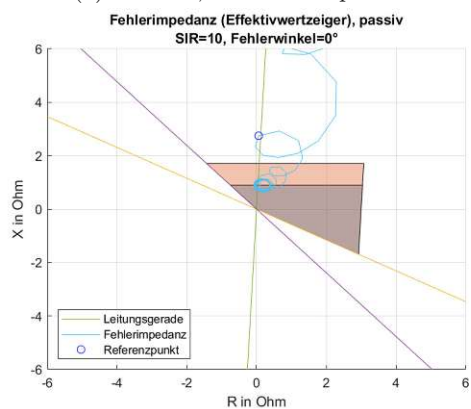


(c) SIR=5, Filter

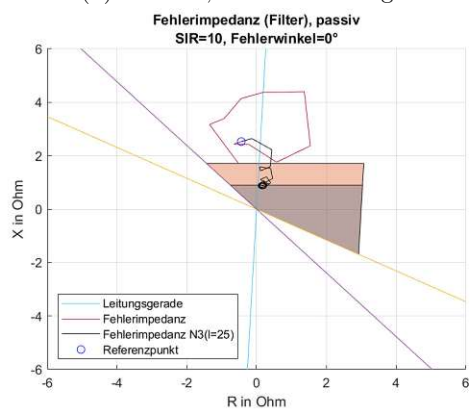
Abbildung 33: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze und einem SIR von 5.



(a) SIR=10, Differenzenquotient

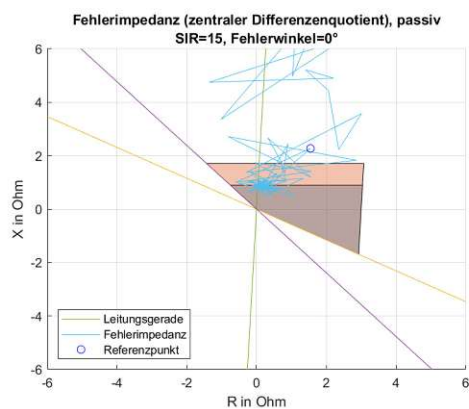


(b) SIR=10, Effektivwertzeiger

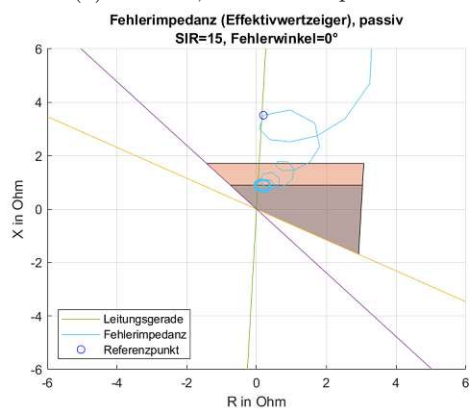


(c) SIR=10, Filter

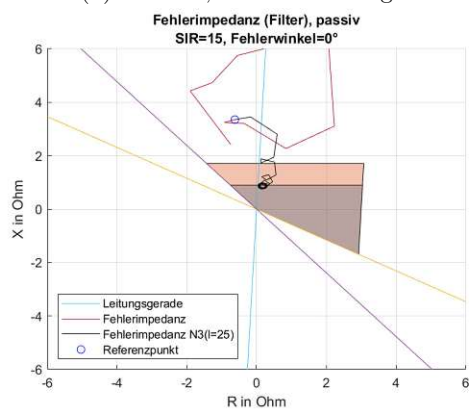
Abbildung 34: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze und einem SIR von 10.



(a) SIR=15, Differenzenquotient



(b) SIR=15, Effektivwertzeiger



(c) SIR=15, Filter

Abbildung 35: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze und einem SIR von 15.

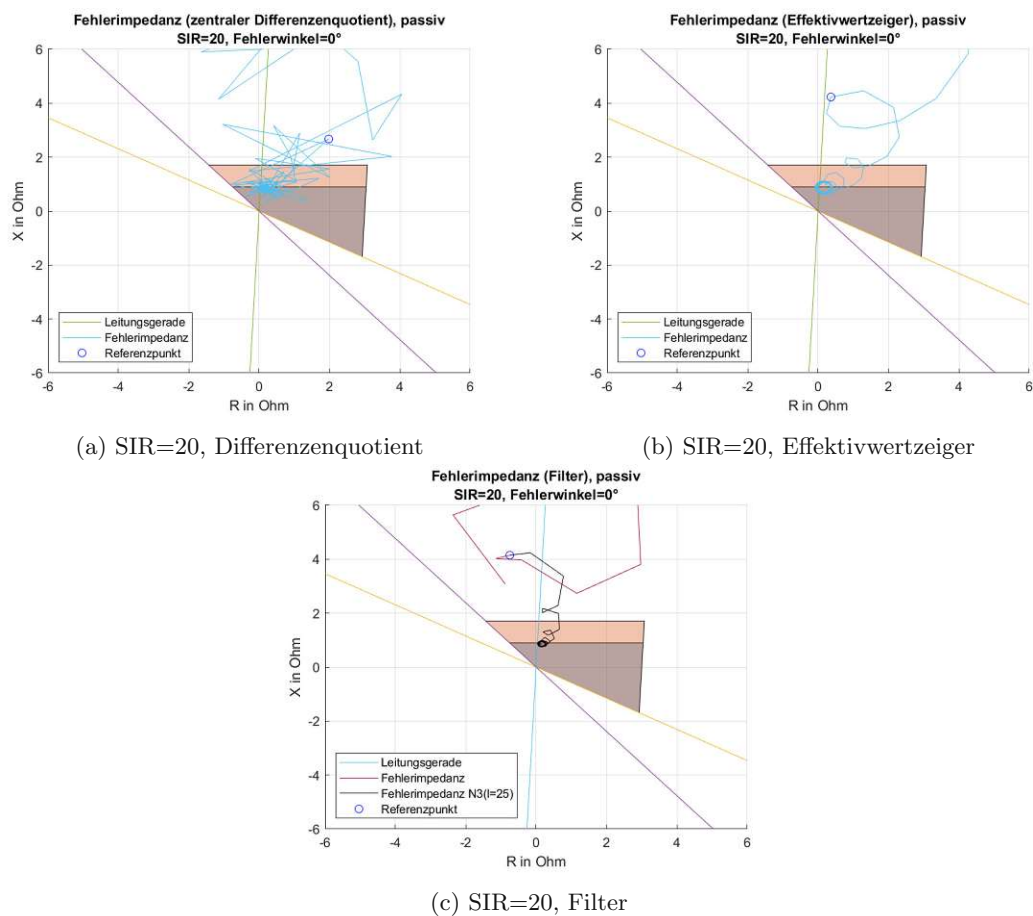


Abbildung 36: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze und einem SIR von 20.

7.2 Einfluss des Fehlerwinkels auf die Fehlerimpedanz

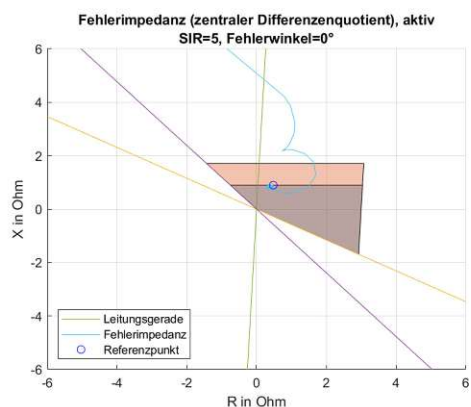
Der Fehlerwinkel trägt, wie in Kapitel 4.2 erwähnt, zum quantitativen und qualitativen Verlauf der Ausgangsspannung des kapazitiven Spannungsteilers bei. Vor allem bei einem Fehler im Spannungsnulldurchgang kommt es zu länger dauernden transienten Vorgängen, wohingegen sich ein Fehler im Spannungsmaximum nicht so drastisch auswirkt.

In den Abbildungen 37 bis 46 sind jeweils die Trajektorien für Fehlereintrittswinkel von 0° , 25° , 45° , 75° , 90° dargestellt. Zuerst sind die Grafiken für die Simulation an dem kapazitiven Spannungswandler mit aktiver Ferroresonanzfilterung angeführt und anschließend jene bei passiver Filterung.

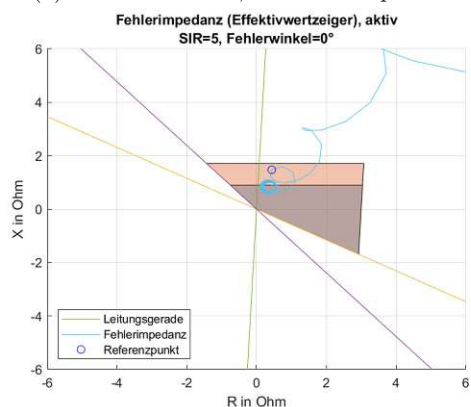
Wie man erkennen kann, ist die Trajektorie der Fehlerimpedanz bei 0° wesentlich länger, als bei 90° . Dies gilt sowohl für den CVT mit aktiver Ferroresonanzunterdrückung, als auch für jenen mit passiver Ferroresonanzfilterung. Wie vorhin erwähnt, hängt dies mit dem Einfluss des Fehlerwinkels auf die Ausgangsspannung des CVT zusammen. Bei einem Fehler im Spannungsnulldurchgang sind die transienten in der Ausgangsspannung des CVT nämlich gravierender als im Spannungsmaximum.

