

Was ist ein DC/DC-Wandler? Teil 3

Einführung

In der vorherigen Ausgabe haben wir erwähnt, dass die in einer Induktivität gespeicherte und von ihr abgegebene Energie, die ein Element der Abwärts-DC/DC-Wandler ist, für den Betrieb der Abwärts-DC/DC-Wandler verwendet wird. Diesmal werden wir erklären, dass die Funktion der in der Induktivität gespeicherten und von ihr abgegebenen Energie den Aufwärtsbetrieb, bei dem die Ausgangsspannung höher als die Eingangsspannung ist, und den Umkehrbetrieb, bei dem die positive Eingangsspannung in eine negative Ausgangsspannung umgewandelt wird, ermöglicht, indem einfach die Art und Weise geändert wird, wie die Stromversorgung, eine Induktivität und ein Schalter angeschlossen sind. Wir werden auch andere Steuerungsmethoden als die Zeitverhältnissteuerung erläutern.

Spannungserzeugung durch Abschalten des Stroms in der Induktivität

Eine einfache Schaltung zur Erläuterung ist in Abbildung 1 dargestellt. Nehmen wir an, dass ein konstanter Strom, $I = V_{in} / R$, durch die Induktivität fließt und die Induktionsspannung zwischen Punkt A und Punkt B im Ausgangszustand V_{in} ist. Wenn in dieser Situation SW2 zwischen der Induktivität und dem Widerstand R ausgeschaltet wird, wie ändert sich dann die Spannung von Punkt B? Auch wenn SW2 ausgeschaltet wird, versucht die Induktivität den Strom ($I = V_{in} / R$) kontinuierlich fließen zu lassen, die Spannung von Punkt B steigt drastisch an und es wird eine Art Überspannung mit positiver Richtung erzeugt. DC/DC Aufwärtswandler steuern diesen Vorgang, um eine stabile Spannung zu erzeugen, die höher als die Eingangsspannung ist. Wenn andererseits SW1 zwischen der Induktivität und der Versorgungsspannung V_{in} ausgeschaltet wird, wie ändert sich dann die Spannung von Punkt A im Ausgangszustand? Auch wenn SW1 ausgeschaltet wird, versucht die Induktivität, den Strom ($I = V_{in} / R$) kontinuierlich fließen zu lassen, die Spannung von Punkt A sinkt drastisch und es entsteht eine Art Überspannung mit einer negativen Spannung von weniger als 0 V. Invertierende DC/DC-Wandler steuern diesen Vorgang, um eine stabile Spannung von weniger als 0 V zu erzeugen.

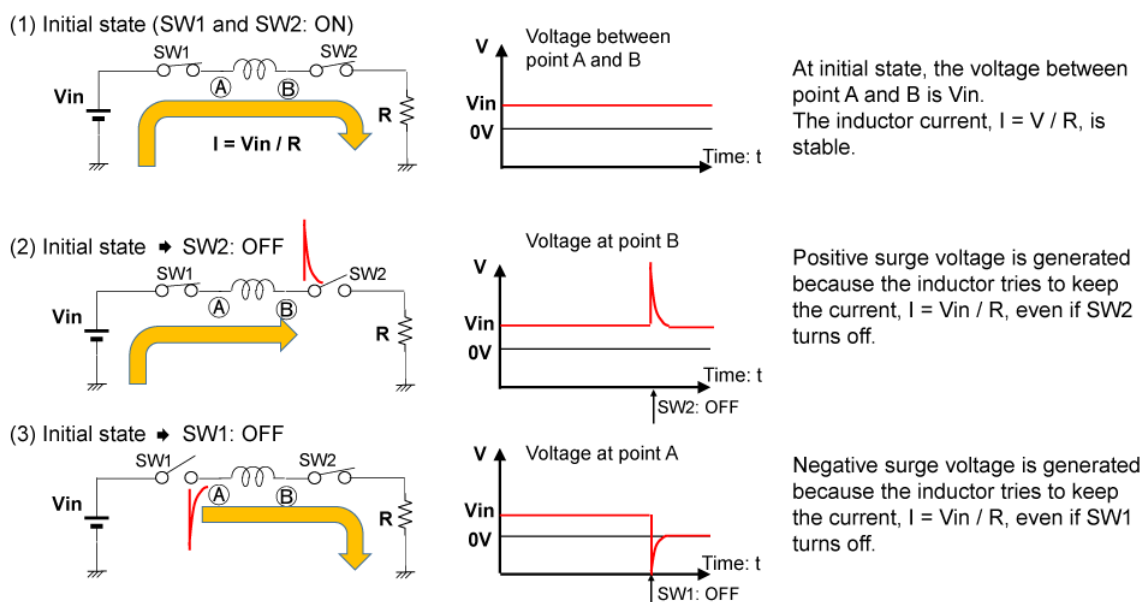


Abbildung 1. Überspannung durch Stromunterbrechung an der Induktivität

Aufwärts-DC/DC-Wandler

Bei einem DC/DC-Aufwärtswandler sind Eingangsstromversorgung V_{in} , Induktor L , SW1, SW2, Ausgangskondensator C_{out} wie in Abbildung 2 dargestellt angeschlossen.

