

Zeta コンバータの基本特性

(読んでほしい人：パワエレ初心者)

2013/5/31 舞鶴高専 平地克也

昇圧も降圧も可能なチョッパ回路としては図1の昇降圧チョッパがよく使われますが、他にもCuk(チューク)コンバータ、Sepic(セピック)コンバータ(図3)、Zeta(ゼータ)コンバータ(図2、図4)が知られています。このうちCukコンバータは汎用電源として商品化されたこともあり多数の論文や参考書があります。しかしSepicコンバータとZetaコンバータはあまり一般的ではなく、特にZetaコンバータは日本ではほとんど論文や参考書はないようです。しかしながら、Zetaコンバータには次のような特長があり、もっと関心を持たれてもいいように思います。

- ・昇降圧チョッパやCukコンバータとは異なり、出力電圧の極性反転がない。
- ・昇降圧チョッパより高効率期待できる。
- ・回路に直列にコンデンサがあるので負荷短絡に強い。
- ・降圧チョッパと同じく出力側にリアクトルがあるので出力電圧のリプルが少ない。
- ・出力側のリアクトルを利用し、出力電流を直接制御できる。

このような特長を考慮すれば、例えば入力電圧の変動範囲が広い場合のLED照明用電源などに適していると思います。他にもいろんな適切な用途があるでしょう。次頁以下に平地研究室で実験確認したZetaコンバータの基本特性を示します。数少ないZetaコンバータの資料として参考にして下さい。なお、この資料は2012年度平地研究室卒業生石塚大貴の卒業論文の一部に平地が少し加筆したものです。

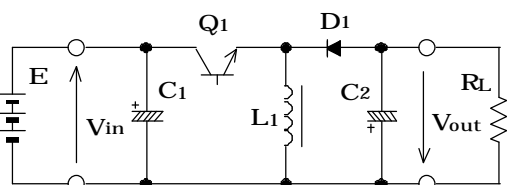


図1 昇降圧チョッパ

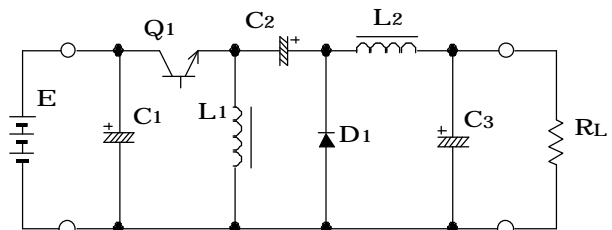


図2 ZETAコンバータ

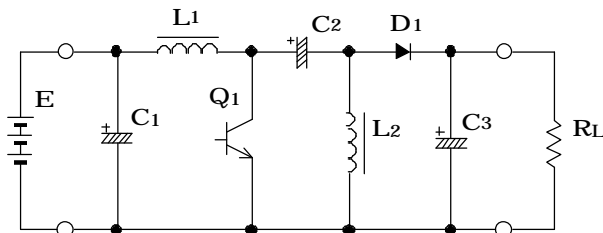


図3 SEPICコンバータ

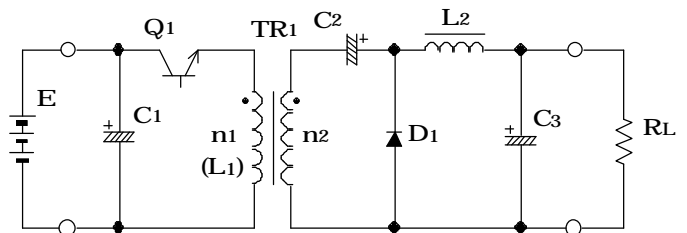


図4 絶縁型ZETAコンバータ

目次

- 第 1 章 はじめに
- 第 2 章 Zeta コンバータの概要
- 第 3 章 Zeta コンバータ基本回路の動作
 - 3.1 各点の波形
 - 3.2 通流率-出力電圧特性
 - 3.3 通流率 0.2 の時の特性
 - 3.4 通流率 0.5 の時の特性
 - 3.5 通流率 0.7 の時の特性
 - 3.6 まとめ
- 第 4 章 同一鉄心 Zeta コンバータの動作
 - 4.1 各点の波形
 - 4.2 通流率-出力電圧特性
 - 4.3 通流率 0.2 の時の特性
 - 4.4 通流率 0.5 の時の特性
 - 4.5 通流率 0.7 の時の特性
 - 4.6 まとめ
- 第 5 章 絶縁型 Zeta コンバータの動作
 - 5.1 各点の波形
 - 5.2 通流率-出力電圧特性
 - 5.3 通流率 0.2 の時の特性
 - 5.4 通流率 0.5 の時の特性
 - 5.5 通流率 0.7 の時の特性
 - 5.6 まとめ
- 第 6 章 おわりに
- 付録 A Zeta コンバータの部品表
- 付録 B 理論値の導出過程

第1章 はじめに

ZETA コンバータは昇圧も降圧も可能、出力電圧が入力電圧と同じ極性、出力電圧のリプルが少ない、などの特長があるが、日本ではあまり用いられておらず、参考書や文献は少ない。よって本研究では回路各部の波形や入出力特性などの実験データを取りそろえることを目的とする。

入力電圧は 12V、出力電圧は 0V ~ 60V、出力電流は 0A ~ 2A の範囲で実験した。通流率を可変できる制御回路と駆動回路を自作して実験に用いた。主回路の FET とダイオードは実験中の破損を防ぐためにかなり大きな電圧、電流容量のものを用いた。回路各部の電流波形測定のため配線はかなり長くなったが、動作周波数を 20kHz と低い値にしたので特に問題なく動作した。

第2章 Zeta コンバータの概要

Zeta コンバータは、昇降圧が可能なチョッパ回路である。通常の昇降圧チョッパと比べると、出力電圧と入力電圧の極性が同じ、出力側のリプル電流が小さい、回路にコンデンサが直列に接続してあるので故障時に安全といった特徴を持っている。回路図を図 2.1.1 に、電流経路を図 2.1.2 に示す。Zeta コンバータには FET が ON と OFF のモードが存在する。FET が ON の場合、ダイオードには電流が流れないため、図 2.1.2 (a) のような電流経路になる。FET が OFF の場合、L1 と L2 に蓄えられたエネルギーが放出され、図 2.1.2 (b) のような電流経路になる。そのため出力は通常の昇降圧チョッパとは異なり正電圧になる。なお、試作器に使用した部品は付録 A に示す。

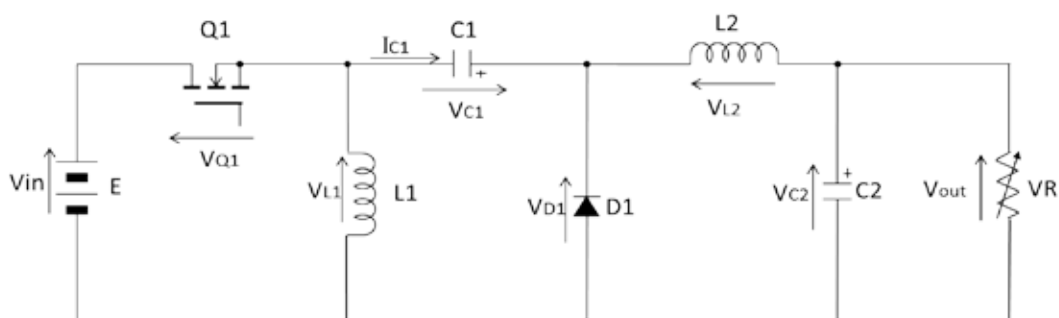


図 2.1.1 Zeta コンバータ

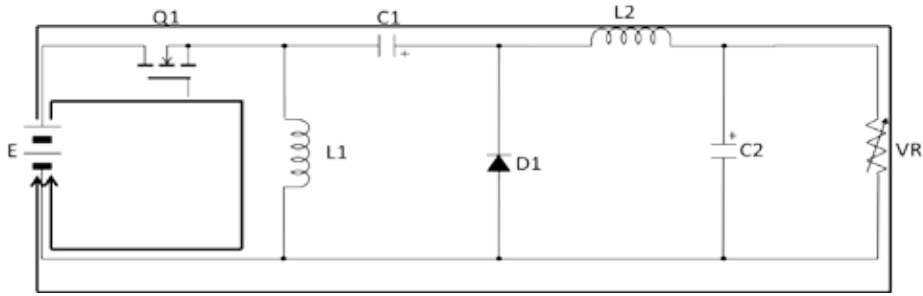


図 2.1.2(a) FET が ON 時の Zeta コンバータの電流経路

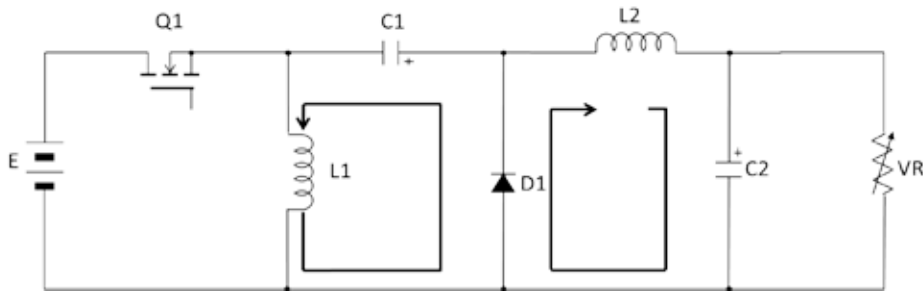


図 2.1.2(b) FET が OFF 時の Zeta コンバータの電流経路

また， V_{out} の理論値は式(2.1.1)に， I_{L2} の理論値は式(2.1.2)に， V_{C1} の理論値は式(2.1.3)によって求める事ができる．これらの式の導出過程は付録 B に示す．

$$V_{out} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \times V_{in} \quad (2.1.1)$$

$$I_{L1} = I_{in} \quad (2.1.2)$$

$$I_{L2} = \frac{1-\alpha}{\alpha} \times I_{in} = I_{out} \quad (2.1.3)$$

$$V_{C1} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \times V_{in} \quad (2.1.4)$$

さらに，式(2.1.4)は式(2.1.1)より式(2.1.5)に変形できる．

$$V_{C1} = \frac{\alpha}{1-\alpha} \times \frac{1-\alpha}{\alpha} \times V_{out} = V_{out} \quad (2.1.5)$$

第3章 Zeta コンバータ基本回路の動作

本章では Zeta コンバータの最も基本的な回路を用いて波形観測，入出力特性の実験を行った結果を述べる．

3.1 各点の波形

以下に各点の波形を示す．図 2.1.1 の回路図の回路を使用し，入力電圧は 12[V]，出力電流は 2[A]，通流率は 0.5 の時のものである．使用した部品は付録 A に示す．測定波形は電圧の場合は 10[V]/div，電流の場合は 2[A]/div である．

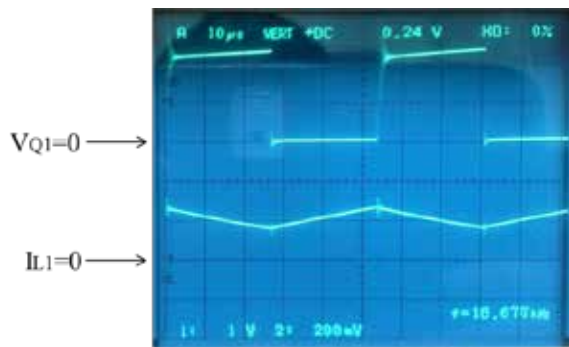


図 3.1.1 V_{Q1} と I_{L1} の波形

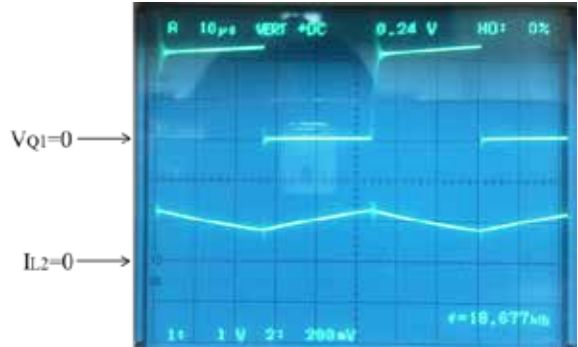


図 3.1.2 V_{Q1} と I_{L2} の波形

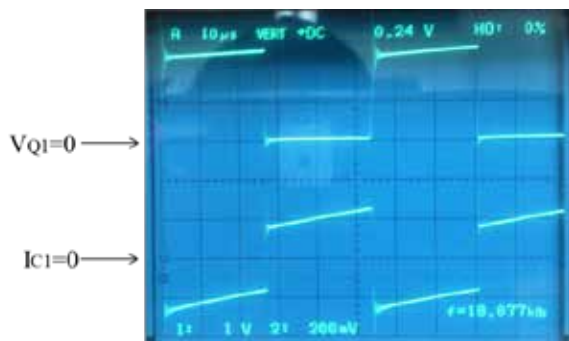


図 3.1.3 V_{Q1} と I_{C1} の波形

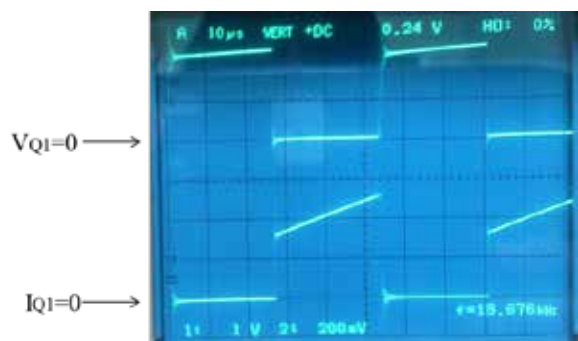


図 3.1.4 V_{Q1} と I_{Q1} の波形

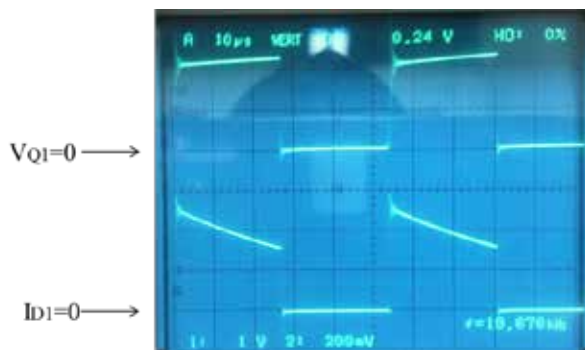


図 3.1.5 V_{Q1} と I_{D1} の波形

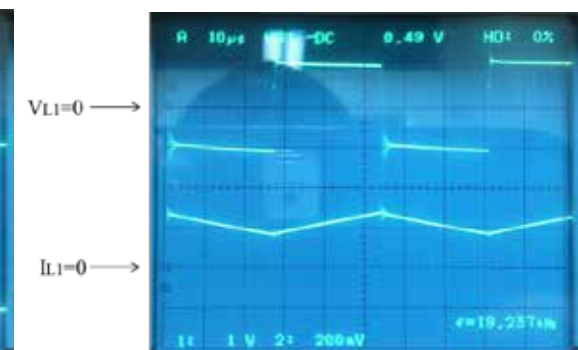


図 3.1.6 V_{L1} と I_{L1} の波形

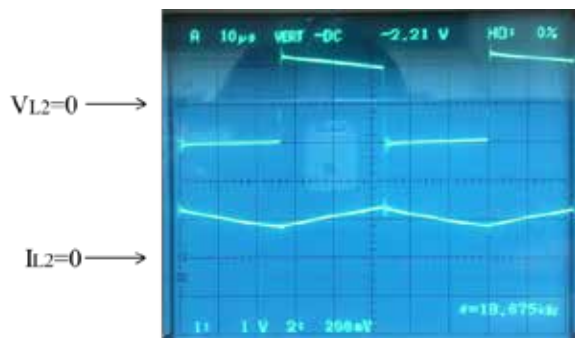


図 3.1.7 V_{L2} と I_{L2} の波形

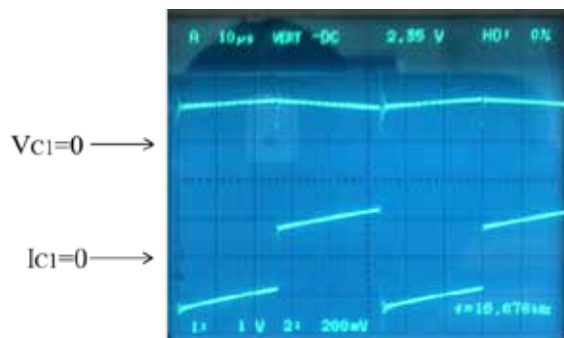


図 3.1.8 V_{C1} と I_{C1} の波形

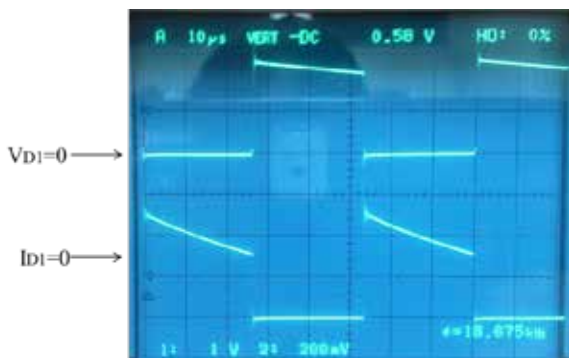


図 3.1.11 V_{D1} と I_{D1} の波形

電圧はすべて 10[V]/div
電流はすべて 2[A]/div

以下に V_{Q1} , I_{L1} , I_{L2} , I_{C1} , I_{Q1} , I_{D1} , V_{L1} , V_{D1} の各波形と理論波形との比較を示す。