Des Weiteren ist es äußerst interessant, dass die Form der Trajektorie beim Anwenden der Effektivwertzeiger sich nicht stark verändert. Wendet man hingegen die Filter an, so verändert sich die Form stark. Vor allem die Kurzzeitfilter verhalten sich abhängig vom Fehlerwinkel unterschiedlich. Während bei einem Winkel von 0° die einzelnen Datenpunkte weiter auseinander liegen, findet man bei größeren Winkeln die einzelnen Punkte kompakter beieinander. Dieses Verhalten ist sehr gut beim Anwenden der Filter sichtbar. Eine ähnliche Situation kann aber auch bei der Lösung mittels Differenzenquotienten beobachtet werden.

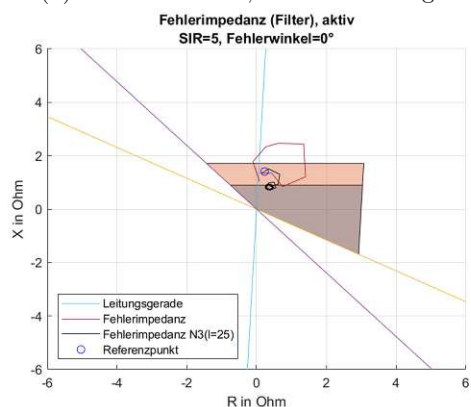
Einen anderen Aspekt den man beobachten kann ist, dass bei einem Winkel von 90° , die Fehlerimpedanz schneller einläuft als bei kleineren Winkeln. Dies kann man nur beim Anwenden der Effektivwertzeiger erkennen. Die Filter geben dieses Verhalten nicht wieder.



(a) Fehlerwinkel 0° , Differenzenquotient

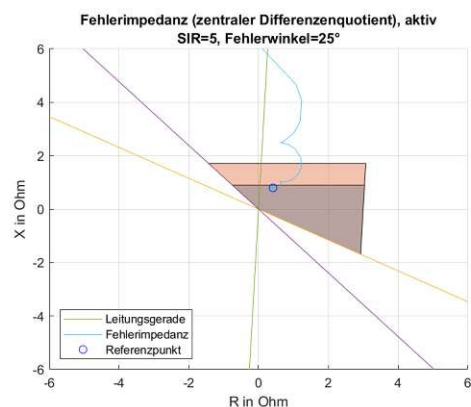


(b) Fehlerwinkel 0° , Effektivwertzeiger

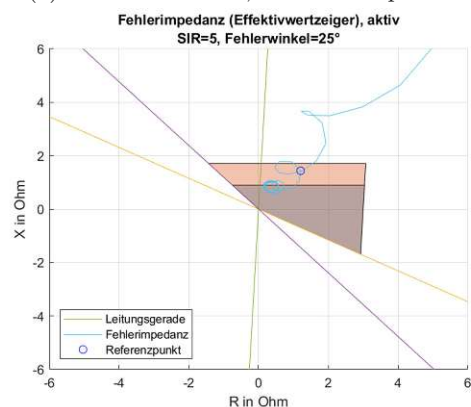


(c) Fehlerwinkel 0° , Filter

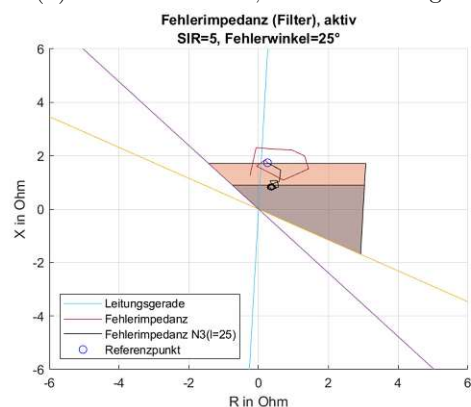
Abbildung 37: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze, einem SIR von 5 und einem Fehlereintrittswinkel von 0° .



(a) Fehlerwinkel 25° , Differenzenquotient

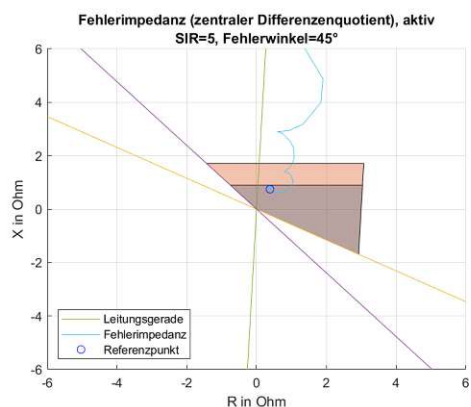


(b) Fehlerwinkel 25° , Effektivwertzeiger

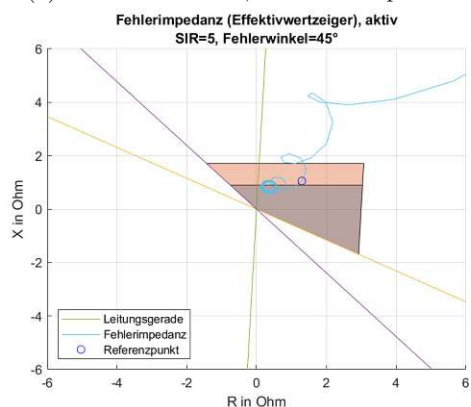


(c) Fehlerwinkel 25° , Filter

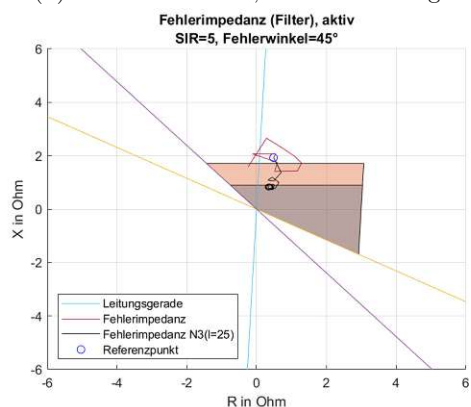
Abbildung 38: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze, einem SIR von 5 und einem Fehlereintrittswinkel von 25° .



(a) Fehlerwinkel 45° , Differenzenquotient

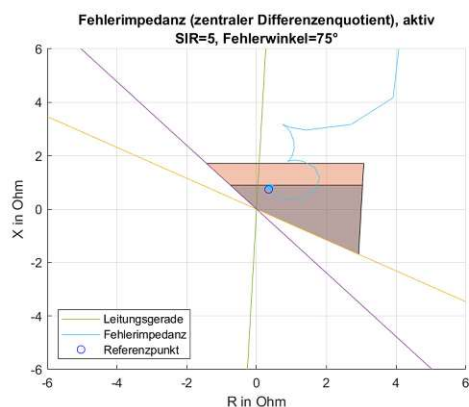


(b) Fehlerwinkel 45° , Effektivwertzeiger

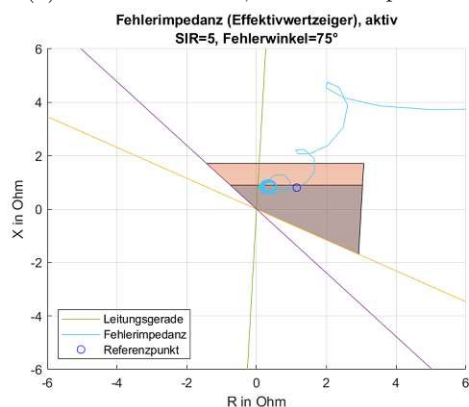


(c) Fehlerwinkel 45° , Filter

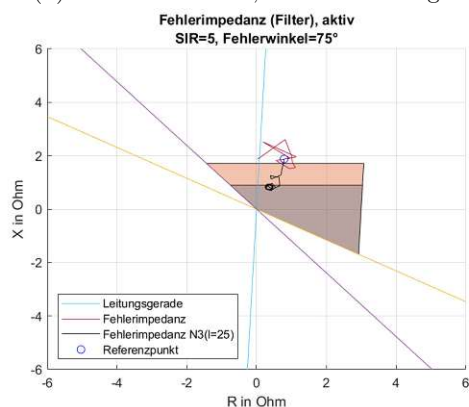
Abbildung 39: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze, einem SIR von 5 und einem Fehlereintrittswinkel von 45° .



(a) Fehlerwinkel 75° , Differenzenquotient

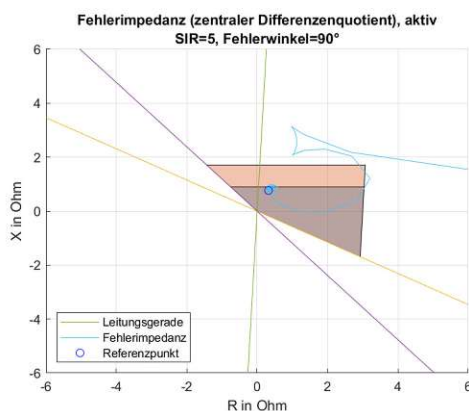


(b) Fehlerwinkel 75° , Effektivwertzeiger

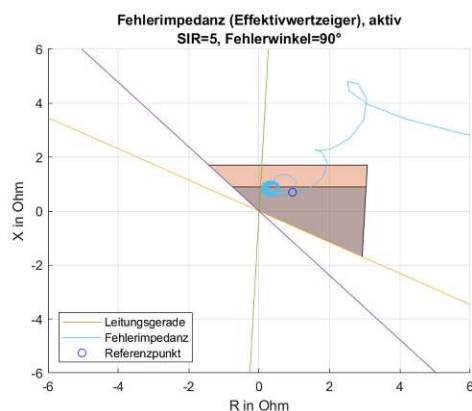


(c) Fehlerwinkel 75° , Filter

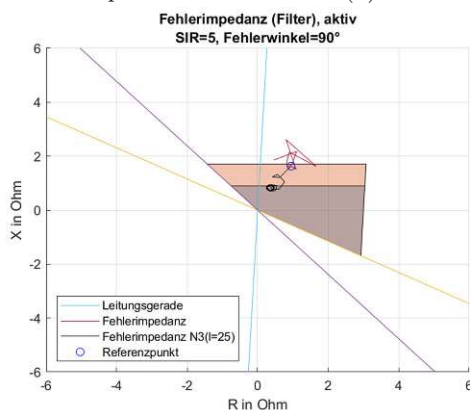
Abbildung 40: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze, einem SIR von 5 und einem Fehlereintrittswinkel von 75° .



