

Erdungskonzept für einen halbleiterschalteten Marxgenerator mit resonanter Aufladung

Dr.-Ing. Martin Sack, Karlsruher Institut für Technologie, Deutschland
 Johannes Ruf, M.Sc., Karlsruher Institut für Technologie, Deutschland
 Dennis Herzog, B.Eng., Karlsruher Institut für Technologie, Deutschland
 Prof. Dr. Georg Müller, Karlsruher Institut für Technologie, Deutschland

1 Einleitung

Für den Aufschluss pflanzlicher Zellen mit Hilfe von gepulsten elektrischen Feldern (Elektroporation) kommen in der Nahrungsmittelindustrie Elektroporationsanlagen zum Einsatz [1]. Für diesen Zweck entwickelt das KIT/IHM einen halbleiterschalteten Marxgenerator mit resonanter Aufladung. Für Studienzwecke wurde ein 8-stufiger Marxgenerator aufgebaut und an einer künstlichen Last in Betrieb genommen. Er ist für eine Stufenspannung von $U_L = 1 \text{ kV}$, einen gepulsten Entladestrom von $\hat{I} = 500 \text{ A}$ und eine Pulsrepetitionsrate von $f_{\text{rep}} = 500 \text{ Hz}$ ausgelegt [2]. Resonantes Laden ermöglicht auf einfache Weise ein schnelles Nachladen des Generators bei gleichzeitiger Spannungsverdoppelung. Der Ladestrompfad des Generators ist mit stromkompensierten Drosseln bestückt, die für den Ladestrom als Gegentaktsignal eine geringe Impedanz und für den Ausgangspuls eine große Impedanz darstellen.

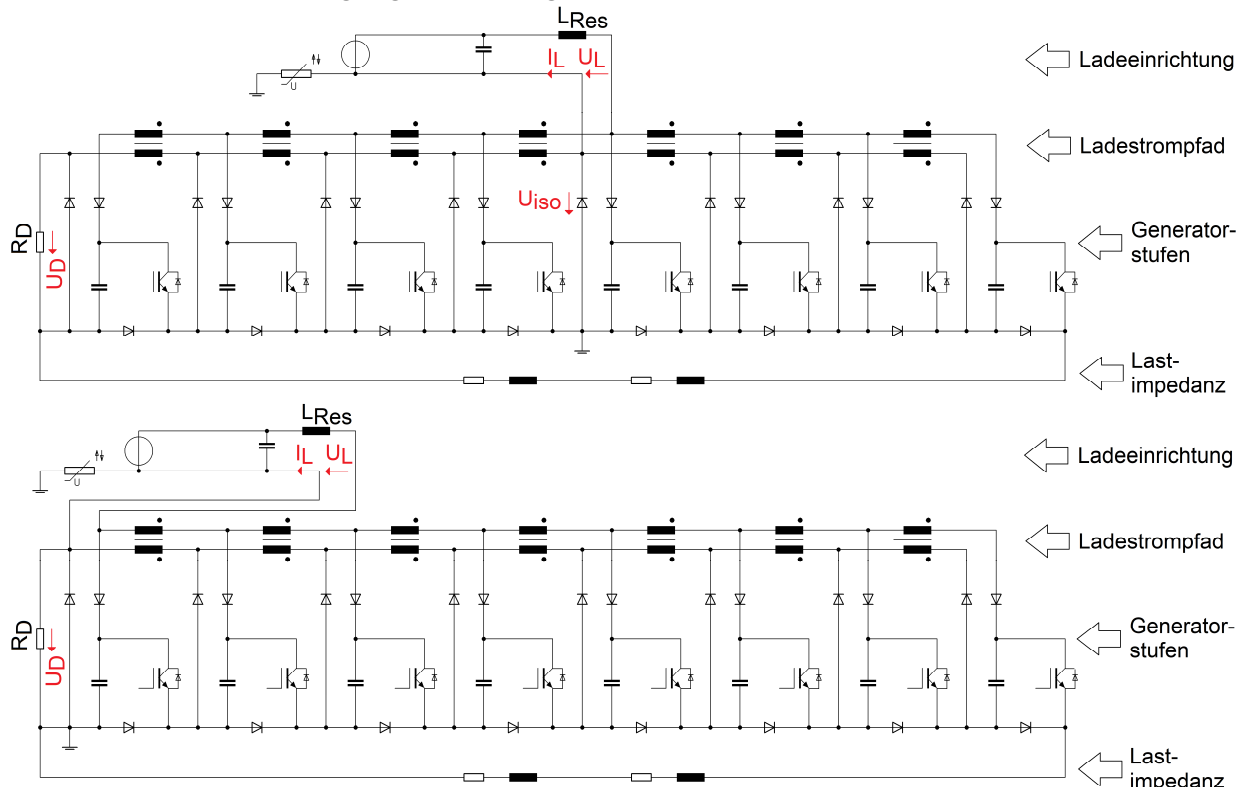


Bild 1: Erdungskonzept für einen Betrieb bei erdsymmetrischer Ausgangsspannung (oben) und einer Ausgangsspannung unsymmetrisch zum Erdpotential (unten).

