

Spannungseinprägendes Verhalten von HGÜ-Systemen und nichtsynchronen Erzeugungsanlagen mit Gleichstromanbindung

In Ergänzung zur VDE AR-N 4131 für das dynamische Frequenz-Wirkleistungsverhalten und die dynamische Spannungsregelung ohne Blindstromvorgabe

Juni 2020

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Anwendungsbereich	1
3	Abkürzungen und Begriffe	2
4	Anforderungen aus Systemsicht	2
5	Relevante Bemessungsgrößen von HGÜ-Systemen und Erzeugungsanlagen im Hinblick auf ihr dynamisches Frequenz-Wirkleistungsverhalten und die dynamische Spannungsregelung ohne Blindstromvorgabe	3
6	Anwendungsspezifische Hinweise	4
6.1	Allgemein	4
6.2	HGÜ-Systeme	5
6.3	Erzeugungsanlagen	6
7	Testnetze, Nachweisverfahren und Referenzverhalten für HGÜ-Systeme und Erzeugungsanlagen	6
7.1	Testnetze	6
7.2	Definition der Testszenarien	8
7.2.1	Winkelsprung in der Netzspannung	9
7.2.2	Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung	9
7.2.3	Spannungssprung in der Netzspannung	10
7.2.4	Auftreten einer Gegensystemspannung	11
7.2.5	Auftreten von Harmonischen	11
7.2.6	Auftreten einer Subharmonischen	12
7.2.7	Änderung der Netzimpedanz	12
7.2.8	Inselnetzbildung mit DUT und aktiver Last	13
7.2.9	Inselnetzbildung mit 2 DUT und aktiver Last	13
7.2.10	Änderung der Netzimpedanz mit 2 parallelen DUT	14
7.3	Referenzverhalten	15
7.3.1	Vorgehensweise	15
7.3.2	Erzeugungsanlagen und HGÜ-Systeme mit Möglichkeiten des Energieausgleichs aus unabhängigen Energiequellen	16
8	Zusammenfassung und Ausblick	27
9	Literaturverzeichnis	28
A.	Anhang	29
A.I.	Nachweisverfahren – Anwendungsspezifische Hinweise	29
A.I.A.	Gefordertes DUT-Verhalten für Bewertung auf spannungseinprägendes Regelungsverhalten (High-Level-Regelungsanforderungen)	29

A.I.B. Spezifikation einer stromeinprägend geregelten Last (Einspeisung).....	30
A.I.C. Definition der Messgrößen	36
A.II. Vergleich zwischen Nachweisverfahren.....	37
A.II.A. Einleitung	37
A.II.B. Zeitverlauf bis zum ersten Peak und des eingeschwungenen Zustands.....	38
A.II.C. Kontinuierliche Einhüllende auf Basis des Simulationsmodells mit tatsächlicher Topologie	39
A.II.D. Vergleich	45
A.III. Beispielhafte Referenz-Zeitverläufe mit geregelter Spannungsquelle.....	90

1 Einleitung

In der VDE-AR-N 4131 (TAR HGÜ) werden mit dem dynamischen Frequenz-Wirkleistungsverhalten und der dynamischen Spannungsregelung ohne Blindstromvorgabe neue Anforderungen an die Regelungen von HGÜ-Systemen und von nichtsynchronen Erzeugungsanlagen mit Gleichstromanbindung gestellt.

Die Anforderungen und Nachweiskriterien für dynamisches Frequenz-Wirkleistungsverhalten und dynamische Spannungsregelung ohne Blindstromvorgabe müssen den Ergebnissen der Netzstudien des relevanten Netzbetreibers Rechnung tragen und dabei die Anforderungen aus VDE-AR-N 4131 [1], 10.1.4 und 10.1.9.2 erfüllen.

Um die Grundsätze der Implementierung dieser Anforderungen aufzuzeigen und allen am Netzanschlussprozess beteiligten Parteien einen Rahmen für die Umsetzung in Form von Spezifikationen und eines Konformitätsnachweisverfahrens zu geben, wird die allgemeine Beschreibung der TAR HGÜ mit diesem Hinweispapier konkretisiert. Dies umfasst insbesondere die Weiterentwicklung der Nachweismethoden zum zukünftigen spannungseinprägenden Verhalten von HGÜ-Systemen und nichtsynchronen Erzeugungsanlagen mit Gleichstromanbindung.

Das Hinweispapier stellt die Anforderungen aus Systemsicht und die Bemessungsgrenzen heutiger HGÜ-Systeme und leistungselektronischer Stellglieder im Besonderen dar. Diesbezüglich sollen die folgenden Grundprinzipien bei der Wahl des Verfahrens der Nachweisführung auf Konformität Berücksichtigung finden:

- Das Hinweispapier soll kein konkretes Regelungskonzept vorschreiben und beinhaltet dementsprechend auch keine Vorschriften für deren technische Umsetzung.
- Die vorgeschlagenen Prüfkriterien für den Nachweis sollen insbesondere auf die VSC-MMC Technologie abgestimmt werden.
- Die netzstabilisierende Wirkung der jeweiligen Anlagen-Regelung muss sichergestellt sein.

Das Hinweispapier skizziert exemplarisch einen Ablaufplan für den Konformitätsnachweis und stellt beispielhaft ein Testnetz, Szenarien und ein Referenzverhalten für das spannungseinprägende Verhalten bereit.

2 Anwendungsbereich

In der VDE-AR-N 4131 (TAR HGÜ) werden mit dem dynamischen Frequenz-Wirkleistungsverhalten (Abschnitt 10.1.4) und der dynamischen Spannungsregelung ohne Blindstromvorgabe (Kapitel 10.1.9.2 und Abschnitt 10.2.7) neue Anforderungen an die Regelung von HGÜ-Systemen und für nichtsynchrone Erzeugungsanlagen mit Gleichstromanbindung gestellt.

Dieser VDE-Hinweis „Spannungseinprägendes Verhalten“ beschreibt Verfahren für den Nachweis des dynamischen Frequenz-Wirkleistungsverhaltens (Abschnitt 10.1.4) und der dynamischen Spannungsregelung ohne Blindstromvorgabe (Abschnitt 10.1.9.2 und Abschnitt 10.2.7). Damit werden die Vorgaben der VDE-AR-N 4131 bezüglich des spannungseinprägenden Verhaltens zukünftiger HGÜ-Systeme und nichtsynchrone Erzeugungsanlagen mit Gleichstromanbindung funktional konkretisiert. Mit der Beschreibung der entsprechenden Funktionen werden eindeutige, technologieneutrale anwendungsspezifische Informationen für die Entwicklung und Realisierung entsprechender technischer Lösungen bereitgestellt. Hierzu werden die für den Konformitätsnachweis eines spannungseinprägenden

Verhaltens geeigneten Testnetze, Testszenarien sowie Methoden für die Vorgabe des Referenzverhaltens und des Gültigkeitsbereiches vorgestellt. Im Anhang sind alle Ergebnisse in Form eines beispielhaften Konformitätsnachweises hinsichtlich der Anforderungen der VDE-AR-N 4131 abgelegt, damit diese mindestens den Ergebnissen Rechnung tragen, die der relevante Übertragungsnetzbetreiber bei Studien hinsichtlich des erforderlichen dynamischen Frequenz-Wirkleistungsverhaltens bzw. einer Spannungsregelung ohne Blindstromvorgabe erzielt hat.

Der FNN Hinweis „Spannungseinprägendes Verhalten“ ist eine Ergänzung zur VDE-AR-N 4131. Die Methoden und Nachweisverfahren sind jedoch nicht auf HGÜ-Systeme und nichtsynchrone Erzeugungsanlagen mit Gleichstromanbindung begrenzt und sind prinzipiell auch auf andere Anwendungsregeln anwendbar.

3 Abkürzungen und Begriffe

DFT	Diskrete Fourier-Transformation
DLL	Dynamic Link Library
dq-Regelung	Regelung in netzsynchron umlaufenden Koordinaten (Park-Transformation)
DUT	Device Under Test
MMC	Modular Multilevel Converter
PLL	Phase-Locked Loop (Phasenregelschleife)
VSC	Voltage Source Converter
Erzeugungsanlagen	Der Begriff wird in diesem Dokument für nichtsynchrone Erzeugungsanlagen mit Gleichstromanbindung verwendet.
unverzögert	Der Begriff „unverzögert“ bezieht sich auf ein Verhalten gemäß Anforderungen der TAR 4131, welches in diesem Dokument entsprechend eines Referenzverhaltens nachprüfbar definiert wird.

4 Anforderungen aus Systemsicht

Folgende Anforderungen bestehen aus Systemsicht, um bei einem verringerten Anteil an Synchronmaschinen einen stabilen Systembetrieb aufrechterhalten zu können.

- Beherrschung einer Systemauffrennung unter definierten Kriterien
 - Definition des zu beherrschenden Leistungsbilanzungleichgewichts
 - Definition des maximal zulässigen RoCoF
 - Definition der mindestens erforderlichen Schwungmasse
- Begrenzung der maximalen Ausdehnung von Spannungstrichtern bei Netzfehlern
- Sicherstellung der Reglerstabilität
 - bei Kleinsignalstörungen
 - bei Großsignalstörungen
- Parallelbetrieb von HGÜ-Systemen und Erzeugungsanlagen ist auch ohne Synchronmaschinen möglich

Für weitergehende Informationen zu einem Systembetrieb ausschließlich auf Basis von HGÜ-Systemen und Erzeugungsanlagen mit Gleichstromanbindung wird auf [2] und [3] verwiesen.

5 Relevante Bemessungsgrößen von HGÜ-Systemen und Erzeugungsanlagen im Hinblick auf ihr dynamisches Frequenz-Wirkleistungsverhalten und die dynamische Spannungsregelung ohne Blindstromvorgabe

Prinzipiell verfügen die Anlagen über die Möglichkeit, in Reaktion auf eine Änderung der AC-Netzspannungsamplitude Blindstrom einzuspeisen, welcher der Änderung entgegenwirkt. Die Möglichkeiten zur Reaktion auf Frequenzabweichungen sind bei HGÜ-Systemen und Erzeugungsanlagen getrennt zu betrachten.

Prinzipiell verfügen HGÜ-Systeme über die Möglichkeit, einer Frequenzabweichung durch Austausch entsprechender Wirkleistung mit dem betroffenen Drehstromnetz entgegenzuwirken, wenn die dazu benötigte Wirkleistung unmittelbar an den HGÜ-Stationen verfügbar ist.

Die Bereitstellung der benötigten Wirkleistung erfolgt gemäß Stand der Technik durch angeschlossene andere Synchrongebiete, sofern diese dazu in der Lage sind. Dabei können die Gewährleistung der Systemstabilität und Aspekte der Systemführung im anderen Synchrongebiet einschränkend wirken.

Prinzipiell verfügen Erzeugungsanlagen über die Möglichkeit durch den Austausch von Wirkleistung einer Frequenzabweichung entgegenzuwirken. Die Bereitstellung der erforderlichen Wirkleistung kann bei Anlagen mit rotierenden Massen durch Nutzung ihrer Trägheit sowie durch die Einspeisung vorgehaltener Wirkleistungsreserven erfolgen.

Bei HGÜ-System und Erzeugungsanlagen erfolgt nach dem Stand der Technik die Bereitstellung von Blind- und Wirkleistung auf Grundlage gemessener Regelabweichungen innerhalb der durch die Bemessung einer Anlage gegebenen Grenzen. Die Grenzen sind dabei definiert durch die Zeitverläufe von:

- Strömen
- Spannungen
- Energiebilanz (Differenz von aufgenommener und abgegebener Energie an den Klemmen des Stromrichters zu jedem Zeitpunkt)

Daraus ergibt sich eine Abhängigkeit der Wirk- und Blindleistungsstellmöglichkeiten vom aktuellen Arbeitspunkt einer Anlage.

Während die Möglichkeiten für die Spannungsregelung im wesentlichen durch die Stromgrenzen gegeben sind, ist für das dynamische Frequenz-Wirkleistungsverhalten eine Bereitstellung von zusätzlicher Energie notwendig.

Insbesondere sind die bisher existierenden HGÜ-Systeme im Allgemeinen nicht vorbereitet, aus sich heraus vorübergehend Energie in der notwendigen Größenordnung abzugeben bzw. aufzunehmen, wie dies dem Verhalten einer mit einer bestimmten Trägheit rotierenden Generatorwelle entsprechen würde.

HGÜ-Systeme und Erzeugungsanlagen, welche einen darüber hinausgehenden Energieaustausch entsprechend dem Verhalten einer rotierenden Generatorwelle aufweisen sollen, benötigen gegenüber den heutigen Bemessungsanforderungen im Allgemeinen zumindest folgende Voraussetzungen:

- Einen entsprechenden Energiespeicher
- Entsprechende Stromreserven

Für die Bereitstellung solcher Funktionen sind entsprechende technische Entwicklungen notwendig. Art, Umfang und Zeit dieser Entwicklungen hängen von den Anforderungen ab. Sie können das HGÜ-System bzw. die Erzeugungsanlage selbst oder an deren Drehstromklemmen anzuschließende zusätzliche Systeme betreffen.

6 Anwendungsspezifische Hinweise

Zukünftige Drehstromnetze werden zunehmend aus Erzeugungsanlagen mit Gleichstromanbindung gespeist. Das netzbildende spannungseinprägende Verhalten dieser Erzeugungsanlagen wird deshalb für die Stabilität zukünftiger Netze entscheidend sein. Weiterhin sollen HGÜ-Systeme durch eine spannungseinprägende Wirkung die Netzstabilität unterstützen. HGÜ-Systeme können dabei:

- asynchrone Drehstrom-Verbundnetze verbinden,
- als Inselnetze betriebene Erzeugungsanlagen mit einem Drehstrom-Verbundnetz verbinden,
- ein Drehstrom-Verbundnetz durch eine interne Verbindung verstärken.

Das spannungseinprägende Verhalten ist u.a. durch dynamisches Frequenz-Wirkleistungsverhalten und dynamische Spannungsregelung gekennzeichnet.

Die Anforderungen und Nachweiskriterien für dynamisches Frequenz-Wirkleistungsverhalten und dynamische Spannungsregelung müssen den Ergebnissen der Netzstudien des Netzbetreibers Rechnung tragen und dabei die Anforderungen aus VDE-AR-N 4131, 10.1.4 und 10.1.9.2 erfüllen.

Das vorliegende Dokument beschreibt Verfahren für den Nachweis des dynamischen Frequenz-Wirkleistungsverhaltens und der dynamischen Spannungsregelung ohne Blindstromvorgabe und spezifiziert zugehörige Nachweiskriterien. Die technische Umsetzung dieser Anforderungen kann in Abhängigkeit von der gewählten Technologie des HGÜ-Systems bzw. der Erzeugungsanlage zu erheblichem technischen Mehraufwand führen. Die folgenden technologiebezogenen Rahmenbedingungen sind bei der Spezifikation der Systemanforderungen zu berücksichtigen.

6.1 Allgemein

Bei leistungselektronischen Betriebsmitteln sind die Strom- und Spannungsgrenzen zu beachten. Ausgehend von der Bemessung für den stationären Betriebsfall ist die temporäre Überlastbarkeit solcher Betriebsmittel typischerweise deutlich geringer, als dies etwa bei elektromechanischen Betriebsmitteln der Fall ist.

Bei Erreichen der Strom- oder Spannungsgrenzen erfolgen geeignete Regelungseingriffe. Diese haben das primäre Ziel, das leistungselektronische Betriebsmittel im Rahmen der gegebenen technischen Möglichkeiten am Netz zu halten. Das gewünschte spannungseinprägende Verhalten ist in einer solchen Situation zweitrangig. Im Zusammenwirken mit anderen Betriebsmitteln des Netzes können dadurch ungewünschte Wechselwirkungen entstehen.

Neben den Strom- oder Spannungsgrenzen können regelungstechnische Gegebenheiten das gewünschte Verhalten hinsichtlich des dynamischem Frequenz-Wirkleistungsverhaltens bzw. der dynamischen Spannungsregelung einschränken. Einschränkungen können sich z. B. daraus ergeben, dass bei der Gestaltung der Regelkreise zahlreiche verschiedene Anforderungen zu berücksichtigen sind, die sich in der Umsetzung gegenseitig beeinflussen können. Dies sind z.B.:

- Dynamische Anforderungen an das Durchfahren von Unter- und Überspannungen auf der Drehstrom- oder Gleichstromseite,
- LFSM-U, LFSM-O bzw. sogenannte special protection schemes,,
- die Dämpfung von Torsionsschwingungen oder
- die Kompensation, Filterung oder Dämpfung von Oberschwingungen.

Eine lösungsorientierte Gestaltung des Systems erfordert die Abstimmung zwischen dem relevanten Netzbetreiber und dem Anschlussnehmer im Sinne einer Gesamtoptimierung.

Die am Netzanschlusspunkt verfügbare Leistung wird, wie allgemein bekannt, durch Sättigungseffekte von Transformatoren des HGÜ-Systems bzw. der Erzeugungsanlage beeinflusst. Die auftretenden Sättigungseffekte sind bestimmt von den Bemessungsgrößen und der Auslegung der jeweiligen Transformatoren. Sie sind damit projektabhängig.

Die Effekte der Transformatorsättigung können bei Vorgabe der Anforderungen und Nachweisverfahren wie folgt berücksichtigt werden. Der Konformitätsnachweis der Anlage erfolgt über das Erbringen der vom Hersteller ermittelten Wirk- und Blindleistungswerte an den drehstromseitigen Stromrichteranschlussklemmen, wobei die Transformatoren entsprechend ihres tatsächlichen Designs mit und ohne Sättigung nachgebildet sind. Das Referenzverhalten wird durch den relevanten Netzbetreiber ohne den Effekt der Transformatorsättigung vorgegeben.

Durch diese Vorgehensweise werden sowohl das spannungseinprägende Verhalten wie auch ein stabiler Anlagenbetrieb unter Einfluss der Transformatorsättigung nachgewiesen

6.2 HGÜ-Systeme

Im allgemeinen Fall ist für die Bereitstellung der Funktion dynamisches Frequenz-Wirkleistungsverhaltens und dynamischer Spannungsregelung zumindest ein temporärer Austausch von Wirkleistung zwischen dem Device Under Test (DUT) und dem Netz notwendig. Heutige HGÜ-Systeme verfügen praktisch über keine entsprechenden Energiereserven. Deshalb muss die damit im Zusammenhang stehende Energiebilanz ausreichend schnell ausgeglichen werden, damit das HGÜ-System weiter stabil betrieben werden kann. Die Quelle für diesen Energieausgleich ist idealerweise unabhängig von dem Drehstromsystem, für welches das dynamische Frequenz-Wirkleistungsverhalten und die dynamische Spannungsregelung bereitgestellt werden soll. Eine solche unabhängige Quelle kann z.B. ein anderes Synchrongebiet sein, welches über den Gleichstromkreis der HGÜ angeschlossen ist.

Ist ein Energieausgleich über eine unabhängige Quelle nicht möglich, kann das HGÜ-System nur die inherent vorhandenen dynamischen Energiereserven bereitstellen. In diesem Fall muß der Energieausgleich von dem betroffenen Drehstromsystem typischerweise innerhalb weniger Millisekunden ausgeglichen werden.

6.3 Erzeugungsanlagen

Anders als bei HGÜ-Systemen können Erzeugungsanlagen den Energieausgleich in gewissen Grenzen aus der Trägheit der bewegten Massen durchführen.

7 Testnetze, Nachweisverfahren und Referenzverhalten für HGÜ-Systeme und Erzeugungsanlagen

7.1 Testnetze

Die Nachweisführung soll auf Basis von EMT-Netzberechnungen erfolgen. Abbildung 1 zeigt ein beispielhaftes Testnetz für die Nachweisführung für eine Erzeugungsanlage bzw. eine Station eines HGÜ-Systems. Das HGÜ-System bzw. die Erzeugungsanlage, für die der Nachweis geführt werden soll, wird im Folgenden als „Device Under Test“ (DUT) bezeichnet. Abbildung 2 zeigt ergänzend ein beispielhaftes Testnetz für die Nachweisführung für zwei parallele HGÜ-Systeme.

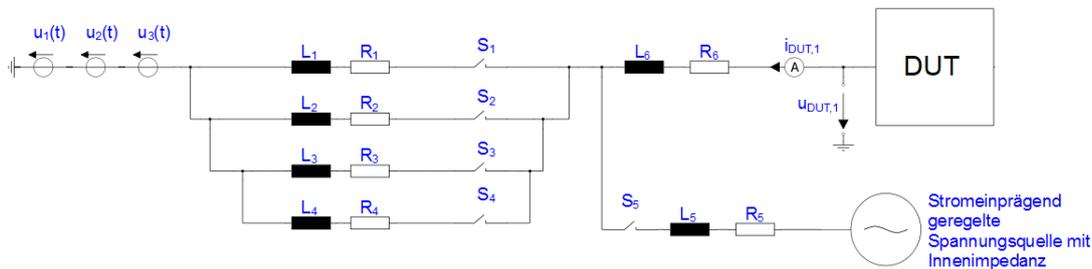


Abbildung 1: Strangersatzschaltung eines Testnetzes zur Überprüfung auf spannungseinprägendes Verhalten mit einer Erzeugungsanlage / einer Station eines HGÜ-Systems als DUT

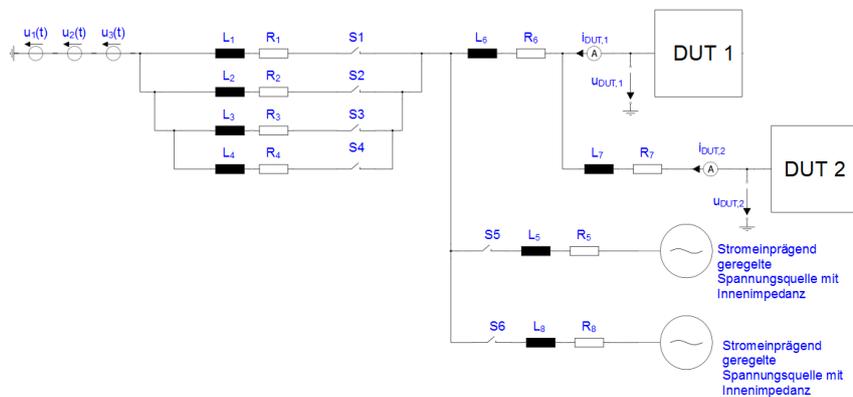


Abbildung 2: Strangersatzschaltung eines Testnetzes zur Überprüfung auf spannungseinprägendes Verhalten mit zwei parallelen HGÜ-Systemen als DUTs

Das Testnetz (vgl. Strangersatzschaltungen in Abbildung 1 und Abbildung 2) besteht aus einer Netznachbildung mit den in Reihe geschalteten Spannungsquellen $u_1(t)$, $u_2(t)$ und $u_3(t)$, und vier ohmsch-induktiven Leitungsimpedanzen Z_1 bis Z_4 , die über die Schalter S_1 bis S_4 zugeschaltet werden können. Hiermit lassen sich vier verschiedene Kurzschlussleistungen realisieren.

Eine stromeinprägend geregelte Spannungsquelle mit Innenimpedanz, kann über den Schalter S_5 und eine weitere ohmsch-induktive Leitungsimpedanz Z_5 zugeschaltet werden. In dem Block DUT befindet sich das Modell der Anlage (z.B. HGÜ-Station oder Erzeugungsanlage), die mit den Szenarien aus

Abschnitt 7.2 untersucht werden soll. Bei EZA erfolgt die Nachbildung des DUT angelehnt an die Vorgaben aus VDE-AR-N 4131 Anhang B.6.3.2.2 mit mindestens zwei EZE.

Die Elemente des Testnetzes sind an die Leistung des DUT anzupassen. Beispielhafte Parameter können der Tabelle in Abschnitt 7.2 entnommen werden. Hierbei erfolgt die Angabe der verschiedenen Parameter für HGÜ-Systeme in absoluten Werten, da ein Anschluss in aller Regel am 400-kV-Netz erfolgt. Für die Parameter der Erzeugungsanlagen werden dagegen relative Größen verwendet, um auch unterschiedliche Spannungsebenen (z.B. 66 kV, 150 kV, 230 kV, etc.) abbilden zu können.

Die im Strangersatzschaltbild angegebenen Spannungsquellen korrespondieren im Zeitbereich jeweils mit dreiphasigen Spannungsquellen. $u_1(t)$, $u_2(t)$ und $u_3(t)$ sind im Zeitbereich für die Phasen a, b und c wie folgt zu definieren und auszuführen:

u_{a1} , u_{b1} , u_{c1} : symmetrisches Drehspannungssystem (Mitsystemeinspeisung)

u_{a2} , u_{b2} , u_{c2} : symmetrisches Drehspannungssystem (Gegensystemeinspeisung)

u_{a3} , u_{b3} , u_{c3} : symmetrisches Oberschwingungssystem (Mit- oder Gegensystem)

- Grundschiwingung Mitsystem:

$$u_{a1}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{LL1} \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi_1)$$

$$u_{b1}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{LL1} \cdot \cos\left(\omega_1 t + \varphi_1 - \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$u_{c1}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{LL1} \cdot \cos\left(\omega_1 t + \varphi_1 + \frac{2}{3}\pi\right)$$

mit:

U_{LL1} Leiter-Leiter-Spannung im Mitsystem

$\omega_1 = 2\pi \cdot f_1 = 2\pi \cdot 50\text{Hz}$ Kreisfrequenz im Mitsystem

φ_1 Spannungswinkel im Mitsystem (Nullphasenwinkel)

- Grundschiwingung Gegensystem:

$$u_{a2}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{LL2} \cdot \cos(\omega_1 t + \varphi_2)$$

$$u_{b2}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{LL2} \cdot \cos\left(\omega_1 t + \varphi_2 + \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$u_{c2}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{LL2} \cdot \cos\left(\omega_1 t + \varphi_2 - \frac{2}{3}\pi\right)$$

U_{LL2} Leiter-Leiter-Spannung im Gegensystem

φ_2 Spannungswinkel im Gegensystem (Nullphasenwinkel)

- Symmetrisches Oberschwingungssystem (Mit- oder Gegensystem):

$$u_{a3}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{LL3} \cdot \cos(v\omega_1 t + \varphi_3)$$

$$u_{b3}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{LL3} \cdot \cos\left(v\omega_1 t + \varphi_3 - \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$u_{c3}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_{LL3} \cdot \cos\left(v\omega_1 t + \varphi_3 + \frac{2}{3}\pi\right)$$

U_{LL3} Leiter-Leiter-Spannung für das Oberschwingungssystem der Ordnungszahl v

φ_3 Spannungswinkel der Oberschwingung (Nullphasenwinkel)

7.2 Definition der Testszenarien

In allen nachfolgenden Szenarien wird das DUT bei halber Nennwirkleistungseinspeisung d.h. $P_{ref,pu} = 0,5$ an einem Netz mit endlicher Kurzschlussleistung (endlicher Netzimpedanz) betrieben. Der Blindleistungssollwert ist stets $Q_{ref,pu} = 0$. Folgende Ereignisse werden in den Szenarien ausgeführt:

Zu untersuchende Szenarien für HGÜ-Systeme	Zu untersuchende Szenarien für Erzeugungsanlagen
<ul style="list-style-type: none"> ■ Winkelsprung der Netzspannung ■ Lineare Frequenzänderung in der Netzspannung mit initialem Winkelsprung ■ Spannungssprung der Netzspannung ■ Auftreten eines Gegensystems ■ Auftreten einer Harmonischen ■ Auftreten einer Subharmonischen ■ Änderung der Netzimpedanz ■ Inselnetzbildung mit stromeinprägend geregelter Spannungsquelle ■ Inselnetzbildung mit 2 DUT mit stromeinprägend geregelter Spannungsquelle ■ Änderung der Netzimpedanz mit zwei parallelen DUT 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Winkelsprung der Netzspannung ■ Lineare Frequenzänderung in der Netzspannung mit initialem Winkelsprung ■ Spannungssprung der Netzspannung ■ Auftreten eines Gegensystems ■ Auftreten einer Harmonischen ■ Auftreten einer Subharmonischen ■ Änderung der Netzimpedanz ■ Inselnetzbildung mit stromeinprägend geregelter Spannungsquelle

Die in den Unterabschnitten angegebenen Schalterstellungen und Spannungswerte beziehen sich auf Abbildung 1 bis Abbildung 2.

