

(12) **Patentschrift**

(21) Anmeldenummer: A 106/2023
(22) Anmeldetag: 15.09.2023
(45) Veröffentlicht am: 15.12.2024

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

(56) Entgegenhaltungen:
VAGHELA, M.A. et al. "Tri-State Coupled Inductor Based High Step-Up Gain Converter Without Right Hand Plane Zero" IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs [online]. Juni 2023 (06.2023). Bd. 70, Nr. 6, Seiten 2291–2295. [ermittelt am 5. Juli 2024].
<doi:10.1109/TCSII.2023.3237679>. Ermittelt von <<https://ieeexplore.ieee.org/document/10018479>>.
AT 500921 A1
JP 2010063299 A
CN 104821784 A
US 2020328672 A1
WO 9712308 A1

(73) Patentinhaber:
Himmelstoss Felix Dipl.-Ing. Dr.
2351 Wiener Neudorf (AT)
(72) Erfinder:
Himmelstoss Felix Dipl.-Ing. Dr.
2351 Wiener Neudorf (AT)

(54) **Hochsetzsteller mit gekoppelten Spulen und zwei Eingriffsmöglichkeiten**

(57) Hochsetzsteller, bestehend aus einer positiven (1) und einer negativen Eingangsklemme (2), aus einer positiven (3) und einer negativen Ausgangsklemme (4), zwei elektronischen Schaltern (S1, S2) mit entsprechender Ansteuerschaltung, zwei Dioden (D1, D2), zwei magnetisch miteinander gekoppelten Wicklungen (N1, N2) und einem Kondensator (C1). Im kontinuierlichen Betrieb laufen in der Taktperiode drei Moden ab. Im ersten Modus sind beide elektronischen Schalter (S1, S2) eingeschaltet, beide Dioden (D1, D2) sperren. Im zweiten Modus wird der erste elektronische Schalter (S1) ausgeschaltet, dadurch schaltet die erste Diode (D1) ein. Im dritten Modus wird auch der zweite Schalter (S2) ausgeschaltet und die zweite Diode (D2) schaltet ein. Der Vorteil des Konverters ist die Vermeidung des Einschaltstromstoßes, wenn der Konverter an ein starres DC Netz geschaltet wird. Zusätzlich ergibt sich ein Spannungsübersetzungsverhältnis mit zwei Eingangsgrößen, den Tastverhältnissen der beiden Schalter. Das Spannungsübersetzungsverhältnis wird zusätzlich linearisiert.

