

Superkondensator-Bänke für die Energiespeicherung richtig laden

Einleitung

Superkondensatoren (SCs), auch als Ultrakondensatoren und elektrische Doppelschicht-Kondensatoren bekannt, finden sich in zahlreichen [Power-Management](#)-Anwendungen. Im Automotive-Bereich, z.B. bei Start-Stopp-Systemen mit regenerativen Bremsen, können SCs die Energie bereitstellen, die der Anlasser benötigt, um den Verbrennungsmotor wieder zu starten. Oder sie nehmen die kinetische Energie auf, die beim Bremsen zurückgewonnen wird. Superkondensatoren sind vorteilhaft, da sie wesentlich öfter geladen und entladen werden können als herkömmliche Blei-Säure Akkus. Sie können Energie auch viel schneller absorbieren, ohne dass die Lebensdauer darunter leidet. SCs sind daher auch für industrielle Reserve-Stromversorgungssysteme, schnurlose Elektrogeräte mit Schnellladefunktion und Fernsensoren interessant, wenn ein regelmäßiger Austausch von Batterien nicht praktikabel ist.

Der folgende Beitrag beschreibt die Herausforderungen beim Laden dieser großen Kondensatoren und zeigt Entwicklern im Bereich der Stromversorgungen, wie die beste Systemkonfiguration für eine Reserve-Energiespeicherung evaluiert und ausgewählt wird. Eine SC-Ladelösung wird mit Signalformen und detaillierten Informationen vorgestellt.

Systemausarbeitung

Zahlreiche Systemkonfigurationen verwenden SC-Bänke als Reserve-Energiespeicher. Zu Beginn müssen Entwickler die Konfiguration ihres Energiespeichers vornehmen und dann entscheiden, bei welcher Spannung die Energie gespeichert werden kann. Die richtige Wahl hängt von den Leistungs- und Spannungsanforderungen der Last sowie von den Energie- und Spannungsfähigkeiten des SC ab. Wurde die beste Lösung gefunden, muss eine Abwägung zwischen der Gesamtleistungsfähigkeit und den Kosten getroffen werden.

Bild 1 zeigt das Blockdiagramm einer hocheffizienten Lösung, in der die Lasten aus Bausteinen bestehen, die eine geregelte Eingangsspannung (3,3; 5; 12 V etc.) fordern. Die Hauptversorgung mit 48 V versorgt den Schaltregler 2 (SW2) im Normalbetrieb, während gleichzeitig die SC-Bank über den Schaltregler 1 (SW1) auf 25 V geladen wird. Wird die Hauptversorgung getrennt, versorgt die SC-Bank SW2, um einen Betrieb der Last ohne Unterbrechung zu garantieren.