Für die im Anhang gezeigten Referenzverläufe gelten die nachfolgenden Impedanzwerte:

HGÜ-Systeme (Beispiel in absoluten Größen für $U_{LL1}=400$ kV und $P_r = 1000$ MW)	Erzeugungsanlagen (Beispiel in relativen Größen)
<ul style="list-style-type: none"> - $L_1 = 33,807$ mH - $R_1 = 1,056$ Ω - $L_2 = 167,23$ mH - $R_2 = 5,2538$ Ω - $L_3 = L_4 = 501,701$ mH - $R_3 = R_4 = 15,7614$ Ω - $L_5 = L_6 = L_7 = L_8 = 5,06768$ mH - $R_5 = R_6 = R_7 = R_8 = 0,159206$ Ω 	<ul style="list-style-type: none"> - $r_1=r_2=r_3=r_4=74,6 \cdot 10^{-3}$ p.u. - $l_1=l_2=l_3=l_4=2,375 \cdot 10^{-3}$ p.u. - $r_5=7,46 \cdot 10^{-3}$ p.u. - $l_5=0,237 \cdot 10^{-3}$ p.u. <p>Der Widerstand R_6 und die Induktivität L_6 sind für Erzeugungsanlagen durch ein adäquates Kabelmodell zu ersetzen</p>

7.2.1 Winkelsprung in der Netzspannung

HGÜ-Systeme	Erzeugungsanlagen
<ul style="list-style-type: none"> ■ Schalterstellungen <ul style="list-style-type: none"> - S1, S2, S3, S4: geschlossen (entspricht $S_k'' = 20$ GVA) - S5: geöffnet ■ $u_1(t)$: $U_{LL1} = 400$ kV, $f_1 = 50$ Hz, $\varphi_1 = 0^\circ$ <ul style="list-style-type: none"> - Variationen von φ_1 <ul style="list-style-type: none"> - $t = 1$ s: $\varphi_1 = 0^\circ \rightarrow \varphi_1 = -10^\circ$ - $t = 3$ s: $\varphi_1 = -10^\circ \rightarrow \varphi_1 = -40^\circ$ - $t = 5$ s: $\varphi_1 = -40^\circ \rightarrow \varphi_1 = -30^\circ$ - $t = 7$ s: $\varphi_1 = -30^\circ \rightarrow \varphi_1 = 0^\circ$ ■ $u_2(t) = u_3(t) = 0$ kV 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Schalterstellungen <ul style="list-style-type: none"> - S1, S2, S3 geschlossen (entspricht $S_k'' = 4 P_n$) - S4, S5: geöffnet ■ $u_1(t)$: $u_{LL1} = 1$ p.u., $f_1 = 50$ Hz, $\varphi_1 = 0^\circ$ <ul style="list-style-type: none"> - Variationen von φ_1 <ul style="list-style-type: none"> - $t = 1$ s: $\varphi_1 = 0^\circ \rightarrow \varphi_1 = -10^\circ$ - $t = 3$ s: $\varphi_1 = -10^\circ \rightarrow \varphi_1 = -40^\circ$ - $t = 5$ s: $\varphi_1 = -40^\circ \rightarrow \varphi_1 = -30^\circ$ - $t = 7$ s: $\varphi_1 = -30^\circ \rightarrow \varphi_1 = 0^\circ$ ■ $u_2(t) = u_3(t) = 0$ kV

7.2.2 Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung

HGÜ-Systeme	Erzeugungsanlagen
<ul style="list-style-type: none"> ■ Schalterstellungen <ul style="list-style-type: none"> - S1, S2, S3, S4: geschlossen (entspricht $S_k'' = 20$ GVA) - S5: geöffnet ■ $u_1(t)$: $U_{LL1} = 400$ kV, $f_1 = 50$ Hz, $\varphi_1 = 0^\circ$ 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Schalterstellungen <ul style="list-style-type: none"> - S1, S2, S3 geschlossen (entspricht $S_k'' = 4 P_n$) - S4, S5: geöffnet ■ $u_1(t)$: $u_{LL1} = 1$ p.u., $f_1 = 50$ Hz, $\varphi_1 = 0^\circ$

HGÜ-Systeme	Erzeugungsanlagen
<ul style="list-style-type: none"> - Variationen von φ_1 und f_1 - $t = 1 \text{ s}$: $\varphi_1 = 0^\circ \rightarrow \varphi_1 = 30^\circ$ - $t = 1 \text{ s bis } 1,5 \text{ s}$: $f_1 = 50 \text{ Hz} \rightarrow f_1 = 51 \text{ Hz}$ (lineare Frequenzänderung mit +2 Hz/s bis 1,5 s) - $t = 4 \text{ s}$: $\varphi_1 = 30^\circ \rightarrow \varphi_1 = 0^\circ$ - $t = 4 \text{ s bis } 4,5 \text{ s}$: $f_1 = 51 \text{ Hz} \rightarrow f_1 = 50 \text{ Hz}$ - $t = 7 \text{ s}$: $\varphi_1 = 0^\circ \rightarrow \varphi_1 = -30^\circ$ - $t = 7 \text{ s bis } 7,5 \text{ s}$: $f_1 = 50 \text{ Hz} \rightarrow f_1 = 49 \text{ Hz}$ - $t = 11 \text{ s}$: $\varphi_1 = -30^\circ \rightarrow \varphi_1 = 0^\circ$ - $t = 11 \text{ s bis } 11,5 \text{ s}$: $f_1 = 49 \text{ Hz} \rightarrow f_1 = 50 \text{ Hz}$ <p>■ $u_2(t) = u_3(t) = 0 \text{ kV}$</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Variationen von φ_1 und f_1 - $t = 1 \text{ s}$: $\varphi_1 = 0^\circ \rightarrow \varphi_1 = 30^\circ$ - $t = 1 \text{ s bis } 1,5 \text{ s}$: $f_1 = 50 \text{ Hz} \rightarrow f_1 = 51 \text{ Hz}$ (lineare Frequenzänderung mit +2 Hz/s bis 1,5 s) - $t = 4 \text{ s}$: $\varphi_1 = 30^\circ \rightarrow \varphi_1 = 0^\circ$ - $t = 4 \text{ s bis } 4,5 \text{ s}$: $f_1 = 51 \text{ Hz} \rightarrow f_1 = 50 \text{ Hz}$ - $t = 7 \text{ s}$: $\varphi_1 = 0^\circ \rightarrow \varphi_1 = -30^\circ$ - $t = 7 \text{ s bis } 7,5 \text{ s}$: $f_1 = 50 \text{ Hz} \rightarrow f_1 = 49 \text{ Hz}$ - $t = 11 \text{ s}$: $\varphi_1 = -30^\circ \rightarrow \varphi_1 = 0^\circ$ - $t = 11 \text{ s bis } 11,5 \text{ s}$: $f_1 = 49 \text{ Hz} \rightarrow f_1 = 50 \text{ Hz}$ <p>■ $u_2(t) = u_3(t) = 0 \text{ kV}$</p>

7.2.3 Spannungssprung in der Netzspannung

HGÜ-Systeme	Erzeugungsanlagen
<p>■ Schalterstellungen</p> <ul style="list-style-type: none"> - S1, S2, S3, S4: geschlossen (entspricht $S_k'' = 20 \text{ GVA}$) - S5: geöffnet <p>■ $u_1(t)$: $U_{LL1} = 400 \text{ kV}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $\varphi_1 = 0^\circ$</p> <ul style="list-style-type: none"> - Variationen von U_{LL1} - $t = 1 \text{ s}$: $U_{LL1} = 400 \text{ kV} \rightarrow 380 \text{ kV}$ - $t = 3 \text{ s}$: $U_{LL1} = 380 \text{ kV} \rightarrow 400 \text{ kV}$ - $t = 5 \text{ s}$: $U_{LL1} = 400 \text{ kV} \rightarrow 340 \text{ kV}$ - $t = 7 \text{ s}$: $U_{LL1} = 340 \text{ kV} \rightarrow 400 \text{ kV}$ - $t = 9 \text{ s}$: $U_{LL1} = 400 \text{ kV} \rightarrow 420 \text{ kV}$ - $t = 11 \text{ s}$: $U_{LL1} = 420 \text{ kV} \rightarrow 400 \text{ kV}$ - $t = 13 \text{ s}$: $U_{LL1} = 400 \text{ kV} \rightarrow 440 \text{ kV}$ - $t = 15 \text{ s}$: $U_{LL1} = 440 \text{ kV} \rightarrow 400 \text{ kV}$ <p>■ $u_2(t) = u_3(t) = 0 \text{ kV}$</p>	<p>■ Schalterstellungen</p> <ul style="list-style-type: none"> - S1, S2, S3 geschlossen (entspricht $S_k'' = 4 P_n$) - S4, S5: geöffnet <p>■ $u_1(t)$: $u_{LL1} = 1 \text{ p.u.}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $\varphi_1 = 0^\circ$</p> <ul style="list-style-type: none"> - Variationen von u_{LL1} - $t = 1 \text{ s}$: $u_{LL1} = 1 \text{ p.u.} \rightarrow 0,95 \text{ p.u.}$ - $t = 3 \text{ s}$: $u_{LL1} = 0,95 \text{ p.u.} \rightarrow 1 \text{ p.u.}$ - $t = 5 \text{ s}$: $u_{LL1} = 1 \text{ p.u.} \rightarrow 0,9 \text{ p.u.}$ - $t = 7 \text{ s}$: $u_{LL1} = 0,9 \text{ p.u.} \rightarrow 1 \text{ p.u.}$ - $t = 9 \text{ s}$: $u_{LL1} = 1 \text{ p.u.} \rightarrow 1,05 \text{ p.u.}$ - $t = 11 \text{ s}$: $u_{LL1} = 1,05 \text{ p.u.} \rightarrow 1 \text{ p.u.}$ - $t = 13 \text{ s}$: $u_{LL1} = 1 \text{ p.u.} \rightarrow 1,1 \text{ p.u.}$ - $t = 15 \text{ s}$: $u_{LL1} = 1,1 \text{ p.u.} \rightarrow 1 \text{ p.u.}$ <p>■ $u_2(t) = u_3(t) = 0 \text{ kV}$</p>

7.2.4 Auftreten einer Gegensystemspannung

HGÜ-Systeme	Erzeugungsanlagen
<ul style="list-style-type: none"> ■ Schalterstellungen <ul style="list-style-type: none"> - S1, S2, S3, S4: geschlossen (entspricht $S_k'' = 20 \text{ GVA}$) - S5: geöffnet ■ $u_1(t)$: $U_{LL1} = 400 \text{ kV}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $\varphi_1 = 0^\circ$ ■ $u_2(t)$: $U_{LL2} = 0 \text{ kV}$, $f_2 = -50 \text{ Hz}$, $\varphi_2 = 0^\circ$ <ul style="list-style-type: none"> - Variation von U_{LL2} - $t = 1 \text{ s}$: $U_{LL2} = 0 \text{ kV} \rightarrow 8 \text{ kV}$ ■ $u_3(t) = 0 \text{ kV}$ 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Schalterstellungen <ul style="list-style-type: none"> - S1, S2, S3 geschlossen (entspricht $S_k'' = 4 P_n$) - S4, S5: geöffnet ■ $u_1(t)$: $u_{LL1} = 1 \text{ p.u.}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $\varphi_1 = 0^\circ$ ■ $u_2(t)$: $u_{LL2} = 0 \text{ p.u.}$, $f_2 = -50 \text{ Hz}$, $\varphi_2 = 0^\circ$ <ul style="list-style-type: none"> - Variation von u_{LL2} - $t = 1 \text{ s}$: $u_{LL2} = 0 \text{ p.u.} \rightarrow 0,02 \text{ p.u.}$ ■ $u_3(t) = 0 \text{ kV}$

7.2.5 Auftreten von Harmonischen

HGÜ-Systeme	Erzeugungsanlagen
<ul style="list-style-type: none"> ■ Schalterstellungen <ul style="list-style-type: none"> - S1, S2, S3, S4: geschlossen (entspricht $S_k'' = 20 \text{ GVA}$) - S5: geöffnet ■ $u_1(t)$: $U_{LL1} = 400 \text{ kV}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $\varphi_1 = 0^\circ$ ■ $u_2(t), u_3(t)$: <ul style="list-style-type: none"> - $U_{LL2} = 0 \text{ kV}$, $\varphi_2 = 0^\circ$ - $U_{LL3} = 0 \text{ kV}$, $\varphi_3 = 0^\circ$ <ul style="list-style-type: none"> - Variationen von $U_{LL2}, f_2, U_{LL3}, f_3$ - $t = 1 \text{ s}$: $f_2 = 100 \text{ Hz}$ mit $U_{LL2} = 1,48 \text{ kV}$ - $t = 2 \text{ s}$: $f_2 = 100 \text{ Hz}$ mit $U_{LL2} = 0,0 \text{ kV}$ - $t = 3 \text{ s}$: $f_2 = -250 \text{ Hz}$ mit $U_{LL2} = 6,28 \text{ kV}$ $f_3 = 350 \text{ Hz}$ mit $U_{LL3} = 5,24 \text{ kV}$ - $t = 4 \text{ s}$: $f_2 = -250 \text{ Hz}$ mit $U_{LL2} = 0,0 \text{ kV}$ $f_3 = 350 \text{ Hz}$ mit $U_{LL3} = 0,0 \text{ kV}$ - $t = 5 \text{ s}$: $f_2 = 950 \text{ Hz}$ mit $U_{LL2} = 2,92 \text{ kV}$ - $t = 6 \text{ s}$: $f_2 = 950 \text{ Hz}$ mit $U_{LL2} = 0,0 \text{ kV}$ - $t = 7 \text{ s}$: $f_2 = 1550 \text{ Hz}$ mit $U_{LL2} = 2,2 \text{ kV}$ - $t = 8 \text{ s}$: $f_2 = 1550 \text{ Hz}$ mit $U_{LL2} = 0,0 \text{ kV}$ 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Schalterstellungen <ul style="list-style-type: none"> - S1, S2, S3 geschlossen (entspricht $S_k'' = 4 P_n$) - S4, S5: geöffnet ■ $u_1(t)$: $u_{LL1} = 1 \text{ p.u.}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $\varphi_1 = 0^\circ$ ■ $u_2(t), u_3(t)$: <ul style="list-style-type: none"> - $u_{LL2} = 0 \text{ p.u.}$, $\varphi_2 = 0^\circ$ - $u_{LL3} = 0 \text{ p.u.}$, $\varphi_3 = 0^\circ$ <ul style="list-style-type: none"> - Variationen von $u_{LL2}, f_2, u_{LL3}, f_3$ - $t = 1 \text{ s}$: $f_2 = 100 \text{ Hz}$ mit $u_{LL2} = 0,02 \text{ p.u.}$ - $t = 2 \text{ s}$: $f_2 = 100 \text{ Hz}$ mit $u_{LL2} = 0 \text{ p.u.}$ - $t = 3 \text{ s}$: $f_2 = -250 \text{ Hz}$ mit $u_{LL2} = 0,02 \text{ p.u.}$ $f_3 = 350 \text{ Hz}$ mit $u_{LL3} = 0,02 \text{ p.u.}$ - $t = 4 \text{ s}$: $f_2 = -250 \text{ Hz}$ mit $u_{LL2} = 0 \text{ p.u.}$ $f_3 = 350 \text{ Hz}$ mit $u_{LL3} = 0,0$ - $t = 5 \text{ s}$: $f_2 = 950 \text{ Hz}$ mit $u_{LL2} = 0,02 \text{ pu}$ - $t = 6 \text{ s}$: $f_2 = 950 \text{ Hz}$ mit $u_{LL2} = 0 \text{ p.u.}$ - $t = 7 \text{ s}$: $f_2 = 1550 \text{ Hz}$ mit $u_{LL2} = 0,02 \text{ p.u.}$ - $t = 8 \text{ s}$: $f_2 = 1550 \text{ Hz}$ mit $u_{LL2} = 0 \text{ p.u.}$

7.2.6 Auftreten einer Subharmonischen

HGÜ-Systeme	Erzeugungsanlagen
<ul style="list-style-type: none"> ■ Schalterstellungen <ul style="list-style-type: none"> - S1, S2, S3, S4: geschlossen (entspricht $S_k'' = 20 \text{ GVA}$) - S5: geöffnet ■ $u_1(t)$: $U_{LL1} = 400 \text{ kV}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $\varphi_1 = 0^\circ$ ■ $u_2(t)$: $U_{LL2} = 0 \text{ kV}$, $f_2 = 50 \text{ Hz}$, $\varphi_2 = 0^\circ$ <ul style="list-style-type: none"> - Variationen von U_{LL2} und f_2 <ul style="list-style-type: none"> - $t = 1 \text{ s}$: $f_2 = 5 \text{ Hz}$ mit $U_{LL2} = 8,0 \text{ kV}$ - $t = 6 \text{ s}$: $f_2 = 5 \text{ Hz}$ mit $U_{LL2} = 0,0 \text{ kV}$ - $t = 11 \text{ s}$: $f_2 = 10 \text{ Hz}$ mit $U_{LL2} = 8,0 \text{ kV}$ - $t = 16 \text{ s}$: $f_2 = 10 \text{ Hz}$ mit $U_{LL2} = 0,0 \text{ kV}$ - $t = 21 \text{ s}$: $f_2 = 15,9 \text{ Hz}$ mit $U_{LL2} = 8,0 \text{ kV}$ ■ $u_3(t) = 0 \text{ kV}$ 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Schalterstellungen <ul style="list-style-type: none"> - S1, S2, S3 geschlossen (entspricht $S_k'' = 4 P_n$) - S4, S5: geöffnet ■ $u_1(t)$: $u_{LL1} = 1 \text{ p.u.}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $\varphi_1 = 0^\circ$ ■ $u_2(t)$: $u_{LL2} = 0 \text{ p.u.}$, $f_2 = 50 \text{ Hz}$, $\varphi_2 = 0^\circ$ <ul style="list-style-type: none"> - Variationen von u_{LL2} und f_2 <ul style="list-style-type: none"> - $t = 1 \text{ s}$: $f_2 = 5 \text{ Hz}$ mit $u_{LL2} = 0,02 \text{ p.u.}$ - $t = 6 \text{ s}$: $f_2 = 5 \text{ Hz}$ mit $u_{LL2} = 0 \text{ p.u.}$ - $t = 11 \text{ s}$: $f_2 = 10 \text{ Hz}$ mit $u_{LL2} = 0,02 \text{ p.u.}$ - $t = 16 \text{ s}$: $f_2 = 10 \text{ Hz}$ mit $u_{LL2} = 0 \text{ p.u.}$ - $t = 21 \text{ s}$: $f_2 = 15,9 \text{ Hz}$ mit $u_{LL2} = 0,02 \text{ p.u.}$ ■ $u_3(t) = 0 \text{ kV}$

7.2.7 Änderung der Netzimpedanz

HGÜ-Systeme	Erzeugungsanlagen
<ul style="list-style-type: none"> ■ Schalterstellungen <ul style="list-style-type: none"> - S1: geschlossen <ul style="list-style-type: none"> - $t = 1,0 \text{ s}$: Öffnung des Schalters (Änderung S_k'' von 20 GVA auf 5 GVA) - S2: geschlossen <ul style="list-style-type: none"> - $t = 3,0 \text{ s}$: Öffnung des Schalters (Änderung S_k'' von 5 GVA auf 2 GVA) - S3: geschlossen <ul style="list-style-type: none"> - $t = 5,0 \text{ s}$: Öffnung des Schalters (Änderung S_k'' von 2 GVA auf 1 GVA) - S4: geschlossen - S5: geöffnet ■ $u_1(t)$: $U_{LL1} = 400 \text{ kV}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $\varphi_1 = 0^\circ$ ■ $u_2(t) = u_3(t) = 0 \text{ kV}$ 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Schalterstellungen <ul style="list-style-type: none"> - S1: geschlossen <ul style="list-style-type: none"> - $t = 1,0 \text{ s}$: Öffnung des Schalters (Änderung S_k'' von $4 \cdot P_n$ auf $2,67 \cdot P_n$) - S2: geschlossen <ul style="list-style-type: none"> - $t = 3,0 \text{ s}$: Öffnung des Schalters (Änderung S_k'' von $2,67 \cdot P_n$ auf $1,33 \cdot P_n$) - S3: geschlossen - S4, S5 geöffnet ■ $u_1(t)$: $U_{LL1} = 1 \text{ p.u.}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $\varphi_1 = 0^\circ$ ■ $u_2(t) = u_3(t) = 0 \text{ kV}$

7.2.8 Inselnetzbildung mit DUT und aktiver Last

HGÜ-Systeme	Erzeugungsanlagen
<ul style="list-style-type: none"> ■ Schalterstellungen <ul style="list-style-type: none"> - S1: geschlossen (entspricht $S_k'' = 13 \text{ GVA}$) - $t = 1,0 \text{ s}$: Öffnung des Schalters - S2, S3, S4: geöffnet - S5: geschlossen ■ $u_1(t)$: $U_{LL1} = 400 \text{ kV}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $\varphi_1 = 0^\circ$ ■ $u_2(t) = u_3(t) = 0 \text{ kV}$ ■ Die stromeinprägend geregelte Spannungsquelle speist dauerhaft 200 MW ein 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Schalterstellungen <ul style="list-style-type: none"> - S1, S2, S3: geschlossen (entspricht $S_k'' = 4 P_n$) - $t = 1,0 \text{ s}$: Öffnung der Schalter (Insel) - S4: geöffnet - S5 geschlossen (falls anwendbar) ■ $u_1(t)$: $u_{LL1} = 1 \text{ p.u.}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $\varphi_1 = 0^\circ$ ■ $u_2(t) = u_3(t) = 0 \text{ kV}$ ■ Die stromeinprägend geregelte Spannungsquelle, falls anwendbar, nimmt dauerhaft $-0,2 P_n$ ab

7.2.9 Inselnetzbildung mit 2 DUT und aktiver Last

HGÜ-Systeme	Erzeugungsanlagen
<ul style="list-style-type: none"> ■ Schalterstellungen <ul style="list-style-type: none"> - S1: geschlossen (entspricht $S_k'' = 13 \text{ GVA}$) - $t = 1,0 \text{ s}$: Öffnung des Schalters - S2, S3, S4: geöffnet - S5: geschlossen - S6: geschlossen ■ $u_1(t)$: $U_{LL1} = 400 \text{ kV}$, $f_1 = 50 \text{ Hz}$, $\varphi_1 = 0^\circ$ ■ $u_2(t) = u_3(t) = 0 \text{ kV}$ ■ Die stromeinprägend geregelte Spannungsquelle speist jeweils dauerhaft 200 MW ein 	

7.2.10 Änderung der Netzimpedanz mit 2 parallelen DUT

HGÜ-Systeme	Erzeugungsanlagen
<ul style="list-style-type: none"> ■ Schalterstellungen ■ Schalterstellungen <ul style="list-style-type: none"> - S1: geschlossen - $t = 1,0$ s: Öffnung des Schalters (Änderung S_k von 20 GVA auf 5 GVA) - S2: geschlossen - $t = 3,0$ s: Öffnung des Schalters (Änderung S_k von 5 GVA auf 2 GVA) - S3: geschlossen - S4: geschlossen - S5, S6: geöffnet ■ $u_1(t): U_{LL1} = 400$ kV, $f_1 = 50$ Hz, $\varphi_1 = 0^\circ$ ■ $u_2(t) = u_3(t) = 0$ kV 	

7.3 Referenzverhalten

7.3.1 Vorgehensweise

Die Anforderungen und Nachweiskriterien für dynamisches Frequenz-Wirkleistungsverhalten und dynamische Spannungsregelung ohne Blindstromvorgabe müssen den Ergebnissen der Netzstudien des relevanten Netzbetreibers Rechnung tragen und dabei die Anforderungen aus VDE-AR-N 4131 [1], 10.1.4 und 10.1.9.2 erfüllen. Weiterhin sollen die folgenden Grundprinzipien bei der Methodikwahl Berücksichtigung finden:

- Die netzstabilisierende Wirkung der Anlagen-Regelung ist sichergestellt.
- Die vorgeschlagenen Prüfkriterien für den Nachweis
 - sind insbesondere auf die VSC-MMC Technologie abgestimmt, schreiben aber kein konkretes Regelungskonzept vor.
 - beinhalten dementsprechend keine Vorschriften für deren technische Umsetzung.

Die Anforderungen an HGÜ-Systeme zu spannungseinprägendem Verhalten mit inhärenter Bereitstellung von Augenblicksleistung können auf Momentanwert-Signale übertragen werden, die z.B. durch EMT-Netzberechnung, HIL-Berechnung oder Messungen im Feld bereit gestellt worden sind. Der Nachweis kann sinnvollerweise anhand von Zeitverläufen von Augenblickswerten (z.B. Augenblickstrombetrag) sowie von Signalen, die über einen Zeitraum bestimmt werden müssen (z.B. Wirkleistung und Blindleistung), erfolgen.

Beispielhaft sei hier ein möglicher Ablaufplan skizziert:

1. Mit einem generischen Modell des DUT und einem für den DUT geeigneten Netzäquivalent, so wie geeigneten Referenz-Szenarien erzeugt der relevante Netzbetreiber ein Referenzverhalten. Der relevante Netzbetreiber übergibt dieses Netzäquivalent, die Referenz-Szenarien und das Referenzverhalten dem Netzanschlussnehmer.
2. Der relevante Netzbetreiber wird eines der folgenden Verfahren zur Erstellung des Referenzverhaltens auswählen.
 1. Die vorläufige Nachbildung des DUT entspricht der tatsächlichen Topologie (z.B. VSC-MMC). Die Details werden unter Abschnitt 7.3.2.1.1 beschrieben.
 2. Die vorläufige Nachbildung des DUT erfolgt mit einer impedanzbehafteten Spannungsquelle mit geregelter Winkelnachführung. Die Details werden unter Abschnitt 7.3.2.1.2 beschrieben.
3. Den Unterschieden zwischen der konkreten und detaillierten herstellereinspezifischen Regelung des DUT und dem vereinfachten Referenzverhalten (ideale Spannungsquelle, generisches VSC-MMC Modell) wird Rechnung getragen, indem Grenz-Zeitverläufe definiert werden, welche die Referenz-Zeitverläufe einhüllen. Diese Grenz-Zeitverläufe werden im Folgenden als „Einhüllende“ bezeichnet. Die Details werden unter Abschnitt 7.3.2.2 beschrieben. Für das spannungseinprägende Verhalten ist insbesondere das initiale Verhalten bis zum ersten Peak relevant.
4. Konformitätsnachweis und Prüfung des Konformitätsnachweises: Der Anschlussnehmer legt dem relevanten Netzbetreiber die Simulationsergebnisse zur Prüfung vor. Bei der Durchführung des

Konformitätsnachweises erkannte Abweichungen werden vom Anschlussnehmer im Konformitätsbericht vermerkt und begründet. Da insbesondere die netzstabilisierende Wirkung der Anlagen-Regelung sichergestellt sein muss, müssen erkannte Abweichungen nicht automatisch zu einer Verletzung der Netzanschlussrichtlinien führen und werden im Nachgang mit dem relevanten Netzbetreiber ebenso wie auffälliges Verhalten wie z.B. schwach gedämpfte Schwingungen besprochen. Zur Prüfung des Konformitätsnachweises übergibt der Netzanschlussnehmer ein digitales Modell der realen Anlage des DUT, welches in dem durch den relevanten Netzbetreiber übergebenen Netzäquivalent mit den übergebenen Szenarien arbeitet.

7.3.2 Erzeugungsanlagen und HGÜ-Systeme mit Möglichkeiten des Energieausgleichs aus unabhängigen Energiequellen

7.3.2.1 Referenz-Zeitverläufe

Zur Darstellung des Referenzverhaltens müssen für jedes Szenario EMT-Netzberechnungen im Zeitbereich durchgeführt werden. Um die zukünftige Anlage in den Simulationen zu berücksichtigen sind mindestens die nachfolgend erläuterten Verfahren zulässig.

7.3.2.1.1 Simulationsmodell mit tatsächlicher Topologie

Bei diesem Verfahren kommt ein Simulationsmodell zur Anwendung, welches die reale Topologie der neuen Anlage beinhaltet. Bei der Regelung wird auf für solche Topologien typische Regelkreise zurückgegriffen. Die mit diesem Modell erhaltenen Ergebnisse können in Bezug auf eine reale Anlage dementsprechend nur indikativ sein.

Die folgenden Aussagen in diesem Abschnitt beziehen sich ausschließlich auf Stromrichter vom Typ Modular Multilevel Converter (MMC). Für die Nachbildung eines solchen Stromrichters können zwei Fälle unterschieden werden:

- MMC mit konstanter Modulspannung: Ein solches Stromrichtermodell ist hinsichtlich der verfügbaren Energiereserve der Stromrichter idealisiert. Reale Stromrichter verfügen demgegenüber nur über eine bestimmte Energiereserve (siehe auch Abschnitt 6.2).
- MMC mit variabler Modulspannung: Ein solches Stromrichtermodell berücksichtigt den tatsächlichen Energiehaushalt zwischen der AC und der DC-Seite des MMC.

Unsicherheiten in relevanten Parametern der neuen Anlage können durch eine Sensitivitätsanalyse berücksichtigt werden. Die Sättigung der Transformatoren wird dabei nicht nachgebildet.

Die in diesem Abschnitt dargestellten Ergebnisse wurden auf Basis eines MMC mit einer Nennleistung von 1GW und einer Kurzschlussspannung von 25% und anschließend auf Basis einer impedanzbehafteten Ersatzspannungsquelle mit vergleichbarer Impedanz generiert.

7.3.2.1.2 Simulationsmodell mit impedanzbehafteter Spannungsquelle

Bei diesem Verfahren kommt als Simulationsmodell eine dreiphasige Spannungsquelle mit festem Spannungsvektor (Amplitude und Winkel) hinter einer ohmsch-induktiven Impedanz zur Anwendung (siehe Abbildung 3). Bei diesem Verfahren wird das reale MMC Verhalten nur eingeschränkt wiedergegeben. Konkret wird die Energiebilanz zwischen den beiden Anschlussseiten einer HGÜ-Kopfstation mit diesem Simulationsmodell nicht berücksichtigt. Dieses Modell wird im Folgenden als impedanzbehaftete Spannungsquelle bezeichnet.

Das DUT soll nach einer Netzstörung unverzüglich ein netzstabilisierendes Verhalten aufweisen. Netzstabilisierend ist das Verhalten, wenn die durch die Netzänderung hervorgerufenen Ströme an den Anschlussklemmen des DUT der Netzänderung entgegenwirken. Eine impedanzbehaftete Spannungsquelle zeigt ein solches netzstabilisierendes Verhalten. Sie erfüllt die Anforderung entsprechend VDE-AR-N 4131:

„Die kontinuierliche Spannungseinprägung muss auf Abweichungen in der Spannung mit einem Strom reagieren, der der Spannungsänderung in Betrag und Phasenlage entgegenwirkt“.

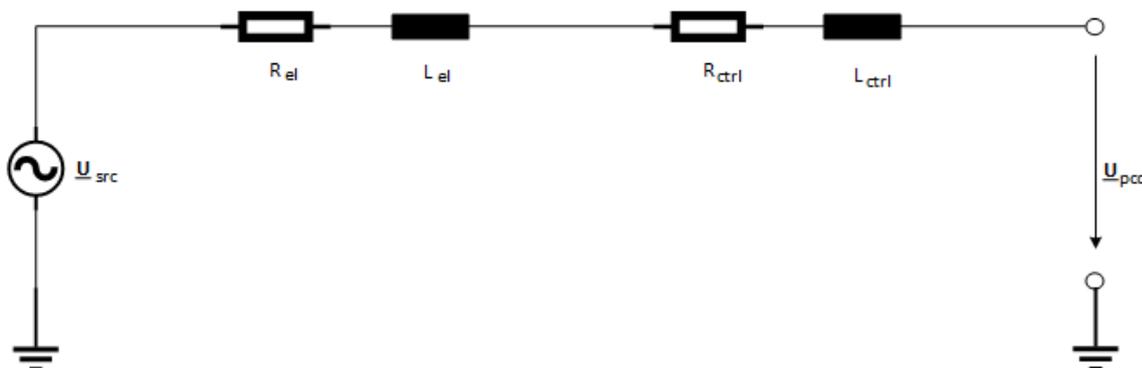


Abbildung 3: Strangersatzschaltung für die vereinfachte Modellierung eines spannungseinprägenden Umrichters mit einem physikalischen (R_{el} , L_{el}) und einem regelungstechnischen (R_{ctrl} , L_{ctrl}) Anteil

Der ausgetauschte Augenblicksstrom und die daraus resultierende Wirk- und Blindleistung werden in diesem Fall unverzüglich verändert. Die Dynamik dieser unverzügerten Reaktion kann mit folgender Übertragungsfunktion beschrieben werden: $G(s) = \frac{I(s)}{U(s)} = \frac{1}{1 + \frac{L_{el} + L_{ctrl}}{R_{el} + R_{ctrl}} s}$

Die Gesamtimpedanz des DUT kann mittels des regelungstechnischen Anteils parametrisiert werden und wird durch den physikalischen Anteil nach unten beschränkt. Der physikalische Teil liegt typischerweise zwischen 20 und 30%¹ und ist größtenteils induktiv.

In einem Simulationsmodell müssen Amplitude und Phasenlage der Quellspannung zunächst so gewählt werden, dass der gewünschte stationäre Arbeitspunkt erreicht wird. Nach der Netzänderung muss die Phasenlage und ggf. auch die Amplitude der Quellspannung verzögert der Spannung am Netzanschlusspunkt nachgeführt werden. Dadurch werden die ausgetauschte Wirk- und Blindleistung langsam auf den vorherigen Arbeitspunkt zurückgeführt. Die Geschwindigkeit der Winkelnachführung ist dabei ausschlaggebend für die bereit gestellte Energiemenge.

Im Weiteren folgt die Parametrierung der impedanzbehafteten Spannungsquelle entsprechend der spezifizierten Szenarien des relevanten Netzbetreibers. Hierzu wird die regelungstechnische Impedanz angepasst, sodass die instantane Reaktion, d.h. im Zeitraum bis zum ersten Peak der betrachteten Größen, den Simulationsergebnissen des relevanten Netzbetreibers gemäß Abschnitt 7.3.1 Punkt 1 ausreichend genau entspricht. Der abgeleitete Parametersatz muss für alle Szenarien gültig sein.

¹ Normiert auf $\frac{U_{Netz,nenn}^2}{S_{DUT}}$, mit $U_{Netz,Nenn}$ = Netzennspannung und S_{DUT} = Nennscheinleistung des DUT

Mit dem so erhaltenen Parametersatz für das Simulationsmodell der impedanzbehafteten Spannungsquelle können für alle Szenarien Referenzverläufe erzeugt werden. Nichtlineare Effekte wie z.B. die Sättigung der Transformatoren werden dabei nicht nachgebildet.

7.3.2.2 Nachweiskriterien

7.3.2.2.1 Einleitung

Um individuellen Einschränkungen der verwendeten Netzmodelle und Modelle des DUT sowie der unterschiedlichen Regelungsalgorithmen und -systeme in den DUT Rechnung zu tragen, werden Grenz-Zeitverläufe definiert, welche die Referenz-Zeitverläufe einhüllen.

Für die Einhüllenden gelten nachfolgende Grundanforderungen:

1. Die Einhüllenden weisen ein Toleranzband von höchstens 50% und mindestens 5% auf
 1. In Richtung der gewünschten Änderung wird ein großes abklingendes Toleranzband zugelassen
 2. In Gegenrichtung der gewünschten Änderung wird ein kleines abklingendes Toleranzband zugelassen
2. Die Einhüllenden hängen nur von Momentanwert-Signalen ab und können so direkt zur Laufzeit bestimmt werden
 1. Trigger-Zeitpunkte für die Berechnung der Einhüllenden können aus den Messdaten bestimmt werden
 2. Die gewünschte Änderungsrichtung – z.B. bei einem Wirkleistungsanstieg – kann aus den Messdaten bestimmt werden
3. Die Bewertung ist sowohl in Echtzeit sowie als Nachverarbeitungsschritt möglich

Die Einhüllenden können folgendermaßen aus den Referenz-Zeitverläufen abgeleitet werden:

- Bewertung des Zeitverlaufs bis zum ersten Peak und des eingeschwungenen Zustands
- Bewertung anhand von kontinuierlichen Einhüllenden auf Basis des Simulationsmodells mit tatsächlicher Topologie
- Bewertung anhand abgeleiteter Einhüllenden auf Basis des Simulationsmodells der impedanzbehafteten Spannungsquelle

Welche der nachfolgend beschriebenen Methoden in einem Projekt zur Anwendung kommt, bleibt dem/den relevanten Netzbetreiber(n) überlassen.

7.3.2.2.2 Zeitverlauf bis zum ersten Peak und des eingeschwungenen Zustands

Beschreibung und Beispiel

Bei dieser Methode werden die Referenz-Zeitverläufe idealisiert mit der impedanzbehafteten Spannungsquelle erstellt. Eine reale Anlage kann das gezeigte Systemverhalten deshalb möglicherweise nicht erreichen.

Zur Beurteilung der augenblicklichen Reaktion des DUT und dessen netzstabilisierender Wirkung ist der Zeitraum bis zum ersten Peak in den Referenz-Zeitverläufen entscheidend. Danach kommt es lediglich auf stabile (asymptotisch) abklingende Ausgleichsvorgänge an. Deshalb werden die Hüllkurven nach dem ersten Peak unterbrochen. Es wird die Einhaltung eines Toleranzbands nach der zulässigen Ausgleichzeit geprüft.

Der erste Peak wird mittels Differentiation und/oder Maximalwertbildung nach dem Trigger-Ereignis bestimmt (vgl. Abbildung 4).