(a) Fehlerwinkel 90°, Differenzenquotient

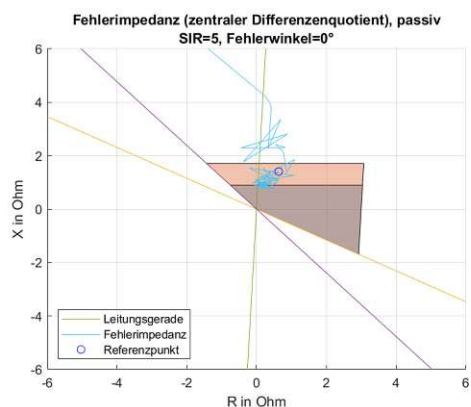


(b) Fehlerwinkel 90°, Effektivwert

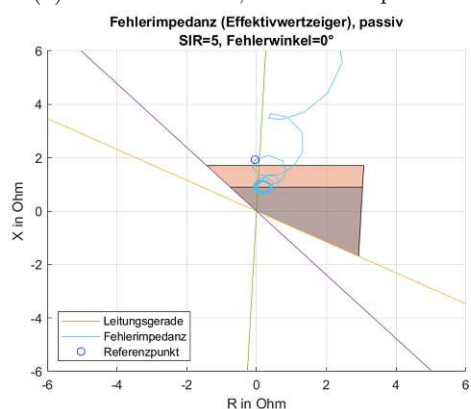


(c) Fehlerwinkel 90°, Filter

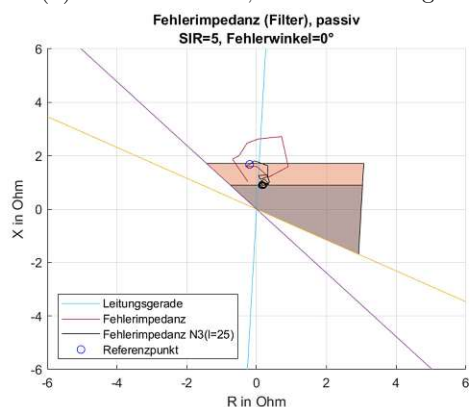
Abbildung 41: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze, einem SIR von 5 und einem Fehlereintrittswinkel von 90°.



(a) Fehlerwinkel 0° , Differenzenquotient

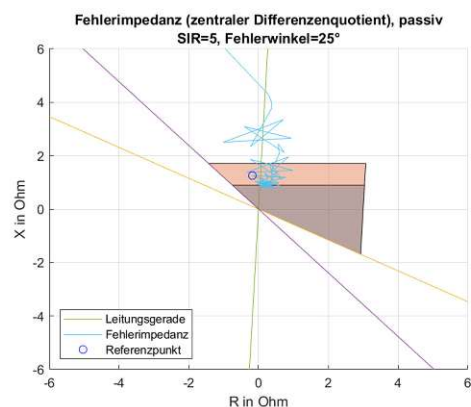


(b) Fehlerwinkel 0° , Effektivwertzeiger

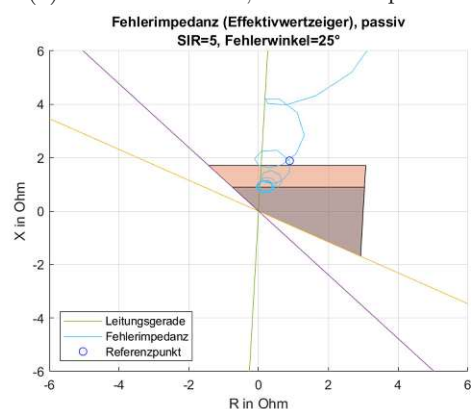


(c) Fehlerwinkel 0° , Filter

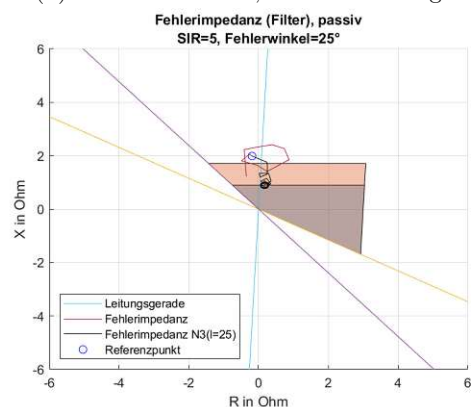
Abbildung 42: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze, einem SIR von 5 und einem Fehlereintrittswinkel von 0° .



(a) Fehlerwinkel 25° , Differenzenquotient

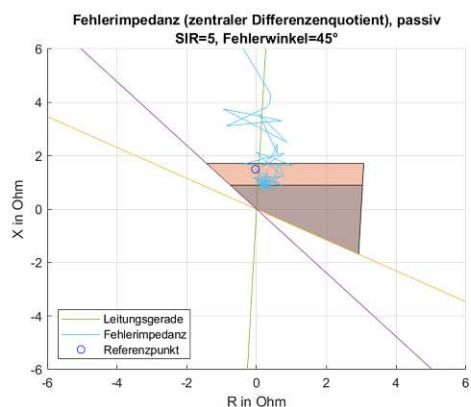


(b) Fehlerwinkel 25° , Effektivwertzeiger

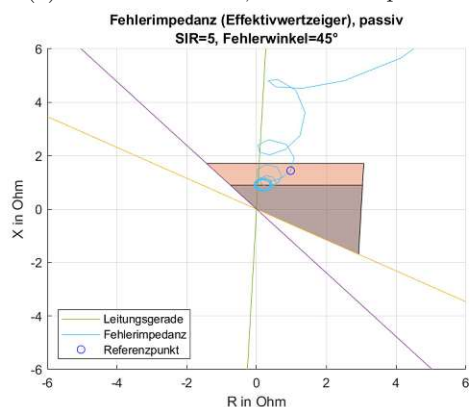


(c) Fehlerwinkel 25° , Filter

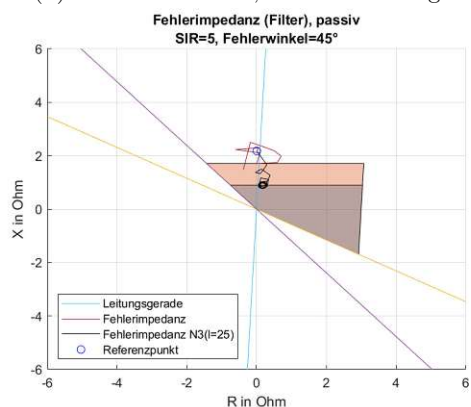
Abbildung 43: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze, einem SIR von 5 und einem Fehlereintrittswinkel von 25° .



(a) Fehlerwinkel 45°, Differenzenquotient

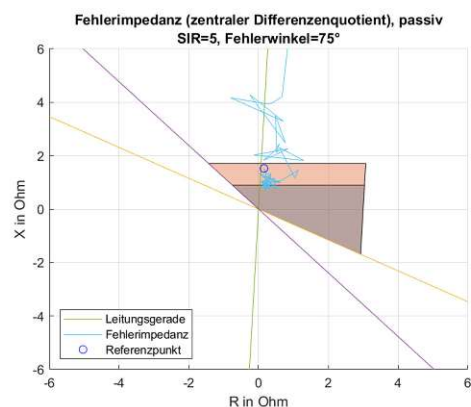


(b) Fehlerwinkel 45°, Effektivwertzeiger

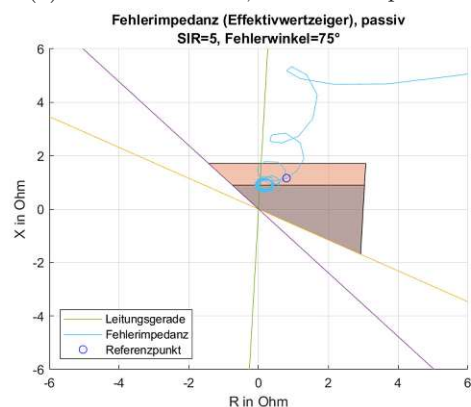


(c) Fehlerwinkel 45°, Filter

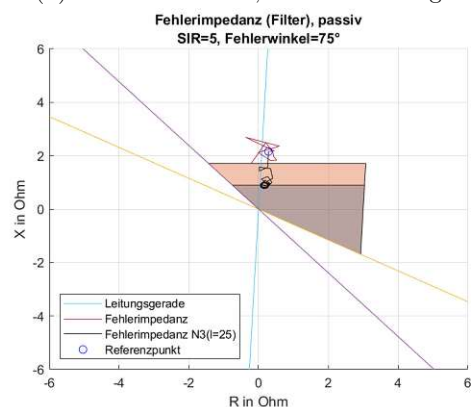
Abbildung 44: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze, einem SIR von 5 und einem Fehlereintrittswinkel von 45°.