Gemäß Abbildung 2 kann der Betrieb wie folgt erklärt werden:

- Schritt 1: Wenn SW1 eingeschaltet wird, fließt der Strom von der Stromversorgung V_{in} durch die Induktivität nach GND und nimmt allmählich zu und die Energie wird in der Induktivität gespeichert.
- Schritt 2: Wenn SW1 ausgeschaltet und SW2 eingeschaltet wird, fließt der Strom durch die Induktivität weiter. Während dieser Stufe 2 wird die in der Induktivität gespeicherte Energie freigesetzt.

Mit diesem Strom wird der Ausgangskondensator aufgeladen und die Ausgangsspannung steigt an. Wir hoffen Sie können nachvollziehen, dass die Ausgangsspannung V_{out} durch die Wiederholung von Schritt 1 und Schritt 2 ansteigt.

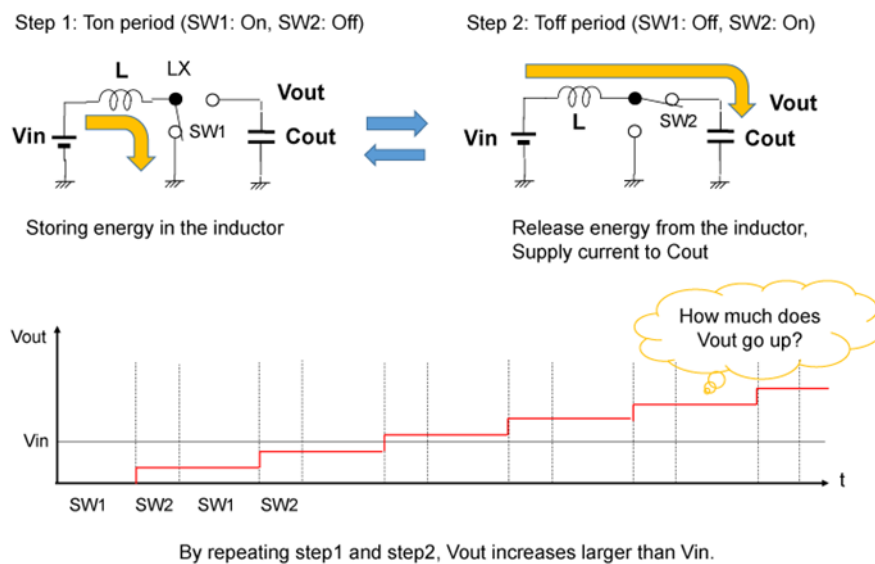


Abbildung 2. Funktionsprinzip von Aufwärts-DC/DC-Wandlern

Und wie steigt dann die Ausgangsspannung? Die Antwort ist in Abbildung 3 dargestellt.

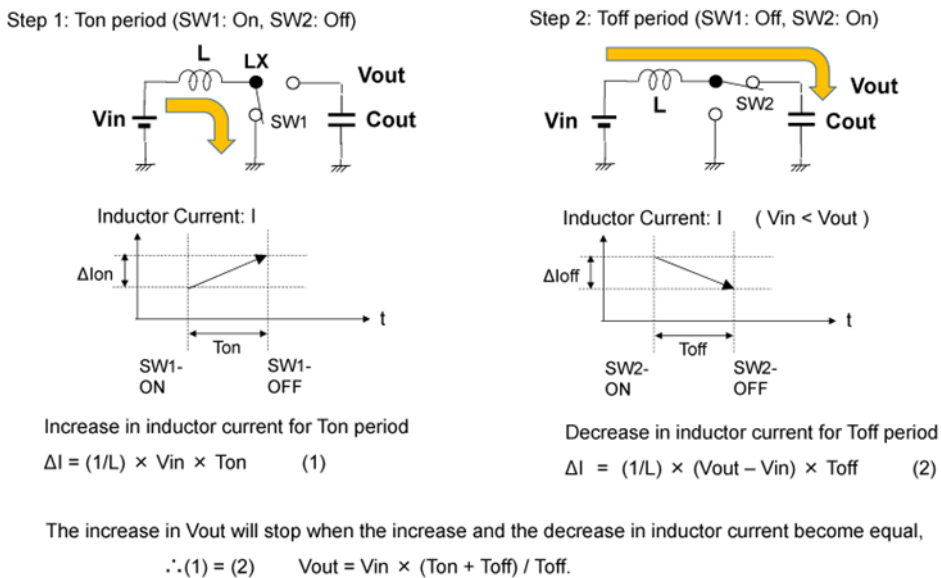


Abbildung 3. Betriebsanalyse von DC/DC-Aufwärtswandlern

Wenn die Spannung "V" über eine Induktivität "L" für die Dauer "T" angelegt wird, dann kann der Betrag des Induktionsstroms ΔI durch die folgende Formel beschrieben werden: $\Delta I = (1 / L) \times V \times T$