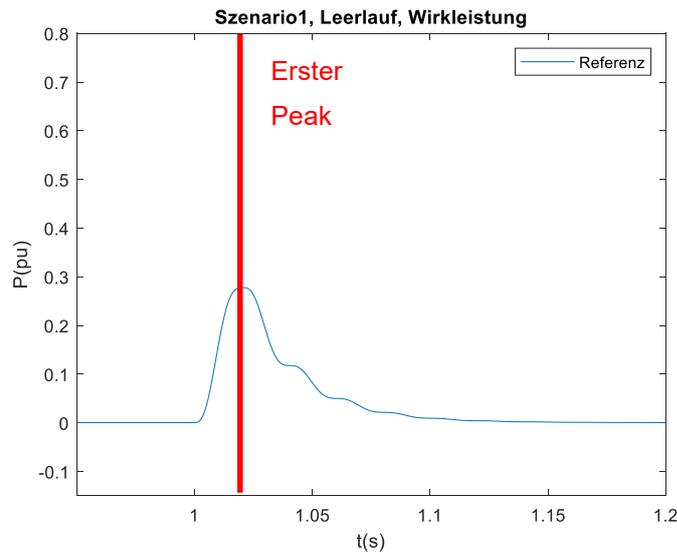


Abbildung 4: Referenzverlauf für einen Winkelsprung um -10°

Das Toleranzband ergibt sich wie folgt (vgl. Abbildung 5):

$$\Delta_p(t, t_{hold}) = \begin{cases} 0.05 & , t < t_{hold} \\ 0.5 & t_{hold} \leq t \leq t_{peak} \end{cases}$$

$$\Delta_m(t, t_{hold}) = \begin{cases} 0.05 & , t < t_{hold} \\ 0.1 & t_{hold} \leq t \leq t_{peak} \end{cases}$$

t_{hold} ist der Triggerzeitpunkt

t_{peak} ist der Zeit beim ersten Peak

Falls das Referenzsignal nach dem Auslösen des Triggerereignisses das stationäre Toleranzband nicht verlässt (z.B. wenn die ideale Reaktion „keine Reaktion“ ist), dann wird das stationäre Totband, $\pm 5\%$, über die komplette Simulationsdauer beibehalten.

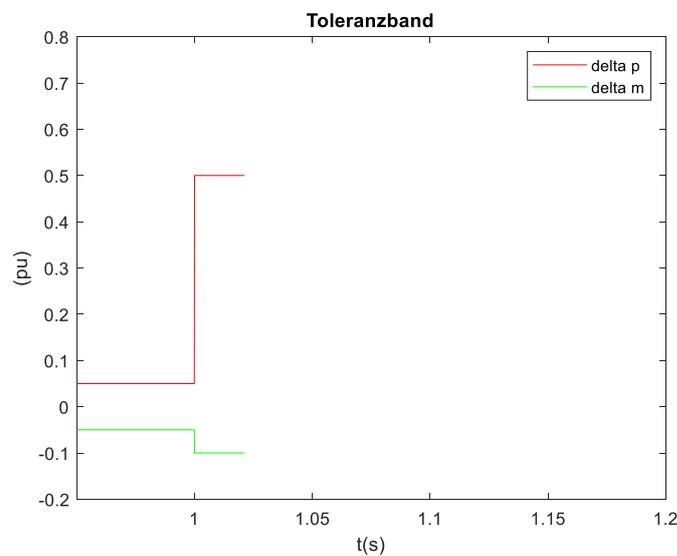


Abbildung 5: Toleranzband

Dieses Toleranzband wird zum Referenz-Zeitverlauf addiert (vgl. Abbildung 6).

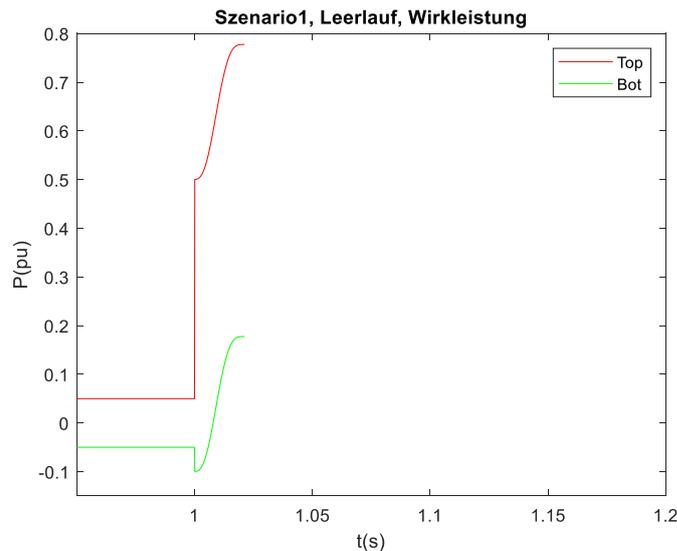


Abbildung 6: Einhüllende bis zum ersten Peak für einen Winkelsprung um -10°

Vorteile

Die Methode ist unabhängig von einer konkreten Regelung, indem sie nur auf die wesentlichen Eigenschaften der Anlage Bezug nimmt. Sie ist leicht umsetzbar und mit geringem Aufwand verbunden.

Nachteile

Eine geschlossene automatische Auswertung des gesamten Ausgleichsvorgangs ist nicht möglich. Dennoch sind mit der initialen Reaktion des Systems und dem Erreichen eines stabilen stationären Zustands die wesentlichen Kriterien für eine automatische Auswertung vorhanden.

7.3.2.2.3 Kontinuierliche Einhüllende auf Basis des Simulationsmodells mit tatsächlicher Topologie

Beschreibung

Der Konformitätsnachweis mit MMC Regelung wird hier anhand von Beispielverläufen gezeigt, die unter der idealen Annahme einer konstanten Modulspannung und damit unbeschränkter Energiereserve ermittelt wurden. Eine reale Anlage kann das gezeigte Systemverhalten deshalb möglicherweise nicht erreichen. Weiterhin werden Beispielverläufe mit einer begrenzten Energiereserve gezeigt, welche den Einfluss der Energiereserve darstellen.

Die Einhüllenden werden für die gesamte Simulationszeit um den Referenz-Zeitverlauf gebildet.

Falls das Zeitverhalten des DUT die Einhüllenden nach dem ersten Peak verlässt, kann der Test trotzdem als bestanden bewertet werden, sofern das Zeitverhalten abklingend ist.

Es wird eine Delta-Funktion erzeugt:

1. Mit dem Auslösen des Triggerereignisses wird ein Timer gestartet
2. Mittels Differentiation wird nach dem Triggerereignis die Richtung der Änderung bestimmt

3. Das Toleranzband ergibt sich wie folgt:

$$\Delta_p(t, t_{hold}, t_1) = \begin{cases} 0.05 & , t < t_{hold} \\ 0.45 \cdot \left(1 - \frac{t - t_{hold}}{t_1}\right) + 0.05 & , t_{hold} \leq t \leq t_1 + t_{hold} \\ 0.05 & , t_1 + t_{hold} < t \end{cases}$$

$$\Delta_m(t, t_{hold}, t_2) = \begin{cases} 0.05 & , t < t_{hold} \\ 0.05 \cdot \left(1 - \frac{t - t_{hold}}{t_2}\right) + 0.05 & , t_{hold} \leq t \leq t_2 + t_{hold} \\ 0.05 & , t_2 + t_{hold} < t \end{cases}$$

t_{hold} ist der Triggerzeitpunkt

t_1 ist die Abklingdauer des Toleranzbandes in Richtung der gewünschten Änderung

t_2 ist die Abklingdauer des Toleranzbandes in die Gegenrichtung der gewünschten Änderung

Die notwendige Abklingdauer des Toleranzbandes ergibt sich aus den Simulationen des relevanten Netzbetreibers.

4. Falls das Referenzsignal nach dem Auslösen des Triggerereignisses das stationäre Toleranzband nicht verlässt (z.B. wenn die ideale Reaktion „keine Reaktion“ ist), dann wird das stationäre Totband über die komplette Simulationsdauer beibehalten.

Vorteile

Diese Methode ermöglicht eine geschlossene automatische Auswertung des gesamten Ausgleichsvorgangs.

Nachteile

Diese Methode bildet nach der instantanen Reaktion auch Regelungseffekte wie z.B. Schwingungen nach. Die Qualität des Nachweisverfahren ist abhängig von der Qualität der modellierten Regelung. Sie enthält Regelungseffekte von einer besonderen Regelung und kann nicht verallgemeinert werden. Die Beispiele im Anhang A zeigen, dass sogar für sehr ähnliche Regelungsverfahren, die Hüllkurven häufig nach dem ersten Peak verlassen werden. Das lässt einen hohen Aufwand für detaillierte Klärungen zwischen relevantem Netzbetreiber und Anschlussnehmer erwarten.

Beispiel

Die Erstellung der Hüllkurven wird hier beispielhaft anhand eines Winkelsprunges um -10° für die Wirkleistung dargestellt.

Im vorliegenden Beispiel wurde eine Abklingzeit gleich 150 ms (t_1) für Δ_p und gleich 15 ms (t_2) für Δ_m gewählt (vgl. Abbildung 7). Die Delta-Funktion in Kombination mit dem Referenzverlauf (vgl. Abbildung 8) ergibt die resultierende Hüllkurve für den ganzen Zeitbereich (vgl. Abbildung 9).

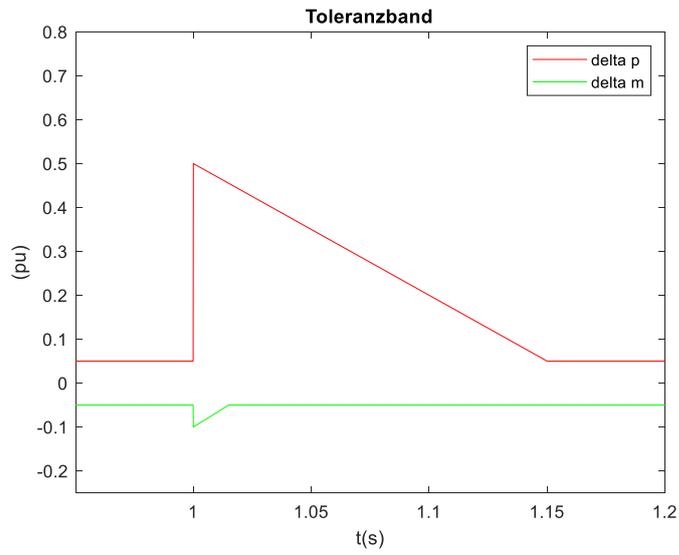


Abbildung 7: Toleranzband

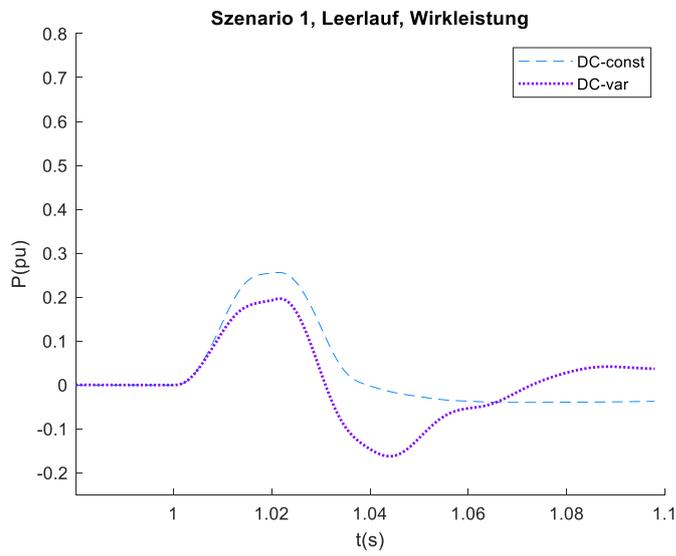


Abbildung 8: Referenzverlauf für einen Winkelsprung um -10°

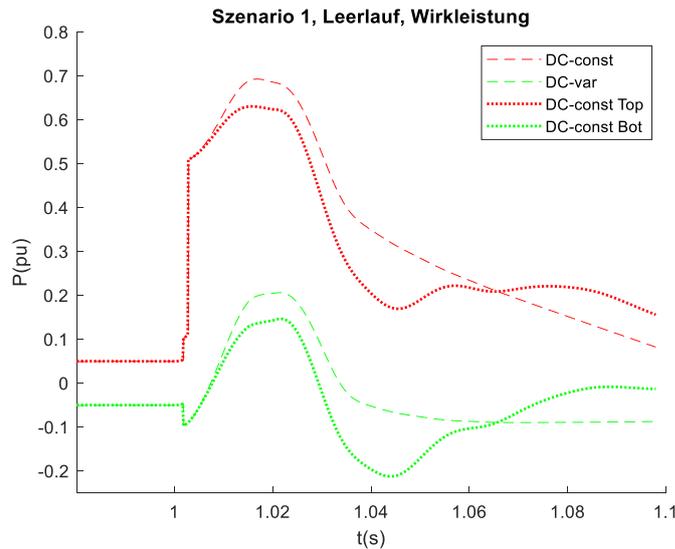


Abbildung 9: Resultierende Hüllkurve für einen Winkelsprung um -10°

7.3.2.2.4 Abgeleitete Einhüllende auf Basis des Simulationsmodells der impedanzbehafteten Spannungsquelle

Beschreibung und Beispiel

Bei dieser Methode werden die Referenz-Zeitverläufe idealisiert mit der impedanzbehafteten Spannungsquelle erstellt. Eine reale Anlage kann das gezeigte Systemverhalten deshalb möglicher Weise nicht erreichen.

Dieses Simulationsmodell liefert eine gute Annäherung eines netzdienlichen Verhalten bis zum ersten Peak. Es kann aber Regelungseffekte wie z.B. Schwingungen nicht nachbilden. Die Erstellung von Einhüllenden mit der Summation einer Delta-Funktion auf die Referenzzeitverlauf ist deswegen nur bis zum ersten Peak ausreichend. Wenn die Einhüllende für die gesamte Simulationszeit gelten sollen, ist es notwendig, kompliziertere Methoden zu verwenden. Die hier vorgestellte Methode ist eine davon.

Die erwartete Antwort der verschiedenen Signale, d.h. Wirk-, Blindleistung auf Augenblickstrombetrag, können für alle Szenarien in folgende Kategorien eingeteilt werden:

- Spitze
- Sprung
- Rampe

Spitze

Der erste Peak (Strom oder Leistung) wird als Ausgangspunkt herangezogen. Danach muss ein Toleranzband eingehalten werden. Die Toleranz wird wie folgt ermittelt:

- Die Toleranz kann proportional zu der netzdienlichen Reaktion sein.
- Die Toleranz muss, verglichen mit der netzdienlichen Reaktion, Zeit versetzt sein.

Die Dauer bis zum Erreichen des Peakwerts wird als Zeitverzug gewählt. Abbildung 10 illustriert die Methode.

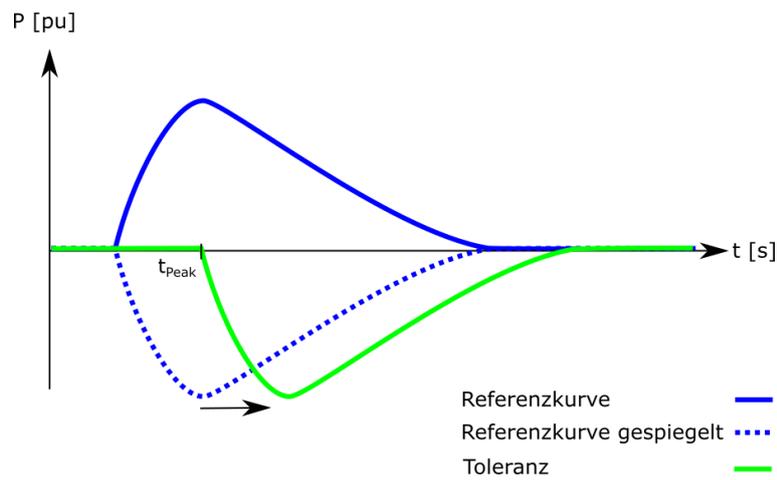


Abbildung 10 Einhüllende aus der gespiegelten Referenzkurve, Prinzip

Nach dem ersten Peak übernimmt die gespiegelte und zeitversetzte Kurve die untere Grenze des Toleranzbandes. Abbildung 11 illustriert diese Methode für das Szenario 1.

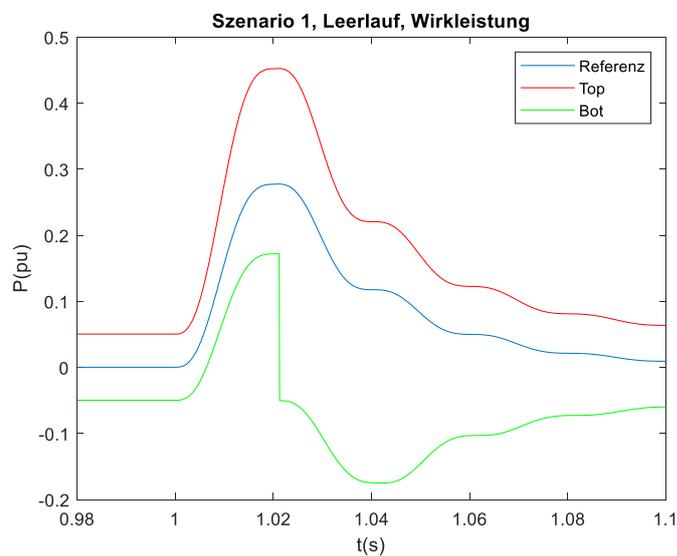


Abbildung 11 Einhüllende aus der gespiegelten Referenzkurve, Illustration

Um ebenfalls die Fälle mit einer konstanten Referenzkurve abzudecken, sollte eine stationäre Toleranz (Delta Funktion) addiert werden, z.B. $\pm 5\%$.

Wie Abbildung 12 zeigt, berücksichtigt diese Methode die Effekte einer realen Regelung.

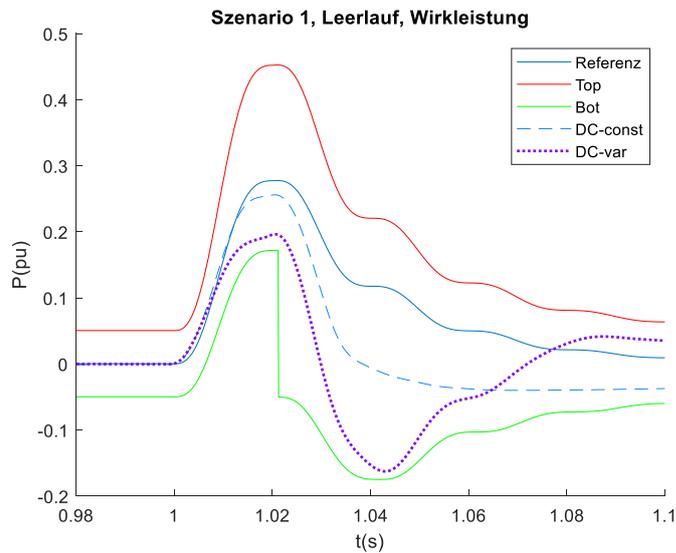


Abbildung 12 Einhüllende aus der gespiegelten Referenzkurve, Vergleich mit realen Regelungen

Durch die Spiegelung der Referenzkurve ist die Netzdienlichkeit abgesichert und es wird genug Freiheit eingeräumt, um eine reale Regelung zu entwickeln.

Sprung

Für den Sprung wird die Toleranz wie im Abschnitt 7.3.2.2.3 definiert (vgl. Abbildung 13).

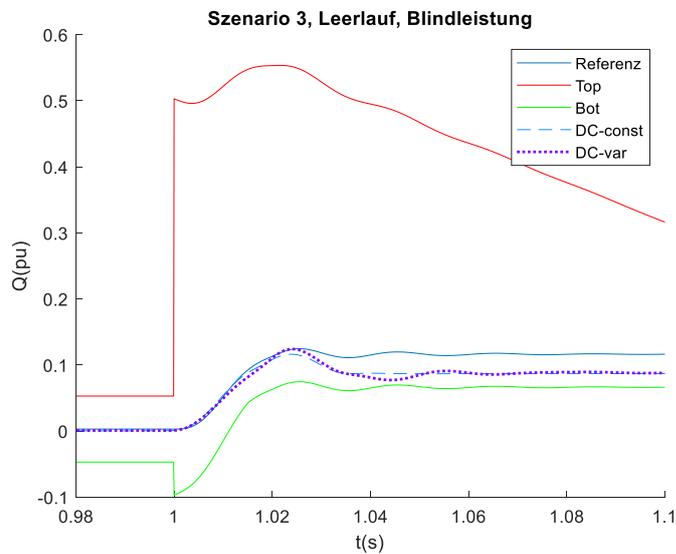


Abbildung 13 Alternative Einhüllende für Kurven ähnlich zur Sprungfunktion

Rampen

Bei Rampen, wie z.B. für die Wirkleistung bei Szenario 2 „Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung“, wird der Referenz-Zeitverlauf um die Rampe gespiegelt.

Im ersten Schritt wird die Rampe abgeschätzt.

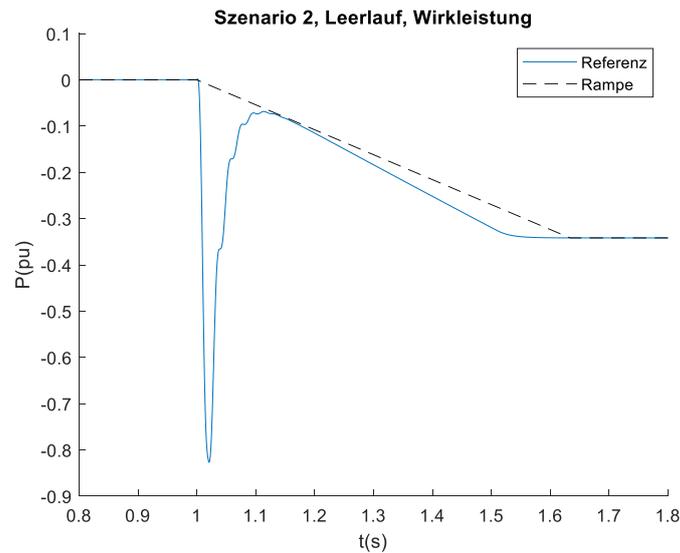


Abbildung 14 Referenzkurve der Wirkleistung bei Szenario 2, Rampe

Dann wird die Kurve nach dem gleichen Prinzip wie bei dem Fall Spitze gespiegelt. Wie Abbildung 15 zeigt, berücksichtigt diese Methode die Effekte einer realen Regelung.

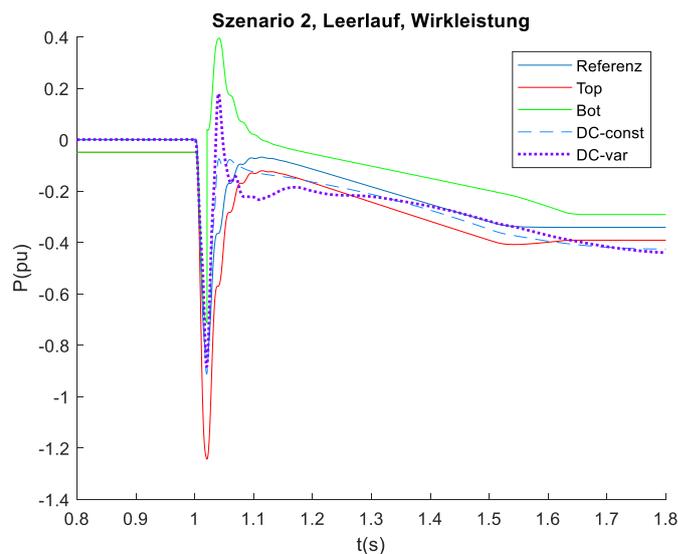


Abbildung 15 Einhüllende aus der gespiegelten Referenzkurve um eine Rampe

Vorteile

Die Methode ist unabhängig von einer konkreten Regelung, indem sie nur auf die wesentlichen Eigenschaften der Anlage Bezug nimmt. Außerdem ermöglicht sie eine geschlossene automatische Auswertung des gesamten Ausgleichsvorgangs.

Nachteile

Bei dieser Methode ist es notwendig das erwartete Verhalten für jede Kurve zu definieren, bevor die Einhüllenden definiert werden können.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Dieser FNN-Hinweis beschreibt Verfahren und Methoden zur Ermittlung von Anforderungen sowie Nachweiskriterien für dynamisches Frequenz-Wirkleistungsverhalten und dynamische Spannungsregelung. Damit wurde die Vorgabe der VDE-AR-N 4131 bezüglich des spannungseinprägenden Verhaltens zukünftiger HGÜ- und Erzeugungseinheiten funktional konkretisiert. Mit der Beschreibung der entsprechenden Funktionen werden den Entwicklern und Herstellern solcher Einheiten eindeutige, technologie neutrale Hinweise für die Entwicklung und Realisierung entsprechender technischer Lösungen gegeben.

Die technologie neutralen Hinweise umfassen das Vorgehen von den Systemplanungs-Studien des relevanten Netzbetreibers über die Umsetzung der Studienergebnisse in ein vereinfachtes Netzequivalent mit bestimmten Betriebszenarien bis zum Konformitätsnachweis.

Während die beschriebenen Anforderungen und Nachweiskriterien für spannungseinprägendes Verhalten im Grundprinzip allgemeingültig sind, erfordert deren praktische Anwendung die Berücksichtigung weiterer Gegebenheiten, die in dem vorliegenden Dokument noch nicht behandelt worden sind. Dazu zählen:

- Die Wechselwirkung von HGÜ-Systemen mit leistungselektronisch angebundenen Erzeugungsanlagen
- Die Wechselwirkung zwischen Erzeugungsanlagen unterschiedlicher Hersteller
- Die Wechselwirkung zwischen HGÜ-Systemen unterschiedlicher Hersteller
- Berücksichtigung von Resonanzstellen des Drehstromnetzes bei der Spezifikation der Anforderungen und den Nachweisverfahren
- Optimierung sich gegenseitig beeinflussender Regelungsfunktionen
- Das Anlagenverhalten von HGÜ- bzw. Erzeugungseinheiten bei Erreichen der Anlagen-Bemessungsgrenzen hinsichtlich Strömen, Spannung und/oder Energie

Da diese Gegebenheiten die Möglichkeiten spannungseinprägenden Verhaltens einschränken, sollte ihnen bei der Auslegung des Energiesystems und der Spezifikation des DUT Systemverhaltens, Rechnung getragen werden.

9 Literaturverzeichnis

1. VDE-AR-N 4131 Anwendungsregel:2019-03, Technische Regeln für den Anschluss von HGÜ-Systemen und über HGÜ-Systeme angeschlossene Erzeugungsanlagen (TAR HGÜ)
2. MIGRATE Abschlussbericht
3. 4-ÜNB Projekt Systemeigenschaften Umrichter-basierter Erzeugung (SUE)

A. Anhang

A.I. Nachweisverfahren – Anwendungsspezifische Hinweise

A.I.A. Gefordertes DUT-Verhalten für Bewertung auf spannungseinprägendes Regelungsverhalten (High-Level-Regelungsanforderungen)

Für die Durchführung der Testszenarien ist in der Regelung des DUT eine vereinfachte Sollwertberechnung (Statik) zu realisieren. Es gelten folgende Bezugspfeile

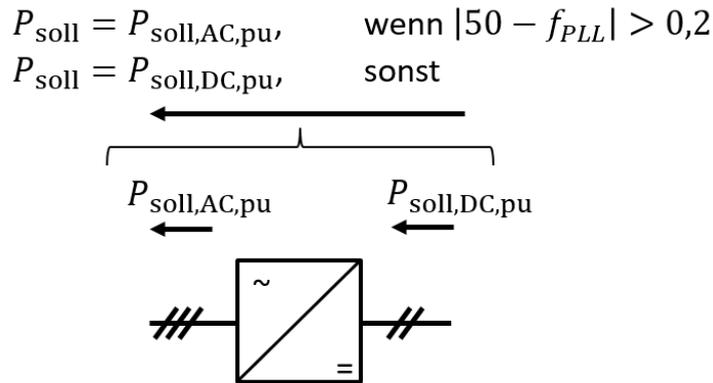


Abbildung 16: Bezugspfeile des DUT (in Pfeilrichtung positiv)

P_{soll} ist die Sollwirkleistung, die nach Berechnung der Kennlinie von der Anlage an beiden Anlagentoren (AC und DC) umzusetzen ist. Anlageninterne Verluste werden an dieser Stelle vernachlässigt.

Beträgt die Differenz zwischen der nominellen Netzfrequenz (50 Hz) und der mittels PLL identifizierten Frequenz weniger als 0,2 Hz, wird die Sollwirkleistung in Abhängigkeit der durch die Leitwarte geforderten Referenzleistung P_{ref} sowie der DC-Statik-Kennlinie berechnet. Beträgt die Differenz mehr als 0,2 Hz, wird die Sollwirkleistung in Abhängigkeit der durch die Leitwarte geforderten Referenzleistung P_{ref} sowie der Frequenz-Statik-Kennlinie berechnet.

Alle im Folgenden angegebenen Werte sind bezogene Werte (p.u.). Dabei sind alle Spannungen U auf die AC-Netznominalspannung bzw. DC-Netznominalspannung bezogen, alle Ströme I sind auf den AC-Nennwirkstrom $I_{w,n}$ bzw. DC-Nennstrom $I_{d,n}$ bezogen, Leistung P und Blindleistung Q sind jeweils auf die Bemessungswirkleistung des jeweiligen DUTs bezogen.

Für den AC und DC Maximalstrom gelten:

$$I_{1,\text{max}} = 1,1 \cdot I_{w,n} \text{ (entspricht } \cos(\varphi) = 0,95) \text{ und } I_{d,\text{max}} = 1,1 \cdot I_{d,n}$$

Die maximale Scheinleistung auf der AC-Seite berechnet sich zu

$$S_{1,\text{max}} = |U_1| \cdot I_{1,\text{max}}$$

Mit priorisierter Blindleistung kann AC-seitig maximal folgende Wirkleistung umgesetzt werden

$$P_{1,\text{max}} = \sqrt{S_{1,\text{max}}^2 - Q_{1,\text{soll}}^2}$$

DC-seitig berechnet sich die maximal mögliche Wirkleistung wie folgt

$$P_{d,max} = |U_d| \cdot I_{d,max}$$

Es wird die minimale beider Netzanforderungen gefordert

$$P_{max} = \min (P_{1,max}, P_{d,max})$$

Die Blindleistungskennlinie lautet für das Mitsystem

$$Q_{1,soll,pu} = Q_{1,ref,pu} + (1 - |U_{1,pu}|) \cdot 2 \quad (\text{Limitiert auf } \pm S_{1,max})$$

Und für das Gegensystem

$$Q_{2,soll,pu}:$$

$$Q_{2,soll,pu} = 0, \quad \text{wenn } |U_{2,DUT,pu}| < 0,02$$

$$Q_{2,soll,pu} = (0,02 - |U_{2,DUT,pu}|) \cdot 2 \quad (\text{Limitiert auf } \pm 1)$$

Die Frequenzstatik lautet

$$P_{1,soll,pu} = P_{ref,pu} + (1 - f_{PLL,pu}) \cdot 20 \quad (\text{Limitiert auf } \pm P_{1,max})$$

Die DC-Statik lautet

$$P_{d,soll,pu} = P_{ref,pu} - (1 - U_{d,pu}) \cdot 10 \quad (\text{Limitiert auf } \pm P_{1,max})$$

Der Index *ref* bezeichnet die vorgegebene Referenzleistung, die z.B. durch eine Leitwarte vorgegeben wird. Der Index *soll* bezeichnet den Sollwert der von der Anlage umzusetzen ist.

Hinweise: In den spezifizierten Szenarien sind widersprüchliche Wirkleistungsanforderungen zwischen den beiden AC-Netzen, die durch das DUT verbunden werden, ausgeschlossen. Weiterhin ist eine Überschreitung des erlaubten Anlagenstromes aufgrund von gleichzeitiger Wirkleistungs- und Blindleistungsanforderung im Mit- und Gegensystem in den spezifizierten Szenarien ausgeschlossen.

A.I.B. Spezifikation einer stromeinprägend geregelten Last (Einspeisung)

Die geregelte Last (Einspeisung) ist auf eine Nennspannung von 400 kV und eine Bemessungsleistung von 200 MW ausgelegt.

In Abbildung 17 ist ein Ersatzschaltbild mit den Parametern des Leistungsteils und in *Abbildung 18* ein Blockschaltbild der dq-Regelung mit allen Parametern dargestellt. Für einen Abgleich sind Referenzergebnisse für einen Wirk- und Blindleistungssprung sowie für eine sprungartige Frequenzänderung in einem starren angeschlossenen Netz dargestellt.