(a) Fehlerwinkel 75°, Differenzenquotient



(b) Fehlerwinkel 75°, Effektivwertzeiger



(c) Fehlerwinkel 75°, Filter

Abbildung 45: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze, einem SIR von 5 und einem Fehlereintrittswinkel von 75°.

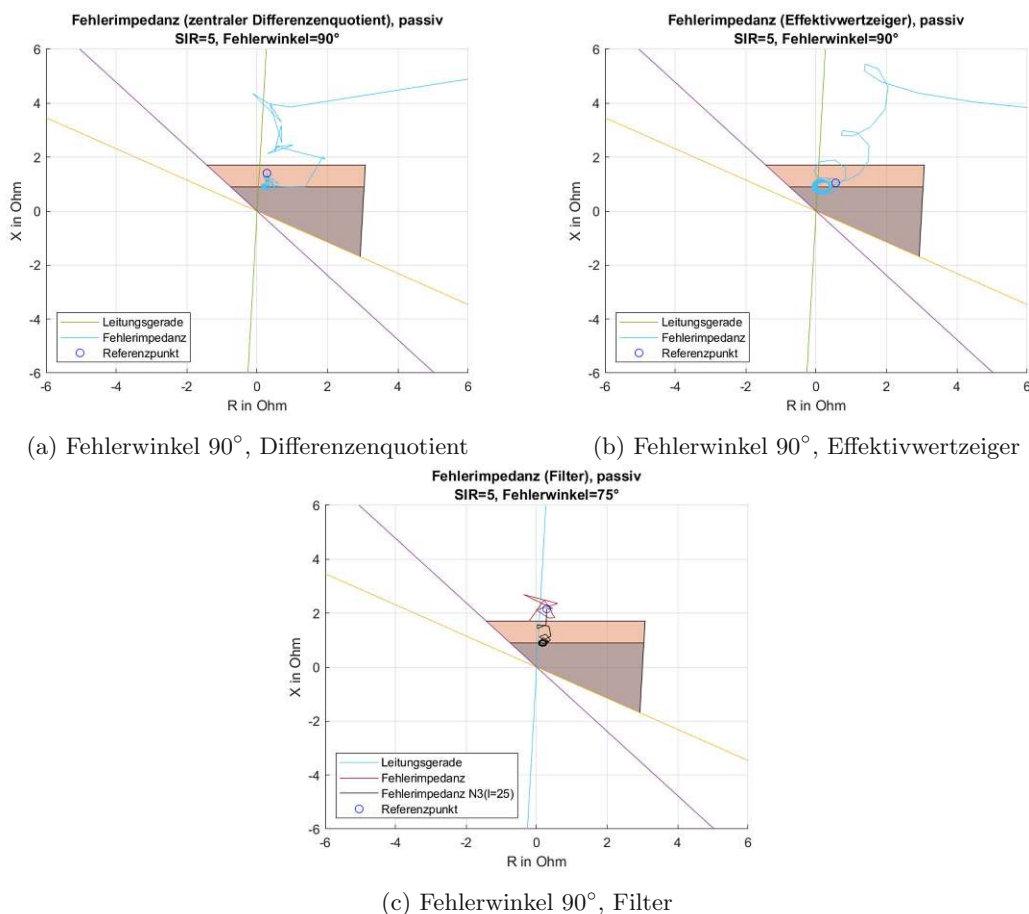


Abbildung 46: Verlauf der Fehlerimpedanz bei einem Fehler an der Zonengrenze, einem SIR von 5 und einem Fehlereintrittswinkel von 90°.

7.3 Einfluss der Kapazität auf die Fehlerimpedanz

In den Abbildungen 47 bis 56 wird der Einfluss der Größe der Ersatzkapazität C_e des kapazitiven Spannungsteilers auf den Verlauf der Fehlerimpedanz untersucht. Wie in den vorherigen Unterpunkten, sind die Ergebnisse der Simulationen mittels Differenzenquotienten mit a) markiert, jene mittels Effektivwertzeiger mit b) und die Trajektorien der Fehlerimpedanz, die beim Anwenden der Filter entstehen mit c).

Zuerst wurde am CVT eine aktive Filterung zur Unterdrückung der Ferroresonanzen verwendet (zu sehen in den Abbildungen 47 bis 51), wohingegen in den darauffolgenden Abbildungen eine passive Filterung verwendet wurde (Abbildungen 52 bis 56). In all den betrachteten Fällen wurde ein Fehlerwinkel von 0° und ein SIR von 5 gewählt. Diese Parameter wurden deshalb gewählt, weil der

Fehler im Spannungsnulldurchgang am kritischsten ist.

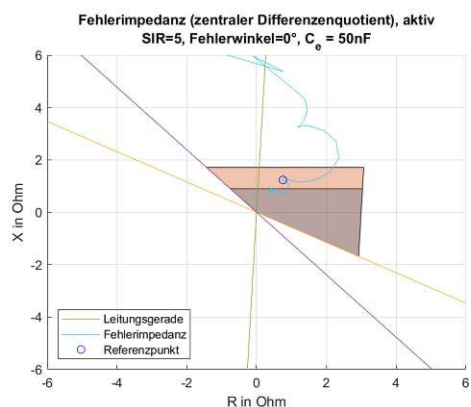
Abschließend sei noch erwähnt, dass der Standardwert der Ersatzkapazität welcher in der restlichen Arbeit verwendet wird im Fall des CVT mit aktivem Filter bei $C_{e,aktiv} = 100 \text{ nF}$ liegt, und beim kapazitivem Spannungsteiler mit passivem Filter bei $C_{e,passiv} = 69.5 \text{ nF}$ liegt. Es werden für beide Fälle jeweils zwei Punkte über dem Ausgangswert betrachtet und zwei darunter.

Des Weiteren gilt zu bedenken, dass die Ersatzkapazität nicht alleine geändert werden kann. Die Kompensationsdrossel muss stets auf die Kapazität abgestimmt sein. Das bedeutet aber auch, dass die parasitären Elemente der Drossel modifiziert werden müssen. Für die Streukapazität und die Kupferverluste der Kompensationsspule wurde ein linearer Zusammenhang bezüglich der Induktivität angenommen.

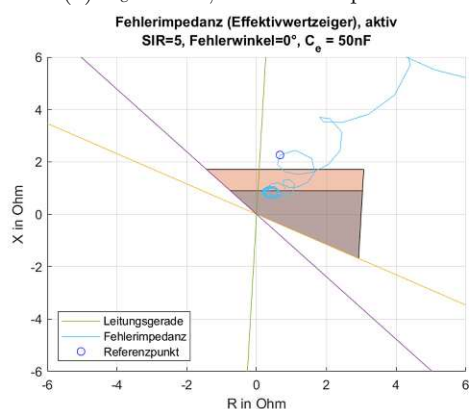
Sieht man sich die Abbildungen 47 bis 56 an, so erkennt man, dass bei höheren Werten der Ersatzkapazität die Fehlerimpedanz wesentlich schneller zum stationären Endwert einläuft als bei kleineren Werten. Dies ist am blauen Referenzpunkt zu erkennen, welcher bei hohem C_e wesentlich näher beim stationären Endwert zu liegen kommt.

Dies wird vor allem beim Betrachten der Abbildungen 47c und 51c sichtbar, wohingegen in der erstgenannten Abbildung der stationäre Zustand erst nach einigen Werten des Langzeitfilters erreicht wird, so führen in letztgenannter bereits die Filter mit einem kurzen Fenster sehr nahe an diesen Wert heran.

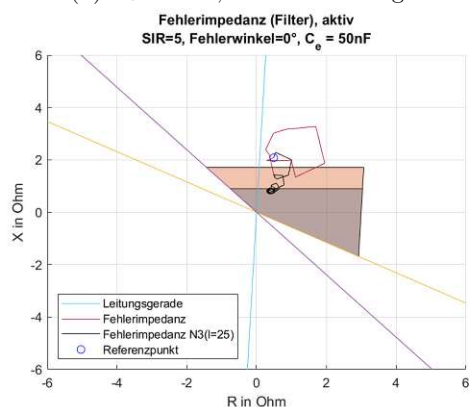
Betrachtet man die Grafiken hinsichtlich einer evtl. Überfunktion des Relais, so kann man sagen, dass sowohl beim Anwenden der Effektivwertzeiger als auch bei Verwendung der Filter kaum ein Effekt erkannt werden kann, der darauf schließen lässt, dass hohe oder niedrige Werte der Ersatzkapazität sich positiv bzw. negativ auswirken würden.