- Schritt 1: SW1 schaltet für die Dauer von Ton ein. Die Eingangsspannung V_{in} wird über die Induktivität für Ton-Periode gelegt. Der Anstieg des Stroms in der Induktivität ΔI_{on} kann wie folgt berechnet werden:

$$\Delta I_{on} = (1 / L) \times V_{in} \times T_{on} \dots(1)$$

- Schritt 2: SW2 schaltet für die Toff-Periode ein. Die Spannung " $V_{out} - V_{in}$ " wird für die Toff Periode über die Induktivität gelegt. Die Abnahme des Stroms in der Induktivität ΔI_{off} kann entsprechend der folgenden Formel berechnet werden:

$$\Delta I_{off} = (1 / L) \times (V_{out} - V_{in}) \times T_{off} \dots (2)$$

Wenn der Anstieg des Stroms in der Induktivität ΔI_{on} und der Rückgang des Stroms ΔI_{off} gleich sind, hört der Anstieg der Ausgangsspannung auf. Mit Hilfe von Gleichung (1) = (2) erhalten wir also V_{out} als:

$$V_{out} = V_{in} \times (T_{on} + T_{off}) / T_{off}$$

Wie oben beschrieben, ist die Konfiguration in Abbildung 2 dargestellt und die Spannung, die höher als V_{in} ist, wird durch das Schalten zweier Schalter in einem bestimmten Zeitverhältnis erzeugt. Die Ausgangsspannung wird durch das Zeitverhältnis eingestellt. Wir hoffen Sie haben nun die Funktionsweise von DC/DC-Aufwärtswandlern verstanden.

Glättung der Ausgangsspannung durch Kondensator

Abwärts-DC/DC-Wandler liefern sowohl während der Ton-Periode als auch während der Toff Periode einen Strom an die Ausgangslast. Aufwärtswandler und invertierende DC/DC Wandler liefern jedoch während der Ton-Periode keinen Strom an die Ausgangslast.

Bei Abwärts-DC/DC-Wandlern besteht der Filter aus einer Induktivität und einem Kondensator, wobei die Induktivität auch eine "glättende" Rolle spielt. Bei DC/DC-Wandlern mit Aufwärtsregelung trägt die Induktivität jedoch nicht zur Glättung bei und nur der Kondensator spielt eine Rolle bei der Glättung.

Daher ist ein Kondensator mit einer relativ großen Kapazität erforderlich. Die Rolle der Induktivität in DC/DC-Aufwärtswandlern ist nur "Energiespeicherung und -abgabe".

Ausgangsstrom von DC/DC-Wandlern

Angenommen der durchschnittliche Strom von V_{in} ist I_{in} und der Ausgangsstrom ist I_{out} , dann gilt:

$$V_{in} \times I_{in} = V_{out} \times I_{out}$$

Nach dieser Gleichung ist der maximale Ausgangsstrom umso geringer, je größer das Verhältnis der Ausgangsspannung zur Eingangsspannung oder das Verstärkungsverhältnis ist.

* Während $V_{in} \times I_{in}$ während der Ton-Periode und der Toff-Periode zugeführt wird, fließt während der Ton-Periode Strom durch die Induktivität nach GND. Daher könnte man meinen, dass der in dieser Zeit verbrauchte Strom Energie verbraucht, aber in der Ton Periode wird keine Energie verbraucht. Dies ist der Zeitraum, in dem Energie in Höhe von $V_{in} \times I_{in}$ in der Induktivität gespeichert wird.

Invertierende DC/DC-Wandler

Um einen invertierenden DC/DC-Wandler zusammenzustellen müssen die Eingangsversorgung V_{in} , Induktor L, SW1, SW2, Ausgangskondensator C_{out} wie in Abbildung 4 dargestellt angeschlossen werden. Anhand von Abbildung 4 kann die Funktionsweise wie folgt erklärt werden:

- Schritt 1: Wenn SW1 eingeschaltet wird fließt der Strom von der Stromversorgung V_{in} durch die Induktivität nach GND und nimmt allmählich zu. Zu diesem Zeitpunkt wird durch den Strom, der durch die Induktivität fließt, Energie in der Induktivität gespeichert.
- Schritt 2: Wenn SW1 ausgeschaltet und SW2 eingeschaltet wird, fließt der Strom durch die Induktivität weiter. Während dieser Stufe 2 wird die in der Induktivität gespeicherte Energie als Strom freigesetzt.