2 Erdungskonzept

2.1 Erdungskonzepte für eine Elektroporationsanlage

Die Bauart des Zellaufschlussreaktors bestimmt das Erdungskonzept der Anlage [3]. Für den Einsatz eines Zellaufschlussreaktors, bei dem das elektrische Feld bauartbedingt im Wesentlichen senkrecht zum Produktstrom ausgerichtet ist, reduziert ein erdsymmetrischer Betrieb den Leckstrom, der ungewollt entlang der Produktzuführung und Ausleitung des

Zellaufschlussreaktors fließt. Im idealen Fall einer symmetrischen Anordnung ist der Leckstrom sogar Null. Ein erdsymmetrischer Betrieb bietet sich für Zellaufschlussreaktoren mit kollinear angeordneten Elektroden an, bei dem das elektrische Feld hauptsächlich in Richtung des Produktstroms ausgerichtet ist.

Bild 1 zeigt anhand vereinfachter Ersatzschaltbilder zwei Erdungskonzepte des Pulsgenerators, die im Rahmen des vorliegenden Beitrags untersucht wurden. Bei mittiger Erdung liefert der Generator eine erdsymmetrische Ausgangsspannung (Bild 2). Bei Erdung am negativen Anschluss ist die Ausgangsspannung unsymmetrisch zu Erde. Der Ladekreis des Generators ist mit stromkompensierten Drosseln aufgebaut. Während des Ladevorgangs ist die wirksame Impedanz der stromkompensierten Drosseln gering, da der Ladestrom für die stromkompensierten Drosseln ein Gegentaktsignal darstellt. Die geringe Impedanz ermöglicht ein schnelles Nachladen der Stufenkondensatoren für einen Betrieb mit einer Pulsrepetitionsrate bis zu 500 Hz. Bei der Pulserzeugung dienen die stromkompensierten Drosseln der transienten Stufenisolation. Die dann anliegende Stufenspannung bewirkt einen Stromfluss in beiden Wicklungen der Drosseln in gleicher Richtung, sodass die stromkompensierte Drossel aufgrund gespeicherter magnetischer Energie als Induktivität wirksam ist. Diese gespeicherte magnetische Energie muss jedoch bis zum Folgepuls wieder soweit abgebaut sein, dass es in der Folge nicht zu einer Sättigung des Kernmaterials kommt. Die Dioden zwischen den stromkompensierten Drosseln des Ladepfads und den Stufenkondensatoren verhindern einen Stromfluss über einen niederimpedanten Freilaufpfad, der über stufenparallele Freilaufdioden bestehen würde, und leiten den während eines Pulses in den stromkompensierten Drosseln aufgebauten Strom zu einem Dämpfungswiderstand (R_D).

Der Ausgang des Ladegeräts ist vom Erdpotential galvanisch getrennt, die zulässige Isolationsspannung U_{iso} zur Erde ist jedoch begrenzt. Eine direkte Erdung des erdnahen Netzteilaustrags würde durch die Überbrückung einer Diode einen niederimpedanten Freilaufpfad eröffnen und kam daher nicht in Betracht. Die Diode bewirkt jedoch bereits eine Erdanbindung für negative Spannungen gegenüber Erde. Ein zusätzlicher parallel geschalteter Varistor begrenzt die Isolationsspannung bei positiver Polarität.

2.2 Messergebnisse

Das Verhalten der beschriebenen Schaltung wurde bei erdsymmetrischem und erdsymmetrischem Betrieb auf der Basis von Messungen genauer untersucht. Dazu wurde der Generator mit einer ohmsch-induktiven Last verbunden, die den Pulskreis vervollständigt.

2.2.1 Pulsform

Bild 2 zeigt für den symmetrischen Betriebsfall eine Messung der beiden Ausgangsspannungen U_{A+} und U_{A-} , des Ausgangsstroms I_A , der Isolationsspannung U_{iso} sowie der Spannung U_D über dem Dämpfungswiderstand R_D . Die Messpunkte sind in Bild 1 dargestellt. Die Ladespannung für die Messungen betrug $\hat{U}_L = 200$ V pro Stufe. Die Pulsform weist einen stark gedämpften periodischen Verlauf auf, bis die Stufenkondensatoren vollständig entladen sind. Danach kommutiert der Strom in die Freilaufdioden parallel zu den Stufen. Dies verhindert eine Aufladung der Stufenkondensatoren mit negativer Polarität. Die Halbwertsbreite des Stroms beträgt $t_h = 11$ μ s. Die Spannung U_{iso} bleibt unterhalb von 10 V und damit weit unterhalb der Ansprechschwelle des Varistors von $U_{DC} = 615$ V.