(a) $C_e=50\text{ nF}$, Differenzenquotient

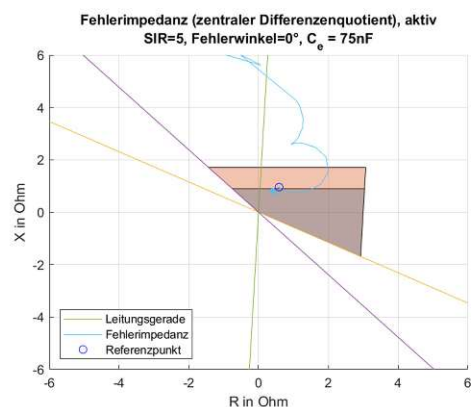


(b) $C_e=50\text{ nF}$, Effektivwertzeiger

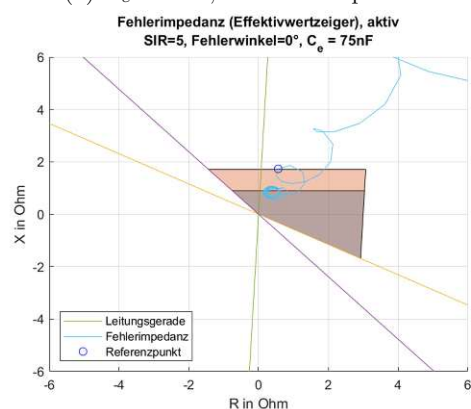


(c) $C_e=50\text{ nF}$, Filter

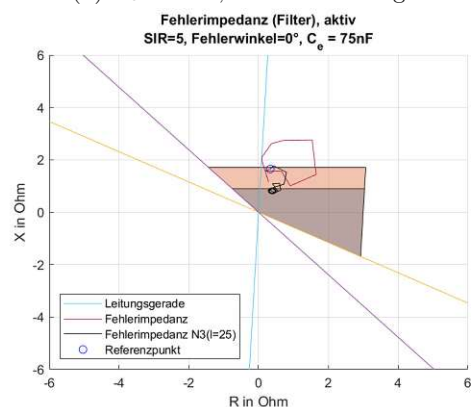
Abbildung 47: Fehlerimpedanz bei einer Ersatzkapazität von $C_e=50\text{ nF}$ bei aktiver Ferroresonanzfilterung.



(a) $C_e=75\text{ nF}$, Differenzenquotient

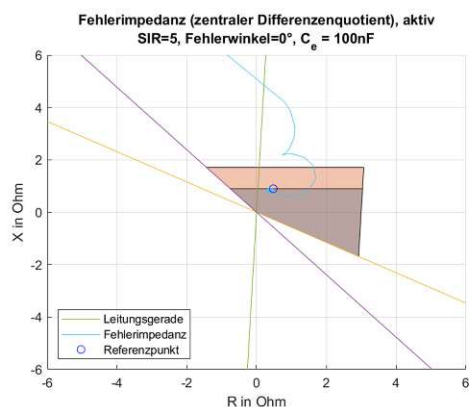


(b) $C_e=75\text{ nF}$, Effektivwertzeiger

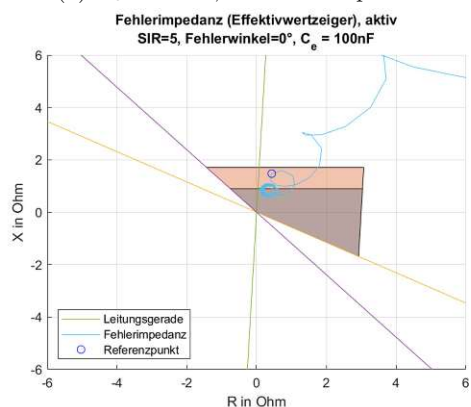


(c) $C_e=75\text{ nF}$, Filter

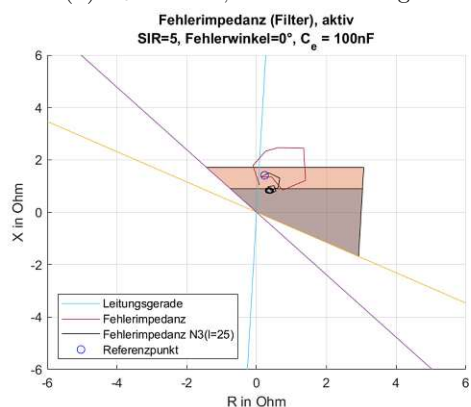
Abbildung 48: Fehlerimpedanz bei einer Ersatzkapazität von $C_e=75\text{ nF}$ bei aktiver Ferroresonanzfilterung.



(a) $C_e=100\text{ nF}$, Differenzenquotient

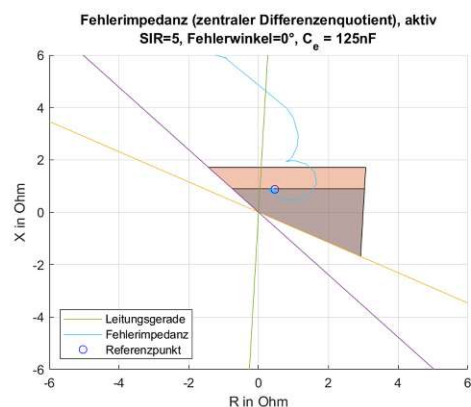


(b) $C_e=100\text{ nF}$, Effektivwertzeiger

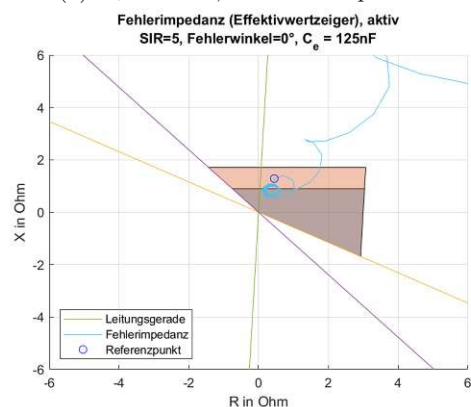


(c) $C_e=100\text{ nF}$, Filter

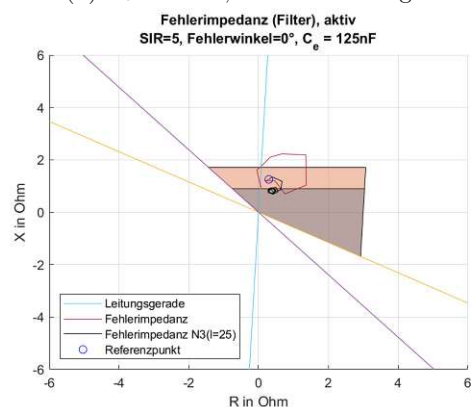
Abbildung 49: Fehlerimpedanz bei einer Ersatzkapazität von $C_e=100\text{ nF}$ bei aktiver Ferroresonanzfilterung.



(a) $C_e=125\text{ nF}$, Differenzenquotient

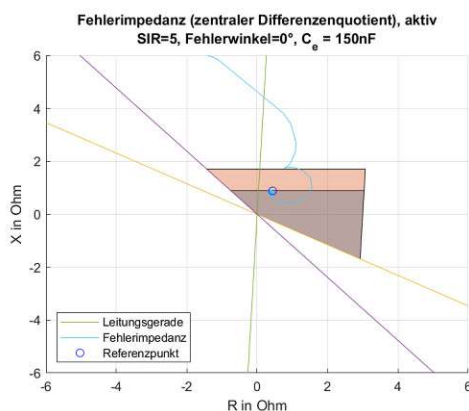


(b) $C_e=125\text{ nF}$, Effektivwertzeiger

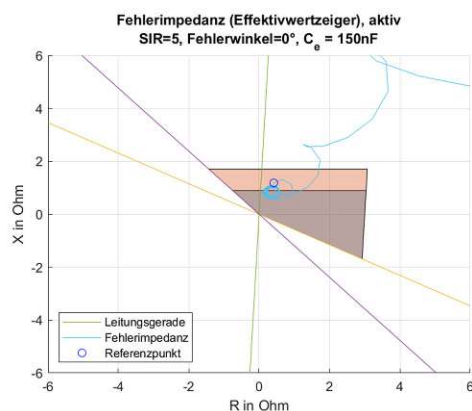


(c) $C_e=125\text{ nF}$, Filter

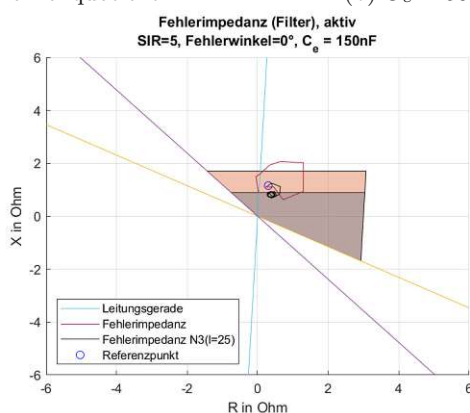
Abbildung 50: Fehlerimpedanz bei einer Ersatzkapazität von $C_e=125\text{ nF}$ bei aktiver Ferroresonanzfilterung.