Der Ausgangskondensator wird mit diesem Strom entladen und die Ausgangsspannung sinkt. Sie können sich vorstellen, dass die Ausgangsspannung V_{out} durch abwechselndes Schalten zwischen Schritt 1 und Schritt 2 unter 0 V sinkt.

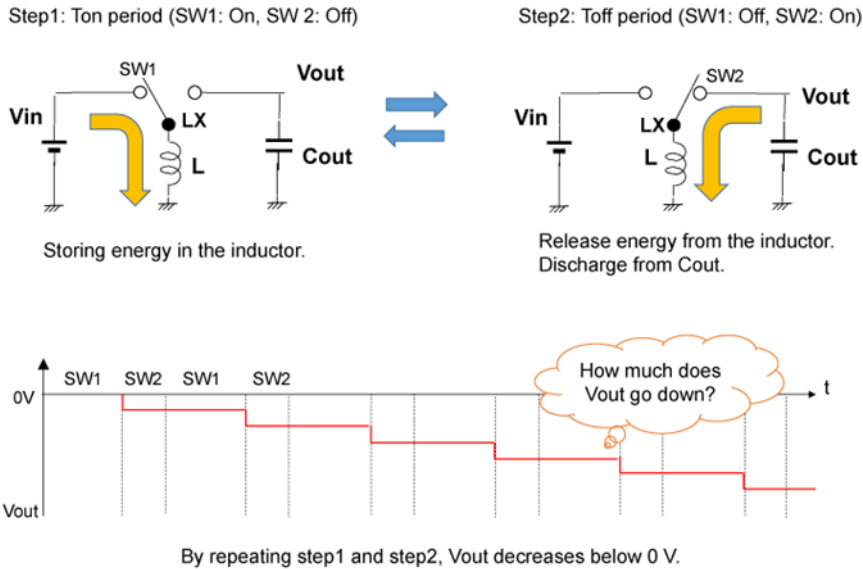


Abbildung 4. Funktionsprinzip von invertierenden DC/DC-Wandlern

Wie stark sinkt dann die Ausgangsspannung? Die Antwort ist in Abbildung 5 dargestellt.

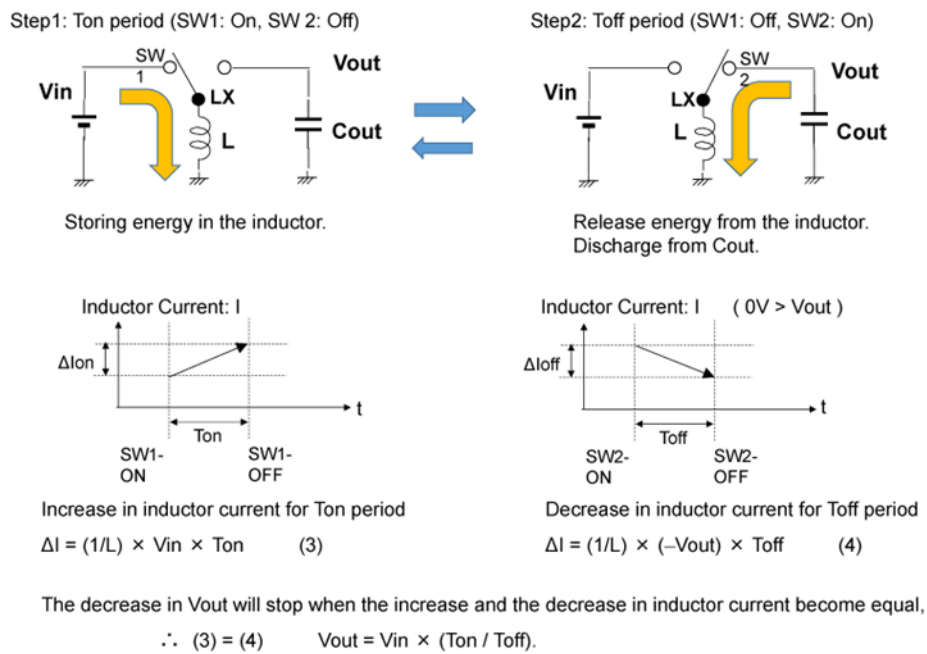


Abbildung 5. Betriebsanalyse von invertierenden DC/DC-Wandlern

Er wird auf die gleiche Weise analysiert wie die DC/DC-Aufwärtswandler.