Als Schalter kommen Insulated Gate Bipolartransistoren (IGBTs) zum Einsatz. Die Einschaltzeit wurde zu 40 μ s gewählt und ist damit wesentlich länger als der erzeugte Puls. Direkt nach der Entladung der Stufenkondensatoren beginnt ein Strom aus der Ladeschaltung zu fließen. Solange die Stufenschalter geschlossen sind, fließt dieser Strom statt durch den Stufenkondensator über den Stufenschalter und die Diode der nächsthöheren Stufe zur Rückleitung des Ladekreises. Aufgrund eines nur kleinen ohmschen Anteils in diesem Kreis kann der Anstieg des Ladestroms durch die Induktivität des resonanten Ladekreises L_{res} als nahezu linear betrachtet werden. Nach

dem Öffnen der Stufenschalter kommutiert der Ladestrom auf den Strompfad durch den Stufenkondensator und die stufeneigene Diode zur Rückleitung des Ladekreises.

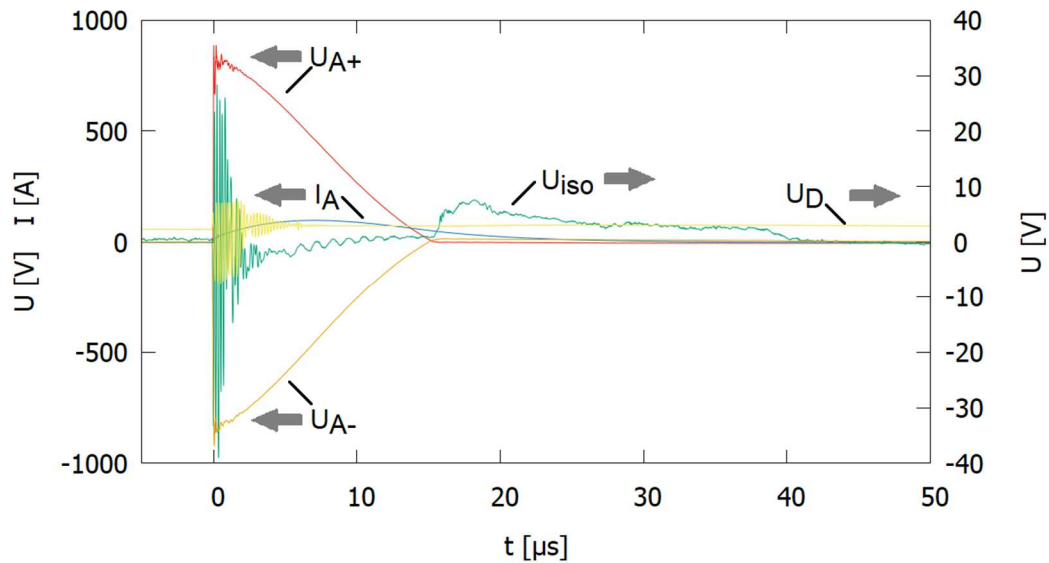


Bild 2: Betrieb bei symmetrischer Erdanbindung: Messung der Ausgangsspannungen U_{A+} und U_{A-} , des Ausgangsstroms I_A , der Isolationsspannung U_{iso} sowie der Spannung U_D über dem Dämpfungswiderstand (Ladespannung $\dot{U}_L = 200 \text{ V/Stufe}$).

2.2.2 Resonantes Laden

Die Parallelschaltung der Stufenkondensatoren und die Induktivität des resonanten Ladekreises L_{res} bilden einen Schwingkreis, dessen halbe Periodendauer der Resonanzschwingung die Aufladezeit bestimmt. Die Spannung am Ausgang der Spannungsquelle der Ladeschaltung wird durch einen Kondensator ausreichender Größe gestützt. Durch das resonante Aufladen der Stufenkondensatoren gespeist aus einer Spannungsquelle verdoppelt sich deren Ladespannung gegenüber der Quellenspannung, vorausgesetzt man kann die Verluste vernachlässigen. Die Energie, die zuvor bei geschlossenen Stufenschaltern bereits in L_{res} gespeichert wurde, bewirkt eine Erhöhung der Stufenladespannung. Somit lässt sich durch eine gegenüber der Pulslänge verlängerte Einschaltzeit der IGBTs die Höhe der Ladespannung in gewissen Grenzen beeinflussen. Dies kann auch zur Kompensation von Verlusten eingesetzt werden.