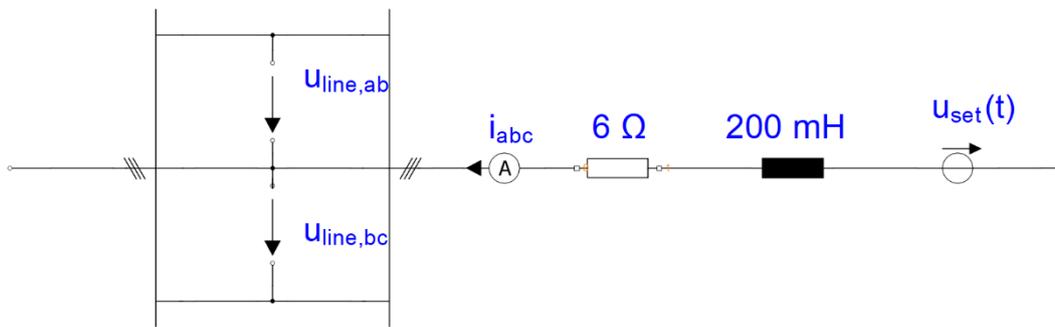


Abbildung 17: Ersatzschaltbild der geregelten Spannungsquelle

Alle Parameter sind dem Ersatzschaltbild (vgl. Abbildung 17) und dem Blockschaltbild der Regelung (vgl. Abbildung 18) zu entnehmen. Die Regelung wird mit einer konstanten Abtastzeit von 5 μ s aufgerufen.

Die verwendeten PI-Regler basieren auf folgender Formel

$$i(k) = i(k - 1) + e(k) \cdot T_{\text{sample}}$$

$$u(k) = K_p \cdot \left(e(k) + \frac{1}{T_i} \cdot i(k) \right)$$

mit

- T_{sample} : Abtastzeit der Regelung
- $I(k)$: Integralanteil zum Zeitpunkt k (aktueller Wert)
- $I(k - 1)$: Integralanteil zum Zeitpunkt $k - 1$ (letzter Wert)
- $e(k)$: Regelabweichung
- K_p : Proportionalverstärkung des PI-Reglers
- T_i : Einstellzeit des PI-Reglers
- $u(k)$: resultierende Stellgröße des PI-Reglers

Eingangsgrößen der dq-Regelung

- u_{ab} : Leiter-Leiter-Spannung zwischen Leiter a und Leiter b in Volt
- u_{bc} : Leiter-Leiter-Spannung zwischen Leiter b und Leiter c in Volt
- i_a : gemessener Strom von Leiter a in Ampere
- i_b : gemessener Strom von Leiter b in Ampere
- i_c : gemessener Strom von Leiter c in Ampere
- P_{ref} : Wirkleistungssollwert in pu
- Q_{ref} : Blindleistungssollwert in pu

Ausgangsgrößen der dq-Regelung

- $u_{\text{set},a}$: Stellspannung Phase a in Volt

- $U_{set,b}$: Stellspannung Phase b in Volt
- $U_{set,c}$: Stellspannung Phase c in Volt

Mitschnitt interner Regelungsgrößen

- f_{ist} : identifizierte Frequenz
- P_{ist} : Wirkleistungsistwert in pu
- Q_{ist} : Blindleistungsistwert in pu
- P_{ref} : Wirkleistungssollwert in pu
- Q_{ref} : Blindleistungssollwert in pu

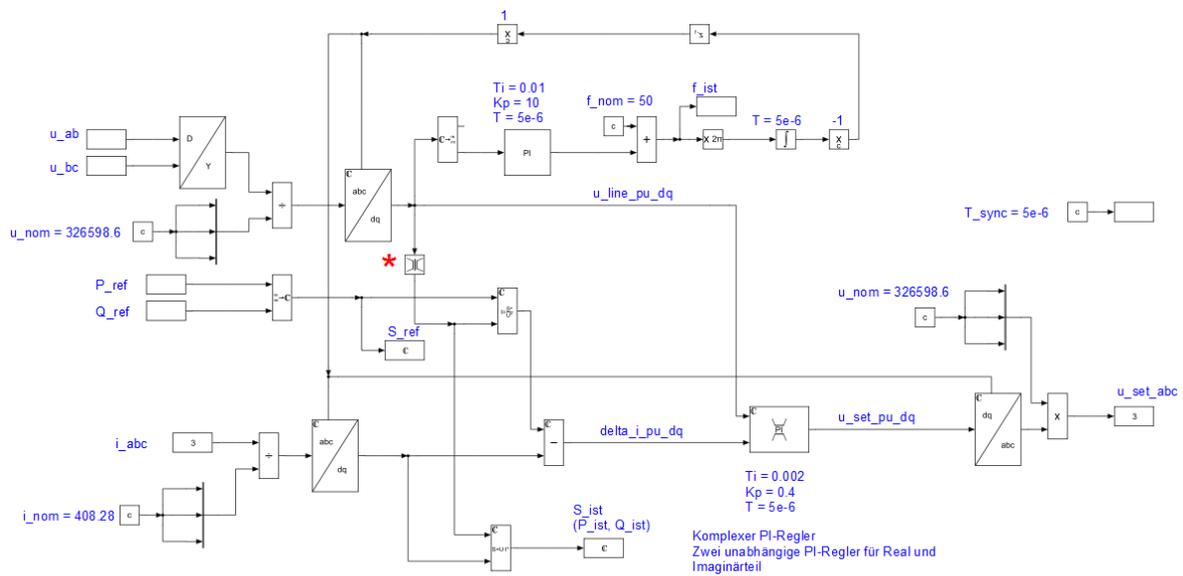


Abbildung 18: Blockschaltbild einer dq-Regelung für das Mitsystem. Der Block mit * realisiert eine betragliche Begrenzung des komplexen Eingangssignals auf einen Wert zwischen 0,01 und 2 (bei gleichbleibendem Winkel).

Der obere Eingang in die Rotationsblöcke $abc \rightarrow dq$ und $dq \rightarrow abc$ entspricht dem Rotationswinkel, mit dem die Umrechnung ausgeführt wird.

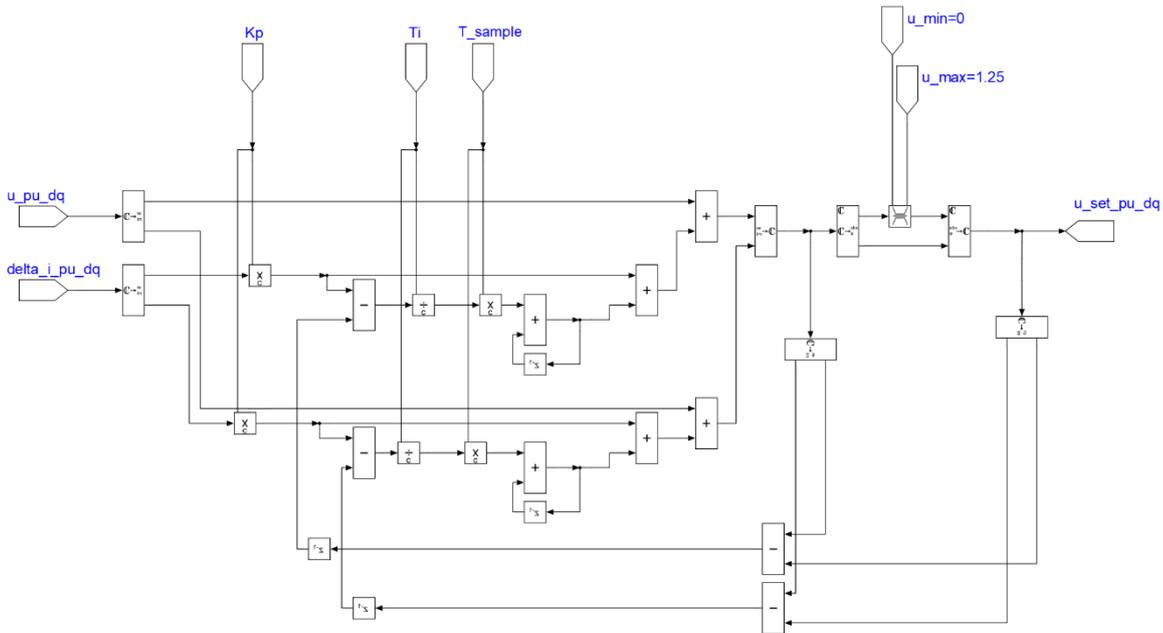


Abbildung 19: Detail des PI-Reglers mit Begrenzung der Stellspannung auf 125% der Nennspannung

Für den Abgleich wird die geregelte Spannungsquelle an ein starres und ideales 400-kV-Netz angeschlossen. Die folgenden Ereignisse sind eingestellt:

- $t = 0,6$ s: $P_{\text{ref}} = 1,0$
- $t = 0,8$ s: $Q_{\text{ref}} = 0,5$
- $t = 1,0$ s: $f=51,0$ Hz (sprungartige Frequenzänderung im starren 400-kV-Netz)

Die folgenden Simulationsergebnisse zeigen das Verhalten der geregelten Spannungsquelle. Damit lässt sich die korrekte Umsetzung der Spezifikation prüfen.

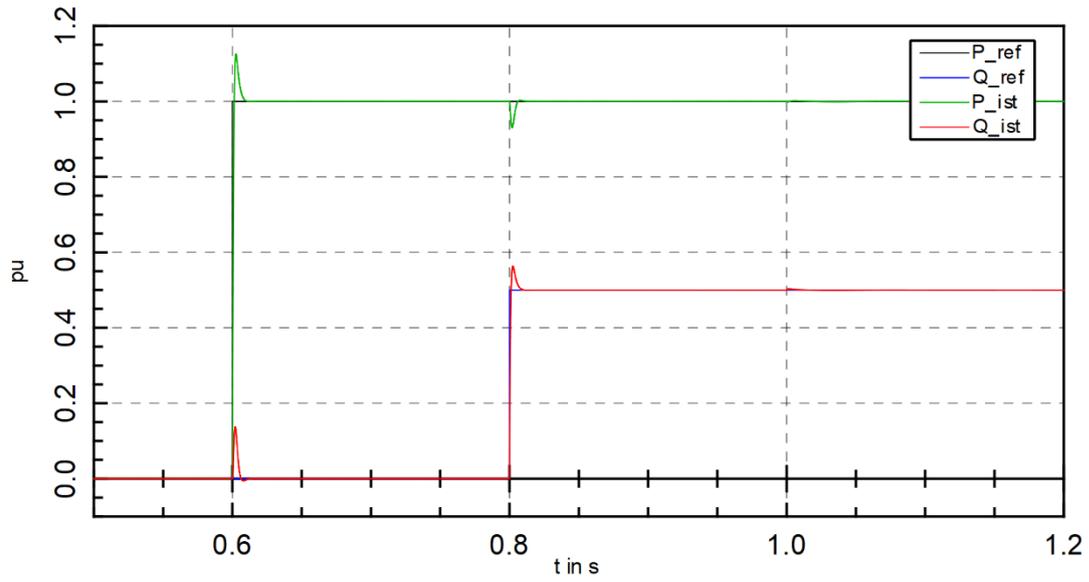


Abbildung 20: P und Q

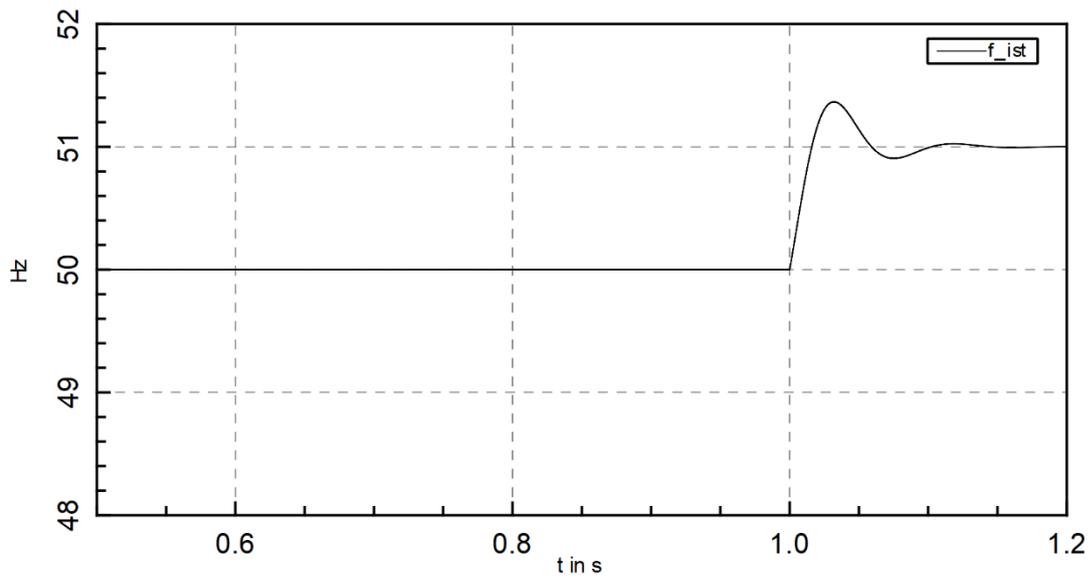


Abbildung 21: Identifizierte Frequenz

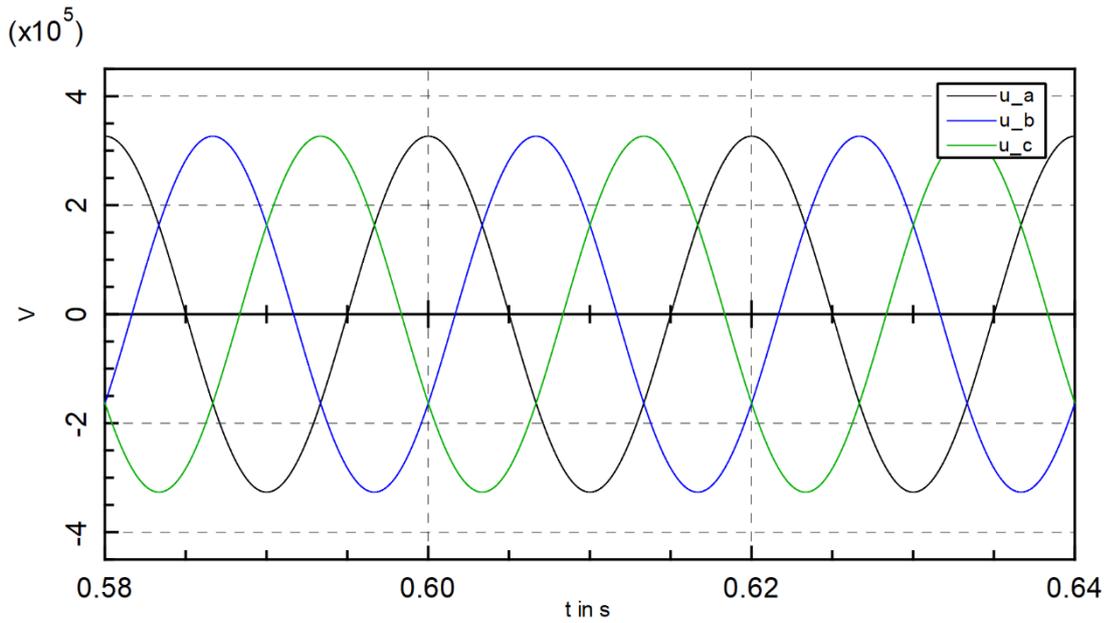


Abbildung 22: Leiter-Erde Spannungen am Anschluss der geregelten Spannungsquelle
(Messspannungen links von der Impedanz)

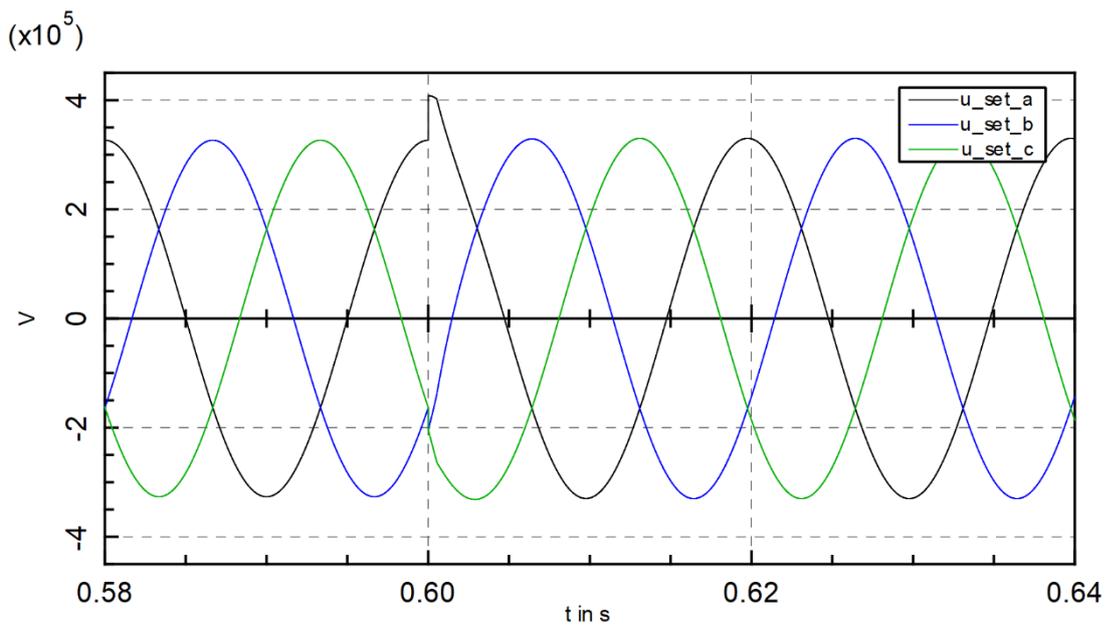


Abbildung 23: Realisierte Stellspannungen der geregelten Spannungsquelle

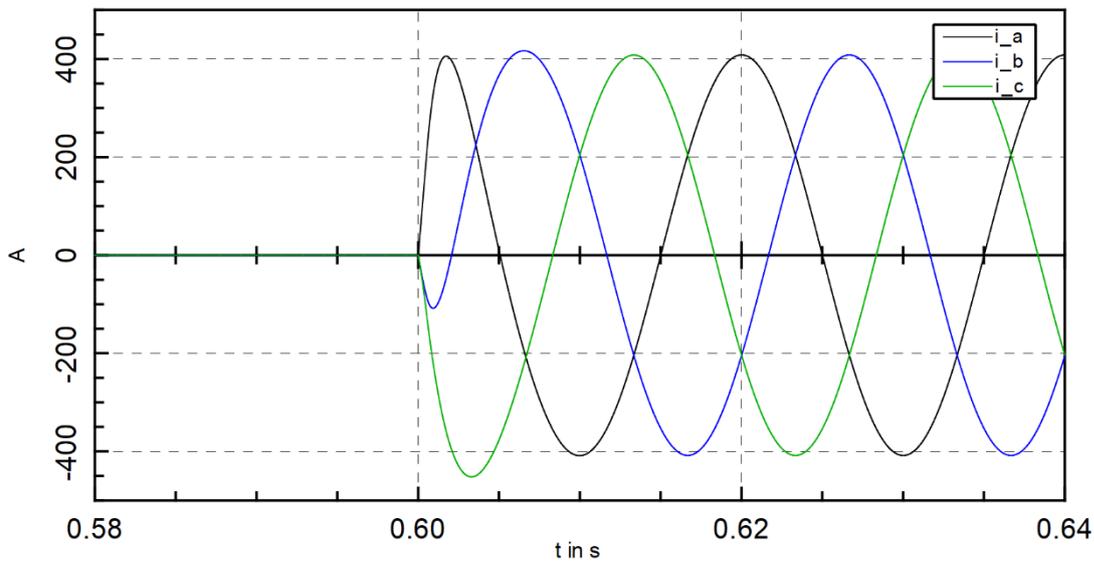


Abbildung 24: Messströme

A.I.C. Definition der Messgrößen

Für die Bewertung werden einerseits augenblickliche Messgrößen wie der augenblickliche Strombetrag sowie über einen Zeitraum ermittelte Größen wie Wirk- und Blindleistung bestimmt.

Der augenblickliche Strombetrag $|i|$ ermittelt sich auf Basis der drei Phasenströme i_a , i_b , i_c wie folgt

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}$$

$$|i| = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2}$$

Die Wirkleistung und die Blindleistung berechnen sich nach DIN EN 61400-21 Anhang C separat für das Mit- und das Gegensystem. Um die Frequenz der Netzspannung zu berücksichtigen und damit eine netzsynchrone Auswertung zu ermöglichen, wird die Berechnung der Digitalen Fourier-Transformation (DFT) mit einer Phasenregelschleife (PLL) kombiniert. Die Zeitkonstante der PLL liegt zur Entkopplung von der Zeitkonstante der DFT in der Größenordnung von 200 ms.

Die konkrete PLL bzw. deren Parametrierung wird vom relevanten Netzbetreiber vorgegeben. Der relevante Netzbetreiber kann weitere Bewertungsgrößen, deren Berechnung dieser im konkreten Projekt vorgibt, fordern.

A.II. Vergleich zwischen Nachweisverfahren

A.II.A. Einleitung

In diesem Abschnitt werden die Nachweiskriterien mit „Zeitverlauf bis zum ersten Peak und des eingeschwungenen Zustands“ und „Kontinuierliche Einhüllende auf Basis des Simulationsmodells mit tatsächlicher Topologie“ gegenübergestellt. Zusätzlich wurden die Einhüllenden für die Regelung MMC mit konstanter Modulspannung und MMC mit variabler Modulspannung dargestellt.

Die Parameter der impedanzbehafteten Spannungsquelle wurden so gewählt, dass der erste Peak des Augenblickstrombetrags die gleiche Höhe bei einem Winkelsprung um -10° im Leerlauf hat und dass das Abklingverhalten vergleichbar schnell zu den anderen Regelungen ist². Es wurden Referenzverläufe für Wirk- und Blindleistung und für den Augenblickstrombetrag erstellt.

Kurzbeschreibung der Kurvenverläufe:

- „Quelle“ ist der Referenzverlauf für die impedanzbehaftete Spannungsquelle (blau, voll)
- „DC-const“ ist der Referenzverlauf für den MMC mit konstanter Modulspannung (hell blau, gestrichen)
- „DC-var“ ist der Referenzverlauf für den MMC mit variabler Modulspannung (lila, punktiert)
- „Quelle Top“ ist die obere Einhüllende erstellt aus der impedanzbehafteten Spannungsquelle (rot, voll)
- „Quelle Bot“ ist die untere Einhüllende erstellt aus der impedanzbehafteten Spannungsquelle (grün, voll)
- „DC-const Top“ ist die obere Einhüllende erstellt aus dem MMC mit konstanter Modulspannung (rot, gestrichen)
- „DC-const Bot“ ist die untere Einhüllende erstellt aus dem MMC mit konstanter Modulspannung (grün, gestrichen)
- „DC-var Top“ ist die obere Einhüllende erstellt aus dem MMC mit variabler Modulspannung (rot, punktiert)
- „DC-var Bot“ ist die untere Einhüllende erstellt aus dem MMC mit variabler Modulspannung (grün, punktiert)

In den folgenden zwei Abschnitten erfolgt eine separate Darstellung der Einhüllenden für einen Winkelsprung um -10° und der beiden Nachweiskriterien.

Danach werden die beiden Nachweiskriterien für die anderen Szenarien verglichen.

² $L_{el}=0.3$ pu, $L_{ctrl}=R_{ctrl}=0.053$ pu, $T_{pll}=20$ ms

A.II.B. Zeitverlauf bis zum ersten Peak und des eingeschwungenen Zustands

Die Einhüllende für Wirk- und Blindleistung, sowie für den Augenblicklichen Strom (vgl. *Abbildung 25*, *Abbildung 26* und *Abbildung 27*) wird vergrößert dargestellt.

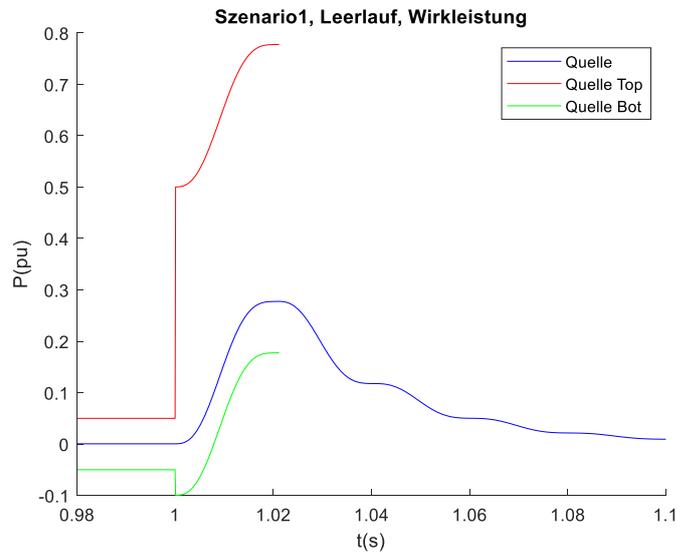


Abbildung 25: Referenzverlauf für einen Winkelsprung um -10° für die Wirkleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

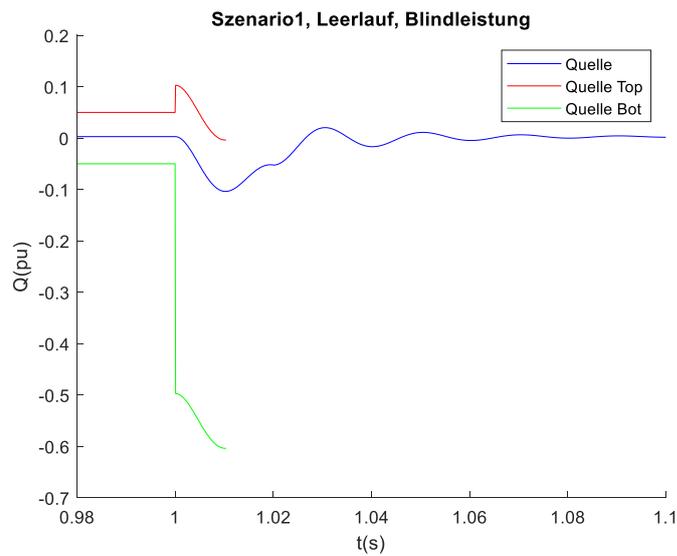


Abbildung 26: Referenzverlauf für einen Winkelsprung um -10° für die Blindleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

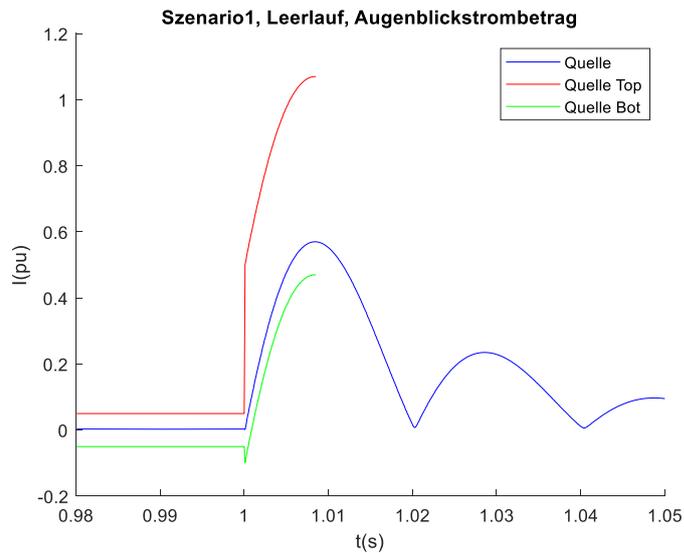


Abbildung 27: Referenzverlauf für einen Winkelsprung um -10° für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

A.II.C. Kontinuierliche Einhüllende auf Basis des Simulationsmodells mit tatsächlicher Topologie

A.II.C.1. MMC mit konstanter Modulspannung

In diesem Absatz werden zuerst die Einhüllenden, die mit der MMC mit konstanter Modulspannung erstellt wurden, für die gesamte Simulationszeit dargestellt.

Die Einhüllenden für die Wirk- und Blindleistung, sowie für den Augenblicklichen Strom (vgl. *Abbildung 28* bis *Abbildung 33*) werden mit und ohne Zoom dargestellt.

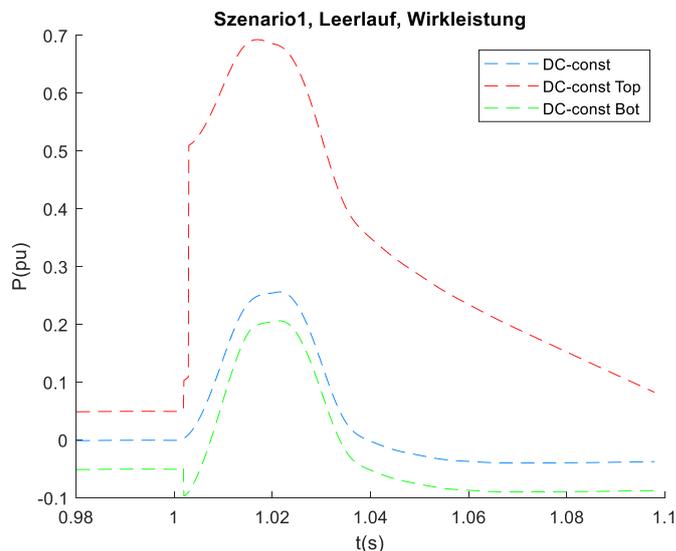


Abbildung 28: Referenzverlauf für einen Winkelsprung um -10° für die Wirkleistung, Einhüllenden des MMC mit konstanter Modulspannung (Zoom)

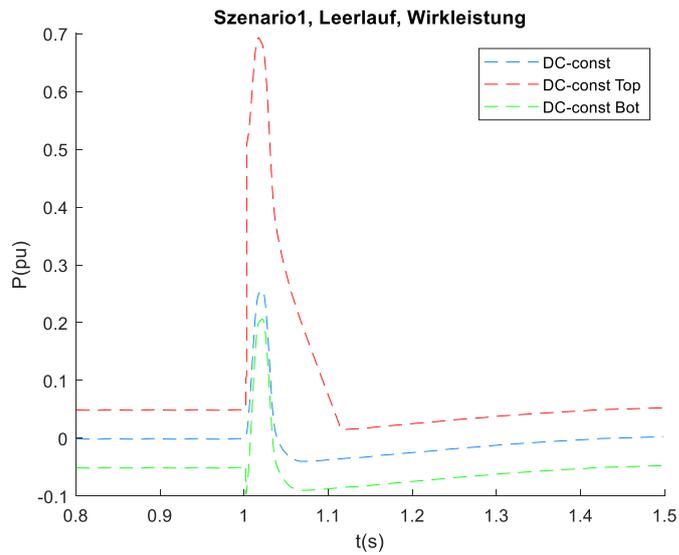


Abbildung 29: Referenzverlauf für einen Winkelsprung um -10° für die Wirkleistung, Einhüllenden des MMC mit konstanter Modulspannung

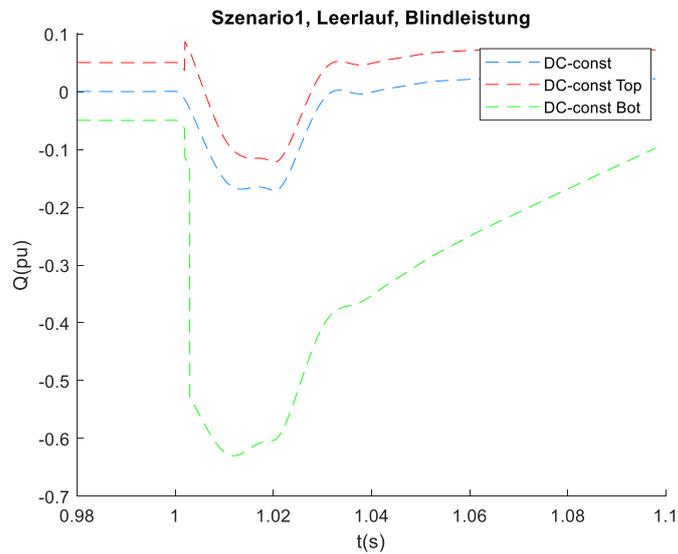


Abbildung 30: Referenzverlauf für einen Winkelsprung um -10° für die Blindleistung, Einhüllenden des MMC mit konstanter Modulspannung (Zoom)

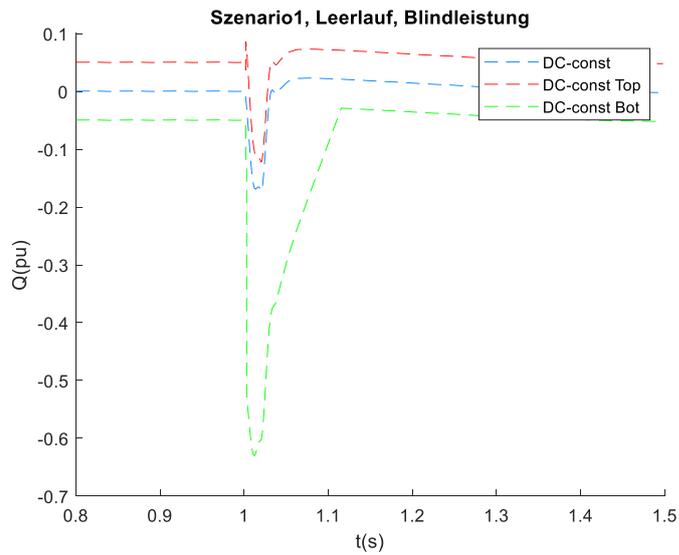


Abbildung 31: Referenzverlauf für einen Winkelsprung um -10° für die Blindleistung, Einhüllenden des MMC mit konstanter Modulspannung

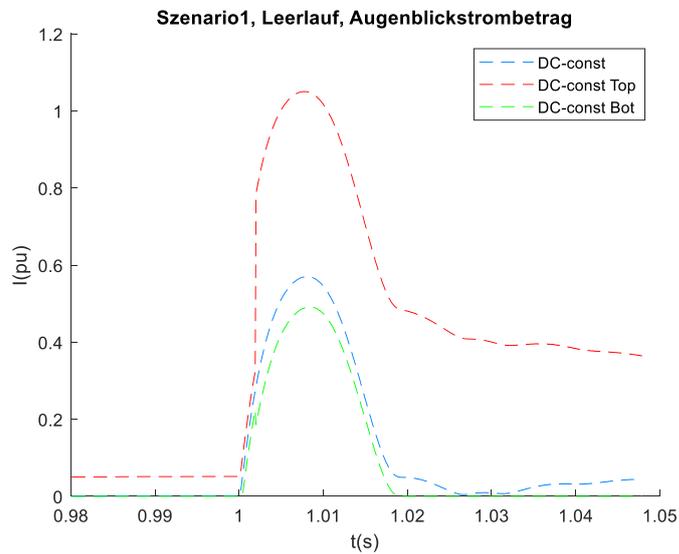


Abbildung 32: Referenzverlauf für einen Winkelsprung um -10° für den Augenblickstrombetrag, Einhüllenden des MMC mit konstanter Modulspannung (Zoom)

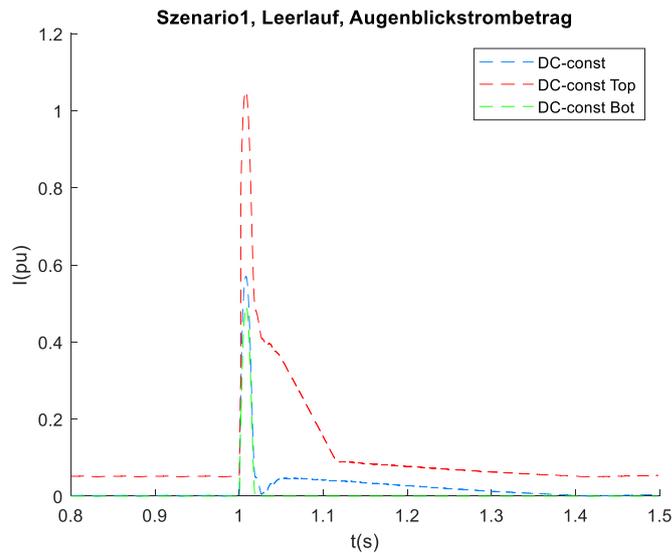


Abbildung 33: Referenzverlauf für einen Winkelsprung um -10° für den Augenblickstrombetrag, Einhüllenden des MMC mit konstanter Modulspannung

A.II.C.2. MMC mit variabler Modulspannung

Die Einhüllenden für die Wirk- und Blindleistung, sowie für den Augenblicklichen Strom (vgl. *Abbildung 34* bis *Abbildung 39*) werden mit und ohne Zoom dargestellt.