- Schritt 1: SW1 wird für die Dauer von Ton eingeschaltet. Die Eingangsspannung Vin wird für die Dauer von Ton über die Induktivität gelegt. Der Anstieg des Stroms durch die Induktivität Δlon lässt sich nach der folgenden Formel berechnen:

$$\Delta I_{on} = (1 / L) \times V_{in} \times T_{on} \dots(3)$$

- Schritt 2: SW2 schaltet für die Toff-Periode ein. Die Spannung "|Vout|" wird für die Toff Periode über die Induktivität gelegt. Der Rückgang des Stroms durch die Induktivität Δloff kann anhand der folgenden Formel berechnet werden:

$$\Delta I_{off} = (1 / L) \times |V_{out}| \times T_{off} \dots(4)$$

Wenn der Anstieg des Stroms durch die Induktivität Δlon und der Rückgang des Stroms durch die Induktivität Δloff gleich sind, fällt die Ausgangsspannung nicht mehr ab. Durch die Verwendung von Gleichung (3) = (4) erhalten wir also Vout als:

$$|V_{out}| = V_{in} \times (T_{on} / T_{off}).$$

Wie oben beschrieben, ist die Konfiguration in Abbildung 4 dargestellt und die Spannung kleiner als 0 V wird durch das Schalten zweier Schalter in einem bestimmten Zeitverhältnis geregelt. Die Ausgangsspannung wird durch das Zeitverhältnis eingestellt. Wir hoffen Sie haben nun die Funktionsweise von invertierenden DC/DC-Wandlern verstanden.

Prinzip der Ausgangsspannungserzeugung von Abwärts-/Aufwärts-/invertierenden DC/DC-Wandlern

Für jede Topologie von DC/DC-Wandlern gilt, wenn der ansteigende Strom durch die Induktivität ΔI_{on} und der abfallende Strom durch die Induktivität ΔI_{off} gleich sind, dass die Spannung zwischen den beiden Flanken der Induktivität V_{on} während T_{on} ist und V_{off} während T_{off} ist, dann gilt die folgende Formel.

$$V_{on} \times T_{on} = V_{off} \times T_{off}$$

Wie in Abbildung 6 dargestellt, lässt sich das Bild der Ausgangsspannung der DC/DC-Wandler leicht beschreiben.

Abwärts-DC/DC-Wandler

V_{out} während der Toff-Periode wird geteilt und durch $(V_{in} - V_{out}) \times T_{on}$ gemittelt,

$$\therefore V_{out} = V_{in} \times T_{on} / (T_{on} + T_{off}).$$

Aufwärts-DC/DC-Wandler

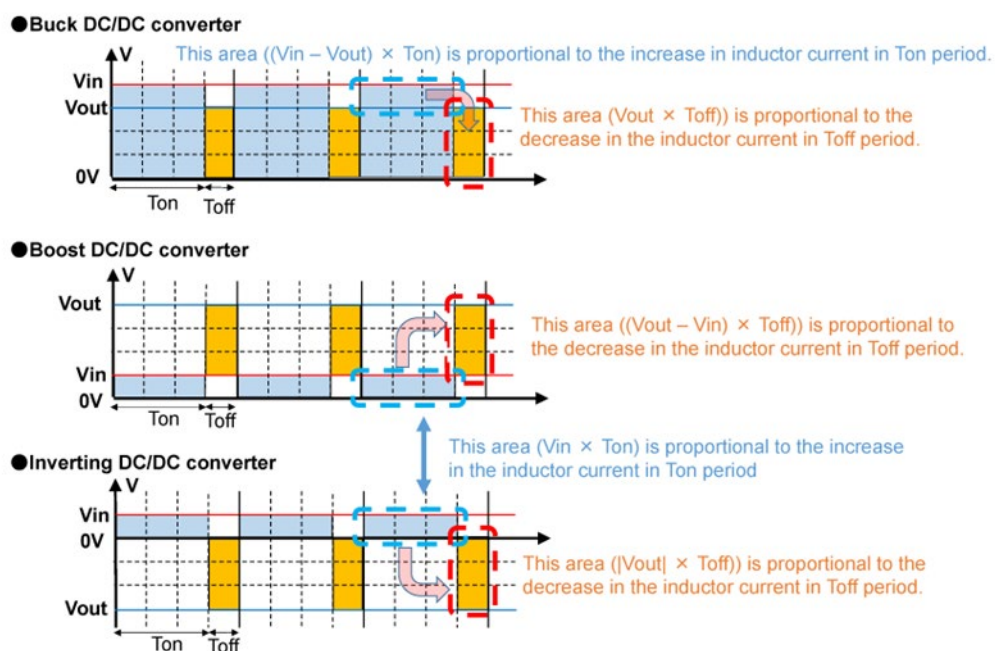
$V_{in} \times T_{on} / T_{off}$ wird zu V_{in} addiert,