Bild 3 zeigt die Messung der Ladespannung U_L und des Ladestroms I_L , des Ausgangsstroms I_A , der Isolationsspannung U_{iso} sowie der Spannung U_D über dem Dämpfungswiderstand beim Betrieb mit symmetrischer Erdanbindung bei einer Ladespannung von $\dot{U}_L = 200 \text{ V/Stufe}$. Die Messung von U_D zeigt, dass der Strom durch R_D zu Beginn des nachfolgenden Pulses nicht vollständig abgeklungen ist. Er bewirkt jedoch noch keine Sättigung der Kerne der stromkompensierten Drosseln.

Wie die Messung zeigt, nimmt die Spannung U_D während des Ladestromflusses auf Null ab, steigt danach wieder an und nimmt erneut ab. Der Grund ist, dass durch den Ladevorgang die Dioden zwischen Ladekreis und Stufen leitfähig sind. Dies ermöglicht dem im Vergleich zum Ladestrom kleinen Strom aufgrund der im Ladekreis gespeicherten magnetischen Energie einen überlagerten Stromfluss über den niederimpedanten Freilaufpfad durch die stufenparallelen Freilaufdioden. In der positiven Generatorhälfte ist dieser kleine Strom, der in die erdseitigen Wicklungen der stromkompensierten Drosseln fließt, richtungsgleich mit dem Ladestrom. In der negativen Generatorhälfte unterscheiden sich dagegen die beiden Stromrichtungen. Dies bewirkt, dass in der negativen Generatorhälfte der Strom durch R_D nicht sofort abnimmt, sondern die induktiv gespeicherte Energie zunächst weiter in R_D umgesetzt wird, während diese Energie in den

Freilaufpfaden der positiven Generatorhälfte erhalten bleibt und erst nach dem Aufladen in R_D abgebaut wird.

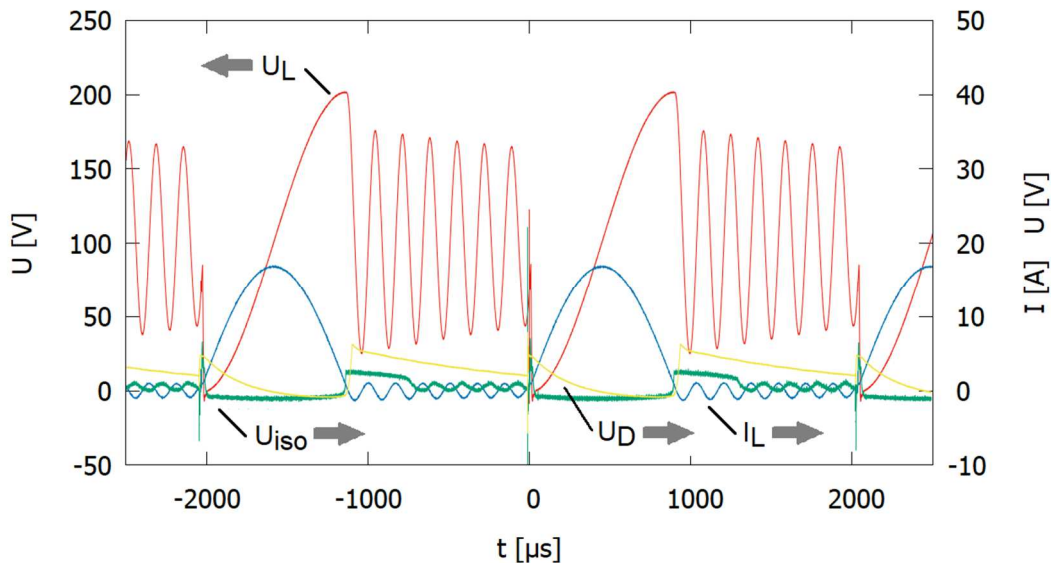


Bild 3: Betrieb bei symmetrischer Erdanbindung: Messung der Ladespannung U_L und des Ladestroms I_L , der Isolationsspannung U_{iso} sowie der Spannung U_D über dem Dämpfungswiderstand (Ladespannung $\dot{U}_L = 200 \text{ V/Stufe}$).

2.2.3 Schwingungsvermeidung mittels Diode

Die Ladespannung am Ausgang der Ladeeinrichtung U_L zeigt nach der resonanten Aufladung eine Schwingung. Mit dem Stromnulldurchgang nach dem Aufladen sperren die Dioden zwischen Ladestrompfad und Stufenkondensatoren. Die Streukapazität zwischen den beiden Wicklungen der stromkompensierten Drosseln ist jedoch noch auf die doppelte Ladespannung geladen. Dies bewirkt die gemessene schwach gedämpfte Schwingung in einem Schwingkreis, der durch L_{res} und die Parallelschaltung der Streukapazitäten der stromkompensierten Drosseln gebildet wird.

