



(10) **DE 10 2015 219 850 A1** 2017.04.13

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2015 219 850.2**

(22) Anmeldetag: **13.10.2015**

(43) Offenlegungstag: **13.04.2017**

(51) Int Cl.: **H02M 3/158 (2006.01)**

(71) Anmelder:

**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., 80686 München,
DE; Hochschule für Angewandte Wissenschaften
Hamburg Körperschaft des Öffentlichen Rechts,
20099 Hamburg, DE**

(72) Erfinder:

**Yu, Zhe, 24558 Henstedt-Ulzburg, DE; Kapels,
Holger, 23843 Bad Oldesloe, DE; Hoffmann, Klaus
F., 22523 Hamburg, DE**

(74) Vertreter:

**Schoppe, Zimmermann, Stöckeler, Zinkler,
Schenk & Partner mbB Patentanwälte, 81373
München, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

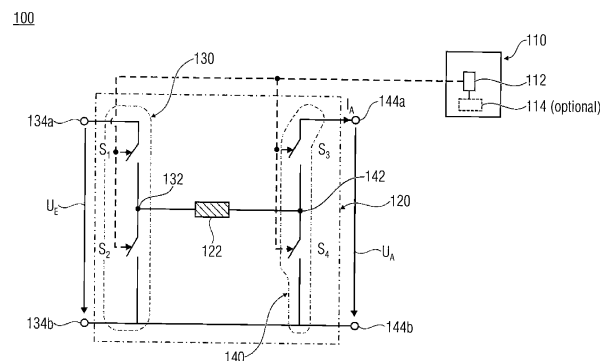
**DE 10 2006 005 853 A1
DE 10 2013 218 228 A1
CH 699 920 B1
US 2004 / 0 027 101 A1**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung zum Steuern eines schaltenden Gleichspannungswandlers, schaltender Gleichspannungswandler und Verfahren zum Steuern eines geschalteten Gleichspannungswandlers**

(57) Zusammenfassung: Eine Vorrichtung zum Steuern eines schaltenden Gleichspannungswandlers mit einer ersten Halbbrückenschaltung umfassend einen ersten Schalter und einen zweiten Schalter, mit einer zweiten Halbbrückenschaltung umfassend einen dritten Schalter und einen vierten Schalter, und mit einer Induktivität, die zwischen die Mittenabgriffe der ersten und der zweiten Halbbrückenschaltung geschaltet ist, umfasst gemäß Ausführungsbeispielen eine Steuereinheit, die ausgebildet ist, um abhängig von einer Eingangsspannung und einer Ausgangsspannung an dem schaltenden Gleichspannungswandler eine Schaltfrequenz der Schalter des Gleichspannungswandlers, die Tastverhältnisse des ersten und vierten Schalters und die Zeitverzögerung zwischen dem Einschalten des ersten und des vierten Schalters anzupassen.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf eine Vorrichtung zum Steuern eines schaltenden Gleichspannungswandlers, insbesondere zum Steuern eines Tief-Hochsetzstellers, auf einen schaltenden Gleichspannungswandler und auf ein Verfahren zum Steuern eines geschalteten Gleichspannungswandlers. Die vorliegende Erfindung bezieht sich ferner auf einen bidirektionalen kaskadierten Tief-Hochsetzsteller und Konzepte zur Auslegung und zum Steuern der Tief-Hochsetzsteller.

[0002] Zum Erzielen einer stabilen und hocheffizienten Energieversorgung werden heutzutage viele regenerative Energiesysteme durch einen bidirektionalen Gleichspannungswandler mit Zwischenenergiespeicherelementen ausgelegt. Aufgrund der Rückspeisefähigkeit nimmt der Anteil der bidirektionalen Brückenschaltungen stetig zu. Diese haben die Funktion, unterschiedliche Spannungsebenen anzupassen. Dementsprechend kommt es bei vielen Anwendungen vor, dass sich die Bereiche der Eingangs- und Ausgangsspannung des Wandlers bei einem aufladenden und entladenden Energiespeicher überlappen. Folglich wird hierfür eine spezielle Art von Gleichspannungswandlern, die sowohl im Tiefsetzmodus, d. h. reduzieren einer Eingangsspannung, als auch im Hochsetzmodus, d. h., Erhöhen einer Eingangsspannung, betrieben werden kann, benötigt.

[0003] Es existieren kaskadierte Tief-Hochsetzsteller mit vier Schaltern, die aufgrund einer einfachen Topologie und einer hohen Lastfähigkeit häufig für solche Anwendungen eingesetzt werden. Als Schnittstelle, insbesondere zwischen regenerativen Energiesystemen und Energiespeichern, hat die Effizienz des Wandlers einen signifikanten Einfluss auf den Wirkungsgrad des gesamten Systems.

[0004] In US 6,166,527 wird ein Steuerungskonzept für einen Tief-Hochsetzsteller zur Reduzierung der Leistungsverluste vorgestellt. Je nach Verhältnis von Eingangs- und Ausgangsspannung wird der Wandler in drei unterschiedlichen Modi betrieben, und zwar im Tiefsetzmodus, Hochsetzmodus oder im Tief-Hochsetzmodus. Dadurch werden die Leistungsverluste des Gleichspannungswandlers bei Tiefsetz- und Hochsetzmodi zwar verringert, aufgrund des simultanen Betriebs der vier Schalter bleiben die Verluste beim Tiefsetz-Hochsetzmodus aber immer noch groß.

[0005] In US 2012/0146594 A1 wird ein Steuerungskonzept vorgestellt, bei dem der Tief-Hochsetzsteller in fünf unterschiedlichen Modi betrieben wird. Dazu gehören der Tiefsetzmodus, ein Tiefsetzmodus mit halbiertem Schaltfrequenz, der Tief-Hochsetzmodus mit halbiertem Schaltfrequenz, der Hochsetzmodus mit halbiertem Schaltfrequenz und der Hochsetzmodus. Bei einer Annäherung von Eingangs- und Ausgangsspannung wird die Schaltfrequenz der PWM-Signale (PWM = Pulsweitenmodulation) halbiert. Dadurch kann der Bereich der Tief- und Hochsetzmodi erweitert werden und der Bereich der verlustreichen Tief-Hochsetzmodi entsprechend verkürzt werden. Dies ermöglicht zwar eine Erhöhung des Wirkungsgrads des Wandlers in der Übergangsphase zwischen dem Tiefsetzmodus und dem Hochsetzmodus, weist jedoch in dem Tief-Hochsetzmodus eine geringe Energieeffizienz auf.

[0006] Folglich besteht ein Bedarf an Konzepten zum Reduzieren oder Minimieren der Leistungsverluste in kaskadierten Tief-Hochsetzstellern.

[0007] Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht deshalb darin, eine Vorrichtung zum Steuern eines schaltenden Gleichspannungswandlers, einen schaltenden Gleichspannungswandler und ein Verfahren zum Steuern eines geschalteten Gleichspannungswandlers zu schaffen, das eine hohe Effizienz des Betriebs des Gleichspannungswandlers ermöglicht.

[0008] Diese Aufgabe wird durch den Gegenstand der unabhängigen Patentansprüche gelöst.

[0009] Ein Kerngedanke der vorliegenden Erfindung besteht darin, erkannt zu haben, dass Schaltverluste in kaskadierten Tief-Hochsetzstellern dadurch reduziert oder minimiert werden können, dass Schalter der Gleichspannungswandler spannungsfrei geschaltet werden, etwa gemäß einem ZVS-Konzept (ZVS = Zero Voltage Switching, spannungsfreies Schalten). Dies ermöglicht, hart schaltende Vorgänge, d. h., Schaltvorgänge bei denen Spannungen an den Leistungsanschlüssen der Schalter anliegen, mit Hilfe von weich schaltenden Schaltvorgängen, d. h., zumindest näherungsweise spannungsfreie oder stromfreie Schaltvorgänge, zu ersetzen. Dies wird erreicht durch Steuerungskonzepte für schaltende Gleichspannungswandler gemäß Ausführungsbeispielen.

[0010] Ein Gleichspannungswandler weist beispielsweise eine erste Halbbrückenschaltung umfassend einen ersten Schalter und einen zweiten Schalter und eine zweite Halbbrückenschaltung umfassend einen dritten

Schalter und einen vierten Schalter auf. Der schaltende Gleichspannungswandler umfasst eine Induktivität, die zwischen die Mittenabgriffe der ersten und der zweiten Halbbrückenschaltung geschaltet ist. Gemäß einem Ausführungsbeispiel umfasst eine Vorrichtung zum Steuern eines schaltenden Gleichspannungswandlers eine Steuereinheit, die ausgebildet ist, um abhängig von einer Eingangsspannung und einer Ausgangsspannung an dem schaltenden Gleichspannungswandler eine Schaltfrequenz der Schalter des Gleichspannungswandlers, die Tastverhältnisse des ersten und vierten Schalters und die Zeitverzögerung zwischen dem Einschalten des ersten Schalters und dem Einschalten des vierten Schalters anzupassen. Durch die Anpassung der Schaltfrequenz, der Tastverhältnisse und der Zeitverzögerung wird ein hocheffizienter Betrieb des Tief-Hochsetzstellers über einen großen Bereich von Arbeitspunkten bzw. bei allen erlaubten Leistungspunkten bzw. Arbeitspunkten ermöglicht.

[0011] Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel umfasst ein schaltender Gleichspannungswandler eine erste Halbbrückenschaltung umfassend einen ersten Schalter und einen zweiten Schalter und eine zweite Halbbrückenschaltung umfassend einen dritten Schalter und einen vierten Schalter. Der schaltende Gleichspannungswandler umfasst eine Induktivität, die zwischen die Mittenabgriffe der ersten und der zweiten Halbbrückenschaltung geschaltet ist. Der schaltende Gleichspannungswandler umfasst ferner eine Ansteuereinheit, die ausgebildet ist, um abhängig von einer Eingangsspannung und einer Ausgangsspannung an dem schaltenden Gleichspannungswandler eine Schaltfrequenz der Schalter des Gleichspannungswandlers, die Tastverhältnisse des ersten und vierten Schalters und die Zeitverzögerung zwischen dem Einschalten des ersten Schalters und des vierten Schalters anzupassen.

[0012] Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel umfasst ein Verfahren zum Steuern eines geschalteten Gleichspannungswandlers ein Verbinden einer Steuereinheit mit einem schaltenden Gleichspannungswandler. Der schaltende Gleichspannungswandler weist eine erste Halbbrückenschaltung umfassend einen ersten Schalter und einen zweiten Schalter und eine zweite Halbbrückenschaltung umfassend einen dritten Schalter und einen vierten Schalter auf. Der schaltende Gleichspannungswandler umfasst eine Induktivität, die zwischen die Mittenabgriffe der ersten und der zweiten Halbbrückenschaltung geschaltet ist. Das Verfahren umfasst ein Anpassen einer Schaltfrequenz der Schalter des Gleichspannungswandlers, der Tastverhältnisse des ersten und des vierten Schalters und der Zeitverzögerung zwischen dem Einschalten des ersten und des vierten Schalters abhängig von einer Eingangsspannung und einer Ausgangsspannung an dem schaltenden Gleichspannungswandler.

[0013] Gemäß weiteren Ausführungsbeispielen erfolgt die Anpassung der Schaltfrequenz, der Tastverhältnisse und der Zeitverzögerung gemeinsam und/oder basierend auf einem Strom, der durch den schaltenden Gleichspannungswandler fließt. Dies ermöglicht eine hohe Genauigkeit der eingestellten Schaltfrequenz, Tastverhältnisse und/oder Zeitverzögerung.

[0014] Weitere vorteilhafte Ausführungsformen sind der Gegenstand der abhängigen Patentansprüche.

[0015] Bevorzugte Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden nachfolgend Bezug nehmend auf die beiliegenden Zeichnungen erläutert. Es zeigen:

[0016] Fig. 1 ein schematisches Blockschaltbild einer Vorrichtung zum Steuern eines schaltenden Gleichspannungswandlers gemäß einem Ausführungsbeispiel;

[0017] Fig. 2 ein schematisches Blockschaltbild eines schaltenden Gleichspannungswandlers, wie er durch die Ansteuereinheit gemäß Fig. 1 ansteuerbar ist;

[0018] Fig. 3a bis Fig. 3f schematisch einen zeitlichen Verlauf einer Ansteuerung der Schalter gemäß einem ersten Konzept hierin beschriebener Ausführungsbeispiele;

[0019] Fig. 4a bis Fig. 4l schematisch Zustände des Stromflusses durch den schaltenden Gleichspannungswandler basierend auf dem ersten Konzept;

[0020] Fig. 5a bis Fig. 5d einen zeitlichen Verlauf der Ansteuerung der Schalter gemäß dem ersten Konzept, bei dem Totzeiten der Schalter vernachlässigt sind;

[0021] Fig. 6a bis Fig. 6c schematische Darstellungen von Kurven der von der Steuereinheit eingestellten Schaltfrequenz über eine variierende Ausgangsfrequenz des schaltenden Gleichspannungswandlers gemäß dem ersten Konzept;

- [0022]** Fig. 7a bis Fig. 7c zu den Fig. 6a bis Fig. 6c vergleichbare Verläufe der Schaltfrequenz für negative Ausgangsströme gemäß einem Ausführungsbeispiel;
- [0023]** Fig. 8a bis Fig. 8c schematische Verläufe eines von der Steuereinheit gemäß dem ersten Konzept hierin beschriebener Ausführungsbeispiele eingestellten ersten Tastverhältnisses;
- [0024]** Fig. 9a bis Fig. 9c schematische Verläufe eines von der Steuereinheit gemäß dem ersten Konzept hierin beschriebener Ausführungsbeispiele eingestellten zweiten Tastverhältnisses;
- [0025]** Fig. 10 schematisch einen Verlauf einer von der Steuereinheit gemäß dem ersten Konzept hierin beschriebener Ausführungsbeispiele eingestellten Zeitverzögerung zwischen Schaltvorgängen;
- [0026]** Fig. 11 Spannungsverläufe eines Kommutierungsvorgangs während einer Totzeit zwischen dem Ausschalten eines Schalters und dem Einschalten eines anderen Schalters des geschalteten Gleichspannungswandlers gemäß dem ersten Konzept hierin beschriebener Ausführungsbeispiele;
- [0027]** Fig. 12a bis Fig. 12c schematische Verläufe von Wirkungsgraden des ersten Konzepts hierin beschriebener Ausführungsbeispiele bei positiven ausgangsströmen;
- [0028]** Fig. 13a bis Fig. 13c schematische Verläufe von Wirkungsgraden des ersten Konzepts hierin beschriebener Ausführungsbeispiele bei negativen ausgangsströmen;
- [0029]** Fig. 14 einen Vergleich von Wirkungsgraden zwischen dem ersten Konzept hierin beschriebener Ausführungsbeispiele zum Schalten eines schaltenden Gleichspannungswandlers und einem Konzept gemäß dem Stand der Technik;
- [0030]** Fig. 15a bis Fig. 15b eine schematische Ansicht einer Variation der Zeitverzögerung gemäß einem zweiten Konzept hierin beschriebener Ausführungsbeispiele zur Ansteuerung eines schaltenden Gleichspannungswandlers;
- [0031]** Fig. 16a bis Fig. 16c Verläufe von Schaltfrequenzen, mit der die Schalter des schaltenden Gleichspannungswandlers von der Steuereinheit gemäß dem zweiten Konzept hierin beschriebener Ausführungsbeispiele steuerbar sind;
- [0032]** Fig. 17a bis Fig. 17c schematische Verläufe eines Zeitverzögerungsfaktors bei verschiedenen Verhältnissen zwischen einer Ausgangsspannung und einer Eingangsspannung bei positiven Ausgangsströmen gemäß dem zweiten Konzept hierin beschriebener Ausführungsbeispiele;
- [0033]** Fig. 18a bis Fig. 18c zu den Fig. 17a bis Fig. 17c vergleichbare Verläufe des Zeitverzögerungsfaktors für negative Werte des Ausgangsstroms gemäß dem zweiten Konzept hierin beschriebener Ausführungsbeispiele;
- [0034]** Fig. 19a bis Fig. 19c schematisch einen erzielbaren Wirkungsgrad, für das zweite Konzept hierin beschriebener Ausführungsbeispiele für einen positiven Ausgangsstrom; und
- [0035]** Fig. 20a bis Fig. 20c eine zu den Fig. 19a bis Fig. 19c vergleichbare Darstellung von Wirkungsgraden gemäß dem zweiten Konzept hierin beschriebener Ausführungsbeispiele für negative Ausgangsströme.
- [0036]** Bevor nachfolgend Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung im Detail anhand der Zeichnungen näher erläutert werden, wird darauf hingewiesen, dass identische, funktionsgleiche oder gleichwirkende Elemente, Objekte und/oder Strukturen in den unterschiedlichen Figuren mit den gleichen Bezugszeichen versehen sind, so dass die in unterschiedlichen Ausführungsbeispielen dargestellte Beschreibung dieser Elemente untereinander austauschbar ist bzw. aufeinander angewendet werden kann.
- [0037]** Nachfolgende Ausführungsbeispiele verwenden Indizes zur Unterscheidung gleicher oder gleichartiger Elemente in den Figuren, etwa Schalter oder Kapazitäten. Die Beschreibung referenziert diese Indizes individuell oder durch Verwendung des allgemeingültigen Index i . Eine Verwendung des Index i soll so verstanden werden, dass er damit alle oder jedes einzelne der jeweiligen Elemente bezeichnet.

[0038] Fig. 1 zeigt ein schematisches Blockschaltbild einer Vorrichtung **110** zum Steuern eines schaltenden Gleichspannungswandlers **120**. Der schaltende Gleichspannungswandler **120** umfasst eine erste Halbbrückenschaltung **130** und eine zweite Halbbrückenschaltung **140**. Die erste Halbbrückenschaltung **130** umfasst einen ersten Schalter S_1 und einen zweiten Schalter S_2 , die beispielsweise zu einer Serienschaltung verschaltet sind. Die erste Halbbrückenschaltung **130** umfasst einen Mittenabgriff **132**, der zwischen den Schaltern S_1 und S_2 angeordnet ist. Die zweite Halbbrückenschaltung **140** umfasst zwei Schalter S_3 und S_4 , die ebenfalls seriell miteinander verschaltet sind. Ein Mittenabgriff **142** der zweiten Halbbrückenschaltung **140** ist zwischen den Schaltern S_3 und S_4 angeordnet. Zwischen die Mittenabgriffe **132** und **142** ist eine Induktivität **122** geschaltet, so dass die Halbbrückenschaltungen **130** und **140** über die Induktivität **122** verbunden sind. Tore der Halbbrückenschaltungen **130** bzw. **140** können Anschlüsse **134a**, **134b** bzw. **144a** und **144b** umfassen. Jeweils ein Anschluss **134b** und **144b** können ebenfalls miteinander verbunden sein, so dass ein gemeinsames Referenzpotential der Halbbrückenschaltungen **130** und **140** erhalten wird. Das Blockschaltbild des schaltenden Gleichspannungswandlers kann als vereinfachtes Blockschaltbild eines kaskadierten Tief-Hochsetzstellers verstanden werden.

[0039] Die Vorrichtung **110** umfasst eine Steuereinheit **112**, die ausgebildet ist, um abhängig von einer Eingangsspannung U_E zwischen den Anschlüsse **134a** und **134b** und abhängig von einer Ausgangsspannung U_A zwischen den Anschlüssen **144a** und **144b** eine Schaltfrequenz der Schalter S_1 bis S_4 , Tastverhältnisse zumindest des ersten Schalters S_1 und des vierten Schalters S_4 und eine Zeitverzögerung zwischen Einschaltvorgängen der Schalter S_1 und S_4 anzupassen, was nachfolgend detailliert erläutert wird. Durch diese Anpassungen können Schaltverluste gering sein, so dass eine hohe Effizienz des Betriebs des schaltenden Gleichspannungswandlers **120** erhalten wird.

[0040] Gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel umfasst ein schaltender Gleichspannungswandler **100** den schaltenden Gleichspannungswandler **120**, d. h., die erste Halbbrückenschaltung **130**, die zweite Halbbrückenschaltung **140** und die Induktivität **122**. Der schaltende Gleichspannungswandler **100** umfasst dabei die Steuereinheit **112** als Ansteuereinheit. Das bedeutet, der schaltende Gleichspannungswandler **100** kann den Tief-Hochsetzsteller sowie eine Ansteuereinheit zur Anpassung der Schaltfrequenz der Schalter, der Tastverhältnisse sowie zur Anpassung der Zeitverzögerung umfassen.

[0041] Die Steuereinheit kann bspw. als Prozessor, Mikrocontroller, programmierbarer Logikbaustein (beispielsweise ein feldprogrammierbares Gatterarray, ein FPGA) oder dergleichen ausgeführt sein. Die Vorrichtung **110** kann beispielsweise einen Speicher **114** aufweisen, in dem Werte für die Schaltfrequenz, die Tastverhältnisse und/oder die Zeitverzögerung hinterlegt sind. Die hinterlegten Werte können einen Bezug zur Eingangsspannung U_E , zur Ausgangsspannung U_A und/oder einen Bezug zu einem Ausgangsstrom I_A aufweisen, so dass die hinterlegten Werte basierend auf den Bezugsgrößen ermittelbar sind. So kann die Ansteuereinheit durch Sensorwerte und/oder durch empfangene Signale Informationen bzgl. der Eingangsspannung, der Ausgangsspannung und ggf. des Ausgangsstroms aufweisen und basierend darauf einzustellende Parameter in dem Speicher auslesen. Alternativ kann die Vorrichtung **110** ausgebildet sein, um die jeweiligen Werte zu ermitteln, beispielsweise basierend auf einer von der Vorrichtung **110** implementierten oder in dem Speicher **114** gespeicherten Berechnungsvorschrift. Nachfolgende Ausführungsbeispiele sind so beschrieben, dass die Steuereinheit ausgebildet ist, um die Schaltfrequenz, die Tastverhältnisse und die Zeitverzögerung basierend auf der Eingangsspannung, der Ausgangsspannung und basierend auf dem Ausgangsstrom des schaltenden Gleichspannungswandlers zu bestimmen. Gemäß weiteren Ausführungsbeispielen ist der Gleichspannungswandler ausgebildet, um die Schaltfrequenz, die Tastverhältnisse und die Zeitverzögerung basierend auf der Eingangsspannung und der Ausgangsspannung des schaltenden Gleichspannungswandlers zu bestimmen. Der schaltende Gleichspannungswandler kann einen im Wesentlichen konstanten Ausgangsstrom aufweisen, so dass auf eine Berücksichtigung des Ausgangsstroms verzichtet werden kann. So kann bspw. eine Stromdrossel verwendet werden, um einen konstanten Stromfluss zu erhalten.

[0042] Fig. 2 zeigt ein schematisches Blockschaltbild eines schaltenden Gleichspannungswandlers **200**, wie er durch die Ansteuereinheit **112** ansteuerbar ist. Parallel zu den Schaltern S_1 bis S_4 ist jeweils eine Diode D_1 , D_2 , D_3 bzw. D_4 und eine Kapazität C_1 , C_2 , C_3 bzw. C_4 geschaltet. Kapazitäten C_E bzw. C_A können zwischen die Anschlüsse **134a** und **134b** bzw. **144a** und **144b** geschaltet sein. Die Schalter S_1 bis S_4 können als halbleiterbasierte Schalter und insbesondere als sogenannte „Leistungshalbleiter“ ausgeführt sein, etwa in Form von MOSFETs (MOSFET = Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor; Metall-Oxid-Halbleiter-Feldeffekttransistor) oder IGBTs (IGBT = Insulated Gate Bipolar Transistor; Bipolartransistoren mit isolierter Gate-Elektrode).

[0043] Die Dioden D_1 bis D_4 können beispielsweise als parasitäre Dioden der Schalter S_1 bis S_4 realisiert sein. Alternativ oder zusätzlich kann es sich um in den Schaltern S_1 bis S_4 integrierte Dioden handeln. Alternativ oder zusätzlich hierzu können die Dioden D_1 bis D_4 zusätzlich zu den Schaltern S_1 bis S_4 parallel geschaltet diskrete Dioden sein. Die Kapazitäten C_1 bis C_4 können als parasitäre Kapazitäten der Schalter S_1 bis S_4 realisiert sein. Alternativ oder zusätzlich können die Kapazitäten C_1 bis C_4 als diskrete Kapazitäten parallel zu den Schaltern S_1 bis S_4 geschaltet sein.

[0044] Die mit L bezeichnete Induktivität **122** ist als Speicherdrossel, d. h. als leistungselektronische Induktivität, einsetzbar. Ein Strom i_L durch die Induktivität **122** ist so eingezeichnet, dass er von der ersten Halbbrückenschaltung **130** zu der zweiten Halbbrückenschaltung **140** fließt. Dabei kann der Strom i_L sowohl positive als auch negative Werte annehmen, d. h. ein effektiver Stromfluss ist in beide Richtungen möglich. Über die Induktivität **122** fällt während eines Betriebs eine Spannung u_L ab. Ein Eingangsstrom I_E ist so eingezeichnet, dass eine Stromrichtung eines positiven Stroms I_E durch die Pfeilrichtung gekennzeichnet ist, d. h. ausgehend von dem Anschluss **134a** hin zu dem Schalter S_1 . Vereinfacht, wenn I_E positiv ist, fließt I_E von links nach rechts, wobei dies wechselseitig vertauschbar ist, wenn der Strom I_E negativ ist. U_A bezeichnet die Ausgangsspannung, während I_A den Ausgangsstrom bezeichnet. Eine Stromrichtung eines positiven Stroms I_A wird durch die Pfeilrichtung gekennzeichnet, d. h., wenn der Strom I_A positiv ist, fließt der Strom I_A hin zu dem Anschluss **144a**, d. h. von links nach rechts, wobei dies wechselseitig vertauschbar ist, wenn der Strom I_A negativ ist. Die Pfeilrichtungen von Strömen i_{CE} durch den Eingangskondensator C_E bzw. i_{CA} durch den Ausgangskondensator C_A bezeichnet ebenfalls die jeweils positive Stromrichtung.