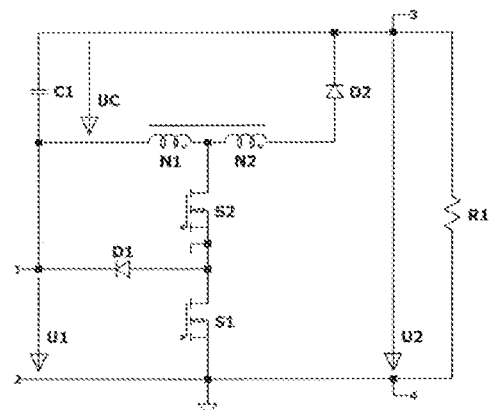


Fig. 3

Beschreibung

HOCHSETZSTELLER MIT GEKOPPELTEN SPULEN UND ZWEI EINGRIFFSMÖGLICHKEITEN

[0001] Die Erfindung betrifft einen Hochsetzsteller, bestehend aus einer positiven (1) und einer negativen Eingangsklemme (2), an die die Eingangsspannung (U_1) angelegt ist, aus einer positiven (3) und einer negativen Ausgangsklemme (4), an die die Last (R_1) angeschaltet ist, einem ersten elektronischen Schalter (S1) und einem zweiten elektronischen Schalter (S2) mit entsprechender Ansteuerschaltung, einer ersten Diode (D1), einer zweiten Diode (D2), einer ersten Wicklung (N1), einer zweiten Wicklung (N2) und einem Kondensator (C1), wobei die positive Eingangsklemme (1) an die Kathode der ersten Diode (D1) und an den ersten Anschluss der ersten Wicklung (N1) geschaltet ist, an die Verbindung vom zweiten Anschluss der ersten Wicklung (N1) und dem ersten Anschluss der zweiten Wicklung (N2) der positive Anschluss des zweiten elektronischen Schalters (S2) geschaltet ist, an den negativen Anschluss des zweiten elektronischen Schalters (S2) der positive Anschluss des ersten elektronischen Schalters (S1) und die Anode der ersten Diode (D1) geschaltet sind, an den zweiten Anschluss der zweiten Wicklung die Anode der zweiten Diode (D2) geschaltet ist, an die Kathode der zweiten Diode (D2) die positive Ausgangsklemme (3) geschaltet ist, die negative Eingangsklemme (2), der negative Anschluss des ersten elektronischen Schalters (S1) und die negative Ausgangsklemme (4) verschaltet sind und die erste Wicklung (N1) mit der zweiten Wicklung (N2) magnetisch miteinander gekoppelt ist.

[0002] Die Erfindung wird nun an Hand von Abbildungen erläutert. Die Schaltungen sind beispielhaft mit MOSFETs gezeichnet.

[0003] Fig. 1 stellt die Ausgangsschaltung dar,

[0004] Fig. 2 zeigt den Einschaltstromstoß dieses Konverters.

[0005] Fig. 3 zeigt nun die Variante der gegenständlichen Erfindung und

[0006] Fig. 4, dass dabei der Einschaltstromstoß vermieden wird.

[0007] Fig. 5 und Fig. 6 zeigen die Ströme und die Spannungen an den Bauteilen.

[0008] In Fig. 7 ist das Spannungsübersetzungsverhältnis dargestellt.

[0009] Der Ausgangspunkt ist ein Konverter, der in G M. A. Vaghela and M. A. Mulla, "Tri-State Coupled Inductor Based High Step-Up Gain Converter Without Right Hand Plane Zero," in IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, vol. 70, no. 6, pp. 2291-2295, June 2023, doi: 10.1109/TCSII.2023.3237679 dargestellt ist. Der entscheidende Unterschied liegt in der Position des Speicherkondensators. Er wird in der gegenständlichen Erfindung zwischen der positiven Eingangsklemme und der positiven Ausgangsklemme geschaltet und nicht parallel zu den Ausgangsklemmen.

[0010] In AT 500921 (FACHHOCHSCHULE TECHNIKUM WIEN) wird ein modifizierter Hochsetzsteller dargestellt, bei dem der Speicherkondensator parallel zu Spule und Diode geschaltet ist.

[0011] Durch die Kombination erhält man eine gänzlich neue Hochsetzstellertopologie, die gegenüber dem klassischen Hochsetzer mehrere Vorteile hat: die Spannungsbelastung des Kondensators wird verringert, der gefährliche Einschaltstromstoß beim Anschalten an ein steifes Netz (z.B. Fahrzeugbatterien) wird vermieden, das Spannungsübersetzungsverhältnis hat einen zusätzlichen Parameter durch das Verhältnis der Windungszahlen und man kann so die Ausgangsspannung weiter vergrößern. Durch entsprechende Ansteuerung der beiden elektronischen Schalter kann das Spannungsübersetzungsverhältnis linearisiert werden, und aus regelungstechnischer Hinsicht wichtig: die Nullstelle auf der rechten Seite wird vermieden. Dies wird in der nach der Literatur folgenden Beschreibung erläutert.

[0012] JP 2010063299 A (ORIGIN ELECTRIC) zeigt mehrere andere Schaltungsvarianten um das Spannungsübersetzungsverhältnis zu steigern. Sie unterscheiden sich topologisch von der

gegenständlichen Erfindung.