Um diese Schwingung zu vermeiden, wurde eine Diode in Serie zur Induktivität L_{res} ergänzt, die eine Entladung der genannten Streukapazitäten über L_{res} verhindert. Die Bilder 4 und 5 zeigen Messungen nach dem Einbau dieser Diode für den erdsymmetrischen Betrieb und einen Betrieb unsymmetrisch zur Erde.

2.2.4 Bedämpfung des Ladekreises

Abhängig vom gewählten Erdungskonzept unterscheiden sich die Ströme durch den Dämpfungswiderstand R_D bezüglich ihrer Höhe und dem Zeitpunkt des Stromflusses. Im Fall des erdsymmetrischen Betriebs ist der Spannungsabfall über R_D nur halb so groß wie im erdsymmetrischen Fall.

Solange die IGBTs noch nach dem Pulsende angesteuert werden, laden sich die Stufenkondensatoren wie weiter oben beschrieben noch nicht auf und der Ladestromkreis schließt sich über die Dioden zum erdseitigen Ladekreis der nachfolgenden Stufe. Betrachtet man den Stromkreis nur einer Stufe im positiven Generatorzweig, wird nur die erdseitige Wicklung der stromkompensierten Drossel vom Rückstrom durchflossen. Die überspannungsseitige Wicklung bleibt stromlos. Betrachtet man zusätzlich den Versorgungsstrom zur nachfolgenden Stufe, so kompensiert dieser Versorgungsstrom den Rückstrom der ersten Stufe. Dies gilt auch für die weiteren Stufen in der Kette. Jedoch bildet die letzte Stufe in dieser Kette eine Ausnahme: Hier schließt sich der Stromkreis über die Last zurück zu Masse. Da die Lastimpedanz in jedem Fall

höher ist als die Impedanz der kurzgeschlossenen Ladestromkreise der anderen Stufen, bewirkt die Differenz der Ströme in diesen Schleifen im Vergleich zum Strom über die Lastimpedanz ein Gleichtaktsignal in den stromkompensierten Drosseln. Anders ausgedrückt bewirkt die unvollkommene Kompensation der Teilströme durch die Wicklungen der stromkompensierten Drosseln ein Gleichtaktsignal und damit eine Energiespeicherung in den Kernen der stromkompensierten Drosseln. Diese Energie addiert sich zur bereits aufgrund der Pulsapplikation gespeicherten magnetischen Energie in den Kernen.

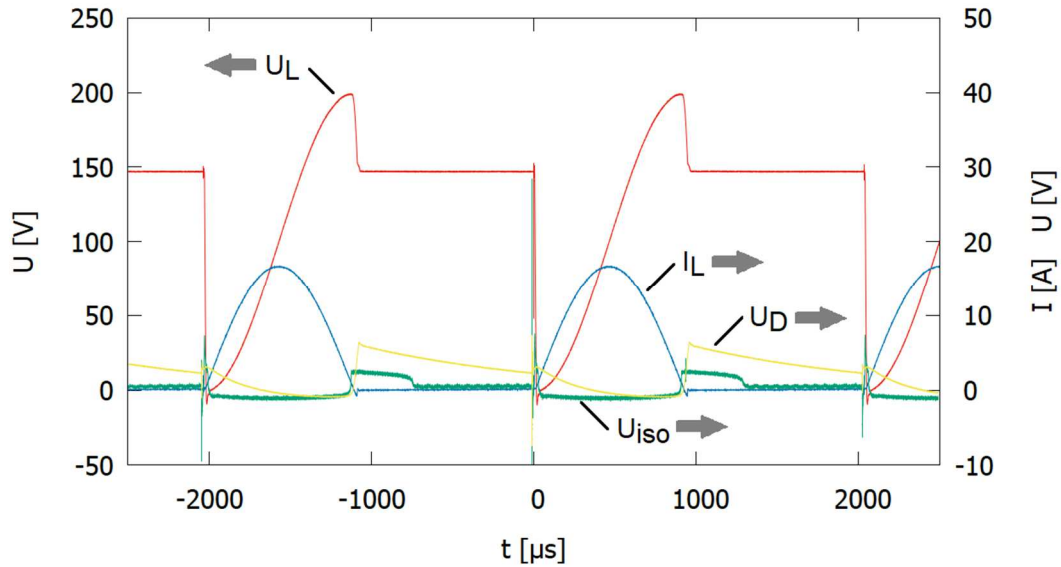


Bild 4: Betrieb bei symmetrischer Erdanbindung sowie eingebauter Diode in Serie zu L_{res} : Messung der Ladespannung U_L und des Ladestroms I_L , der Isolationsspannung U_{iso} sowie der Spannung U_D über dem Dämpfungswiderstand (Ladespannung $\dot{U}_L = 200$ V/Stufe).

