

降圧型高力率コンバータの基本特性

(読んでほしい人：パワエレ技術者)

2016/8/9 舞鶴高専 平地克也

前回の技術メモ(No.20160701、「降圧型高力率コンバータの基本動作」)では降圧型高力率コンバータ(図1)に成立する式を導出し、入力電流 i_{in} とリアクトル電流 i_L の波形を表計算ソフトで描画させました。 i_{in} 波形と i_L 波形が分かれば、入力電流実効値、入力力率、出力電流、動作周波数なども容易に導出することができ、高力率コンバータの基本特性を理解することができます。

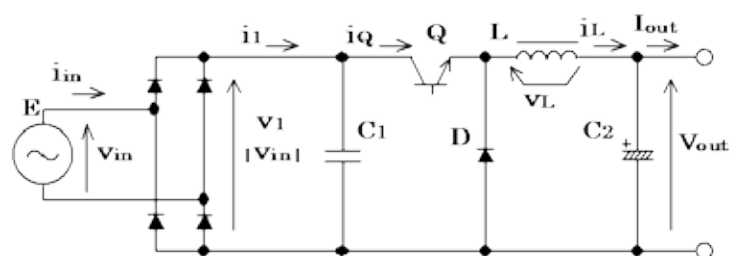


図1 降圧型高力率コンバータ

諸特性の計算方法

i_{in} と i_L 波形から諸特性が次のように導出できます。

< 出力電流 I_{out} >

「 $I_{out} = i_L$ の平均値」から容易に計算できます。 i_L は三角波の集合体であり、境界モードでは1周期の長さが位相によって変化します。 I_{out} の計算には表計算ソフトを使って三角波1つ1つの面積を計算する必要があります。

< 入力電流実効値 I_{in} >

入力電流瞬時値 i_{in} から実効値の定義式に従って計算します。

$$\text{実効値の定義式} \dots I_{in} = \sqrt{\frac{1}{\rho} \int_0^{\rho} i_{in}^2 dt}$$

< 入力力率 \cos >

$\cos = \text{入力電力} \div (\text{入力電圧実効値} \times \text{入力電流実効値})$

なお、回路の損失は無視し「入力電力 = 出力電力 = $V_{out} \times I_{out}$ 」とします。

< 動作周波数 >

不連続モードでは動作周波数は一定ですが、境界モードでは位相によって変化します。最も影響が大きいと思われる位相 = 90度の時の周波数を代表値として使用します。

計算結果

入力電圧、出力電流、動作周波数、などを変化させた時の i_{in} 波形と i_L 波形および諸特性を以下の図 2 ~ 図 13 に示します。次の条件で計算しています。

入力電圧：100V、200V、240V に可変 入力電圧周波数：60Hz 一定

出力電圧：DC60V 一定（DC60V に定電圧制御した場合を想定している）

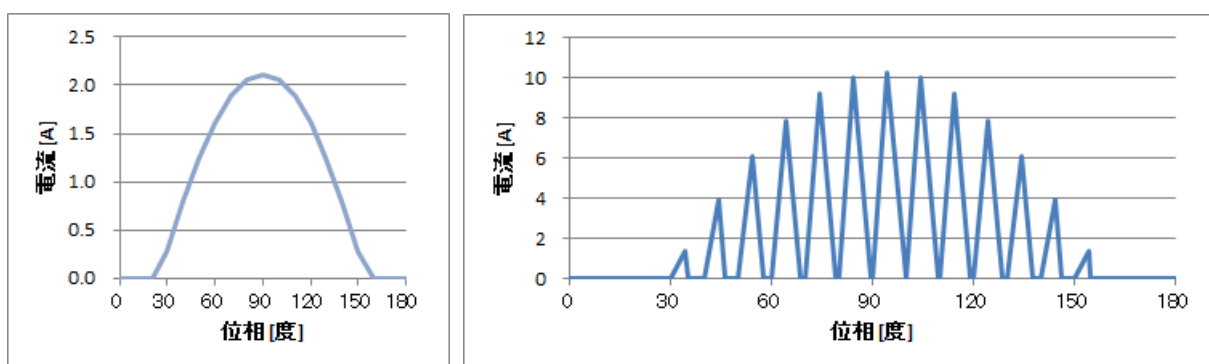
出力電流：2A、1A、0.1A などに可変 リアクトル $L = 1.5\text{mH}$ （なお、図 8 だけは $750\mu\text{H}$ ）