[0013] CN 104821784 A (WUHAN LYUDING TIANSHU) zeigt einen Konverter, bei dem ebenfalls ein Kondensator zwischen Ein- und Ausgang geschaltet ist, aber der Einschaltstromstoß wird dadurch nicht vermieden, weil parallel zum Ausgang ein Kondensator geschaltet wird. Der zwischen Ausgang und Eingang geschaltete Kondensator dient zusammen mit einem weiteren Kondensator und dem zusätzlichen Transistor und der zusätzlichen Diode zur Vergrößerung des Spannungsübersetzungsverhältnisses.

[0014] US 2020328672 A1 (Li, R. et al.) zeigt eine interessante Schaltung, die über zwei Gleichrichter mit dem Wechselspannungsnetz verbunden ist. Die Schaltung dient zum Hochsetzen und durch die Erweiterung ist es möglich, die Ausgangsspannung stabiler zu halten. Zusätzlich wird der Einschaltstromstoß vermieden. Topologisch unterscheidet sich die Schaltung deutlich von der gegenständlichen Erfindung.

[0015] WO 9712308 A1 (MOTOROLA INC) zeigt einen Hochsetzsteller mit einer Hilfsschaltung zur Verringerung des Einschaltstromstoßes. Es ist dabei anzumerken, dass dazu ein ohmscher Widerstand verwendet wird.

[0016] In der Fachliteratur findet man Topologien ohne gekoppelte Spulen und zwar für die Ausgangsvariante

[0017] K. Viswanathan, R. Oruganti and D. Srinivasan, "Dual-mode control of tri-state boost converter for improved performance," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, no. 4, pp. 790-797, July 2005, doi: 10.1109/TPEL.2005.850907.

[0018] K. Viswanathan, R. Oruganti and D. Srinivasan, "A novel tri-state boost converter with fast dynamics," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 17, no. 5, pp. 677-683, Sept. 2002, doi: 10.1109/TPEL.2002.802197.

[0019] S. K. Viswanathan, R. Oruganti and D. Srinivasan, "Dual mode control of tri-state boost converter for improved performance," IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist, 2003. PESC '03., Acapulco, Mexico, 2003, pp. 944-950 vol.2, doi: 10.1109/PESC.2003.1218182.

[0020] Der Konverter nach Fig. 1 besteht aus zwei elektronischen Schaltern S1 und S2, zwei gekoppelten Spulen N1, N2 und zwei Dioden D1, D2. Parallel zu den Ausgangsklemmen (3, 4) ist ein Kondensator C1 geschaltet und als Last ist ein Widerstand dargestellt. Die Eingangsspannung U1 ist zwischen den Eingangsklemmen 1 und 2 angelegt. Diese Schaltung hat wie praktisch alle Hochsetzsteller den Nachteil eines hohen Einschaltstroms, wenn der Konverter an eine starre Eingangsspannung (z.B. Autobatterien oder ein mit Batterien und Superkondensatoren gepufferetes Gleichspannungsnetz (DC micro-grid)) geschaltet wird.

[0021] Eine Idee dieses entstehenden Eingangsstroms erhält man, wenn man ideale Bauteile annimmt und auch noch die Last weglässt. Die beiden Wicklungen N1 und N2 bilden zusammen die Induktivität L_{12} . Legt man nun die Spannung U1 an, so lässt sich der Strom beschreiben durch

$$U_1 = L_{12} \frac{di}{dt} + \frac{1}{C_1} \int_0^t i dt .$$

[0022] Mit Hilfe der Laplace Transformation kann man den Strom zu

$$i = U_1 \sqrt{\frac{C_1}{L_{12}}} \sin \left(\sqrt{\frac{1}{C_1 L_{12}}} t \right)$$

berechnen. Der Spitzenstrom ergibt sich zu

$$\hat{I} = U_1 \sqrt{\frac{C_1}{L_{12}}} .$$

[0023] Wenn der Strom negativ wird, endet der Puls, da die Diode D2 sperrt. Die Dauer des Pulses ergibt sich zu

$$T_{IN} = \pi \sqrt{C_1 L_{12}}.$$

[0024] Fig. 2 zeigt den Verlauf des Stroms durch die Spule, die Ausgangsspannung und die Eingangsspannung. Auf diesem Bild ist die Last angeschaltet. Die Ausgangsspannung schießt in die Höhe und der Kondensator wird durch die Last wieder entladen. Wenn die Ausgangsspannung unter die Eingangsspannung fällt, schaltet D2 wieder ein. Es kommt zu einer leichten gedämpften Schwingung.