図 3.1.12 V_{Q1} の実測波形と理論波形の比較

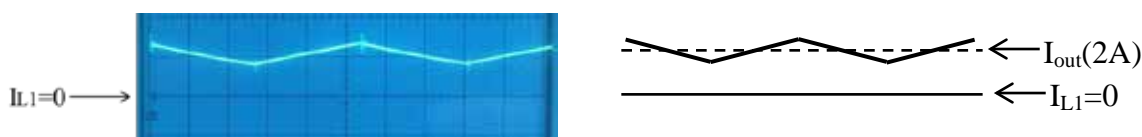


図 3.1.13 I_{L1} の実測波形と理論波形の比較

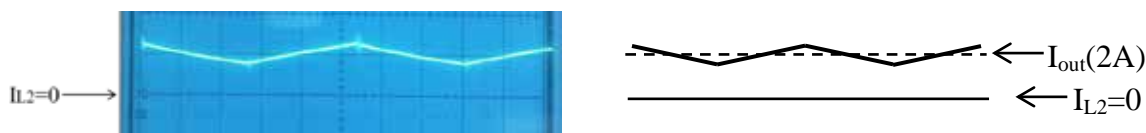


図 3.1.14 I_{L2} の実測波形と理論波形の比較

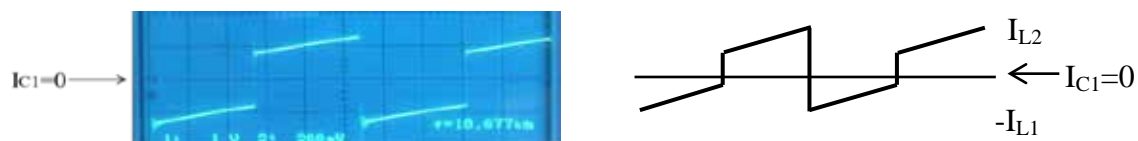


図 3.1.15 I_{C1} の実測波形と理論波形の比較



図 3.1.16 I_{Q1} の実測波形と理論波形の比較



図 3.1.17 I_{D1} の実測波形と理論波形の比較



図 3.1.17 V_{L1} の実測波形と理論波形の比較

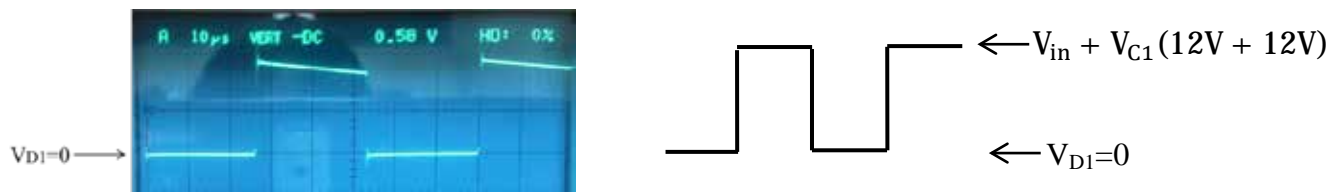


図 3.1.18 V_{D1} の実測波形と理論波形の比較

3.2 通流率-出力電圧特性

入力電圧を 12[V]，出力電流を 1[A]一定にし，通流率 α を変化させた時の出力電圧 V_{out} の変化について測定する．表 3.1 にその結果を示す．

表 3.1 通流率-出力電圧特性

通流率 α	V_{in} [V]	I_{in} [A]	V_{out} [V]	I_{out} [A]	理論 V_{out} [V]
0.1	12	0.099	0.023	0.725	1.333333
0.2	12	0.311	1.555	1.032	3
0.3	12	0.482	3.355	1.026	5.142857
0.4	12	0.45	6.15	1	8
0.5	12	1.127	10.06	1	12
0.6	12	1.743	16.06	1.001	18
0.7	12	2.704	24.67	1.009	28
0.8	12	4.581	39.55	1.002	48
0.9	12	8.31	59	0.992	108

以下の図 3.2.1 に通流率-出力電圧特性のグラフを示す。

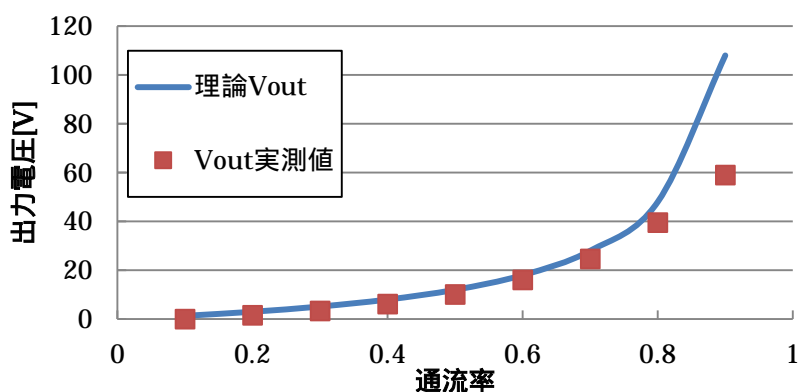


図 3.2.1 通流率-出力電圧特性

3.3 通流率 0.2 の時の特性

入力電圧 12[V]，通流率 0.2 を一定とし，出力電流を 0.1[A]ずつ増加させていった時の入力電流，出力電圧を測定した．その結果を表 3.2 に示す．

表 3.2 通流率 0.2 時の測定結果

$V_{in}[V]$	$I_{in}[A]$	$V_{out}[V]$	$I_{out}[A]$	$V_{C1}[V]$	$I_{L2}[A]$	理論 $V_{out}[V]$	効率[%]
12	0.07	2.5066	0.201	2.599	0.2	3	59.97936
12	0.098	2.499	0.303	2.561	0.3	3	64.3875
12	0.125	2.446	0.4	2.534	0.35	3	65.22667
12	0.152	2.4	0.497	2.51	0.5	3	65.39474
12	0.183	2.349	0.611	2.501	0.55	3	65.35697
12	0.207	2.312	0.697	2.489	0.65	3	64.87375
12	0.239	2.263	0.81	2.459	0.8	3	63.91318
12	0.264	2.228	0.903	2.433	0.9	3	63.50644
12	0.292	2.186	1.005	2.43	1	3	62.69777
12	0.321	2.15	1.105	2.423	1.05	3	61.67575
12	0.345	2.121	1.198	2.422	1.15	3	61.3758
12	0.376	2.07	1.307	2.4	1.25	3	#REF!
12	0.407	2.027	1.42	2.388	1.35	3	58.93407
12	0.431	1.995	1.511	2.378	1.45	3	58.28393
12	0.453	1.974	1.574	2.374	1.6	3	57.1574
12	0.487	1.915	1.711	2.338	1.7	3	56.06716
12	0.518	1.871	1.816	2.316	1.8	3	54.66113

12	0.537	1.841	1.91	2.29	1.9	3	54.56719
12	0.558	1.828	1.966	2.298	2	3	53.67157

図 3.3.1 に出力電流-出力電圧特性のグラフを，図 3.3.2 に出力電流-効率特性のグラフを示す．

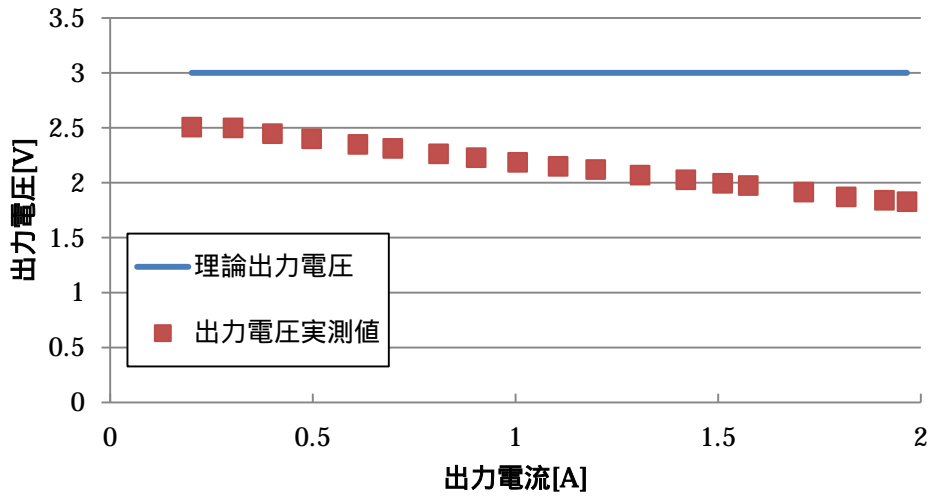


図 3.3.1 出力電流-出力電圧特性

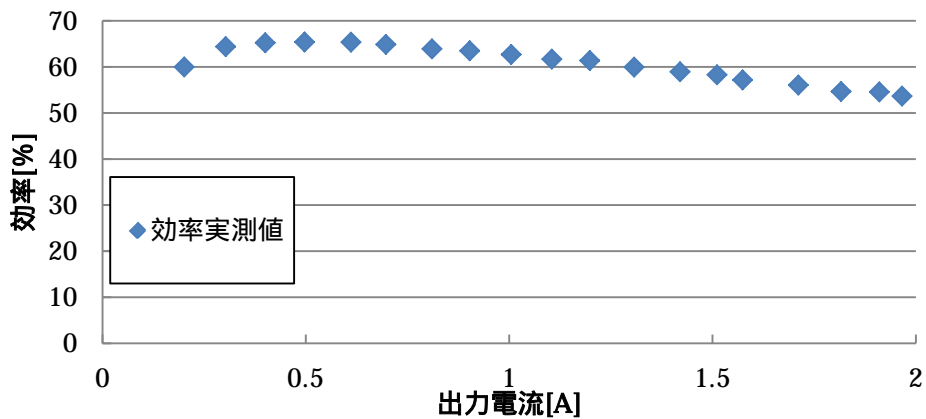


図 3.3.2 出力電流-効率特性

図 3.3.3 に出力電流-C1 電圧特性のグラフを，図 3.3.4 に出力電流-L2 電流特性のグラフを示す．

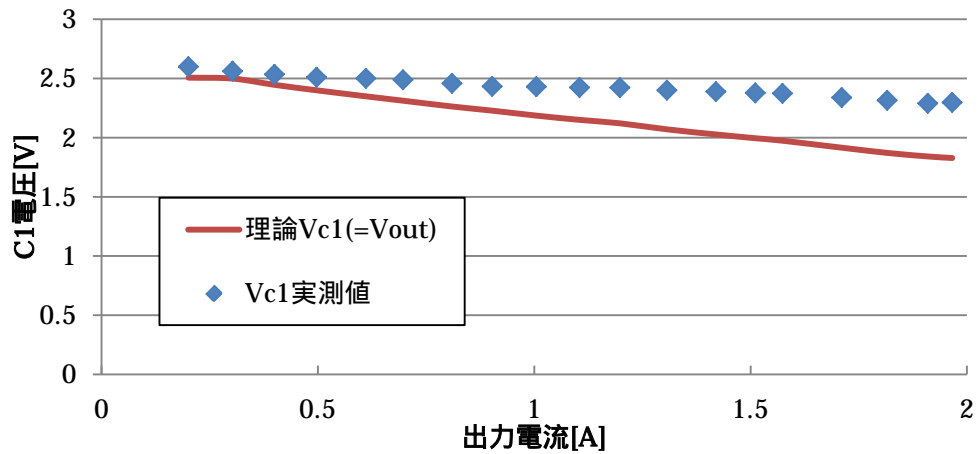


図 3.3.3 出力電流-C1 電圧特性

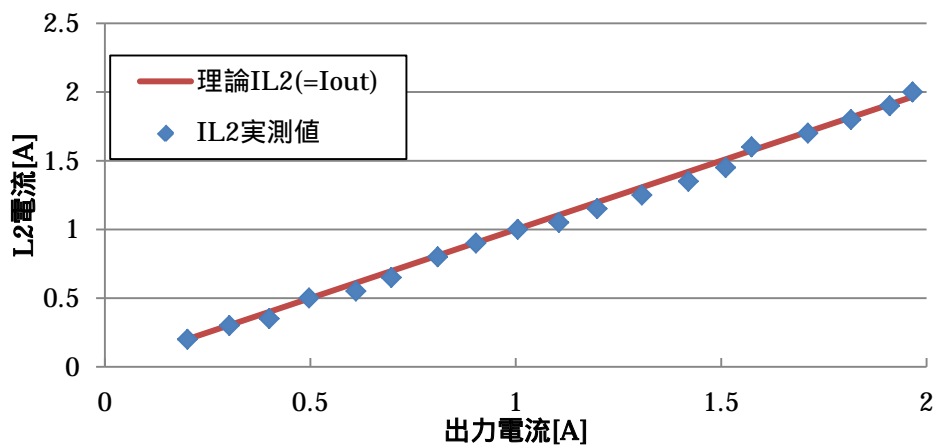


図 3.3.4 出力電流-L2 電流特性

3.4 通流率 0.5 の時の特性

入力電圧 12[V]，通流率 0.5 を一定とし，出力電流を 0.1[A]ずつ増加させていった時の入力電流，出力電圧を測定した．その結果を表 3.3 に示す．

表 3.3 通流率 0.5 時の測定結果

V_{in} [V]	I_{in} [A]	V_{out} [V]	I_{out} [A]	V_{C1} [V]	I_{L2} [A]	理論 V_{out} [V]	効率[%]
12	0.258	11.09	0.2	11.68	0.2	12	71.64083
12	0.36	10.87	0.3	11.69	0.25	12	75.48611
12	0.463	10.66	0.4	11.62	0.4	12	76.74586
12	0.566	10.47	0.5	11.5	0.5	12	77.07597
12	0.668	10.26	0.6	11.48	0.6	12	76.79641
12	0.771	10.07	0.701	11.38	0.7	12	76.29777
12	0.874	9.9	0.8	11.35	0.8	12	75.51487

12	0.974	9.71	0.898	11.35	0.9	12	74.60284
12	1.075	9.53	0.996	11.28	1	12	73.58047
12	1.191	9.29	1.11	11.3	1	12	72.15155
12	1.291	9.14	1.205	11.28	1.2	12	71.09282
12	1.398	8.99	1.309	11.26	1.25	12	70.14729
12	1.494	8.83	1.402	11.24	1.4	12	69.0521
12	1.588	8.67	1.495	11.21	1.45	12	68.01873
12	1.703	8.52	1.607	11.12	1.6	12	66.99765
12	1.799	8.4	1.694	11.05	1.7	12	65.9144
12	1.9	8.22	1.803	10.94	1.8	12	65.00289
12	2.005	8.11	1.899	10.87	1.9	12	64.01035
12	2.107	8.1	1.994	10.84	2	12	63.87992