不連続モード時の動作周波数 = 2.16kHz （10 度毎にスイッチング：半サイクルに 18 パルス）

なお、図 8 だけは動作周波数 = 4.32kHz （5 度毎にスイッチング：半サイクルに 36 パルス）

なお、境界モードでは動作周波数は条件に応じて変化する。

< 不連続モードにて >



(a) 入力電流

(b) リアクトル電流

図 2 電流波形（入力 100V1.27A、出力 60V2A、不連続モード、 $T_{on} = 190\mu\text{sec}$ 、力率 0.95）

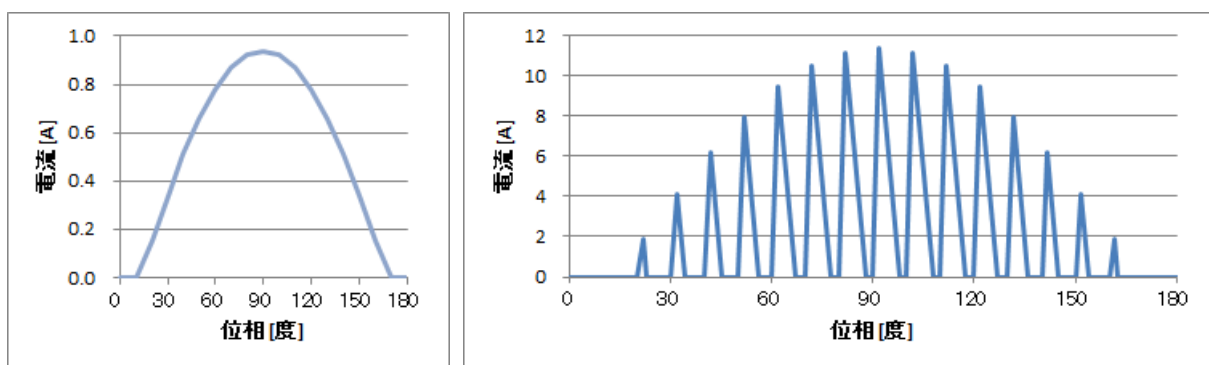
図 2 の時、入力電圧最小、出力電流最大です。位相 90 度では次のようになっています。

リアクトル電流 i_L の上昇時間 + 下降時間 = $190\mu\text{sec} + 250\mu\text{sec} = 440\mu\text{sec}$

1 周期 = $1 / 2.16\text{kHz} = 463\mu\text{sec}$

よって、「 i_L の上昇時間 + 下降時間 1 周期」であり、境界モードに近い状態になっています。入力電圧最小、出力電流最大、位相 90 度の時に i_L の上昇時間 + 下降時間は最大となるので、この時なるべく境界モードに近い状態となるように L を値を選んでいきます。