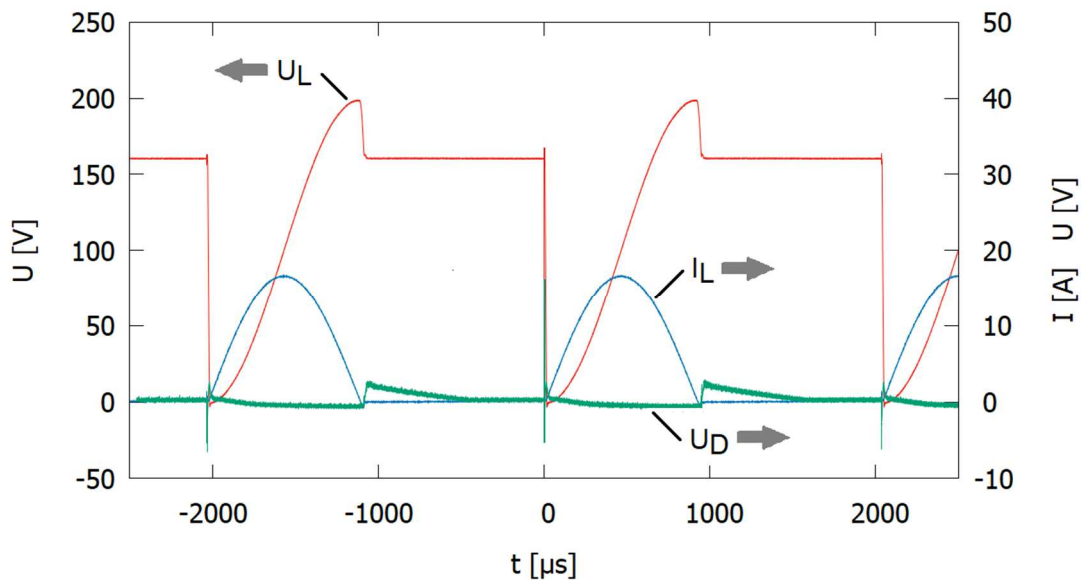


Bild 5: Betrieb bei unsymmetrischer Erdanbindung sowie eingebauter Diode in Serie zu L_{res} : Messung der Ladespannung U_L und des Ladestroms I_L sowie der Spannung U_D über dem Dämpfungswiderstand (Ladespannung $\dot{U}_L = 200$ V/Stufe.).

Beim symmetrischen Betrieb tritt aufgrund der generatormittigen Einspeisung der beschriebene Effekt zusätzlich auch in der negativen Generatorhälfte auf, nur mit dem Unterschied, dass der größere Stromanteil hier in den versorgungsseitigen Wicklungen der stromkompensierten

Drosseln fließt. Dies bewirkt einen höheren Anteil an magnetisch gespeicherter Energie in den Kernen der stromkompensierten Drosseln.

Wie die Messung für die unsymmetrische Erdankopplung (Bild 5) dagegen zeigt, ist die als Gleichtaktsignal im Ladekreis gespeicherte Energie geringer und die Spannung über dem Dämpfungswiderstand hat ausreichend Zeit um bei $f_{rep} = 500$ Hz zwischen zwei Pulsen auf Null abzusinken.

3 Magnetisch gekoppelte Störemission

3.3 Leitungsführung im Pulskreis

Die Leitungsführung im Pulskreis beeinflusst die magnetisch gekoppelte Störemission. Bild 6 zeigt den 8-stufigen Pulsgenerator in der Verschaltung für einen erdunsymmetrischen Betrieb sowie als Detail den oberen Generatoranschluss. Der Anschluss des Lastkreises erfolgt an einem Kupferblech, über das die Stufen in Serie geschaltet werden und das außermittig senkrecht im Generator angeordnet ist.



Bild 6: 8-stufiger Marxgenerator in der Verschaltung mit unsymmetrischer Erdanbindung (links): Die Anschlussleitung am Generatorausgang oben am Gehäuse (Detail rechts) ist beidseitig des Gehäuses im jeweils gleichen Abstand zur inneren Stromschiene geführt und am Fußpunkt des Gehäuses mit der erdseitigen Leitung zur Lastimpedanz unterhalb des Generators gehäusemittig zusammengeführt.

Untersucht wurden zwei Varianten der Leitungsführung:

Variante a):

Die Leitung zwischen dem oberen Generatoranschluss und dem Lastwiderstand führt rechts im Abstand von 11 cm zum ausgangsseitigen Kupferblech am Gehäuse entlang nach unten.