$$\therefore V_{out} = V_{in} \times (T_{on} + T_{off}) / T_{off}.$$

Invertierende DC/DC-Wandler

Es wird eine negative Spannung von $V_{in} \times T_{on} / T_{off}$ erzeugt,

$$\therefore V_{out} = -V_{in} \times T_{on} / T_{off}.$$



Steuerungsverfahren für DC/DC-Wandler

PWM-Steuerung

Die Regelungsmethode die eine konstante Spannung durch die Steuerung des Zeitverhältnisses regelt, wie bisher erläutert, wird als PWM-Regelung bezeichnet. PWM steht für Pulsweitenmodulation. Bei der PWM-Steuerung ist die Schaltfrequenz konstant und die Einschaltdauer (On duty) wird gesteuert. Der Steuerkreis überwacht die Ausgangsspannung und durch Anpassung des Einschaltverhältnisses wird die Ausgangsspannung geregelt.

Kontinuierlicher Leitungsmodus

Bisher wurde die Berechnung der Ausgangsspannung unter der Voraussetzung erklärt, dass der ansteigende und abfallende Betrag des Stroms durch die Induktivität gleich ist. Diese Bedingung bedeutet, dass der Strom durch die Induktivität kontinuierlich sein sollte. Daher geht die oben beschriebene Beziehung zwischen der Ausgangsspannung und dem Zeitverhältnis, das die Ausgangsspannung bestimmt davon aus, dass der Strom durch die Induktivität kontinuierlich ist. Dieser Modus, in dem der Induktionsstrom kontinuierlich ist, wird als kontinuierlicher Leitungsmodus bezeichnet. Das Verhältnis zwischen dem Laststrom, I_{out} , und dem Anstiegs-/Abfallbereich des Induktionsstroms (Ripple-Strom) ΔI , ist wie in der folgenden Formel beschrieben:

$$I_{out} \geq 1/2 \times \Delta I.$$

Insbesondere dann, wenn $I_{out} = 1/2 \times \Delta I$ gilt, wird dies als kritischer Modus bezeichnet. Siehe Abbildung 7.

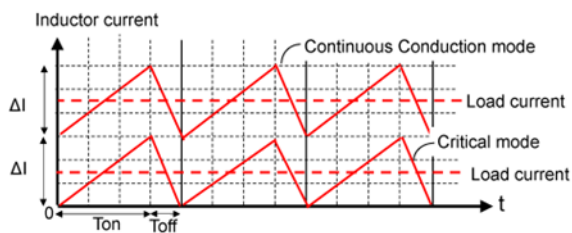
Diskontinuierlicher Leitfähigkeitsmodus

Wenn das Verhältnis zwischen dem Laststrom, I_{out} , und dem Anstiegs-/Verringerungsbereich des Induktionsstrom (Ripple-Strom) ΔI , ist unten dargestellt, im erzwungenen PWM Modus, $I_{out} < 1/2 \times \Delta I$, fließt der Induktorstrom in umgekehrter Richtung.

Der Rückstrom aus der Induktivität ist ein Faktor für den Effizienzverlust, daher schaltet sich SW aus um den Rückstrom zu verhindern. Wenn $I_{out} < 1/2 \times \Delta I$ gilt, dann ist der Induktionsstrom in diesem Fall diskontinuierlich.

Wie in Abbildung 7 dargestellt, wird die Ausgangsspannung bei der PWM-Steuerung des diskontinuierlichen Stromflusses durch die Steuerung der Ton-Periode in Abhängigkeit vom Laststrom geregelt. Bei der PWM-Steuerung ist die Frequenz unabhängig vom Laststrom konstant. Daher ist die von den DC/DC-Wandlern verbrauchte Leistung im Falle einer geringen Last nicht vernachlässigbar im Vergleich zu der von der Last verbrauchten Leistung, was zu einem geringeren Wirkungsgrad führt.

• Continuous conduction mode, and Critical mode

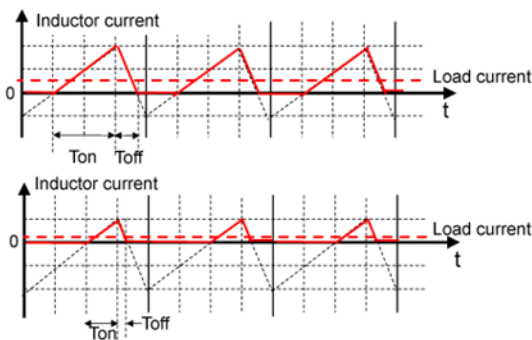


- Continuous conduction mode ($I_{out} > 1/2 \times \Delta I$)
- Critical mode ($I_{out} = 1/2 \times \Delta I$)

• If the load current (I_{out}) and increase/decrease range of the inductor current (ΔI , ripple current) are:
 $I_{out} \geq 1/2 \times \Delta I$, ideally, the output voltage is not affected by the load current, decided just by V_{in} , T_{on} , and T_{off} .

