

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-lichtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

(12) **PATENTSCHRIFT**

(21) Anmeldenummer: 01000/07

(22) Anmeldedatum: 22.06.2007

(24) Patent erteilt: 31.12.2010

(45) Patentschrift veröffentlicht: 31.12.2010

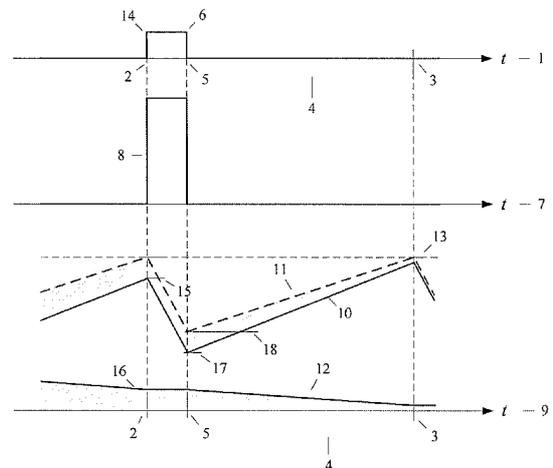
(73) Inhaber:
ETH Zürich, ETH transfer, Rämistrasse 101
8092 Zürich (CH)

(72) Erfinder:
Dominik Bortis, 8046 Zürich (CH)
Stefan Waffler, 8051 Zürich (CH)
Jürgen Biela, 8004 Zürich (CH)
Johann W. Kolar, 8044 Zürich (CH)

(74) Vertreter:
Frei Patentanwaltsbüro AG, Postfach 1771
8032 Zürich (CH)

(54) **Verfahren und Vorrichtung zur Ermittlung des Sollwertes eines Nachladestromes.**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung des Sollwertes des Nachladestromes eines am Eingang eines Pulsed Power Systems liegenden Eingangskondensators wobei der Nachladestrom durch einen Schaltverstärker geregelt und über eine Induktivität eingepreßt wird. Ziel ist, einen Sollwertverlauf derart zu erreichen, dass die Nachladeschaltung das speisende Netz ungeachtet der pulsformigen Leistungsaufnahme des Pulsed Power Systems möglichst gleichmässig, d.h. mit einem zeitlich konstanten Leistungsfluss belastet. Erfindungsgemäss wird hierfür eine Eingangskondensatoranfangsspannung (15) erfasst und deren Abweichung gegenüber einem Pulsspannungssollwert (13) ermittelt, und nach einem Endzeitpunkt (5) des Pulses (8) die Eingangskondensatorpulsendspannung (17) erfasst und damit ein zu einem Anfangszeitpunkt (2) der Pulsperiode (4) vorliegender Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler (16) für die folgende Nachladung des Eingangskondensators berücksichtigt. Um einen stationär konstanten Nachladestrom zu erreichen, wird ein rampenförmig ansteigender Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf (11) vorgegeben. Die Regelung der Nachladeschaltung wird vorteilhaft kaskadiert ausgeführt und hierbei durch einen überlagerten Eingangsspannungsregler aus einem Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf (11) und dem Eingangskondensatorspannungssollwert (10) durch Subtraktion ein Eingangskondensatorspannungsregelfehler (12) ermittelt und einer unterlagerten Nachladestromregelung nach dynamischer Gewichtung als Nachladestromsollwertanteil vorgegeben.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Vorgabe eines stationär konstanten Sollwertes des Nachladestromes (oder Nachladestromsollwert) des Eingangskondensators eines Pulsed Power Systems bei hohem pulsfrequenter Spannungsrüffel wie im Oberbegriff des Patentanspruches 1 beschrieben ist.

Stand der Technik

[0002] Solid State Pulsed Power Systeme zur Erzeugung kurzer Hochspannungs- bzw. Hochenergiepulse weisen einseitig einen Kondensator zur niederinduktiven Bereitstellung des Pulsstromes auf. Die Nachladung des Eingangskondensators soll stationär ungeachtet der pulsfrequenten Schwankung der Kondensatorspannung mit möglichst konstanter Leistung erfolgen, sodass die Spannungseinbrüche zufolge der Pulse nicht in einer pulsförmigen Belastung des speisenden Netzes resultieren bzw. bei Speisung über Pulsleichrichtersysteme aus dem Dreiphasenetz eine weitgehend sinusförmige Stromform erreicht wird. Da die Pulse eine genau definierte Spannungsamplitude aufweisen müssen, muss die Nachladung weiters so erfolgen, dass vor Auslösung eines Pulses ein genau definierter Wert der Eingangskondensatorspannung vorliegt.

[0003] Bekannte Konzepte zur Regelung der Nachladeschaltung beruhen auf einer Unterdrückung der pulsfrequenten Schwankung der Eingangskondensatorspannung durch Tiefpassfilterung und weisen daher nur sehr geringe Dynamik auf bzw. kann die Speiseschaltung einer raschen Änderung der Pulsfrequenz oder der Pulslänge nicht folgen, womit die Spannungsamplitude der durch das Pulsed Power System generierten Pulse unerlaubt hohe Abweichungen von Sollwert zeigen. Alternativ kann die Nachladeschaltung mit hoher Dynamik ausgeführt, d.h. die Eingangskondensatorspannung mit enger Toleranz geregelt werden, wobei die Nachladeschaltung dann versucht, einen Teil der Pulsleistung unmittelbar aus dem Netz zu beziehen. Dies resultiert in einer Belastung des Netzes mit hohen Leistungsspitzen bzw. bei Einsatz von Pulsleichrichtersystemen in einer pulsfrequenten Verzerrung des Netzstromes, welche die Vorschriften bezüglich des zulässigen Oberschwingungsgehaltes der Netzströme verletzt.