(a) $C_e=150\text{ nF}$, Differenzenquotient

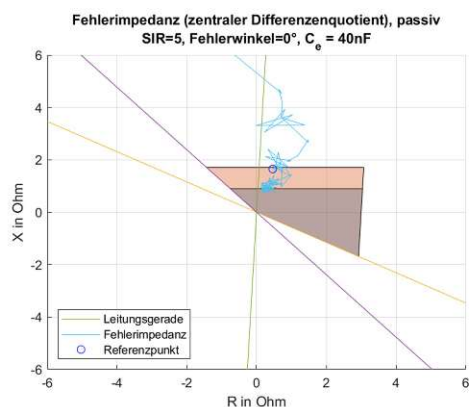


(b) $C_e=150\text{ nF}$, Effektivwertzeiger

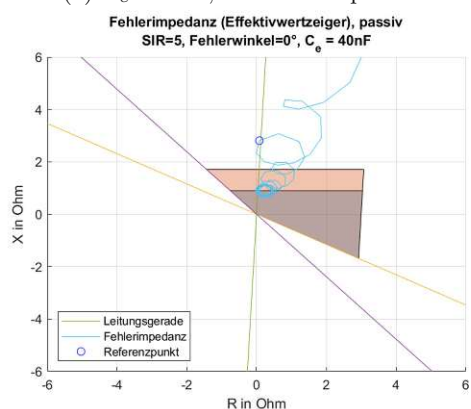


(c) $C_e=150\text{ nF}$, Filter

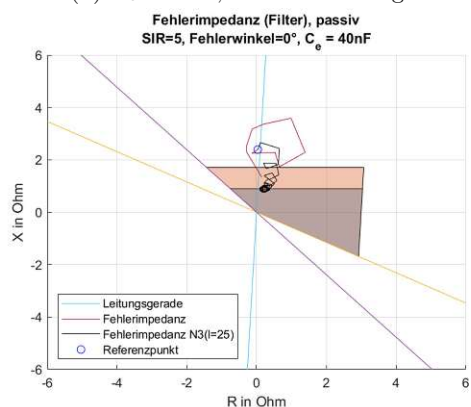
Abbildung 51: Fehlerimpedanz bei einer Ersatzkapazität von $C_e=150\text{ nF}$ bei aktiver Ferroresonanzfilterung.



(a) $C_e=40\text{ nF}$, Differenzenquotient

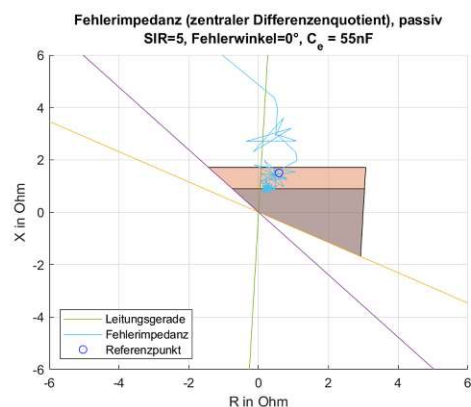


(b) $C_e=40\text{ nF}$, Effektivwertzeiger

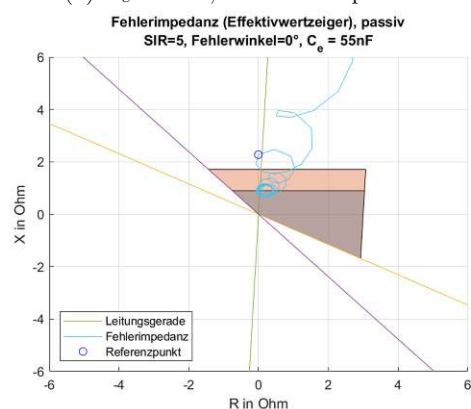


(c) $C_e=40\text{ nF}$, Filter

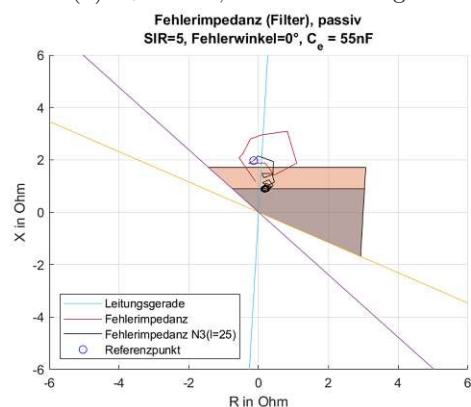
Abbildung 52: Fehlerimpedanz bei einer Ersatzkapazität von $C_e=40\text{ nF}$ bei passiver Ferroresonanzfilterung.



(a) $C_e=55\text{ nF}$, Differenzenquotient

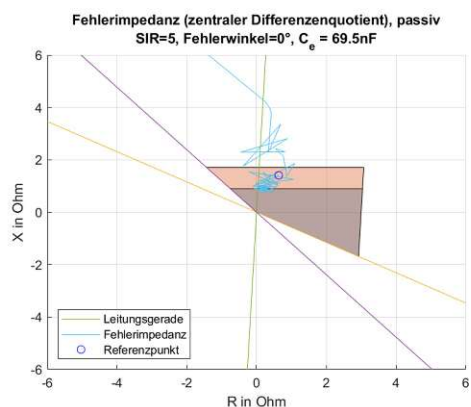


(b) $C_e=55\text{ nF}$, Effektivwertzeiger

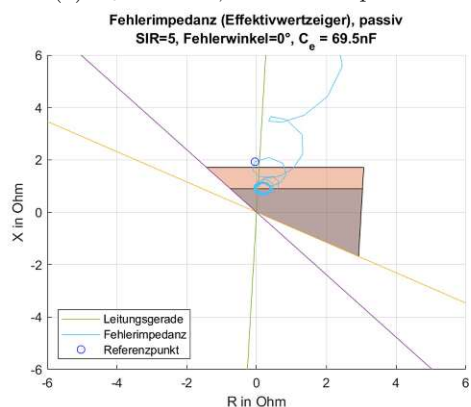


(c) $C_e=55\text{ nF}$, Filter

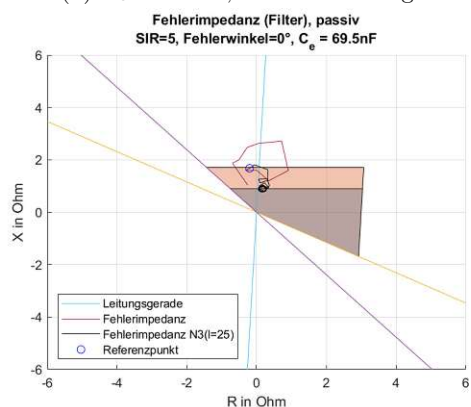
Abbildung 53: Fehlerimpedanz bei einer Ersatzkapazität von $C_e=55\text{ nF}$ bei passiver Ferroresonanzfilterung.



(a) $C_e=69.5\text{ nF}$, Differenzenquotient

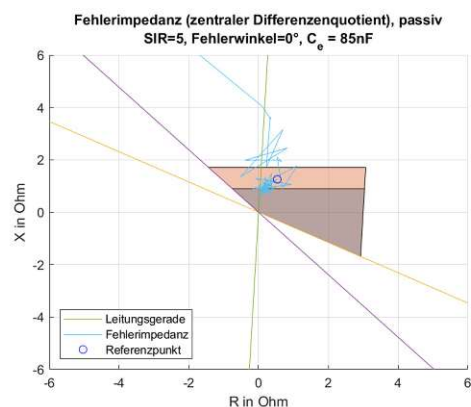


(b) $C_e=69.5\text{ nF}$, Effektivwertzeiger

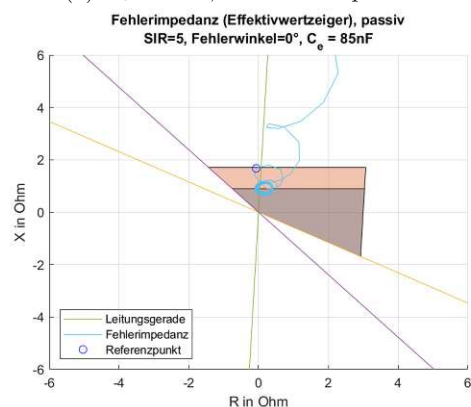


(c) $C_e=69.5\text{ nF}$, Filter

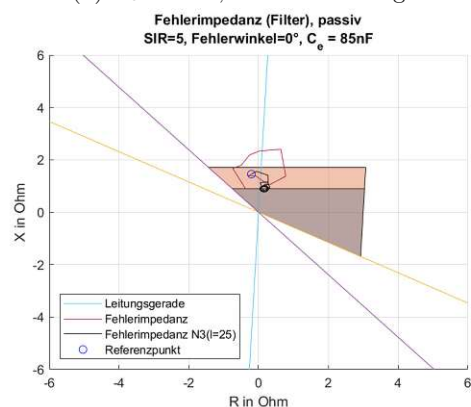
Abbildung 54: Fehlerimpedanz bei einer Ersatzkapazität von $C_e=69.5\text{ nF}$ bei passiver Ferroresonanzfilterung.



(a) $C_e=85\text{ nF}$, Differenzenquotient



(b) $C_e=85\text{ nF}$, Effektivwertzeiger



(c) $C_e=85\text{ nF}$, Filter

Abbildung 55: Fehlerimpedanz bei einer Ersatzkapazität von $C_e=85\text{ nF}$ bei passiver Ferroresonanzfilterung.