図 3.4.1 に出力電流-出力電圧特性のグラフを，図 3.4.2 に出力電流-効率特性のグラフを示す．

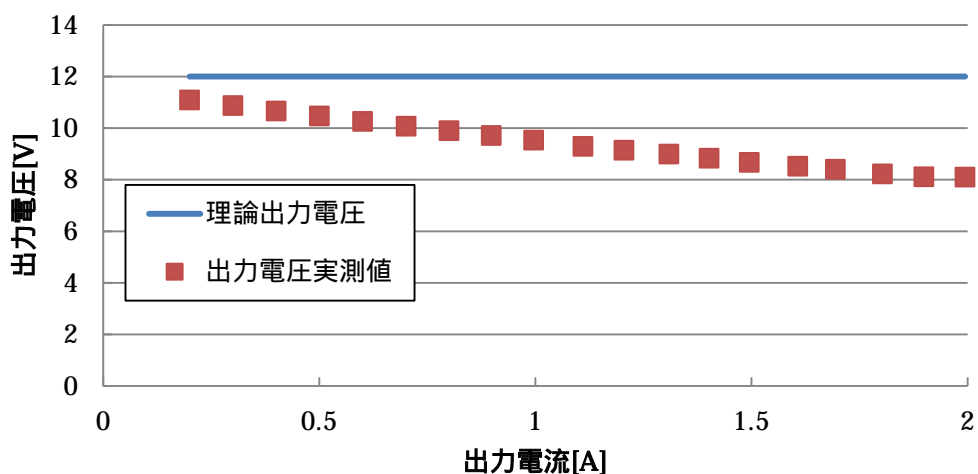


図 3.4.1 出力電流-出力電圧特性

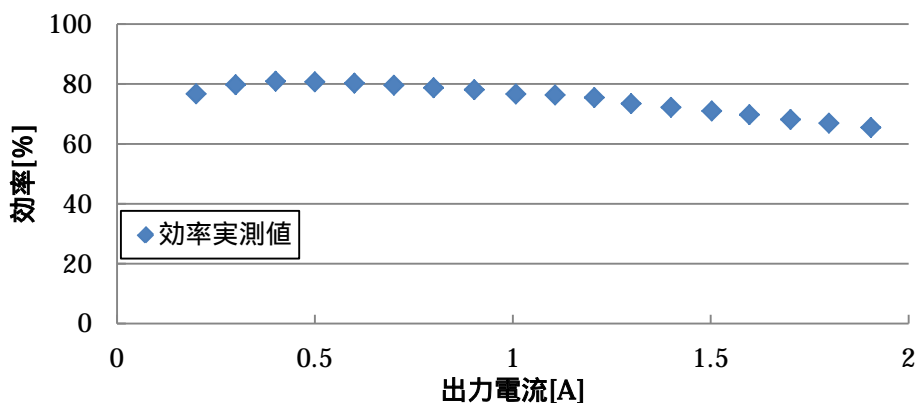


図 3.4.2 出力電流-効率特性

図 3.4.3 に出力電流-C1 電圧特性のグラフを，図 3.4.4 に出力電流-L2 電流特性のグラフを示す．

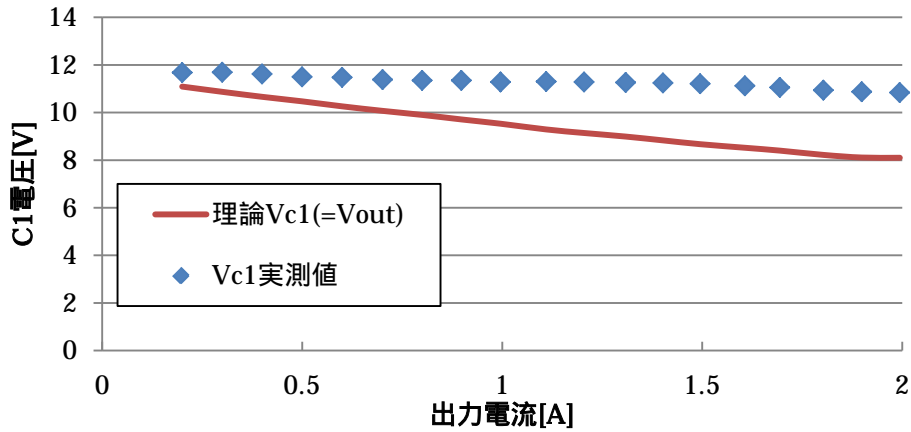


図 3.4.3 出力電流-C1 電圧特性

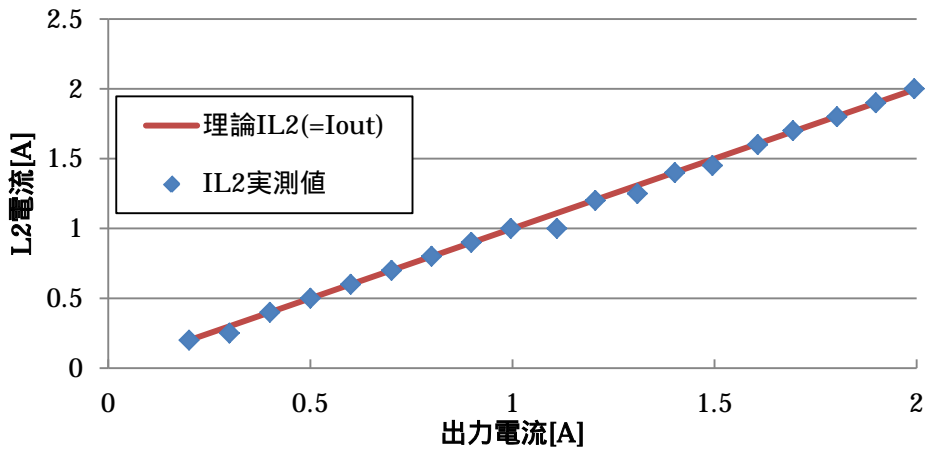


図 3.4.4 出力電流-L2 電流特性

3.5 通流率 0.7 の時の特性

入力電圧 12[V]，通流率 0.7 を一定とし，出力電流を 0.1[A]ずつ増加させていった時の入力電流，出力電圧を測定した．その結果を表 3.4 に示す．

表 3.4 通流率 0.7 時の測定結果

V _{in} [V]	I _{in} [A]	V _{out} [V]	I _{out} [A]	V _{C1} [V]	I _{L2} [A]	理論 V _{out} [V]	効率[%]
12	0.598	27.51	0.2	28.63	0.2	28	76.67224
12	0.847	27.01	0.3	28.09	0.25	28	79.72255
12	1.095	26.51	0.401	27.53	0.4	28	80.9019
12	1.343	26.01	0.5	27.09	0.5	28	80.6962
12	1.59	25.53	0.6	26.69	0.55	28	80.28302
12	1.838	25.07	0.7	26.83	0.65	28	79.56565

12	2.086	24.63	0.8	26.12	0.75	28	78.71524
12	2.341	24.28	0.903	25.85	0.85	28	78.04656
12	2.6	23.72	1.008	25.4	0.9	28	76.63385
12	2.843	23.52	1.107	25.04	1.05	28	76.31797
12	3.086	23.17	1.206	24.63	1.2	28	75.45642
12	3.321	22.52	1.299	24.33	1.25	28	73.4053
12	3.571	22.1	1.4	24	1.35	28	72.202
12	3.822	21.65	1.503	23.58	1.5	28	70.94878
12	4.054	21.23	1.598	23.21	1.6	28	69.73676
12	4.319	20.74	1.702	22.75	1.7	28	68.1089
12	4.55	20.31	1.799	22.3	1.8	28	66.91885
12	4.806	19.82	1.905	21.86	1.9	28	65.46868
12	5.085	19.25	2.014	21.39	2	28	63.53573

図 3.5.1 に出力電流-出力電圧特性のグラフを，図 3.5.2 に出力電流-効率特性のグラフを示す．

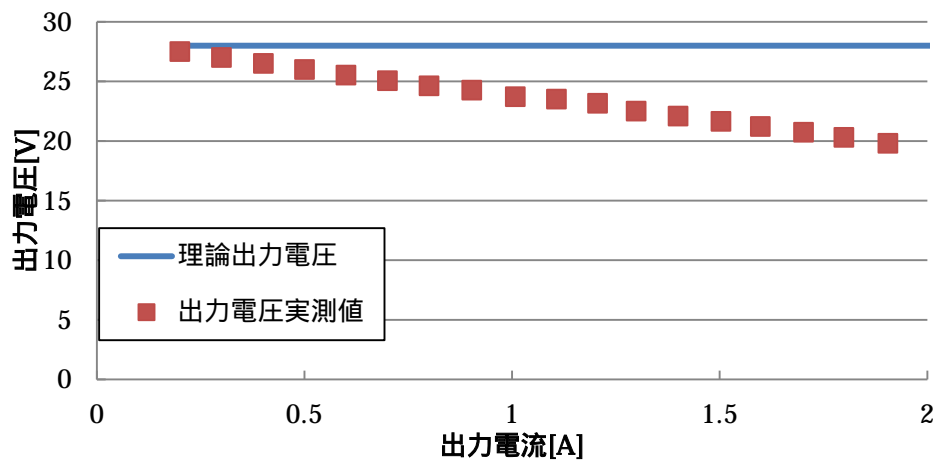


図 3.5.1 出力電流-出力電圧特性

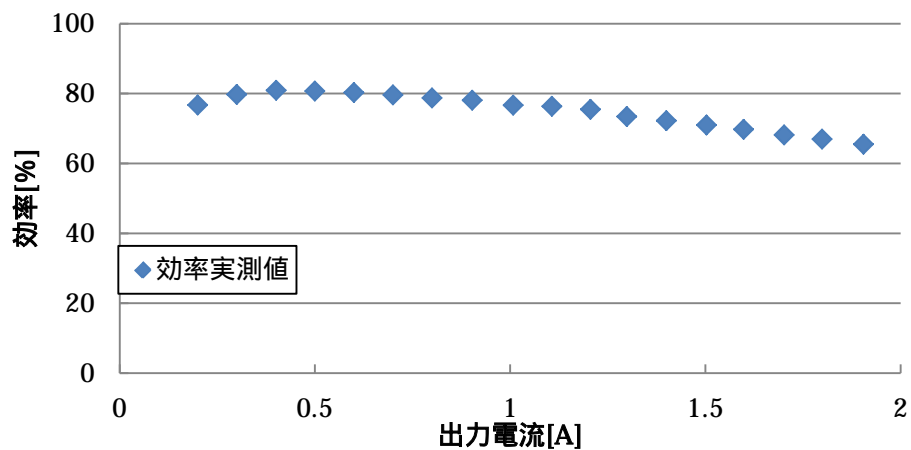


図 3.5.2 出力電流-効率特性

図 3.5.3 に出力電流-C1 電圧特性のグラフを，図 3.5.4 に出力電流-L2 電流特性のグラフを示す。

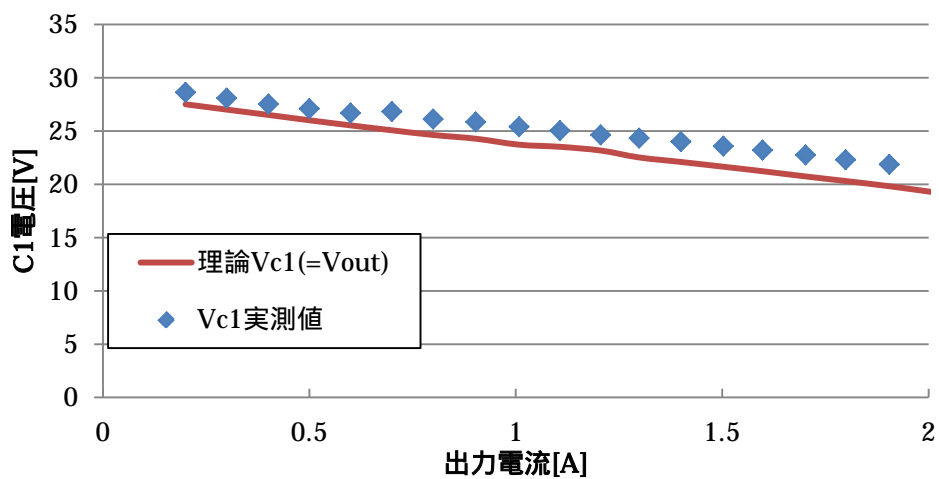


図 3.5.3 出力電流-C1 電圧特性

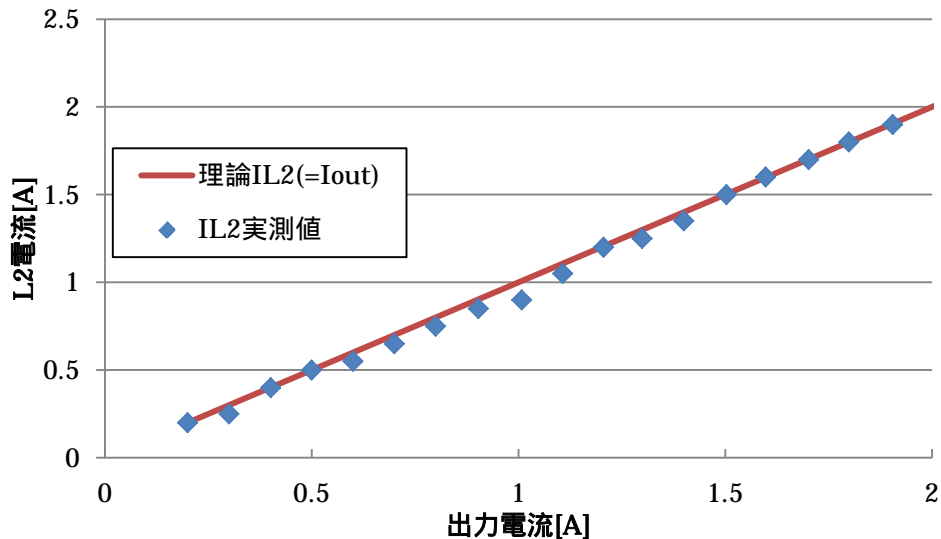


図 3.5.4 出力電流-L2 電流特性

3.6 まとめ

回路各部の波形は理論通りとなった．出力電圧と C1 電圧の特性は出力電流が大きき時は理論値より小さくなるが、これは FET やダイオードの電圧降下のためである．通流率 0.2 の時は出力電圧が低いので効率が極端に悪くなっている．

FET が ON の時は $V_{L1} = V_{L2} = V_{in}$ となる．FET が OFF の時は $V_{L1} = V_{L2} = V_{out}$ となる．よって、L1 と L2 の印加電圧は常に等しいので 2 つのコイルは同一鉄心に密結合状態で巻くことができ、部品点数の抑制とコストダウンを実現できる．次章で同一鉄心における Zeta コンバータの測定結果を示す．

第 4 章 同一鉄心 Zeta コンバータの動作

第 4 章では、二つのコイルを同一鉄心に巻いた Zeta コンバータの波形観測，入出力特性の実験を行った結果を述べる。

4.1 各点の波形

まず、図 4.1.1 に同一鉄心 Zeta コンバータの回路図を、図 4.1.2 に電流経路を示す。なお、図 4.1.2(a)は FET が ON の時の電流経路、図 4.1.2(b)は FET が OFF の時の電流経路である。製作した回路および部品表は付録 A に示す。

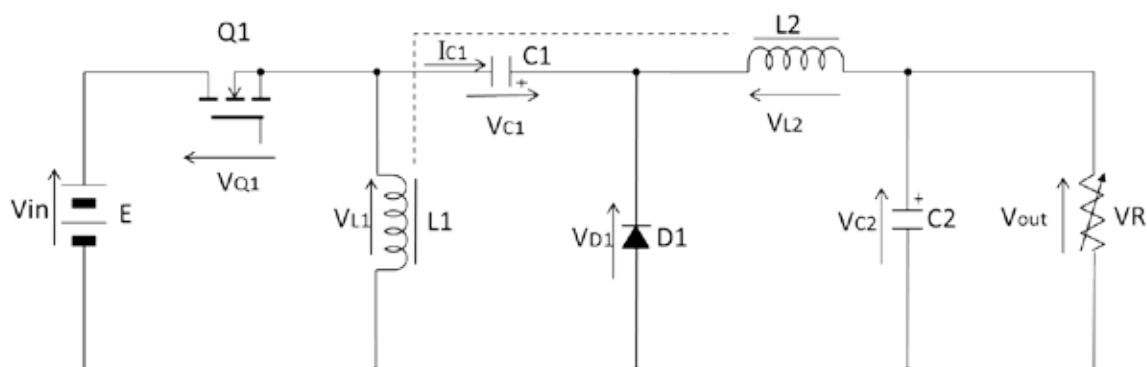


図 4.1.1 同一鉄心 Zeta コンバータ

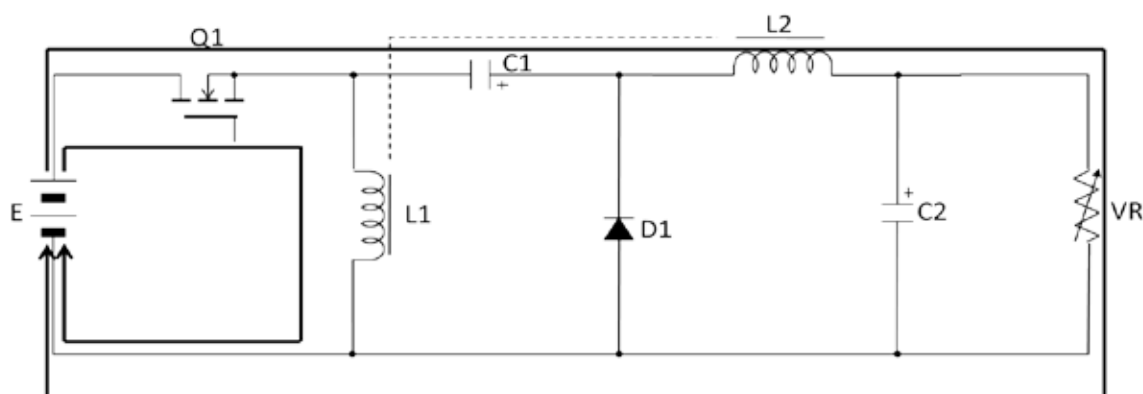


図 4.1.2(a) FET が ON 時の同一鉄心 Zeta コンバータの電流経路

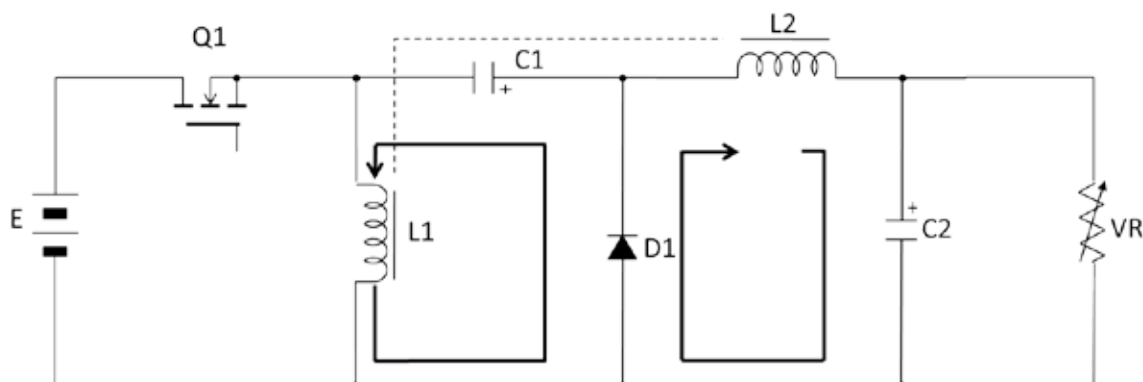


図 4.1.2(b) FET が OFF 時の同一鉄心 Zeta コンバータの電流経路

以下に、各点の波形を示す．入力電圧は 12[V]，出力電流は 2[A]，通流率は 0.5 の時のものである．また、測定波形は電圧の場合は 10[V]/div、電流の場合は 2[A]/div である．