……このように選ぶと i_L のピーク値を最小にできます。

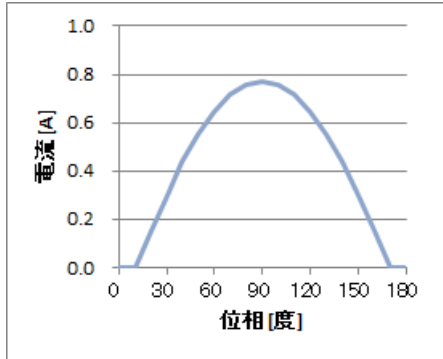


(a) 入力電流

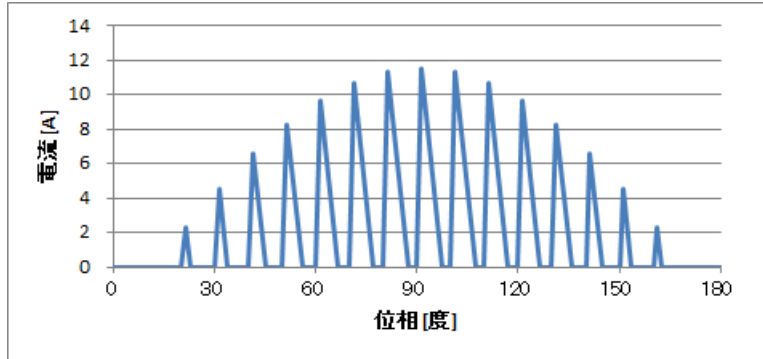
(b) リアクトル電流

図 3 電流波形（入力 200V0.61A、出力 60V2A、不連続モード、 $T_{on} = 77\mu\text{sec}$ 、力率 0.98）

図2と比べて入力電圧が2倍になっているので i_L の導通範囲が広がっています。図2では30度から導通していましたが、図3では20度から導通。そのため力率がUPしています(0.95 0.98)。



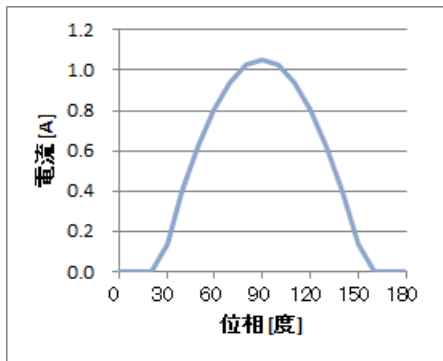
(a) 入力電流



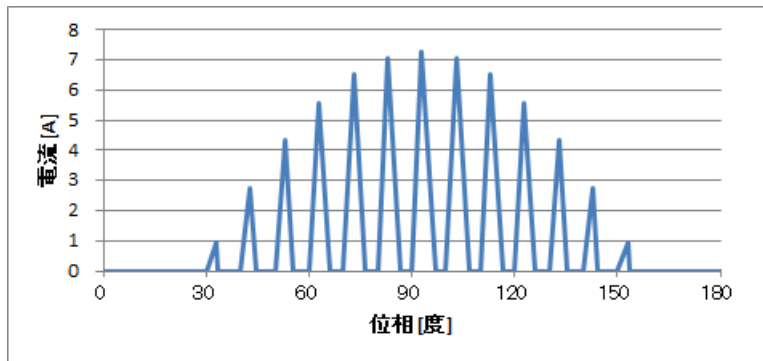
(b) リアクトル電流

図4 電流波形(入力 240V0.51A、出力 60V2A、不連続モード、Ton = 62 μ sec、力率 0.98)

入力電圧が最大(240V)です。不連続モードではこの時 i_L のピーク値は最大となります(位相 90度で 11.53A)。スイッチ素子 Q とダイオード D の最大電流もこの値となるのでこの値が重要な設計定数となります。



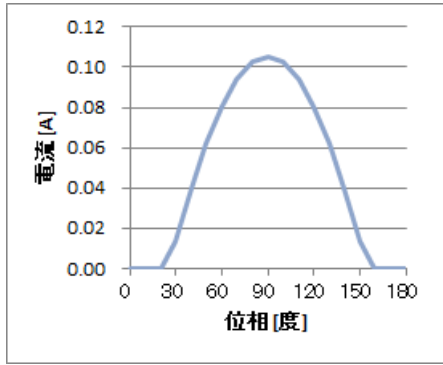
(a) 入力電流



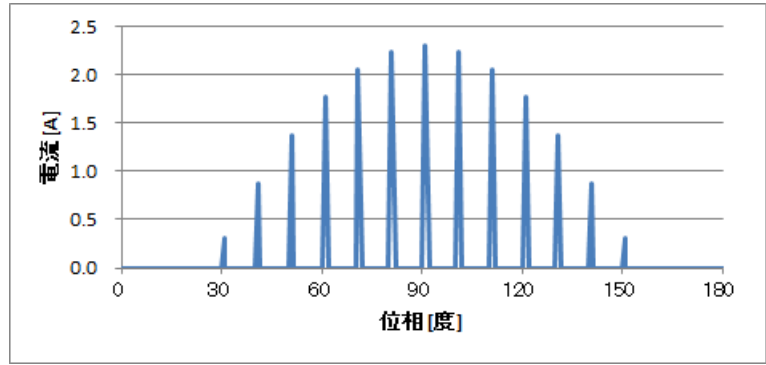
(b) リアクトル電流

図5 電流波形(入力 100V0.63A、出力 60V1A、不連続モード、Ton = 134 μ sec、力率 0.95)