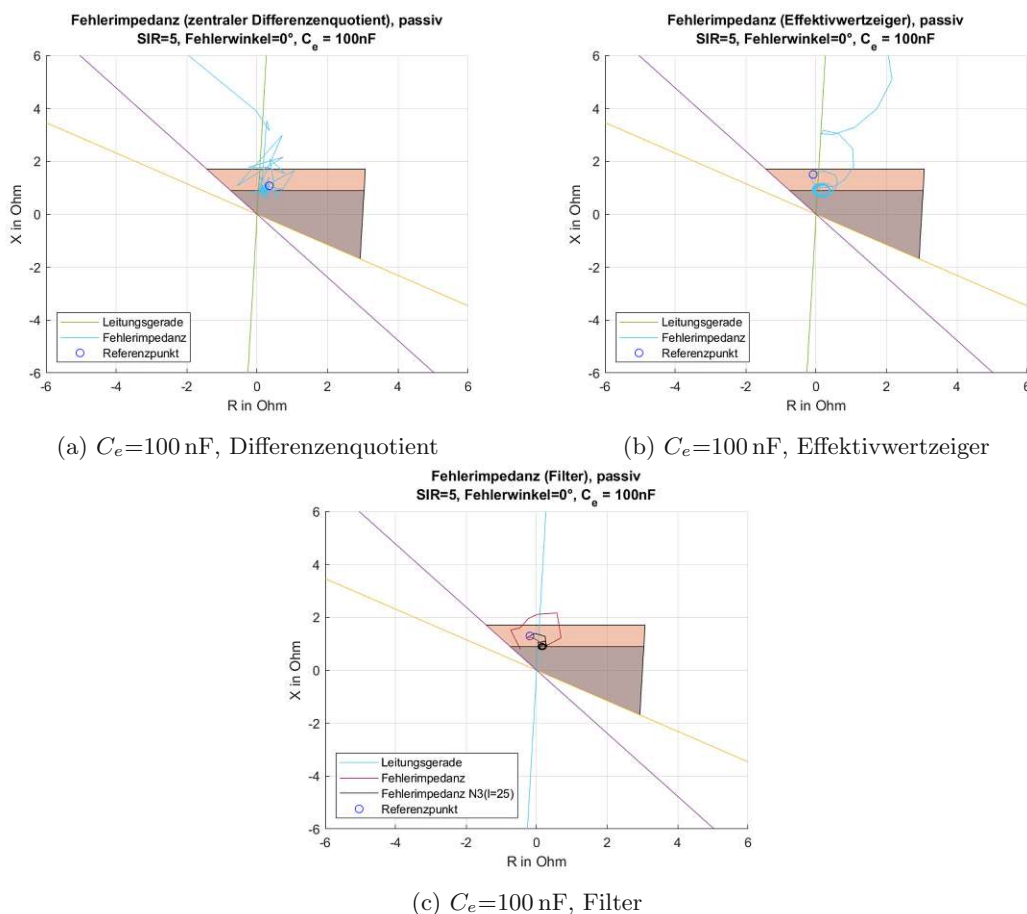


Abbildung 56: Fehlerimpedanz bei einer Ersatzkapazität von $C_e = 100 \text{ nF}$ bei passiver Ferroresonanzfilterung.

Der Grund warum hohe Kapazitäten sich positiv auf die Trajektorie der Fehlerimpedanz auswirken ist, dass bei hohen Kapazitäten die Amplitude der transienten Schwingungen wesentlich geringer ist als bei geringeren Kapazitäten. Dies ist auch in Abbildung 57 ersichtlich. In dieser ist der Zeitverlauf der Ausgangsspannung des CVT einmal bei einer Ersatzkapazität von 50 nF und einmal bei 150 nF dargestellt. Die Amplitude der transienten Schwingung zwischen 2 s und 2.05 s ist bei dem höheren Kapazitätswert geringer als bei dem kleineren Kapazitätswert. Dieses Verhalten trägt dazu bei, dass sogenannte „high capacitance“ CVT ein besseres Verhalten aufweisen als „low capacitance“ CVT. An dieser Stelle sei auf Kapitel 4.1 verwiesen, wo zu sehen ist, dass der Frequenzgang bei hohen Kapazitätswerten wesentlich flacher ausfällt, und dadurch die Ausgangsspannung besser der Eingangsspannung folgt.

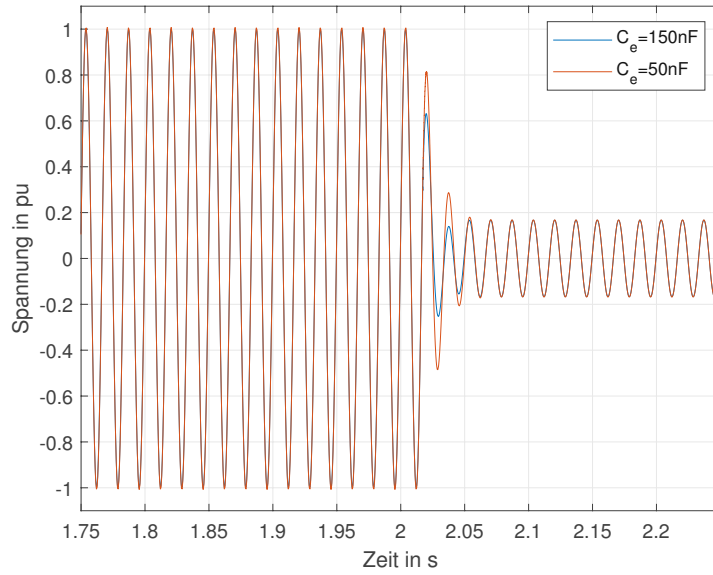


Abbildung 57: Einfluss der Ersatzkapazität auf die Ausgangsspannung des kapazitiven Spannungsteilers; Fehlereintritt bei 2 s

8 Fazit und Ausblick

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass kapazitive Spannungswandler auf unterschiedliche Weise ihre Ausgangsspannung beeinflussen können und dadurch auch einen bedeutenden Einfluss auf die daraus berechnete Fehlerimpedanz haben.

Wie sich gezeigt hat, haben parasitäre Elemente wie bspw. der Kupferwiderstand, aber auch eine Parallelkapazität einen gravierenden Einfluss auf das Verhalten eines kapazitiven Spannungswandlers und sind daher essentiell, für ein realitätsgetreues Modell des CVT. Diese Elemente führen dazu, dass zusätzliche Resonanzstellen für die Kompensationsdrossel und den Zwischenwandler auftreten. Die parasitären Kapazitäten beeinflussen hauptsächlich einen Frequenzbereich jenseits der Arbeitsfrequenz von 50 Hz bzw. 60 Hz, haben aber Auswirkungen auf Oberschwingungen.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass die Art der Filterung, die zur Unterdrückung der Ferroresonanzen gewählt wird, einen maßgeblichen Anteil am Verhalten des kapazitiven Spannungswandlers aufweist. So wirken aktive Filter, welche aus einem LC Schwingkreis, der auf die Systemfrequenz abgestimmt ist, bestehen, wie ein Bandpassfilter. Dies zeigt sich einerseits deutlich am Frequenzgang, hat aber auch stärkere Auswirkungen auf das Verhalten des CVT, als dies bei passiven Filtern der Fall ist.

Außerdem kann gesagt werden, dass das „source impedance ratio“ also das Verhältnis von Quellenimpedanz zu Leitungsimpedanz, den kapazitiven Spannungswandler sehr stark beeinflussen kann. Dies geht sogar so weit, dass bei sehr hohen SIR die Fehlerimpedanz nicht mehr von oben in den stationären Endwert einläuft, sondern von unten. Das Verhalten kann dazu führen, dass der Distanzschutz eine Überfunktion aufweist. Also die Erkennung eines Fehlers der nicht in der Zone liegt als Fehler innerhalb der Zone. Dies stellt ein unerwünschtes Verhalten dar. In der Praxis werden häufig Maßnahmen wie eine verzögerte Entscheidung über das Auslösen, oder eine spezielle Erkennung für Situationen in denen ein hohes „source impedance ration“ auftritt, implementiert.

Auch der Winkel, mit dem der Fehler eintritt beeinflusst das Verhalten des kapazitiven Spannungsteilers. Bei einem Fehler im Nulldurchgang der Primärspannung treten wesentlich stärkere transiente Schwingungen auf, als dies bei einem Fehler im Spannungsmaximum der Fall ist. Der Grund liegt primär in der Tatsache, dass die Energie, die in den aktiven Elementen des CVT, also in Spulen und Kapazitäten gespeichert ist, sich im Fehlerfall entladen muss. Da in der Regel die Zeitkonstante, mit der sich die kapazitiven Elemente entladen größer ist als jene, mit denen sich die induktiven entladen und die gespeicherte Energie in den Kapazitäten im Spannungsnulldurchgang am höchsten ist, treten hier die größeren transienten Schwingungen auf.

Des Weiteren hat sich gezeigt, dass CVT, die einen kapazitiven Spannungs-

wandler mit hohen Kapazitätswerten haben, ein wesentlich besseres Verhalten aufweisen als jene mit niedrigen Werten. Man spricht hier auch von „high capacitance“ und „low capacitance“ CVT. Die Amplitude der transienten Schwingungen bei „high capacitance“ CVT ist wesentlich geringer, als dies bei „low capacitance“ CVT der Fall ist.

Ein Aspekt, der in dieser Arbeit nicht betrachtet wurde, sind Maßnahmen, zur Kompensation der nicht idealen Effekte der Spannungswandlung mittels kapazitiven Spannungswandler. Eine sehr triviale Methode ist, die Auslöseentscheidung zu verzögern, um so der Fehlerimpedanz mehr Zeit zu geben in den stationären Endwert einzulaufen. Dies ist jedoch nicht ideal, da mehr Zeit vergeht bis potentiell beschädigte Betriebsmittel abgeschaltet werden.