[0045] Die **Fig. 3a** bis **Fig. 3f** zeigen schematisch einen zeitlichen Verlauf einer Ansteuerung der Schalter S_1 bis S_4 gemäß einem ersten Konzept hierin beschriebener Ausführungsbeispiele. Die **Fig. 3a** bis **Fig. 3f** weisen eine gemeinsame Zeitachse t auf. Die in **Fig. 3f** bezeichneten Zeitpunkte t_1 bis t_{14} sowie t_1' bis t_{14}' beziehen sich auf ein Ansteuerintervall T_1 der ersten Halbbrückenschaltung **130** und bezeichnen ebenfalls Zeitpunkte in den anderen **Fig. 3a** bis **Fig. 3e**. Die Zeitpunkte t_1' bis t_{14}' bezeichnen zu den Zeitpunkten t_1 bis t_{14} vergleichbare Zeitpunkte in vorangehenden oder nachfolgenden Ansteuerintervallen.

[0046] **Fig. 3a** zeigt einen schematischen Verlauf einer Ansteuerung der Schalter S_1 , der mit einem Signal PWM1H ansteuerbar ist, und des Schalters S_2 , der mit einem Signal PWM1L ansteuerbar ist. Die **Fig. 3b** zeigt einen schematischen Verlauf einer Ansteuerung des Schalters S_3 , der mit einem Signal PWM2L ansteuerbar ist, und des Schalters S_4 , der mit einem Signal PWM2H ansteuerbar ist. Bei den Signalen zur Ansteuerung der Schalter S_1 bis S_4 handelt es sich beispielsweise um pulswidenmodulierte Signale (PWM-Signale). Die Schalter S_1 und S_2 bzw. S_3 und S_4 können paarweise so angesteuert werden, dass sie jeweils im Wesentlichen komplementär zueinander angesteuert werden. Beispielsweise ist höchstens einer der Schalter S_1 oder S_2 bzw. S_3 oder S_4 eingeschaltet. Die **Fig. 3a** und **Fig. 3b** sind vereinfacht so dargestellt, dass sie einen niedrigen Pegel L (Low) und einen hohen Pegel H (High) aufweisen. Ein niedriger Pegel deutet einen ausgeschalteten Zustand des jeweiligen Schalters an. Jeder der Schalter S_1 bis S_4 kann gemäß einer normal leitenden oder einer normal sperrenden Konfiguration implementiert sein, vereinfacht als Schließer oder als Öffner. Der hohe Pegel H deutet einen eingeschalteten, d. h., leitenden, Zustand eines als Schließer ausgeführten Schalters an. Der ausgeschaltete Zustand bezieht sich dabei auf einen nicht leitenden Zustand. Bei einer Implementierung eines Schalters S_1 bis S_4 als Öffner kann ein gleiches Verhalten durch Invertierung des jeweiligen Signals erhalten werden.

[0047] Die Schalter S_1 und S_2 werden innerhalb der Schaltperiode T_1 angesteuert. Die Schalter S_3 und S_4 werden innerhalb der Schaltperiode T_2 angesteuert. Die Schaltperiode T_2 ist gegenüber der Schaltperiode T_1 um die Zeitverzögerung t_v verschoben und weist eine im Wesentlichen gleiche Periodendauer T auf. Die Schaltfrequenz f , mit der die Schalter S_1 bis S_4 geschaltet werden, ist beispielsweise $1/T$. Die Steuereinheit **112** ist ausgebildet, um die Zeitdauer T und mithin die Frequenz $f = 1/T$ zu verändern. Die Steuereinheit ist ferner ausgebildet, um Zeitdauern t_{S1} bis t_{S4} zu verändern, die eine jeweilige Zeitdauer oder Zeitintervall beschreiben, innerhalb der der jeweilige Schalter S_1 bis S_4 eingeschaltet ist. Die Zeitdauern t_{S1} bis t_{S4} werden auch als Einschaltzeiten bezeichnet. Zwischen den eingeschalteten Zuständen zweier Schalter S_1 und S_2 bzw. S_3 und S_4 einer Halbbrückenschaltung kann eine Totzeit t_{tot1} bis t_{tot4} angeordnet sein, in welcher jeweils beide Schalter der Halbbrückenschaltung ausgeschaltet sind. Ein Verändern der Einschaltzeiten t_{S1} bis t_{S4} kann als Veränderung eines Tastverhältnisses des jeweiligen Schalters, d. h. als Anteil innerhalb der Periodendauer T , in welcher der jeweilige Schalter eingeschaltet ist, verstanden werden.

[0048] Der Schalter S_4 wird verglichen mit dem Schalter S_1 nach der Zeitverzögerung t_v eingeschaltet. Die Zeitverzögerung t_v kann als Anteil der Periodendauer T verstanden werden und ist ebenfalls durch die Steuereinheit **112** veränderlich einstellbar.

[0049] Die hierin vorgestellten Ansteuerkonzepte weisen die gemeinsame Idee auf, die Schaltfrequenz $1/T$, die Tastverhältnisse t_S/T der Ansteuersignale und die Zeitverzögerung t_v zwischen den Ansteuersignalen für die erste Halbbrückenschaltung (linke Seite des Tief-Hochsetzstellers mit den Schaltern S_1 und S_2) und den Ansteuersignalen für die zweite Halbbrückenschaltung (rechte Seite des Tief-Hochsetzstellers mit den Schaltern S_3 und S_4) in Abhängigkeit von Arbeitspunkten des geschalteten Gleichspannungswandlers zu modulieren. Ein Arbeitspunkt bezeichnet dabei eine anliegende Eingangsspannung und eine anliegende Ausgangsspannung. Der Arbeitspunkt kann von dem Ausgangsstrom I_A abhängig oder beeinflusst sein. Durch die Modulationen kann einerseits der ZVS-entlastete Betrieb der Leistungshalbleiter (Schalter) gewährleistet werden. Andererseits können die weiteren Verluste, inklusive der Durchlassverluste in den Schaltern, der Verluste in der Speicherdrossel sowie der Verluste in den Ein- und Ausgangskondensatoren minimiert werden.

[0050] Wie es in **Fig. 3a** dargestellt ist, beträgt die Zeitdauer des High-Pegel-Zustands H des Signals PWM1H innerhalb einer Periode T den Wert t_{S1} . Das bedeutet, die Zeitdauer des Einschaltzustands des Schalters S_1 innerhalb einer Periode ist t_{S1} . Die Zeitdauer des High-Pegel-Zustands des Signals PWM1L innerhalb einer Periode ist t_{S2} . Das bedeutet, die Zeitdauer des Einschaltzustands von S_2 innerhalb einer Periode ist t_{S2} . Die Totzeit zwischen dem Ausschalten des Schalters S_1 und dem Einschalten des Schalters S_2 ist mit t_{tot1} bezeichnet.

[0051] Wie es in **Fig. 3b** dargestellt ist, weisen die Signale PWM2H und PWM2L die Periode T_2 auf, die die gleiche Periodendauer T aufweist, wie die Periodendauer T_1 der Signale PWM1H und PWM1L. Die Zeitdauer des High-Pegel-Zustands H des Signals PWM2H innerhalb einer Periode ist mit t_{S4} bezeichnet. Das heißt, die Zeitdauer des Einschaltzustands des Schalters S_4 innerhalb der Periode T ist t_{S4} . Die Zeitdauer des High-Pegel-Zustands des Signals PWM2L innerhalb der Periode T ist mit t_{S3} bezeichnet. Das heißt, die Zeitdauer des Einschaltzustands des Schalters S_3 innerhalb der Periode T ist t_{S3} . Die Totzeit zwischen dem Ausschalten des Schalters S_4 und dem Einschalten des Schalters S_3 ist mit t_{tot4} bezeichnet.

[0052] Gemäß einem Ausführungsbeispiel ist die Zeitdauer t_{S1} stets länger als die Zeitdauer t_{S4} , so dass gilt, dass $t_{S1} > t_{S4}$. Die Zeitverzögerung t_v zwischen dem Einschalten des Schalters S_1 und des Schalters S_4 weist eine Zeitdauer von ≥ 0 auf und ist gleichzeitig kleiner oder gleich als die Differenz der Zeitdauern t_{S1} und t_{S4} , so dass gilt, dass $0 \leq t_v \leq t_{S1} - t_{S4}$. Gemäß diesem Ausführungsbeispiel ist die Steuereinheit ausgebildet, um die Schalter des schaltenden Gleichspannungswandlers so anzusteuern, dass der zweite Schalter S_2 stets ausgeschaltet ist, wenn der vierte Schalter S_4 eingeschaltet ist. Das bedeutet, dass ein Schalterzustand des Schalters S_3 und ein Schalterzustand des vierten Schalters S_4 in jedem Betriebspunkt des geschalteten Spannungswandlers im Wesentlichen komplementär zueinander sind, wenn etwa die Totzeiten vernachlässigt werden. In anderen Worten sind die Schalter S_3 und S_4 gemäß diesem Ausführungsbeispiel nie gleichzeitig an. Alternativ oder zusätzlich kann die Steuereinheit ausgebildet sein, um den vierten Schalter nur in Zeitintervallen anzuschalten, in denen der erste Schalter S_1 eingeschaltet ist. Dies kann für eine Steuerung einer Kommutierung von Strömen in dem schaltenden Gleichspannungswandler genutzt werden, um die fastfreien ZVS-Zustände der Schalter auch bei veränderlichen Arbeitspunkten zu erhalten. Gemäß einem Ausführungsbeispiel ist die Steuereinheit ausgebildet, um Schaltvorgänge des Schalters S_4 nur zu Zeitpunkten anzusteuern, wenn der Schalter S_1 den eingeschalteten Zustand aufweist.

[0053] Wie es in den **Fig. 3a** und **Fig. 3b** angedeutet ist, können die Zeitdauern t_{S1} bis t_{S4} voneinander verschiedene Zeitdauern aufweisen. Gemäß anderen Ausführungsbeispielen, wie sie nachfolgend erläutert werden, können die Zeitdauern auch gleich oder paarweise gleich sein.

[0054] Eine Reihenfolge der Schaltvorgänge der Schalter gemäß den **Fig. 3a** bis **Fig. 3f** kann auch so beschrieben werden, dass ausgehend von einer Situation nach dem Zeitpunkt t_1 , in welcher der Schalter S_1 eingeschaltet ist, der Schalter S_3 zum Zeitpunkt t_2 ausgeschaltet wird. In einem darauffolgenden Zeitpunkt t_4 wird der Schalter S_4 eingeschaltet. In einem darauffolgenden Zeitpunkt t_6 wird der Schalter S_4 ausgeschaltet. In einem darauffolgenden Zeitpunkt t_8 wird der Schalter S_3 eingeschaltet. In einem darauffolgenden Zeitpunkt t_9 wird der Schalter S_1 ausgeschaltet. Darauf folgt zu einem Zeitpunkt t_{11} der Schalter S_2 eingeschaltet, um in einem darauffolgenden Zeitpunkt t_{12} ausgeschaltet zu werden. Zu einem darauffolgenden Zeitpunkt $t_{1'}$, der beispielsweise einen Beginn einer neuen Periode T der ersten Halbbrückenschaltung bezeichnet, wird der Schalter S_1 wieder eingeschaltet.

[0055] Die obige Ungleichung bezüglich der Zeitverzögerung t_v weist zwei Grenzfälle auf. Ein erster Grenzfall ist für $t_v = 0$ gegeben. In diesem Fall kann eine Reihenfolge der Schaltvorgänge der Schalter so beschrieben werden, dass die Schalter S_1 und S_4 gleichzeitig eingeschaltet werden, der Schalter S_4 ausgeschaltet wird und danach der Schalter S_3 eingeschaltet wird. Anschließend wird der Schalter S_1 ausgeschaltet. Nachfolgend wird der Schalter S_2 eingeschaltet, woraufhin die Schalter S_2 und S_3 gleichzeitig ausgeschaltet werden. Zu einem

folgenden Zeitpunkt werden die Schalter S_1 und S_4 wieder gleichzeitig, d. h., in mit geringer oder keiner Verzögerung, eingeschaltet. Für den zweiten Grenzfall, wenn $t_v = t_{S1} - t_{S4}$ ist, kann die Reihenfolge der Schalter so zusammengefasst werden, dass zuerst der Schalter S_1 eingeschaltet und zu einem nachfolgenden Zeitpunkt der Schalter S_3 ausgeschaltet wird. Zu einem folgenden Zeitpunkt wird der Schalter S_4 eingeschaltet. Zu einem darauffolgenden Zeitpunkt werden die Schalter S_1 und S_4 gleichzeitig ausgeschaltet. Zu einem späteren Zeitpunkt werden die Schalter S_2 und S_3 gleichzeitig eingeschaltet. Zu einem nachfolgenden Zeitpunkt wird der Schalter S_2 ausgeschaltet. Zu einem späteren Zeitpunkt wird der Schalter S_1 eingeschaltet.

[0056] Die Fig. 3c und Fig. 3d zeigen die Verläufe der Spannung u_L und des Stroms i_L der Speicherdrossel L , vgl. Fig. 2, innerhalb einer Periode. Während dem Einschalten der Schalter S_1 und S_3 ist die Spannung u_L gleich der Differenz zwischen der Eingangsspannung U_E und der Ausgangsspannung U_A , d. h. $u_L = U_E - U_A$. Der Strom i_L ist negativ und ändert sich mit der Steigung $(U_E - U_A)/L$. Während dem Einschalten der Schalter S_1 und S_4 ist die Spannung u_L gleich der Eingangsspannung U_E . Der Strom i_L steigt mit der Steigung U_E/L und dreht seine Richtung von negativ zu positiv um. Während dem Einschalten der Schalter S_2 und S_3 liegt die negative Spannung $-U_A$ an der Speicherdrossel an. Der Strom i_L bzw. dessen Stromstärke sinkt und dreht sich von positiv zu negativ. Der Strom i_L der Speicherdrossel dreht seine Richtung zweimal innerhalb einer Periode um, d. h. er weist zweimal je Periode einen Vorzeichenwechsel auf. Bei einem Ausschalten der Schalter S_1 und S_4 ist der Speicherdrosselstrom i_L beispielsweise positiv. Beim Ausschalten der Schalter S_2 und S_3 ist der Strom i_L negativ.

[0057] In Fig. 3e werden die Spannungen u_{DS1} und u_{DS2} jeweils auf den Schaltern S_1 und S_2 dargestellt. Die Schalter S_1 und S_2 können so angesteuert werden, dass sie stets spannungslos umgeschaltet werden, das bedeutet, es kann ZVS-entlastet geschaltet werden (ZVS = Zero Voltage Switching). So ist beispielsweise die Spannung u_{DS2} zum Zeitpunkt t_{11} , zu dem der Schalter S_2 eingeschaltet wird, beispielsweise 0. Zum Zeitpunkt t_1 , zu dem der Schalter S_1 eingeschaltet wird, ist die Spannung u_{DS1} gleich 0 oder näherungsweise 0. Zum Zeitpunkt t_8 , zu dem der Schalter S_3 eingeschaltet wird, ist die Spannung u_{DS3} gleich 0 oder näherungsweise 0. Zum Zeitpunkt t_4 , zu dem der Schalter S_4 eingeschaltet wird, ist die Spannung u_{DS4} beispielsweise gleich 0 oder näherungsweise 0.

[0058] Fig. 4a bis Fig. 4l zeigen schematisch Zustände des Stromflusses während der in den Fig. 3a bis Fig. 3f beschriebenen Schaltperioden.

[0059] Zum Zeitpunkt t_9 wird der Schalter S_1 spannungslos ausgeschaltet. Aufgrund der nicht abgebauten Spannung u_{DS2} ist die Diode D_2 zum Zeitpunkt t_9 immer noch gesperrt. Folglich kann der positive Strom i_L gegebenenfalls ausschließlich auf die Kapazitäten C_1 und C_2 kommutieren. Dadurch wird die Kapazität C_1 aufgeladen und die Kapazität C_2 wird entladen. Zum Zeitpunkt t_{10} ist die Spannung u_{DS2} des Schalters S_2 auf 0 abgebaut. Der Strom i_L fließt durch die Diode D_2 . Zum Zeitpunkt t_{11} wird der Schalter S_2 spannungslos eingeschaltet. Der Strom i_L kommutiert von der Diode auf den Kanal des Schalters S_2 , wie es beispielsweise in den Fig. 4g, Fig. 4h und Fig. 4i dargestellt ist. Diese Kommutierung kann mit einem geringen Maß an Verlusten bzw. näherungsweise ohne Verluste erfolgen.

[0060] Zum Zeitpunkt t_{13} wird der Schalter S_2 spannungslos ausgeschaltet. Aufgrund der nicht abgebauten Spannung u_{DS1} ist die Diode D_1 zum Zeitpunkt t_{13} immer noch gesperrt. Folglich kann der negative Strom i_L gegebenenfalls ausschließlich auf die Kondensatoren C_1 und C_2 kommutieren. Dadurch wird die Kapazität C_1 entladen und die Kapazität C_2 wird aufgeladen. Zum Zeitpunkt t_{14} ist die Spannung u_{DS1} des Schalters S_1 abgebaut und weist beispielsweise einen Wert von 0 oder näherungsweise 0 auf. Der Strom i_L fließt durch die Diode D_1 . Zum Zeitpunkt t_1' des nachfolgenden Schaltintervalls wird der Schalter S_1 spannungslos eingeschaltet. Der Strom i_L kommutiert von der Diode auf den Kanal des Schalters S_1 , wie es beispielsweise in den Fig. 4j, Fig. 4k und Fig. 4l dargestellt ist. Diese Kommutierung kann mit einem geringen Maß an Verlusten und gegebenenfalls näherungsweise ohne Verluste erfolgen. In der Fig. 3f sind die Spannungen u_{DS3} und u_{DS4} jeweils für die Schalter S_3 und S_4 dargestellt. Die Schalter S_3 und S_4 werden ebenfalls ZVS-entlastet und mithin verlustlos oder verlustarm umgeschaltet, wie es vorangehend für die Schalter S_1 und S_2 beschrieben ist.

[0061] Zum Zeitpunkt t_2 wird der Schalter S_3 spannungslos ausgeschaltet. Wegen der nicht abgebauten Spannung u_{DS4} ist die Diode D_4 zum Zeitpunkt t_2 gesperrt. Folglich kann der negative Strom i_L nur auf die Kondensatoren C_3 und C_4 kommutieren. Dadurch wird die Kapazität C_3 aufgeladen und die Kapazität C_4 wird entladen. Zum Zeitpunkt t_3 ist die Spannung u_{DS4} des Schalters S_4 auf 0 reduziert. Der Strom i_L fließt durch die Diode D_4 . Zum Zeitpunkt t_4 wird der Schalter S_4 spannungslos eingeschaltet. Der Strom kommutiert nachfolgend ohne Verluste oder verlustarm von der Diode auf den Kanal des Schalters S_4 , wie es in den Fig. 4a, Fig. 4b und Fig. 4c dargestellt ist.

[0062] Zum Zeitpunkt t_6 wird der Schalter S_4 spannungslos ausgeschaltet. Wegen der nicht abgebauten Spannung u_{DS3} ist die Diode D_3 zum Zeitpunkt t_6 gesperrt. Folglich kann der positive Strom i_L nur auf die Kondensatoren C_3 und C_4 kommutieren. Dadurch wird die Kapazität C_3 entladen und die Kapazität C_4 wird aufgeladen. Zum Zeitpunkt t_7 ist die Spannung u_{DS3} des Schalters S_3 auf null reduziert. Der Strom i_L fließt durch die Diode D_3 . Zum Zeitpunkt t_8 wird der Schalter S_3 spannungslos eingeschaltet. Der Strom kommutiert verlustarm oder ohne Verluste von der Diode auf den Kanal des Schalters S_3 , wie es in den **Fig. 4d**, **Fig. 4e** und **Fig. 4f** dargestellt ist.

[0063] Aus den **Fig. 3a** bis **Fig. 3f** wird deutlich, dass eine Veränderung der Eingangsspannung und/oder der Ausgangsspannung eine Veränderung der Zeitpunkte bewirken kann, zu denen die entsprechenden Schalter spannungsfrei eingeschaltet oder ausgeschaltet werden können. Die Steuereinheit **112** ist ausgebildet, um abhängig von der Eingangsspannung und der Ausgangsspannung an dem schaltenden Gleichspannungswandler die Schaltfrequenz der Schalter, die Tastverhältnisse von Schaltern und die Zeitverzögerung zwischen dem Einschalten des Schalters S_1 und des Schalters S_4 anzupassen.

[0064] Bevor nachfolgend Bezug genommen wird auf eine Anpassung der Schaltfrequenz, der Tastverhältnisse und der Zeitverzögerung werden kurz einige Hintergründe erläutert. Wie vorangehend ausgeführt, können die Totzeiten t_{tot1} , t_{tot2} , t_{tot3} und t_{tot4} sehr kurz und im Vergleich zu den Einschaltzeiten, d. h. den Zeiten, in denen die jeweiligen Schalter leitend sind, t_{S1} , t_{S2} , t_{S3} und t_{S4} vernachlässigbar sein. Dies gilt bspw. bei niedrigen Frequenzen, etwa bis zu Frequenzen von 150 kHz. Bei hohen Frequenzen, etwa oberhalb von 1 GHz können die Totzeiten t_{tot1} , t_{tot2} , t_{tot3} und t_{tot4} einen relevanten Zeitanteil umfassen. Bei einer Vernachlässigung der Totzeiten t_{tot1} , t_{tot2} , t_{tot3} und t_{tot4} ergibt sich näherungsweise:

$$T = t_{S1} + t_{S2} = t_{S3} + t_{S4} \quad (1)$$

[0065] Die Tastverhältnisse D_1 des ersten Schalters S_1 und D_2 des Schalters S_4 (Engl.: Duty Ratio bzw. Duty Cycle) können definiert werden zu:

$$D_1 = \frac{t_{S1}}{T}, D_2 = \frac{t_{S4}}{T} \quad (2)$$

[0066] Daraus kann hergeleitet werden, dass:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{D_1}{1 - D_2} \quad (3)$$

[0067] Das bedeutet, dass das Spannungsübersetzungsverhältnis von Eingangsspannung zur Ausgangsspannung U_A von den Tastverhältnissen D_1 und D_2 abhängig sein kann, insbesondere von den Einschaltzeiten t_{S1} und t_{S2} sowie der Periode T . Das Spannungsübersetzungsverhältnis kann unabhängig von der Zeitverzögerung t_r zwischen dem Einschalten der Schalter S_1 und S_4 sein. Durch Variation der Tastverhältnisse D_1 und D_2 kann die Ausgangsspannung U_A gesteuert und/oder geregelt werden. Das Übersetzungsverhältnis kann wie folgt hergeleitet werden:

Allgemein kann für eine Speicherdrossel L gelten, dass:

$$u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt} \Rightarrow i_L(t) = i_L(t_1) + \frac{1}{L} \cdot \int_{t_1}^t u_L dt \quad (4)$$

[0068] Da sich der Stromverlauf des Speicherdrosselstroms i_L in stationären Zuständen des geschalteten Gleichspannungswandlers wiederholen kann, ergibt sich beispielsweise, dass:

$$i_L(T + t_1) = i_L(t_1) \quad (5)$$

[0069] Durch Einsetzen der Gleichung 4 in Gleichung 5 ergibt sich, dass

$$\int_{t_1}^{t_1+T} u_L dt = 0$$

(6)

[0070] Die Fig. 5a bis Fig. 5d entsprechen im Wesentlichen den Fig. 3a bis Fig. 3d, wobei die Totzeiten vernachlässigt sind. Der Fig. 5c sind die Spannungsniveaus der Spannung u_L an der Speicherdrossel in den einzelnen Zeitpunkten t_1 bis t_{IV} zu entnehmen. Dabei gilt:

$$\begin{aligned} t_1 \rightarrow t_{II}: u_L &= U_E - U_A \\ t_{II} \rightarrow t_{III}: u_L &= U_E \\ t_{III} \rightarrow t_{IV}: u_L &= U_E - U_A \\ t_{IV} \rightarrow t_1: u_L &= -U_A \end{aligned} \quad (7)$$

[0071] Durch Einsetzen der Gleichung 7 in Gleichung 6 ergibt sich, dass:

$$\begin{aligned} \int_{t_1}^{t_1+T} u_L dt &= \int_{t_1}^{t_{II}} u_L dt + \int_{t_{II}}^{t_{III}} u_L dt + \int_{t_{III}}^{t_{IV}} u_L dt + \int_{t_{IV}}^{t_1} u_L dt = 0 \\ \Downarrow \\ (U_E - U_A) \cdot t_V + U_E \cdot t_{S4} + (U_E - U_A) \cdot (t_{S1} - t_V - t_{S4}) + (-U_A) \cdot (T - t_{S1}) &= 0 \\ \Downarrow \\ \frac{U_A}{U_E} = \frac{t_{S1}}{T - t_{S4}} = \frac{D_1}{1 - D_2} \end{aligned}$$

(8)

[0072] Der Speicherdrosselstrom i_L ist beim Ausschalten der Schalter S_2 bis S_3 negativ, vgl. beispielsweise Fig. 3d zu den Zeitpunkten t_{13} und t_2 oder Fig. 5d zum Zeitpunkt t_1 . Allein durch einen negativen Strom i_L ist nicht garantiert, dass die Schalter S_2 und S_3 ZVS-entlastet und mithin verlustlos geschaltet werden. Zusätzlich kann beispielsweise eine Anforderung darin bestehen, dass der Betrag des Stroms i_L größer als ein Referenzwert I_0 ist, damit die zu den Schaltern parallel geschalteten Kondensatoren C_2 bzw. C_3 innerhalb der Totzeiten vollständig umgeladen werden können. Der Referenzwert I_0 des Stroms wird später genauer beschrieben.