• That is, the output voltage is regulated by controlling time ratio.

• Discontinuous conduction mode



- Discontinuous conduction mode ($I_{out} < 1/2 \times \Delta I$)

• If the load current (I_{out}) and increase/decrease range of the inductor current (ΔI , ripple current) in continuous conduction mode are $I_{out} < 1/2 \times \Delta I$, the inductor current flows in reverse, and it leads decline of efficiency. During the period for occurring reverse current, SW will be turned off to prevent reverse current, and the inductor current will be discontinuous.

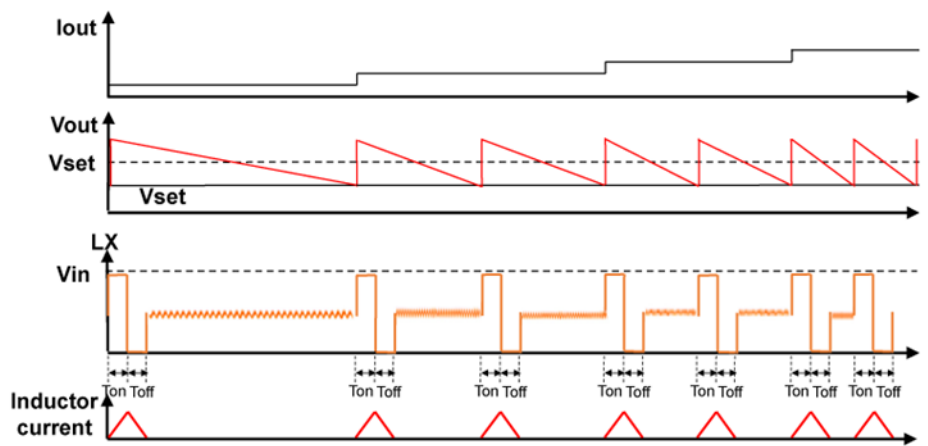
• In PWM control, during the period of load current that is in current discontinuity mode, T_{on} interval is fixed, and the stable output voltage is generated by controlling the T_{on} period depending on the load current.

• Since DC/DC converters are in constant operation, their efficiency declines as the load current decreases.

Abbildung 7. Kontinuierlicher Leitungsmodus und diskontinuierlicher Leitungsmodus bei PWM-Steuerung

VFM/PFM-Steuerung

Um den Wirkungsgrad bei geringer Last zu verbessern, wird eine andere Steuerungsmethode, die VFM- (variable Frequenzmodulation) / PFM- (Pulsfrequenzmodulation) Steuerung verwendet. Bei dieser Steuerungsmethode wird die Ausgangsspannung überwacht und wenn die Ausgangsspannung unter den eingestellten Ausgangsschwellenwert fällt, beginnt der Schaltvorgang um den Ausgangsstrom an die Last zu liefern. Die Einschaltzeit, der Impuls (T_{on} Periode), des Schaltvorgangs ist konstant und die Anzahl der Schaltvorgänge ändert sich in Abhängigkeit vom Laststrom. Wenn der Laststrom klein ist, ist das Intervall des Impulses lang, im Gegensatz dazu ist das Intervall des Impulses kurz, wenn der Laststrom groß ist. Da das Schalten nur dann erfolgt, wenn ein Spannungsabfall festgestellt wird, kann bei geringer Last ein hoher Wirkungsgrad erzielt werden.



- In VFM/PFM control, Ton time is fixed, and stable output voltage is regulated by controlling Ton interval depending on the load current.
- Since DC/DC converters operate only when a voltage drop exceeding the specified voltage is detected with the respect to setting voltage, high efficiency will be achieved at low load current.

Abbildung 8. VFM/PFM-Steuerbetrieb Wellenformbild

In der Tabelle auf der linken Seite von Abbildung 9 ist der Vergleich zwischen PWM- und VFM/PFM-Regelung dargestellt. Bei DC/DC-Wandlern wird in der Regel die PWM-Regelung für einen stabilen Betrieb bei hohem Laststrom verwendet und die VFM/PFM-Regelung für Effizienz bei geringer Last.