図2から出力電流を1/2にしています(2A 1A)。出力電流を1/2にしてもリアクトル電流のピーク値は1/2にはなりません(10.29A 7.27A)。なお、後述するように境界モードでは出力電流を1/2にするとリアクトル電流も1/2となります。



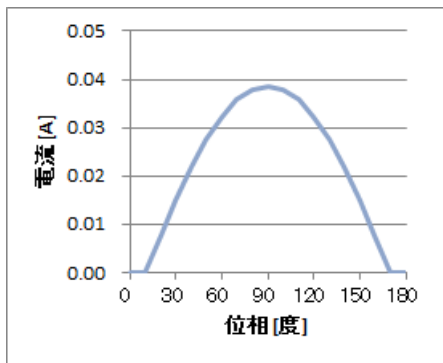
(a) 入力電流



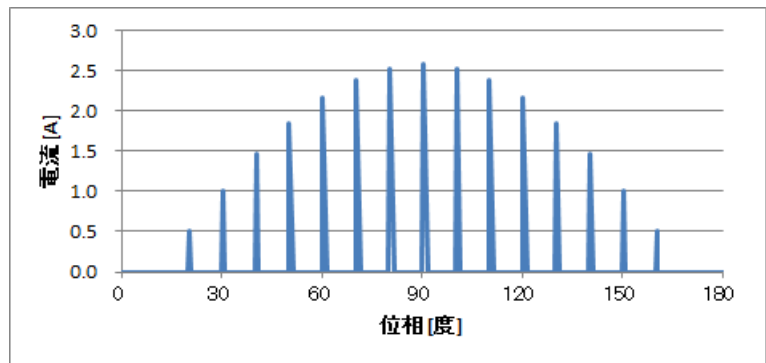
(b) リアクトル電流

図6 電流波形（入力 100V0.063A、出力 60V0.1A、不連続モード、 $T_{on} = 42.4 \mu\text{sec}$ 、力率 0.95）

微少負荷（0.1A）時の波形です。微少負荷でもリアクトル電流のピーク値はそこそこ大きい。



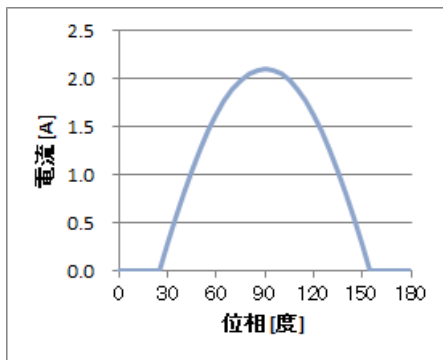
(a) 入力電流



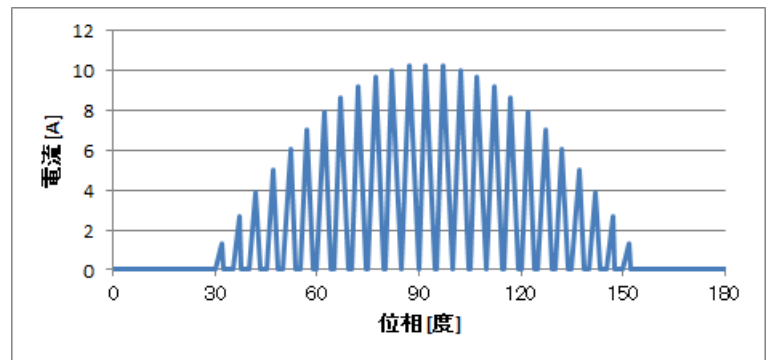
(b) リアクトル電流

図7 電流波形（入力 240V0.026A、出力 60V0.1A、不連続モード、 $T_{on} = 13.9 \mu\text{sec}$ 、力率 0.98）

入力電圧最大、出力電流最小時の波形です。この時入力電流は最小となります。



(a) 入力電流