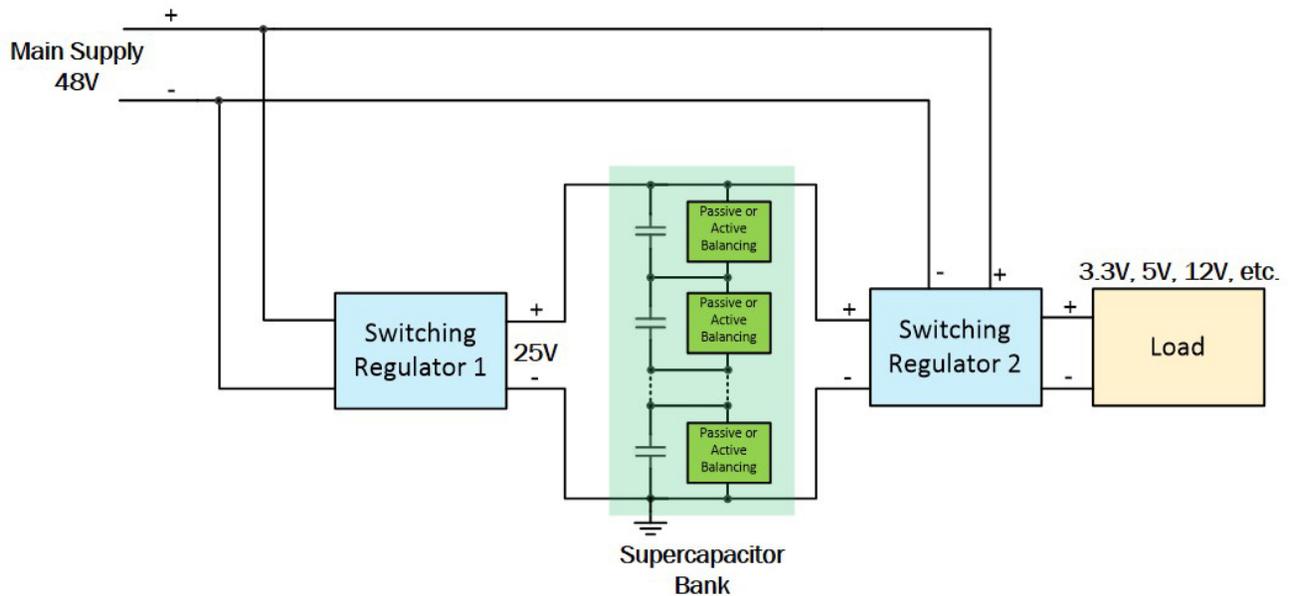


Bild 1: Blockdiagramm eines Batteriereserve-Systems mit Superkondensator-Bank

Systemdesign und Herausforderungen

Nach der Wahl einer SC-Zelle muss der Entwickler die Zielspannung wählen, mit der jede SC-Zelle geladen wird. Dies erfolgt über die Nennkennlinie des SC. Die meisten SC-Zellen weisen eine Nennspannung von 2,5 bis 3,3 V bei Raumtemperatur auf. Dieser Wert sinkt mit steigender Temperatur und Lebensdauer. Die Zielspannung sollte unterhalb der maximalen Nennspannung liegen, um die Lebensdauer des SC zu erhöhen.

Anschließend kann die Spannung für die SC-Bank und SW2-Topologie gewählt werden. Die SC-Bank-Konfiguration kann parallel, in Serie oder als Kombination serieller und paralleler Stränge erfolgen. Da die Zellenspannung meist unter 3,3 V liegt und die Lasten oft die gleiche oder eine höhere Versorgung benötigen, stehen als Optionen für die Zellenkonfiguration und SW2 eine Einzelzelle mit einem Aufwärts-(Boost-)Wandler oder mehrere Zellen in Serie mit einem Abwärts-(Buck-) oder Buck-Boost-Wandler zur Verfügung. Bei einem Boost-Wandler muss sichergestellt sein, dass beim Entladen des SC die Spannung nicht unter die minimale Eingangsspannung des SW2 fällt. Diese kann bis zur Hälfte der geladenen Spannung des SC betragen. Daher ist in Bild 1 eine serielle SC-Bank und ein einfacher Buck-Regler für SW1 dargestellt. Steigen die Anforderungen an den Energiebedarf, lassen sich mehrere serielle Stränge durch parallele ersetzen.

Wird eine serielle SC-Kombination realisiert, muss die Zahl der Zellen entsprechend der gewünschten Spannung an der Spitze des Strangs gewählt werden. Mehr Kondensatoren in Serie bedeuten eine höhere Spannung des SC-Strangs mit weniger Kapazität. Als Beispiel soll die Wahl von zwei Strängen mit vier 2,7V/10F-Kondensatoren und einem Strang mit acht (seriellen) identischen Kondensatoren verglichen werden. Während sich die gleiche Gesamtladung und Energie speichern lässt, ist der nutzbare Spannungsbereich des Einzelstrangs vorteilhafter. Benötigt eine Last zum Beispiel 5 V Vorspannung, beträgt die erforderliche Spannung für SW2 in etwa 6 V. Dabei sind der maximale Tastgrad und andere Dropout-Faktoren zu berücksichtigen.