Darstellung der Erfindung

[0004] Aufgabe der Erfindung ist es daher, ein Verfahren zur Ermittlung des Sollwertes des Eingangskondensatornachladestromes zu schaffen, welches ungeachtet der pulsfrequenten Spannungsschwankung auf einen konstanten Nachladestromsollwert und diesen so wählt, dass vor der Auslösung eines Pulses ein definierter Eingangsspannungssollwert genau erreicht wird.

[0005] Erfindungsgemäss wird dies durch das Verfahren nach Patentanspruch 1 erreicht. Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind den abhängigen Patentansprüchen zu entnehmen.

[0006] Dem Eingangskondensator eines Pulsed Power Systems wird periodisch, d.h. am Anfang einer Pulsperiode, für eine kurze Pulsdauer ein hoher Strom entnommen. Entsprechend bricht dann die Eingangsspannung signifikant ein und muss durch eine Nachladeschaltung bis zur Auslösung des nächstfolgenden Pulses wieder auf den durch eine übergeordnete Steuereinheit vorgegebenen Pulsspannungssollwert gebracht werden.

[0007] Erfindungsgemäss wird der Nachladestromsollwert derart gebildet, dass stationär ein konstanter Wert des Nachladestromes resultiert. Hiefür wird die Eingangskondensatorspannung unmittelbar vor Auslösung eines Pulses, d.h. am durch ein Synchronisierungssignal indizierten Beginn einer Pulsperiode, erfasst (Eingangskondensatoranfangsspannung) und die Abweichung gegenüber dem Pulsspannungssollwert (Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler) nach der Beziehung $\text{Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler} = \text{Pulsspannungssollwert} - \text{Eingangskondensatoranfangsspannung}$ ermittelt. Nach Ende des Pulses wird der dann aufgrund der Pulsstromentnahme gegenüber Eingangskondensatoranfangsspannung signifikant abgesunkene Eingangskondensatorspannungswert (Eingangskondensatorpulsendspannung) erneut erfasst und ein Eingangskondensatorpulsendspannungssollwert durch Addition von Eingangskondensatorpulsendspannung und Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler, d.h. $\text{Eingangskondensatorpulsendspannungssollwert} = \text{Eingangskondensatorpulsendspannung} + \text{Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler}$, berechnet. Damit wird ein am Anfang der Pulsperiode vorliegender Spannungsfehler für die folgende Nachladung des Eingangskondensators berücksichtigt.

[0008] Damit die Nachladung stationär mit konstantem Strom erfolgt, wird dann der Nachladeschaltung ein linearer, ausgehend von Eingangskondensatorpulsendspannungssollwert auf den Pulsspannungssollwert am Ende der Pulsperiode rampenförmig ansteigender Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf vorgegeben. Da dem Pulscondensator innerhalb dieses Zeitintervalls kein Strom entnommen wird, resultiert bei Führung der Eingangskondensatorspannung entsprechend dem Sollwert ein konstanter Nachladestrom und damit eine weitgehend konstante Leistungsaufnahme der Nachladeschaltung, d.h. durch die Nachladeschaltung wird keine pulsförmige Belastung eines speisenden Netzes verursacht. Die Regelung der Nachladeschaltung kann vorteilhaft kaskadiert ausgeführt werden, d.h. ein überlagerter Eingangsspannungsregler ermittelt aus dem Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf und dem Eingangskondensatorspannungswert den Eingangskondensatorspannungsregelfehler und gibt dementsprechend einer unterlagerten Nachladestromregelung einen Nachladestromsollwert vor. Um innerhalb der Pulsdauer, d.h. bei starkem Absinken der Eingangskondensatorspannung und dem damit verbundenen hohen Eingangskondensatorspannungsregelfehler das Auftreten einer hohen Nachla-

destromspitze zu vermeiden, wird der Eingangskondensatorspannungsregelfehler bei Pulsbeginn, d.h. der Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler für die Pulsdauer festgehalten und erst nach Pulsende wieder freigegeben. Gemäss der vorstehend beschriebenen Generierung des Eingangskondensatorspannungssollwertverlaufs ist dann am Pulsende eine glatte Fortsetzung des Verlaufes des Eingangsspannungsregelfehlers gegeben, sodass auch ein glatter Verlauf des Nachladestromes sichergestellt ist.

[0009] Zusammenfassend wird durch das erfindungsgemässe Verfahren also ein glatter Verlauf des Eingangskondensatorspannungsregelfehlers erreicht und nach Pulsende bis zum Anfang der nächsten Pulsperiode ein linearer Soll-Anstieg der Eingangskondensatorspannung definiert, der durch einen konstanten Nachladestrom erreicht werden kann.

[0010] Eine vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung nach Patentanspruch 1 beschreibt der abhängige Patentanspruch 2. Um das die Nachladeschaltung speisende Netz ungeachtet der pulsförmigen Leistungsaufnahme des Pulsed Power Systems möglichst gleichmässig, d.h. mit einem zeitlich konstanten Leistungsfluss zu belasten, ist idealerweise nicht der Eingangskondensatornachladestrom, sondern die Eingangskondensatornachladeleistung auf einem konstanten Wert zu halten. Dies kann erfindungsgemäss dadurch erreicht werden, dass ausgehend vom Eingangskondensatorpulsendspannungssollwert ein nichtlinearer Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf so vorgegeben wird, dass die Führung des Eingangskondensatorspannungssollwertes entlang dieser Sollkurve eine konstante Nachladeleistung erfordert. Vereinfacht kann dieser Verlauf über Modifikation des nach Patentanspruch 1 resultierenden Nachladestromsollwerts dadurch ermittelt werden, dass der Nachladestromsollwert mit dem arithmetischen Mittel des Eingangskondensatorpulsendspannungssollwertes und des Pulsspannungssollwerts, d.h. mit $\frac{1}{2} \cdot (\text{Eingangskondensatorpulsendspannungssollwert} + \text{Pulsspannungssollwert})$ multipliziert und so eine konstante Nachladesollleistung bestimmt wird, deren Division durch den aktuellen Wert der Eingangskondensatorspannung schliesslich auf den durch eine Nachladestromregelung einzustellenden modifizierten Nachladestromsollwert führt.