[0025] Um nun diesen großen Strom zu vermeiden, der zu einer Belastung der Bauteile führt, muss man die Position des Kondensators verändern. Er wird zwischen die positive Eingangsklemme (1) und die positive Ausgangsklemme (3) geschaltet. Damit ergibt sich die Schaltung gemäß Fig. 3.

[0026] Betrachtet man nun ebenfalls das Anschalten einer Spannungsquelle, so kommt es nun zu keinem Einschaltstromimpuls, wie aus Fig. 4 zu entnehmen ist.

[0027] Die Funktionsweise der Schaltung soll nun kurz beschrieben werden. Dazu werden ideale Bauelemente vorausgesetzt (keine Verlustwiderstände, ideales Schalten der Halbleiterelemente). Die beiden Schalter werden mit der gleichen Frequenz betrieben und immer gleichzeitig eingeschaltet. Das Tastverhältnis (Einschaltzeit des Schalters in Bezug auf die Periodendauer) für Schalter S1 ist mit d_1 und für Schalter S2 mit d_2 bezeichnet. Im kontinuierlichen Betrieb folgen drei Zustände (Moden) einander ab. In Modus M1 sind beide Schalter eingeschaltet und die Eingangsspannung liegt an der Wicklung N1 und der Strom durch diese steigt. In Modus M2 wird der Schalter S1 gesperrt. Der Strom der Wicklung N1 kommutiert nun in die Diode D1. Die Spannung an der Wicklung N1 ist nun null (ideale Bauelemente) und der Strom bleibt gleich. Wird nun auch S2 ausgeschaltet, so beginnt der Modus M3. Nun sind beide Wicklungen in Serie und da sie magnetisch gekoppelt sind, reduziert sich der Strom auf einen Wert, sodass die Durchflutung die gleiche bleibt, damit der magnetische Fluss im Magnetkern nicht springt.

[0028] Das Spannungs-Zeit Gleichgewicht für die Wicklung N1 ergibt sich zu

$$U_1 d_1 = |U_1 - U_2| \frac{N_1}{N_1 + N_2} (1 - d_2).$$

[0029] Damit lässt sich die Ausgangsspannung in Abhängigkeit der Eingangsspannung U_1 , der beiden Tastverhältnisse d_1 und d_2 , der Windungszahlen der Wicklungen N_1 und N_2 angeben zu

$$U_2 = \frac{d_1(N_1 + N_2) + (1 - d_2)N_1}{(1 - d_2)N_1} U_1 \quad d_1 \leq d_2.$$

[0030] Die Spannung am Kondensator ergibt sich zu

$$U_{C1} = U_1 \frac{d_1}{1 - d_2} \frac{N_1 + N_2}{N_1} \quad d_1 \leq d_2.$$

[0031] Um eine gute Kopplung zwischen den Wicklungen zu erzielen ist eine bifilare Wicklung vorteilhaft.

[0032] Für gleiche Windungszahlen

$$N_1 = N_2 = N$$

ergibt sich die Ausgangsspannung und die Spannung am Kondensator zu

$$U_2 = \frac{1 + 2d_1 - d_2}{1 - d_2} U_1 \quad d_1 \leq d_2$$

$$U_{C1} = 2 \frac{d_1}{1 - d_2} U_1 \quad d_1 \leq d_2.$$

[0033] Ein interessanter Aspekt der Schaltung ist, dass für ein konstantes d_2 sich ein linearer Zusammenhang für das Spannungsübersetzungsverhältnis in Abhängigkeit zum Tastverhältnis d_1 von Schalter S1 ergibt

$$M = \frac{U_2}{U_1} = 1 + K \cdot d_1 \quad \text{mit} \quad K = \frac{2}{1-d_2}.$$