Variante b):

Die Verbindung zwischen dem oberen Generatoranschluss und Lastwiderstand besteht aus zwei Leitungen, die beidseitig außen am Gehäuse entlanggeführt sind. Die Abstände zum ausgangsseitigen Kupferblech betragen jeweils 11 cm.

Beiden Varianten gemeinsam ist, dass die Leitungen von der Seite betrachtet und auf der Höhe der inneren senkrechten Pulsleitung geführt wurden. Die Verbindung zwischen dem unteren, erdseitigen Generatoranschluss und der Lastimpedanz wurde mit einer Einzelleitung generatormittig kurz verbunden. Die Leitungen vom oberen Generatoranschluss sind in diesem Bereich mit dieser Leitung kombiniert und gemeinsam verlegt. Bild 6 zeigt beispielhaft die Anordnung für Variante b).

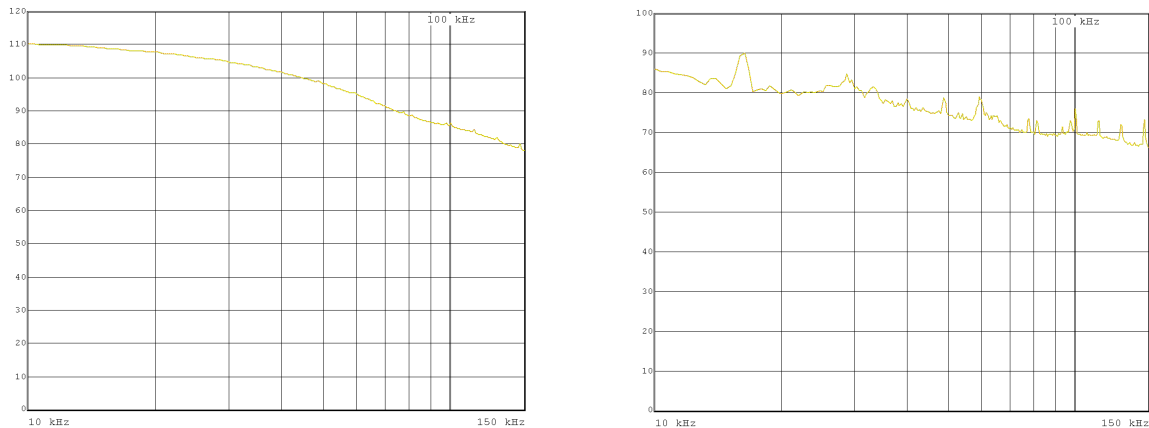


Bild 7: Messung der Störemission mit Rahmenantenne im Frequenzbereich von 10 kHz bis 150 kHz bei azimuthaler Ausrichtung, Aufstellung in 3 m Abstand von der Generatorfront auf mittlerer Generatorhöhe, Detektor: Spitzenwert, ZF-Bandbreite: 1 kHz, Anordnung nach Variante a) (links) und Variante b) (rechts).

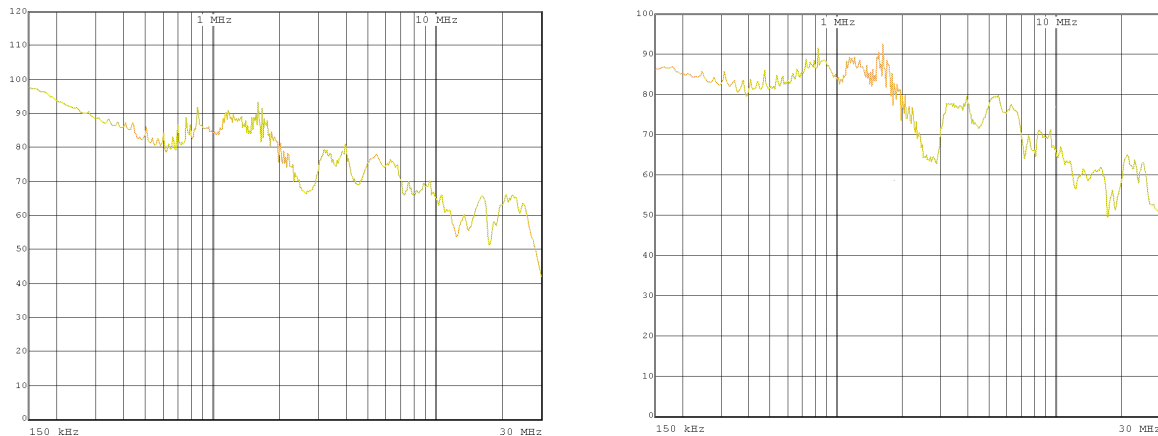


Bild 8: Messung der Störemission mit Rahmenantenne im Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz bei azimuthaler Ausrichtung, Aufstellung in 3 m Abstand von der Generatorfront auf mittlerer Generatorhöhe, Detektor: Spitzenwert, ZF-Bandbreite: 9 kHz, Anordnung nach Variante a) (links) und Variante b) (rechts).