[0011] Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung zur Ermittlung eines stationär konstanten Nachladestromsoll- bzw. Istwertes beschreibt der abhängige Patentanspruch 3.

[0012] Erfindungsgemäss wird hierbei der seitens des Pulsed Power Systems bezogene Strom, z.B. mittels einer Rogowskispule, erfasst und integriert, d.h. die dem Eingangskondensator entnommene Ladung ermittelt. Erfindungsgemäss wird diese Ladung dem Eingangskondensator über einen konstanten Nachladestrom zugeführt; der Sollwert dieses Nachladestromes ergibt sich damit einfach aus der Division der entnommenen Ladung durch die Pulsperiode. Um am Ende einer Pulsperiode den Pulsspannungssollwert mit hoher Genauigkeit einzustellen, wird weiters der Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler ermittelt und dynamisch gewichtet und im Sinne eines Ausgleichs des Eingangskondensatoranfangsspannungsfehlers bis zum Ende der Pulsperiode zum Nachladestromsollwert addiert; demgemäss wird, z.B. bei unterhalb des Pulsspannungssollwertes liegender Eingangskondensatoranfangsspannung, der Nachladestrom erhöht und so bis zum Ende der Pulsperiode eine, den Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler kompensierende stärkere Aufladung des Eingangskondensators vorgenommen.

[0013] Eine vorteilhafte Vorrichtung, realisiert durch erfindungsgemässe Einbindung der erfindungsgemässen Verfahren nach Patentanspruch 1 bis 3 in eine kaskadierte Regelung der Eingangskondensatorspannung, gestützt auf eine, vorteilhaft mittels eines Schaltverstärkers implementierte Nachladestromquelle, beschreibt der abhängige Patentanspruch 4.

[0014] Für die weiteren Ausführungen sei angenommen, dass der Eingangskondensator durch ein Pulsed Power System belastet werde, welches zu den Anfang einer Taktperiode markierenden Triggerzeitpunkten einen Strompuls aufnimmt. Die Nachladung des Eingangskondensators erfolgte über einen Schaltverstärker aus einer Speisespannungsquelle. Anstelle des Schaltverstärkers und der Speisespannungsquelle könnte auch ein dreiphasiges Pulsleichrichtersystem treten. Beide Systeme weisen aufgrund der ausgangsseitigen Induktivität Tiefsetzstellerstruktur auf und haben damit eine entsprechende Anforderung an den Wert der Spannung der Speisespannungsquelle. Der Schaltverstärker ist über eine Ausgangsinduktivität mit dem Eingangskondensator verbunden. Der Regelung der Eingangskondensatorspannung sei eine Nachladestromregelung unterlagert, welche die Ausgangsspannung des Schaltverstärkers so einstellt, dass in der Verbindungsleitung zwischen Schaltverstärkerausgang und Eingangskondensator des Pulsed Power Systems der gewünschte Nachladestrom auftritt. Der Nachladestromsollwert wird durch einen, das erfindungsgemässe Verfahren nach Anspruch 1 oder 3 implementierenden, z.B. auch rein digital ausführbaren Funktionsgenerator gebildet. Diesem Funktionsgenerator wird erfindungsgemäss das Triggersignal des Pulsed Power Systems zugeführt, womit Anfang und Ende einer Pulsperiode sowie Pulsanfang und Pulsende bekannt sind. Weiters wird die Eingangskondensatorspannung und der Pulsspannungssollwert an den Funktionsgenerator gelegt. Durch erfindungsgemässe Verknüpfung der Eingangsvariablen nach Patentanspruch 1 oder 3 wird am Ausgang des Funktionsgenerators der, einen kontinuierlichen Verlauf zeigenden Eingangskondensatorspannungsregelfehler gebildet. Nach dynamischer Gewichtung des Eingangskondensatorspannungsregelfehlers durch einen Eingangskondensatorspannungsregler erhält man den Nachladestromsollwert, zu welchem vorteilhaft ein Nachladestromvorsteuersignal addiert wird, welches den gewünschten Anstieg der Eingangskondensatorspannung gemäss dem Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf sicherstellt, also für das Verfahren nach Anspruch 1 durch einen Differentiator mit am Eingang anliegendem Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf und nachfolgender Multiplikation mit der Kapazität des Eingangskondensators erhalten werden kann. Für Anspruch 3 liegt das Nachladestromvorsteuersignal direkt in Form des Nachladestromsollwerts vor, der Eingangskondensatorspannungsregelfehler ist dann jeweils gleich dem Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler. Der Gesamtnachladestromsollwert wird dann mit dem Istwert des Nachladestromes verglichen und die Nachladestromregelabweichung dem Schaltverstärker zugeführt

und dort in bekannter Weise in einen Sollwert der Schaltverstärkerausgangsspannung umgesetzt, wobei die Bildung dieses Sollwertes erfindungsgemäss vorteilhaft unter Einbeziehung des Eingangskondensatorspannungswertes erfolgt, womit bei Absinken der Eingangskondensatorspannung während der Pulsdauer auch unmittelbar die Schaltverstärkerausgangsspannung reduziert wird und so ein transienter Anstieg des Nachladestromes, der sich in einer transienten Spitze der, der Speisespannungsquelle entnommenen Leistung äussern würde, vermieden werden kann.