[0034] Fig. 7 stellt das Spannungsübersetzungsverhältnis in Abhängigkeit von d_1 mit d_2 als Parameter für ein Windungsverhältnis von eins zu eins dar. Die gekrümmte Kurve stellt das Spannungsübersetzungsverhältnis des normalen Boost Konverters mit gekoppelten Spulen (Windungsverhältnis 1:1) zum Vergleich dar. Man sieht, dass bei kleineren Tastverhältnissen höhere Ausgangsspannungen erzielt werden können. Um noch höhere Spannungen zu erzielen können zwei oder mehrere Konverter in Kaskade geschaltet werden.

[0035] Wenn $d_1 > d_2$ ist funktioniert die Schaltung wie ein gewöhnlicher Boost Konverter, und die Ausgangsspannung und die Kondensatorspannung ergeben sich zu

$$U_2 = \frac{d_2 N_2 + N_1}{N_1(1-d_2)} U_1, \quad U_{C1} = \frac{d_2}{1-d_2} \frac{N_1 + N_2}{N_1} U_1.$$

[0036] Für $N_1 = N_2 = N$ ergibt sich dann

$$U_2 = \frac{1+d_2}{1-d_2} U_1$$

$$U_{C1} = 2 \frac{d_2}{1-d_2} U_1.$$

[0037] Für den Kondensator gilt, dass im eingeschwungenen Zustand der Strom im Mittel null ist.

[0038] Durch den Kondensator fließt, solange die Diode D2 sperrt, der negative Laststrom und wenn die Diode leitet, fließt der negative Laststrom plus der Strom durch D2, das entspricht dem Strom durch die Wicklungen. Das Ladungsgleichgewicht kann daher angeschrieben werden gemäß

$$I_R d_2 = (\bar{I}_{N2,3} - I_R)(1-d_2).$$

[0039] $\bar{I}_{N2,3}$ ist der Mittelwert des Stroms durch N2, wenn D2 leitet. Dieser ergibt sich aus dem Laststrom zu

$$\bar{I}_{N2,3} = \frac{I_R}{1-d_2}.$$

[0040] Damit kann man nun den mittleren Strom durch N1 im Intervall M1, wenn die Dioden D1 und D2 sperren, bestimmen zu

$$\bar{I}_{N1,1} = \frac{I_R}{1-d_2} \frac{N_1 + N_2}{N_2}.$$

[0041] Zum besseren Verständnis sind in den Figuren 5 und 6 die Ströme durch und die Spannungen an den Bauteilen dargestellt. Dabei hat der Schalter S1 ein Tastverhältnis von 30 % und S2 ein Tastverhältnis von 50 %. Oben ist der Strom durch die Quelle dargestellt (dieser Strom ist hier negativ gezeichnet, also in gleicher Richtung wie die Spannung entsprechend dem Verbraucherzählpfeilsystem). Solange S1 eingeschaltet ist, nimmt der Strom zu, wird aber S1 abgeschaltet, so fällt der Strom im Eingang wieder auf den Laststrom zurück. Das nächste Diagramm zeigt den Strom durch den Kondensator. Dieser wird immer durch den Laststrom durchflossen und dadurch entladen. Wenn jedoch D2 einschaltet, wenn beide Transistoren ausgeschaltet sind, dann wird der Kondensator wieder nachgeladen. Der Strom durch die Wicklung N1 ist im nächsten Verlauf gezeichnet. Solange S1 und S2 leiten, steigt der Strom, wenn nur mehr S2 leitet bleibt er praktisch gleich, wenn auch S2 ausschaltet, so springt der Strom auf die Hälfte (da gleiche Windungszahlen für die Wicklungen gewählt wurden) und sinkt weiter ab. Wenn die beiden Schalter S1 und S2 am Beginn der nächsten Taktperiode wieder einschalten, so springt der Strom

wieder auf den doppelten Wert und steigt entsprechend der Eingangsspannung wieder an. Im nächsten Diagramm sieht man den Strom durch die Wicklung N2. Solange D2 sperrt fließt kein Strom durch die zweite Wicklung, und wenn die Diode D2 leitet, entspricht der Strom dem der Wicklung N1. Die beiden letzten Bilder zeigen die Ströme durch die beiden Dioden. Der Strom durch D2 ist gleich dem Strom durch N2. Der Strom durch N1 wird durch D1 übernommen, wenn S1 ausschaltet aber S2 leitend ist. Der Strom bleibt konstant.