Eine weitere einfache Methode, um mit einer Überfunktion des Relais umzugehen ist, die Zone zu verkleinern. Dies kann zum Beispiel durch verringern der X-Reichweite der Zone realisiert werden. Dadurch wird verhindert, dass eine von unten einlaufende Fehlerimpedanz durch eine andere Zone läuft, was eine potentielle Überfunktion verhindern kann.

Andere Methoden umfassen spezielle Algorithmen, mit denen in ausgewählte Situationen, wie bspw. ein hohes „source impedance ratio“ detektiert werden können, sodass diese Situationen, gesondert behandelt werden können. Allerdings spielen in der Praxis auch Algorithmen mit denen Transiente erkannt werden können eine Rolle.

9 Anhang

9.1 CVT Modell mit passiver Filterung

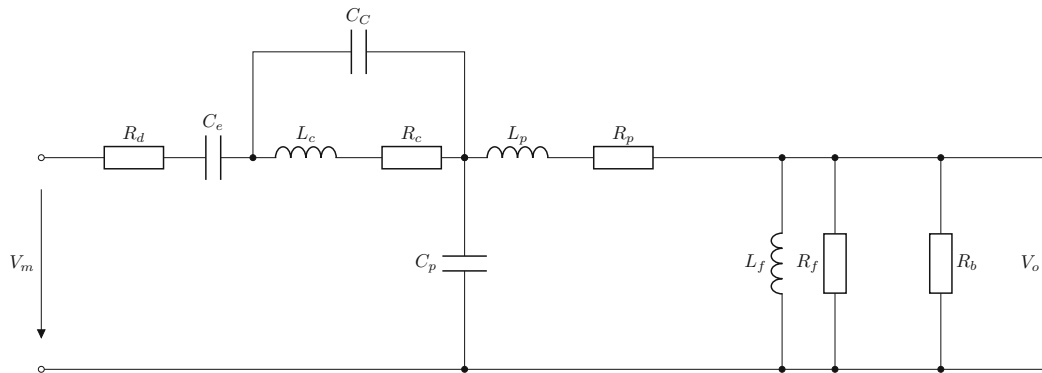


Abbildung 58: Modell des verwendeten kapazitiven Spannungswandler mit passiver Filterung zur Ferroresonanzunterdrückung.

Parameter:

- | | |
|--|---------------|
| • V_m Primärspannung des CVT | 6 kV |
| • R_d Dämpfungswiderstand | 25 k Ω |
| • C_e Ersatzkapazität des CVT | 69.5 nF |
| • C_c parasitäre Streukapazität der Kompensationsdrossel | 1.16 nF |
| • L_c Induktivität der Kompensationsdrossel | 101.2 H |
| • R_c Kupferverluste der Kompensationsdrossel | 127 Ω |
| • C_p parasitäre Streukapazität des Zwischentransformators | 0.26 nF |
| • L_p Streuinduktivität des Zwischentransformators | 6.5 H |
| • R_p Kupferverluste des Zwischentransformators | 296 Ω |
| • L_f Induktivität des Ferroresonanzfilters | 16.5 H |
| • R_f Dämpfungswiderstand des Ferroresonanzfilters | 231 Ω |
| • R_b Bürde | 100 Ω |

9.2 CVT mit aktiver Filterung

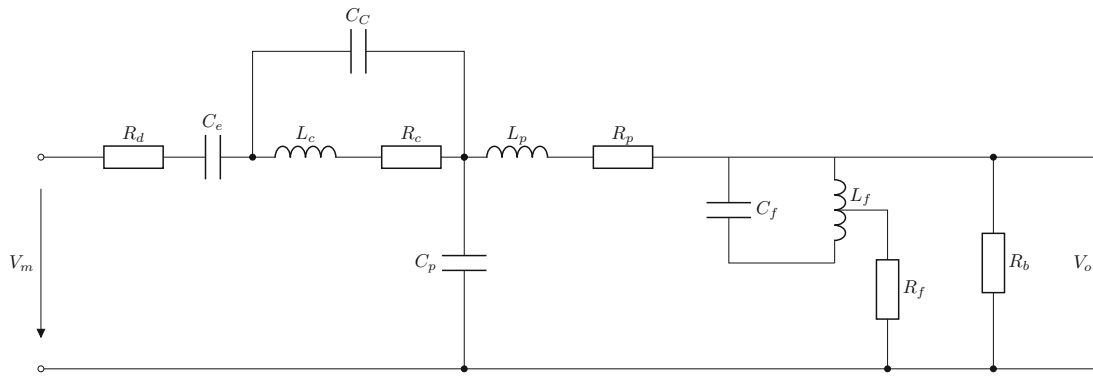


Abbildung 59: Modell des verwendeten kapazitiven Spannungswandler mit aktiver Filterung zur Ferroresonanzunterdrückung.

- | | |
|--|---------------|
| • V_m Primärspannung des CVT | 5 kV |
| • R_d Dämpfungswiderstand | 30 k Ω |
| • C_e Ersatzkapazität des CVT | 100 nF |
| • C_C parasitäre Streukapazität der Kompensationsdrossel | 0.13 nF |
| • L_c Induktivität der Kompensationsdrossel | 68 H |
| • R_c Kupferverluste der Kompensationsdrossel | 228 Ω |
| • C_p parasitäre Streukapazität des Zwischentransformators | 0.14 nF |
| • L_p Streuinduktivität des Zwischentransformators | 2.8 H |
| • R_p Kupferverluste des Zwischentransformators | 400 Ω |
| • L_f Induktivität des Ferroresonanzfilters | 0.7 H |
| • C_f Kapazität des Ferroresonanzfilters | 9.6 μ F |
| • R_f Dämpfungswiderstand des Ferroresonanzfilters | 37.5 Ω |
| • R_b Bürde | 100 Ω |

Literatur

- [1] F. Badrkhani Ajaei und M. Sanaye-Pasand. “Minimizing the Impact of Transients of Capacitive Voltage Transformers on Distance Relay”. In: IEEE, 2008. DOI: 10.1109/icpst.2008.4745229.
- [2] Firouz Badrkhani Ajaei and others. “Analysis and Suppression of the Coupling Capacitor Voltage Transformer Ferroresonance Phenomenon”. In: *IEEE Transactions on Power Delivery, VOL 24 No.4* (4. Okt. 2009).
- [3] Zhongxiao Cong u. a. “Parameter Identification of Electromagnetic Unit in Capacitive Voltage Transformer”. In: (2018).
- [4] David Costello und Karl Zimmerman. “CVT transients revisited Distance, directional overcurrent, and communications-assisted tripping concerns”. In: IEEE, 2012. DOI: 10.1109/cpre.2012.6201222.
- [5] Benjamin Cox. “Prüfung von Differentialschutz-Relais bei stark nichtsinusförmigen Strömen und Spannungen”. Diplomarbeit. Tu Wien.
- [6] D Fernandes u. a. “A Coupling Capacitor Voltage Transformer Representation for Electromagnetic Transient Studies”. In: (2003).
- [7] M Freiburg, E Sperling u. a. *Capacitive Voltage Transformers - Electrical Performance and Effective Diagnostic Measures*. Techn. Ber. Omicron electronics GmbH, 2016.
- [8] Daquing Hou und Jeff Roberts. *Capacitive Voltage Transformers: Transient Overreach Concerns and solutions for Distance Relaying*. Techn. Ber. Schweitzer Engineering Laboratories, 2010.
- [9] M. Kezunovic u. a. “Digital models of coupling capacitor voltage transformers for protective relay transient studies”. In: 7.4 (1992), S. 1927–1935. DOI: 10.1109/61.156996.
- [10] L Kojovic und M Kezunovic. *Computer Simulation of Ferroresonance Suppression Circuit for Digital Modeling of Coupling Capacitor Voltage Transformers*. Techn. Ber. Texas A&M University.
- [11] Ruthard Minker und Joachim Schmid. *Technologie der Messwandler*. 2020.
- [12] E. Pajuelo, G. Ramakrishna und M.S. Sachdev. “An improved voltage phasor estimation technique to minimize the impact of CCVT transients in distance protection”. In: IEEE. DOI: 10.1109/ccece.2005.1556969.
- [13] Adolf Schwab. *Elektroenergiesysteme Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. ISBN: 9783662468555.
- [14] Siemens. *SIPROTEC 5 Distanz-, Leitungsdifferentialschutz und Schaltermanagement für 1-polige und 3-polige Auslösung 7SA87, 7SD87, 7SL87, 7VK87ab V8.01, Handbuch*. 2019.
- [15] Andrew Sweetana. “Transient Response Characteristics of Capacitive Potential Devices”. In: PAS-90.5 (1971), S. 1989–2001. DOI: 10.1109/tpas.1971.292994.

- [16] Michael Thompson und Amit Somani. *A Tutorial on Calculating Source Impedance Ratios for Determining Line Length*. Techn. Ber. Schweitzer Engineering Laboratoris, Inc., 2015.
- [17] D.A. Tziouvaras u. a. “Mathematical models for current, voltage, and coupling capacitor voltage transformers”. In: 15.1 (2000), S. 62–72. DOI: 10.1109/61.847230.

Hiermit erkläre ich, dass die vorliegende Arbeit gemäß dem Code of Conduct, insbesondere ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel, angefertigt wurde. Die aus anderen Quellen direkt oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder in ähnlicher Form in anderen Prüfungsverfahren vorgelegt.

7.11.2021