(b) リアクトル電流

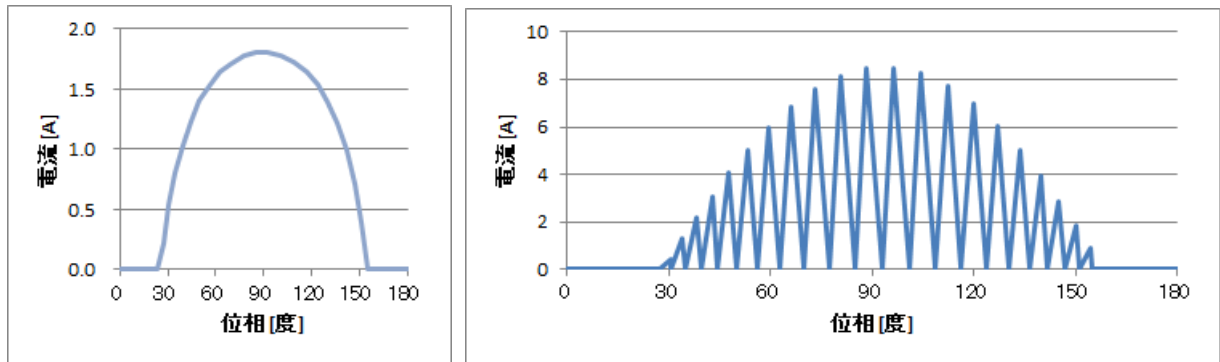
（動作周波数 $f = 4.32\text{kHz}$ 、 $L = 750 \mu\text{H}$ 、にて）

図8 電流波形（入力 100V1.27A、出力 60V2A、不連続モード、 $T_{on} = 95 \mu\text{sec}$ 、力率 0.95）

図2 に対して動作周波数を2倍、 L を1/2、 T_{on} を1/2にしています。図2と比較すれば分かるよう

にリアクトル電流ピーク値、入力電流の値、力率などは全て同じ値です。一般に、動作周波数を N 倍にした時、 L と T_{on} を $1/N$ にすれば同じ特性が得られます。よって、例えば動作周波数を 100kHz (図 8 の 23 倍) にするなら L は $32\ \mu\text{H}$ (図 8 の $1/23$) で OK です。

<境界モードにて>

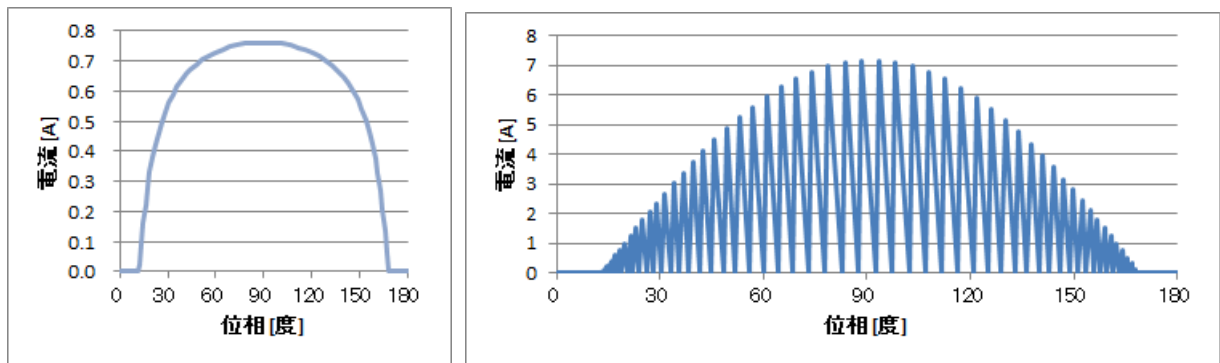


(a) 入力電流

(b) リアクトル電流

図 9 電流波形 (入力 $100\text{V}1.23\text{A}$ 、出力 $60\text{V}2\text{A}$ 、境界モード、 $T_{on} = 157\ \mu\text{sec}$ 、力率 0.98)