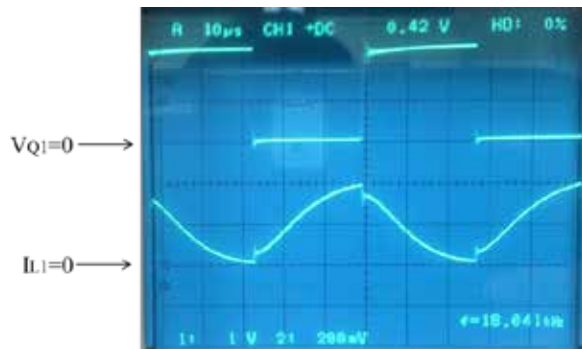


図 4.1.3 V_{Q1} と I_{L1} の波形

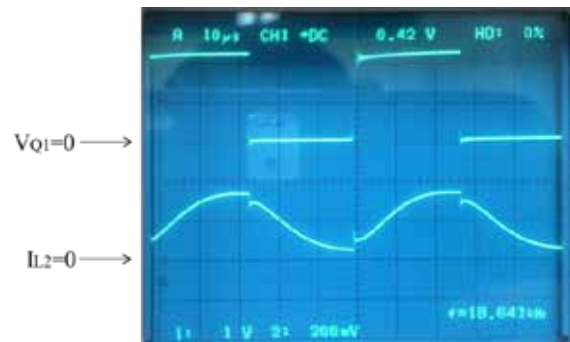


図 4.1.4 V_{Q1} と I_{L2} の波形

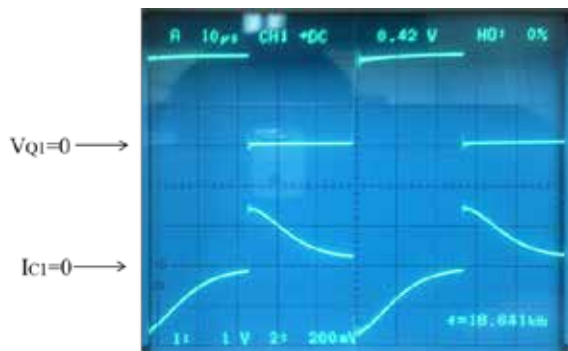


図 4.1.5 V_{Q1} と I_{C1} の波形

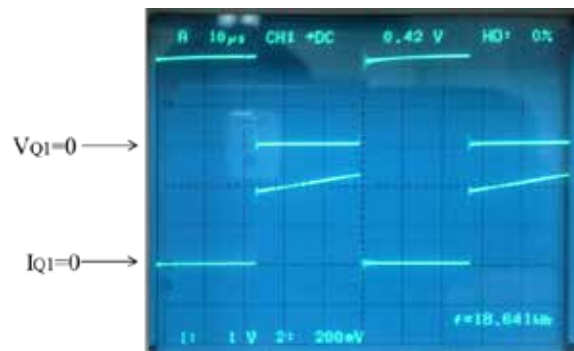


図 4.1.6 V_{Q1} と I_{Q1} の波形

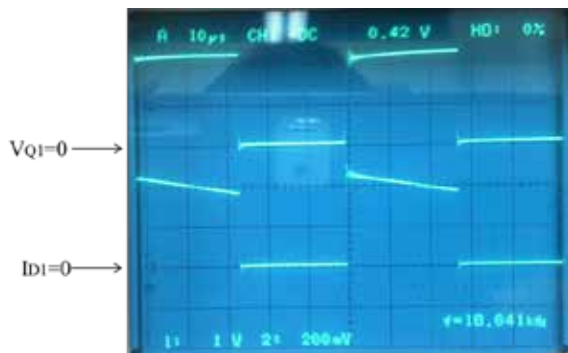


図 4.1.7 V_{Q1} と I_{D1} の波形

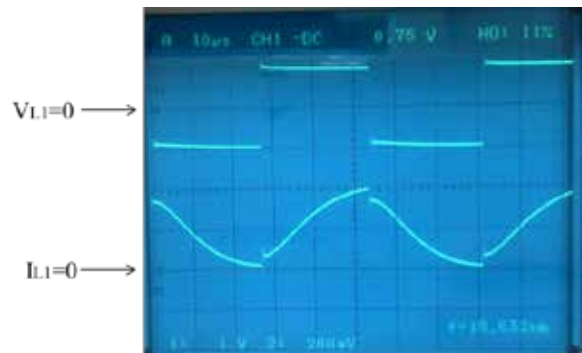


図 4.1.8 V_{L1} と I_{L1} の波形

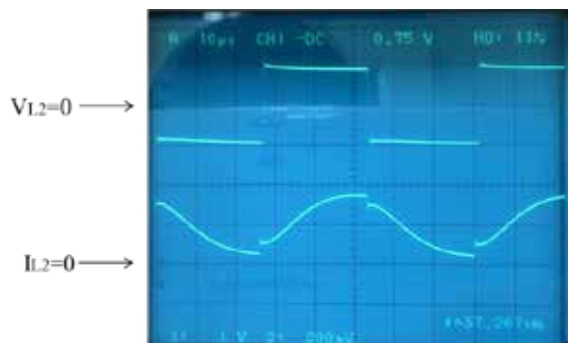


図 4.1.9 V_{L2} と I_{L2} の波形

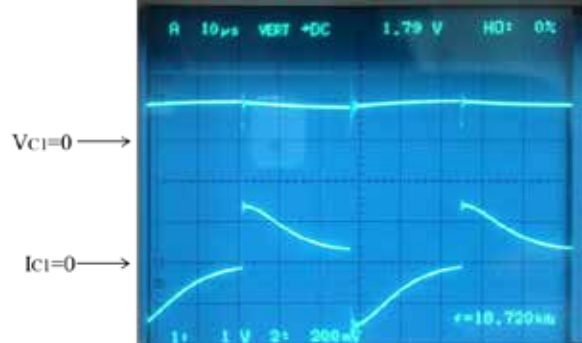


図 4.1.10 V_{C1} と I_{C1} の波形

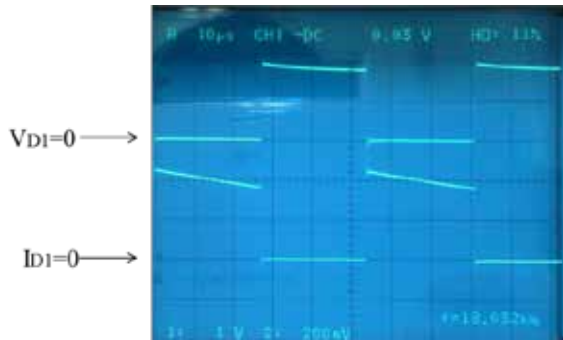


図 4.1.11 V_{D1} と I_{D1} の波形

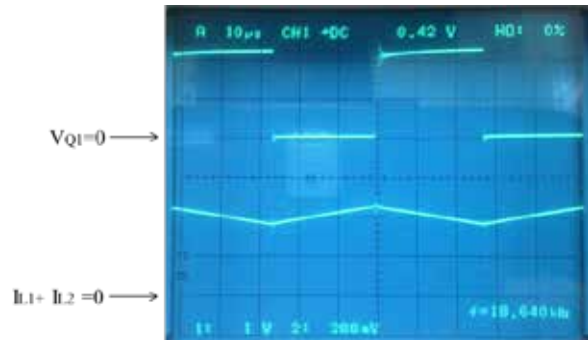


図 4.1.12 V_{Q1} と $I_{L1} + I_{L2}$ の波形

4.2 通流率-出力電圧特性

入力電圧を 12[V] , 出力電流を 1[A]一定にし , 通流率 α を変化させた時の出力電圧 V_{out} の変化について測定する . 表 4.1 にその結果の表を示す .

表 4.1 通流率-出力電圧特性

通流率 α	V_{in} [V]	I_{in} [A]	V_{out} [V]	I_{out} [A]	理論 V_{out} [V]
0.1	12	0.06	0.017	0.547	1.333333
0.2	12	0.039	3.146	0.966	3
0.3	12	0.427	3.024	1.035	5.142857
0.4	12	0.625	5.267	0.999	8
0.5	12	0.963	8.88	1.001	12
0.6	12	1.454	13.85	1.004	18
0.7	12	2.232	21.7	1.001	28
0.8	12	3.6	33.94	1.002	48
0.9	12	9.52	64.7	0.988	108

また、以下に図 4.2.1 に通流率-出力電圧特性のグラフを示す .

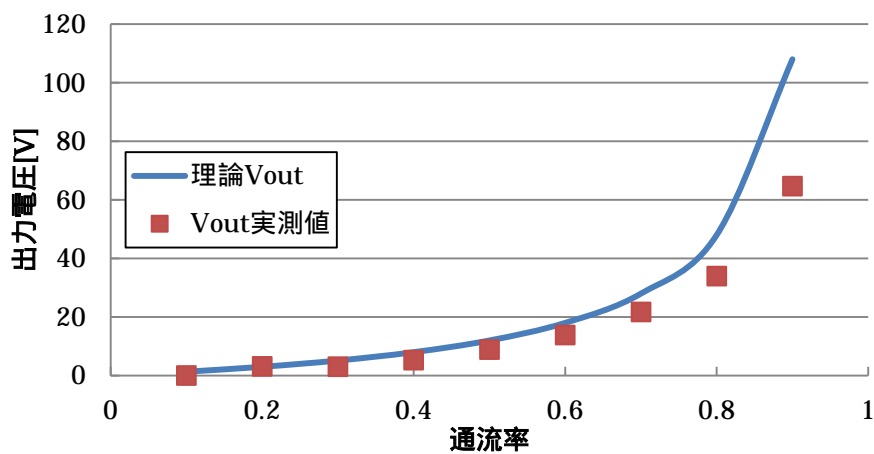


図 4.2.1 通流率-出力電圧特性

4.3 通流率 0.2 の時の特性

入力電圧 12[V]，通流率 0.2 を一定とし，出力電流を 0.1[A]ずつ増加させていった時の入力電流，出力電圧を測定した．その結果を表 4.2 に示す．

表 4.2 通流率 0.2 時の測定結果

$V_{in}[V]$	$I_{in}[A]$	$V_{out}[V]$	$I_{out}[A]$	$V_{C1}[V]$	$I_{L2}[A]$	理論 $V_{out}[V]$	効率[%]
12	0.058	2.185	0.202	2.313	0.15	3	63.41523
12	0.084	2.076	0.303	2.263	0.3	3	62.40357
12	0.109	1.988	0.402	2.234	0.3	3	61.09908
12	0.136	1.888	0.509	2.2	0.475	3	58.88431
12	0.158	1.764	0.598	2.169	0.55	3	55.63671
12	0.183	1.704	0.693	2.142	0.65	3	53.77377
12	0.212	1.598	0.808	2.111	0.75	3	50.75409
12	0.233	1.52	0.889	2.092	0.8	3	48.32904
12	0.2569	1.464	0.997	2.063	0.95	3	47.34683
12	0.285	1.384	1.097	2.038	1.05	3	44.39322
12	0.314	1.286	1.214	2.009	1.1	3	41.43323
12	0.327	1.232	1.266	2.001	1.2	3	39.74801
12	0.361	1.119	1.4	1.965	1.25	3	36.16343
12	0.377	1.06	1.46	1.953	1.35	3	34.20866
12	0.422	0.905	1.65	1.911	1.6	3	29.48756
12	0.44	0.813	1.717	1.897	1.6	3	26.4379
12	0.476	0.692	1.852	1.87	1.75	3	22.43669
12	0.487	0.658	1.896	1.854	1.85	3	21.34784
12	0.522	0.537	2.026	1.824	1.95	3	17.36849