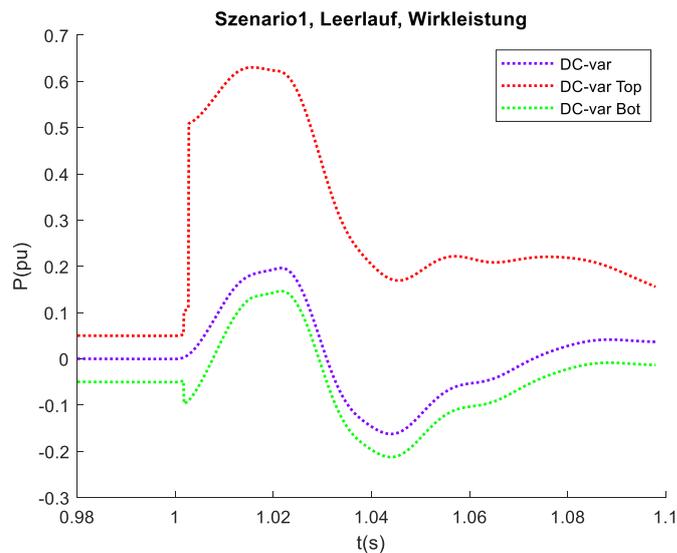


Abbildung 34: Referenzverlauf für einen Winkelsprung um -10° für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung (Zoom)

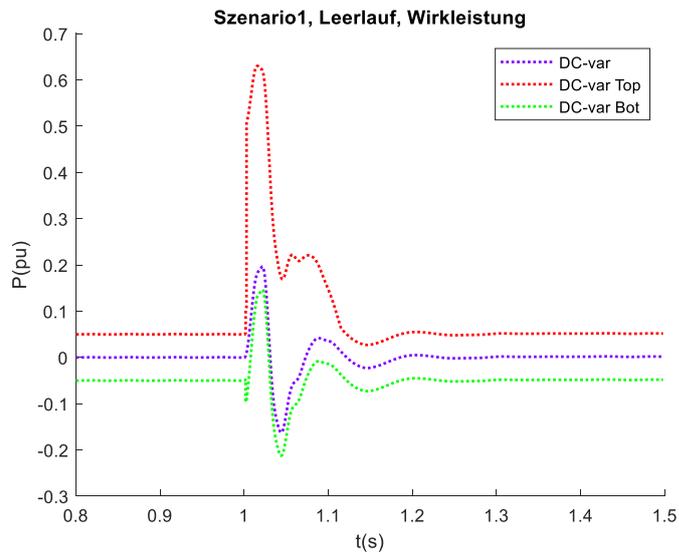


Abbildung 35: Referenzverlauf für einen Winkelsprung um -10° für die Wirkleistung, Einhüllenden des MMC mit variabler Modulspannung (Zoom)

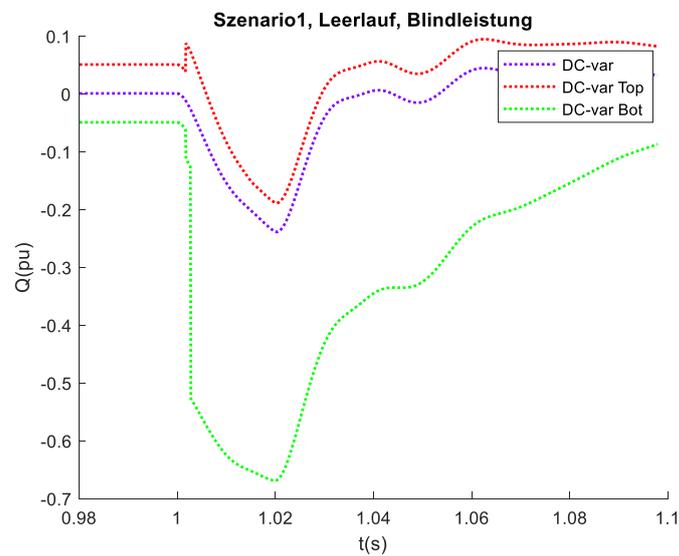


Abbildung 36: Referenzverlauf für einen Winkelsprung um -10° für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung (Zoom)

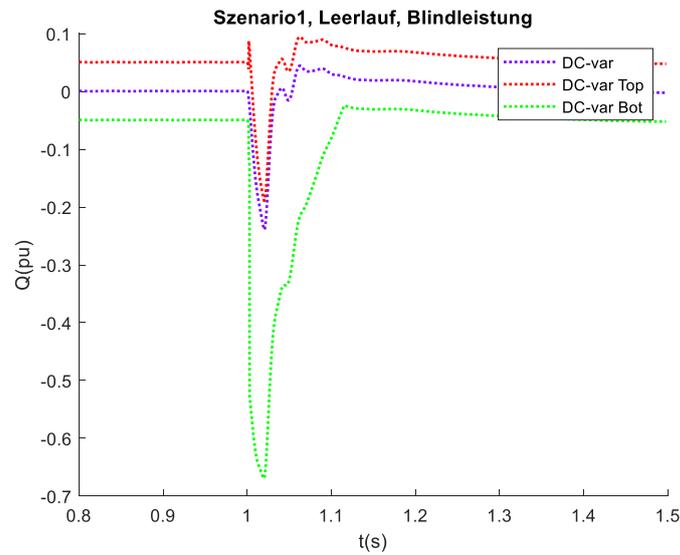


Abbildung 37: Referenzverlauf für einen Winkelsprung um -10° für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

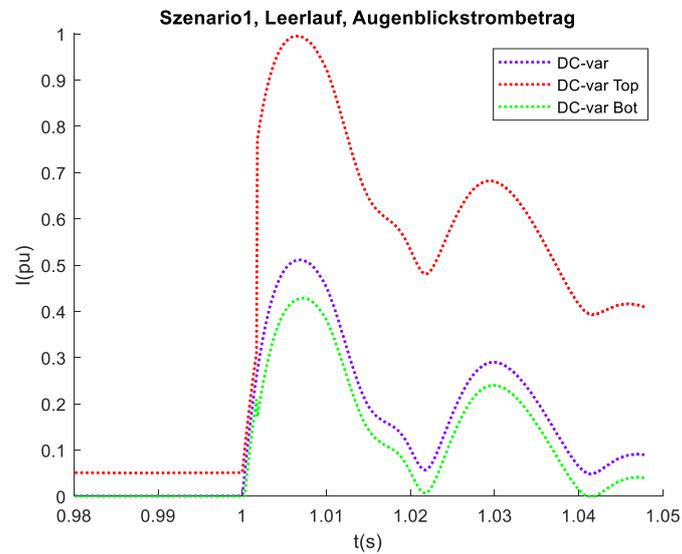


Abbildung 38: Referenzverlauf für einen Winkelsprung um -10° für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung (Zoom)

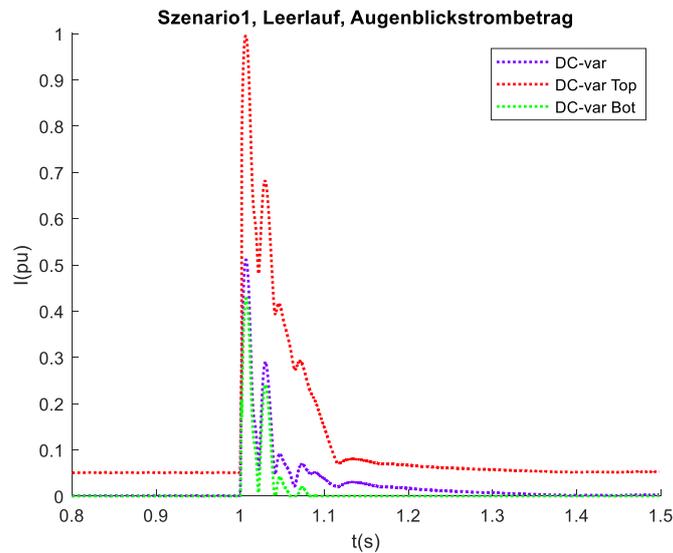


Abbildung 39: Referenzverlauf für einen Winkelsprung um -10° für den Augenblickstrombetrag, Einhüllenden aus MMC mit variabler Modulspannung

A.II.D. Vergleich

Da die Darstellung von den 9 Kurven auf einem Bild zu einem undeutlichen Ergebnis führt, werden die Bilder wie folgt organisiert:

Variante	Referenz-Zeitverläufe			Einhüllenden	
	Quelle	DC-const	DC-var	Top	Bot
1	Ja	Ja	Ja	Quelle Top	Quelle Bot
2	Ja	Ja	Ja	DC-const Top	DC-const Bot
3	Ja	Ja	Ja	DC-var Top	DC-var Bot

Tabelle 1 Bilder-Organisation

Um die Anzahl der Bilder zu begrenzen, werden nur die gezoomt Varianten gezeigt.

A.II.D.1. Winkelsprung in der Netzspannung

A.II.D.1.a. Leerlauf

Wirkleistung

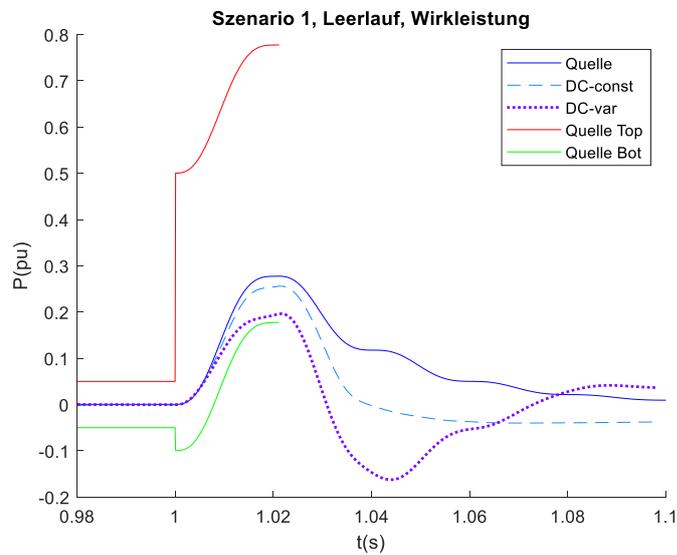


Abbildung 40: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für die Wirkleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

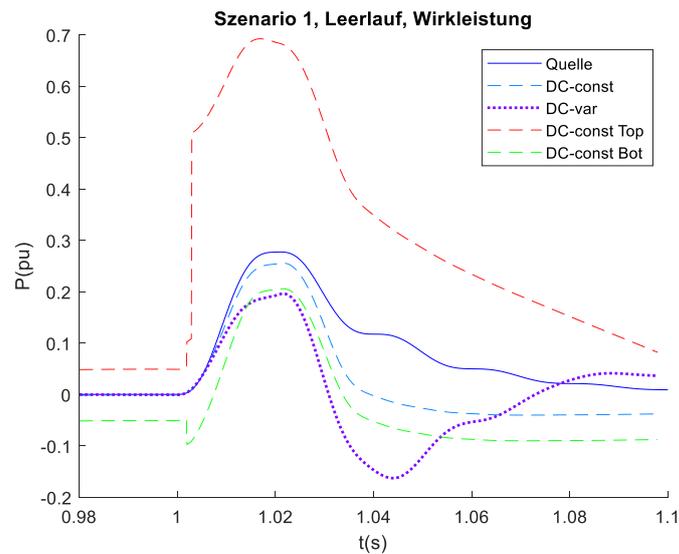


Abbildung 41: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

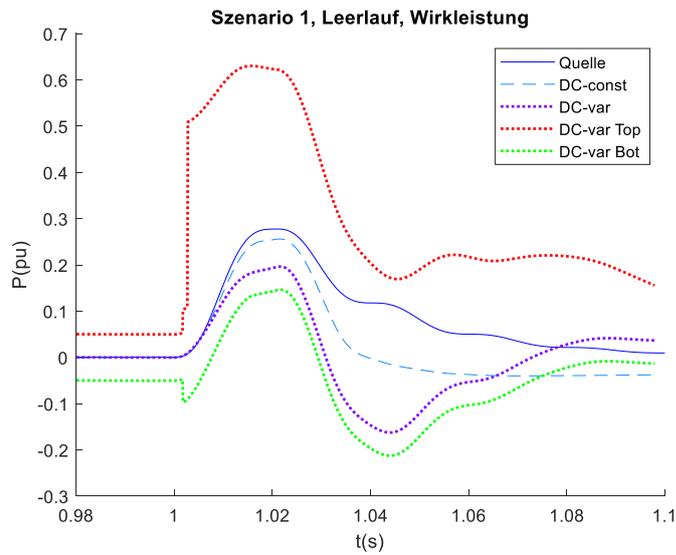


Abbildung 42: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Blindleistung

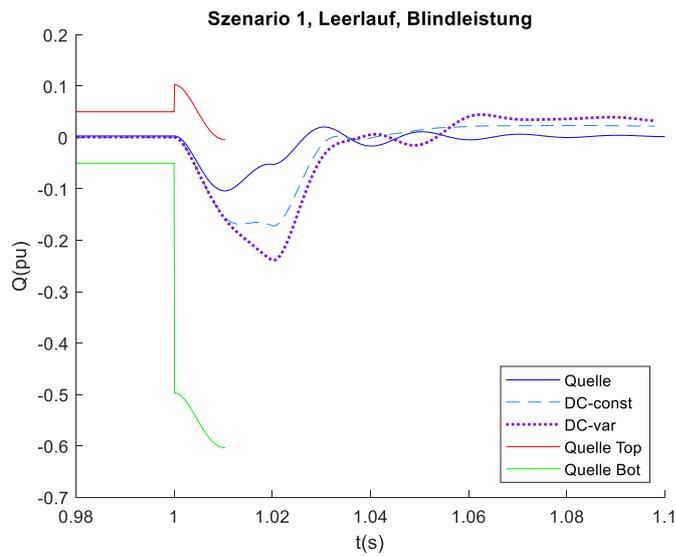


Abbildung 43: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für die Blindleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

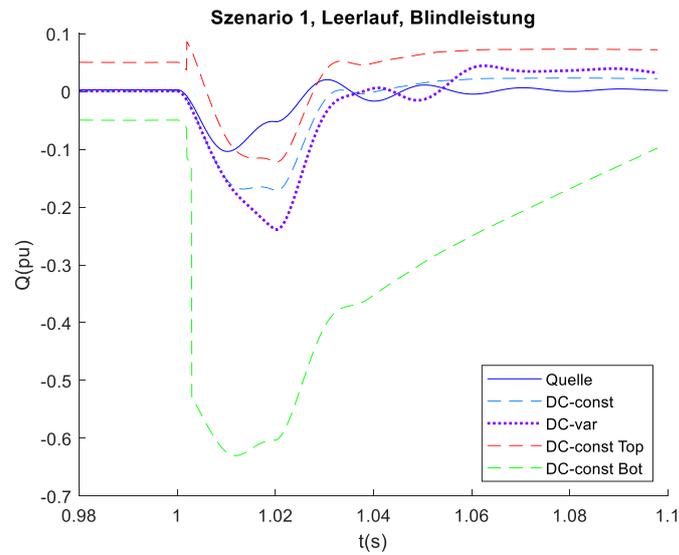


Abbildung 44: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

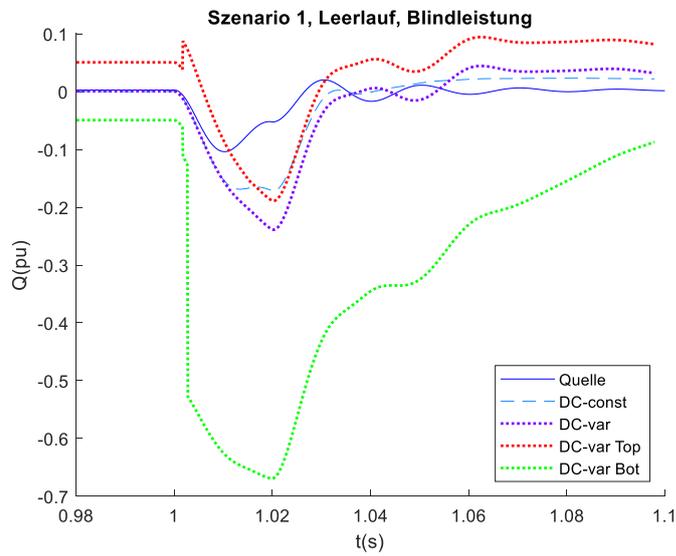


Abbildung 45: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Augenblickstrombetrag

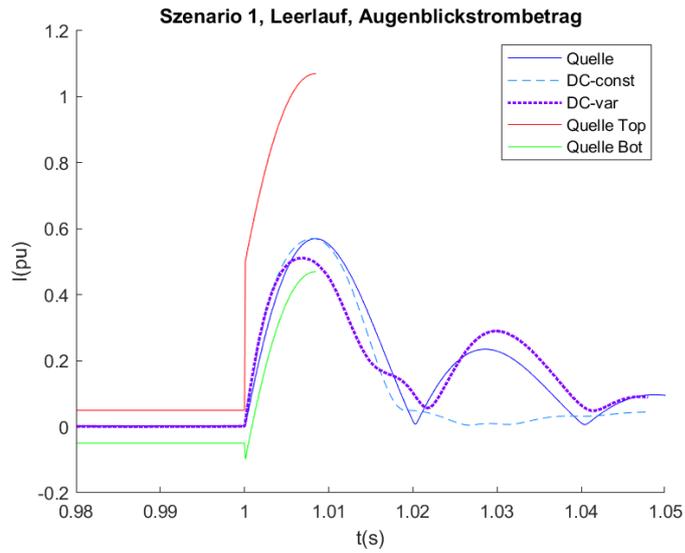


Abbildung 46: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

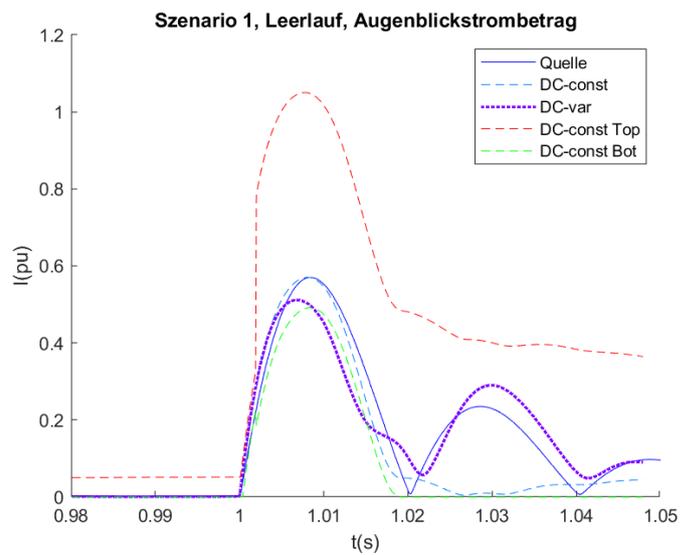


Abbildung 47: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

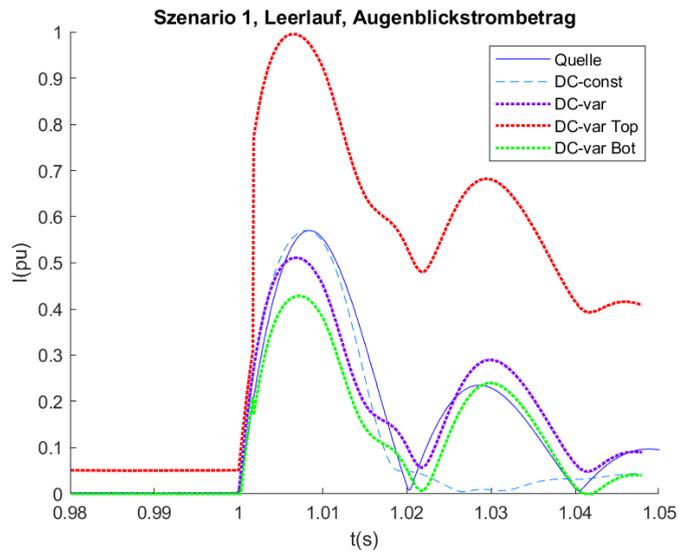


Abbildung 48: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

A.II.D.1.b. Halbnennleistung

Wirkleistung

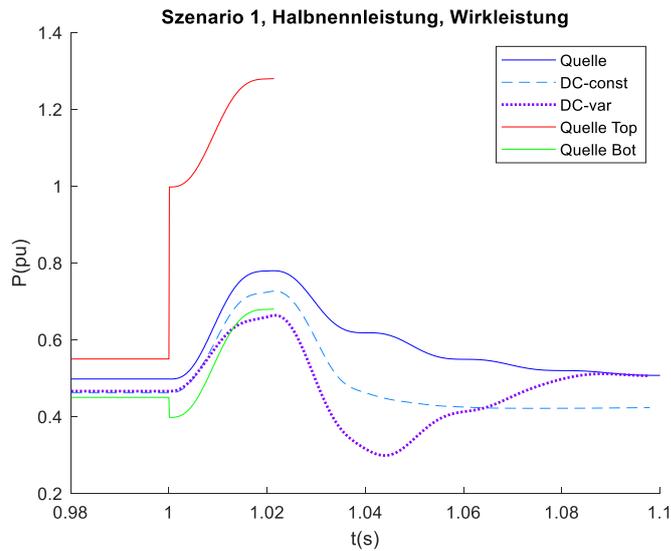


Abbildung 49: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für die Wirkleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

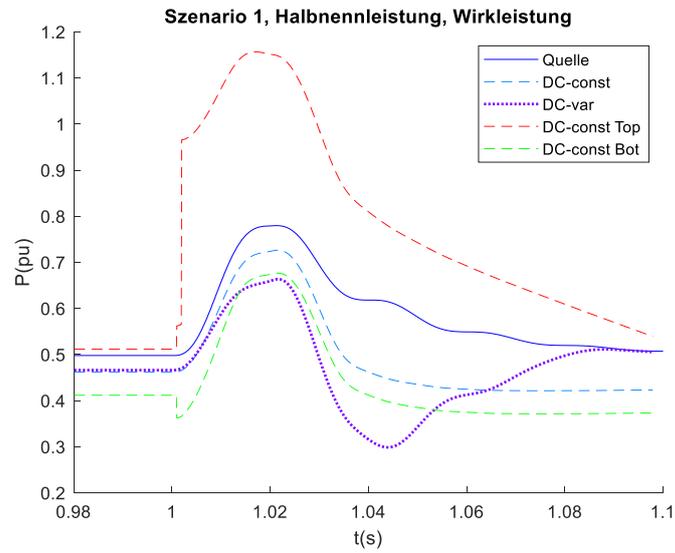


Abbildung 50: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

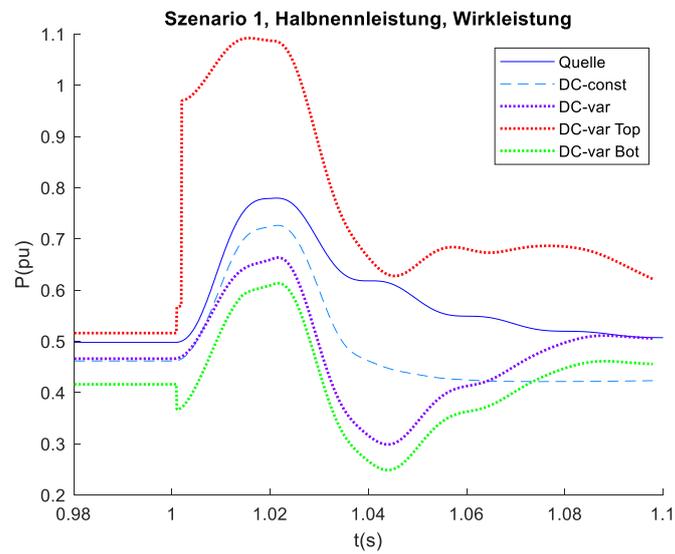


Abbildung 51: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Blindleistung

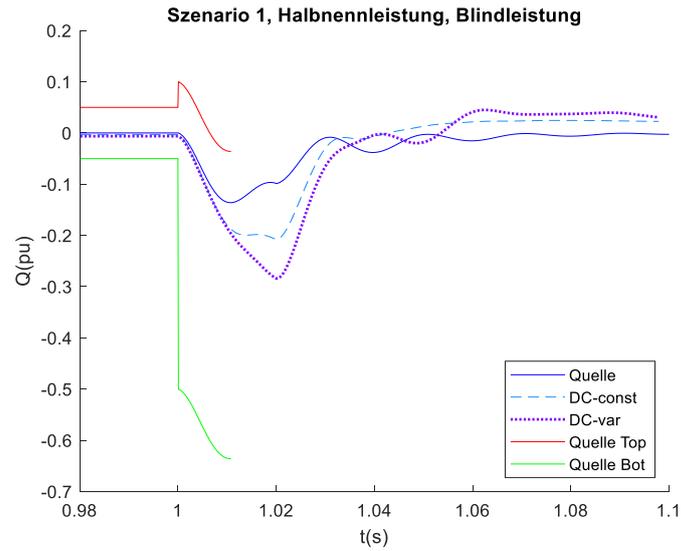


Abbildung 52: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für die Blindleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

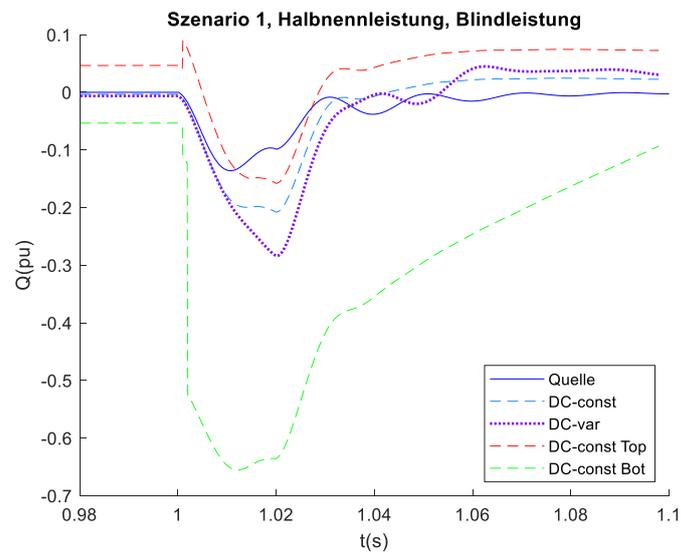


Abbildung 53: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

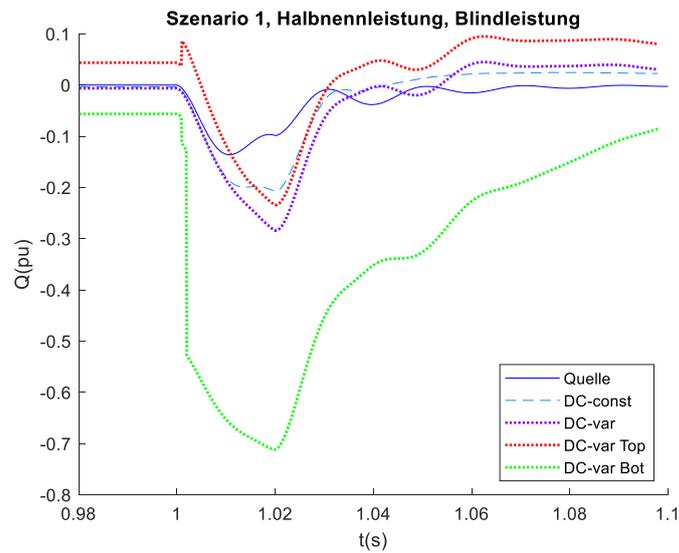


Abbildung 54: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Augenblickstrombetrag

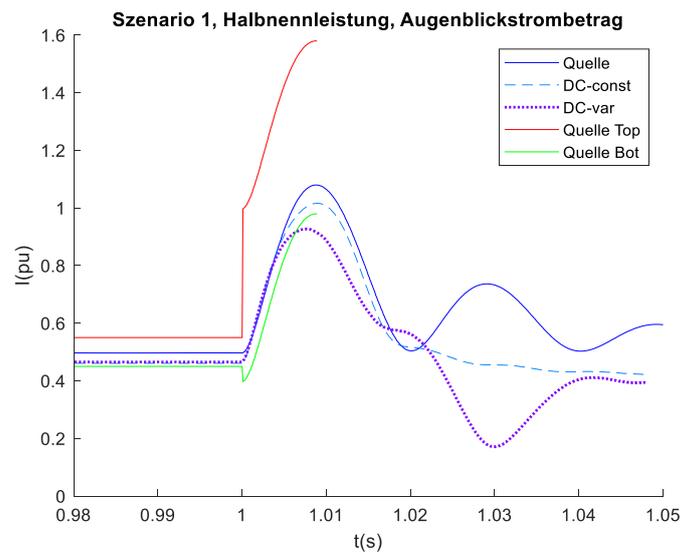


Abbildung 55: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

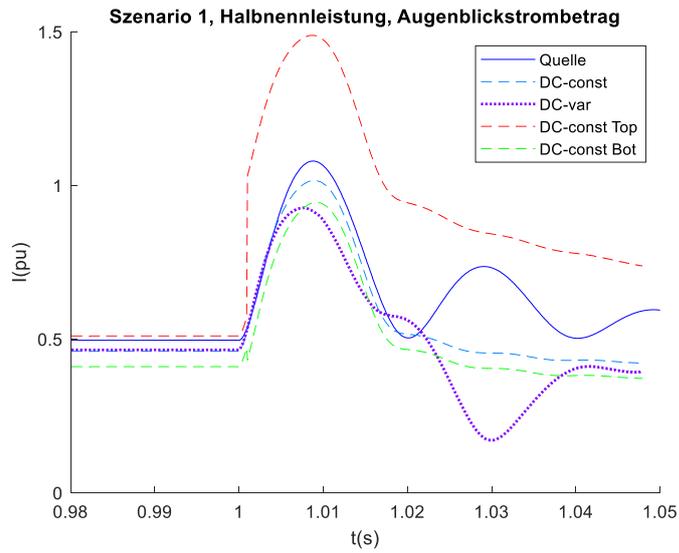


Abbildung 56: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

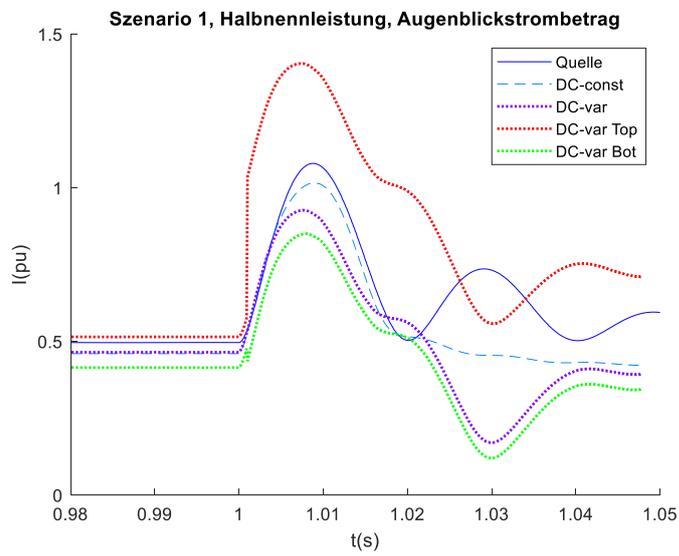


Abbildung 57: Referenzverläufe für einen Winkelsprung um -10° für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