入出力条件やリアクトルの値は図 2 と同じです。制御方式のみ不連続モードから境界モードに変えています。リアクトル電流ピーク値は小さくなっています (10.29A 8.49A)。これは不連続モードと比較して境界モードの大きなメリットです。

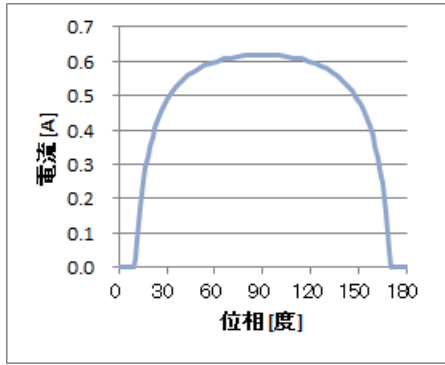


(a) 入力電流

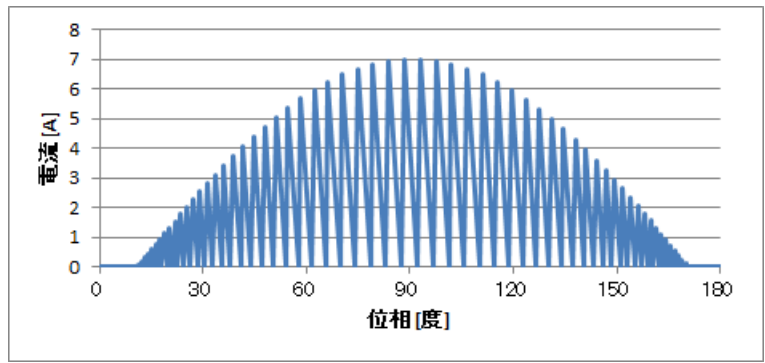
(b) リアクトル電流

図 10 電流波形 (入力 $200\text{V}0.61\text{A}$ 、出力 $60\text{V}2\text{A}$ 、境界モード、 $T_{on} = 48.3\ \mu\text{sec}$ 、力率 0.99)

図 9 から入力電圧を 2 倍にしています。動作周波数は大幅に増加しています (2.71kHz 4.41kHz)。このように、境界モード制御では動作条件によって動作周波数が大幅に変化します。また、不連続モードでは入力電圧が上昇するとリアクトル電流ピーク値も上昇しましたが (100V 200V にて 10.29A 11.36A)、境界モードでは逆に低下します (100V 200V にて 8.49A 7.17A)。



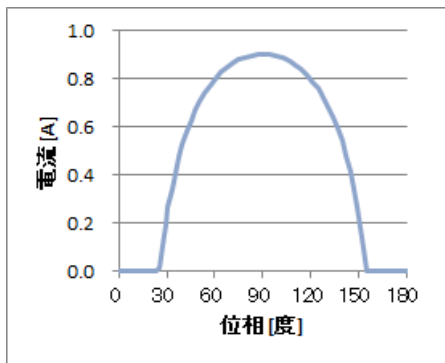
(a) 入力電流



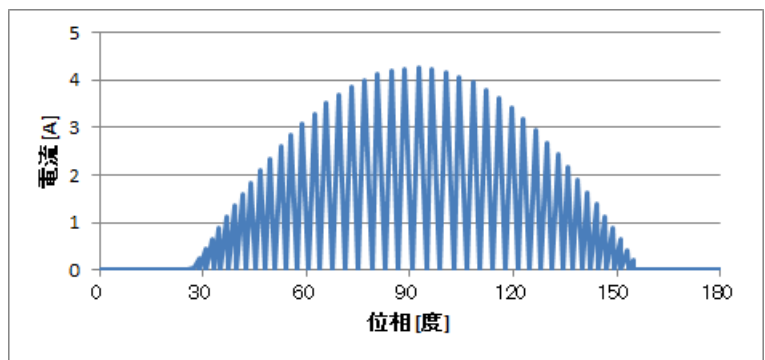
(b) リアクトル電流

図 11 電流波形 (入力 240V0.51A、出力 60V2A、境界モード、 $T_{on} = 37.6 \mu\text{sec}$ 、力率 0.99)