[0015] Eine weitere vorteilhafte erfindungsgemässe Ausgestaltung der Vorrichtung nach Anspruch 4 beschreibt der abhängige Patentanspruch 5. Die einzige Änderung gegenüber der Vorrichtung nach Anspruch 4 besteht darin, dass die Induktivität nicht am Ausgang, sondern am Eingang des Schaltverstärkers angeordnet ist, und die Nachladeschaltung damit Hochsetzstellerverhalten zeigt. Entsprechend der Verlegung der Induktivität ist auch die Strommessung von der Ausgangsseite an die Eingangsseite zu verlegen. Es wird dann nicht direkt der Nachladestrom, sondern entsprechend dem Stromsollwert die der Speisespannungsquelle entnommene Leistung geregelt und am, nun direkt am Eingangskondensator liegenden Schaltverstärkerausgang in Form eines, die Taktfrequenz des Schaltverstärkers aufweisenden, pulsformigen, aber bei Betrachtung des Mittelwertes über eine Pulsperiode zeitlich konstanten Nachladestromes in den Eingangskondensator gespeist. Der dem Schaltverstärker zugeführte Eingangskondensatorspannungswert wird nun zur unmittelbaren transienten Anpassung der Schaltverstärkereingangsspannung herangezogen, d.h. es wird das Absinken der Eingangskondensatorspannung während des Pulses unmittelbar durch eine Änderung des Tastverhältnisses des Schaltverstärkers ausgeglichen, womit eine transiente Spitze der durch die Eingangsinduktivität eingepprägten Stromentnahme der Speisespannungsquelle vermieden wird.

[0016] Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Zeichnungen näher erläutert.

Aufzählung der Zeichnungen

[0017] Fig. 1 zeigt die bei Implementierung des erfindungsgemässen Verfahrens nach Anspruch 1 resultierenden Zeitverläufe des Eingangskondensatorspannungswertverlaufs, des Eingangskondensatorspannungswertes und des Eingangskondensatorspannungsregelfehlers sowie den Verlauf des dem Eingangskondensator seitens des Pulsed Power Systems entnommenen Stromes sowie des, seitens einer übergeordneten Steuerung vorgegebenen, die Pulsperiode und die Pulsdauer bestimmenden Triggersignals, welches real zeitlich gegenüber dem Leistungspuls geringfügig voreilt, was hier jedoch im Sinne der Übersichtlichkeit nicht weiter berücksichtigt wird.

[0018] Fig. 2: Die Regelstruktur zeigt die erfindungsgemässe Einbindung eines basierend auf Anspruch 1 oder 3 implementierten Funktionsgenerators in die zweischleifige Regelung der Eingangskondensatorspannung sowie den schematisierten Leistungsteil der Anordnung in Form einer Pulsstromsenke, des Eingangskondensators und des diesen nachladenden Schaltverstärkers mit Ausgangsinduktivität, wobei der Schaltverstärker aus einer Speisespannungsquelle gespeist wird.

Detaillierte Darstellung der Erfindung

[0019] In Fig. 1 sind über horizontale Zeitachsen charakteristische Signalverläufe eines Pulsed Power Systems, d.h.

- über einer ersten Zeitachse 1 ein Anfangszeitpunkt 2 und ein Endzeitpunkt 3 einer Pulsperiode 4 sowie eine Pulsdauer, also ein Anfangszeitpunkt 2 und ein Endzeitpunkt 5 eines pulsbestimmenden Triggersignals 6 sowie
- über einer zweiten Zeitachse 7 ein einem Eingangskondensator seitens des Pulsed Power Systems entnommenen Pulsstrom und
- über einer dritten Zeitachse 9 ein Eingangskondensatorspannungswert 10, ein Eingangskondensatorspannungswertverlauf (EKSSW) 11 und ein Eingangskondensatorspannungsregelfehler 12 aufgetragen, wobei auch ein Pegel des Pulsspannungswertverlaufs 13 eingetragen ist.

[0020] Dem Eingangskondensator eines Pulsed Power Systems wird periodisch, d.h. am Anfang einer Pulsperiode 4 für eine kurze Pulsdauer ein hoher Pulsstrom entnommen. Entsprechend bricht dann der Eingangskondensatorspannungswert 10 signifikant ein und muss durch eine Nachladeschaltung bis zur Auslösung des nächstfolgenden Pulses, d.h. bis zum Endzeitpunkt 3 der Pulsperiode 4 wieder auf den durch eine übergeordnete Steuereinheit vorgegebenen Pulsspannungswert 13 gebracht werden.