- Die Energie in einem Kondensator beträgt $W=CU^2/2$; der nutzbare Anteil $W= C/2(U_{\text{charge}}^2 - U_{\text{discharge}}^2)$
- Bei zwei Strängen mit vier Kondensatoren beträgt die nutzbare Energie $W = 2*[(10F/4)/2*((2,7V*4)^2-6V^2)] = 201,6 \text{ J}$
- Die nutzbare Energie im Einzelstrang mit acht (seriellen) Kondensatoren beträgt $W = 1*[(10F/8)/2*((2,7V*8)^2-6V^2)] = 269,1\text{J}$

Da beide Kondensatorbänke die gleiche Gesamtenergie speichern, weist der Strang mit niedrigerer Spannung einen größeren Anteil verlorener/unbrauchbarer Energie auf. In diesem Fall ist die höhere Strangspannung zu bevorzugen, um die SCs vollständig nutzen zu können.

Eine dritte Herausforderung entsteht, wenn das Laden der SC-Bank berücksichtigt werden muss. Zu Beginn, wenn die SC-Spannung 0 V beträgt, muss SW1 für eine lange Zeitdauer zu Bedingungen arbeiten, die einem Kurzschluss am Ausgang ähnlich sind, da die Kapazität sehr hoch ist. Ein regulärer SW1 kann dann in den Hiccup-Modus fallen und das Laden des SC schlägt fehl. Um den SC und SW1 zu schützen ist eine zusätzliche Strombegrenzungsfunktion zu Beginn des Ladens erforderlich. Eine gute Lösung für SW1 wäre, für eine längere Zeit einen konstanten Ladestrom bei einer sehr niedrigen Ausgangsspannung bereitzustellen.

Es gibt verschiedene Methoden, einen SC zu laden. Konstantstrom/Konstantspannung (CICV) wird häufig angewendet und ist die bevorzugte Methode (Bild 2: CICV-Kurve). Zu Beginn des Ladezyklus arbeitet die Ladevorrichtung (SW1) im Konstantstrommodus und liefert einen konstanten Strom an den SC, sodass dessen Spannung linear ansteigt. Der SC wird auf eine Zielspannung geladen; der Konstantspannungs-Regelkreis wird aktiv und sorgt für eine genaue Regelung der SC-Ladung, damit diese konstant bleibt und ein Überladen verhindert wird. Diese bevorzugte Lösung stellt Anforderungen an das Power Management, die zu berücksichtigen sind.

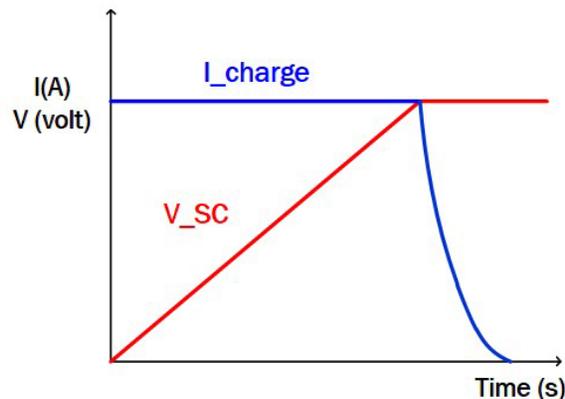


Bild 2: CICV-Ladungsregelung bei Superkondensatoren

In Bezug auf Bild 1 mit einer Hauptversorgung von 48 V erweisen sich eine SC-Bank-Spannung von 25 V und Lastspannungen von 3,3; 5 und 12 V etc. sowie eine synchrone Buck-Funktion für SW1 und SW2 als geeignet. Mit der primären Herausforderung beim Laden von SCs, ist die Wahl von SW1 entscheidend. Die ideale Lösung für SW1 würde ein Power Management erfordern, das mit hohen Eingangs- und Ausgangsspannungen (48 bzw. 25 V) arbeitet und gleichzeitig eine CICV-Regelung bereitstellt.

Ladelösung für Superkondensatoren

Um das SC-Ladeverhalten zu demonstrieren, verwenden wir einen synchronen Abwärtsregler als Beispiel. Wir zeigen Probleme und Lösungsvorschläge auf und nutzen experimentelle Signalformen für ein besseres Verständnis.