入力電圧最大時です。定格負荷時の最大周波数はこの条件で生じます (4.69kHz)。



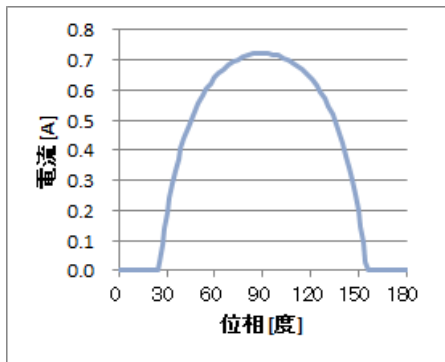
(a) 入力電流



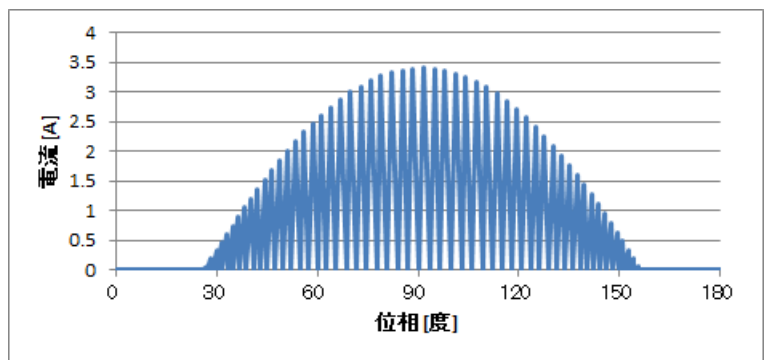
(b) リアクトル電流

図 12 電流波形 (入力 100V0.62A、出力 60V1A、境界モード、 $T_{on} = 78.4 \mu\text{sec}$ 、力率 0.97)

図 9 から出力電流を 1/2 にしています。 T_{on} も 1/2、リアクトル電流ピーク値も 1/2 になっています。境界モードではこの 3 つの値は正確に比例します (不連続モードでは比例しない)。動作周波数は図 9 の 2 倍となっています。境界モードでは動作周波数は出力電流に反比例します。



(a) 入力電流



(b) リアクトル電流

図 13 電流波形 (入力 100V0.49A、出力 60V0.8A、境界モード、 $T_{on} = 62.7 \mu\text{sec}$ 、力率 0.98)

図 12 からさらに軽負荷としています。動作周波数がさらに高くなり、図 13 ではリアクトル電流の形状が判別しにくくなっています。

計算結果まとめ

図 2 ~ 図 13 の計算結果を一覧表にまとめると表 1 のようになります。表 1 から次のことが分かります。

< 不連続モード >

- ・入力電流は出力電流に正比例し、入力電圧に概ね反比例する。
- ・動作周波数を 2 倍にすれば L を 1/2、Ton を 1/2 にすれば同じ特性が得られる。
よって、動作周波数を 100kHz (図 8 の 23 倍) にするなら L は 32 μ H (図 8 の 1/23) で OK。
- ・ワールドワイド電源にも対応可能。
- ・ピーク電流は出力電流の 5 倍以上となる。

< 境界モード >

- ・入力電流は出力電流に正比例し、入力電圧に概ね反比例する。
- ・ピーク電流は不連続モードより境界モードの方が小さい。
- ・スイッチ素子の ON 時間 Ton とピーク電流は出力電流に正比例する。
- ・動作周波数は出力電流に反比例する。よって、軽負荷時は動作周波数が非常に高くなり、境界モードは適切ではない。