図 4.3.1 に出力電流-出力電圧特性のグラフを，図 4.3.2 に出力電流-効率特性のグラフを示す．

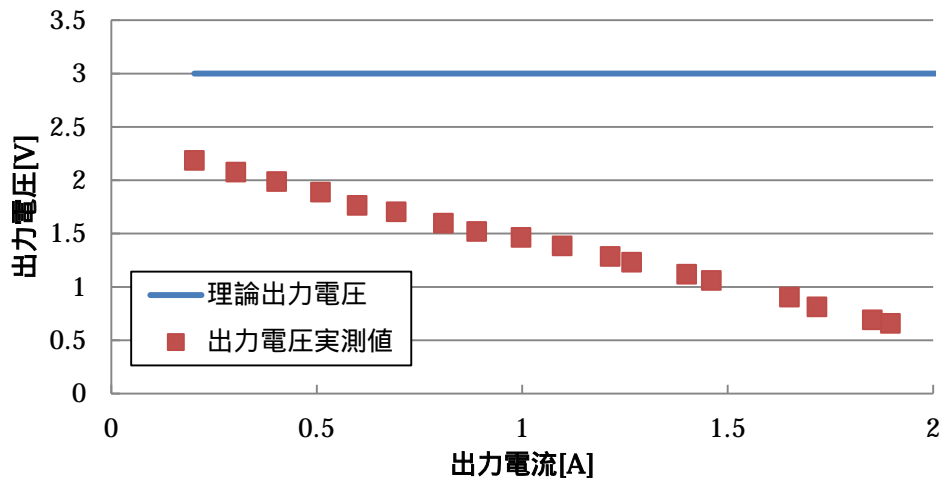


図 4.3.1 出力電流-出力電圧特性

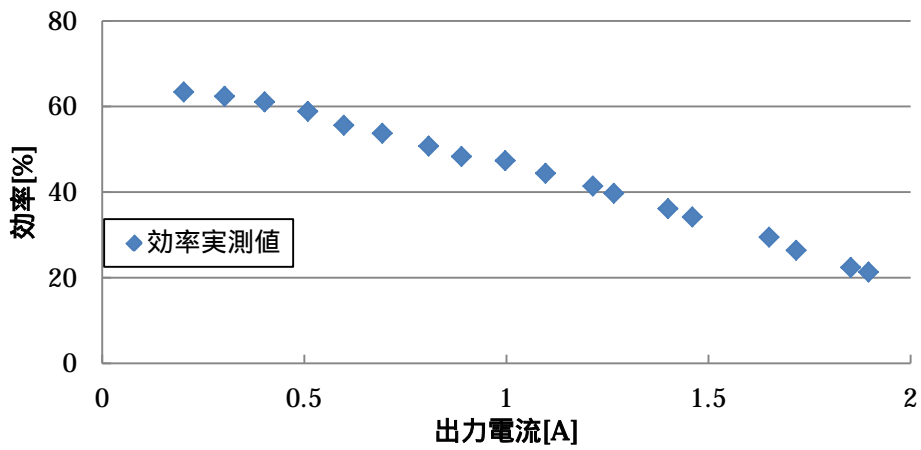


図 4.3.2 出力電流-効率特性

図 4.3.3 に出力電流-C1 電圧特性のグラフを，図 4.3.4 に出力電流-L2 電流特性のグラフを示す．

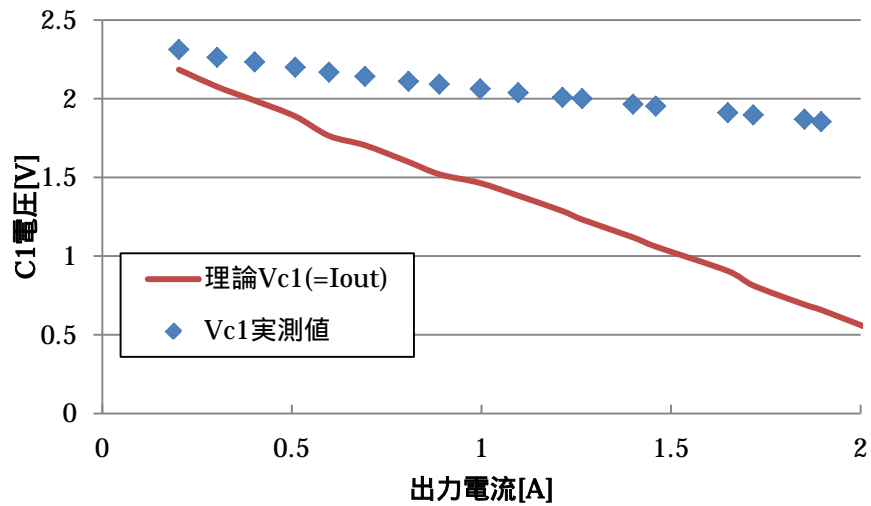


図 4.3.3 出力電流-C1 電圧特性

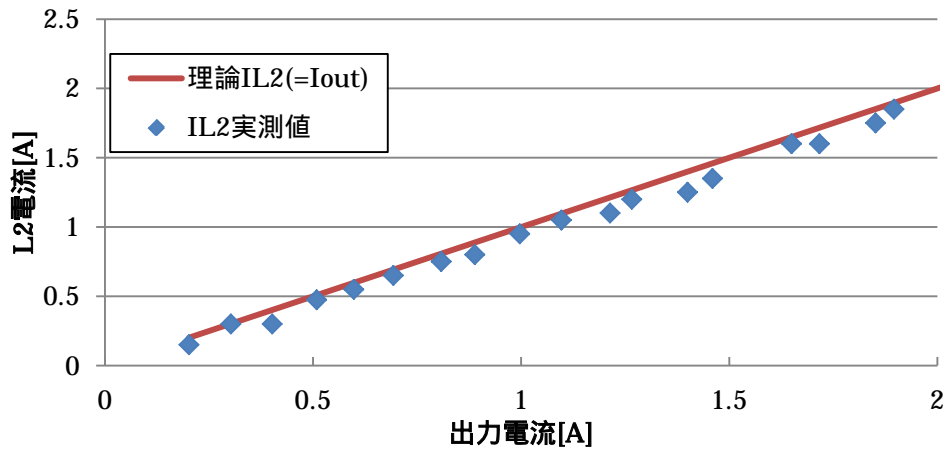


図 4.3.4 出力電流-L2 電流特性

4.4 通流率 0.5 の時の特性

入力電圧 12[V]，通流率 0.5 を一定とし，出力電流を 0.1[A]ずつ増加させていった時の入力電流，出力電圧を測定した．その結果を表 4.3 に示す．

表 4.3 通流率 0.5 時の測定結果

V_{in} [V]	I_{in} [A]	V_{out} [V]	I_{out} [A]	V_{C1} [V]	I_{L2} [A]	理論 V_{out} [V]	効率[%]
12	0.251	12.83	0.2	12.94	0.2	12	85.19256
12	0.309	10.39	0.3	10.57	0.3	12	84.06149
12	0.406	10.18	0.4	10.42	0.4	12	83.57964
12	0.502	9.99	0.5	10.3	0.45	12	82.91833

12	0.602	9.85	0.603	10.21	0.5	12	82.21968
12	0.697	9.7	0.701	10.1	0.6	12	81.29723
12	0.795	9.54	0.802	9.99	0.75	12	80.2
12	0.889	9.39	0.9	9.89	0.9	12	79.21822
12	0.988	9.24	1.003	9.79	0.95	12	78.16903
12	1.084	9.08	1.102	9.69	1	12	76.92312
12	1.186	8.93	1.207	9.6	1.1	12	75.73433
12	1.276	8.78	1.301	9.57	1.2	12	74.60018
12	1.374	8.6	1.407	9.41	1.35	12	73.38792
12	1.47	8.46	1.503	9.32	1.5	12	72.08265
12	1.57	8.28	1.607	9.22	1.6	12	70.62611
12	1.663	8.32	1.703	9.19	1.65	12	71.001
12	1.764	8.17	1.806	9.1	1.75	12	69.70437
12	1.844	8.06	1.89	9.03	1.8	12	68.84219
12	1.949	7.94	1.997	8.93	1.9	12	67.79622

図 4.4.1 に出力電流-出力電圧特性のグラフを，図 4.4.2 に出力電流-効率特性のグラフを示す．

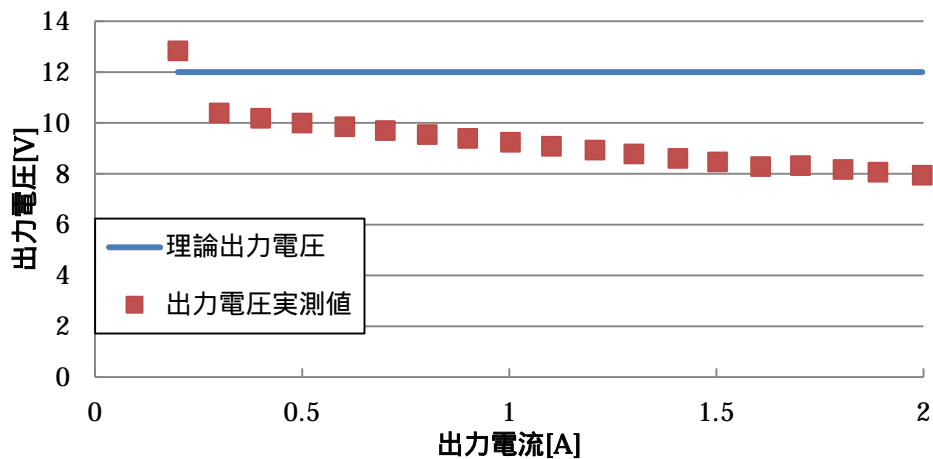


図 4.4.1 出力電流-出力電圧特性

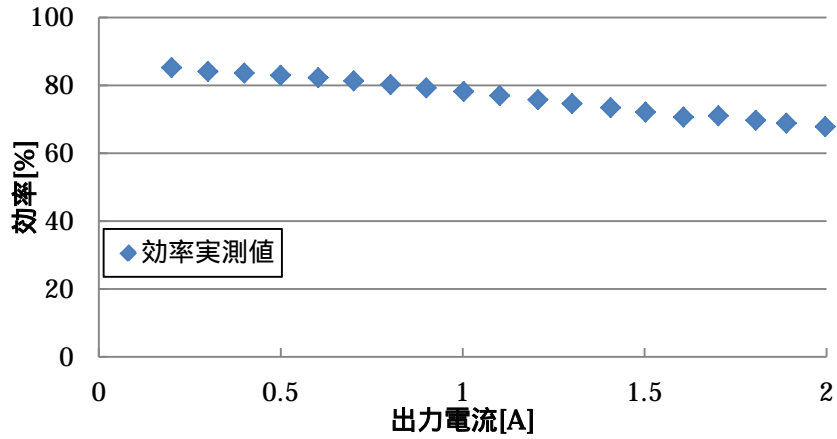


図 4.4.2 出力電流-効率特性

図 4.4.3 に出力電流-C1 電圧特性のグラフを，図 4.4.4 に出力電流-L2 電流特性のグラフを示す．

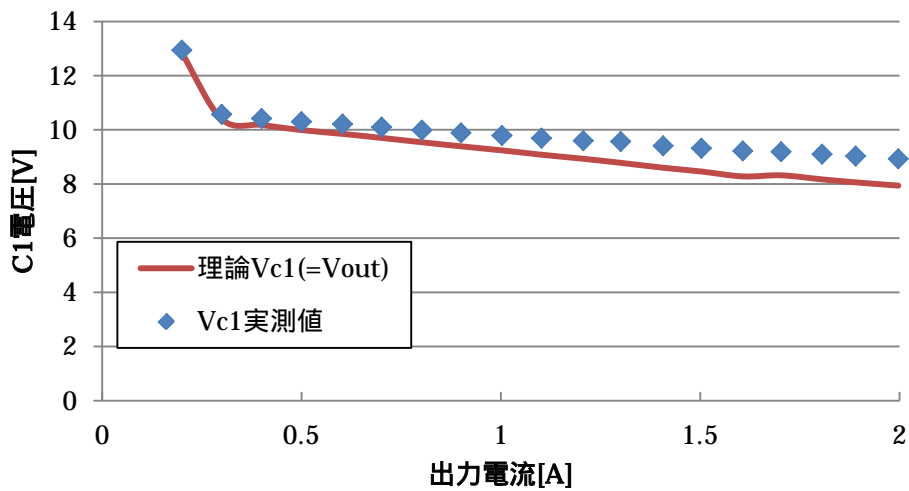


図 4.4.3 出力電流-C1 電圧特性

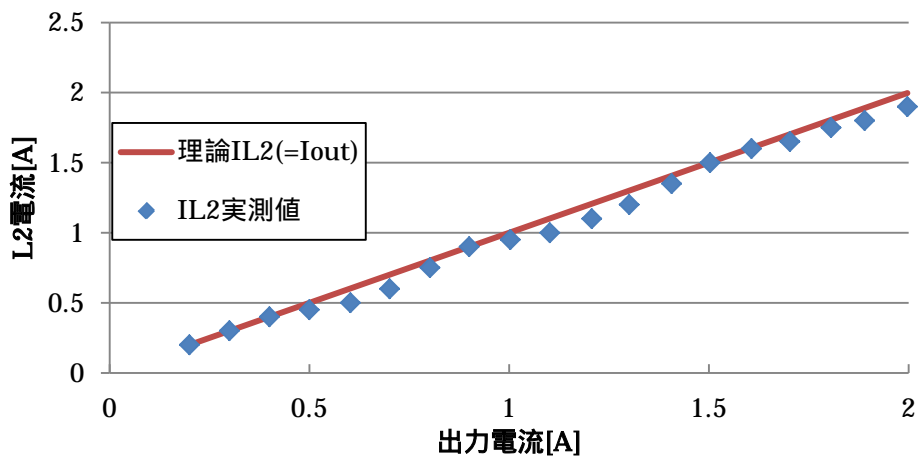


図 4.4.4 出力電流-L2 電流特性

4.5 通流率 0.7 の時の特性

入力電圧 12[V]，通流率 0.7 を一定とし，出力電流を 0.1[A]ずつ増加させていった時の入力電流，出力電圧を測定した．その結果を表 4.4 に示す．

表 4.4 通流率 0.7 時の測定結果

V_{in} [V]	I_{in} [A]	V_{out} [V]	I_{out} [A]	V_{C1} [V]	I_{L2} [A]	理論 V_{out} [V]	効率[%]
12	0.503	26.36	0.2	26.45	0.2	28	87.34261
12	0.738	25.9	0.301	26.04	0.3	28	88.02958
12	0.974	25.45	0.401	25.63	0.45	28	87.31562
12	1.204	25.06	0.5	25.28	0.5	28	86.72481
12	1.437	24.65	0.6	24	0.45	28	85.76896
12	1.673	24.28	0.703	24.6	0.75	28	85.02112
12	1.902	23.87	0.8	24.25	0.8	28	83.66632
12	2.144	23.65	0.903	23.89	0.95	28	83.00665
12	2.374	23.05	1.004	23.48	1.05	28	81.23491
12	2.602	22.57	1.103	23.07	1.1	28	79.72941
12	2.832	22.21	1.199	22.72	1.2	28	78.35979
12	3.076	21.98	1.318	22.7	1.3	28	78.48299
12	3.298	21.81	1.4	22.47	1.35	28	77.15282
12	3.543	21.4	1.506	22.05	1.45	28	75.80299
12	3.774	21.03	1.604	21.71	1.55	28	74.48357
12	4	20.65	1.702	21.38	1.65	28	73.22146
12	4.249	20.26	1.81	20.99	1.8	28	71.92006
12	4.484	19.85	1.91	20.61	18.5	28	70.46071
12	4.686	19.35	2.004	20.25	19.5	28	68.95967

図 4.5.1 に出力電流-出力電圧特性のグラフを，図 4.5.2 に出力電流-効率特性のグラフを示す．

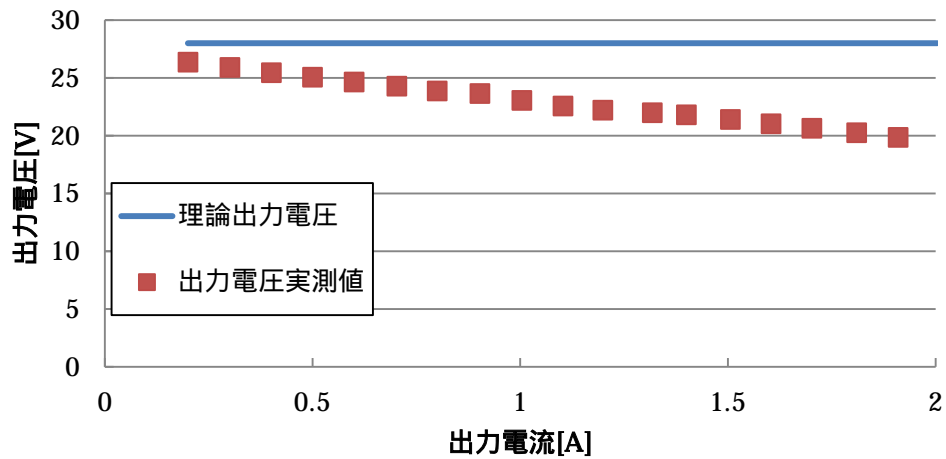


図 4.5.1 出力電流-出力電圧特性

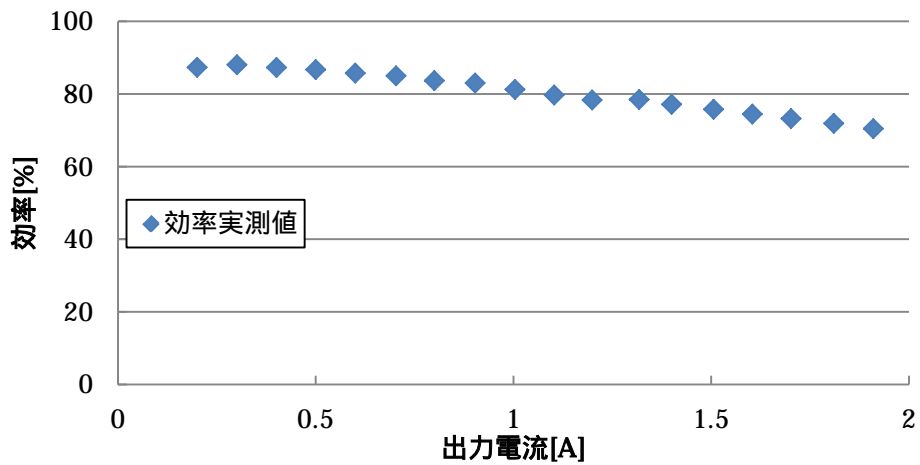


図 4.5.2 出力電流-効率特性

図 4.5.3 に出力電流-C1 電圧特性のグラフを，図 4.5.4 に出力電流-L2 電流特性のグラフを示す。

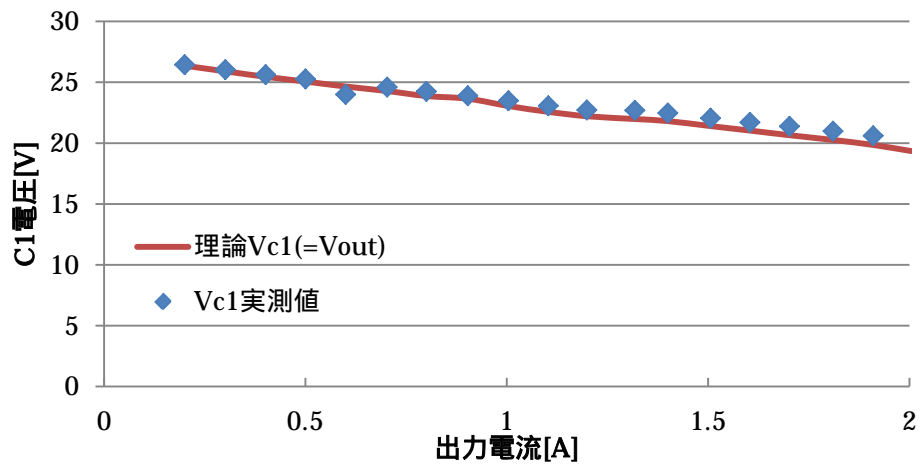


図 4.5.3 出力電流-C1 電圧特性

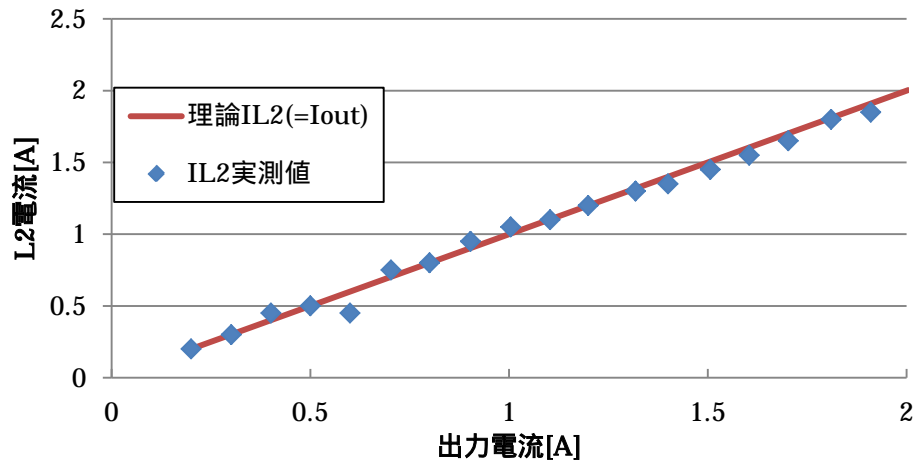


図 4.5.4 出力電流-L2 電流特性

4.6 まとめ

3.1 節の図 3.1.13、図 3.1.14 に示したように L1 と L2 が別々の時は L1 と L2 の電流波形はほぼ理論通りの三角波の波形だった。しかし、図 4.1.3、図 4.1.4 などに示すように、L1 と L2 を同一鉄心とすると L1 と L2 の電流波形は三角波から大きく歪み、理論波形と大きく異なっている。しかしながら、図 4.1.12 に示したように、L1 と L2 の電流の合計の波形は理論通りの三角波である。よって、異常電流波形は 2 つのコイルが磁気結合しているため 2 つのコイルの電流分担が等しくならないからである。回路全体としては正常動作であり問題ないが、L2 のリップル電流が増加するので平滑コンデンサのリップル電流も増加する。今後の検討課題である。