A.II.D.2. Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung

A.II.D.2.a. Leerlauf

Wirkleistung

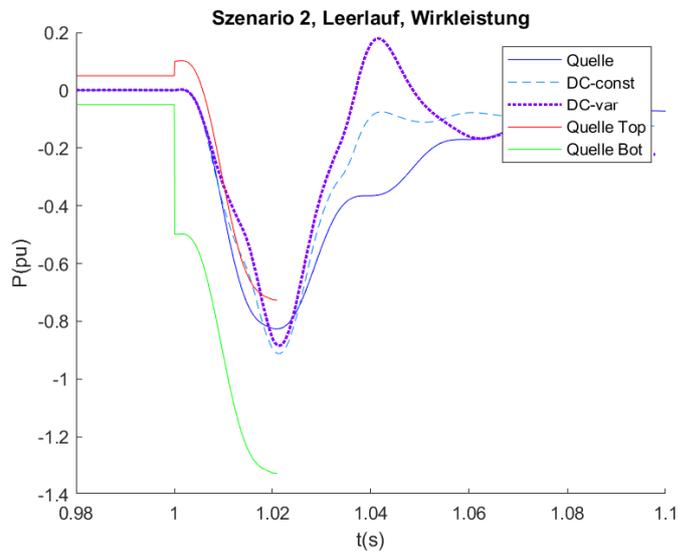


Abbildung 58: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für die Wirkleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

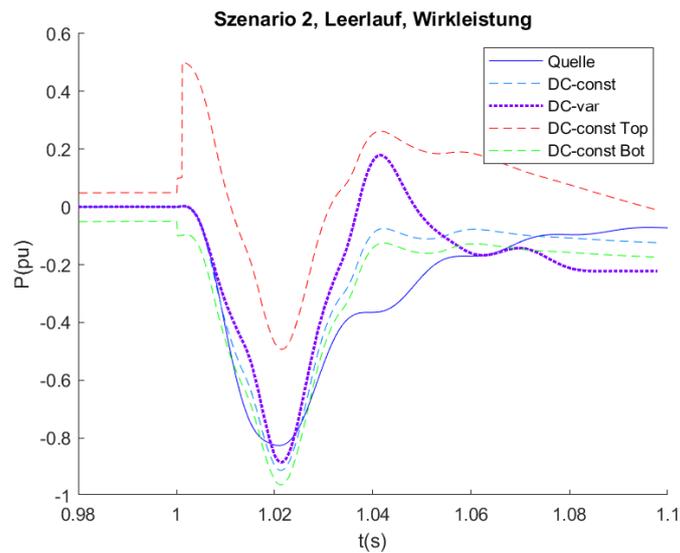


Abbildung 59: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

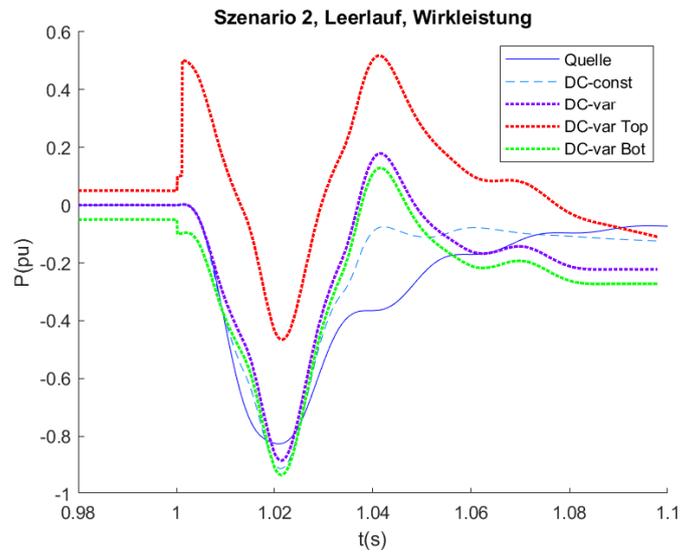


Abbildung 60: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Blindleistung

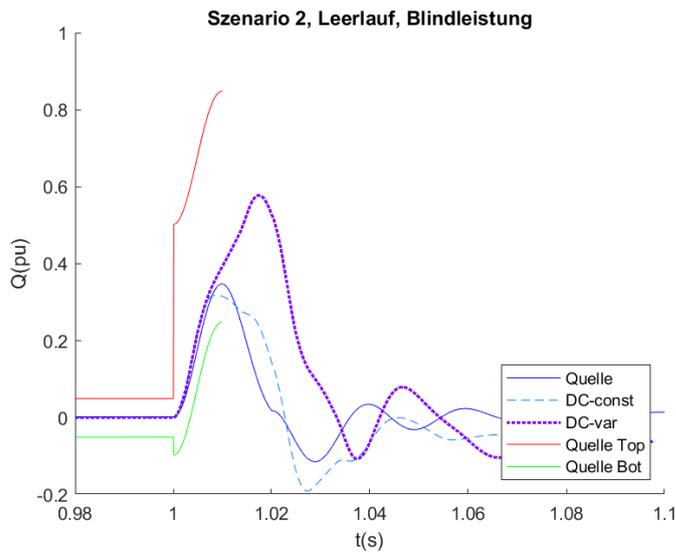


Abbildung 61: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für die Blindleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

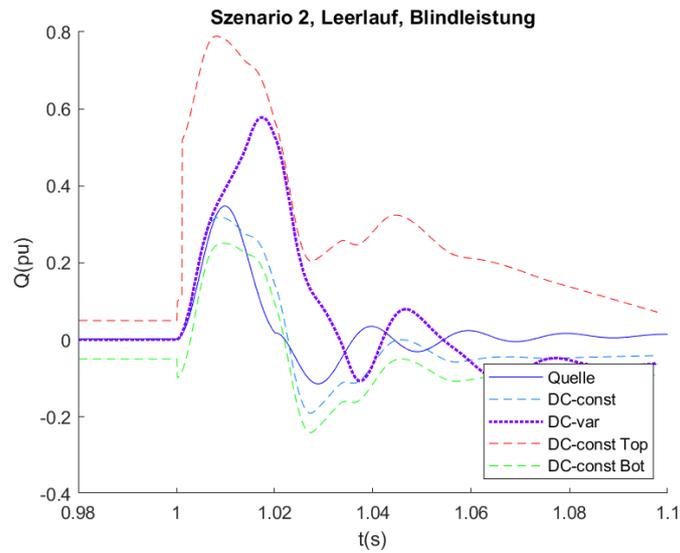


Abbildung 62: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

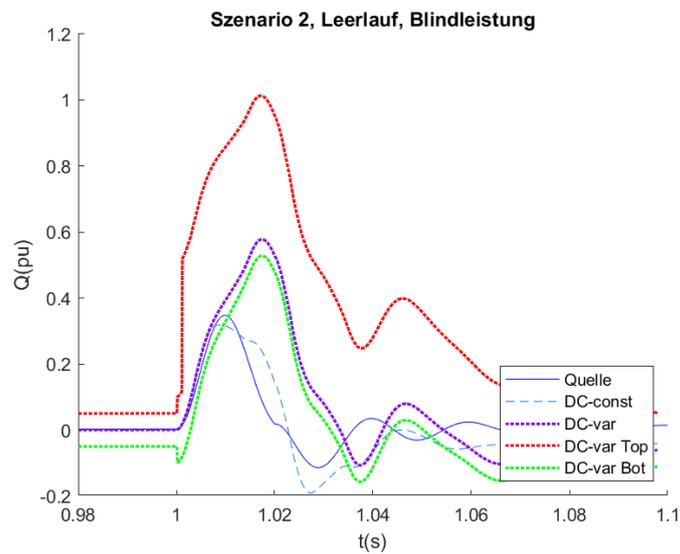


Abbildung 63: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Augenblickstrombetrag

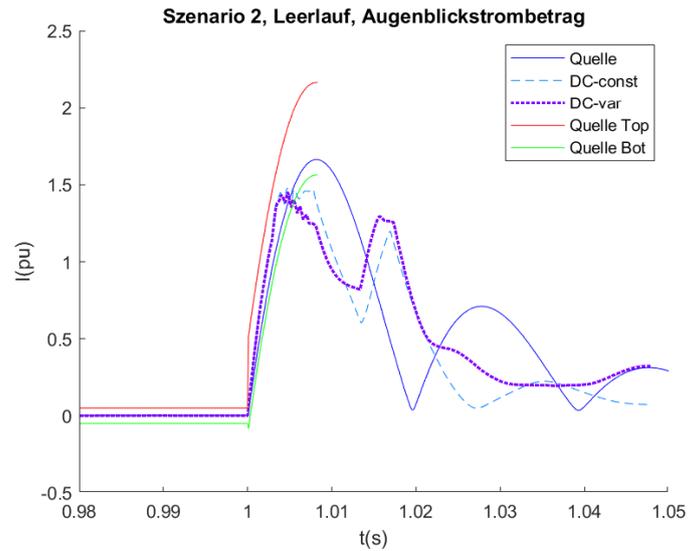


Abbildung 64: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

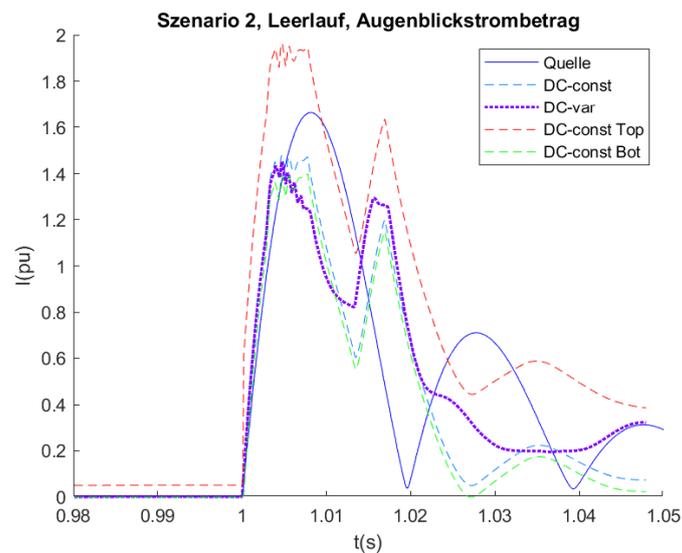


Abbildung 65: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

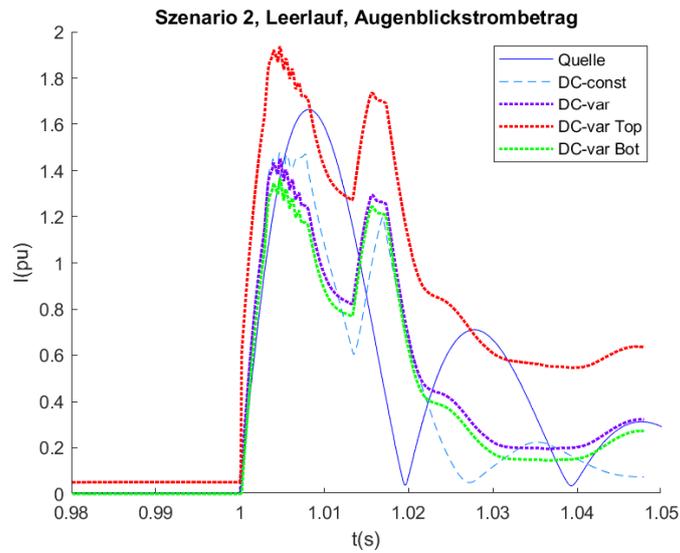


Abbildung 66: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

A.II.D.2.b. Halbnennleistung

Wirkleistung

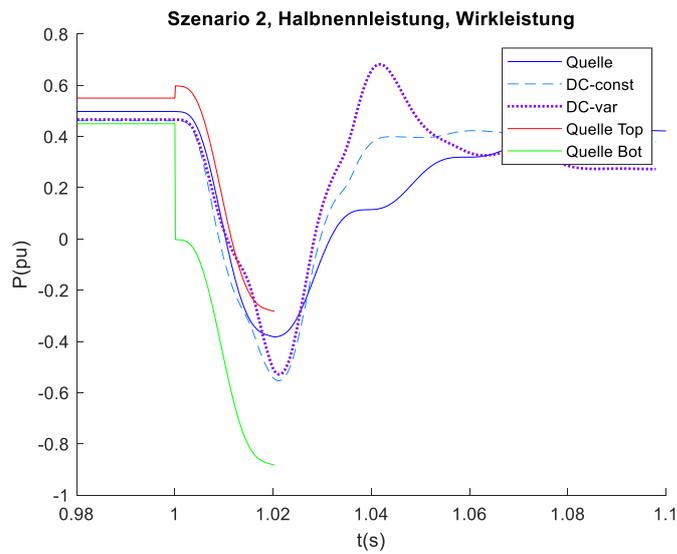


Abbildung 67: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für die Wirkleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

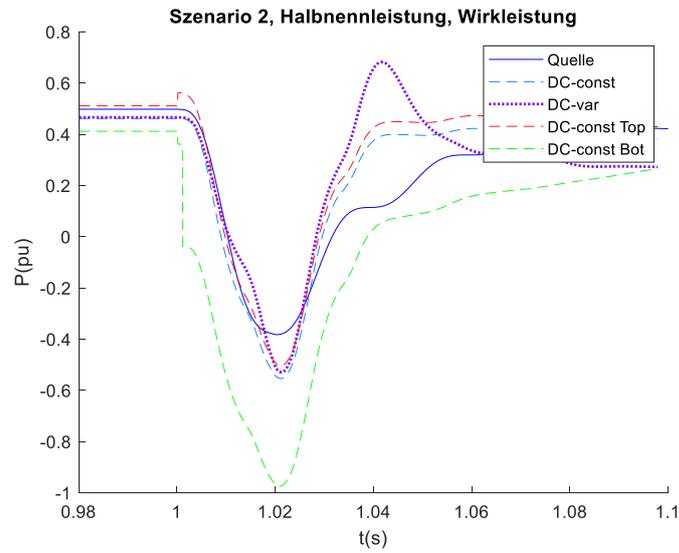


Abbildung 68: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

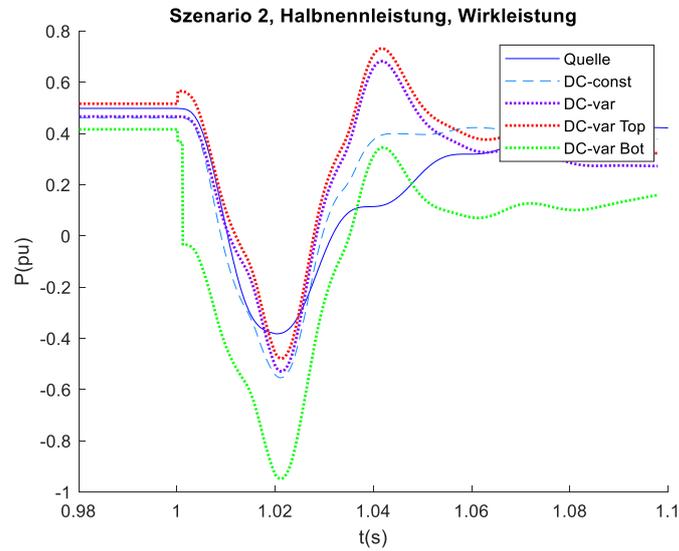


Abbildung 69: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Blindleistung

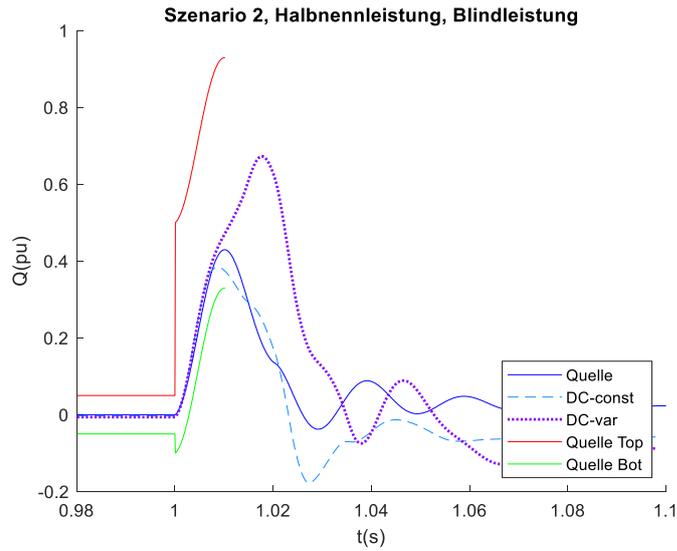


Abbildung 70: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für die Blindleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

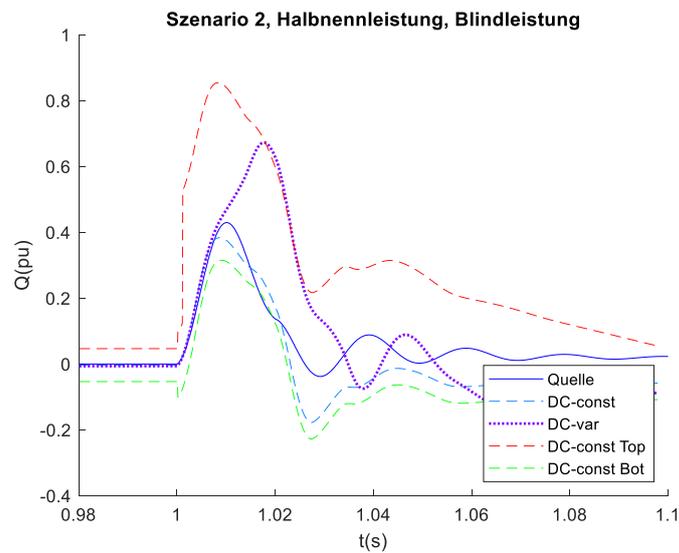


Abbildung 71: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

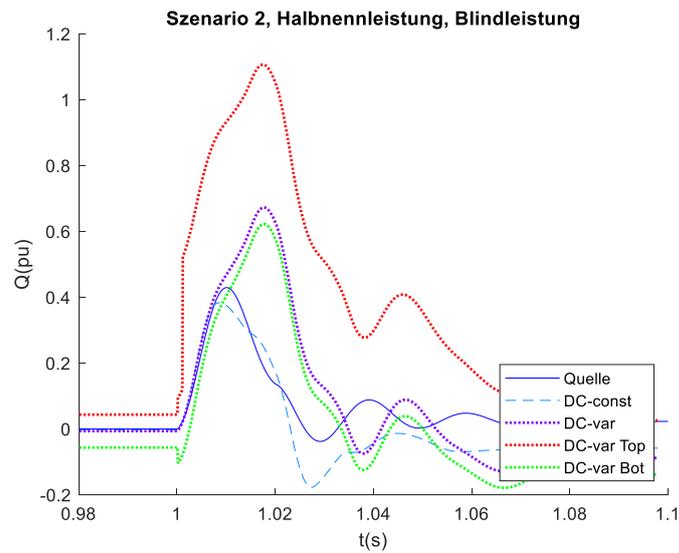


Abbildung 72: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Augenblickstrombetrag

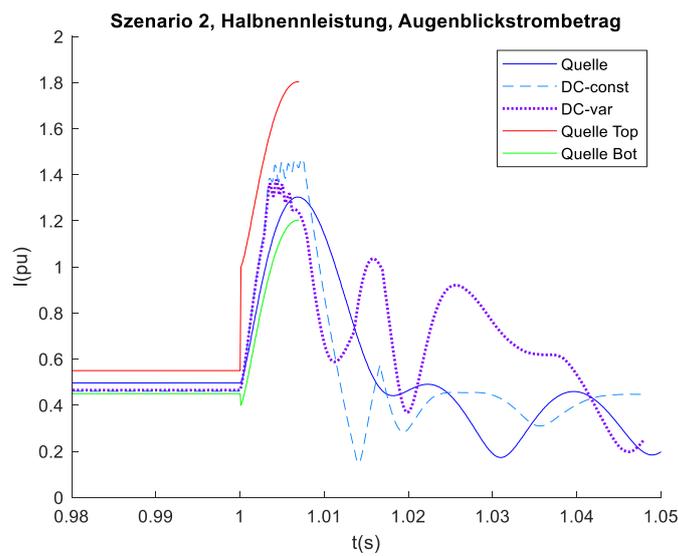


Abbildung 73: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

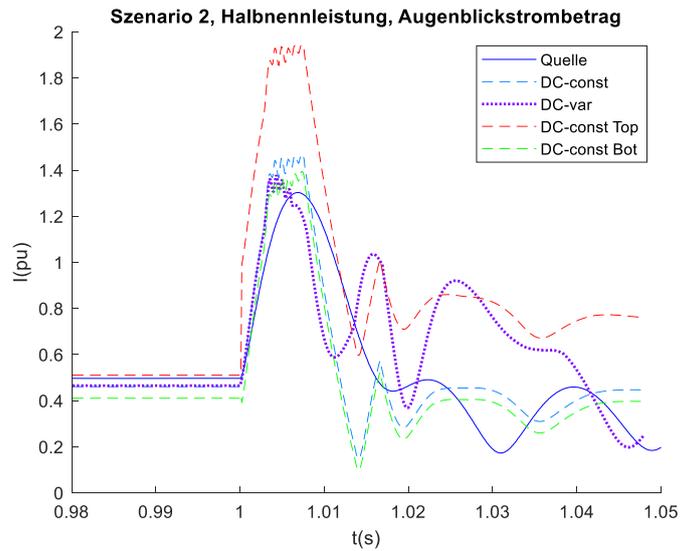


Abbildung 74: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

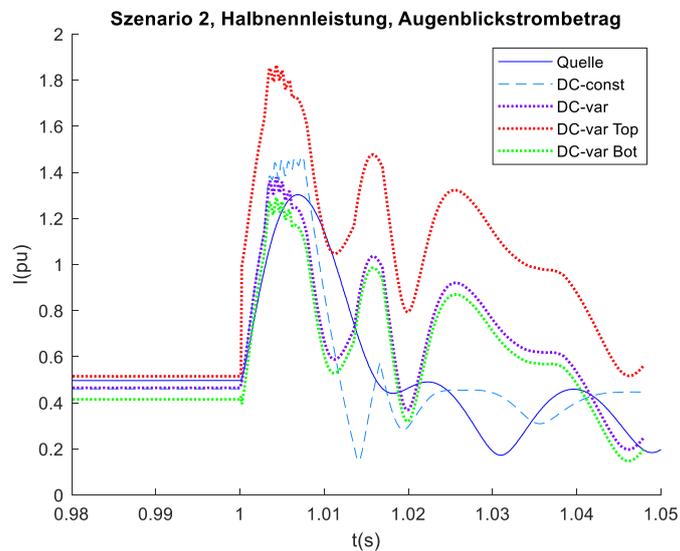


Abbildung 75: Referenzverlauf für einen Winkelsprung mit nachfolgender linearer Frequenzänderung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

A.II.D.3. Spannungssprung in der Netzspannung

A.II.D.3.a. Leerlauf

Wirkleistung

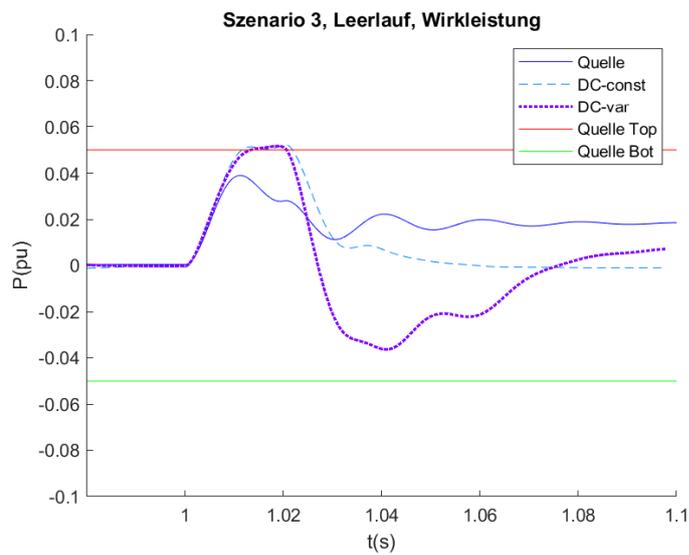


Abbildung 76: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für die Wirkleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

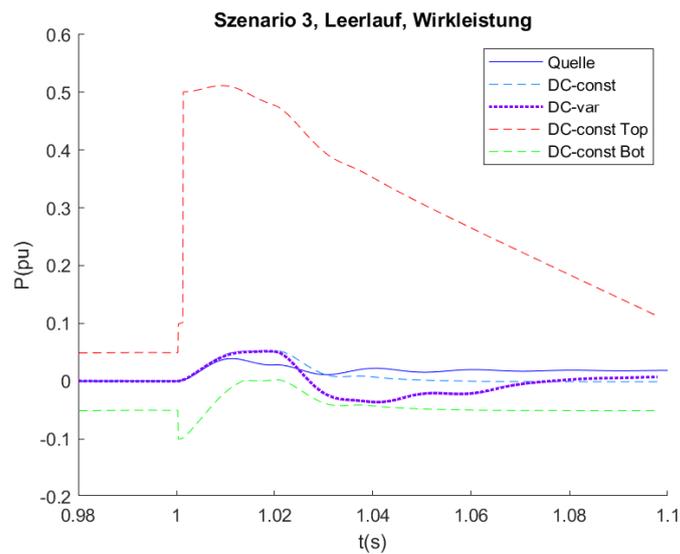


Abbildung 77: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

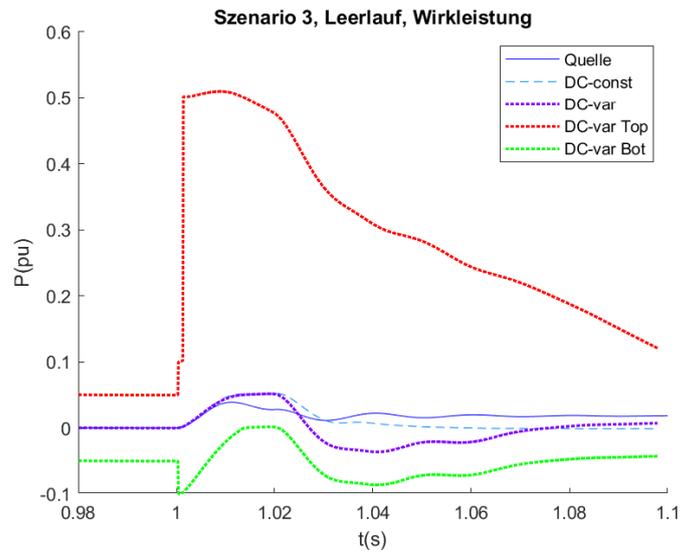


Abbildung 78: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Blindleistung

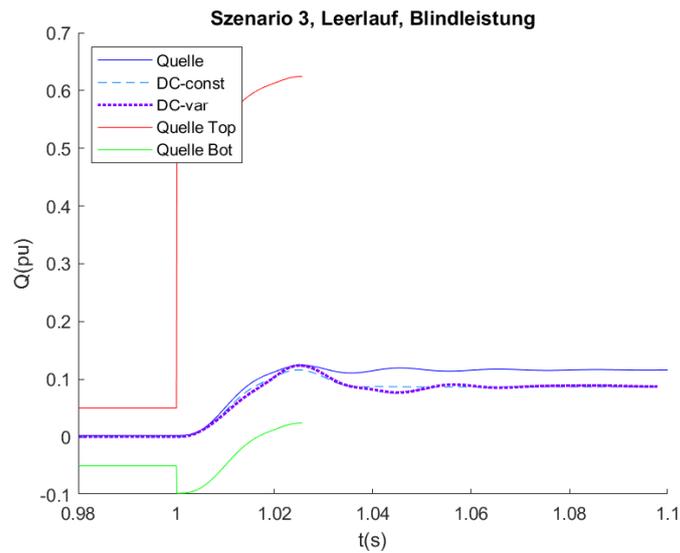


Abbildung 79: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für die Blindleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

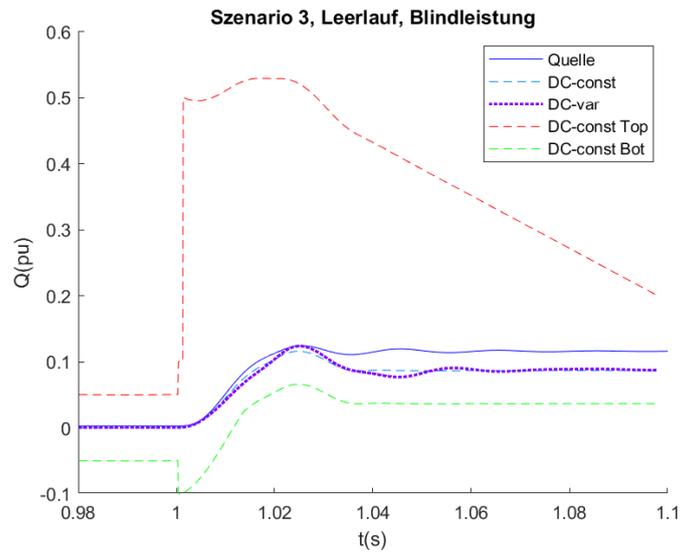


Abbildung 80: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

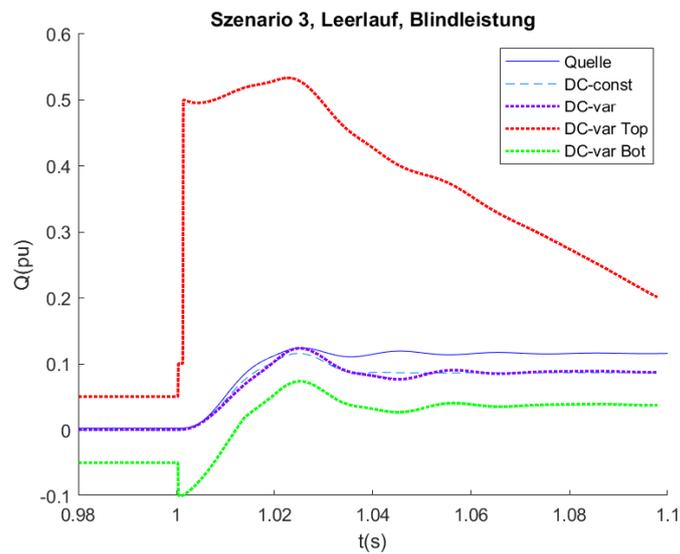


Abbildung 81: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Augenblickstrombetrag