[0042] Fig. 6 zeigt die Spannungsverläufe an den Bauteilen. Im obersten Diagramm sind die Ausgangsspannung und die Eingangsspannung dargestellt. Das nächste Diagramm zeigt die Spannung an S2. Das dritte Diagramm stellt die Spannung an S1 dar. Das vierte und das fünfte Diagramm zeigen die Spannungen an der ersten Wicklung und der zweiten Wicklung, die, bedingt durch das gleiche Windungsverhältnis, gleich sind. Die beiden letzten Diagramme zeigen die Spannung an den Dioden, zuerst an D2 und zuunterst an D1.

[0043] Die Aufgabe einen Hochsetzsteller ohne Einschaltstrom zu realisieren wird erfindungsgemäß dadurch bewerkstelligt, dass der Kondensator (C1) zwischen der positiven Ausgangsklemme (3) und der positiven Eingangsklemme (1) geschaltet ist.

[0044] Um die Wicklungen (N1, N2) gut magnetisch zu koppeln ist es sinnvoll, dass die beiden Wicklungen (N1, N2) bifilar ausgeführt sind. Zur Vermeidung parasitärer Induktivitäten und um einen kompakten Aufbau bei größeren Leistung zu erzielen ist es sinnvoll, dass der erste (S1) und der zweite elektronische Schalter (S2) als Halbbrückenmodul ausgeführt ist. Ebenso ist es sinnvoll, dass zur Vermeidung von Überspannungen, bedingt durch die Streuung der gekoppelten Spulen (N1, N2), eine Entlastungsschaltung vorgesehen ist.

[0045] Um höhere Spannungen zu erzielen kann man zwei oder mehrere Hochsetzsteller der gegenständlichen Ausführung in Kaskade schalten.

Patentansprüche

1. Hochsetzsteller, bestehend aus einer positiven (1) und einer negativen Eingangsklemme (2), an die die Eingangsspannung (U₁) angelegt ist, aus einer positiven (3) und einer negativen Ausgangsklemme (4), an die die Last (R₁) angeschaltet ist, einem ersten elektronischen Schalter (S₁) und einem zweiten elektronischen Schalter (S₂) mit entsprechender Ansteuererschaltung, einer ersten Diode (D₁), einer zweiten Diode (D₂), einer ersten Wicklung (N₁), einer zweiten Wicklung (N₂) und einem Kondensator (C₁), wobei die positive Eingangsklemme (1) an die Kathode der ersten Diode (D₁) und an den ersten Anschluss der ersten Wicklung (N₁) geschaltet ist, an die Verbindung vom zweiten Anschluss der ersten Wicklung (N₁) und dem ersten Anschluss der zweiten Wicklung (N₂) der positive Anschluss des zweiten elektronischen Schalters (S₂) geschaltet ist, an den negativen Anschluss des zweiten elektronischen Schalters (S₂) der positive Anschluss des ersten elektronischen Schalters (S₁) und die Anode der ersten Diode (D₁) geschaltet sind, an den zweiten Anschluss der zweiten Wicklung (N₂) die Anode der zweiten Diode (D₂) geschaltet ist, an die Kathode der zweiten Diode (D₂) die positive Ausgangsklemme (3) geschaltet ist, die negative Eingangsklemme (2), der negative Anschluss des ersten elektronischen Schalters (S₁) und die negative Ausgangsklemme (4) verschaltet sind und die erste Wicklung (N₁) mit der zweiten Wicklung (N₂) magnetisch miteinander gekoppelt ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Kondensator (C₁) zwischen der positiven Ausgangsklemme (3) und der positiven Eingangsklemme (1) geschaltet ist.
2. Hochsetzsteller gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Wicklung (N₁) und die zweite Wicklung (N₂) bifilar ausgeführt sind.
3. Hochsetzsteller gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass der erste elektronische Schalter (S₁) und der zweite elektronische Schalter (S₂) als Halbbrückenmodul ausgeführt ist.
4. Hochsetzsteller einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Vermeidung von Überspannungen, bedingt durch die Streuung der gekoppelten ersten Wicklung (N₁) und zweiten Wicklung (N₂), eine Entlastungsschaltung vorgesehen ist.
5. Zumindest zwei in Kaskade geschaltete Hochsetzsteller, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zumindest zwei Hochsetzsteller jeweils als Hochsetzsteller gemäß einem der Patentansprüche 1 bis 4 ausgebildet sind.