第 5 章 絶縁型 Zeta コンバータの動作

第 5 章では、絶縁型 Zeta コンバータの波形観測，入出力特性の実験を行った結果を述べる。

5.1 各点の波形

まず，図 5.1.1 に同一鉄心 Zeta コンバータの回路図を，図 5.1.2 に電流経路を示す．なお，図 5.1.2(a)は FET が ON の時の電流経路，図 5.1.2(b)は FET が OFF の時の電流経路である．製作した回路の部品表は付録 A に示す．

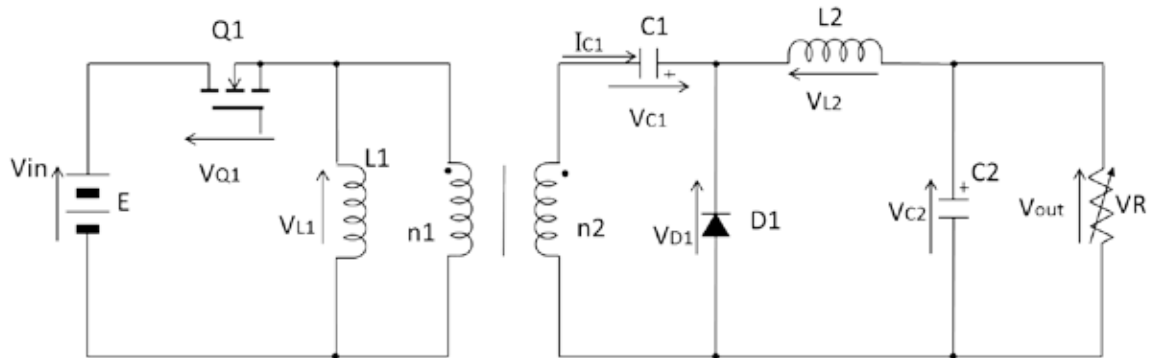


図 5.1.1 絶縁型 Zeta コンバータ ($L1$ は励磁インダクタンス) ($n1:n2 = 1:1$)

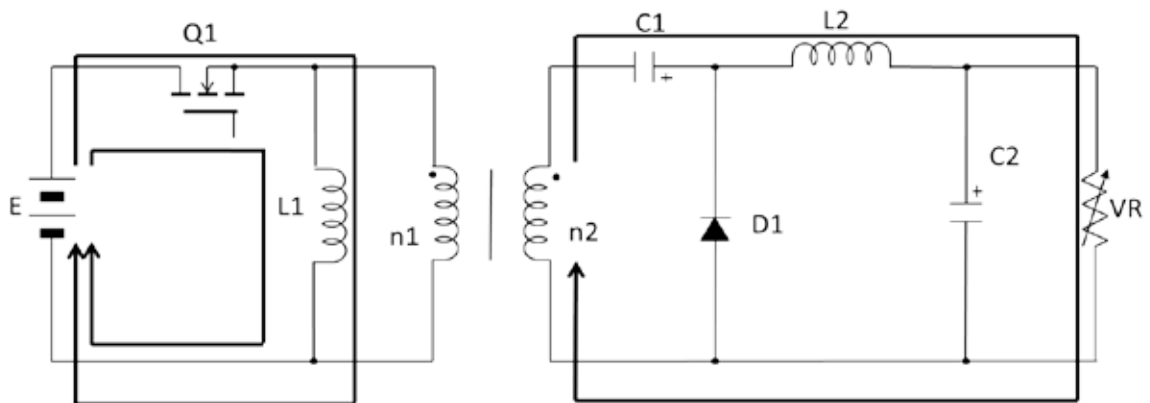


図 5.1.2(a) FET が ON 時の絶縁型 Zeta コンバータの電流経路

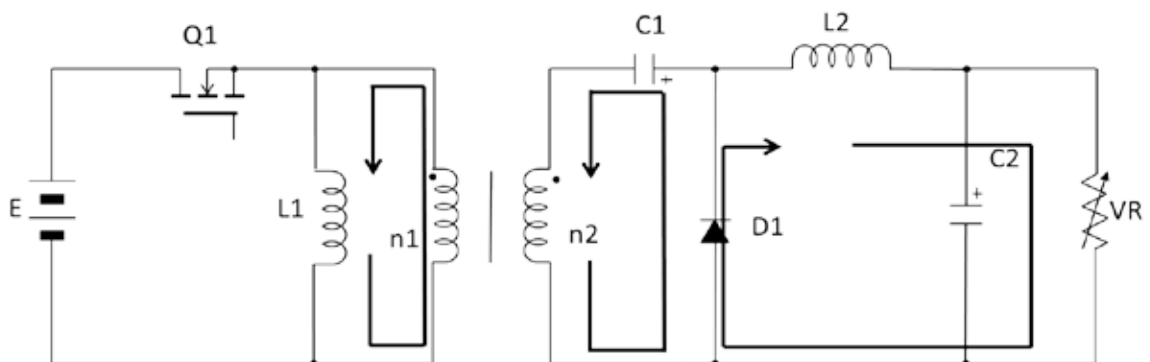


図 5.1.2(b) FET が OFF 時の絶縁型 Zeta コンバータの電流経路

以下に、各点の波形を示す。入力電圧は 12[V]，出力電流は 2[A]，通流率は 0.5 の時のものである。

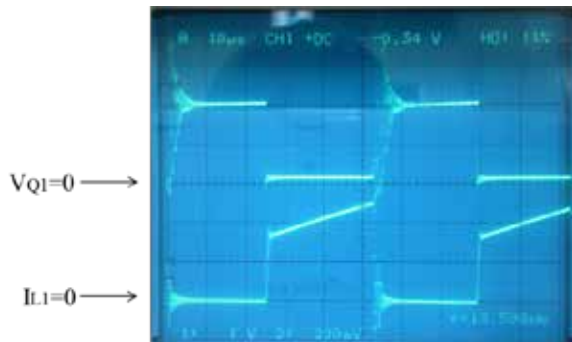


図 5.1.3 V_{Q1} と I_{L1} の波形

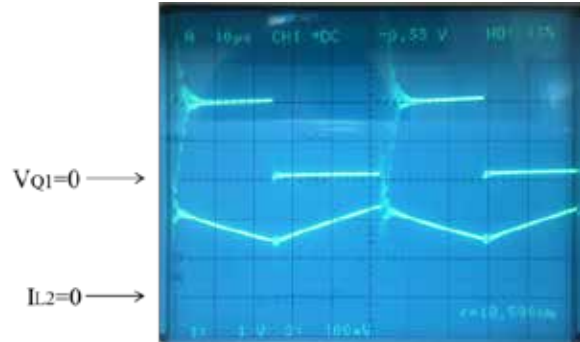


図 5.1.4 V_{Q1} と I_{L2} の波形

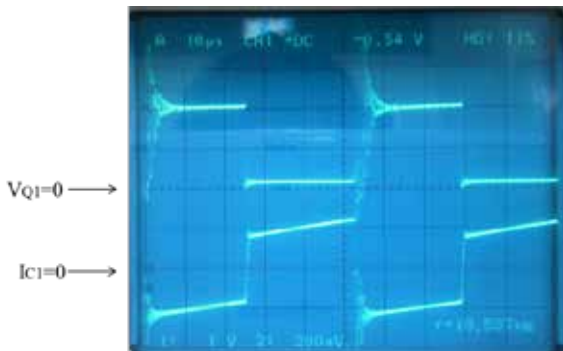


図 5.1.5 V_{Q1} と I_{C1} の波形

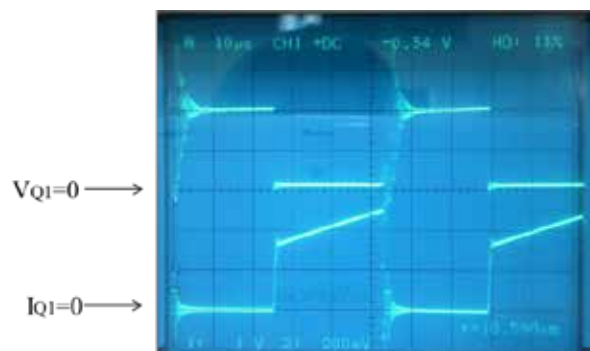


図 5.1.6 V_{Q1} と I_{Q1} の波形

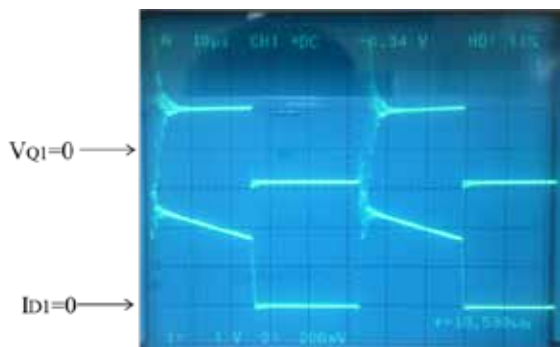


図 5.1.7 V_{Q1} と I_{D1} の波形

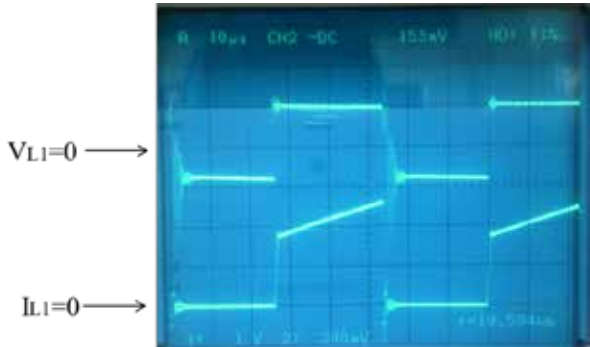


図 5.1.8 V_{L1} と I_{L1} の波形

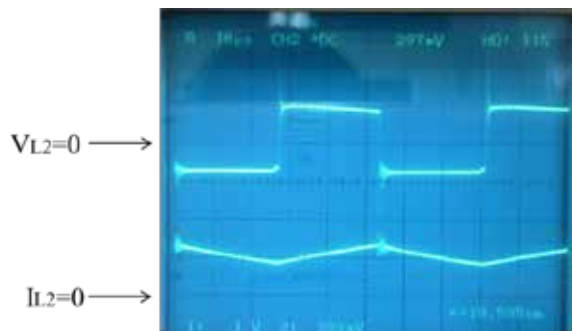


図 5.1.9 V_{L2} と I_{L2} の波形

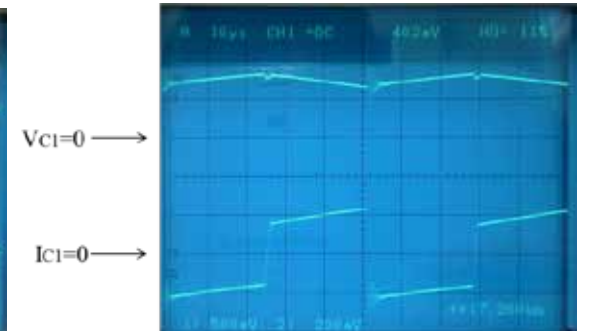


図 5.1.10 V_{C1} と I_{C1} の波形

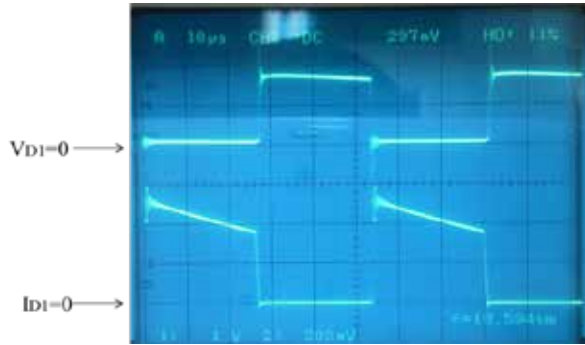


図 5.1.11 V_{D1} と I_{D1} の波形

5.2 通流率-出力電圧特性

入力電圧を 12[V] ,出力電流を 1[A]一定にし ,通流率 α を変化させた時の出力電圧 V_{out} の変化について測定する . 表 5.1 にその結果の表を示す .

表 5.1 通流率-出力電圧特性

通流率 α	V_{in} [V]	I_{in} [A]	V_{out} [V]	I_{out} [A]	理論 V_{out} [V]
10	12	0.022	0.006	0.16	1.333333
20	12	0.237	0.037	1	3
30	12	0.388	2.049	1.013	5.142857
40	12	0.584	3.9	1	8
50	12	0.882	6.7	0.998	12
60	12	1.334	10.76	1	18
70	12	2.3	18.89	1	28
80	12	3.7	29.1	1	48
90	12	6.4	40.08	1	108

また、図 5.2.1 に通流率-出力電圧特性のグラフを示す .

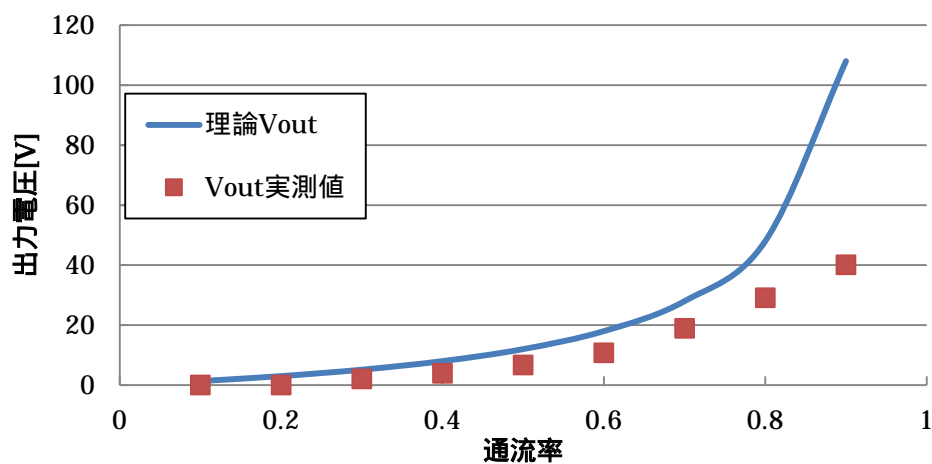


図 5.2.1 通流率-出力電圧特性

5.3 通流率 0.2 の時の特性

入力電圧 12[V]，通流率 0.2 を一定とし，出力電流を 0.1[A]ずつ増加させていった時の入力電流，出力電圧を測定した．その結果を表 5.2 に示す．

表 5.2 通流率 0.2 時の測定結果

$V_{in}[V]$	$I_{in}[A]$	$V_{out}[V]$	$I_{out}[A]$	$V_{C1}[V]$	$I_{L2}[A]$	理論 $V_{out}[V]$	効率[%]
12	0.093	3.393	0.21	4	0.25	3	63.84677
12	0.112	2.571	0.3	2.5	0.35	3	57.38839
12	0.143	2.396	0.402	3	0.4	3	56.13007
12	0.172	2.245	0.501	2.8	0.45	3	54.49346
12	0.203	2.091	0.601	2.5	0.55	3	51.5883
12	0.234	1.98	0.7	2.4	0.6	3	49.35897
12	0.266	1.795	0.801	2.2	0.75	3	45.0437
12	0.294	1.517	0.9	2	0.85	3	38.69898
12	0.32	1.357	1	2	0.95	3	35.33854
12	0.352	1.206	1.102	1.9	1.05	3	31.46335
12	0.379	1.016	1.201	1.8	1.2	3	26.82973
12	0.407	0.977	1.301	1.8	1.3	3	26.02533
12	0.44	0.83	1.4	1.7	1.4	3	22.00758
12	0.46	0.79	1.503	1.7	1.5	3	21.51033
12	0.494	0.691	1.604	1.6	1.58	3	18.6971
12	0.52	0.558	1.702	1.5	1.7	3	15.21981
12	0.55	0.42	1.806	1.4	1.75	3	11.49273
12	0.575	0.257	1.911	1.4	1.9	3	7.117783
12	0.602	0.235	2.01	1.3	2	3	6.538621