[0021] Erfindungsgemäss wird der Sollwert des den Eingangskondensator nachladenden Stromes derart gebildet, dass stationär ein konstanter Wert resultiert. Hierfür wird der im Weiteren als Eingangskondensatoranfangsspannung 15 bezeichnete Momentanwert des Eingangskondensatorspannungswertes 10 unmittelbar vor Auslösung eines Pulses, d.h. am, durch eine positive Flanke 14 des Triggersignales 6 indizierten Anfangszeitpunkt 2 einer Pulsperiode 4 erfasst. Weiters wird die Abweichung gegenüber dem Pulsspannungswert 13, also der Wert 16 des Eingangskondensatoranfangsspannungsfehlers nach der Beziehung

$$\text{Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler} = \text{Pulsspannungswert} - \text{Eingangskondensatoranfangsspannung}$$

ermittelt. Nach Ende des Pulses 8 im Endzeitpunkt 5 des Pulses 8 wird der dann aufgrund der Pulsstromentnahme gegenüber der Eingangskondensatoranfangsspannung 15 signifikant abgesunkene Eingangskondensatorspannungswert, d.h. die Eingangskondensatorpulsendspannung 17 erfasst und ein Eingangskondensatorpulsendspannungswert 18, durch Addition von Eingangskondensatorpulsendspannung 17 und Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler 12, d.h.

Eingangskondensatorpulsendspannungssollwert =

Eingangskondensatorpulsendspannung + Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler, berechnet. Damit wird ein am Anfangszeitpunkt 2 der Pulsperiode 4 vorliegender Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler 16 für die folgende Nachladung des Eingangskondensators berücksichtigt.

[0022] Damit die Nachladung stationär mit konstantem Strom erfolgt, wird dann der Nachladeschaltung ein linearer, ausgehend von Eingangskondensatorpulsendspannungssollwert 18 auf den Pulsspannungssollwert 13 am Endzeitpunkt 3 der Pulsperiode 4 rampenförmig ansteigender Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf 11 vorgegeben. Da dem Puls-kondensator innerhalb dieses Zeitintervalls kein Strom entnommen wird, resultiert bei Führung des Eingangskondensatorspannungssollwertes 10 entsprechend dem Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf 11 ein konstanter Nachladestrom und damit eine weitgehend konstante Leistungsaufnahme der Nachladeschaltung aus der Speisespannungsquelle, d.h. durch die Nachladeschaltung wird keine pulsförmige Belastung eines speisenden Netzes verursacht. Die Regelung der Nachladeschaltung kann vorteilhaft kaskadiert ausgeführt werden, d.h. ein überlagerter Eingangsspannungsregler ermittelt aus dem Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf 11 und dem Eingangskondensatorspannungssollwert 10 den Eingangskondensatorspannungsregelfehler 12 und gibt dementsprechend einer unterlagerten Nachladestromregelung einen Nachladestromsollwert vor. Um innerhalb der Pulsperiode 4, d.h. bei starkem Absinken des Eingangskondensatorspannungssollwertes 10 und den damit verbundenen hohen Regelabweichungen der Eingangskondensatorspannung das Auftreten einer hohen Nachladestromspitze zu vermeiden, wird der Eingangskondensatorspannungsregelfehler 12 bei Pulsbeginn zum Anfangszeitpunkt 2, d.h. der Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler 16 für die Pulsdauer, d.h. bis zum Endzeitpunkt 5 des Pulses 8 festgehalten und erst nach diesem Endzeitpunkt 5 wieder freigegeben. Gemäss der weiter oben beschriebenen Generierung des Eingangskondensatorspannungssollwertverlaufs 11, ist dann zum Endzeitpunkt 5 des Pulses 8 eine glatte Fortsetzung des Verlaufes des Eingangskondensatorspannungsregelfehlers 12 gegeben, sodass auch ein glatter Verlauf des Nachladestromsollwertes und damit des Nachladestromes sichergestellt ist.

[0023] Zusammenfassend wird durch das erfindungsgemässe Verfahren also ein glatter Verlauf des Eingangskondensatorspannungsregelfehlers 12 erreicht und nach dem Endzeitpunkt 5 bis zum Anfang der nächsten Pulsperiode nach dem Endzeitpunkt 3 der Pulsperiode 4 ein linearer Anstieg des Sollwertes der Eingangskondensatorspannung definiert, der durch einen konstanten Nachladestrom erreicht werden kann.