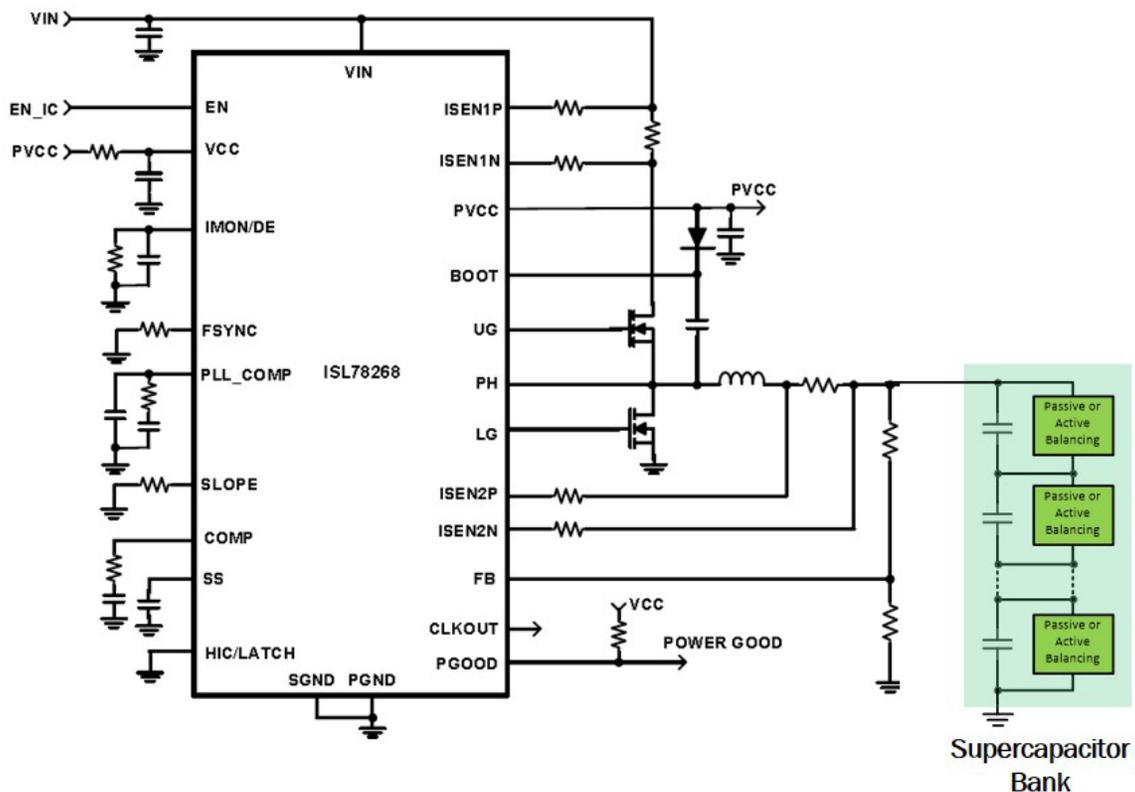


Bild 3: Vereinfachtes Schema eines synchronen Buck-Wandlers für CICV-SC-Laderegung

Bild 3 zeigt das vereinfachte Blockdiagramm mit Intersils ISL78268, der einen synchronen Buck-Wandler für die CICV-Regelung ansteuert. Um eine SC-Bank mit CICV-Regelung auf 25 V zu laden, wurden folgende Funktionen bei der Wahl des Controllers berücksichtigt:

1. Synchroner Buck-Regler arbeitet mit $U_{IN} \geq 48 \text{ V}$ und $U_{OUT} \geq 25 \text{ V}$.
2. Konstantstrom- und Konstantspannungsregelung mit automatischem Übergang zwischen beiden Regelmodi.
3. Genaue Strommeseingänge für den CI-Anteil, die über den Versorgungsspannungen des Systems arbeiten. Nach Bild 3 erfasst der Controller den Konstantstrom der Spule, der gleichzeitig der Ladestrom ist. Der Strommessverstärker des Controllers muss der Gleichtaktspannung widerstehen, die in diesem Fall 25 V beträgt.