図 5.3.1 に出力電流-出力電圧特性のグラフを，図 5.3.2 に出力電流-効率特性のグラフを示す．

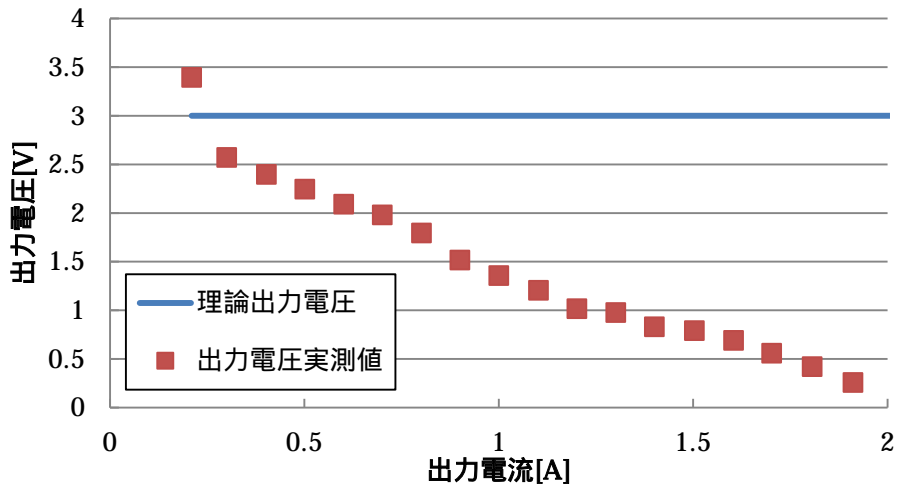


図 5.3.1 出力電流-出力電圧特性

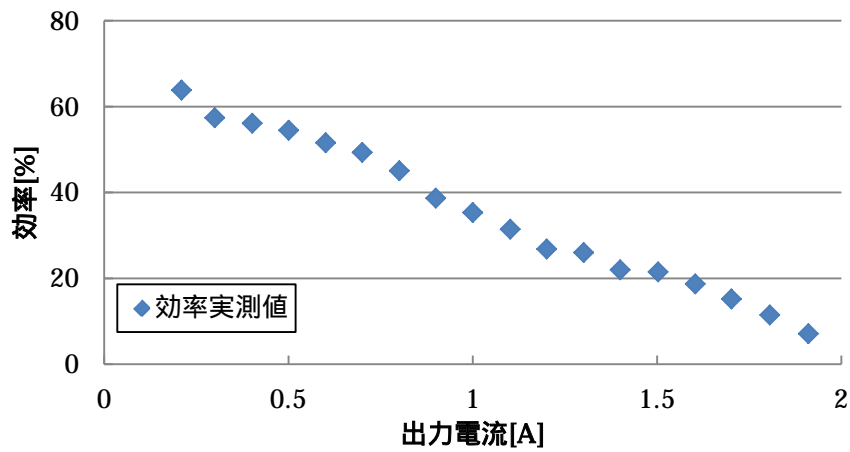


図 5.3.2 出力電流-効率特性

図 5.3.3 に出力電流-C1 電圧特性のグラフを，図 5.3.4 に出力電流-L2 電流特性のグラフを示す。

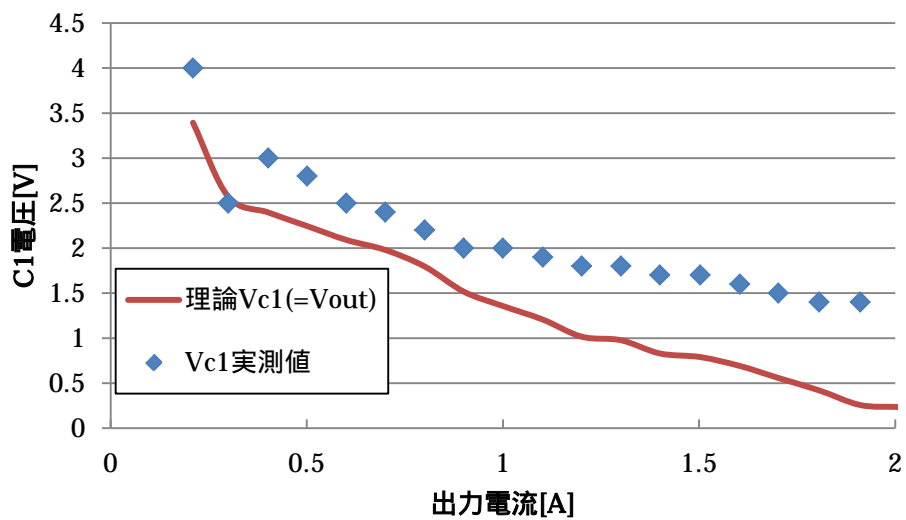


図 5.3.3 出力電流-C1 電圧特性

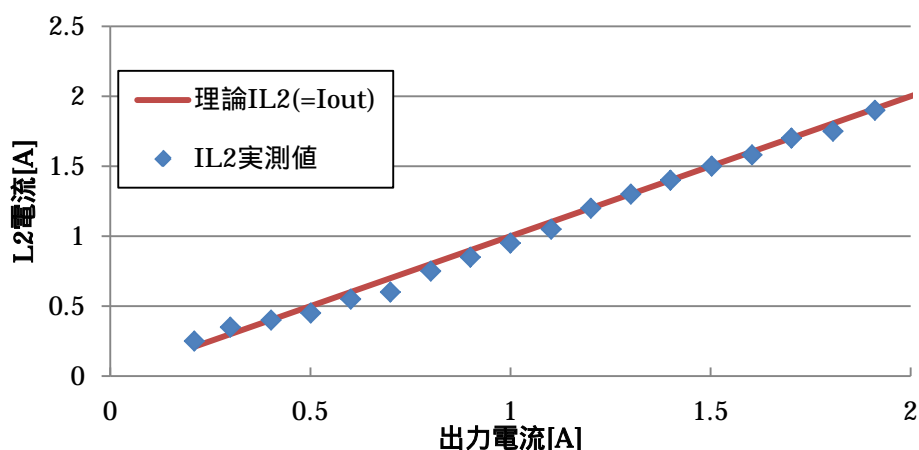


図 5.3.4 出力電流-L2 電流特性

5.4 通流率 0.5 の時の特性

入力電圧 12[V]，通流率 0.5 を一定とし，出力電流を 0.1[A]ずつ増加させていった時の入力電流，出力電圧を測定した．その結果を表 5.3 に示す．

表 5.3 通流率 0.5 時の測定結果

V_{in} [V]	I_{in} [A]	V_{out} [V]	I_{out} [A]	V_{C1} [V]	I_{L2} [A]	理論 V_{out} [V]	効率[%]
12	0.371	17.28	0.2	17	0.2	12	77.62803
12	0.371	11.16	0.3	11.5	0.25	12	75.20216
12	0.477	10.74	0.4	11	0.3	12	75.05241
12	0.587	10.44	0.5	11	0.4	12	74.10562
12	0.697	10.11	0.6	10.5	0.6	12	72.52511
12	0.802	9.87	0.7	10	0.75	12	71.78928
12	0.98	9.55	0.8	10	0.8	12	64.96599
12	1.019	9.28	0.9	9.8	0.87	12	68.30226
12	1.1	9.05	1	9.5	1	12	68.56061
12	1.2	8.75	1.1	9.5	1.1	12	66.84028
12	1.32	8.45	1.201	9	1.25	12	64.0685
12	1.42	8.16	1.31	8.9	1.3	12	62.73239
12	1.53	7.9	1.41	8.5	1.4	12	60.66993
12	1.67	7.74	1.503	8.5	1.5	12	58.05
12	1.7	7.42	1.606	8.4	1.6	12	58.41431
12	1.813	7.1	1.7	8.5	1.7	12	55.47895
12	1.91	6.92	1.813	8.2	1.8	12	54.73805

12	2	6.63	1.911	8	1.9	12	52.79138
12	2.11	6.36	2.01	8	2	12	50.48815

図 5.4.1 に出力電流-出力電圧特性のグラフを，図 5.4.2 に出力電流-効率特性のグラフを示す．

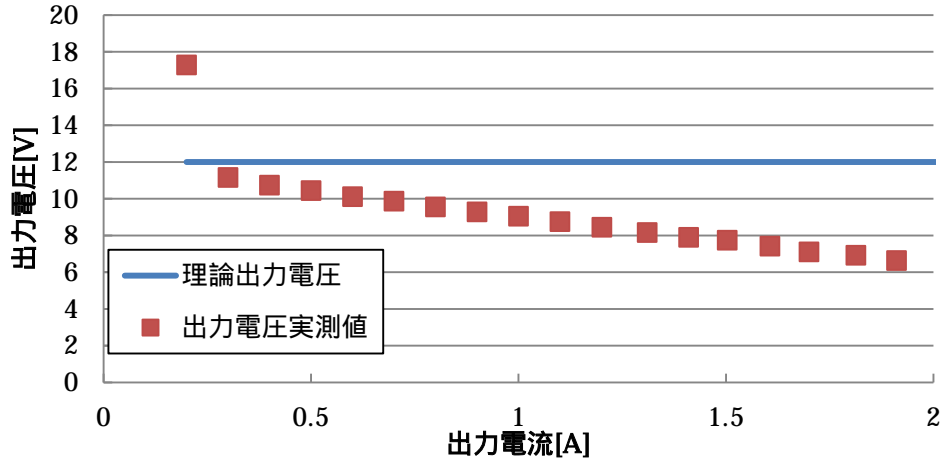


図 5.4.1 出力電流-出力電圧特性

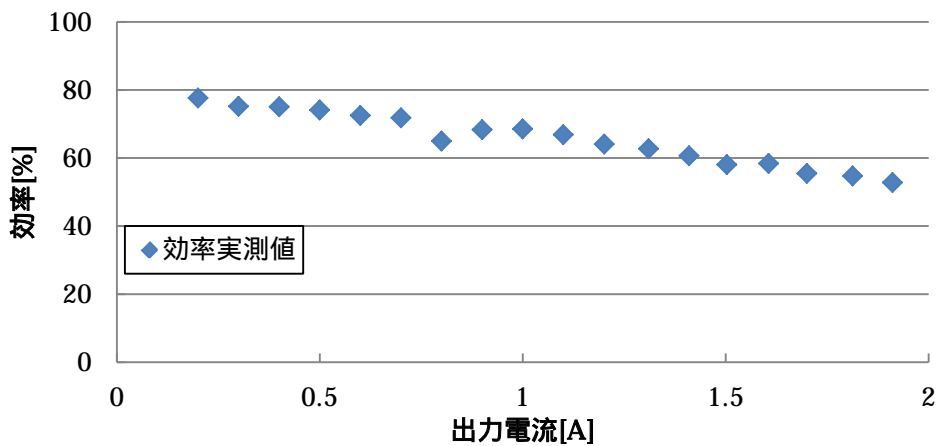


図 5.4.2 出力電流-効率特性

図 5.4.3 に出力電流-C1 電圧特性のグラフを，図 5.4.4 に出力電流-L2 電流特性のグラフを示す．

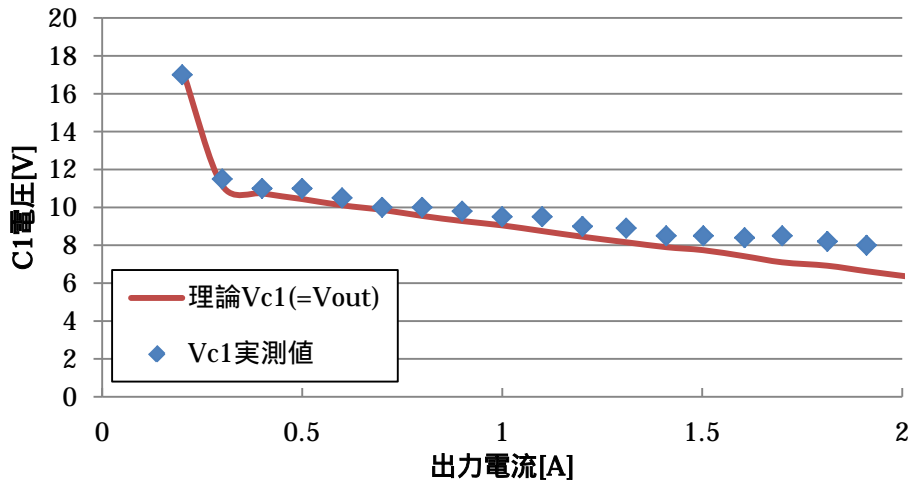


図 5.4.3 出力電流-C1 電圧特性

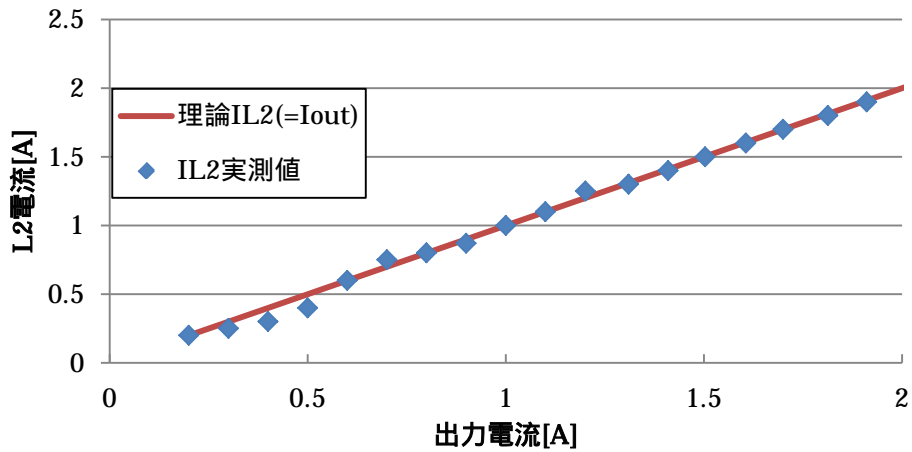


図 5.4.4 出力電流-L2 電流特性

5.5 通流率 0.7 の時の特性

入力電圧 12[V]，通流率 0.7 を一定とし，出力電流を 0.1[A] ずつ増加させていった時の入力電流，出力電圧を測定した．その結果を表 5.4 に示す．

表 5.4 通流率 0.7 時の測定結果

V _{in} [V]	I _{in} [A]	V _{out} [V]	I _{out} [A]	V _{C1} [V]	I _{L2} [A]	理論 V _{out} [V]	効率[%]
12	0.687	31.07	0.2	31	0.1	28	75.37603
12	0.803	25.91	0.3	26	0.3	28	80.66625
12	1.06	25.09	0.4	25	0.3	28	78.89937
12	1.305	24.37	0.5	24.5	0.4	28	77.80971
12	1.541	23.69	0.6	24	0.45	28	76.86567
12	1.779	22.83	0.703	23	0.55	28	75.1803

12	2	22.13	0.801	22	0.7	28	73.85888
12	2.243	21.41	0.904	22	0.8	28	71.90756
12	2.472	20.64	1.025	21	0.9	28	71.31877
12	2.7	19.91	1.11	20	1	28	68.21019
12	2.933	19.28	1.203	20	1.1	28	65.89908
12	3.157	18.72	1.308	19	1.2	28	64.63351
12	3.368	18.04	1.407	18	1.3	28	62.80255
12	3.594	17.36	1.511	18	1.45	28	60.82118
12	3.801	16.75	1.607	17	1.5	28	59.01353
12	4.026	15.99	1.711	16	1.6	28	56.6296
12	4.218	15.38	1.805	16	1.7	28	54.8461
12	4.438	14.67	1.91	15	1.8	28	52.61323
12	4.655	13.76	2.03	14	1.9	28	50.00501