Hierzu 3 Blatt Zeichnungen

Figuren

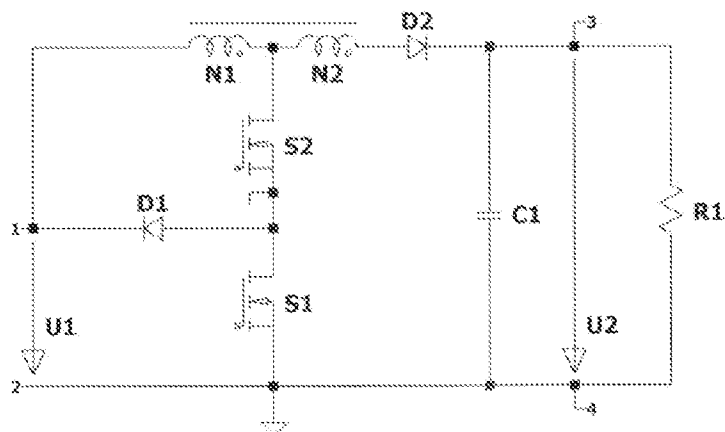


Fig. 1

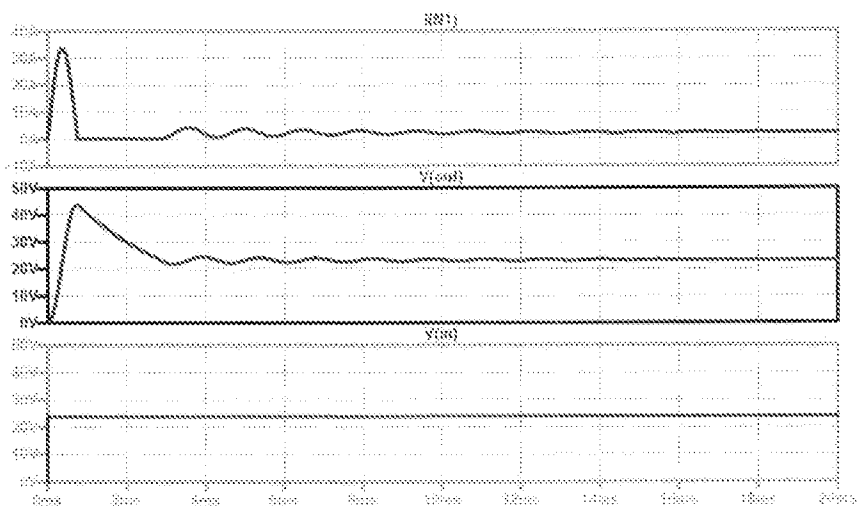


Fig. 2

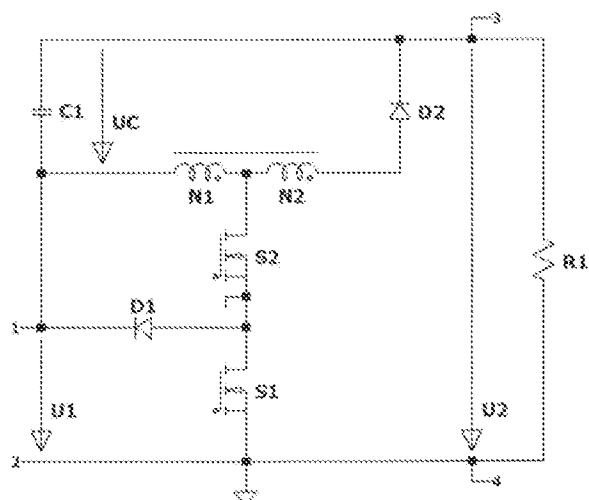