Bild 4 zeigt einen Teil des synchronen Buck-Reglers ISL78268. Zwei unabhängige Fehlerverstärker ($Gm1$ und $Gm2$) regeln die Konstantspannung ($Gm1$) und den Konstantstrom ($Gm2$).

$Gm1$ arbeitet für die CV-Schleifenregelung. Er vergleicht die rückgekoppelte Spannung an FB mit der internen Referenzspannung (1,6 V) und erzeugt eine Fehlerspannung am COMP-Pin. Der FB-Pin ist mit

einem Spannungsteiler der Ausgangsspannung verbunden, der so eingestellt ist, dass FB an 1,6 V liegt, wenn der Ausgang die gewünschte Spannung erreicht hat. Die COMP-Spannung stellt dann den Unterschied zwischen der gewünschten und der tatsächlichen Ausgangsspannung dar. COMP wird dann mit der Rampenspitze der Induktivität verglichen, um das PWM-Signal zu erzeugen, das die Ausgangsspannung konstant hält.

Der Fehlerverstärker Gm2 unterstützt die CI-Regelschleife. Er vergleicht die IMON/DE-Pin-Spannung mit der internen Referenz (1,6 V) und erzeugt einen Fehlerausgang am COMP-Pin. Die IMON/DE-Pin-Spannung wird intern erzeugt und stellt den durchschnittlichen Laststrom der Ausgangsinduktivität dar. Ist der Gm2-Regelkreis aktiv (die Diode zwischen dem Ausgang von Gm1 und Gm2 entscheidet, welcher Regelkreis aktiv ist), stellt die COMP-Spannung den Unterschied zwischen dem gewünschten und dem tatsächlichen Ausgangsstrom dar. COMP wird dann mit der Rampenspitze der Induktivität verglichen, um das PWM-Signal zu erzeugen, das den Ausgangsstrom konstant hält.

Zu Beginn des Ladevorgangs, bevor die SC-Spannung ihren Zielwert erreicht, steuert vor allem Gm2 den COMP-Pin an, was den PWM-Ausgang zu einer CI-Regelung anregt. Hat die SC-Spannung ihren Zielwert erreicht, wird der Ladestrom verringert, wobei die IMON/DE-Pin-Spannung abfällt und die CI-Schleife deaktiviert (wenn $IMON/DE < 1,6\text{ V}$) wird. Der CV-Regelkreis übernimmt die COMP-Steuerung und hält somit die Ausgangsspannung konstant.

Der ISL78268 bietet sowohl eine Peak-Current-Mode-Regelschleife zur PWM-Erzeugung (zuverlässiger Zyklus-für-Zyklus-Spitzenstrommodulator) als auch eine Outer-Constant-Average-Current-Regelschleife zum Laden des SC.