[0073] Ähnlich kann dies für den Strom i_L für die Schalter S_1 und S_4 gelten. Zu den Zeitpunkten t_9 und t_6 ist der Strom beispielsweise positiv. Auch hier kann eine Anforderung darin bestehen, dass der Betrag des Stroms i_L größer als der Wert I_0 ist, damit die zu den Schaltern geschalteten Kondensatoren C_1 bzw. C_4 innerhalb der Totzeiten vollständig umgeleitet werden kann. Ist dies erfüllt, können die Schalter S_1 und S_4 verlustlos umgeschaltet werden. Mathematisch können die Bedingungen für verlustlose Umschaltung der Schalter wie folgt dargestellt werden:

$$\begin{aligned} \text{Bedingung 1: } \max(i_L(t_2), i_L(t_{13})) &\leq -I_0 \\ \text{Bedingung 2: } \min(i_L(t_6), i_L(t_9)) &\geq I_0 \end{aligned} \quad (9)$$

[0074] Die Steuereinheit 112 kann ausgebildet sein, um diese Bedingungen durch Variation der Schaltfrequenzen, der Tastverhältnisse und der Zeitverzögerung zu erfüllen. Die Werte des Stroms i_L zu den Zeitpunkten t_2 , t_6 , t_9 und t_{13} sind beispielsweise von Arbeitspunkten, der Schaltfrequenz $f = 1/T$ bzw. der Schaltperiode T und der Zeitverzögerung t_V abhängig. Ein Arbeitspunkt bezieht sich dabei auf die Parameter Eingangsspannung U_E , die Ausgangsspannung U_A und den Ausgangsstrom I_A . Wenn sich die Arbeitspunkte ändern, etwa wenn die Ausgangsspannung U_A sinkt, der Laststrom I_A steigt oder die Versorgungsspannung U_E schwankt, und eine Anpassung der Schaltfrequenz f und/oder der Zeitverzögerung t_V nicht erfolgt, verändern sich die Werte des Stroms i_L beim Ausschalten der Schalter zu den Zeitpunkten t_2 , t_6 , t_9 und t_{13} . Dies kann dazu führen, dass die oben genannten Bedingungen der Gleichung 9 verletzt werden. Eine Anpassung der Schaltfrequenz

f, der Zeitverzögerung t_v in Abhängigkeit der Arbeitspunkte ermöglicht eine Vermeidung der Verletzung der Bedingungen.

[0075] Wie oben ausgeführt, ist das Spannungsübersetzungsverhältnis von den Tastverhältnissen D_1 und D_2 beeinflusst. Für ein Spannungsübersetzungsverhältnis U_A/U_E können jeweils mehrere Kombinationen von D_1 und D_2 existieren. Beispielsweise kann sich für ein Spannungsübersetzungsverhältnis $U_A/U_E = 2$ die Kombination $D_1 = 0,7$ und $D_2 = 0,65$ oder $D_1 = 0,8$ und $D_2 = 0,6$ oder $D_1 = 0,9$ und $D_2 = 0,55$ anbieten. Das erste Tastverhältnis und das zweite Tastverhältnis kann basierend auf dem Spannungsübersetzungsverhältnis bestimmt werden. Bei einer Hochsetzung der Eingangsspannung ($U_A > U_E$) und/oder einer Tiefsetzung ($U_A < U_E$) kann das erste Tastverhältnis stets größer oder gleich sein als das zweite Tastverhältnis.

[0076] Nachfolgend wird Bezug genommen auf die Anpassung der Schaltfrequenz. Die **Fig. 6a** bis **Fig. 6c** zeigen schematische Verläufe der von der Steuereinheit eingestellten Schaltfrequenz f über eine variierende Ausgangsfrequenz U_A . **Fig. 6a** zeigt diesen Verlauf für die Eingangsspannung $U_E = 300$ V, **Fig. 6b** für die Eingangsspannung $U_E = 400$ V und **Fig. 6c** für die Eingangsspannung $U_E = 500$ V. Jede der **Fig. 6a** bis **Fig. 6c** zeigt fünf Kurven, die mit 1 bis 5 bezeichnet sind und mit aufsteigender Nummernfolge eine aufsteigende Stromstärke von 1 A, 2 A, 3 A, 4 A bzw. 5 A aufweisen. Die Steuereinheit ist ausgebildet, um ausgehend von einer Situation, in der die Ausgangsspannung U_A der Eingangsspannung U_E entspricht, d. h. ausgehend von einem Wert der Ausgangsspannung U_A von 300 V (**Fig. 6a**), 400 V (**Fig. 6b**) bzw. 500 V (**Fig. 6c**), bei einer sinkenden oder steigenden Ausgangsspannung die Schaltfrequenz zunächst zu erhöhen. Anders ausgedrückt kann die Steuereinheit ausgebildet sein, um bei einer Gleichheit der Spannungen U_A und U_E eine zumindest lokal minimale Die Steuereinheit ist ausgebildet, um die Schaltfrequenz solange zu erhöhen, minimale Schaltfrequenz einzustellen. Die Steuereinheit ist ausgebildet, um bis die Ausgangsspannung U_A einen Referenzwert **202a–c** oder **204a–e** erreicht hat. Die Referenzwerte **202i** bezeichnen dabei einen Referenzwert bei einer Erhöhung der Ausgangsspannung. Die Referenzwerte **204i** bezeichnen einen entsprechenden Referenzwert bei einer Verringerung der Ausgangsspannung U_A . Wenn die Ausgangsspannung den Referenzwert überschritten hat, das bedeutet, wenn die Ausgangsspannung U_A größer ist als die Referenzwerte **202i** bzw. kleiner ist als die Referenzwerte **204i**, ist die Steuereinheit ausgebildet, um die Schaltfrequenz zu reduzieren. Beispielsweise kann die Steuereinheit ausgebildet sein, um die Ausgangsspannung U_A , die Eingangsspannung U_E und/oder den Strom I_A zu erfassen und um basierend darauf eine einzustellende Schaltfrequenz zu bestimmen.

[0077] Wie es in den **Fig. 6a** bis **Fig. 6c** dargestellt ist, ist die Steuereinheit bspw. ausgebildet, um mit zunehmender positiver Stromstärke die Schaltfrequenz zu reduzieren. Mit zunehmender Eingangsspannung U_E wird die Schaltfrequenz f erhöht. Das bedeutet, dass die Steuereinheit ausgebildet ist, um die Schaltfrequenz abhängig von der Eingangsspannung U_E zu bestimmen. Die dargestellten Verläufe der einzustellenden Schaltfrequenz sind qualitativ zwischen den verschiedenen Stromstärken gleich oder vergleichbar. Eine hohe Effizienz kann auch ohne Berücksichtigung des Stroms erhalten werden. Eine zusätzliche Berücksichtigung des Stroms kann davon ausgehend eine weitere Verbesserung ermöglichen.

[0078] Die Steuereinheit ist ferner ausgebildet, um eine Reduzierungsgeschwindigkeit, mit der die Schaltfrequenz bei zunehmender Stromstärke erhöht wird, mit einer Erhöhung des Betrags des Ausgangsstroms I_A zu reduzieren. Beispielsweise kann die Reduzierungsgeschwindigkeit linear, einer Wurzelfunktion folgend oder quadratisch mit zunehmendem Strombetragswert absinken. Die Steuereinrichtung kann ausgebildet sein, um mit einer Steigerung der Eingangsspannung U_E die Schaltfrequenz zu erhöhen. Die Schaltfrequenz f kann durch die Steuereinheit **112** oder durch äußere Einflüsse begrenzt werden. beispielsweise kann eine maximale Schaltfrequenz von der Schaltgeschwindigkeit der angeordneten Leistungshalbleiter S_1 bis S_4 beeinflusst oder abhängig sein. Eine minimale Schaltfrequenz f kann ausgelegt sein, um Spannungsrippel der Ausgangsspannung U_A zu reduzieren und/oder um ein Volumen der Schaltung zu begrenzen.

[0079] In anderen Worten kann die Steuereinheit ausgebildet sein, um mit einer Vergrößerung der Differenz zwischen der Eingangsspannung U_E und der Ausgangsspannung U_A die Schaltfrequenz zuerst, d. h. bis zum Erreichen eines Referenzwerts **202i** oder **204i**, schnell zu erhöhen und dann wieder zu reduzieren. Die Steuereinheit kann ausgebildet sein, um mit einer Erhöhung des Betrags des Ausgangsstroms I_A die Schaltfrequenz zu reduzieren.

[0080] Die **Fig. 7a** bis **Fig. 7c** zeigen zu den **Fig. 6a** bis **Fig. 6c** vergleichbare Verläufe der Schaltfrequenz f . Die Kombinationen aus Ausgangsspannung U_A und Eingangsspannung U_E entsprechen der jeweiligen **Fig. 6a**, **Fig. 6b** bzw. **Fig. 6c**. Die Kurven 1 bis 5 zeigen in aufsteigender Reihenfolge einen aufsteigenden Stromwert – 5 A, –4 A, 3 A, –2 A bis –1 A. Wird der Betragswert der jeweiligen Stromstärke herangezogen, so wird deutlich,

dass die Steuereinheit ausgebildet ist, um die Schaltfrequenz bei einer Erhöhung des Betrags des Stromwerts I_A zu reduzieren.

[0081] Wie es in den **Fig. 6a** bis **Fig. 6c** dargestellt ist, ist die Steuereinheit ausgebildet, um mit einer Vergrößerung der Spannungsdifferenz zwischen der Eingangsspannung U_E und der Ausgangsspannung U_A zunächst steil zu erhöhen und dann wieder relativ langsam zu reduzieren. Das bedeutet, dass ausgehend von den Referenzpunkten **202i** bzw. **204i** ein Betrag eines Gradienten in Richtung der Situation, dass die Eingangsspannung U_E der Ausgangsspannung U_A entspricht, größer ist als ein Betrag eines Gradienten in eine Richtung weg von dieser Situation. Die Steuereinheit ist ferner konfiguriert, um die Schaltfrequenz f bei einer Erhöhung des Ausgangsstroms oder eines Betrags hiervon zu erhöhen. Die Steuereinheit ist darüber hinaus konfiguriert, um die Schaltfrequenz mit einer Erhöhung der Eingangsspannung U_E zu erhöhen. In den **Fig. 6a** bis **Fig. 6c** ist für die Fälle $U_E = 300\text{ V}$, $I_A = 5\text{ A}$ und $U_E = 400\text{ V}$ und $I_A = 5\text{ A}$ ersichtlich, dass die Steuereinheit konfiguriert ist, um die Schaltfrequenz in der Nähe der Arbeitspunkte, wo die Ausgangsspannung U_A gleich der Eingangsspannung U_E ist, zu begrenzen. Vorliegend wird die minimale Schaltfrequenz beispielsweise auf 15 kHz begrenzt.

[0082] Die von der Steuereinheit ausgeführte Variation der Schaltfrequenz f gemäß den **Fig. 7a** bis **Fig. 7c** entspricht im Wesentlichen den Verläufen bei einem positiven Ausgangsstrom gemäß den **Fig. 6a** bis **Fig. 6c**. Mit der Erhöhung des Betrags des Ausgangsstroms I_A kann die Steuereinheit konfiguriert sein, um die Schaltfrequenz f zu reduzieren. Die Reduzierungsgeschwindigkeit kann sich mit der Erhöhung des Betrags des Ausgangsstroms I_A verlangsamen.

[0083] Nachfolgend wird Bezug genommen auf die Einstellung der Tastverhältnisse durch die Steuereinheit. Wie es anhand der **Fig. 8a** bis **Fig. 8c** erläutert wird, ist die Steuereinheit ausgebildet, um ausgehend von einer Situation **206**, bei der die Ausgangsspannung U_A kleiner ist als die Eingangsspannung U_E , das Tastverhältnis D_1 mit steigender Ausgangsspannung U_A zu vergrößern. Die Steuereinheit ist ausgebildet, um das Tastverhältnis D_1 so zu erhöhen, dass ein Maximalwert **208** in einer Situation **212** erhalten wird, in der die Ausgangsspannung U_A der Eingangsspannung U_E entspricht.

[0084] Bei einer über die Situation **212** steigenden Ausgangsspannung U_A ist die Steuereinheit beispielsweise ausgebildet, um das Tastverhältnis D_1 zu verringern. Ein Umfang oder eine Intensität, d. h. eine Geschwindigkeit dieser Verringerung erfolgt in einem geringeren Umfang als eine Verringerung des Tastverhältnisses D_1 bei von der Situation **212** ausgehenden Verringerung der Ausgangsspannung U_A . Die Steuereinheit kann ausgebildet sein, um ausgehend von der Situation **212** hin zu der Situation **206** das Tastverhältnis D_1 in einem gleichen oder vergleichbaren Maß zu reduzieren, wie es ausgehend von der Situation **206** hin zu der Situation **212** erhöht wurde.

[0085] In anderen Worten kann die Steuereinheit ausgebildet sein, um das Tastverhältnis D_1 mit Erhöhung der Ausgangsspannung U_A schnell zu vergrößern, wenn die Ausgangsspannung U_A niedriger ist als die Eingangsspannung U_E . Wenn die Ausgangsspannung U_A größer ist als die Eingangsspannung U_E , so ist die Steuereinheit ausgebildet, um das Tastverhältnis D_1 ausgehend von der Situation **212** mit Erhöhung der Ausgangsspannung U_A zuerst zu reduzieren. Überschreitet die Ausgangsspannung U_A einen Referenzpunkt **214i**, der für jede Kombination aus Ausgangsspannung U_A , Eingangsspannung U_E und Ausgangsstrom I_A bestimmbar ist, so kann die Steuereinheit ausgebildet sein, um das Tastverhältnis D_1 wieder leicht zu erhöhen. In einem Arbeitspunkt, bei dem die Ausgangsspannung U_A gleich der Eingangsspannung U_E ist, kann die Steuereinheit ausgebildet sein, um das Tastverhältnis D_1 gemäß dem Maximalwert **208** einzustellen. Der Maximalwert kann bspw. in einem Bereich zwischen $0,3$ und 1 , zwischen $0,6$ und $0,99$ oder zwischen $0,9$ und $0,97$ liegen. Die Steuereinheit kann ferner ausgebildet sein, um das Tastverhältnis D_1 mit einer Erhöhung eines Betragswerts des Ausgangsstroms I_A zu erhöhen, wie es beispielsweise in **Fig. 8c** ersichtlich ist. Mit einer Vergrößerung der Differenz zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung ist die Steuereinheit konfiguriert, um das Tastverhältnis D_1 zu reduzieren. In einem Bereich, in dem die Ausgangsspannung niedriger ist als die Eingangsspannung, ist die Steuereinheit konfiguriert, um das Tastverhältnis D_1 sehr schnell zu ändern, d. h. zu reduzieren. In dem Bereich, in dem die Ausgangsspannung größer ist als die Eingangsspannung, ist die Steuereinheit konfiguriert, um das Tastverhältnis D_1 relativ langsam zu ändern.

[0086] Die **Fig. 9a** bis **Fig. 9c** zeigen schematische Verläufe für das von der Steuereinheit eingestellte Tastverhältnis D_2 bei positivem Ausgangsstrom I_A . Gemäß einem Ausführungsbeispiel ist die Steuereinheit ausgebildet, um ausgehend von einer Situation **216**, bei der die Ausgangsspannung U_A größer ist als die Eingangsspannung U_E , das Tastverhältnis D_2 mit sinkender Ausgangsspannung U_A bis auf einen Minimalwert **218** zu verkleinern. Der Minimalwert **218** kann beispielsweise von der Steuereinheit eingestellt werden, wenn die Situation **212** vorliegt, d. h. wenn die Ausgangsspannung U_A der Eingangsspannung U_E entspricht. Ausgehend

von der Situation **212** kann die Steuereinheit ausgebildet sein, um bei sinkender Ausgangsspannung U_A das Tastverhältnis D_2 weniger stark zu steigern als bei ansteigender Ausgangsspannung U_A . Beispielsweise kann jeder Kurvenverlauf 1 bis 5 der jeweiligen **Fig. 9a**, **Fig. 9b** bzw. **Fig. 9c** einen Verlauf des von der Steuereinheit eingestellten Tastverhältnisses D_2 angeben, der bei einem Anliegen der Ausgangsspannung U_A , der Eingangsspannung U_E und des Ausgangsstroms I_A eingestellt wird. Die Steuereinheit kann ferner ausgebildet sein, um die Tastverhältnisse D_1 und/oder D_2 so einzustellen, dass die Bedingung $U_A/U_E = D_1/(1 - D_2)$ im Wesentlichen erfüllt ist. Das bedeutet, dass die Bedingung zumindest in einem Toleranzbereich von höchstens 15%, höchstens 10% oder höchstens 5% für die Tastverhältnisse D_1 und/oder D_2 erfüllt ist.

[0087] In anderen Worten kann die Steuereinheit ausgebildet sein, um das Tastverhältnis D_2 mit Erhöhung der Ausgangsspannung U_A zuerst zu vergrößern und dann zu reduzieren, wenn die Ausgangsspannung U_A niedriger ist als die Eingangsspannung U_E . Die Reduzierung kann bis zum Arbeitspunkt erfolgen, indem die Ausgangsspannung U_A gleich der Eingangsspannung U_E ist. Wenn die Ausgangsspannung U_A größer ist als die Eingangsspannung U_E , kann die Steuereinheit ausgebildet sein, um das Tastverhältnis D_2 mit Erhöhung der Ausgangsspannung U_A schnell zu erhöhen. Im Arbeitspunkt, bei dem die Ausgangsspannung U_A gleich der Eingangsspannung U_E ist, ist die Steuereinheit ausgebildet, um das minimale Tastverhältnis **218** einzustellen. Der Minimalwert kann bspw. in einem Bereich zwischen 0 und 1, zwischen 0,01 und 0,3 oder zwischen 0,015 und 0,2 liegen. Ein Wert des Tastverhältnisses D_2 kann über die in Gleichung 3 angegebene Beziehung mit dem Wert des Tastverhältnisses D_1 zusammenhängen, so dass ein Tastverhältnis aus einem bestimmten anderen Tastverhältnis bestimmbar ist. Mit Erhöhung des Betrags des Ausgangsstroms I_A ist die Steuereinheit ausgebildet, um das Tastverhältnis D_2 zu reduzieren, wie es beispielsweise in den **Fig. 9a** bis **Fig. 9c** zwischen den Kurven 1 und 2 ersichtlich ist.

[0088] Nachfolgend wird Bezug genommen auf eine Einstellung der Zeitverzögerung t_v durch die Steuereinheit.

[0089] **Fig. 10** zeigt schematisch einen Verlauf einer von der Steuereinheit eingestellten Zeitverzögerung t_v über einen Verlauf des Ausgangsstroms I_A . Die Steuereinheit ist ausgebildet, um die Zeitverzögerung bei einem ansteigenden Ausgangsstrom I_A zu verringern. Beispielsweise kann der Verlauf der Zeitverzögerung t_v bei negativen Ausgangsströmen I_A asymptotisch gegen den Wert einer Zeitdifferenz der Zeitdauern $t_{s1} - t_{s4}$ verlaufen. Bei positiven Ausgangsströmen kann der Wert beispielsweise asymptotisch gegen einen Wert null verlaufen. Alternativ kann ein Wert größer null als Minimalwert implementiert sein und/oder ein geringerer Wert t_v als $(t_{s1} - t_{s4})$ als Maximalwert implementiert sein. Alternativ zu dem dargestellten Verlauf kann auch ein linearer oder beliebiger anderer Verlauf der Zeitverzögerung von der Steuereinheit implementiert sein. Gegenüber den eingangs erwähnten bekannten Konzepten ermöglicht eine vorangehend beschriebene Anpassung der Schaltfrequenz, der Tastverhältnisse und der Zeitverzögerung, dass eine hohe Effizienz des Tief-Hochsetzstellers erhalten wird, da auf eine harte Schaltung der Schalter verzichtet wird. Die Steuereinheit kann ausgebildet sein, um bei einem negativen Ausgangsstrom I_A des schaltenden Gleichspannungswandlers die Zeitverzögerung t_v zu erhöhen, wenn der Betrag des Ausgangsstroms I_A steigt. Die Steuereinheit kann ausgebildet sein, um bei einem positiven Ausgangsstrom I_A des schaltenden Gleichspannungswandlers die Zeitverzögerung t_v zu reduzieren, wenn der Betrag des Ausgangsstroms I_A steigt.

[0090] In anderen Worten kann die Steuereinheit ausgebildet sein, um bei einem positiven Ausgangsstrom I_A die Zeitverzögerung t_v mit Vergrößerung von I_A zu reduzieren, bis gleich oder etwas größer als null. Bei einem negativen Ausgangsstrom ist die Steuereinheit ausgebildet, um die Zeitverzögerung t_v mit Vergrößerung des Betrags von I_A bis gleich oder etwas kleiner als den Wert $t_{s1} - t_{s4}$.

[0091] Zur Verdeutlichung der erhaltbaren Effizienz werden nachfolgend einige mathematische Erläuterungen dargelegt. Zur Erzielung einer maximalen Effizienz eines Tief-Hochsetzstellers gehört eine Minimierung der Leistungsverluste P_V in dem Tief-Hochsetzsteller. Die Leistungsverluste P_V bestehen überwiegend aus folgenden Teilen:

- Schaltverluste P_{SS} in den Schaltern
- Durchlassverluste P_{SD} in den Schaltern
- Kernverluste P_{LK} in der Speicherdrossel
- Durchlassverluste (oder ohmsche Verluste) P_{LD} in der Speicherdrossel
- Verluste P_{CE} im Eingangskondensator
- Verluste P_{CA} im Ausgangskondensator

[0092] Die Leistungsverluste können dargestellt werden als

$$P_V = P_{SS} + P_{SD} + P_{LK} + P_{LD} + P_{CE} + P_{CA} \quad (10)$$

[0093] Mit hierin beschriebenen Konzepten können die Bedingungen unter Gleichung 9 erfüllt werden, so dass die Schalter S_1 bis S_4 stets ZVS-entlastet, d. h. näherungsweise verlustlos, umgeschaltet werden können. Unter diesen zwei Bedingungen ergibt sich näherungsweise, dass $P_{SS} = 0$.

[0094] Ferner sind die Durchlassverluste in den Schaltern und in der Speicherdrossel, die Kernverluste in der Speicherdrossel und die Verluste in den Ein- und Ausgangskondensatoren alle vom Verlauf des Speicherdrosselstroms I_L abhängig. Je kleiner der Effektivwert $I_{L,eff}$ von I_L ist, desto kleiner sind die Verluste P_{SD} , P_{LK} , P_{LD} , P_{CE} und P_{CA} . Folglich kann der Effektivwert $I_{L,eff}$ unter den zwei Bedingungen der Gleichung 9 minimiert werden, um eine hohe bis maximale Effizienz zu erzielen.

[0095] Darüber hinaus kann dargestellt werden, dass der Effektivwert $I_{L,eff}$ bei einem Arbeitspunkt (U_E , U_A , I_A) eine Funktion der Schaltfrequenz f , der Zeitverzögerung t_v und der Tastverhältnisse D_1 und D_2 ist. Der Effektivwert $I_{L,eff}$ kann beispielsweise als eine Funktion wie folgt definiert werden:

$$I_{L,eff}(x), x = \{x_1 = f, x_2 = t_v, x_3 = D_1, x_4 = D_2\} \quad (11)$$

[0096] Unter Berücksichtigung der Bedingung gemäß Gleichung 3 für die Tastverhältnisse D_1 und D_2 kann das nachfolgend dargestellte Optimierungsproblem auch formuliert und gelöst werden, um die hohe bzw. maximale Effizienz bei einem Arbeitspunkt (U_E , U_A , I_A) zu erhalten:

Minimieren von $I_{L,eff}(x)$, $x = \{x_1 = f, x_2 = t_v, x_3 = D_1, x_4 = D_2\}$ unter:

$$\text{Bedingung 1: } \max(i_L(t_2), i_L(t_{13})) \leq -I_0$$

$$\text{Bedingung 2: } \min(i_L(t_6), i_L(t_9)) \geq I_0$$

$$\text{Bedingung 3: } \frac{x_3}{1-x_4} = \frac{U_A}{U_E}$$

$$\text{Bedingung 4: } 0 \leq x_2 \leq \frac{x_3 - x_4}{x_1}$$

(12)

[0097] Die zuvor beschriebenen optimalen Schaltfrequenzen, optimale Zeitverzögerung und die optimalen Tastverhältnisse können Lösungen dieses Optimierungsproblems darstellen.