[0024] In Fig. 2 ist schematisiert ein Pulsed Power System 19 mit Eingangskondensator 20 und einer, dem Eingangskondensator 20 einen pulsförmigen Pulsstrom entnehmenden Pulsstromsenke 21, gezeigt. Die Nachladung des Eingangskondensators 20 erfolgt über einen Schaltverstärker 22, dessen positiver Ausgang 23 über eine Induktivität 24 an die positive Klemme 25 des Eingangskondensators 20 gelegt ist. Der Nachladestrom wird von der negativen Klemme 26 des Eingangskondensators 20 über eine Verbindungsleitung 27 zurück zum negativen Ausgang 28 des Schaltverstärkers 22 geführt. Eingangsseitig liegt der Schaltverstärker an einer Speisespannungsquelle 29. Weiters ist eine vorteilhafte Vorrichtung 30 zur Regelung des Pulsed Power Systems 19 gezeigt, welche eine Implementierung des erfindungsgemässen Verfahrens nach Anspruch 1 in Form eines Funktionsgenerators 31 beinhaltet, wobei dem Funktionsgenerator 31 das Triggersignal 6, der Pulsspannungssollwert 13 und der Eingangskondensatorspannungssollwert 10 über entsprechende, aus dem Pulse Power System 19 abzweigende oder an eine übergeordnete Steuerung führende Verbindungsleitungen zugeführt werden. Die Regelung des Eingangskondensatorspannungssollwertes 10 ist kaskadiert, d.h. als überlagerte Kondensatorspannungsregelschleife 32 und unterlagerte Nachladestromregelschleife 33 ausgeführt. Die Nachladestromregelschleife 33 stellt dabei den Wert der zwischen den Ausgangsklemmen 23 und 28 des Schaltverstärkers 22 auftretenden Spannung so ein, dass in der Induktivität 24 der gewünschte Nachladestrom auftritt. Der Nachladestromsollwert 34 wird durch dynamische Gewichtung des, den Eingangskondensatorspannungsregelfehler 12 repräsentierenden Ausgangs des Funktionsgenerators 31 mittels eines Eingangskondensatorspannungsreglers 35 gebildet. Vorteilhaft wird zum Nachladestromsollwertanteil 36 am Ausgang des Eingangskondensatorspannungsreglers 35 mittels eines Summiergliedes 37 ein Nachladestromvorsteuersignal 38 addiert, welches den gewünschten Anstieg des Eingangskondensatorspannungssollwertes 10 gemäss dem Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf 11 sicherstellt, also für das Verfahren nach Anspruch 1 durch einen Differentiator mit am Eingang anliegendem, aus dem Funktionsgenerator 31 abgreifbarem Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf 11 und nachfolgender Multiplikation mit der Kapazität des Eingangskondensators 20 erhalten werden kann. Der Gesamtnachladestromsollwert 34 wird dann mit dem, mittels eines Stromsensors 39 in der Verbindungsleitung 27 gemessenen Istwert 40 des Nachladestromes verglichen und die mittels eines Subtrahiergliedes 41 ermittelte Nachladestromregelabweichung 42 dem Schaltverstärker 22 zugeführt und dort in bekannter Weise in einen Sollwert der Schaltverstärker Ausgangsspannung umgesetzt, wobei die Bildung dieses Sollwertes erfindungsgemäss vorteilhaft unter Einbeziehung des Eingangskondensatorspannungssollwertes 10 erfolgt, der über eine von der positiven Klemme 25 des Eingangskondensators abzweigende Signalleitung 43 an einen Spannungsvorsteuereingang 44 des Schaltverstärkers 22 gelegt wird. Bei Absinken des Eingangskondensatorspannungssollwertes 10 während der Pulsdauer wird damit unmittelbar die Schaltverstärker Ausgangsspannung reduziert und so ein transienter Anstieg des Nachladestromes in der Induktivität 24, der sich in einer transienten Spitze der, der Speisespannungsquelle 29 entnommenen Leistung äussern würde, unterbunden.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung des Sollwertes eines einen Eingangskondensator (20) eines Pulsed Power Systems (19) aus einer Speisespannungsquelle (29) nachladenden Stromes, wobei dem Eingangskondensator periodisch, jeweils am Anfang einer Pulsperiode (4), für eine kurze Pulsdauer ein Pulsstrom entnommen wird, dadurch gekennzeichnet, dass zu einem Anfangszeitpunkt (2) eines Pulses (8) und einer Pulsperiode (4), unmittelbar vor Auslösung des Pulses (8), eine Eingangskondensatoranfangsspannung (15) erfasst wird und deren Abweichung gegenüber einem Pulsspannungssollwert (13), als Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler (16) nach der Beziehung

$$\text{Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler} = \text{Pulsspannungssollwert} - \text{Eingangskondensatoranfangsspannung}$$
 ermittelt wird, und zu einem Endzeitpunkt (5) des Pulses (8) eine Eingangskondensatorpulsendspannung (17) erfasst und ein Eingangskondensatorpulsendspannungssollwert (18) durch Addition von Eingangskondensatorpulsendspannung (17) und Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler (16), das heisst als