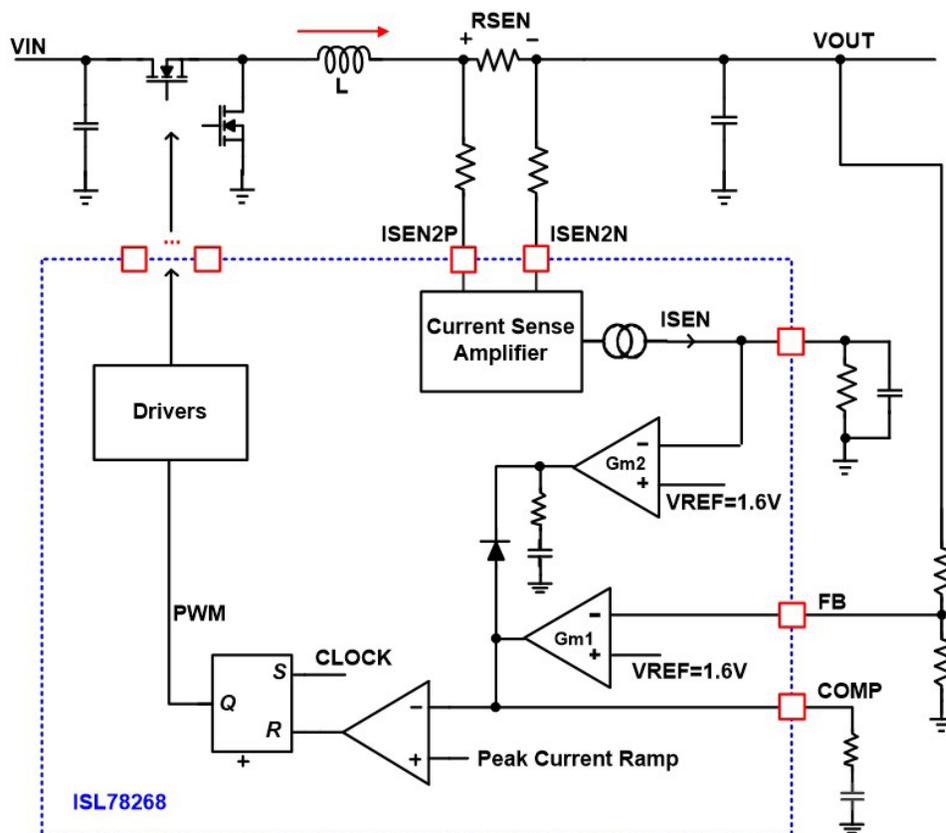


Bild 4: Vereinfachtes Blockdiagramm der CICV-Regelschleife des ISL78268

Im Folgenden wird die eigentliche Umsetzung der SC-Ladefunktion näher erläutert. Die Bilder 5, 6 und 7 zeigen die experimentellen Signalformen des synchronen Buck-Wandlers, der über den ISL78268 angesteuert wird, um eine SC-Bank zu laden (12 50F/2,7V-SCs in Serie). Der SC wird von der Hauptversorgung auf 25 V geladen.

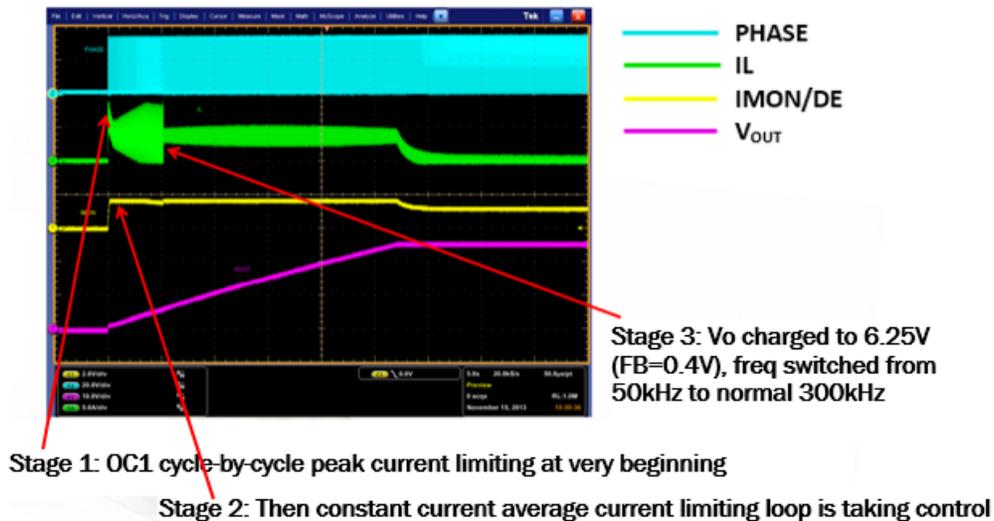
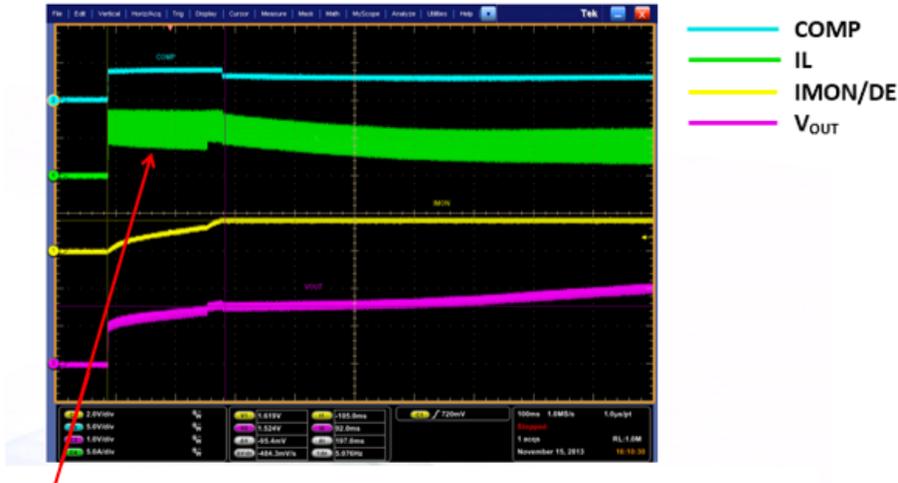