[0098] Gemäß den Gleichungen 9 und 12 ist ein Wert I_0 Teil des Optimierungsproblems. Vorzugsweise ist der Wert des Stroms I_0 innerhalb eines Wertebereichs, der als moderat bezeichnet werden kann, d. h., größer als 0 jedoch kleiner als ein Maximalwert. So kann der Effekt auftreten, dass die Kapazitäten C_1 bis C_4 nicht innerhalb der Totzeiten umgeladen werden, wenn der Strom I_0 kleiner als erforderlich ist. Dies kann dazu führen, dass die Schalter nicht ZVS-entlastet, d. h. verlustarm oder verlustlos umgeschaltet werden. Wenn der Wert des Stroms I_0 größer als erforderlich ist, können die Schalter S_1 bis S_4 zwar verlustlos umgeschaltet werden. Jedoch kann der Effektivwert $I_{L,eff}$ größer werden als notwendig, so dass die Effizienz des Gleichspannungswandlers verschlechtert wird. Ein geeigneter Wert des Stroms I_0 kann beispielsweise wie nachfolgend beschrieben bestimmt werden.

[0099] Unter der Annahme, dass MOSFETs als Schalter für den Tief-Hochsetzsteller eingesetzt werden, können die Spannungsverläufe eines Kommutierungsvorgangs während der Totzeit t_{tot} zwischen dem Ausschalten des Schalters S_2 und dem Einschalten des Schalters S_1 wie in **Fig. 11** dargestellten werden. Bei den dargestellten Verläufen bezeichnet u_{GS1} die Gate-Source-Spannung des Schalters S_1 , u_{GS2} bezeichnet die Gate-Source-Spannung des Schalters S_2 , u_{DS1} bezeichnet die Drain-Source-Spannung des Schalters S_1 , u_{DS2} bezeichnet die Drain-Source-Spannung des Schalters S_2 , Δu_{GS} bezeichnet die Änderung der Gate-Source-Spannung, Δu_{DS} bezeichnet die Änderung der Drain-Source-Spannungen, t_{tot} bezeichnet die Totzeit und t_{um} bezeichnet die Zeitdauer des Umladens der Kapazitäten. Während einer Zeitspanne t_{um} werden die Kapazitäten C_1 und C_2 vom Speicherdrosselstrom i_L komplett umgeladen. Da die Änderung des Stroms i_L innerhalb der Totzeit sehr klein ist, kann angenommen werden, dass i_L innerhalb t_{um} konstant bleibt und gleich einem Wert $I_{L,tot}$ ist. Somit kann gelten, dass:

$$I_{L,tot} = 2 \cdot \frac{\Delta Q_{oss}}{t_{um}}$$

(13)

[0100] ΔQ_{oss} bezeichnet dabei die Änderung der Ladungsmenge in einer Ausgangskapazität C_{oss} .

[0101] Die Ausgangskapazität C_{oss} eines MOSFETs kann als Funktion der Drain-Source-Spannung u_{ds} formuliert werden, so dass gilt:

$$C_{oss} = f(u_{DS}) \quad (14)$$

[0102] Dementsprechend ist die Änderung der Ladungsmenge ΔQ_{oss} mit einer Änderung Drain-Source-Spannung Δu_{DS} verknüpft:

$$\Delta Q_{oss} = \int_0^{\Delta u_{DS}} C_{oss} du_{DS} = \int_0^{\Delta u_{DS}} f(u_{DS}) du_{DS}$$

(15)

[0103] Durch Einsetzen der Gleichung 15 in Gleichung 13 ergibt sich:

$$I_{L,tot} = 2 \cdot \frac{\int_0^{\Delta u_{DS}} f(u_{DS}) du_{DS}}{t_{um}}$$

(16)

[0104] Da die Änderung der Drain-Source-Spannung Δu_{DS} der Schalter S_1 und S_2 gleich der Eingangsspannung U_E ist und die Änderung einer entsprechenden Spannung der Schalter S_3 und S_4 gleich der Ausgangsspannung U_A ist, kann zur Bestimmung eines geeigneten Wertes des Stroms I_0 der größere Wert zwischen U_E und U_A für Δu_{DS} eingesetzt werden. Darüber hinaus kann es erforderlich sein, dass die Umladungszeit t_{um} kürzer als die Totzeit t_{tot} ist. Daraus ergibt sich, dass:

$$I_{L,tot} \geq 2 \cdot \frac{\int_0^{\max(U_E, U_A)} f(u_{DS}) du_{DS}}{t_{tot}}$$

(17)

[0105] Ein optimaler Wert für I_0 ergibt sich somit zu

$$I_0 = 2 \cdot \frac{\int_0^{\max(U_E, U_A)} f(u_{DS}) du_{DS}}{t_{tot}}$$

(18)

[0106] Das vorangehend beschriebene Konzept zum Schalten von Schaltern eines geschalteten Gleichspannungswandlers ermöglicht einen hohen Wirkungsgrad, wie es durch die **Fig. 12a** bis **Fig. 12c** für einen positiven Ausgangsstrom I_A und in den **Fig. 13a** bis **Fig. 13c** für negative Ausgangsströme I_A verdeutlicht ist. Der entsprechend geschaltete Tief-Hochsetzsteller erreicht in allen Figuren einen Wirkungsgrad η von über 99,5% für den Fall, dass die Eingangsspannung U_E gleich der Ausgangsspannung U_A ist. Mit Reduzierung des Betrags des Ausgangsstroms steigt der Wirkungsgrad. In den meisten Arbeitspunkten kann ein Wirkungsgrad von über 99% erhalten werden.

[0107] **Fig. 14** zeigt einen Vergleich von Wirkungsgraden zwischen dem vorangehend beschriebenen Konzept zum Schalten eines schaltenden Gleichspannungswandlers und einem bekannten Konzept gemäß dem Stand

der Technik. Der Vergleich ist unter anderem unter folgenden Bedingungen durchgeführt: es wurde der gleiche MOSFET für die Schalter eingesetzt, die Eingangsspannung U_E beträgt 400 V, der Ausgangsstrom I_A beträgt 3 A. Die Ausgangsspannung wird zwischen 200 V und 600 V variiert. Ein Verlauf **222** des Wirkungsgrads η ist in allen dargestellten Arbeitspunkten größer als ein Verlauf **224** des Wirkungsgrads η eines hartschaltenden Konzepts.

[0108] Nachfolgend wird Bezug genommen auf ein weiteres Konzept zum Ansteuern der Schalter S_1 bis S_4 , wie es durch die Steuereinheit **112** implementierbar ist. Die Steuereinheit kann ausgebildet sein, um die Schalter S_1 und S_2 durch komplementäre Signale PWM1H und PWM1L anzusteuern. Die Einschaltzeit von S_1 innerhalb einer Schaltperiode T ist t_{S1} , d. h. innerhalb der Schaltperiode T ist der Schalter S_1 für die Zeitdauer t_{S1} leitend geschaltet. Die Einschaltzeit des Schalters S_2 innerhalb der Schaltperiode ist t_{S2} . Die Schalter S_4 und S_3 werden durch die komplementären Signale PWM2H und PWM2L angesteuert. Die Einschaltzeit des Schalters S_4 innerhalb einer Schaltperiode T ist t_{S4} . Die Einschaltzeit des Schalters S_3 innerhalb einer Schaltperiode ist t_{S3} . Gemäß dem zweiten Konzept sind die Einschaltzeiten der Schalter S_1 und S_4 im Wesentlichen identisch, so dass näherungsweise, d. h. innerhalb eines Toleranzbereichs von höchstens 15%, höchstens 10% oder höchstens 5%, gilt, dass $t_{S2} = t_{S4}$. Dementsprechend kann ebenfalls gelten, dass die Einschaltzeit der Schalter S_2 und S_3 im Wesentlichen identisch ist, so dass näherungsweise gilt, dass $t_{S2} = t_{S3}$. Das bedeutet, die Steuereinheit ist gemäß dem zweiten Konzept konfiguriert, um das erste Tastverhältnis und das zweite Tastverhältnis so zu bestimmen und/oder einzustellen, dass das erste Tastverhältnis in jedem Betriebspunkt des geschalteten Spannungswandlers dem zweiten Tastverhältnis entspricht. Dies ist beispielsweise für D_1 gleich 0,5 erfüllt. Hier kann die Steuereinheit eine gegenüber dem vorangehend beschriebenen Konzept veränderte Variation der Zeitverzögerung t_v ausführen. Wie es anhand der **Fig. 15a** und **Fig. 15b** beschrieben ist, kann ausgehend von einem Zeitpunkt 0, zu dem der Schalter S_1 eingeschaltet wird, die Zeitverzögerung negativ sein, das bedeutet, der Schalter S_4 wird vor dem Schalter S_1 eingeschaltet und ist zum Zeitpunkt 0 eingeschaltet. Dies gilt, wie es beispielsweise in **Fig. 15a** angedeutet ist, für positive Ausgangsströme I_A . Liegen negative Ausgangsströme I_A vor, so kann die Zeitverzögerung t_v positiv sein, das bedeutet, der Schalter S_4 wird nach dem Schalter S_1 eingeschaltet und ist zum Zeitpunkt 0 ausgeschaltet. In anderen Worten kann die Steuereinheit ausgebildet sein, um bei einem positiven Ausgangsstrom (siehe **Fig. 15a**) den Schalter S_4 früher als den Schalter S_1 einzuschalten.

[0109] Beispielsweise kann definiert werden, dass der Einschaltzeitpunkt des Schalters S_1 den Zeitpunkt 0 bezeichnet und der Einschaltzeitpunkt des Schalters S_4 t_i ist. In diesem Fall gilt, dass $-t_{S1} < t_i < 0$. eine Reihenfolge der Schaltvorgänge der Schalter in diesem Fall kann lauten: S_4 eingeschaltet; S_2 ausgeschaltet; S_1 eingeschaltet; S_4 ausgeschaltet und S_3 eingeschaltet; S_1 ausgeschaltet; S_2 eingeschaltet; S_3 ausgeschaltet; S_4 eingeschaltet.

[0110] Bei einem negativen Ausgangsstrom, wie es in **Fig. 15b** dargestellt ist, kann der Schalter S_4 später als der Schalter S_3 eingeschaltet werden. Wenn erneut definiert wird, dass der Einschaltzeitpunkt des Schalters S_1 null ist und der Einschaltzeitpunkt des Schalters S_4 mit t_i bezeichnet ist, dann kann gelten, dass $0 < t_i < t_{S1}$ ist. Die Reihenfolge der Schaltvorgänge der Schalter kann dann lauten: S_1 eingeschaltet; S_3 ausgeschaltet; S_4 eingeschaltet, S_1 ausgeschaltet; S_2 eingeschaltet; S_4 ausgeschaltet; S_3 eingeschaltet; S_2 ausgeschaltet; S_1 eingeschaltet.

[0111] Für die von der Steuereinheit eingestellten Tastverhältnisse kann gelten, dass $D = t_{S1}/T = t_{S4}/T$, so dass basierend auf dem Spannungsübersetzungsverhältnis ein Zusammenhang mit dem Tastverhältnis D ermittelbar ist, gemäß:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{D}{1 - D}$$

(19)

[0112] Die **Fig. 16a** bis **Fig. 16c** zeigen Verläufe von Schaltfrequenzen, mit der die Schalter des schaltenden Gleichspannungswandlers von der Steuereinheit gemäß dem zweiten Konzept steuerbar sind. Wie es im Zusammenhang mit den **Fig. 6a** bis **Fig. 6c** beschrieben ist, kann die Steuereinheit ausgebildet sein, um bei einer Vergrößerung der Differenz zwischen der Eingangsspannung U_E und der Ausgangsspannung U_A die Schaltfrequenz f schnell zu erhöhen und nach Durchlaufen von Referenzpunkten **204a–d** wieder zu reduzieren. Darüber hinaus kann die Steuereinheit ausgebildet sein, um gemäß dem zweiten Konzept bei einem Anstieg des Betrags des Ausgangsstroms I_A die Schaltfrequenz f zu reduzieren. Wie es im Zusammenhang mit den **Fig. 6a** bis **Fig. 6c** und **Fig. 7a** bis **Fig. 7c** beschrieben ist, kann die Steuereinheit ausgebildet sein,

um die Reduzierungsgeschwindigkeit, mit der die Schaltfrequenz bei einer Erhöhung des Betrages des Ausgangsstroms I_A verlangsamt wird, mit einer Erhöhung des Betrags des Ausgangsstroms I_A zu reduzieren. Die Steuereinheit kann ferner ausgebildet sein, um bei einer Steigerung der Eingangsspannung U_E die Schaltfrequenz f allmählich zu erhöhen. Für eine maximale und minimale Schaltfrequenz kann ebenfalls analog dem ersten Konzept gelten, dass die Steuereinheit ausgebildet ist, um die maximale Schaltfrequenz basierend auf einem verwendeten Leistungshalbleiter zu wählen. Die minimale Schaltfrequenz kann von der Steuereinheit so gewählt werden, dass Rippel der Ausgangsspannung und/oder ein Volumen der Schaltung begrenzt ist. Verglichen mit dem vorangehend beschriebenen ersten Konzept sind die in **Fig. 16a**, **Fig. 16b** bzw. **Fig. 16c** dargestellten von der Steuereinheit bestimmten optimalen Schaltfrequenzen deutlich niedriger, obwohl eine gleiche Induktivität L angeordnet ist.

[0113] Unterschiede zwischen den Konzepten ergeben sich beispielsweise bei der Bestimmung der Zeitverzögerung durch die Steuereinheit.

[0114] Wie es im Zusammenhang mit der **Fig. 15a** beschrieben ist, kann die Steuereinheit ausgebildet sein, um bei einem positiven Ausgangsstrom I_A den Schalter S_4 vor dem Schalter S_1 einzuschalten. Bei einem negativen Ausgangsstrom kann die Steuereinheit, wie es im Zusammenhang mit der **Fig. 15b** beschrieben ist, ausgebildet sein, um dem Schalter S_4 später als den Schalter S_1 einzuschalten. Für die Zeitverzögerung t_v kann beispielsweise gelten, dass

$$|t_v| = |0 - t_i| \text{ mit } t_i = \alpha \cdot T \quad (20)$$

wobei α der Zeitverzögerungsfaktor ist.

[0115] Die **Fig. 17a** bis **Fig. 17c** zeigen schematische Verläufe eines Zeitverzögerungsfaktors α bei jeweils verschiedenen Verhältnissen zwischen der Ausgangsspannung U_A und der Eingangsspannung U_E und über verschiedene Werte eines positiven Ausgangsstroms I_A . **Fig. 18a** bis **Fig. 18c** zeigen entsprechende Verläufe des Zeitverzögerungsfaktors α für negative Werte des Ausgangsstroms I_A . Die Zeitverzögerung t_v kann beispielsweise als α multipliziert mit der Periodendauer T darstellbar sein, das bedeutet $t_v = \alpha T$. Für positive Ausgangsströme I_A kann der Zeitverzögerungsfaktor α einen negativen Wert aufweisen, wie es in den **Fig. 17a** bis **Fig. 17c** ersichtlich ist. Für negative Ausgangsströme I_A kann der Zeitverzögerungsfaktor α positive Werte aufweisen, wie es in den **Fig. 18a** bis **Fig. 18c** ersichtlich ist. Wird beispielsweise die **Fig. 17a** mit der **Fig. 18a**, die **Fig. 17b** mit der **Fig. 18b** oder die **Fig. 17c** mit der **Fig. 18c** verglichen, so wird ersichtlich, dass die jeweiligen Werte des Zeitverzögerungsfaktors α an einer Abszisse, die für den Zeitverzögerungsfaktors α den Wert null aufweist, im Wesentlichen gespiegelt sein können.

[0116] Für jede Kurve 1 bis 5 in jedem der Diagramme der **Fig. 17a** bis **Fig. 17c** und **Fig. 18a** bis **Fig. 18c** existiert ein Bereich **222i**, der die Situation **212**, d. h. die Ausgangsspannung U_A entspricht der Eingangsspannung U_E , umfasst. Mit zunehmendem Betragswert des Stromes I_A kann der Bereich **222i** einen größeren Bereich der Ausgangsspannung U_A umfassen. Innerhalb des Bereichs **222i** ist die Steuereinheit ausgebildet, um den Zeitverzögerungsfaktors α im Wesentlichen unverändert zu lassen. Ausgehend von den Bereichen **222i** ist die Steuereinheit beispielsweise ausgebildet, um bei zunehmender oder abnehmender Ausgangsspannung U_A einen Betragswert des Zeitverzögerungsfaktors α zu reduzieren. Das bedeutet, eine Zeitdifferenz zwischen den Schaltvorgängen des Schalters S_1 und des Schalters S_4 wird reduziert. Die Steuereinheit kann ausgebildet sein, um den Betragswert des Zeitverzögerungsfaktors in einem Bereich zwischen 0 und 1, zwischen 0 und 0,8, zwischen 0 und 0,65, oder in einem Bereich zwischen 0 und 0,5 zu bestimmen. Die Steuereinheit kann ausgebildet sein, um einen Betragswert des Zeitverzögerungsfaktors bei zunehmender Ausgangsstromstärke I_A zu reduzieren.

[0117] Das bedeutet, die Steuereinheit kann ausgebildet sein, um bei einem positiven Ausgangsstrom den Zeitverzögerungsfaktor α gemäß den **Fig. 17a** bis **Fig. 17c** zu modulieren. Bei einem negativen Ausgangsstrom kann die Steuereinheit ausgebildet sein, um den Zeitverzögerungsfaktor α gemäß den **Fig. 18a** bis **Fig. 18c** zu modulieren. Dies kann auch so verstanden werden, dass die Steuereinheit ausgebildet sein kann, um bei einem positiven Ausgangsstrom I_A des schaltenden Gleichspannungswandlers den Schalter S_1 einzuschalten während der Schalter S_4 eingeschaltet ist, vgl. **Fig. 15a**, und um einen Betrag der Zeitverzögerung t_v zu reduzieren, wenn der Betrag des Ausgangsstroms I_A steigt, vgl. **Fig. 17a** bis **Fig. 17c**. Die Steuereinheit kann alternativ oder zusätzlich ausgebildet sein, um bei einem negativen Ausgangsstrom I_A des schaltenden Gleichspannungswandlers den Schalter S_4 einzuschalten während der Schalter S_1 eingeschaltet ist, vgl. **Fig. 15b**, und um den Betrag der Zeitverzögerung t_v zu erhöhen, wenn der Betrag des Ausgangsstroms I_A steigt, vgl. **Fig. 18a** bis **Fig. 18c**.

[0118] Die Fig. 19a bis Fig. 19c zeigen schematisch einen erzielbaren Wirkungsgrad η , wenn die Steuereinheit konfiguriert ist, um das zweite Konzept zu implementieren, für einen positiven Ausgangsstrom I_A . Die Fig. 20a bis Fig. 20c zeigen einen entsprechenden Wirkungsgrad η in Prozent für negative Ausgangsströme I_A . In allen Fällen kann ein Wirkungsgrad von über 99,8% erhalten werden.

[0119] Zusammenfassend kann das erste Konzept so beschrieben werden, dass die Schalter jeweils einer Halbbrücke stets komplementär zueinander mit Berücksichtigung einer Totzeit getaktet werden, d. h. der Schalter S_1 wird komplementär zum Schalter S_2 geschaltet und der Schalter S_4 wird komplementär zum Schalter S_3 geschaltet. Der als Low-Side-Schalter eingesetzte Schalter S_4 der zweiten Halbbrücke wird beispielsweise nur innerhalb des Einschaltzustands des High-Side-Schalters S_1 der ersten Halbbrücke zunächst eingeschaltet und danach ausgeschaltet.

[0120] Unter diesen Voraussetzungen wird eine Spannungsreihenfolge „ $U_E - U_A$; U_E ; $U_E - U_A$; $-U_A$ “ an der Speicherdrossel angelegt, vgl. Fig. 5c. In Abhängigkeit der Arbeitspunkte (U_E , U_A , I_A) werden die Schaltfrequenz f , die Zeitverzögerung t_v und die Tastverhältnisse D_1 und D_2 angepasst, d. h. moduliert. Dadurch wird erreicht, dass die vier Schalter in allen Arbeitspunkten stets spannungslos bzw. verlustarm oder verlustlos umgeschaltet werden. Die Verluste können so minimiert werden. Unter dieser Voraussetzung wird der Effektivwert des Speicherdrosselstroms ebenfalls minimiert. Die Verluste in der Speicherdrossel durch die Durchlassverluste in den Schaltern werden reduziert bzw. optimiert.

[0121] Die Anpassung (Modulation) der Schaltfrequenz f ist u. a. dadurch gekennzeichnet, dass für $U_A/U_E < 1$ die Schaltfrequenz mit zunehmender Ausgangsspannung U_A zunächst erhöht wird und dann die Schaltfrequenz f mit zunehmender Ausgangsspannung U_A wieder absinkt. In der Nähe des Punktes $U_A/U_E = 1$ erreicht die Schaltfrequenz f ein Minimum. Für $U_A/U_E > 1$ wird die Schaltfrequenz f mit zunehmender Ausgangsspannung U_A zunächst erhöht und für größere Ausgangsspannungen U_A (größer als ein Referenzpunkt) wieder abgesenkt. Bei gleicher Eingangsspannung U_E und Ausgangsspannung U_A kann die Schaltfrequenz f mit Erhöhung des Betrags des Ausgangsstroms I_A reduziert werden. Die Schaltfrequenz f kann begrenzt werden. Die maximale Schaltfrequenz kann von einer Schaltgeschwindigkeit der angeordneten Leistungshalbleiter (S_1 – S_4) abhängig sein. Die minimale Schaltfrequenz kann so gewählt werden, dass Rippel der Ausgangsspannung U_A bzw. das Volumen der Schaltung begrenzt ist.

[0122] Die Anpassung (Modulation) des Tastverhältnisses D_1 kann u. a. dadurch gekennzeichnet sein, dass das Tastverhältnis D_1 mit Erhöhung der Ausgangsspannung U_A vergrößert wird, wenn die Ausgangsspannung kleiner ist als die Eingangsspannung U_E . Wenn $U_A > U_E$, kann das Tastverhältnis D_1 mit Erhöhung der Ausgangsspannung U_A zunächst reduziert und dann langsam erhöht werden. In einem Spannungsbereich, in dem in etwa gilt, dass $U_A = U_E$, kann das Tastverhältnis D_1 maximal sein. Mit Erhöhung des Betrages des Ausgangsstroms I_A kann das Tastverhältnis D_1 (bei ansonsten gleichen Spannungen) erhöht werden.

[0123] Die Anpassung (Modulation) des Tastverhältnisses D_2 ist u. a. dadurch gekennzeichnet, dass das Tastverhältnis D_2 mit Erhöhung der Ausgangsspannung U_A zunächst erhöht und dann reduziert wird, wenn gilt, dass $U_A < U_E$. Wenn $U_A > U_E$, so kann das Tastverhältnis D_2 mit Erhöhung der Ausgangsspannung U_A erhöht werden. Nahe des Bereichs, in dem gilt, dass $U_A = U_E$, kann das Tastverhältnis D_2 minimal sein. Mit Erhöhung des Betrages des Ausgangsstroms I_A kann das Tastverhältnis D_2 reduziert werden.

[0124] Die Anpassung (Modulation) der Zeitverzögerung t_v ist gemäß diesem Konzept u. a. dadurch gekennzeichnet, dass bei einem positiven Ausgangsstrom I_A die Zeitverzögerung t_v mit zunehmendem Ausgangsstrom I_A reduziert wird. Bei einem negativen Ausgangsstrom I_A wird die Zeitverzögerung t_v mit zunehmendem Betrag des Ausgangsstroms I_A erhöht.

[0125] Dahingegen kann das zweite Konzept, das durch die Steuereinheit implementierbar ist, so geschrieben werden, dass die Schalter jeweils einer Halbbrückenschaltung stets komplementär mit Berücksichtigung einer Totzeit zueinander getaktet sind, d. h. der Schalter S_1 wird komplementär zu dem Schalter S_2 und der Schalter S_4 wird komplementär zu dem Schalter S_3 geschaltet. Die Zeitdauer des Einschaltzustands des Schalters S_1 ist innerhalb eines Toleranzbereichs gleich der Zeitdauer des Einschaltzustands des Schalters S_4 . Die Zeitdauer des Einschaltzustands des Schalters S_2 ist innerhalb eines Toleranzbereichs gleich der Zeitdauer des Einschaltzustands des Schalters S_3 . Bei einem positiven Ausgangsstrom I_A wird der Schalter S_4 früher eingeschaltet als der Schalter S_1 . Bei negativem Ausgangsstrom wird der Schalter S_4 später eingeschaltet als der Schalter S_1 . In Abhängigkeit der Arbeitspunkte (U_E , U_A , I_A) werden die Schaltfrequenz f , die Zeitverzögerung t_v und die Tastverhältnisse D angepasst, d. h. moduliert. Dadurch wird erreicht, dass die vier Schalter S_1 – S_4 bei allen Arbeitspunkten immer spannungslos, d. h. verlustarm oder verlustlos umgeschaltet werden. Somit

können Schaltverluste reduziert oder minimiert werden. Unter dieser Voraussetzung wird der Effektivwert des Speicherdrosselstroms ebenfalls reduziert oder minimiert. Die Verluste in der Speicherdrossel und die Durchlassverluste in den Schaltern werden somit optimiert.