$$\text{Eingangskondensatorpulsendspannungssollwert} = \text{Eingangskondensatorpulsendspannung} + \text{Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler},$$
 berechnet wird und damit ein zum Anfangszeitpunkt (2) der Pulsperiode (4) vorliegender Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler (16) für die folgende Nachladung des Eingangskondensators berücksichtigt wird, wobei die Nachladung stationär mit konstantem Strom erfolgt, also der Nachladeschaltung ein linearer, ausgehend von Eingangskondensatorpulsendspannungssollwert (18) auf den Pulsspannungssollwert (13) am Endzeitpunkt (3) der Pulsperiode (4) rampenförmig ansteigender Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf (11) vorgegeben wird und damit bei Führung des Eingangskondensatorspannungssollwertes (10) entsprechend dem Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf (11) ein konstanter Nachladestrom und damit eine weitgehend konstante Leistungsaufnahme der Nachladeschaltung aus der Speisespannungsquelle (29) resultiert, wobei die Regelung der Nachladeschaltung kaskadiert ausgeführt ist, d.h. durch einen überlagerten Eingangsspannungsregler aus dem Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf (11) und dem Eingangskondensatorspannungssollwert (10) durch Subtraktion ein Eingangskondensatorspannungsregelfehler (12) ermittelt und einer unterlagerten Nachladestromregelung nach dynamischer Gewichtung als Nachladestromsollwertanteil (36) vorgegeben wird, und wobei, um innerhalb der Dauer des Pulses (8), d.h. bei Absinken des Eingangskondensatorspannungssollwertes (10) und einer damit verbundenen Abweichung der Eingangskondensatorspannung vom Sollwert, das Auftreten einer Nachladestromspitze zu vermeiden, der Eingangskondensatorspannungsregelfehler (12) vom Anfangszeitpunkt (2) des Pulses (8) an für die Dauer des Pulses (8), d.h. bis zum Endzeitpunkt (5) des Pulses (8) festgehalten und erst nach dem Endzeitpunkt (5) des Pulses (8) wieder freigegeben wird, also der Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf (11) innerhalb der Dauer des Pulses (8) parallel zum Eingangskondensatorspannungssollwert (10) geführt wird, wodurch gemäss der Generierung des Eingangskondensatorspannungssollwertverlaufs (11), dann zum Endzeitpunkt (5) des Pulses (8) eine glatte Fortsetzung des Verlaufes des Eingangskondensatorspannungsregelfehlers (12) gegeben ist, sodass auch ein glatter Verlauf des Nachladestromsollwertes (34) und damit auch des tatsächlichen Nachladestromes sichergestellt ist.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass um die Speisespannungsquelle (29) ungeachtet der puls-förmigen Leistungsaufnahme des Pulsed Power Systems (19) möglichst mit einem zeitlich konstanten Leistungsfluss zu belasten, die Eingangskondensatornachladeleistung auf einem konstanten Wert gehalten wird, also ausgehend vom Eingangskondensatorpulsendspannungssollwert (18) ein nichtlinearer Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf (11) so vorgegeben wird, dass die Führung des Eingangskondensatorspannungssollwertes (10) entlang dieser Sollkurve eine konstante Nachladeleistung erfordert, wobei dieser Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf (11) vereinfacht über eine Modifikation des Nachladestromsollwertes (34) dadurch ermittelt wird, dass der Nachladestromsollwert (34) mit dem arithmetischen Mittel des Eingangskondensatorpulsendspannungssollwertes (18) und des Pulsspannungssollwertes (13) multipliziert und so eine konstante Nachladesollleistung bestimmt wird, deren Division durch den aktuellen Wert der Eingangskondensatorspannung (10) schliesslich auf den durch eine Nachladestromregelung (33) einzustellenden modifizierten Sollwert des Nachladestromes führt.
3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Nachladestromsollwert (34) ermittelt wird, indem der seitens des Pulsed Power Systems (19) bezogene Strom erfasst und integriert, d.h. die dem Eingangskondensator (20) entnommene Ladung ermittelt wird und diese Ladung dem Eingangskondensator (20) über einen konstanten Nachladestrom zugeführt wird, ein Nachladestromvorsteuersignal (38) durch Division der seitens des Pulsed Power Systems entnommenen Ladung durch die Dauer zwischen Anfangszeitpunkt (2) und Endzeitpunkt (3) der Pulsperiode (4) ermittelt wird und, um am Endzeitpunkt (3) einer Pulsperiode (4) den Pulsspannungssollwert (13) einzustellen, weiters der Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler (16) ermittelt und dynamisch gewichtet wird und der so erhaltene Nachladestromsollwertanteil (36) im Sinne eines Ausgleichs des Eingangskondensatoranfangsspannungsfehlers (16) bis zum Endzeitpunkt (3) der Pulsperiode (4) zum Nachladestromvorsteuersignal (38) addiert wird,

womit bei z.B. unterhalb des Pulsspannungssollwerts (13) liegender Eingangskondensatoranfangsspannung (15) der Nachladestrom erhöht und so bis zum Endzeitpunkt (3) der Pulsperiode (4) eine den Eingangskondensatoranfangsspannungsfehler (16) kompensierende stärkere Aufladung des Eingangskondensators (20) vorgenommen wird.

4. Vorrichtung (30) zur Ausführung des Verfahrens gemäss Anspruch 1 in einer zweischleifigen Regelung der Eingangskondensatorspannung eines Pulsed Power System (19), welches eine einem Eingangskondensator (20) einen pulsformigen Pulsstrom entnehmenden Pulsstromsenke (21), eine Induktivität (24) und einen Schaltverstärker (22) und eine Speisespannungsquelle (29) sowie einen Stromsensor (39) aufweist, dadurch gekennzeichnet, dass die zur Regelung des Pulsed Power Systems (19) eingesetzte Vorrichtung (30) einseitig einen Funktionsgenerator (31) aufweist, dem ein Triggersignal (6), der Pulsspannungssollwert (13) und der Eingangskondensatorspannungswert (10) über entsprechende, aus dem Pulsed Power System (19) abzweigende oder an eine übergeordnete Steuerung führende Verbindungsleitungen zugeführt wird, wobei die Regelung des Eingangskondensatorspannungswertes (10) kaskadiert, d.h. als überlagerte Kondensatorspannungsregelschleife (32) und unterlagerte Nachladestromregelschleife (33) ausgeführt ist und die Nachladestromregelschleife (33) dazu ausgebildet ist, den Wert der zwischen den Ausgangsklemmen (23) und (28) des Schaltverstärkers (22) auftretenden Spannung so einzustellen, dass in der Induktivität (24) der gewünschte Nachladestrom auftritt, wobei ein Eingangskondensatorspannungsregler (35) zur Bildung des Nachladestromsollwerts (34) durch dynamische Gewichtung eines, den Eingangskondensatorspannungsregelfehler (12) repräsentierenden Ausgangs des Funktionsgenerators (31) ausgebildet ist und ein Summierglied (37) zum Addieren eines Nachladestromvorsteuersignals (38) zum Nachladestromsollwertanteil (36) am Ausgang des Eingangskondensatorspannungsreglers (35) vorliegt, was den gewünschten Anstieg des Eingangskondensatorspannungswertes (10) gemäss dem Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf (11) sicherstellt, und das Nachladestromvorsteuersignal (38) durch einen Differentiator mit am Eingang anliegendem, aus dem Funktionsgenerator (31) abgreifbarem Eingangskondensatorspannungssollwertverlauf (11) und eine nachfolgende Multiplikation mit der Kapazität des Eingangskondensators (20) bestimmbar ist, wobei der Gesamtnachladestromsollwert (34) dann mit dem, mittels eines Stromsensors (39) messbaren Istwertes (40) des Nachladestromes vergleichbar ist und die mittels eines Subtrahiergliedes (41) ermittelbare Nachladestromregelabweichung (42) dem Schaltverstärker (22) zuführbar und dort in einen Sollwert der Schaltverstärker Ausgangsspannung umsetzbar ist, wobei der Schaltverstärker (22) zur Bildung dieses Sollwertes unter Einbeziehung des Eingangskondensatorspannungswertes (10) ausgebildet ist, der über eine von der positiven Klemme (25) des Eingangskondensators abzweigende Signalleitung (43) an einen Spannungsvorsteuereingang (44) des Schaltverstärkers (22) gelegt ist, und so bei Absinken des Eingangskondensatorspannungswertes (10) während der Pulsdauer unmittelbar die Schaltverstärker Ausgangsspannung reduzierbar ist und damit ein transienter Anstieg des Nachladestromes in der Induktivität (24), der sich in einer transienten Spitze der der Speisespannungsquelle (29) entnommenen Leistung äussert, unterbindbar ist.
5. Vorrichtung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Induktivität (24) am Eingang des Schaltverstärkers (22) angeordnet ist und die Nachladeschaltung damit Hochsetzstellerverhalten zeigt, und entsprechend der Verlegung der Induktivität (24) auch die Strommessung (39) von der Ausgangsseite an die Eingangsseite des Schaltverstärkers (22) verlegt ist, und so die Vorrichtung dazu ausgelegt ist, entsprechend dem Nachladestromsollwert (34) die der Speisespannungsquelle (29) entnommene Leistung zu regeln, und aus dem, nun direkt am Eingangskondensator (20) liegenden Schaltverstärker Ausgang als im Mittel über eine Taktfrequenz des Schaltverstärkers (22) zeitlich konstanten Nachladestrom den Eingangskondensator (20) zu speisen, und den dem Schaltverstärker (22) zugeführten Eingangskondensatorspannungswert (10) zur unmittelbaren transienten Anpassung der Schaltverstärker Eingangsspannung heranzuziehen, also das Absinken der Eingangskondensatorspannung während des Pulses unmittelbar durch eine Änderung des Tastverhältnisses des Schaltverstärkers (22) auszugleichen, womit eine transiente Spitze der Stromentnahme aus der Speisespannungsquelle (29) vermeidbar ist.