図 5.5.1 に出力電流-出力電圧特性のグラフを，図 5.5.2 に出力電流-効率特性のグラフを示す．

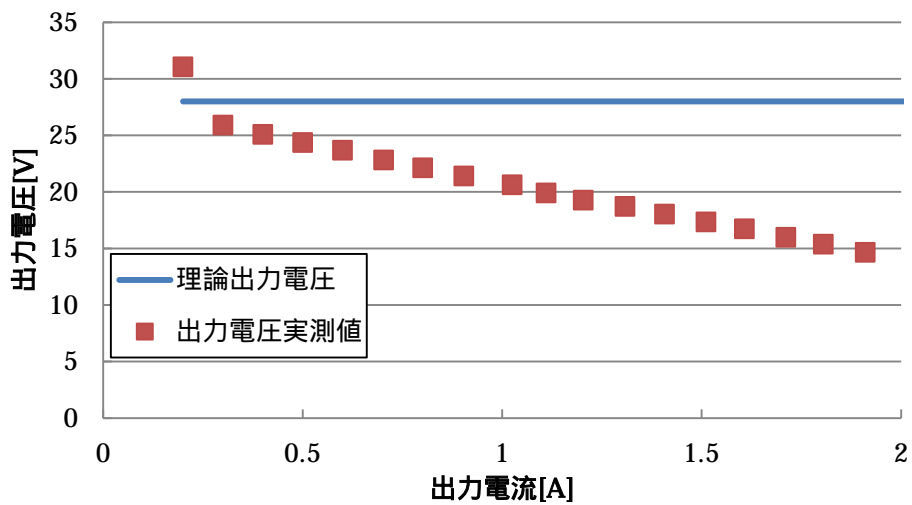


図 5.5.1 出力電流-出力電圧特性

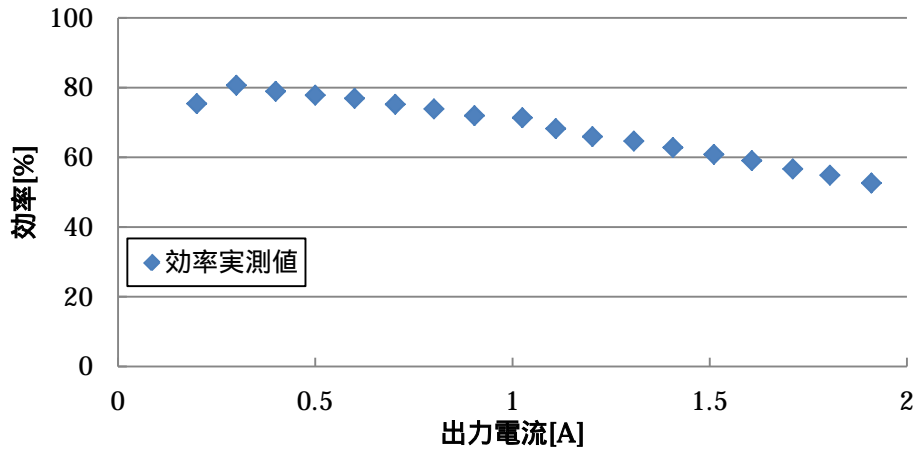


図 5.5.2 出力電流-効率特性

図 5.5.3 に出力電流-C1 電圧特性のグラフを，図 5.5.4 に出力電流-L2 電流特性のグラフを示す．

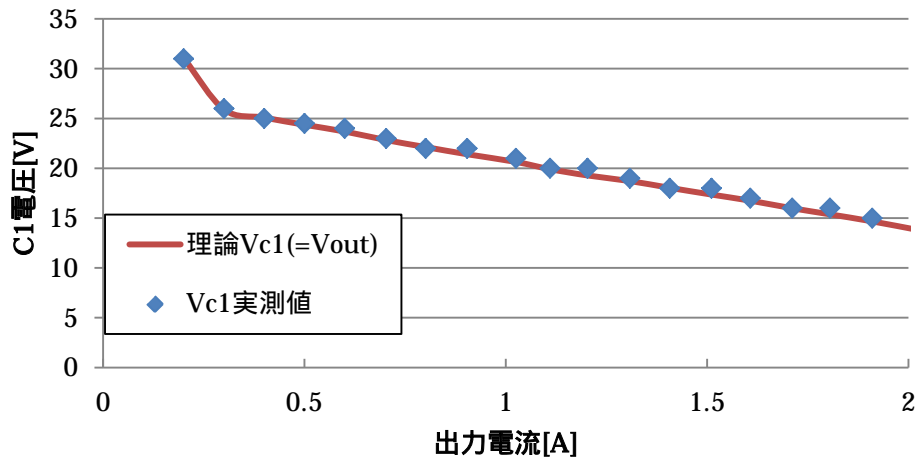


図 5.5.3 出力電流-C1 電圧特性

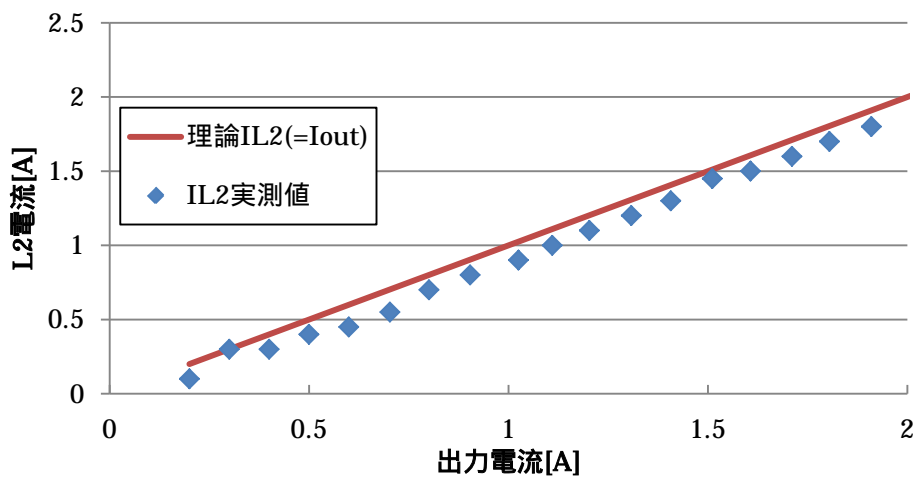


図 5.5.4 出力電流-L2 電流特性

5.6 まとめ

5.1 節の V_{Q1} の波形 (図 5.1.3 など) において $Q1$ が ON から OFF に切り替わる時に大きな振動が発生していることが確認できる。これはトランスを使用したため漏れインダクタンスが発生したことが原因と考えられる。第 3 章の基本回路での測定結果と比較すると効率はかなり低下している。変圧器の漏れインダクタンスによる損失の増加などが原因と思われる。

図 5.1.6 の I_{Q1} と図 5.1.5 の I_{C1} は変圧器の 1 次電流と 2 次電流の関係になる $n1:n2 = 1:1$ だが $Q1$ が ON 時の I_{Q1} は I_{C1} の約 2 倍である。これは I_{Q1} には負荷電流とほぼ同じ大きさの励磁電流が含まれているからであり、絶縁型 Zeta コンバータに特有の面白い現象である。

第 6 章 おわりに

本研究では、あまり研究されていない「Zeta コンバータ」、「同一鉄心 Zeta コンバータ」、「絶縁型 Zeta コンバータ」について波形観測、通流率特性、電流特性の実験を行った。詳しい各点での電圧・電流波形や入出力特性を得ることができた。

電圧・電流波形はおおむね理論通りの波形が得られたが、同一鉄心の場合のリアクトル電流波形が異常であった。2 つのリアクトルが磁気結合していると 2 つのリアクトルの電流分担が均等にはならないことが原因である。この減少は平滑コンデンサのリプル電流の増加をもたらすので対策を検討する必要がある。

効率は最大値で 80% 程度と全般に低い。必要以上に高耐圧の FET を使用したことなどが原因と考えられるが今後損失分析が必要である。

絶縁型では漏れインダクタンスの影響が大きく、FET のサージ電圧の増加や効率の低下を招いた。

付録 A Zeta コンバータの部品表

表 A1 に「Zeta コンバータ」で使用した部品を，表 A2 に「同一鉄心 Zeta コンバータ」で使用した部品を，表 A3 に「絶縁型 Zeta コンバータ」で使用した部品を示す．

表 A1 Zeta コンバータの部品表

記号	種類	型名
L1	インダクタンス	0.392mH
L2	インダクタンス	0.394mH
C1	フィルムコンデンサ	10 μ F \times 3
C2	電解コンデンサ	100 μ F
D1	ダイオード	32DF2
Q1	N 型 MOS-FET	2SK2967
VR	スライド抵抗	

表 A2 同一鉄心 Zeta コンバータの部品表

記号	種類	型名
L1	インダクタンス	0.293mH
L2	インダクタンス	0.273mH
C1	フィルムコンデンサ	10 μ F \times 3
C2	電解コンデンサ	100 μ F
D1	ダイオード	32DF2
Q1	N 型 MOS-FET	2SK2967
VR	スライド抵抗	

表 A3 絶縁型 Zeta コンバータの部品表

記号	種類	型名
L1	インダクタンス	0.293mH
L2	インダクタンス	0.394mH
C1	フィルムコンデンサ	10 μ F \times 3
C2	電解コンデンサ	100 μ F
D1	ダイオード	32DF2
Q1	N 型 MOS-FET	2SK2967
トランス		図 A4 参照
VR	スライド抵抗	

図 A1 に「Zeta コンバータ」の回路を，図 A2 に「同一鉄心 Zeta コンバータ」の回路を，図 A3 に「絶縁型 Zeta コンバータ」の回路を示す．

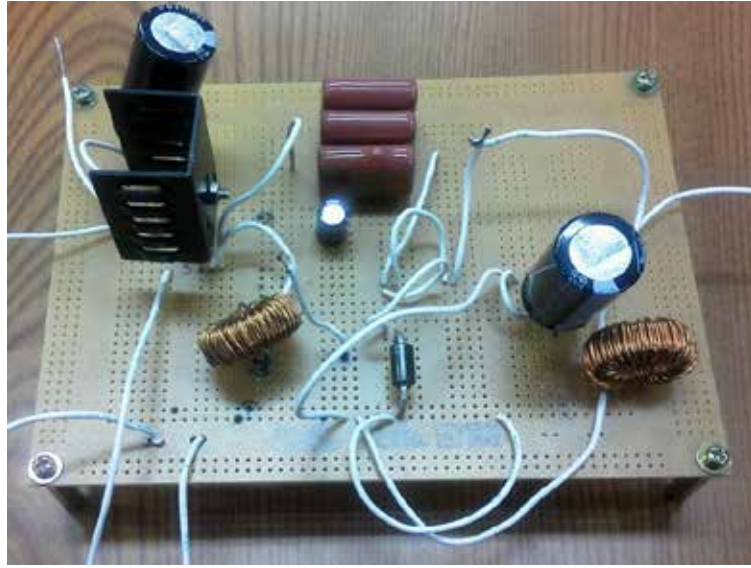


図 A1 Zeta コンバータの回路



図 A2 同一鉄心 Zeta コンバータの回路

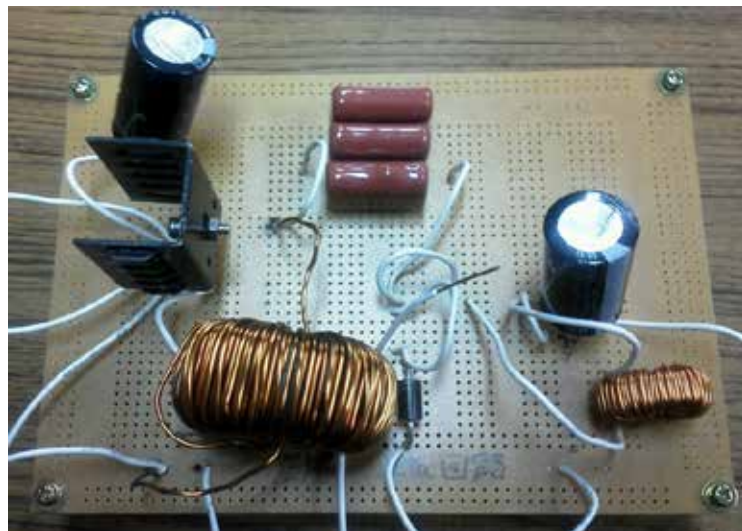


図 A3 絶縁型 Zeta コンバータの回路

図 A4 に使用したトランスの図を示す .

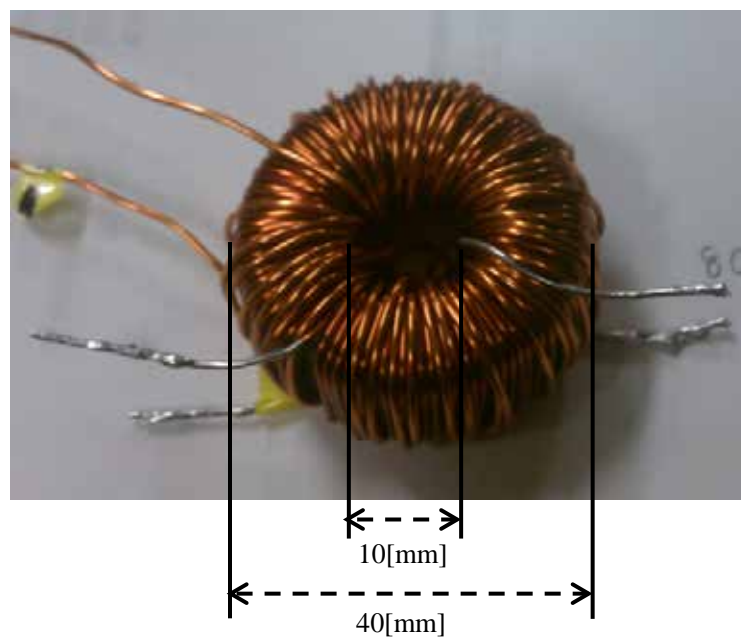


図 A4 使用したトランス

付録 B 理論値の導出過程

FETON 時の図 2.1.2(a)の電流経路より以下の式が成り立つ .

$$V_{L1} = V_{in} \quad (1)$$

$$V_{L2} = V_{in} - V_{C1} - V_{out} \quad (2)$$

$$I_{C1} = I_{L2} \quad (3)$$

$$\Delta I_{L1} = \frac{1}{L1} \times V_{in} \times T \times \alpha \quad (4)$$

$$\Delta I_{L2} = \frac{1}{L2} \times (V_{in} - V_{C1} - V_{out}) \times T \times \alpha \quad (5)$$

$$\Delta V_{C1} = \frac{1}{C1} \times I_{L2} \times T \times \alpha \quad (6)$$

また , FETOFF 時の図 2.1.2(b)の電流経路より以下の式が成り立つ .

$$V_{L1} = V_{C1} \quad (7)$$

$$V_{L2} = -V_{out} \quad (8)$$

$$I_{C1} = -I_{L1} \quad (9)$$

$$\Delta I_{L1} = -\frac{1}{L1} \times V_{C1} \times T \times (1 - \alpha) \quad (10)$$

$$\Delta I_{L2} = \frac{1}{L2} \times (-V_{out}) \times T \times (1 - \alpha) \quad (11)$$

$$\Delta V_{C1} = \frac{1}{C1} \times (-I_{L1}) \times T \times (1 - \alpha) \quad (12)$$

FETON 時の ΔI_{L1} +FETOFF 時の $\Delta I_{L1} = 0$ より式(B4)と式(B10)は式(B15)に変形できる .

$$\frac{1}{L1} \times V_{in} \times T \times \alpha - \frac{1}{L1} \times V_{C1} \times T \times (1 - \alpha) = 0 \quad (13)$$

$$V_{in}\alpha - V_{C1}(1 - \alpha) = 0 \quad (14)$$

$$V_{C1} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \times V_{in} \quad (15)$$

FETON 時の ΔI_{L2} +FETOFF 時の $\Delta I_{L2} = 0$ より式(B5)と式(B11)は式(B17)に変形できる .

$$\frac{1}{L2} \times (V_{in} - V_{C1} - V_{out}) \times T \times \alpha + \frac{1}{L2} \times (-V_{out}) \times T \times (1 - \alpha) = 0 \quad (16)$$

$$(V_{in} - V_{C1} - V_{out})\alpha - V_{out}(1 - \alpha) = 0 \quad (17)$$

式(B15)を式(B17)へ代入

$$\left(V_{in} - \frac{\alpha}{1 - \alpha} \times V_{in} - V_{out} \right) \alpha - V_{out}(1 - \alpha) = 0 \quad (18)$$

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{\alpha - \alpha^2}{1 - \alpha} \right) \quad (19)$$

$$V_{out} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} V_{in} \quad (20)$$

式(B20)を式(B15)に代入

$$V_{C1} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \times \frac{1 - \alpha}{\alpha} \times V_{out} = V_{out} \quad (21)$$

FETON 時の ΔV_{C2} +FETOFF 時の $\Delta V_{C2} = 0$ より式(B6)と式(B12)は式(B)に変形できる .

$$\frac{1}{C1} \times I_{L2} \times T \times \alpha + \frac{1}{C1} \times (-I_{L1}) \times T \times (1 - \alpha) = 0 \quad (22)$$

$$I_{L2}\alpha = I_{L1}(1 - \alpha) \quad (23)$$

$$I_{L2} = \frac{1 - \alpha}{\alpha} I_{L1} \quad (24)$$

I_{L1} の平均値は I_{in} なので I_{L1} の平均値は式(B25)になる .

$$I_{L2} = \frac{1 - \alpha}{\alpha} I_{in} = I_{out} \quad (25)$$