[0126] Eine Ansteuereinheit und/oder ein geschalteter Gleichspannungswandler gemäß hierin beschriebener Ausführungsbeispiele können ausgebildet sein, um die Schalter gemäß dem ersten Konzept oder gemäß dem zweiten Konzept anzusteuern. Eine andere Ansteuereinheit und/oder ein anderer geschalteter Gleichspannungswandler gemäß hierin beschriebenen Ausführungsbeispielen können ausgebildet sein, um die Schalter gemäß dem ersten Konzept und gemäß dem zweiten Konzept anzusteuern. So können die Konzepte bspw. zeitlich wechselnd oder alternierend zueinander ausgeführt werden. Das erste Konzept bietet den Vorteil, dass ein höherer Wirkungsgrad erzielbar ist. Hierfür werden zumindest vier Parameter, die Schaltfrequenz, die beiden Tastverhältnisse und die Zeitverzögerung moduliert. Demgegenüber ermöglicht das zweite Konzept eine Ersparnis bezüglich Rechenaufwand und/oder Speicheraufwand, da zumindest drei Parameter, die Schaltfrequenz, ein gleiches Tastverhältnis und die Zeitverzögerung moduliert werden. Etwa kann zuerst das erste Konzept und anschließend das zweite Konzept ausgeführt werden.

[0127] Obwohl vorangehend beschriebene Ausführungsbeispiele eine Eingangsseite und eine Ausgangsseite des schaltenden Gleichspannungswandlers bezeichnen sei darauf hingewiesen, dass diese Bezeichnungen basierend auf einem symmetrischen Aufbau des schaltenden Gleichspannungswandlers wechselseitig vertauschbar sein können. Dies wird unter anderem durch einen simplen Wechsel zwischen den Hochsetzmodus und dem Tiefsetzmodus erhalten, wenn die Eingangsseite und die Ausgangsseite vertauscht werden.

[0128] Obwohl in vorangehenden Ausführungsbeispielen der Begriff Zeitpunkt verwendet wird, etwa für Schaltvorgänge in Schaltern, wird darauf hingewiesen, dass dies Zeitpunkte Zeitdauern mit kurzer, endlicher Länge beschreiben. So kann ein Zeitpunkt des Umschaltens eines Schalters als Zeitintervall verstanden werden, in dem ein Schalter von einem Zustand in einen anderen Zustand übergeht.

[0129] Obwohl in vorangehenden Ausführungsbeispielen die Eingangsspannung in Schrittweiten von 100 V veränderlich dargestellt ist, kann die Eingangsspannung in beliebigen Schrittweiten oder ohne Schrittweiten veränderlich sein.

[0130] Oben beschriebene und in den Figuren gezeigte Kurvenverläufe sollen eher exemplarisch und qualitativ als quantitativ verstanden werden. Es versteht sich, dass bei anderen als den hierin beschriebenen Ausführungsformen andere Ströme, andere Spannungen, andere Tastzyklen, andere Frequenzen oder andere Wirkungsgrade erhalten werden können. Auch können bspw. analog oder kontinuierlich dargestellte Kurvenverläufe quantisiert beschrieben oder in einem Speicher hinterlegt werden.

[0131] Obwohl manche Aspekte im Zusammenhang mit einer Vorrichtung beschrieben wurden, versteht es sich, dass diese Aspekte auch eine Beschreibung des entsprechenden Verfahrens darstellen, sodass ein Block oder ein Bauelement einer Vorrichtung auch als ein entsprechender Verfahrensschritt oder als ein Merkmal eines Verfahrensschrittes zu verstehen ist. Analog dazu stellen Aspekte, die im Zusammenhang mit einem oder als ein Verfahrensschritt beschrieben wurden, auch eine Beschreibung eines entsprechenden Blocks oder Details oder Merkmals einer entsprechenden Vorrichtung dar.

[0132] Die oben beschriebenen Ausführungsbeispiele stellen lediglich eine Veranschaulichung der Prinzipien der vorliegenden Erfindung dar. Es versteht sich, dass Modifikationen und Variationen der hierin beschriebenen Anordnungen und Einzelheiten anderen Fachleuten einleuchten werden. Deshalb ist beabsichtigt, dass die Erfindung lediglich durch den Schutzzumfang der nachstehenden Patentansprüche und nicht durch die spezifischen Einzelheiten, die anhand der Beschreibung und der Erläuterung der Ausführungsbeispiele hierin präsentiert wurden, beschränkt sei.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 6166527 [0004]
- US 2012/0146594 A1 [0005]

Patentansprüche

1. Vorrichtung (**110**) zum Steuern eines schaltenden Gleichspannungswandlers (**120**) mit einer ersten Halbbrückenschaltung (**130**) umfassend einen ersten Schalter (S_1) und einen zweiten Schalter (S_2), mit einer zweiten Halbbrückenschaltung (**140**) umfassend einen dritten Schalter (S_3) und einen vierten Schalter (S_4), und einer Induktivität (L , **122**), die zwischen die Mittenabgriffe (**132**, **142**) der ersten und der zweiten Halbbrückenschaltung (**130**, **140**) geschaltet ist, und die Folgendes umfasst:

eine Steuereinheit (**112**), die ausgebildet ist, um abhängig von einer Eingangsspannung (U_E) und einer Ausgangsspannung (U_A) an dem schaltenden Gleichspannungswandler (**120**) eine Schaltfrequenz (f) der Schalter (S_1 – S_4) des Gleichspannungswandlers (**120**), ein erstes (D_1) und zweites (D_2) Tastverhältnis des ersten (S_1) und vierten (S_4) Schalters und die Zeitverzögerung (t_v) zwischen dem Einschalten des ersten (S_1) und vierten (S_4) Schalters anzupassen.

2. Vorrichtung gemäß Anspruch 1, bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um die Schaltfrequenz (f), das erste Tastverhältnis (D_1), das zweite Tastverhältnis (D_2) und die Zeitverzögerung (t_v) basierend auf einem Ausgangsstrom (I_A) des schaltenden Gleichspannungswandlers (**120**) zu bestimmen.

3. Vorrichtung Anspruch 1 oder 2, bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um den ersten Schalter (S_1), den zweiten Schalter (S_2), den dritten Schalter (S_3) und den vierten Schalter (S_4) mit von einander verschiedenen Zeitdauern (t_{S1} , t_{S2} , t_{S3} , t_{S4}) einzuschalten.

4. Vorrichtung gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um den vierten Schalter (S_4) nur in Zeitintervallen (t_{S4}) einzuschalten, in denen der erste Schalter (S_1) eingeschaltet ist.

5. Vorrichtung gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um das erste Tastverhältnis (D_1) und das zweite Tastverhältnis (D_2) so zu bestimmen, dass für das erste Tastverhältnis (D_1) und für das zweite Tastverhältnis (D_2) folgende Bedingung erfüllt ist:

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{D_1}{1 - D_2}$$

wobei U_A die Ausgangsspannung, U_E die Eingangsspannung, D_1 das erste Tastverhältnis und D_2 das zweite Tastverhältnis beschreibt.

6. Vorrichtung gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um ausgehend von einer ersten Situation (**206**), bei der die Ausgangsspannung (U_A) kleiner ist als die Eingangsspannung (U_E), das erste Tastverhältnis (D_1) mit steigender Ausgangsspannung (U_A) bis auf einen Maximalwert (**208**), wenn in einer zweiten Situation (**212**) die Ausgangsspannung (U_A) der Eingangsspannung (U_E) entspricht, zu vergrößern.

7. Vorrichtung gemäß Anspruch 6, bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um ausgehend von der zweiten Situation (**212**) bei ansteigender Ausgangsspannung (U_A) das erste Tastverhältnis (D_1) weniger stark zu erniedrigen als bei abfallender Ausgangsspannung (U_A).

8. Vorrichtung gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um ausgehend von einer dritten Situation (**216**), bei der die Ausgangsspannung (U_A) größer ist als die Eingangsspannung (U_E), das zweite Tastverhältnis (D_2) mit sinkender Ausgangsspannung (U_A) bis auf einen Minimalwert (**218**), wenn in einer zweiten Situation (**212**) die Ausgangsspannung (U_A) der Eingangsspannung (U_E) entspricht, zu verkleinern.

9. Vorrichtung gemäß Anspruch 8, bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um ausgehend von der zweiten Situation (**212**) bei sinkender Ausgangsspannung (U_A) das zweite Tastverhältnis (D_2) weniger stark zu steigern als bei ansteigender Ausgangsspannung (U_A).

10. Vorrichtung gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um die Schalter (S_1 – S_4) des schaltenden Gleichspannungswandlers (**120**) so anzusteuern, dass der zweite Schalter (S_2) stets ausgeschaltet ist, wenn der vierte Schalter (S_4) eingeschaltet ist.

11. Vorrichtung gemäß einem der Ansprüche 1 bis 9, bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um das erste Tastverhältnis (D_1) und das zweite Tastverhältnis (D_2) so zu bestimmen, dass das erste Tastverhältnis (D_1) in jedem Betriebspunkt des geschalteten Spannungswandlers dem zweiten Tastverhältnis (D_2) entspricht.

12. Vorrichtung gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um ausgehend von einer zweiten Situation (**212**), in der die Ausgangsspannung (U_A) der Eingangsspannung (U_E) entspricht, bei einer sinkenden oder steigenden Ausgangsspannung (U_A) die Schaltfrequenz (f) zu erhöhen, bis die Ausgangsspannung (U_A) einen Referenzwert (**202a-c**, **204a-e**) erreicht hat, und um die Schaltfrequenz (f) zu reduzieren, wenn die Ausgangsspannung (U_A) den Referenzwert (**202a-c**, **204a-e**) überschritten hat.

13. Vorrichtung gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um die Schaltfrequenz (f) abhängig von der Eingangsspannung (U_E) zu bestimmen.

14. Vorrichtung gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um die Schaltfrequenz (f) bei einer Erhöhung eines Betrags eines Ausgangsstroms (I_A) des schaltenden Gleichspannungswandlers (**120**) zu reduzieren.

15. Vorrichtung gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um die Zeitverzögerung (t_v) in einem Bereich zwischen 0 und einer Zeitdifferenz ($t_{s1} - t_{s4}$) zwischen einer ersten Zeitdauer (t_{s1}), in der der erste Schalter (S_1) innerhalb einer Periodendauer (T) eingeschaltet ist und einer zweiten Zeitdauer (t_{s4}), in der der vierte Schalter (S_4) innerhalb der Periodendauer (T) eingeschaltet ist, abhängig von einem Ausgangsstrom (I_A) des schaltenden Gleichspannungswandlers (**120**) zu bestimmen.

16. Vorrichtung gemäß Anspruch 15, bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um bei einem negativen Ausgangsstrom (I_A) des schaltenden Gleichspannungswandlers (**120**) die Zeitverzögerung (t_v) zu erhöhen, wenn der Betrag des Ausgangsstroms (I_A) steigt und um bei einem positiven Ausgangsstrom (I_A) des schaltenden Gleichspannungswandlers (**120**) die Zeitverzögerung (t_v) zu reduzieren, wenn der Betrag des Ausgangsstroms (I_A) steigt.

17. Vorrichtung gemäß einem der Ansprüche 1 bis 14, bei der die Zeitverzögerung (t_v) als $t_v = \alpha T$ darstellbar ist, wobei t_v die Zeitverzögerung, α ein Zeitverzögerungsfaktor und T eine Periodendauer eines Schaltzyklus der Schalter (S_1 - S_4) des schaltenden Gleichspannungswandlers (**120**) ist, und bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um ausgehend von einem Bereich (**222a-e**) der Ausgangsspannung (U_A), der eine zweite Situation (**212**) umfasst, in der die Ausgangsspannung (U_A) der Eingangsspannung (U_E) entspricht, bei zunehmender oder abnehmender Ausgangsspannung (U_A) einen Betragswert des Zeitverzögerungsfaktors (α) zu reduzieren.

18. Vorrichtung gemäß Anspruch 17, bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um den Betragswert des Zeitverzögerungsfaktors (α) in einem Bereich zwischen 0 und 1 zu bestimmen.

19. Vorrichtung gemäß Anspruch 17 oder 18, bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um bei einem positiven Ausgangsstrom (I_A) des schaltenden Gleichspannungswandlers (**120**) den ersten Schalter (S_1) einzuschalten während der vierte Schalter (S_4) eingeschaltet ist, und um einen Betrag der Zeitverzögerung (t_v) zu reduzieren, wenn der Betrag des Ausgangsstroms (I_A) steigt und bei der die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um bei einem negativen Ausgangsstrom (I_A) des schaltenden Gleichspannungswandlers (**120**) den vierten Schalter (S_4) einzuschalten während der erste Schalter (S_1) eingeschaltet ist, und um den Betrag der Zeitverzögerung (t_v) zu erhöhen, wenn der Betrag des Ausgangsstroms (I_A) steigt.

20. Vorrichtung gemäß einem der vorangehenden Ansprüche, mit einem Speicher, in dem Werte für die Schaltfrequenz (f), das erste (D_1) und zweite Tastverhältnis (D_2) und die Zeitverzögerung (t_v) in Abhängigkeit der Ausgangsspannung (U_A) und der Eingangsspannung (U_E) gespeichert sind, wobei die Steuereinheit (**112**) ausgebildet ist, um die Schaltfrequenz (f), das erste (D_1) und zweite Tastverhältnis (D_2) und die Zeitverzögerung (t_v) basierend auf den gespeicherten Werten anzupassen.

21. Schaltender Gleichspannungswandler (**100**), mit einer ersten Halbbrückenschaltung (**130**) umfassend einen ersten Schalter (S_1) und einen zweiten Schalter (S_2), einer zweiten Halbbrückenschaltung (**140**) umfassend einen dritten Schalter (S_3) und einen vierten Schalter (S_4),

einer Induktivität (L , **122**), die zwischen die Mittenabgriffe (**132**, **142**) der ersten (**130**) und der zweiten (**140**) Halbbrückenschaltung geschaltet ist; und
 einer Ansteuereinheit (**110**), die ausgebildet ist, um abhängig von einer Eingangsspannung (U_E) und einer Ausgangsspannung (U_A) an dem schaltenden Gleichspannungswandler (**100**) eine Schaltfrequenz (f) der Schalter (S_1 – S_4) des Gleichspannungswandlers (**100**), die Tastverhältnisse (D_1 , D_2) des ersten (S_1) und vierten (S_4) Schalters und die Zeitverzögerung (t_v) zwischen dem Einschalten des ersten (S_1) und vierten (S_4) Schalters anzupassen.

22. Schaltender Gleichspannungswandler gemäß Anspruch 21, bei der die Ansteuereinheit (**110**) ausgebildet ist, um den vierten Schalter (S_4) nur in Zeitintervallen (t_{S4}) einzuschalten, in denen der erste Schalter (S_1) eingeschaltet ist.

23. Schaltender Gleichspannungswandler gemäß Anspruch 21 oder 22, der einen Speicher (**114**) aufweist, in dem Werte für die Schaltfrequenz (f), das erste (D_1) und zweite Tastverhältnis (D_2) und die Zeitverzögerung (t_v) in Abhängigkeit der Ausgangsspannung (U_A) und der Eingangsspannung (U_E) gespeichert sind.

24. Schaltender Gleichspannungswandler gemäß einem der Ansprüche 21 bis 23, bei der die Ansteuereinheit (**110**) ausgebildet ist, um die Schaltfrequenz (f), das erste Tastverhältnis (D_1), das zweite Tastverhältnis (D_2) und die Zeitverzögerung (t_v) basierend auf einem Ausgangsstrom (I_A) des schaltenden Gleichspannungswandlers (**120**) zu bestimmen.

25. Verfahren zum Steuern eines geschalteten Gleichspannungswandlers (**100**; **120**) mit folgenden Schritten:

Verbinden einer Steuereinheit (**110**) und einem schaltenden Gleichspannungswandler (**120**) mit einer ersten Halbbrückenschaltung (**130**) umfassend einen ersten Schalter (S_1) und einen zweiten Schalter (S_2), mit einer zweiten Halbbrückenschaltung (**140**) umfassend einen dritten Schalter (S_3) und einen vierten Schalter (S_4), und einer Induktivität (L , **122**), die zwischen die Mittenabgriffe (**132**, **142**) der ersten (**130**) und der zweiten (**140**) Halbbrückenschaltung geschaltet ist;

Anpassen einer Schaltfrequenz (f) der Schalter (S_1 – S_4) des Gleichspannungswandlers (**120**), der Tastverhältnisse (D_1 , D_2) des ersten (S_1) und vierten (S_4) Schalters und der Zeitverzögerung (t_v) zwischen dem Einschalten des ersten (S_1) und vierten (S_4) Schalters abhängig von einer Eingangsspannung (U_E) und einer Ausgangsspannung (U_A) abhängig an dem schaltenden Gleichspannungswandler (**120**).

26. Verfahren gemäß Anspruch 25, bei dem das Anpassen der Schaltfrequenz (f), des ersten Tastverhältnisses (D_1), des zweiten Tastverhältnisses (D_2) und der Zeitverzögerung (t_v) basierend auf einem Ausgangsstrom (I_A) des schaltenden Gleichspannungswandlers (**120**) ausgeführt wird.

Es folgen 24 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

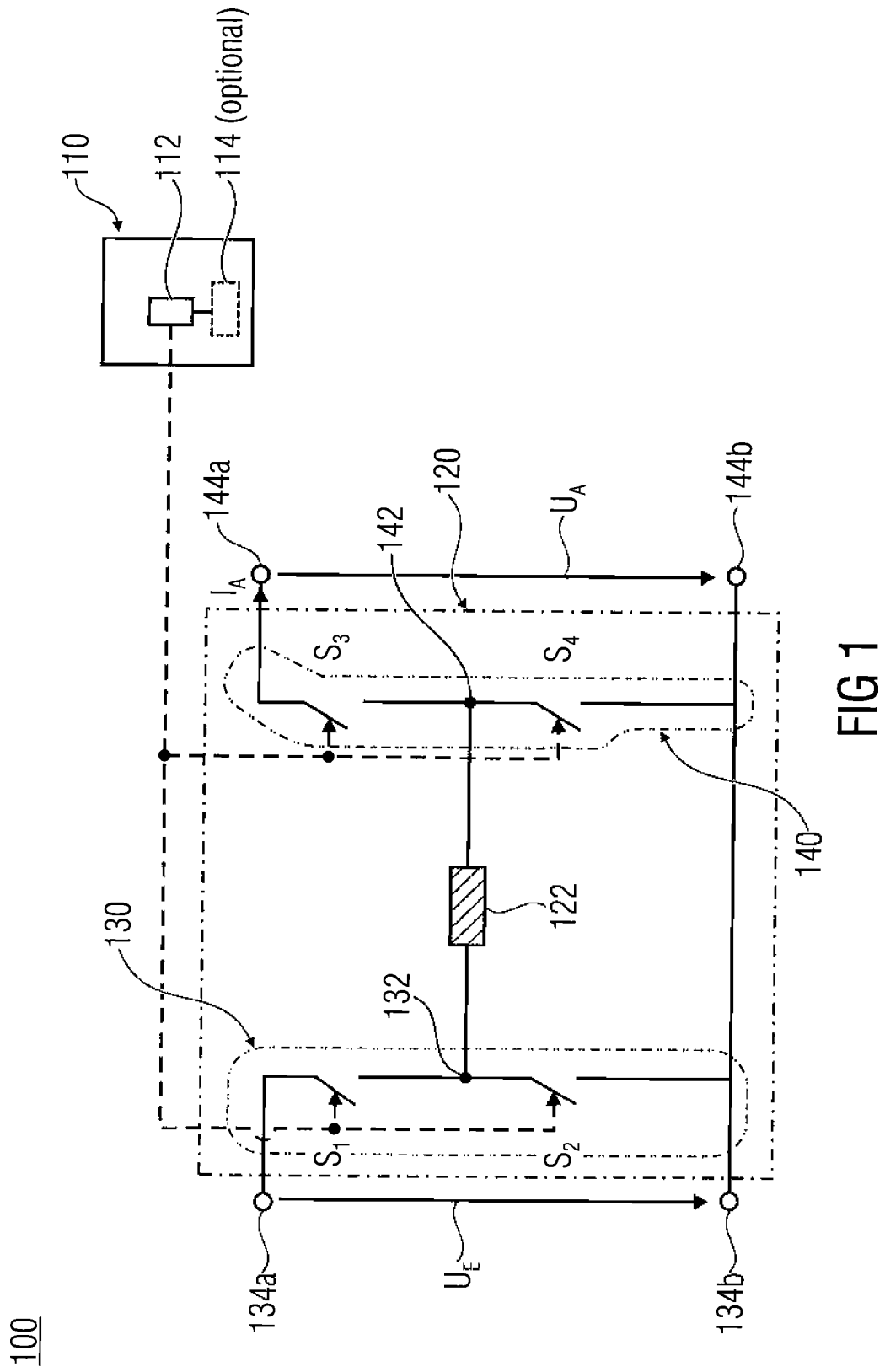


FIG 1

100

200

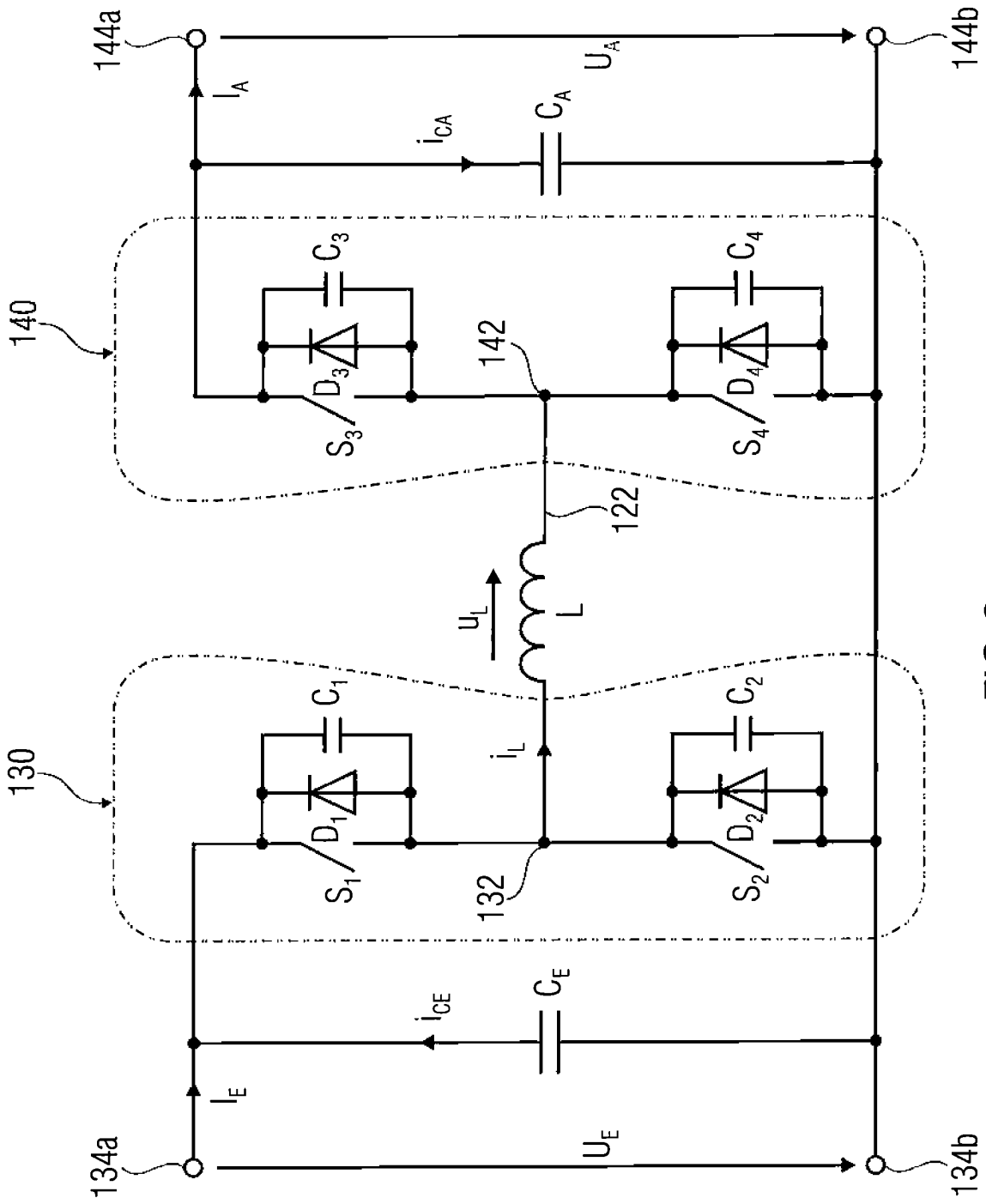
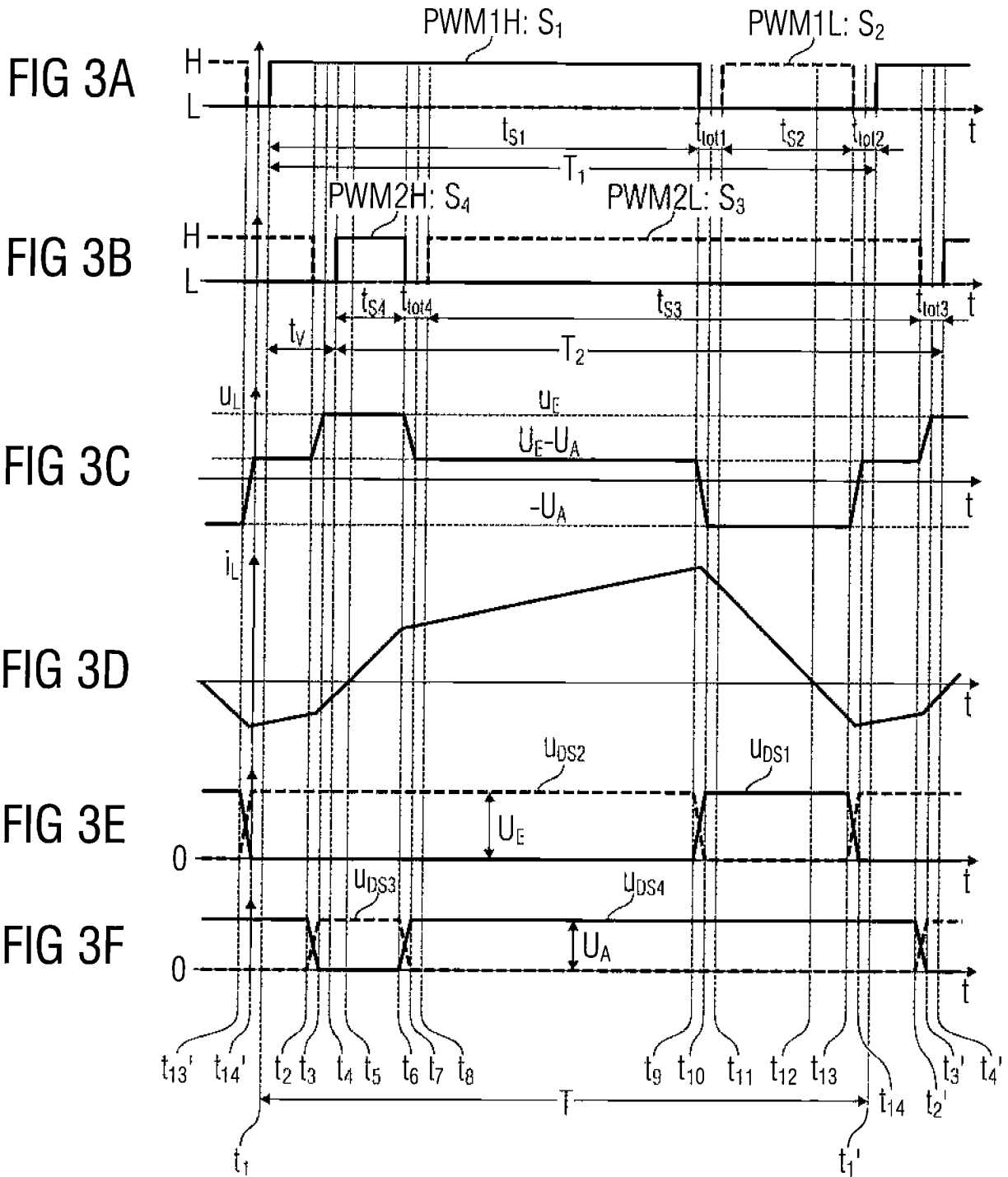