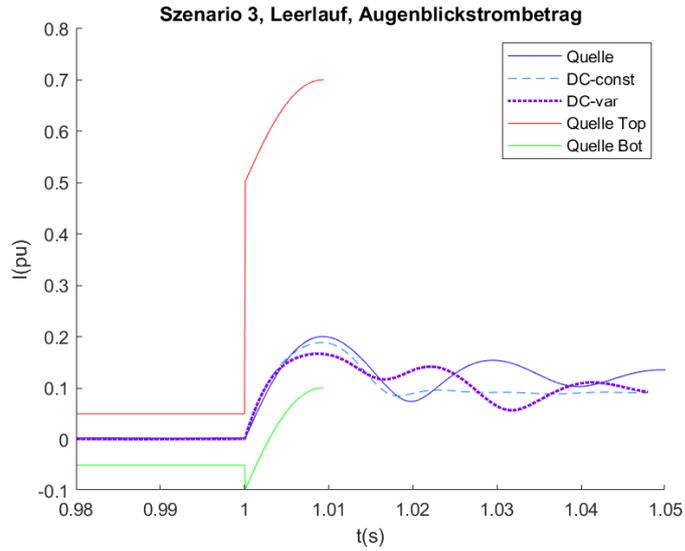


Abbildung 82: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

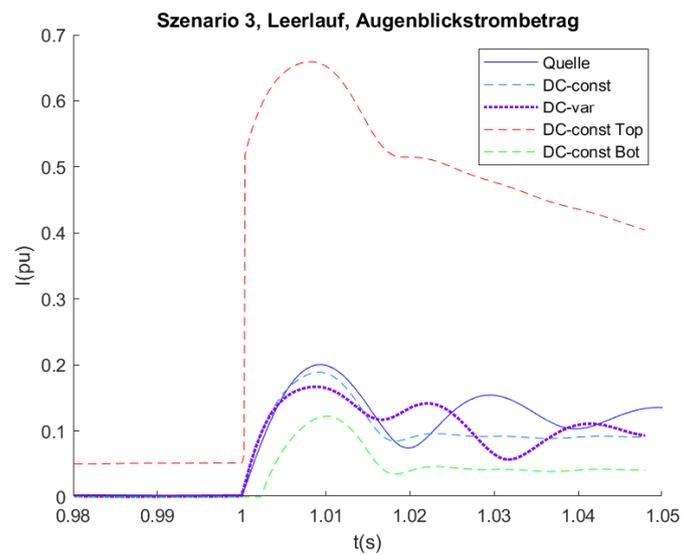


Abbildung 83: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

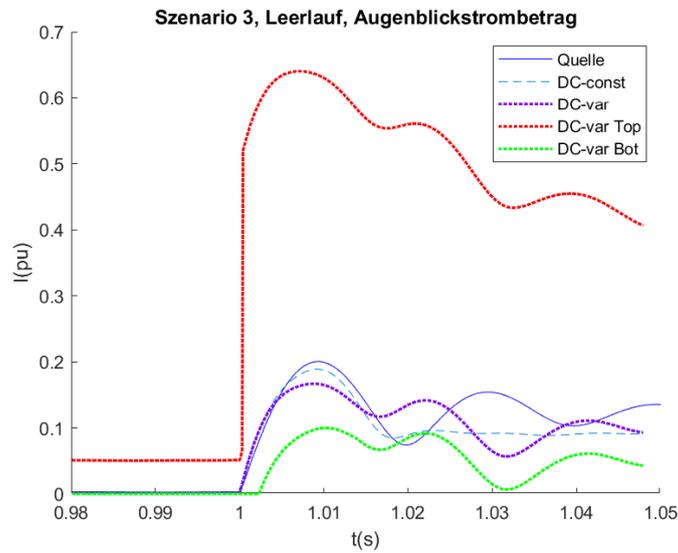


Abbildung 84: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

A.II.D.3.b. Halbnennleistung

Wirkleistung

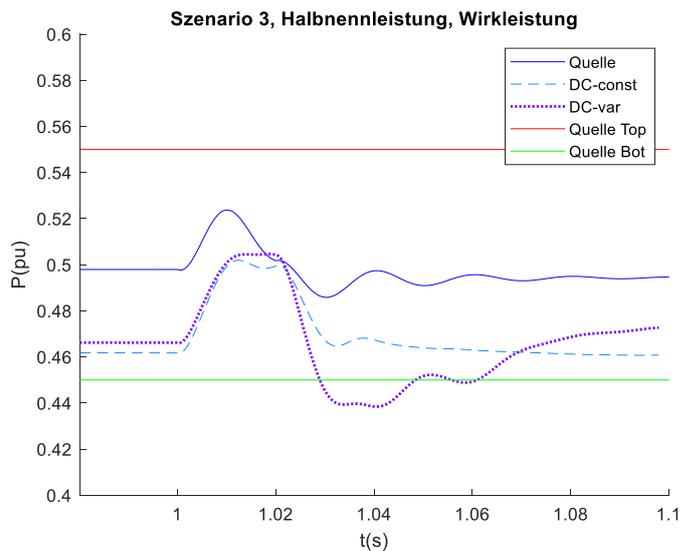


Abbildung 85: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für die Wirkleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

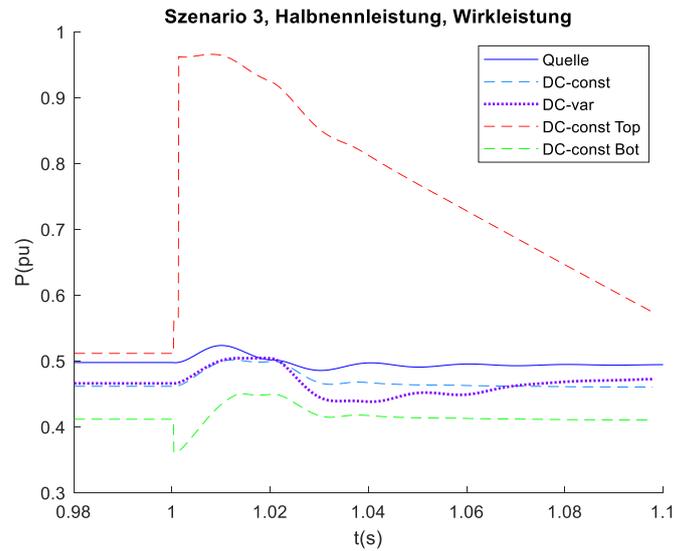


Abbildung 86: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

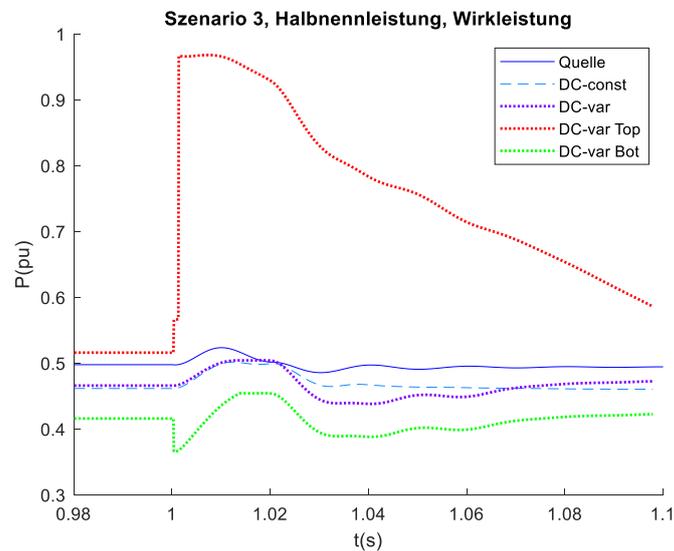


Abbildung 87: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Blindleistung

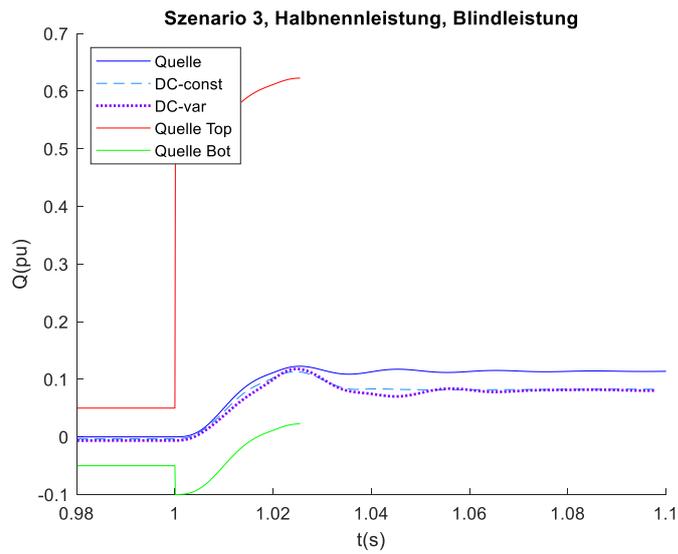


Abbildung 88: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für die Blindleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

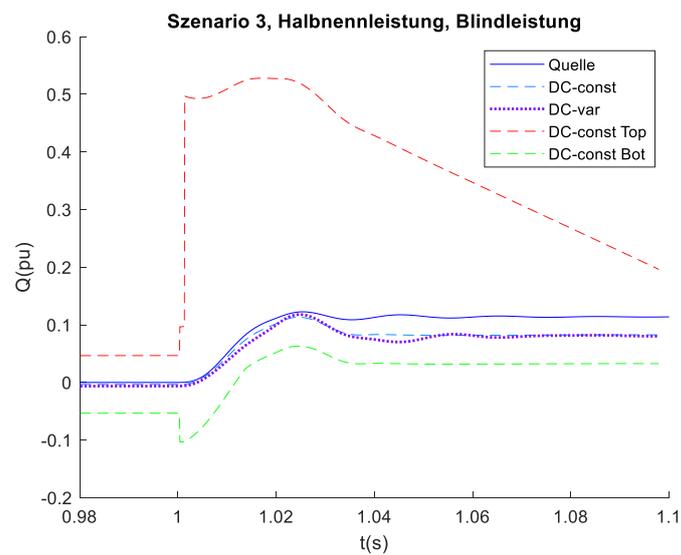


Abbildung 89: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

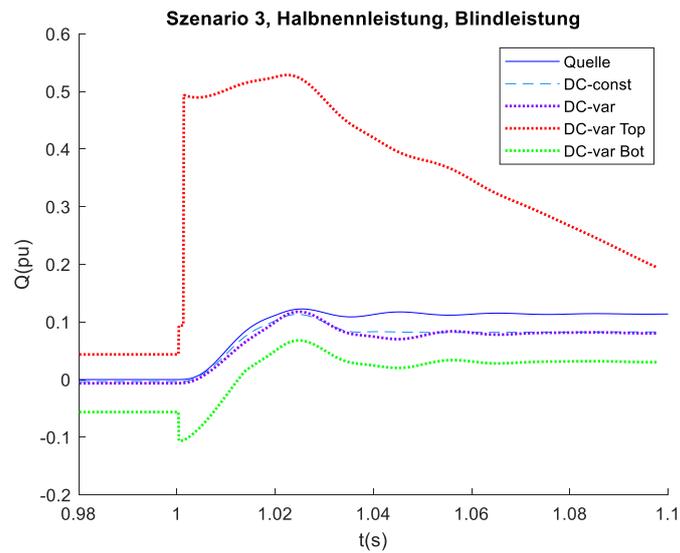


Abbildung 90: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Augenblickstrombetrag

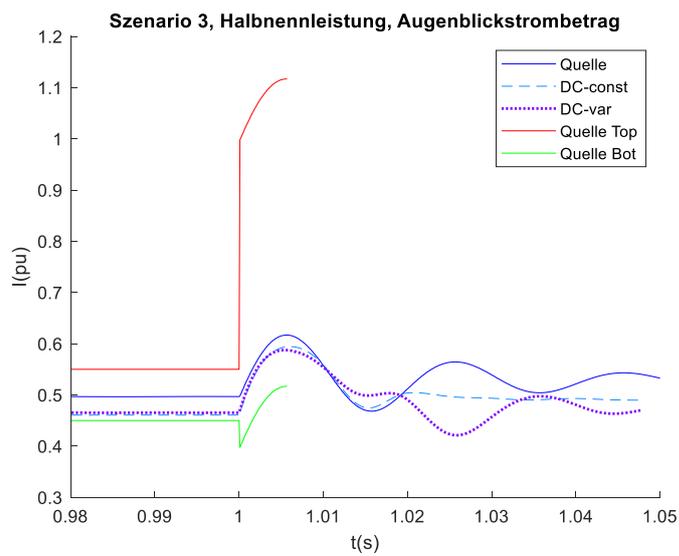


Abbildung 91: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

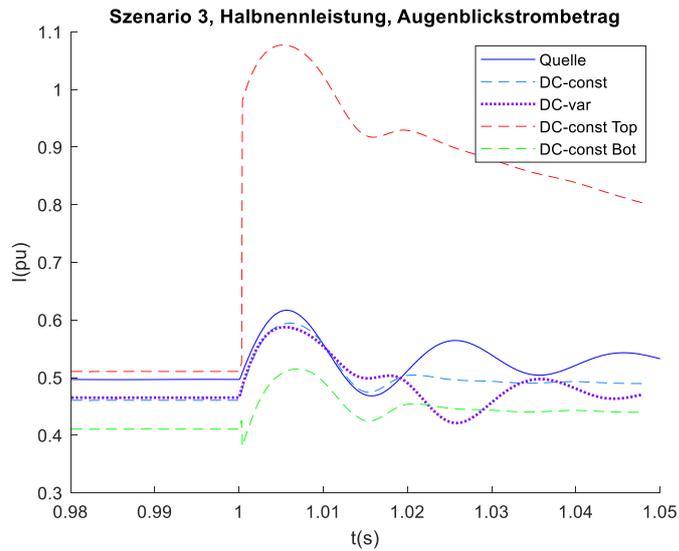


Abbildung 92: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

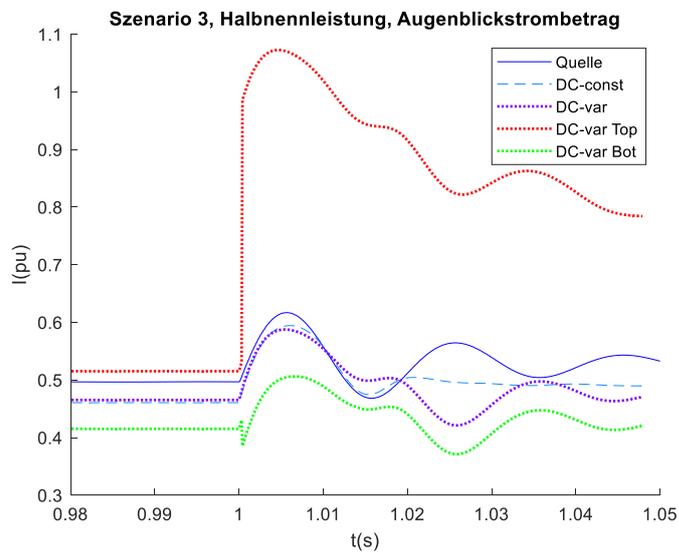


Abbildung 93: Referenzverlauf für einen Spannungssprung in der Netzspannung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

A.II.D.4. Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA

A.II.D.4.a. Leerlauf

Wirkleistung

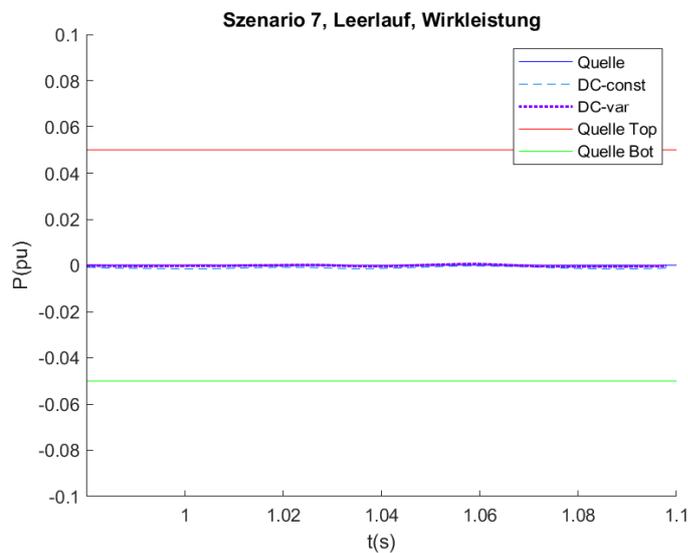


Abbildung 94: Referenzverlauf für eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für die Wirkleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

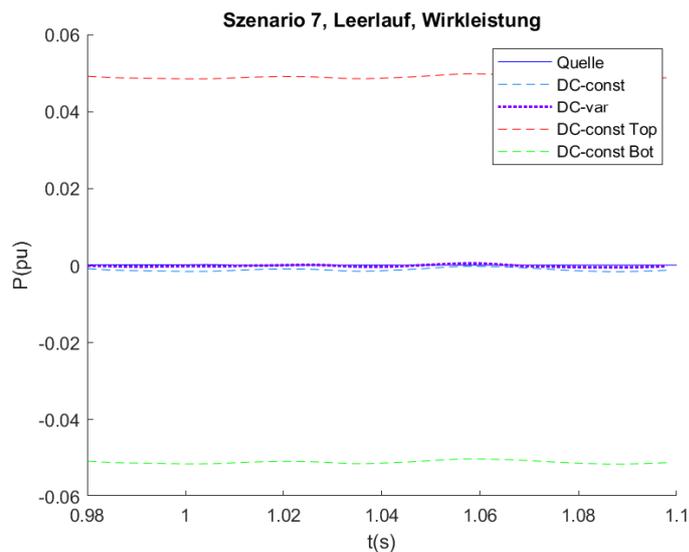


Abbildung 95: Referenzverlauf für eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

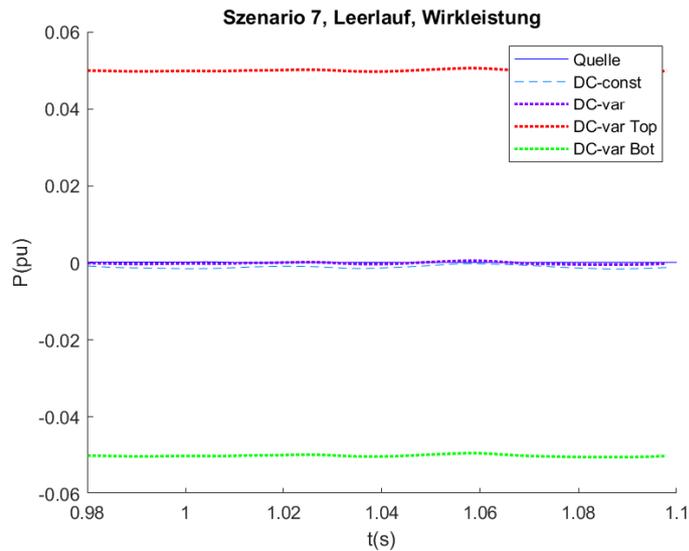


Abbildung 96: Referenzverlauf für eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Blindleistung

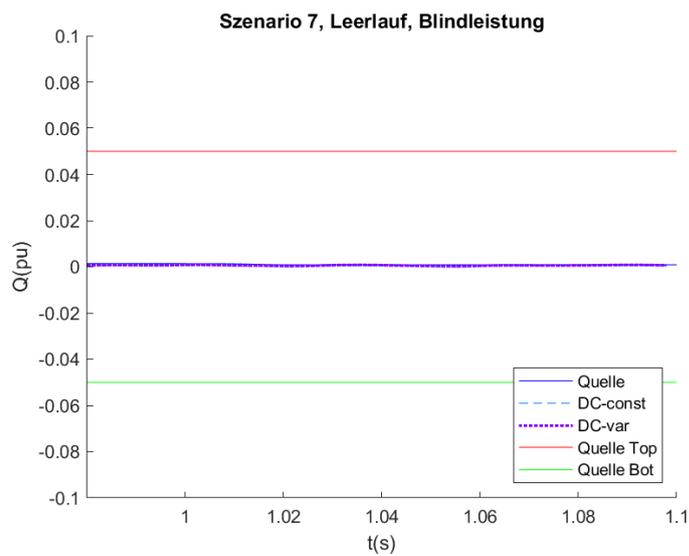


Abbildung 97: Referenzverlauf für eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für die Blindleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

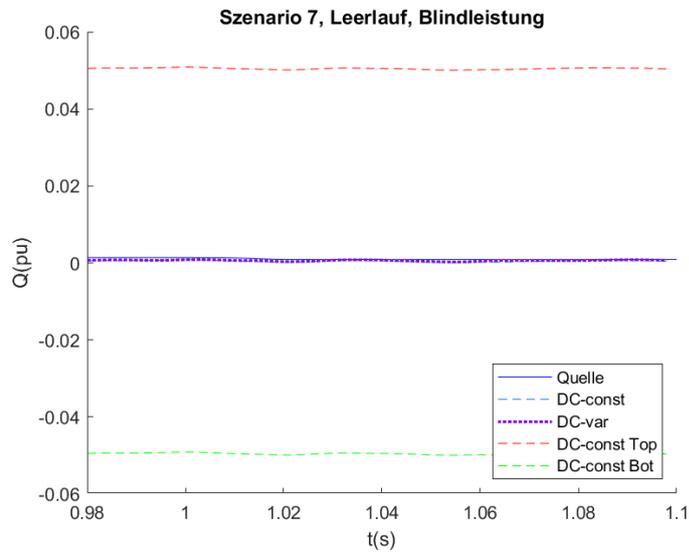


Abbildung 98: Referenzverlauf für eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

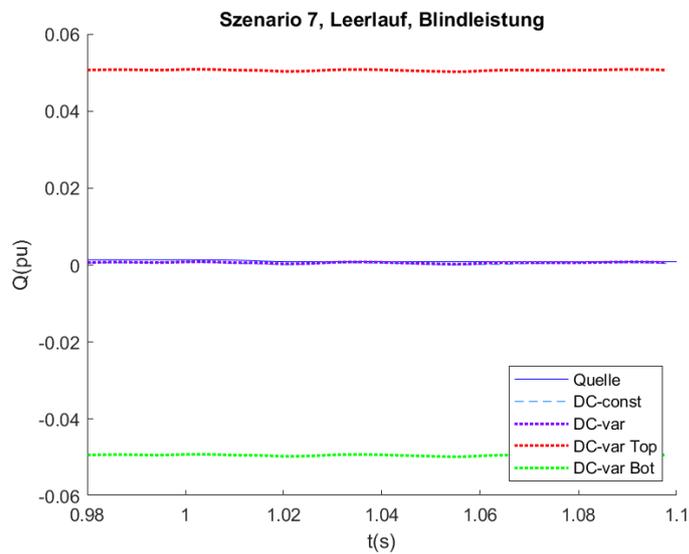


Abbildung 99: Referenzverlauf für eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Augenblickstrombetrag

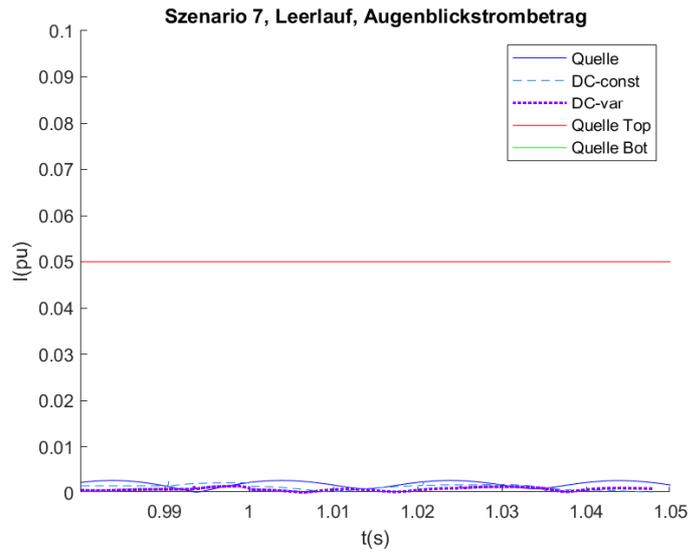


Abbildung 100: Referenzverlauf eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

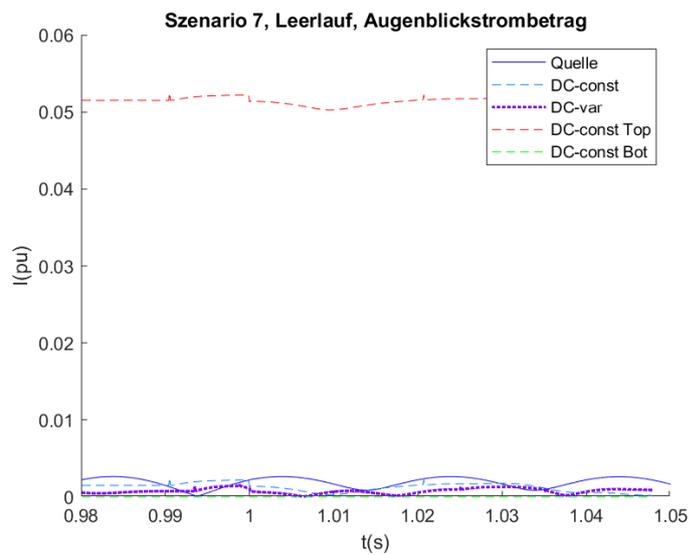


Abbildung 101: Referenzverlauf eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

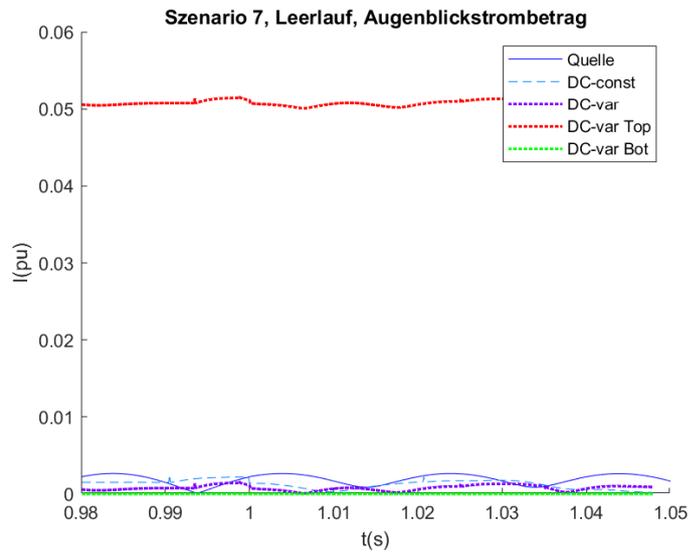


Abbildung 102: Referenzverlauf eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

A.II.D.4.b. Halbnennleistung

Wirkleistung

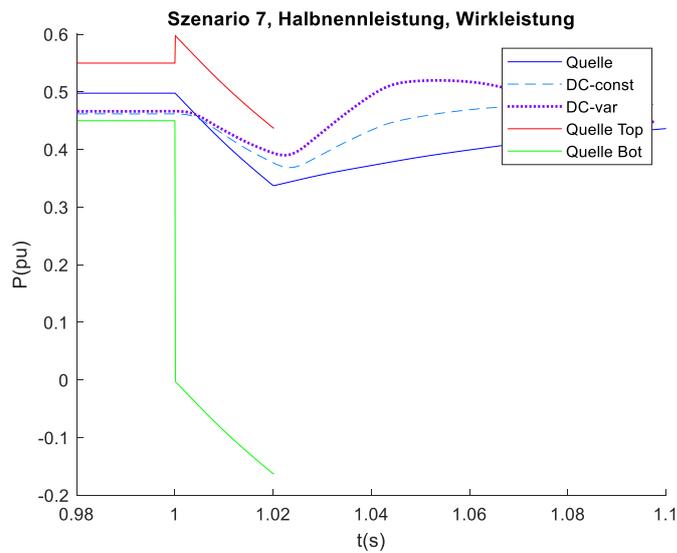


Abbildung 103: Referenzverlauf für eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für die Wirkleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

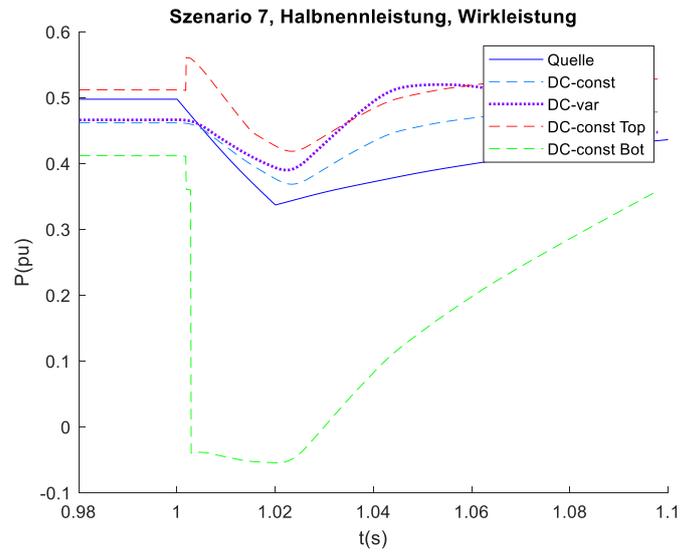


Abbildung 104: Referenzverlauf für eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

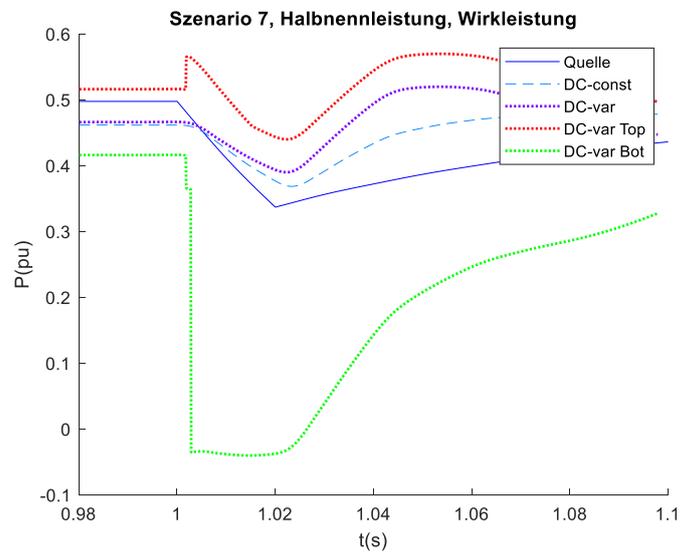


Abbildung 105: Referenzverlauf für eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Blindleistung

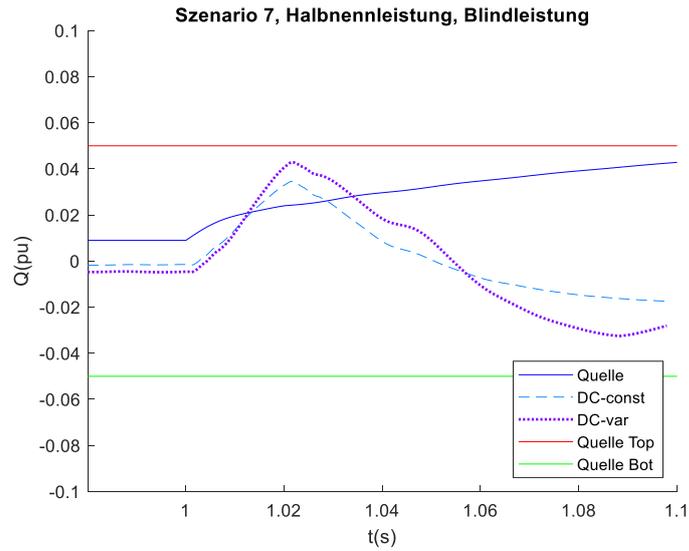


Abbildung 106: Referenzverlauf für eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für die Blindleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

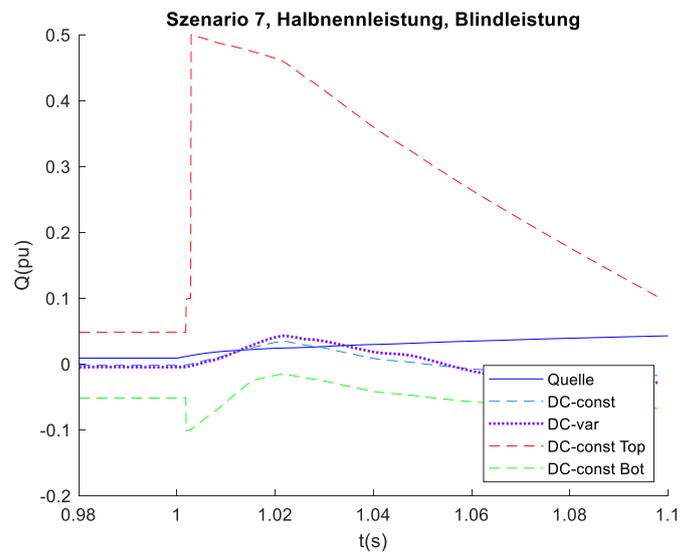


Abbildung 107: Referenzverlauf für eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

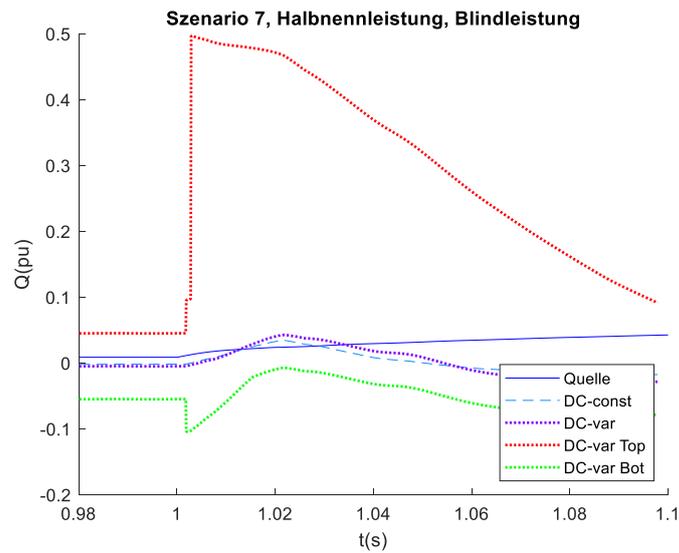


Abbildung 108: Referenzverlauf für eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Augenblickstrombetrag