Bild 5: Labor-Signalformen beim SC-Ladevorgang

Bild 5 zeigt die verschiedenen Stufen beim SC-Ladevorgang. Bei Stufe 1 ist V_o nahezu 0. Das Durchschnittsstromsignal am IMON/DE-Pin hat 1,6 V noch nicht erreicht (die Referenzspannung für den gewünschten Ladestrom). Der CI-Regelkreis ist somit noch nicht aktiv. Zu diesem Zeitpunkt wird der Spitzenstrom der Induktivität Zyklus für Zyklus auf einen festen OC-Schwellenwert begrenzt. Zu Beginn des Ladezustands, wenn V_{OUT} gering ist (FB < 0,4 V), wird die Schaltfrequenz auf 50 kHz begrenzt. Dies dient als Vorsichtsmaßnahme, um den zuvor genannten „Runaway“-Effekt der Induktivität zur Spitzenstrombegrenzung bei niedriger V_{OUT} zu verhindern.

Bild 6 zeigt die vergrößerten Signalformen in Stufe 1. Stufe 2 beginnt, wenn die IMON/DE-Pin-Spannung (gelb dargestellt) 1,6 V erreicht. Ab hier wird der CI-Regelkreis aktiv und senkt das COMP-Signal (cyan). Der Ausgangsstrom wird geregelt, und die IMON/DE-Pin-Spannung bleibt konstant. Diese Spannung stellt den erfassten durchschnittlichen Ausgangsstrom dar. Das IL-Signal (grün) zeigt, dass der Durchschnittsstrom während der Stufe 2 auf einen konstanten Wert geregelt wird. Die Ausgangsspannung (rosa) zeigt das lineare Aufladen des SC durch den konstanten Ladestrom.



Stage 1: OC1 cycle-by-cycle peak current limiting at very beginning

Bild 6: Vergrößerte Darstellung des Signalverlaufs beim SC-Ladevorgang in Stufe 1

Stufe 3 beginnt, wenn der FB-Pin 0,4 V erkennt (Bild 7). Danach ist die Konstantstromregelung vollständig aktiv, sodass die Schaltfrequenz automatisch an die eingestellte Frequenz von 300 kHz angepasst werden kann. Bei höherer Schaltfrequenz verringert sich die Restwelligkeit der Induktivität (grün) erheblich. Die Ausgangsspannung (rosa) steigt weiter linear und zeigt somit das lineare Aufladen des SC an.