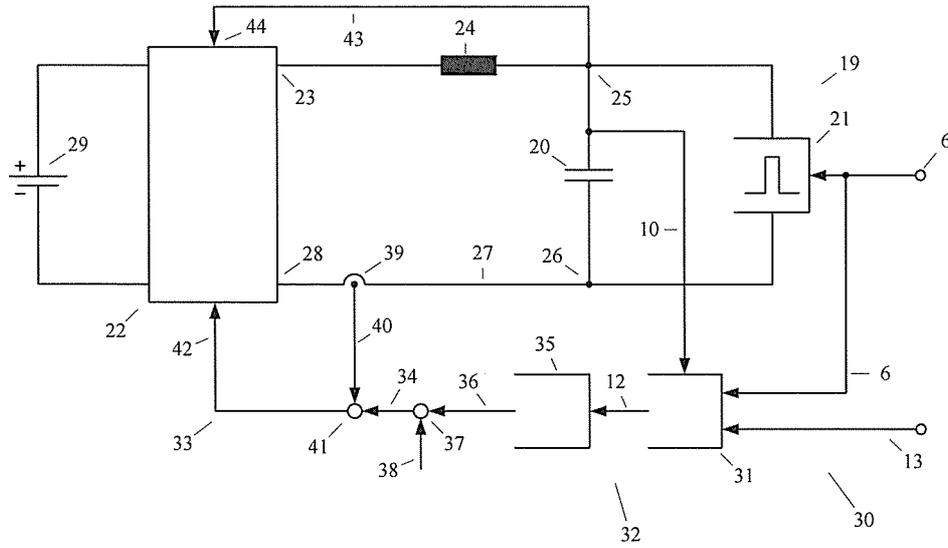


Fig. 2

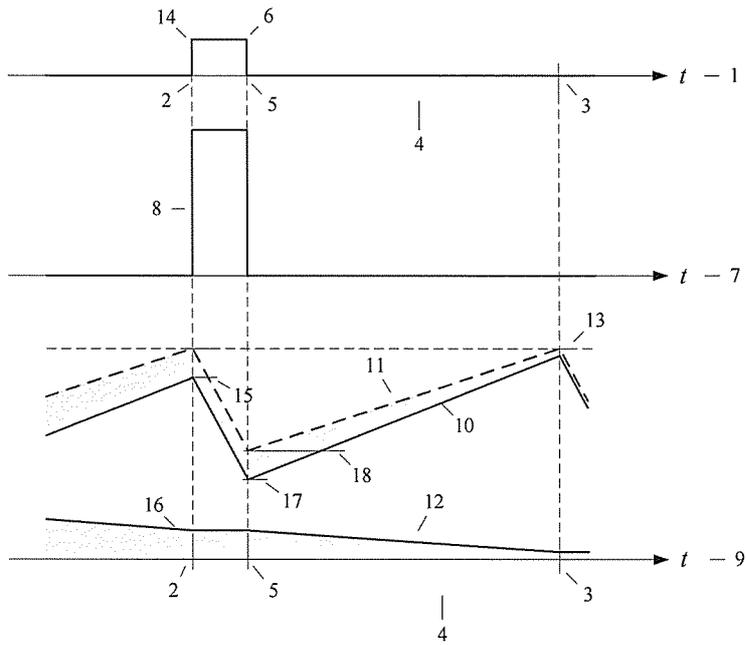


Fig. 1