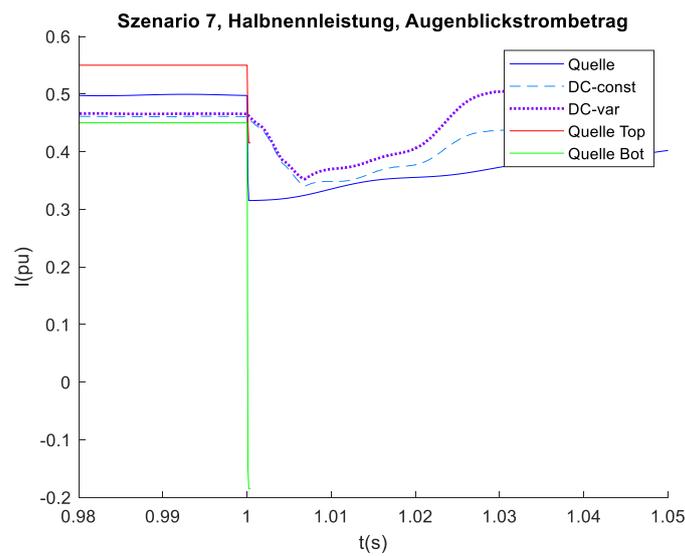


Abbildung 109: Referenzverlauf eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

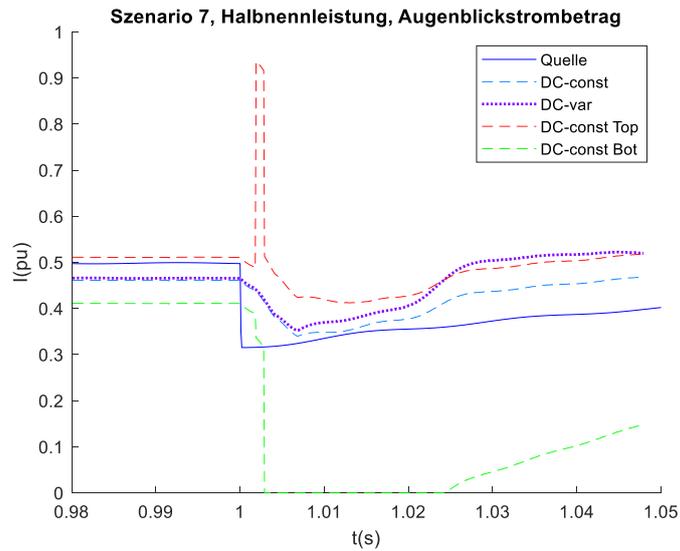


Abbildung 110: Referenzverlauf eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

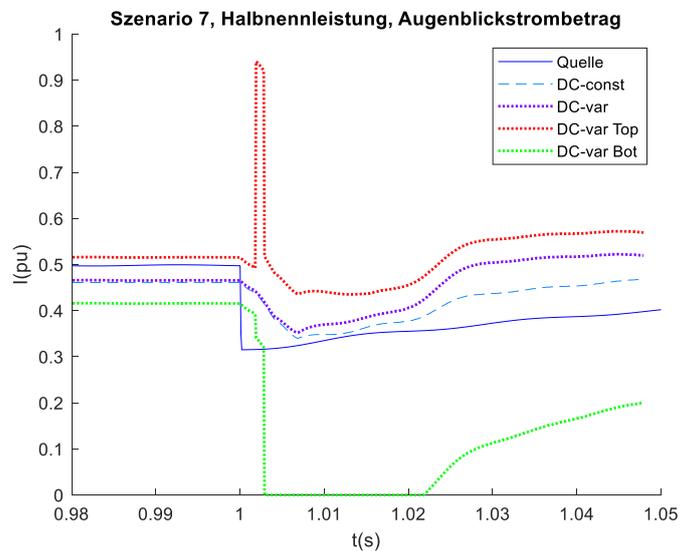


Abbildung 111: Referenzverlauf eine Änderung der Netzimpedanz von 20 GVA auf 1,0 GVA für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

A.II.D.5. Inselnetzbildung mit DUT ($P_N=1$ GW) und aktiver Last ($P_N=200$ MW)

A.II.D.5.a. Leerlauf

Wirkleistung

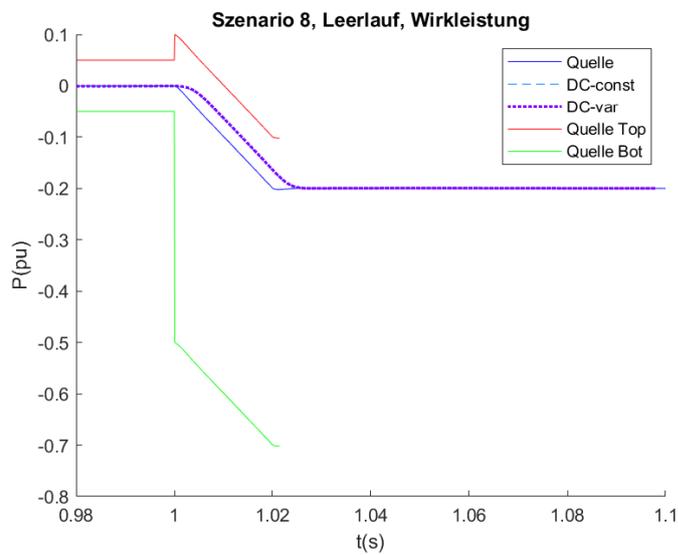


Abbildung 112: Referenzverlauf für eine Inselnetzbildung für die Wirkleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

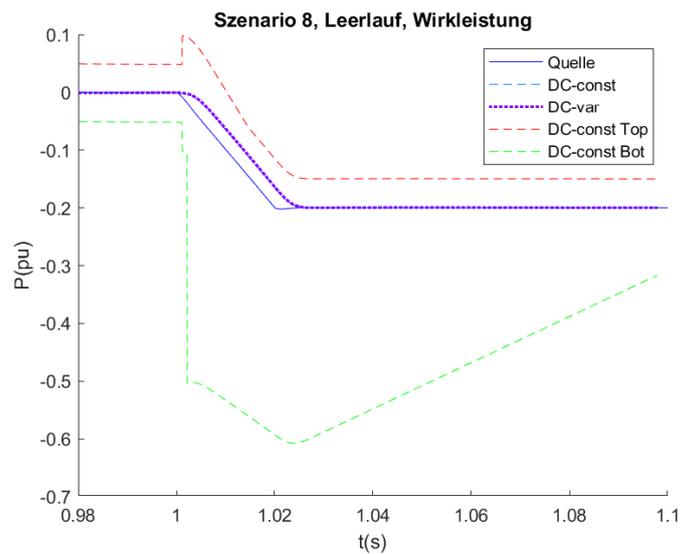


Abbildung 113: Referenzverlauf für eine Inselnetzbildung für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

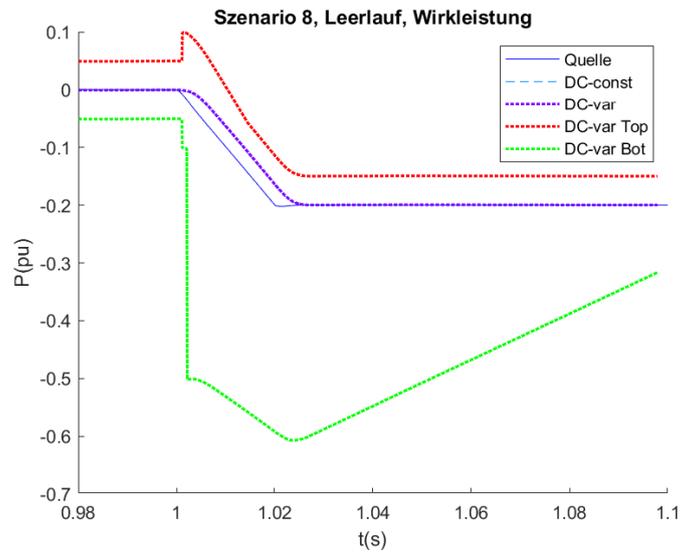


Abbildung 114: Referenzverlauf für eine Inselnetzbildung für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Blindleistung

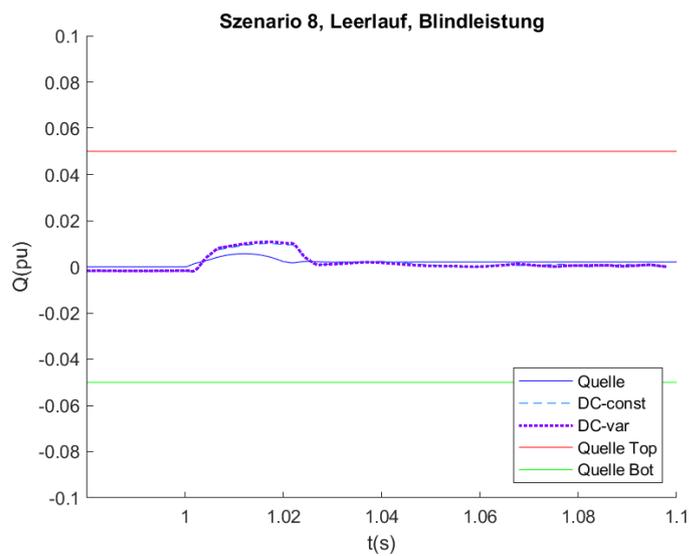


Abbildung 115: Referenzverlauf für eine Inselnetzbildung für die Blindleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

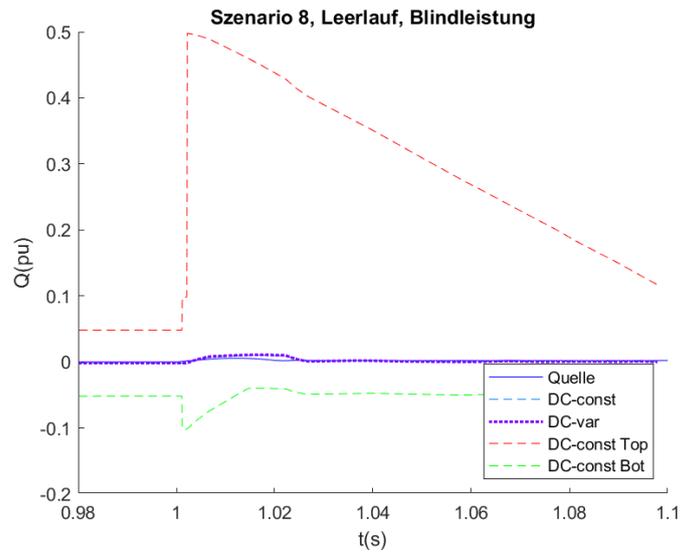


Abbildung 116: Referenzverlauf für eine Inselnetzbildung für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

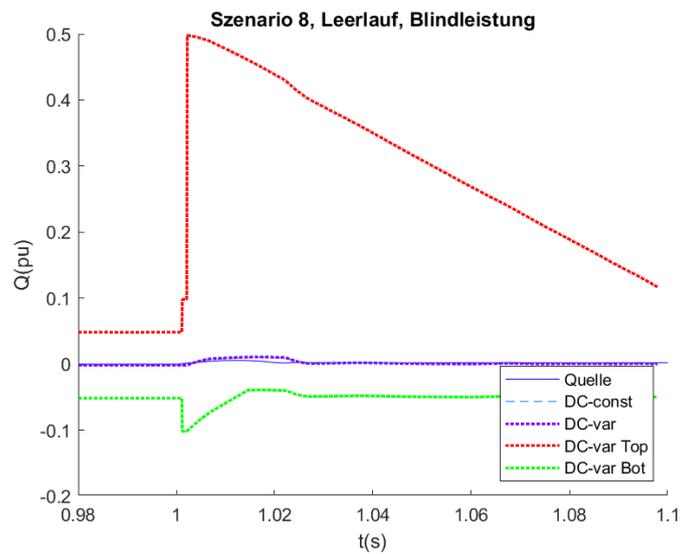


Abbildung 117: Referenzverlauf für eine Inselnetzbildung für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Augenblickstrombetrag

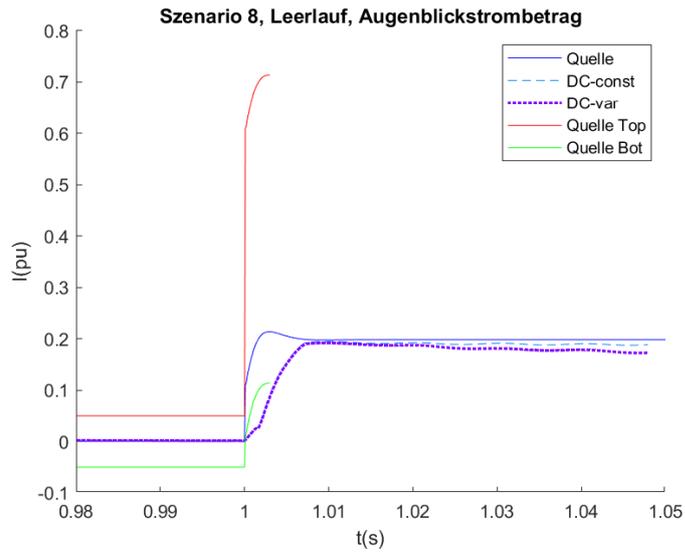


Abbildung 118: Referenzverlauf eine Inselnetzbildung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

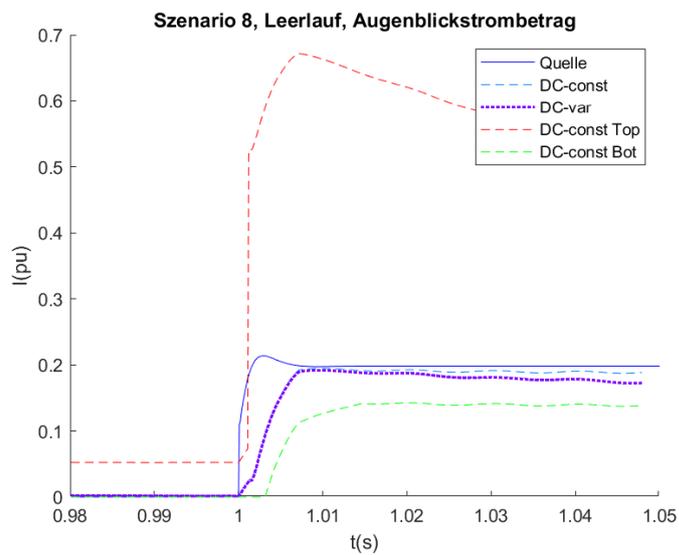


Abbildung 119: Referenzverlauf eine Inselnetzbildung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

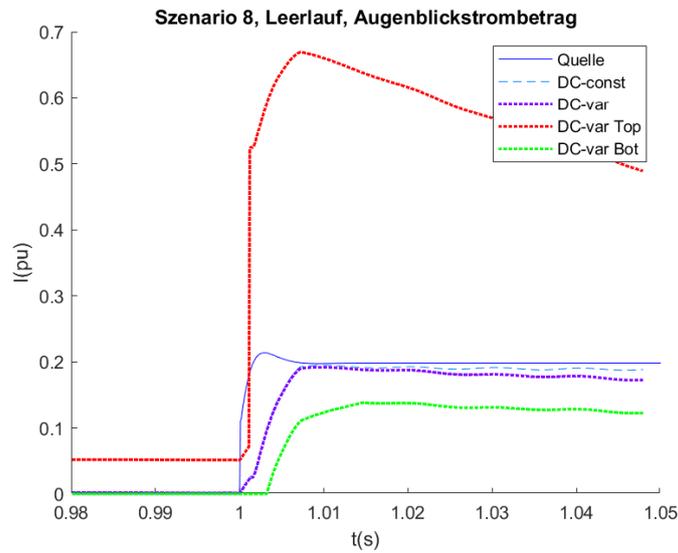


Abbildung 120: Referenzverlauf eine Inselnetzbildung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

A.II.D.5.b. Halbnennleistung

Wirkleistung

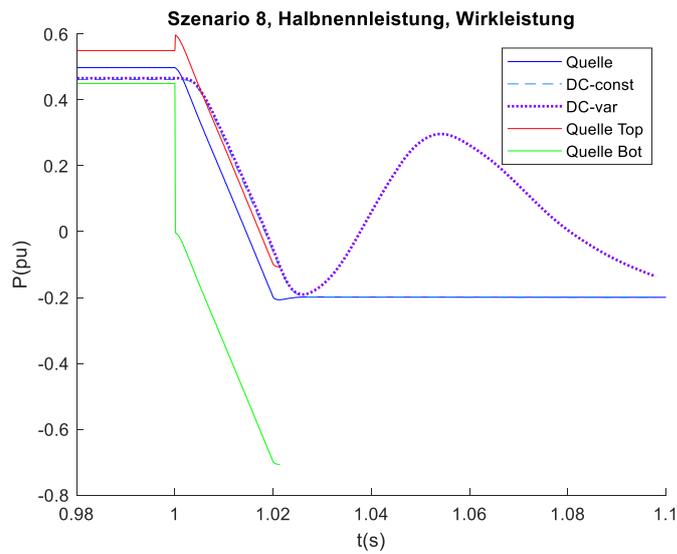


Abbildung 121: Referenzverlauf für eine Inselnetzbildung für die Wirkleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

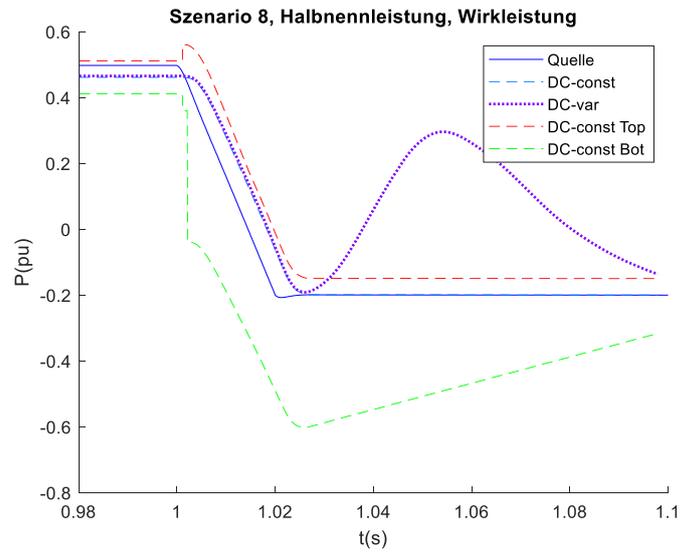


Abbildung 122: Referenzverlauf für eine Inselnetzbildung für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

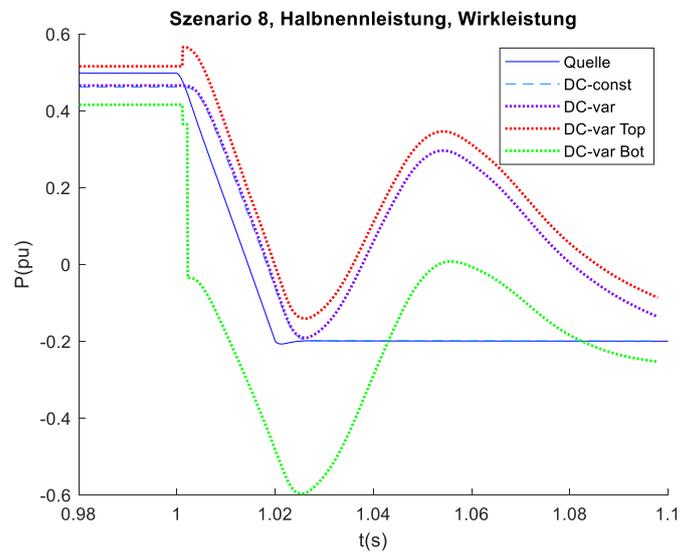


Abbildung 123: Referenzverlauf für eine Inselnetzbildung für die Wirkleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Blindleistung

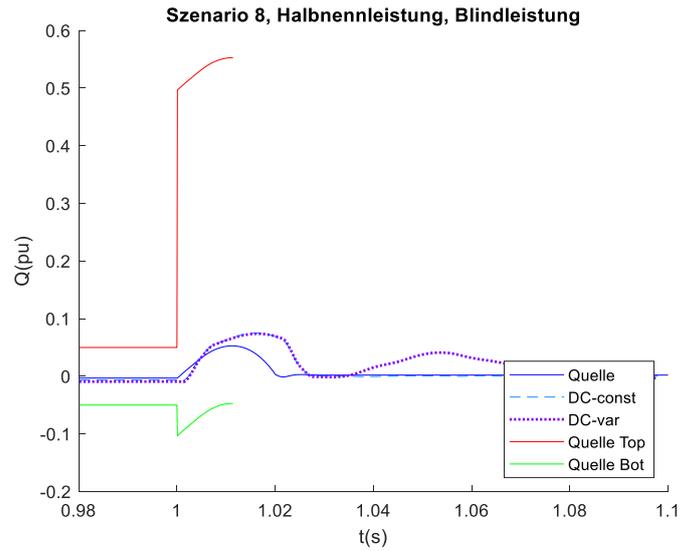


Abbildung 124: Referenzverlauf für eine Inselnetzbildung für die Blindleistung, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

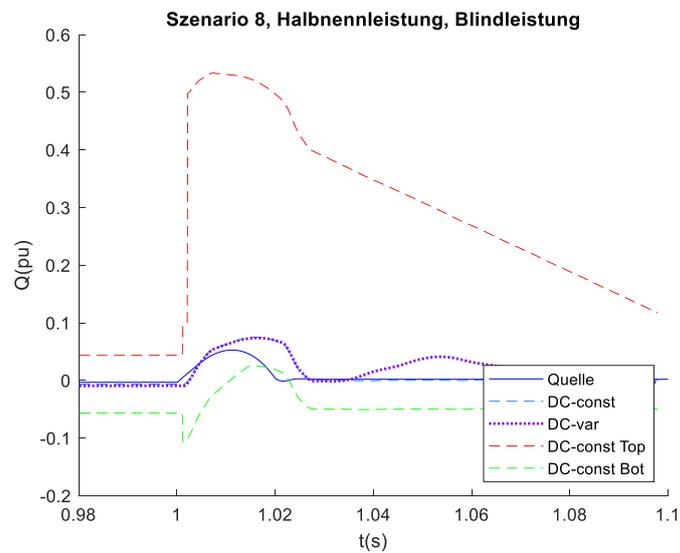


Abbildung 125: Referenzverlauf für eine Inselnetzbildung für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

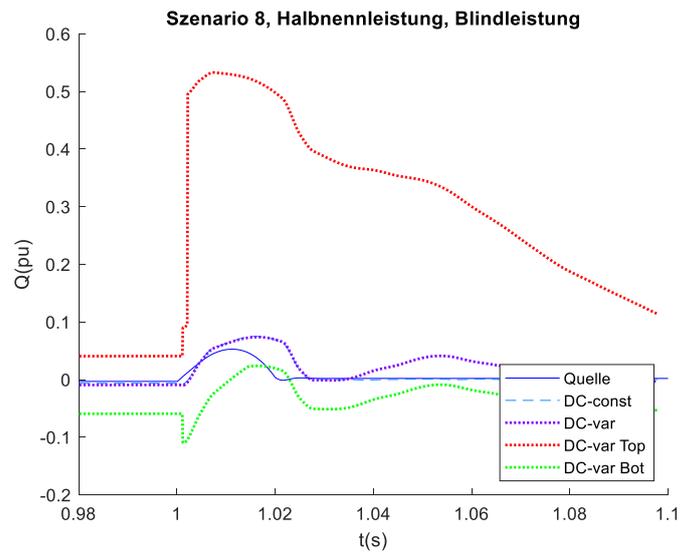


Abbildung 126: Referenzverlauf für eine Inselnetzbildung für die Blindleistung, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

Augenblickstrombetrag

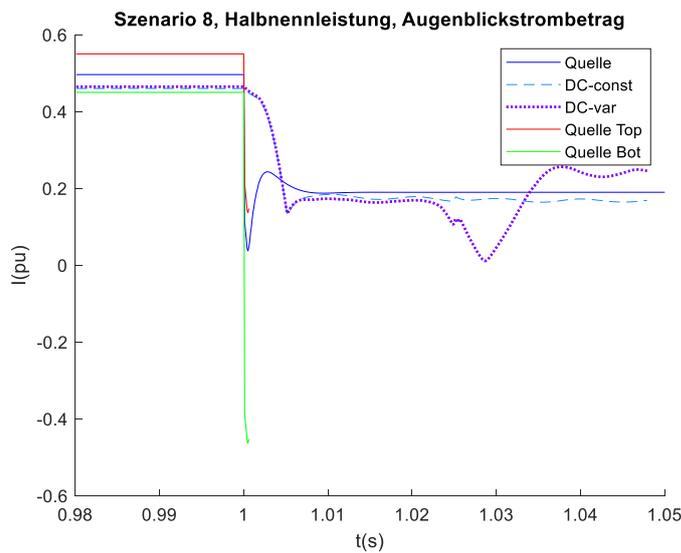


Abbildung 127: Referenzverlauf eine Inselnetzbildung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende der impedanzbehafteten Spannungsquelle

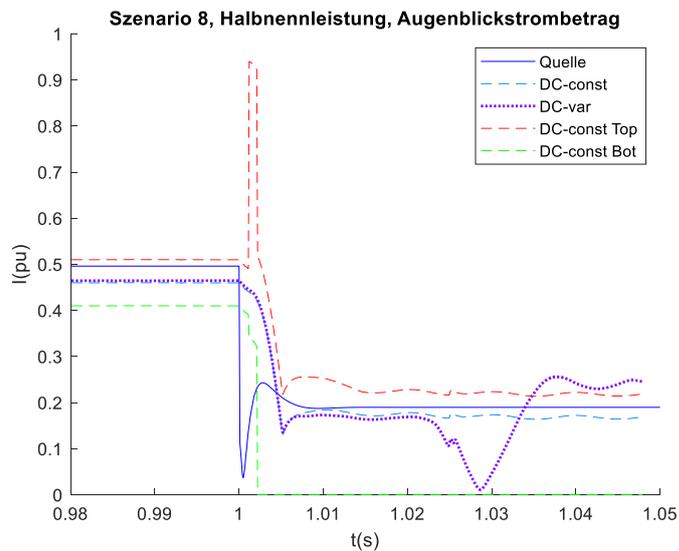


Abbildung 128: Referenzverlauf eine Inselnetzbildung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit konstanter Modulspannung

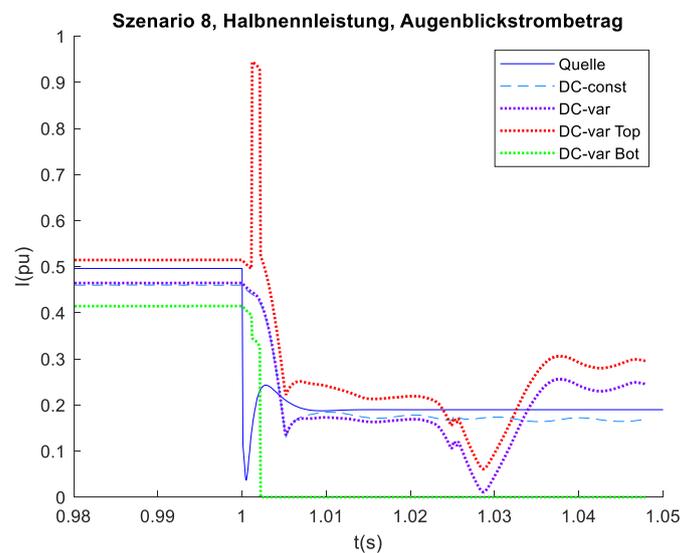


Abbildung 129: Referenzverlauf eine Inselnetzbildung für den Augenblickstrombetrag, Einhüllende des MMC mit variabler Modulspannung

A.III. Beispielhafte Referenz-Zeitverläufe mit geregelter Spannungsquelle

Um den Einfluss der Parametrierung der impedanzbehafteten Spannungsquelle besser einzuschätzen, werden Referenz-Zeitverläufe bei einem Netzwinkelsprung von -10° mit 3 beispielhaften Parametersätzen simuliert. Der resistive Anteil der Gesamtimpedanz liegt bei Null, die anderen Parameter sind die folgenden:

- Reaktanz 70 % mit 20 ms Zeitverzögerung ($0.7pu_{20ms}$)
- Reaktanz 50 % mit 20 ms Zeitverzögerung ($0.5pu_{20ms}$)
- Reaktanz 100 % mit 50 ms Zeitverzögerung ($1.0pu_{50ms}$)

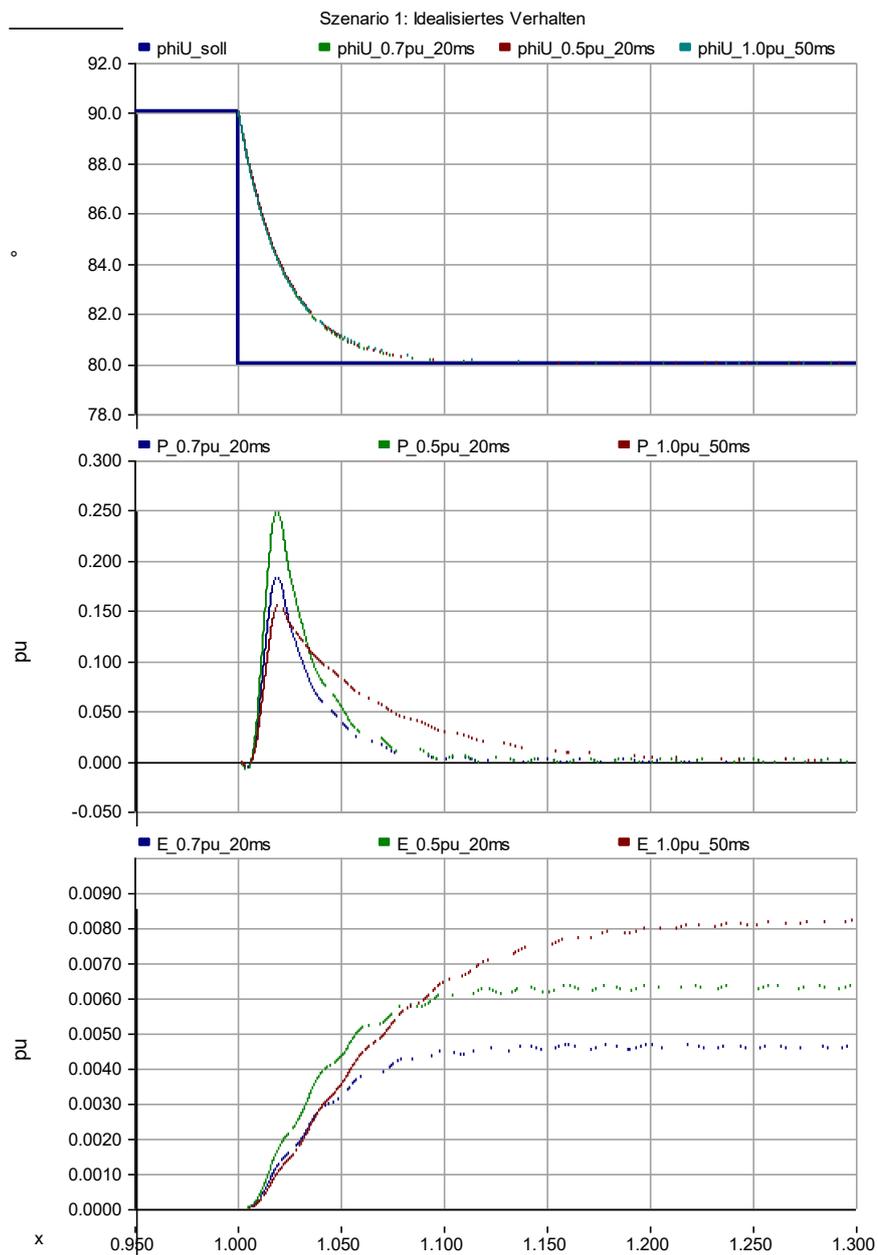


Abbildung 130 Beispielhafte Wirkleistungs- und Energieverläufe (P und E) bei einem Netz winkelsprung (ϕ_U) von -10° für verschiedene Reaktanzen und Zeitverzögerungen

Der Betrag der Impedanz beeinflusst vor allem den Maximalwert der eingespeisten Wirkleistung (und damit den Spitzenwert des Augenblicksstromes). Die Winkelnachführungsgeschwindigkeit wirkt sich dagegen auf das Abklingverhalten der Wirkleistung aus und definiert damit die ausgetauschte Energie.

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e.V.

Forum Netztechnik/Netzbetrieb im
VDE e. V. (VDE FNN)
Bismarckstraße 33
10625 Berlin
Tel. +49 30 383868-70

VDE FNN