FIG 2



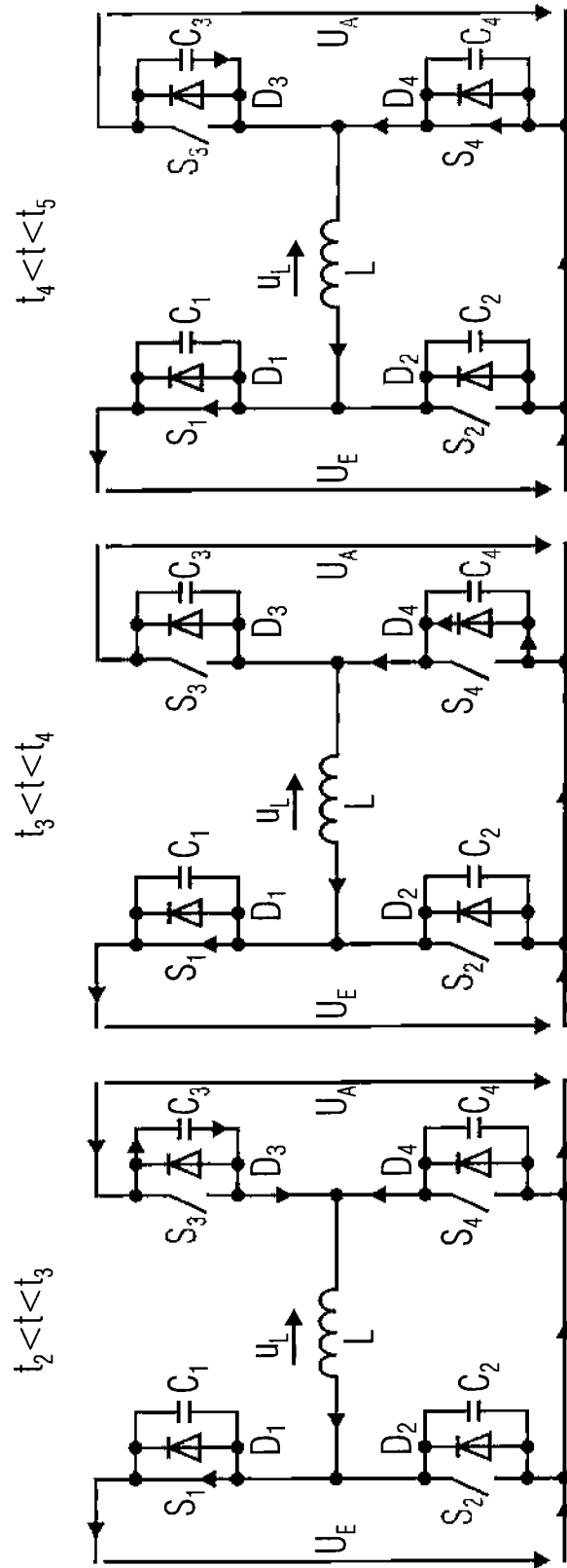


FIG 4C

FIG 4B

FIG 4A

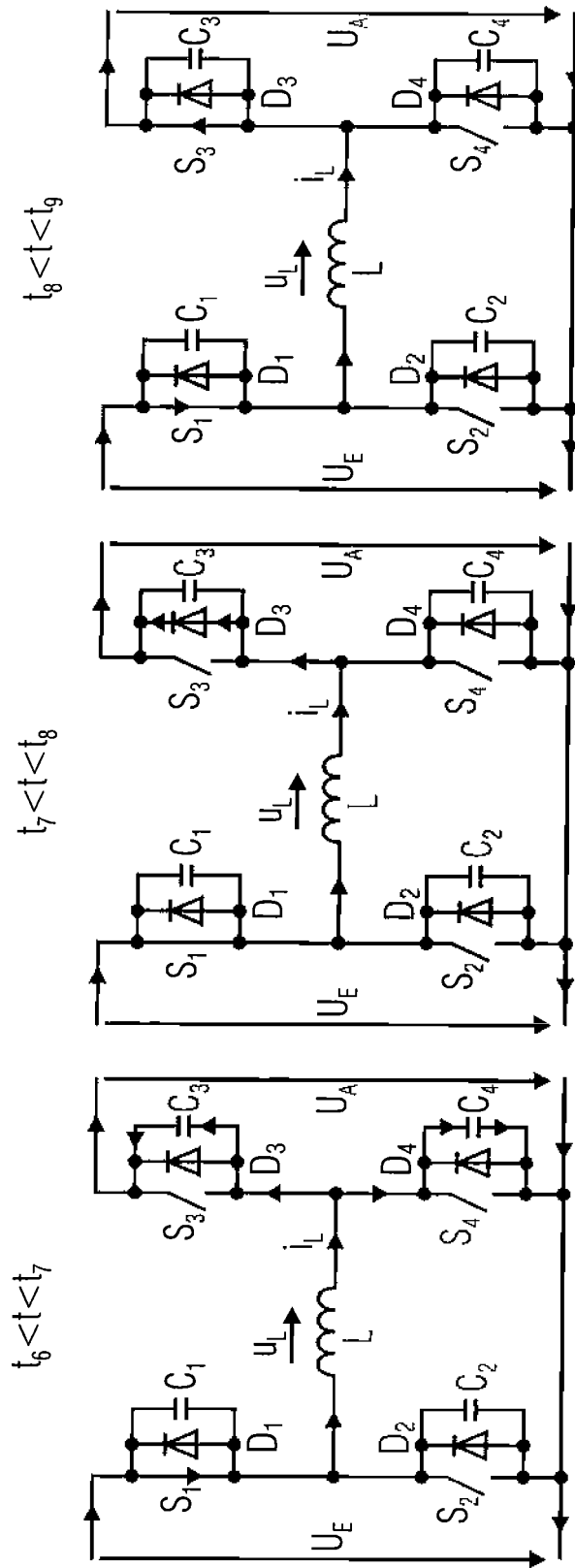


FIG 4F

FIG 4E

FIG 4D

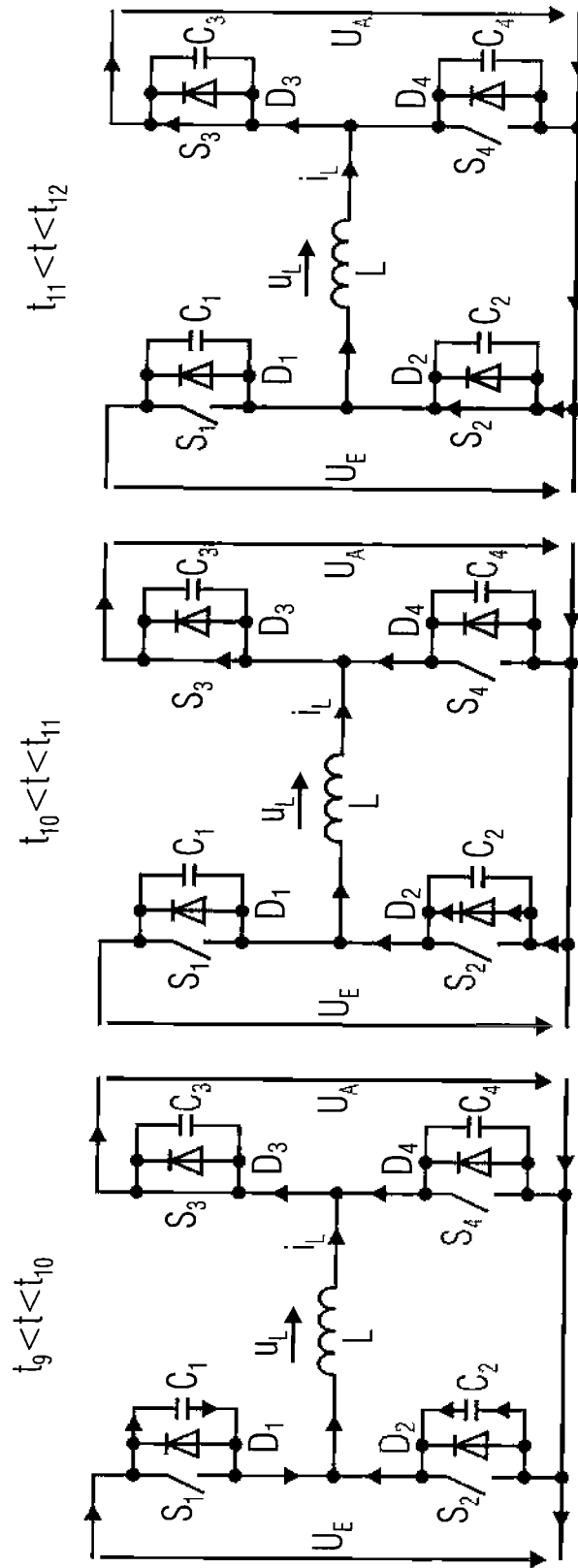


FIG 4I

FIG 4H

FIG 4G

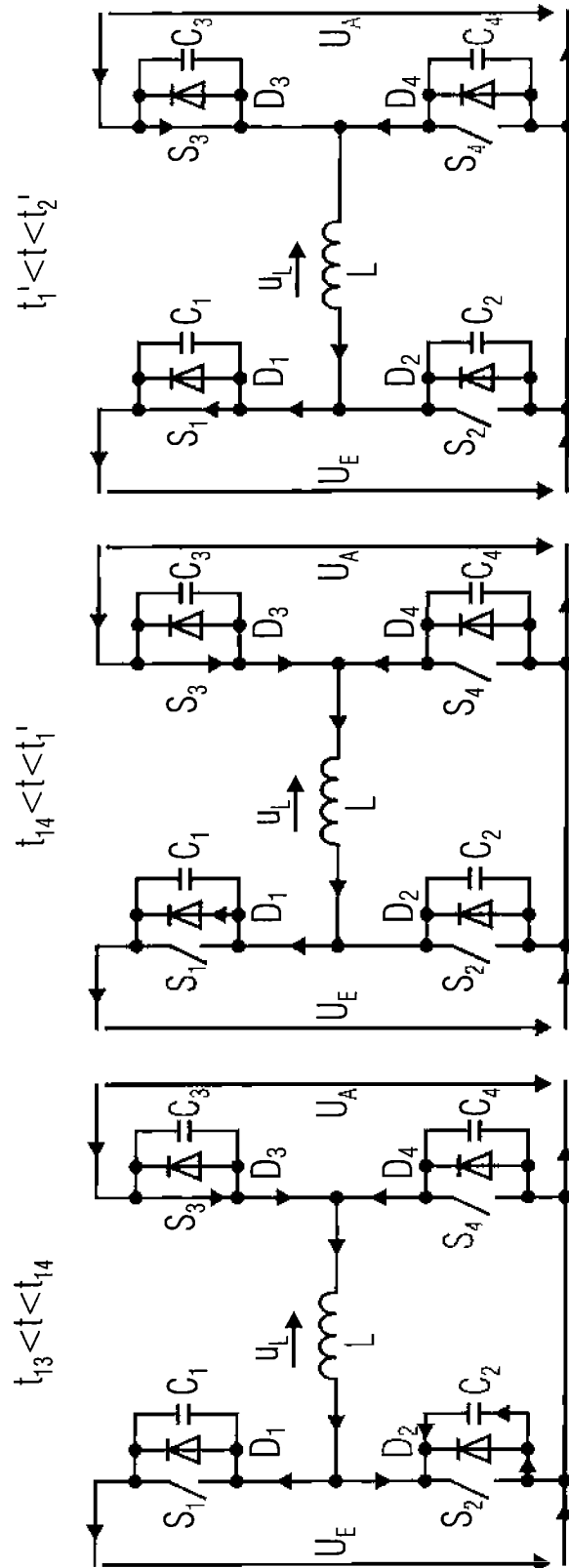
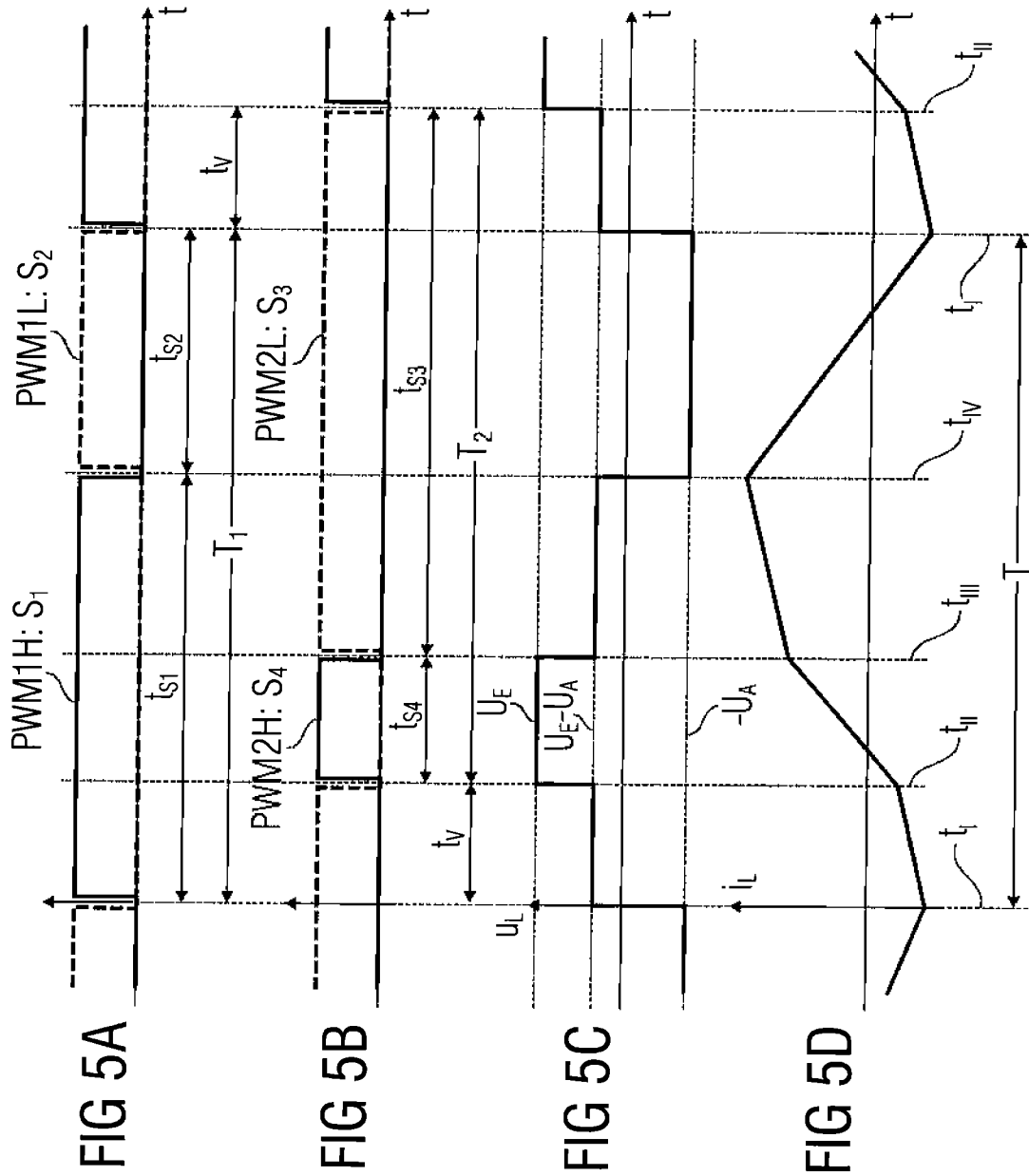