3.2 Emissionsmessung

Um die unterschiedlichen Leiteranordnungen miteinander vergleichen zu können, wurden Störemissionsmessungen mit einer Rahmenantenne im Frequenzbereich von 10 kHz bis 30 MHz durchgeführt. Die Rahmenantenne wurde im Abstand von 3 m mittig vor dem Generator positioniert. Die Antenne wurde so justiert, dass die Höhe ihrer Mitte der Generatormitte entsprach. Bedingt durch die Versuchsanordnung wurde unter Freifeldbedingungen gemessen. Bei einem Abstand von 3 m liegen bis zu einer Frequenz von etwa 16 MHz Nahfeldbedingungen vor [4].

Für die Messungen wurde beim angeschlossenen Funkstörmessempfänger der Spitzenwertdetektor ausgewählt. Im Frequenzbereich von 10 kHz bis 150 kHz misst der Funkstörmessempfänger mit der Zwischenfrequenzbandbreite von 1 kHz, im Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz mit einer ZF-Bandbreite von 9 kHz. Der gemessene Grundstörpegel liegt abgesehen von wenigen schmalbandigen Störern unterhalb der erfassten Signalpegel. Bild 7 zeigt die gemessenen Störemissionen für die beiden Varianten im Frequenzbereich von 10 kHz bis 150 kHz. Während bei radialer Ausrichtung der Antenne die Messungen zu beiden Varianten nahezu keine Unterschiede zeigten und daher nicht dargestellt sind, nimmt die gemessene Feldstärke bei azimuthaler Antennenausrichtung in der gezeigten Reihenfolge der Varianten ab. Ein ähnliches Ergebnis zeigt sich auch für die Messungen im Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz (Bild 8). Die variantenabhängige Abnahme der gemessenen Feldstärke bei den Messungen mit azimuthaler Antennenausrichtung ist nur bei Frequenzen bis ca. 2 MHz sichtbar. Im höheren Frequenzbereich entsprechen sich die Verläufe im Hinblick auf die Höhe der gemessenen Feldstärke.

Die Messungen zeigen, dass an der Messposition eine Störaussendung in azimuthaler Richtung messbar ist. Diese Störaussendung lässt sich aber durch die Leitungsführung insbesondere im unteren Frequenzbereich bis ca. 150 kHz frequenzabhängig um einen Faktor zwischen ca. 12 dB bis 24 dB reduzieren. Selbstverständlich ist es vorgesehen, den Generator später in einem Schirmgehäuse zu betreiben. Eine optimierte Leitungsführung kann dabei einen Beitrag zur Reduktion der Störemission leisten.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Für Studien zum Betrieb eines resonant aufgeladenen halbleiterschalteten Marxgenerators an einer künstlichen ohmsch-induktiven Last wurden Messungen zum Betriebsverhalten insbesondere bei erdsymmetrischem Betrieb sowie dem Betrieb unsymmetrisch zum Erdpotential durchgeführt. Durch diese Messungen konnte gezeigt werden, dass bei erdsymmetrischem Betrieb mehr induktive Energie in den stromkompensierten Drosseln des Ladekreises gespeichert wird als bei erdsymmetrischem Betrieb. In beiden Fällen entsteht nach der Aufladung eine nur schwach gedämpfte Schwingung im Ladekreis aufgrund der Streukapazitäten der stromkompensierten Drosseln. Der Einbau einer zusätzlichen Diode im Ladekreis unterdrückt diese Schwingungen. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass durch eine geeignete Leitungsführung die Störemission aus dem Pulskreis reduziert werden kann. Zukünftige Arbeiten werden sich dem Aufbau eines größeren Generators widmen.

Literaturangaben

- [1] M.Sack, G.Mueller: Untersuchungen zu Störungen der Aufschlussgradmessung an einer Elektroportationsanlage, EMV2012, Düsseldorf, 07.-09.02.2012, S.391-398
- [2] M.Sack, J.Ruf, D.Herzog, G.Mueller: Auxiliary Power Supply for a Semiconductor-based Marx Generator, Proc. OPTIM 2021, Brasov, Romania, 02.-03.09.2021
- [3] M.Sack, F.Attmann, G.Müller: EMV-Aspekte beim Entwurf einer Elektroportationsanlage, Proc. Elektromagnetische Verträglichkeit - EMV 2010, Internationale Fachmesse und Kongress, Düsseldorf, 09.-11.03.2010, S. 635-642.
- [4] A.Schwab, W.Kürner: Elektromagnetische Verträglichkeit, 5. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2007