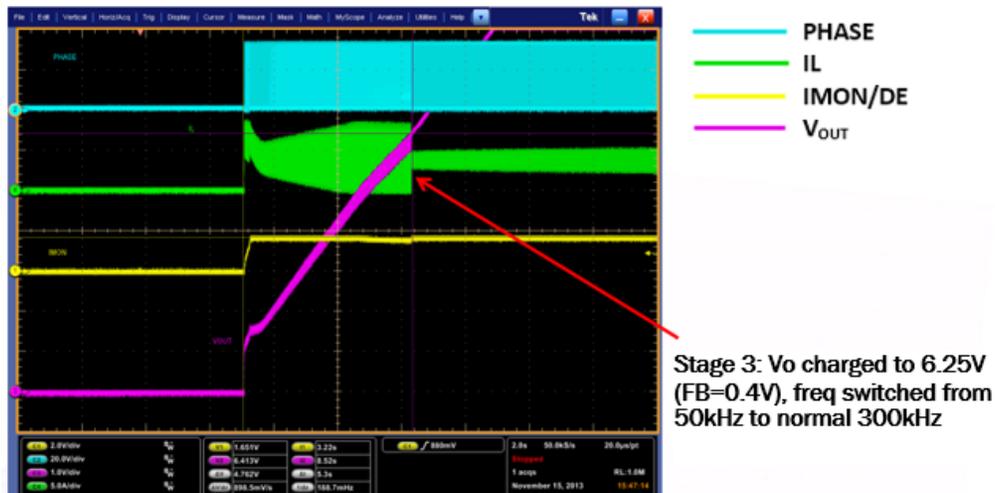


Bild 7: Labor-Signalformen beim SC-Ladevorgang

In Bezug auf Bild 5 wird solange in Stufe 3 verblieben, bis V_o die Zielspannung 25 V erreicht. Danach wird die CV-Regelschleife aktiv, um die Ausgangsspannung zu regeln. Der Durchschnittsstrom-Regelkreis wird deaktiviert. Bild 5 zeigt, wie die Ausgangsspannung (rosa) abflacht und der Induktivitätsstrom sinkt. Die IMON/DE-Pin-Spannung, die den durchschnittlichen Ladestrom repräsentiert, fällt ebenfalls, was das Ende der Konstantstromregelung darstellt.

Fazit

Superkondensatoren werden in bestimmten Automotive-, Industrie- und Consumer-Anwendungen als Energiespeicher verwendet. Ihre physikalischen Eigenschaften bieten einen Vorteil gegenüber herkömmlichen Batterien. Um maximale Energie in der SC-Bank speichern zu können, ist es oft am besten, mehrere SC-Zellen in Serie zu verknüpfen, um hohe Spannungen zu realisieren. Beim Laden sollte eine CICV-Ladetechnik angewendet werden, um hohe Ströme zu begrenzen, die sonst durch den niedrigen ESR des SC fließen würden, wenn mit einer konstanten Spannung geladen wird. Der Konstantstrom macht Ladungsverluste im SC kontrollierbar, was eine geringere Wärmeabstrahlung und eine längere Lebensdauer der SC-Bank zur Folge hat. Die Ladeschaltkreise sollten daher hohe Spannungen tolerieren und eine CICV-Regelung unterstützen. Weitere Informationen über Intersils synchrone Buck-Regler für das Laden von Superkondensatoren unter: www.renesas.com/isl78268-buck-controller.

#

Über die Renesas Electronics Corporation

Renesas Electronics Corporation bietet zuverlässige Embedded-Design-Innovationen mit kompletten Halbleiterlösungen, die Milliarden von vernetzten, intelligenten Geräten ermöglichen, die Art und Weise zu verbessern, wie Menschen arbeiten und leben - sicher und sicher. Als weltweit führender Anbieter von Mikrocontrollern, Analog-, Power- und SoC-Produkten bietet Renesas das Know-how, die Qualität und umfassende Lösungen für eine breite Palette von Anwendungen in den Bereichen Automotive, Industrie, Heimelektronik, Büroautomatisierung und Informationskommunikation, um eine grenzenlose Zukunft zu gestalten. Erfahren Sie mehr unter renesas.com

+1 408-432-8888 | © Renesas Elektronik Amerika. Alle Rechte vorbehalten. Renesas (und Design) sind Marken der Renesas Electronics Corporation oder einer ihrer Tochtergesellschaften. Alle anderen genannten Marken sind Eigentum ihrer jeweiligen Inhaber.