FIG 4L

FIG 4K

FIG 4J



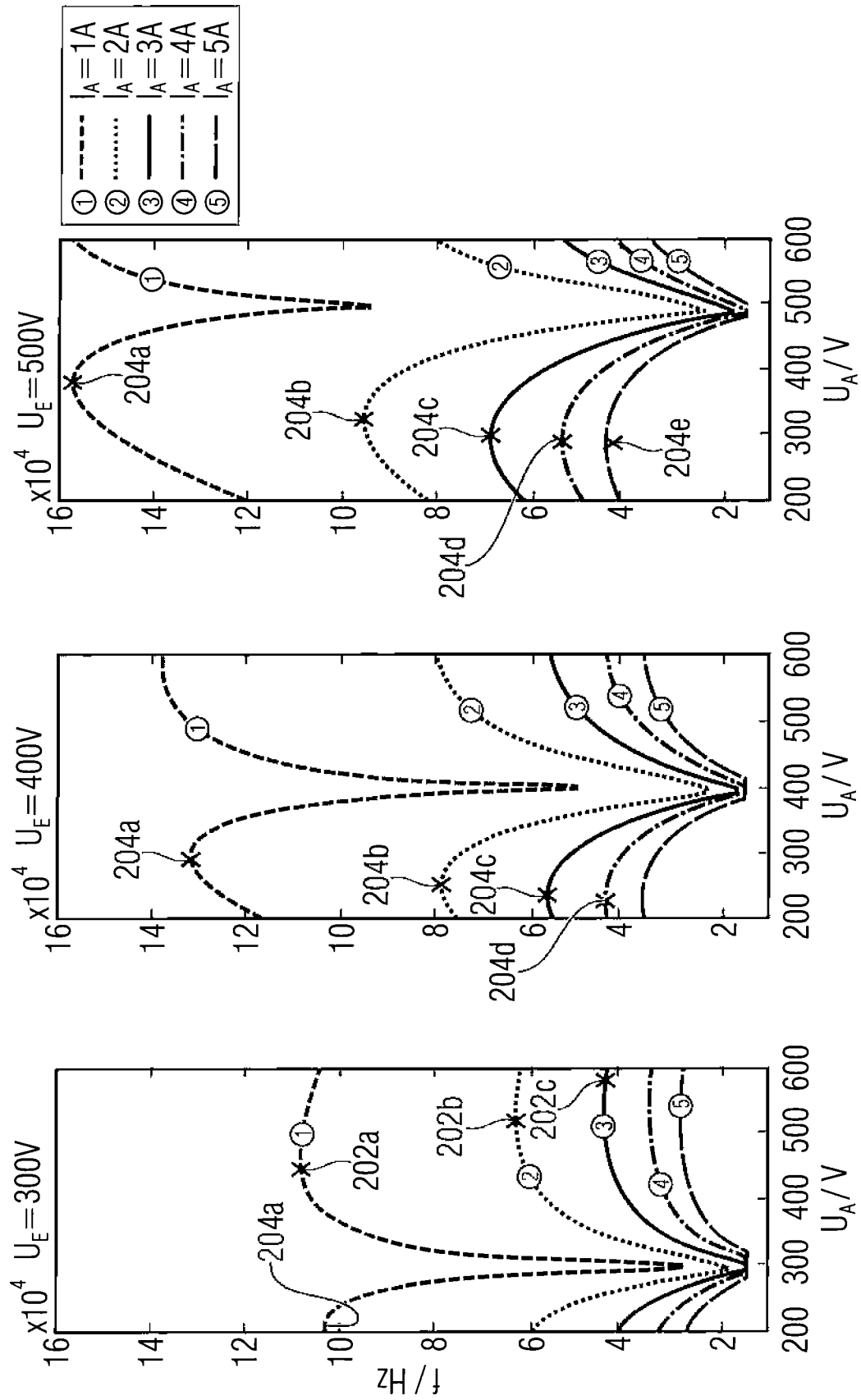


FIG 6C

FIG 6B

FIG 6A

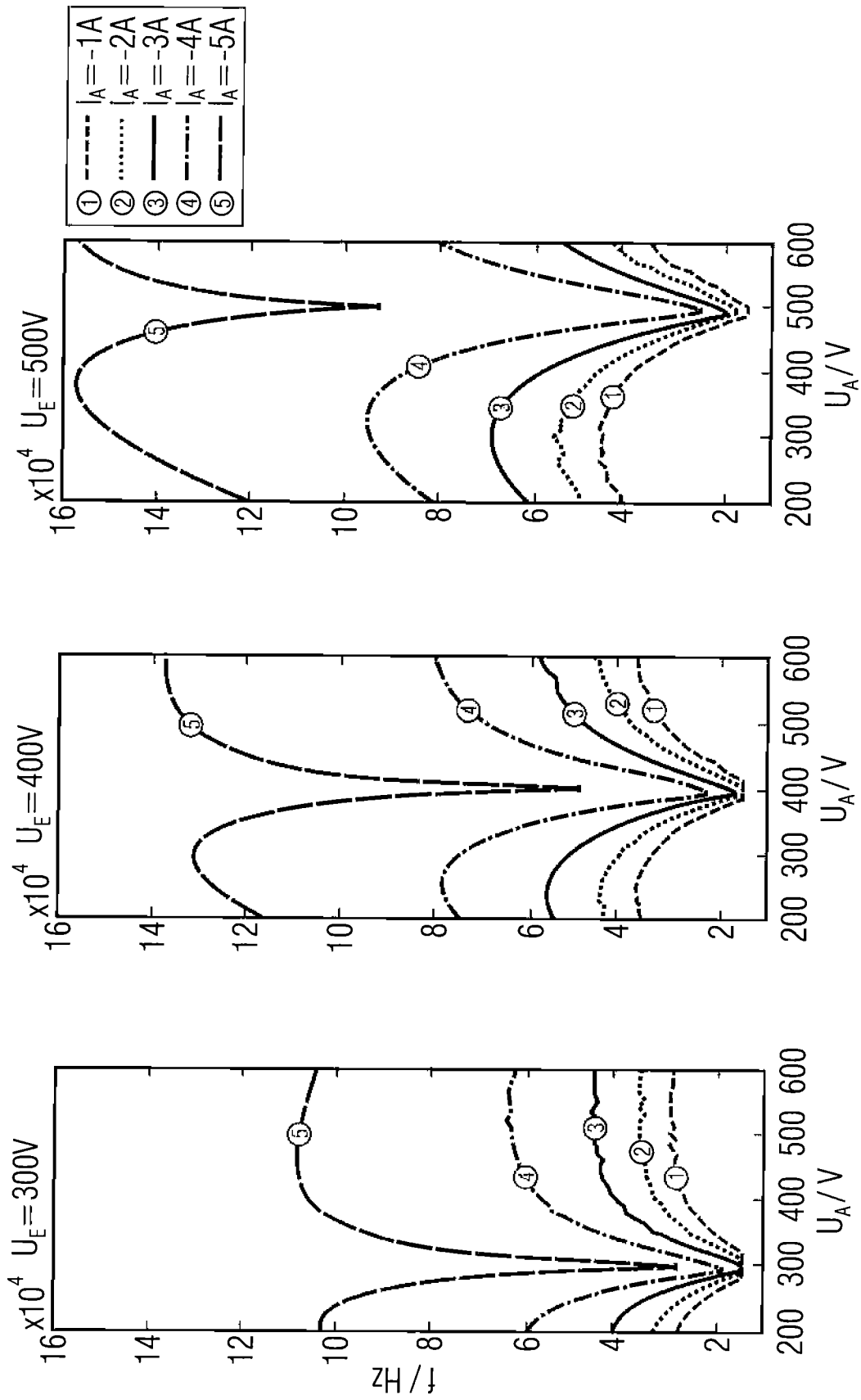


FIG 7C

FIG 7B

FIG 7A

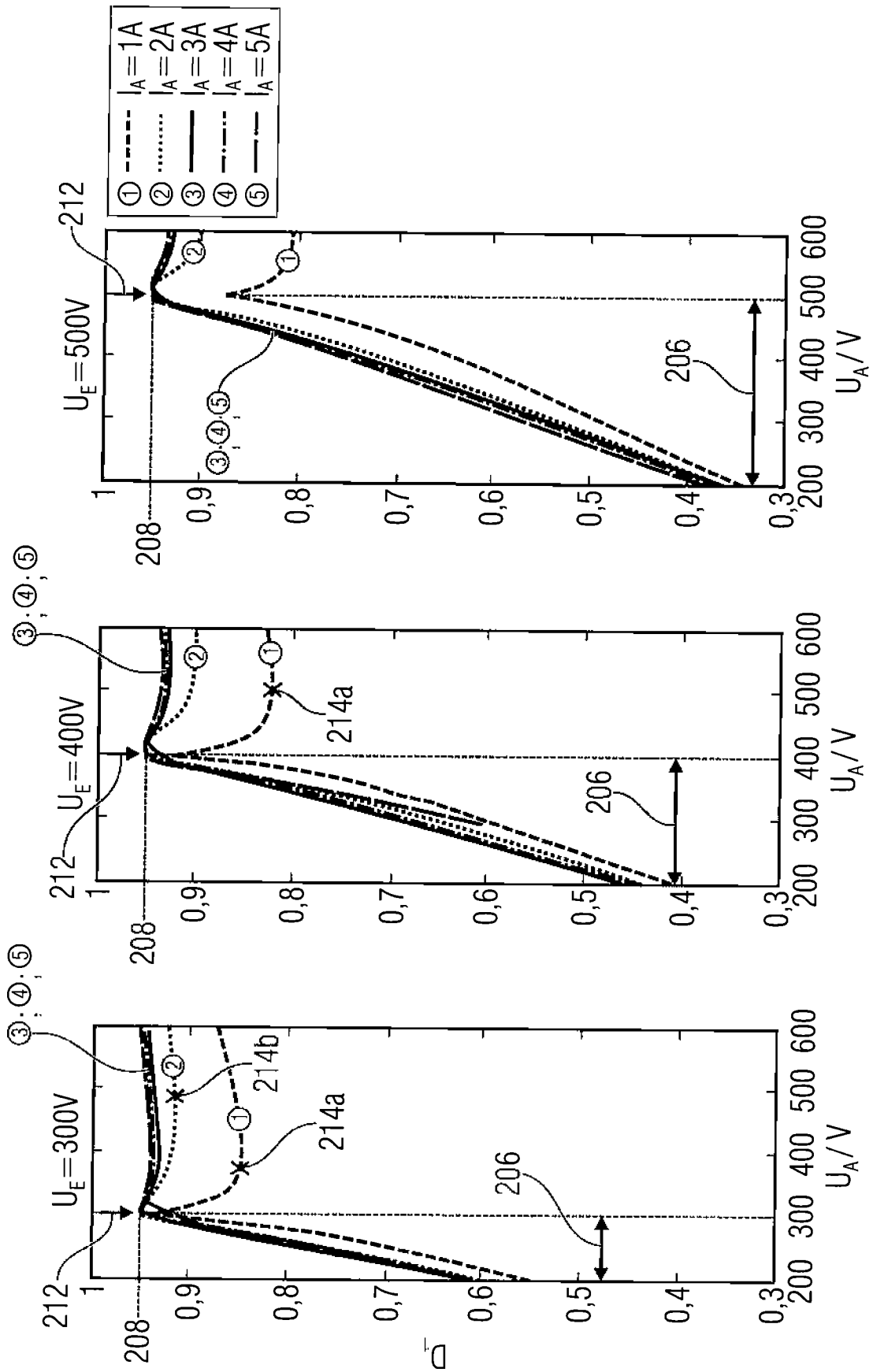


FIG 8C

FIG 8B

FIG 8A

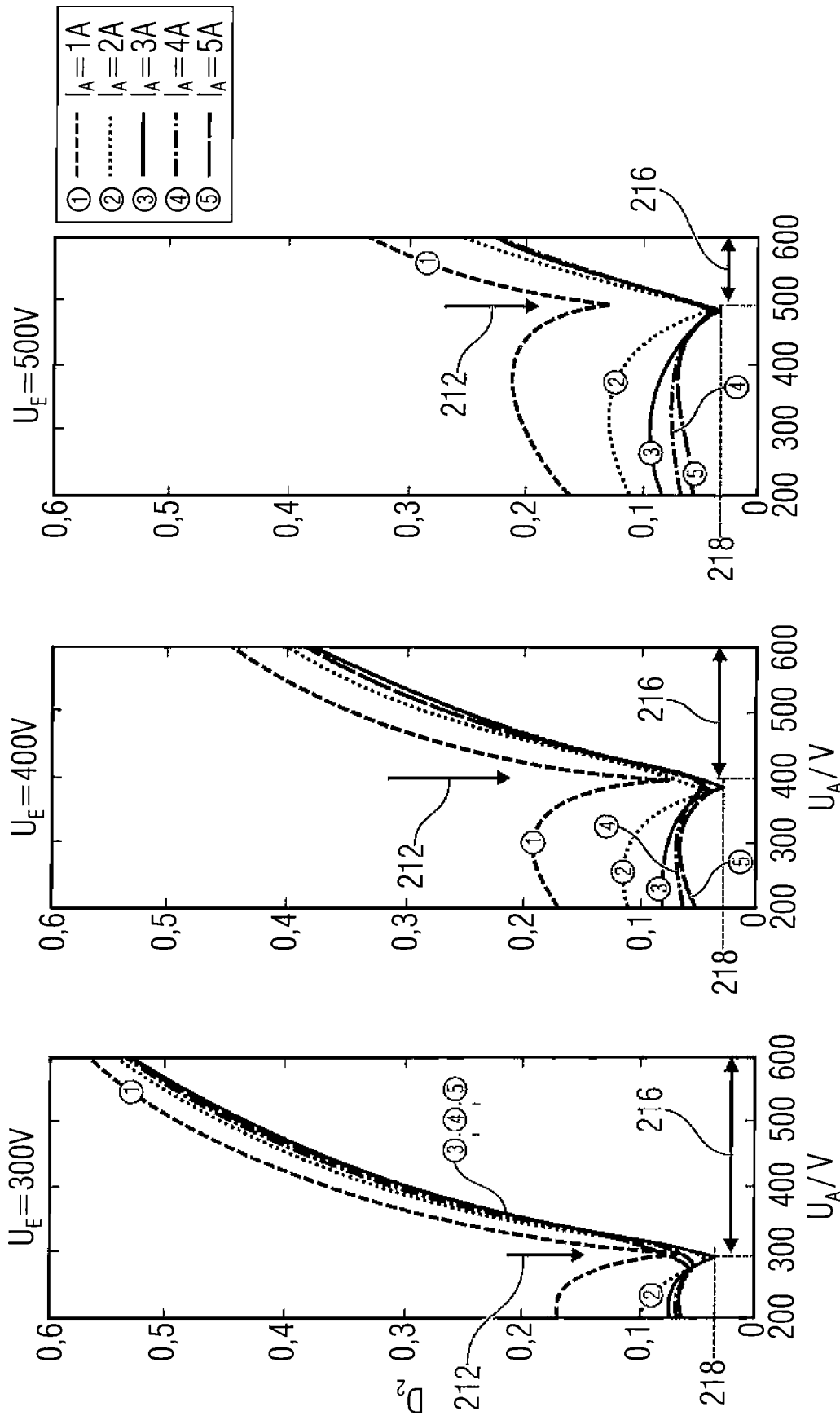


FIG 9C

FIG 9B

FIG 9A

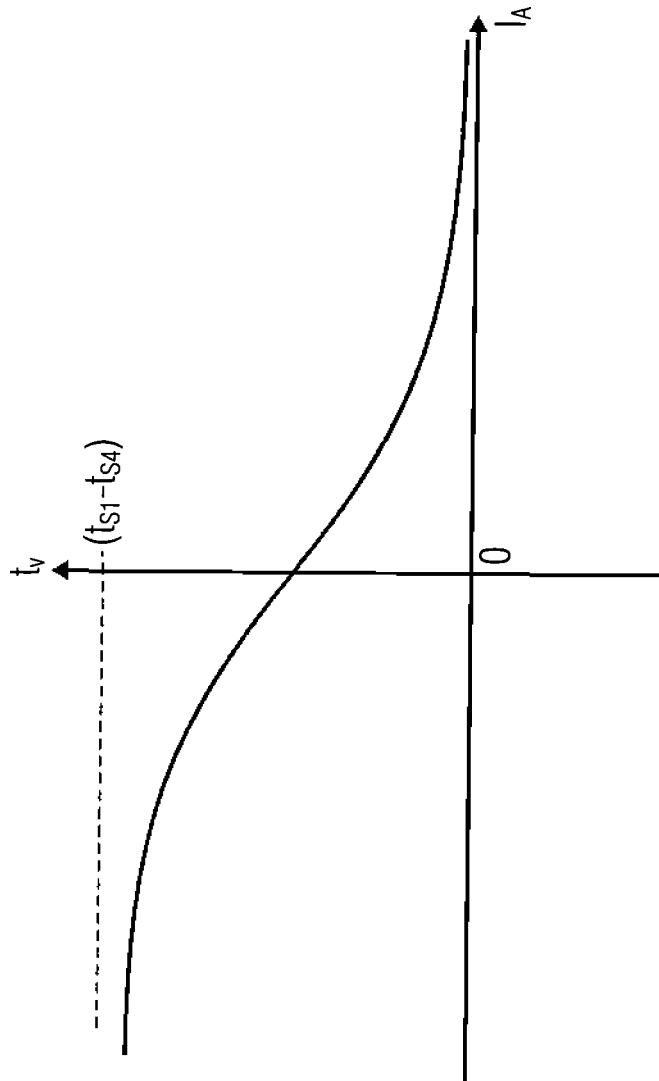


FIG 10

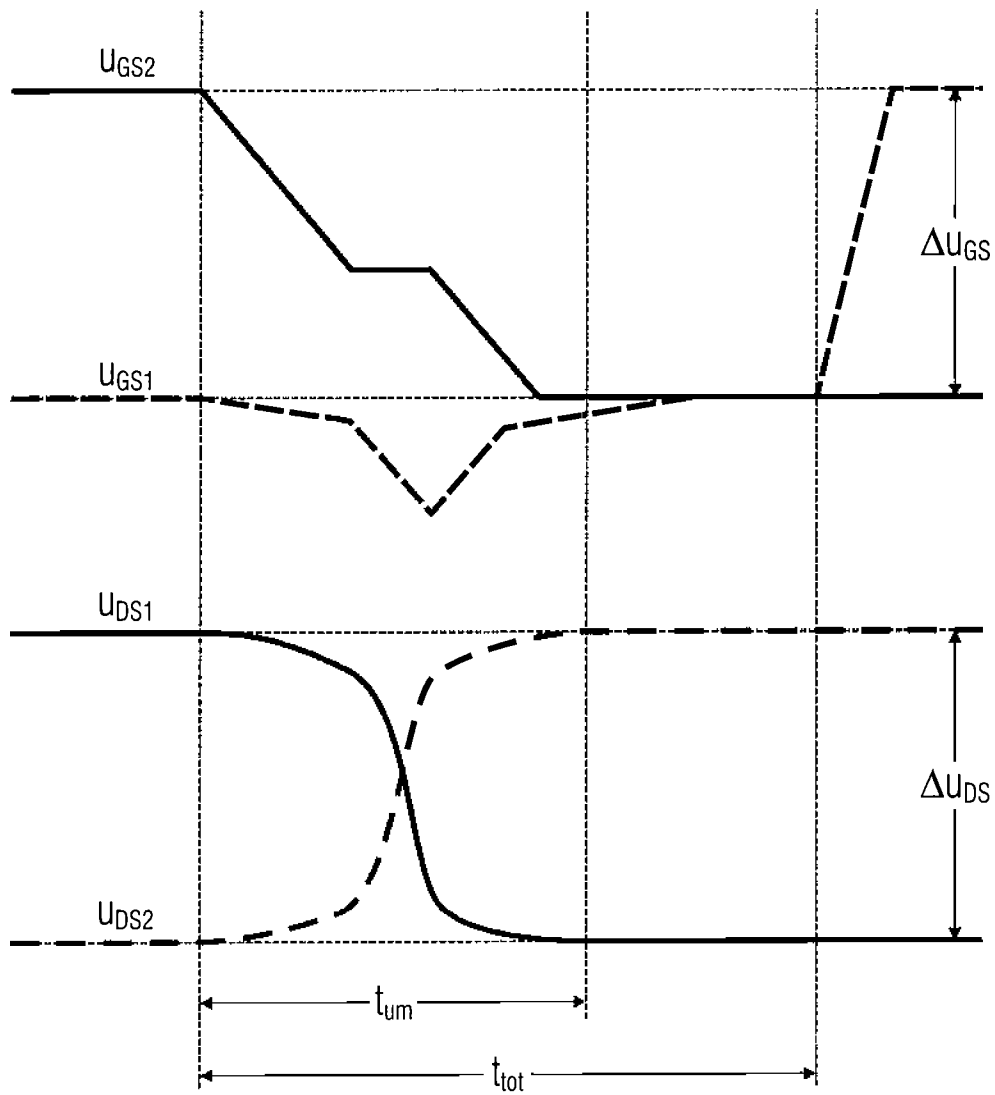


FIG 11

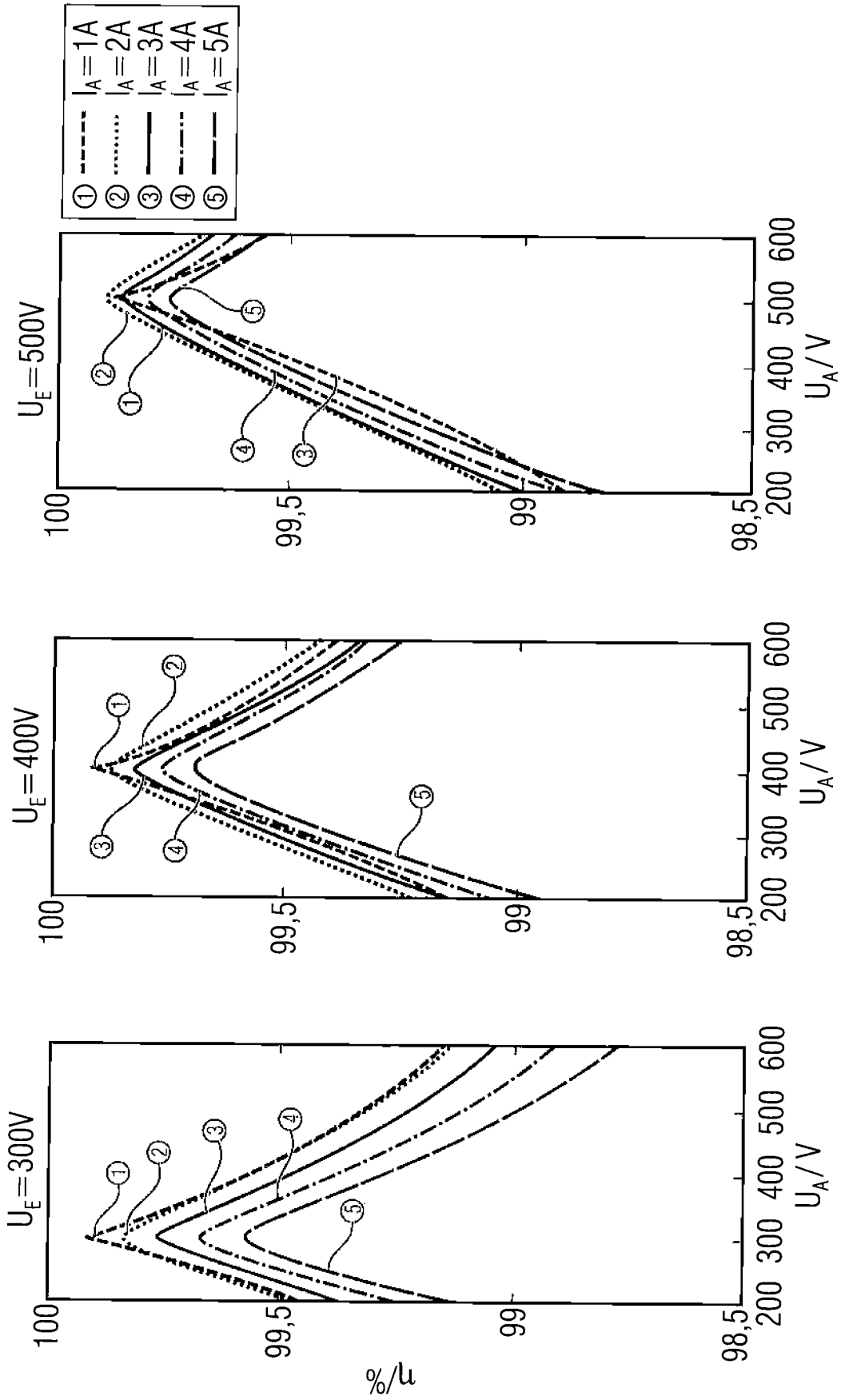


FIG 12C

FIG 12B

FIG 12A

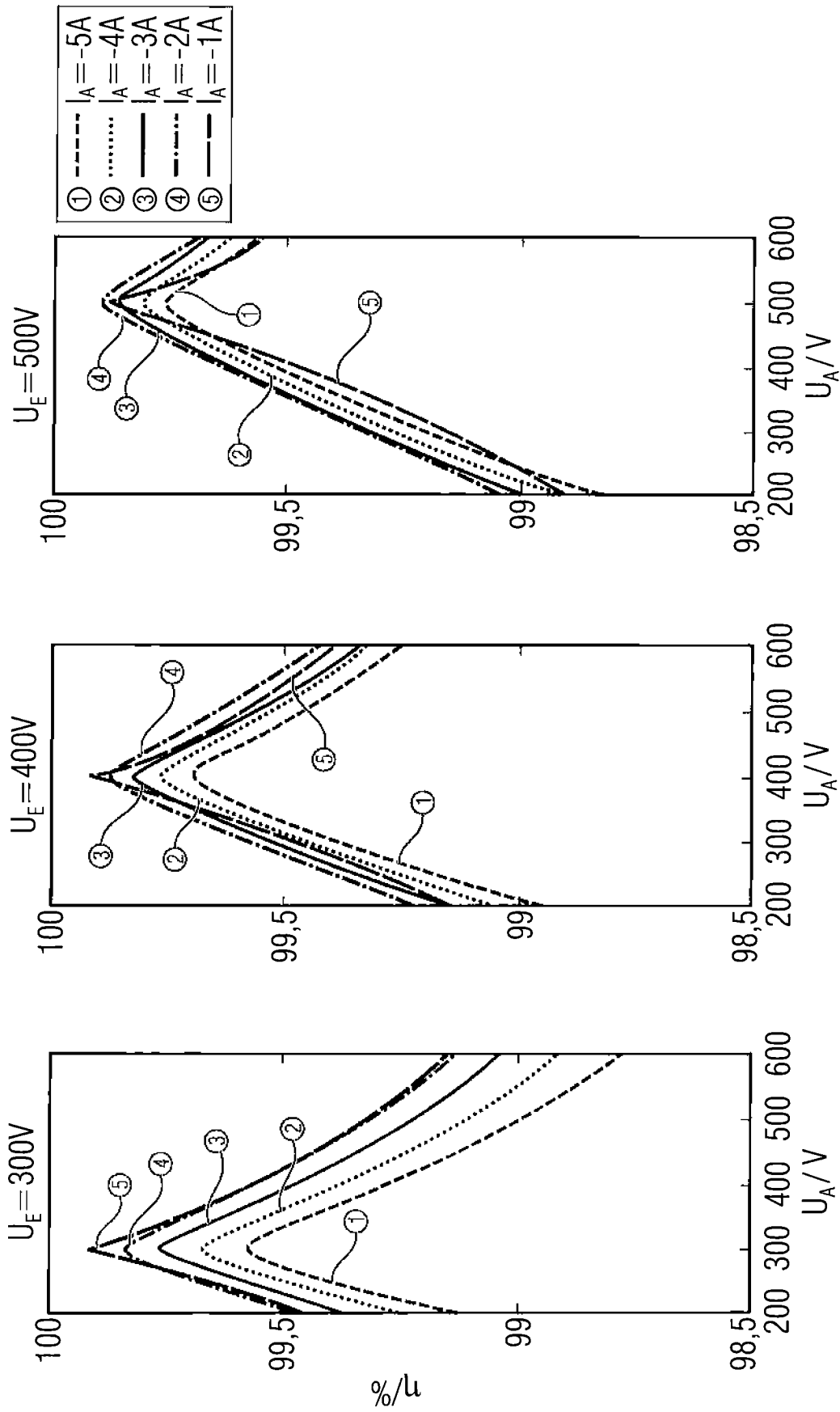


FIG 13C