Vergleich zwischen PWM-Steuerung und VFM/PFM-Steuerung

Effizienz:

Bei der PWM-Steuerung ist die Schaltfrequenz unabhängig vom Laststrom konstant, daher ist der Wirkungsgrad bei geringer Last schlechter als bei der VFM/PFM-Steuerung. Bei der VFM/PFM-Steuerung wird der Schaltvorgang erst dann eingeleitet, wenn die Ausgangsspannung unter den festgelegten Wert sinkt, daher ist der Wirkungsgrad bei geringer Last viel besser als bei der PWM-Steuerung. Das Diagramm rechts in Abbildung 9 zeigt den Wirkungsgrad im Vergleich zum Ausgangsstrom der PWM-Steuerung und der VFM/PFM-Steuerung.

Verbrauchsstrom:

Die PWM-Steuerung arbeitet mit einer konstanten Schaltfrequenz unabhängig vom Laststrom, so dass die Stromaufnahme nahezu konstant ist. Bei der VFM/PFM-Steuerung hingegen ändert sich die Schaltfrequenz in Abhängigkeit vom Laststrom, so dass die Stromaufnahme insbesondere bei geringer Last reduziert werden kann.

Brummspannung:

Im Vergleich zum diskontinuierlichen Betrieb liefert die PWM-Steuerung während der Ton Periode einen vom Laststrom abhängigen Strom, so dass die Ausgangswelligkeitsspannung auf ein geringes Niveau reduziert wird. Die VFM/PFM-Steuerung zielt darauf ab, den Wirkungsgrad zu verbessern, indem das Schaltintervall bei konstanter Ton-Periode vergrößert wird und die Ton-Periode ist relativ lang eingestellt, daher ist die Ausgangswelligkeitsspannung groß.

Einschwingverhalten:

Bei der PWM-Regelung variiert die Ton-Zeit in Abhängigkeit von der Laststromänderung. Daher ist das Einschwingverhalten der PWM-Regelung besser als das der VFM/PFM Regelung die eine feste Ton-Zeit hat.

Rauschen:

Da DC/DC-Wandler die Ausgangsspannung durch Schaltvorgänge regulieren, entsteht Schaltrauschen. Das durch die PWM-Steuerung verursachte Schaltrauschen wird durch die Schaltfrequenz bestimmt, daher ist es einfach Filter zu entwerfen, um eine Gegenmaßnahme zu ergreifen. Bei der VFM/PFM-Steuerung variiert die Schaltfrequenz jedoch in Abhängigkeit vom Laststrom, so dass es schwierig sein kann, eine Gegenmaßnahme zu ergreifen.

•Comparison of Each Item

		VFM/PFM	PWM
Efficiency	Low Load	Good	Bad
	High Load	Bad	Good
Consumption Current		Small	Large
Ripple Voltage		Large	Small
Transient Response		Bad	Good
Noise Countermeasures		Difficult	Easy

※ Better performance in red

•Efficiency

RP508K121X, $V_{OUT} = 1.2\text{ V}$
 $L = \text{MIPSZ2012D0R5 (2012size_0.5 }\mu\text{H)}$

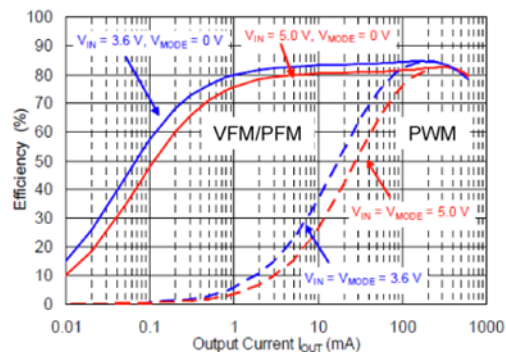


Abbildung 9. Vergleich zwischen PWM-Steuerung und VFM/PFM-Regelung

Fazit

Wir haben erklärt, dass durch die Verbindung von Stromquelle, Induktor und Schaltern auf unterschiedliche Weise und durch die Speicherung von Energie in der Induktivität oder die Abgabe von Energie aus der Induktivität DC/DC-Aufwärtswandler, die eine höhere Spannung als die Eingangsspannung erzeugen, oder invertierende DC/DC-Wandler, die eine negative Spannung erzeugen, realisiert werden können. Wir haben auch die Merkmale der PWM Steuerung und der VFM/PFM-Steuerung als Steuerungsmethoden erläutert.

In der nächsten Ausgabe werden wir weitere Methoden zur Steuerung von DC/DC-Wandlern erläutern.

Vielen Dank, dass Sie sich für diese Thematik interessieren.

Power Management ICs von Nisshinbo gibt es bei der TOPAS electronic AG

Ihrem Partner für neue Technologien und innovative Produkte.

Wir bieten technische Kundenberatung, Anwendungsunterstützung bei der Projektarbeit, Hilfe bei der Fehlersuche und bei Problemlösungen, technische Konzeptentwicklung für den Einsatz der Technologien im Kundenumfeld.

TOPAS

Components
for Solutions

+49 (0)511 968 640