Fig. 3

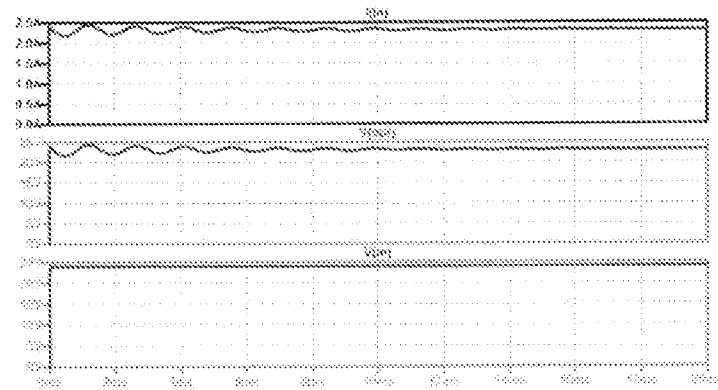


Fig. 4

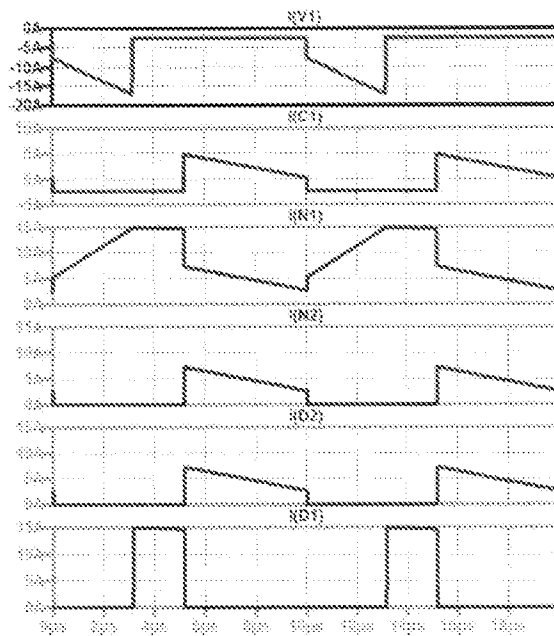


Fig. 5

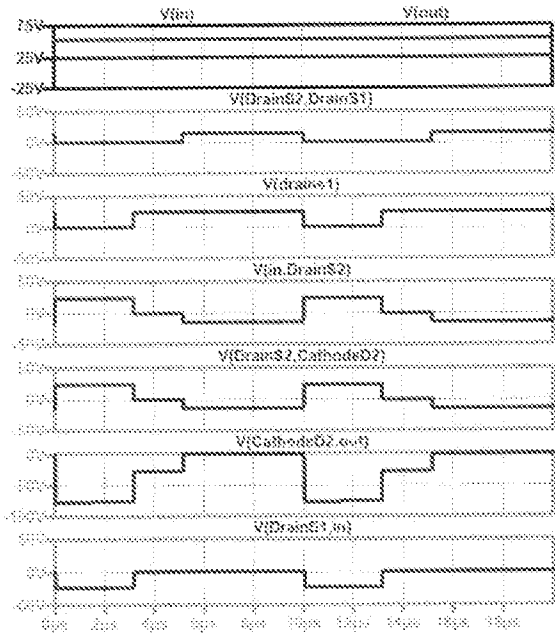


Fig. 6