FIG 13B

FIG 13A

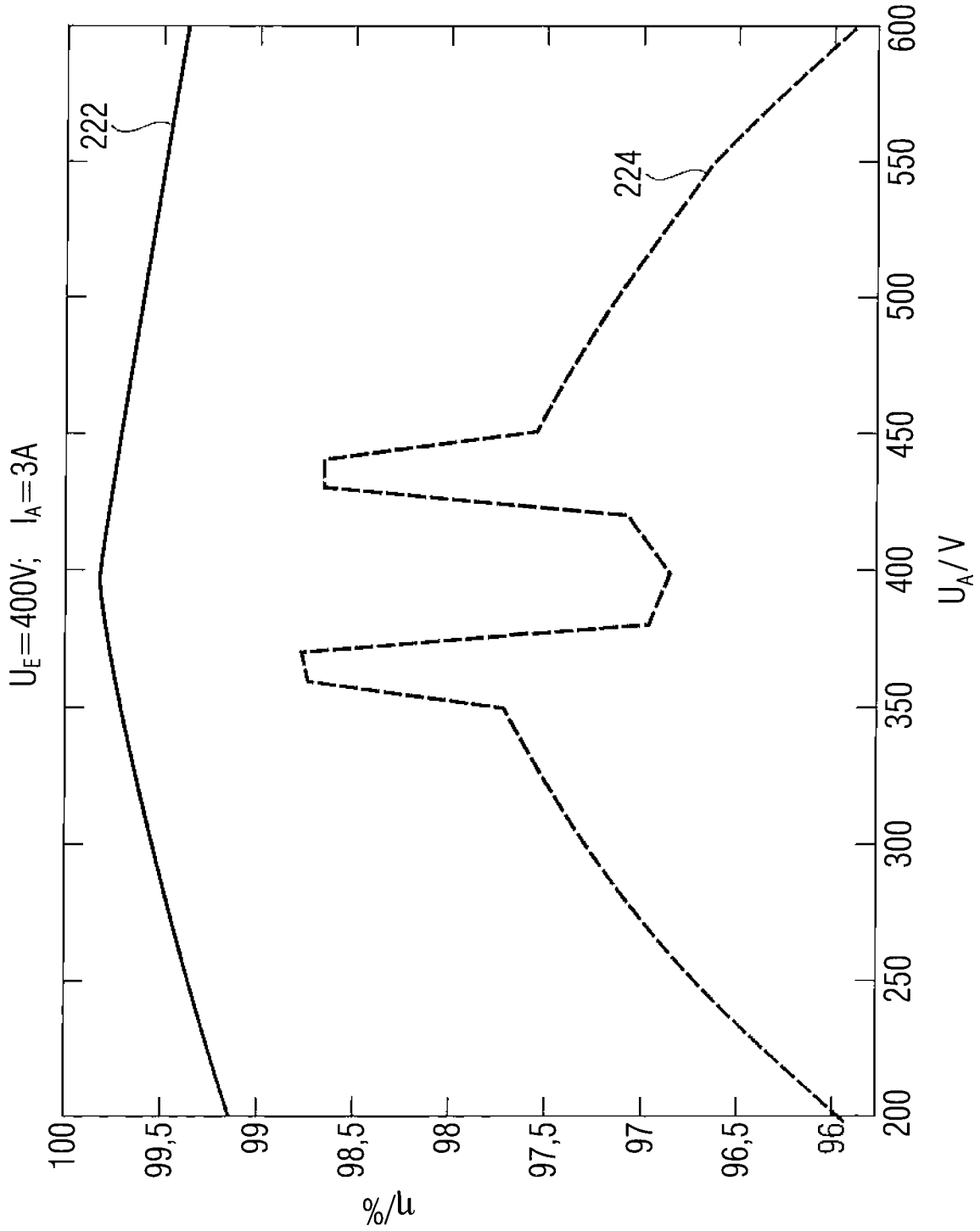


FIG 14

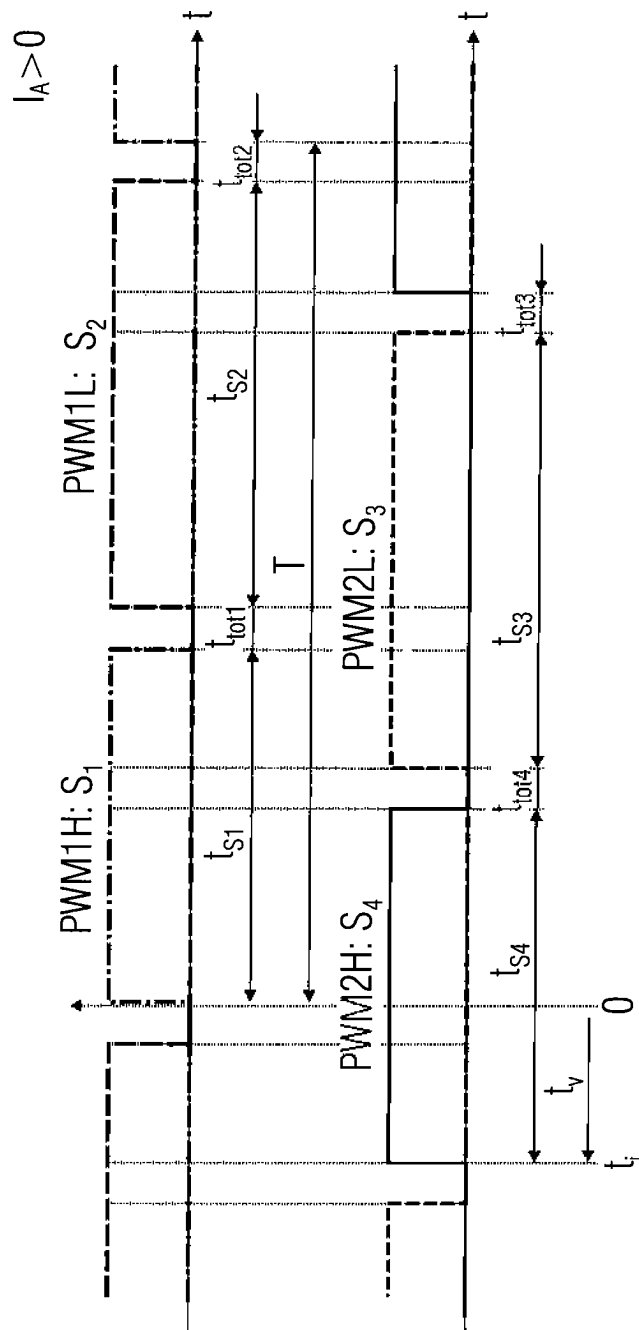


FIG 15A

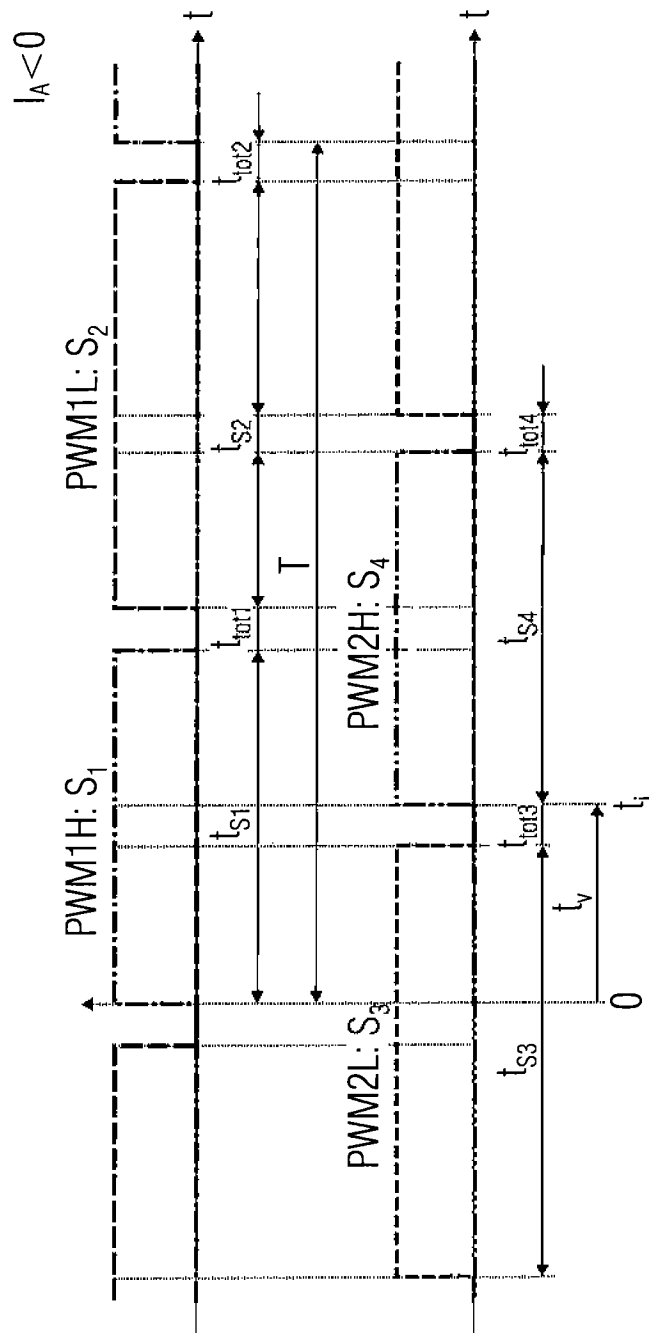


FIG 15B

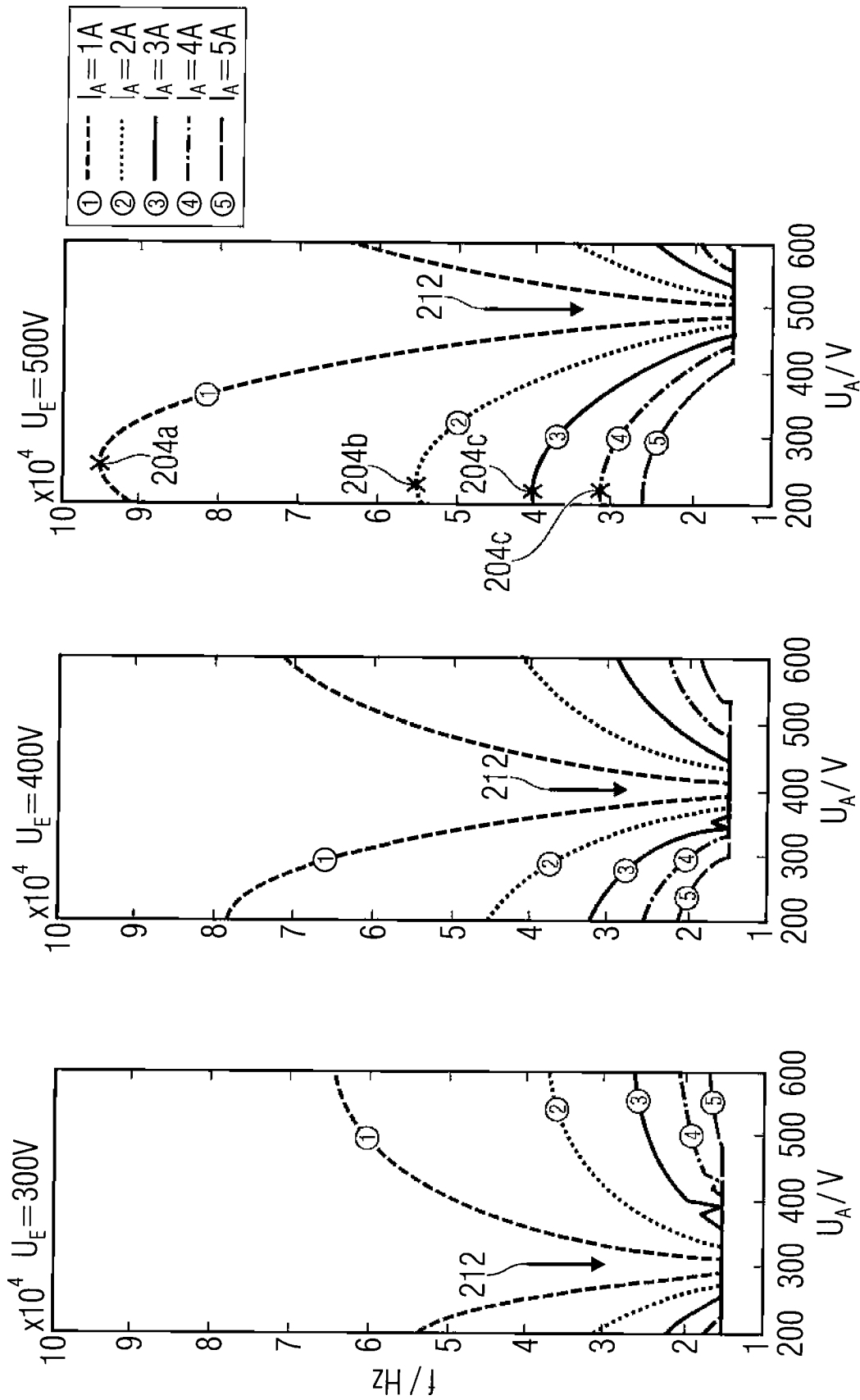


FIG 16C

FIG 16B

FIG 16A

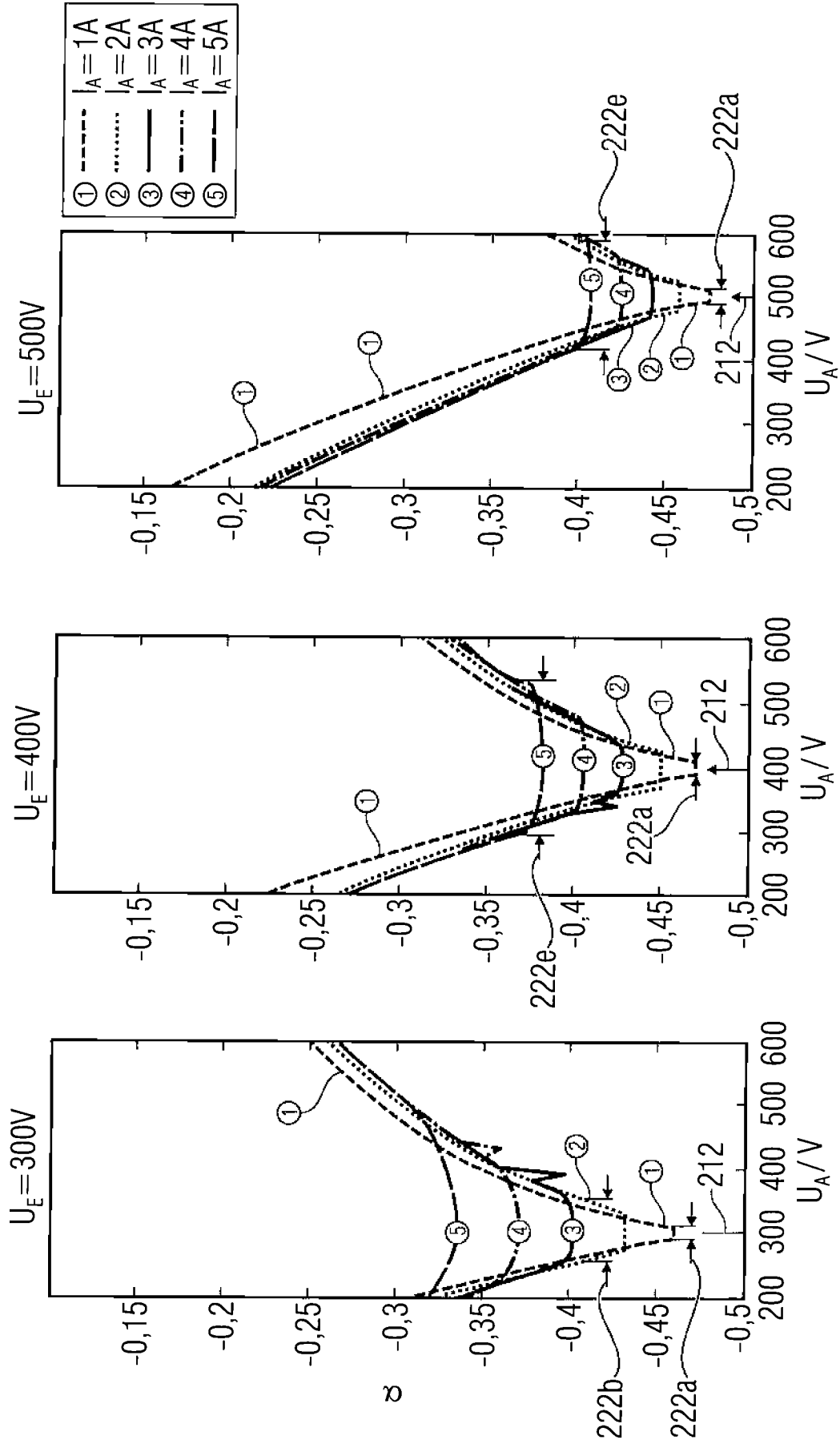


FIG 17C

FIG 17B

FIG 17A

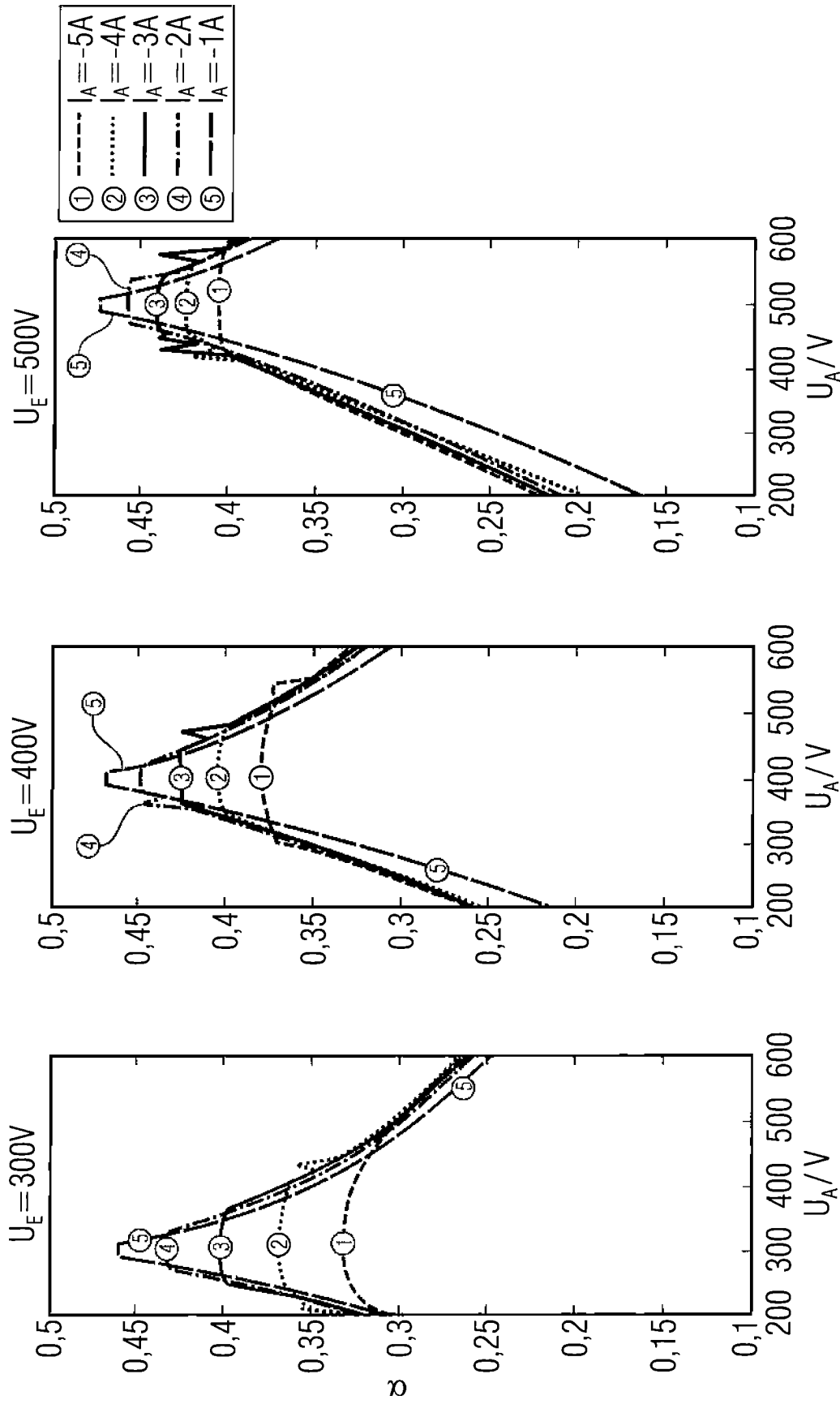


FIG 18C

FIG 18B

FIG 18A

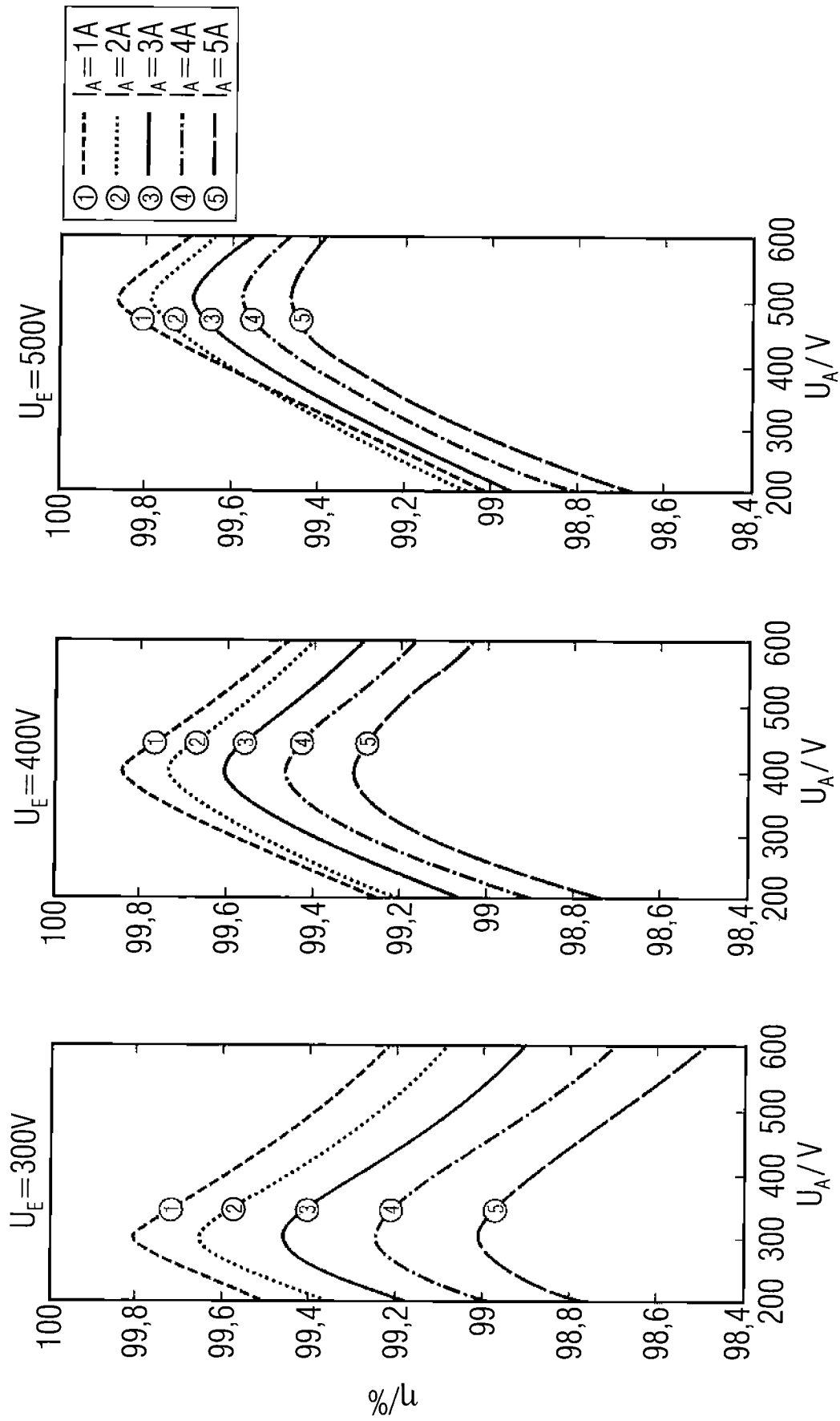


FIG 19C

FIG 19B

FIG 19A

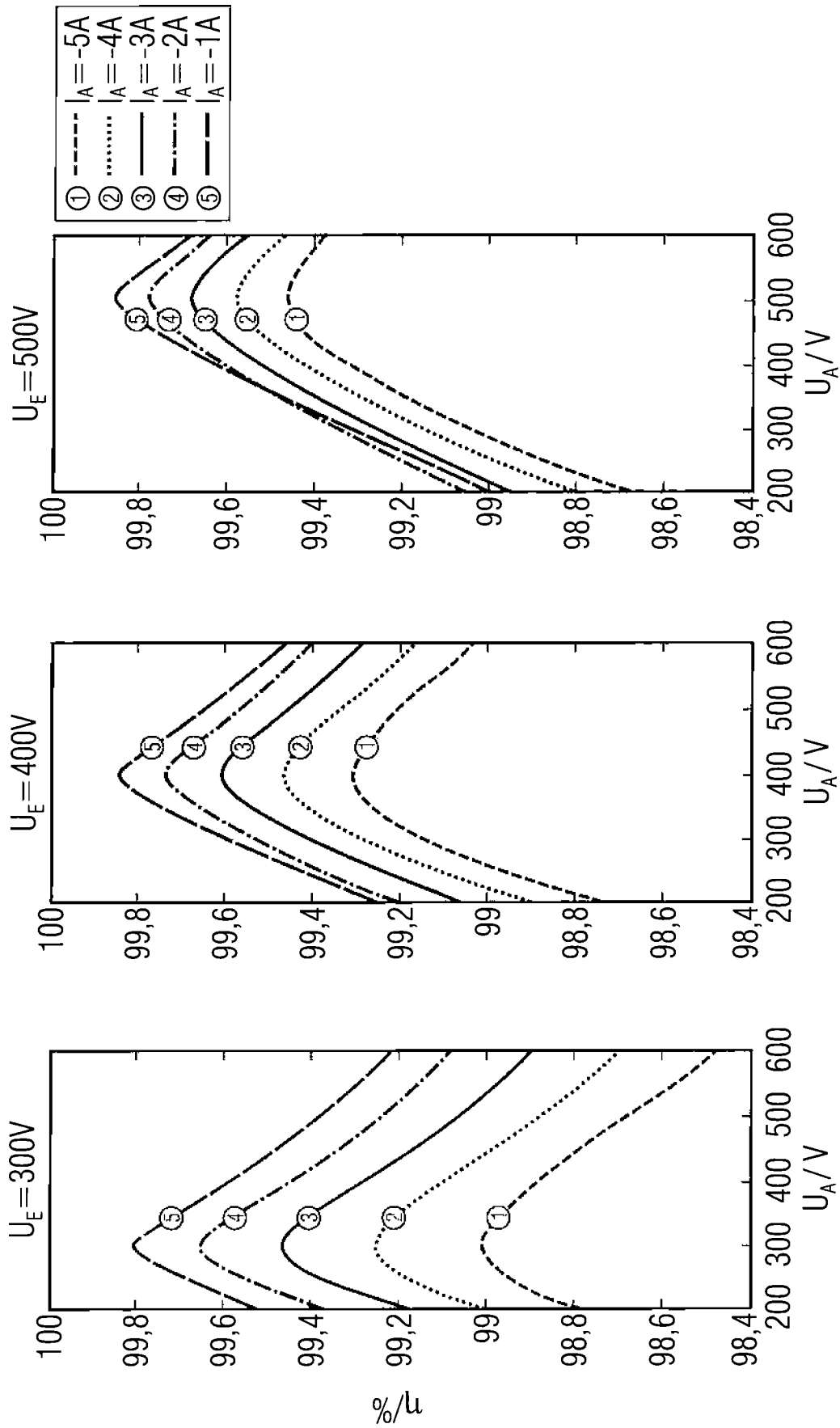


FIG 20C

FIG 20B

FIG 20A