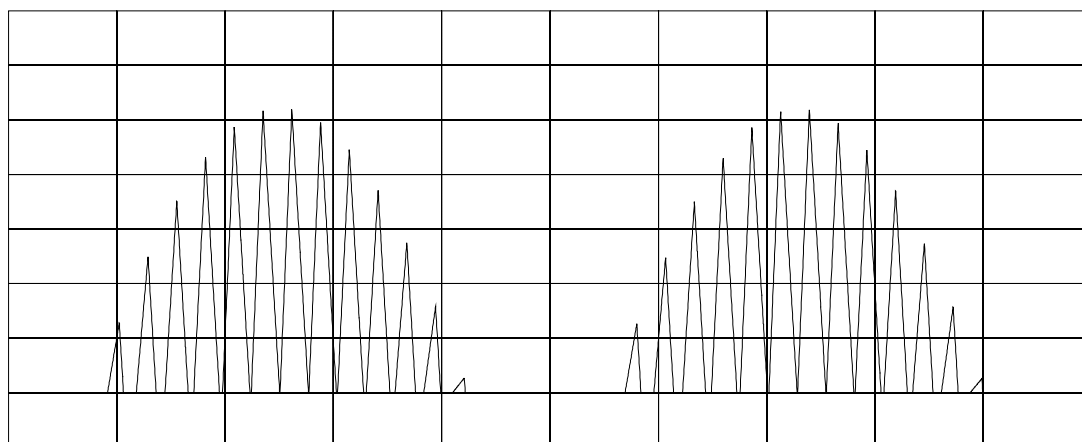
表 1 降圧型高力率コンバータ

動作モード	入力電圧 [V]	入力電流 [A]	力率 [W/VA]	出力電流 [A]	Ton [μ sec]	周波数 [kHz]	ピーク電流 [A]
図 2 不連続	100	1.27	0.95	2	190	2.16	10.29
図 3 不連続	200	0.61	0.98	2	77	2.16	11.36
図 4 不連続	240	0.51	0.98	2	62	2.16	11.53
図 5 不連続	100	0.63	0.95	1	134	2.16	7.27
図 6 不連続	100	0.063	0.95	0.1	42.4	2.16	2.30
図 7 不連続	240	0.026	0.95	0.1	13.9	2.16	2.58
図 8 不連続	100	1.27	0.95	2	95	4.32	10.29
図 9 境界	100	1.23	0.98	2	157	2.71	8.49
図 10 境界	200	0.61	0.99	2	48.3	4.41	7.17
図 11 境界	240	0.51	0.99	2	37.6	4.69	7.00
図 12 境界	100	0.62	0.97	1	78.4	5.41	4.26
図 13 境界	100	0.49	0.98	0.8	62.7	6.76	3.40

- ・出力電圧は全て 60V。リアクトル L は 1.5mH、ただし、図 8 だけは 750 μ H。
- ・Ton はスイッチ素子 Q の ON 時間。
- ・ピーク電流は位相 90 度の時のリアクトル電流ピーク値を示す。
- ・境界モード時の周波数は位相 90 度の時の動作周波数を示す。
- ・電源周波数は全て 60Hz。

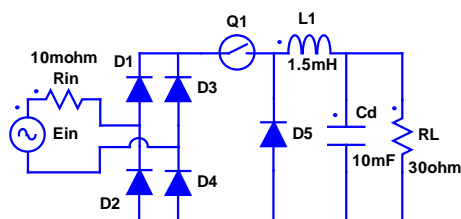
シミュレーション結果

計算結果に間違いがないか確認するために図2と同じ条件でリアクトル電流波形をシミュレーションで求めました。シミュレーション結果図14は図2(b)とほぼ同じ波形となっています。



2A/div、1.74msec/div

図14 リアクトル電流波形のシミュレーション結果（入力100V、出力60V2A、にて）



Q1の通流率は0.41 : $T_{on} = 190 \mu \text{ sec}$ 、 $T = 1 / 2.16 \text{ kHz}$

図15 シミュレーションに用いた回路

むすび

以上の検討から降圧型高力率コンバータについて次のことが分かります。

- ・ピーク電流は不連続モードより境界モードの方が低いが、境界モードでは軽負荷時に対応できない。よって、通常は境界モードで動作させ、軽負荷時は不連続モードに切り替えるのが適切。
- ・ただし、境界モードでもピーク電流は出力電流の4倍程度になるので大容量の装置には適さない。
- ・電源電圧の変動にはかなり強く、ワールドワイド電源にも対応可能。

以上