

Amazonで作る無線電力伝送

2019年7月29日
株式会社スフィンクステクノロジーズ
伊藤 竜次

この資料は「手頃なコスト」を目標にミニ四駆の無線電力伝送システム（以下WPTシステム）を構築する際の設計方法について説明する。

WPTシステムは大まかに次の構成に分かれる。

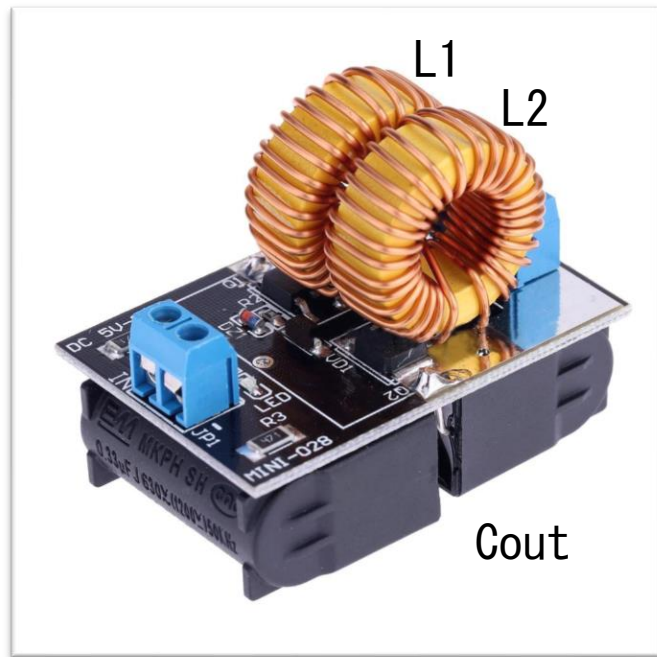


図1-1 ブロック図

それぞれの構成をゼロから作製するのは非常に手間となる。
特に「電源」についてはシステムの根幹となり、一般的にMHz帯のスイッチング電源を作製するのは非常に難しい。
そこで今回のWPTシステムには市販されている「IHヒーター」の電源を用いてWPTシステムを構築する。

(項番2) IH電源について (1/3)

IH電源と回路図を図2-1、2-2に示す。



基本回路: 無安定マルチバイブレータ (LC発振器)

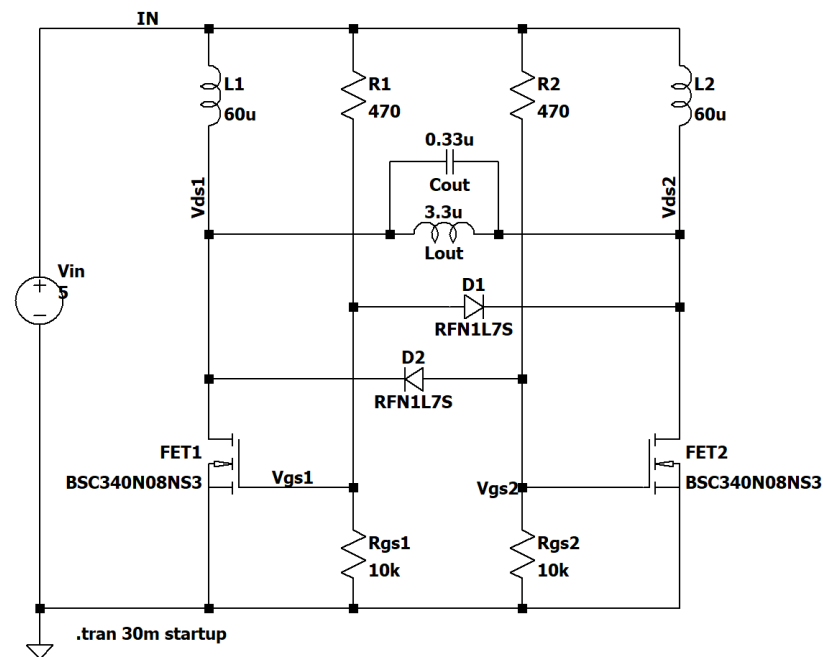


図2-1 5V-12V低電圧ZVS誘導加熱電源モジュール@SODIAL

図2-2 IH電源回路図

(項番2) IH電源について (2/3)

IH電源の動作解析を行った。

図2-3のような半周期回路を考えたとき、出力電圧ピークが求まる。

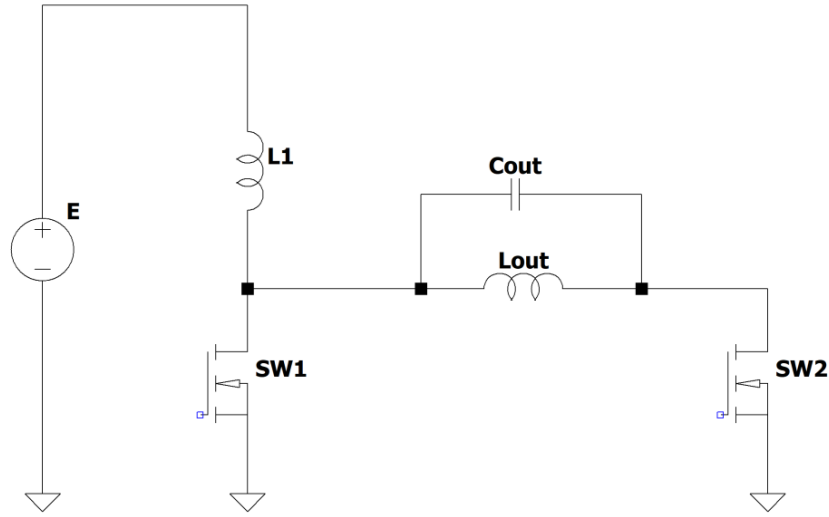
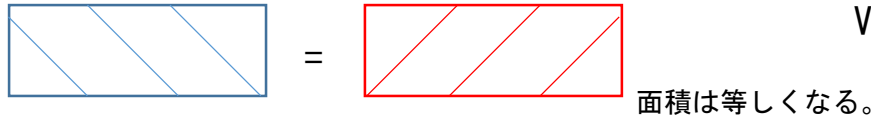


図2-3 簡易回路図



$$ET = \frac{2}{\pi} V_{peak} \times \frac{T}{2}$$

正弦半波の面積

→ $V_{peak} = \pi E$

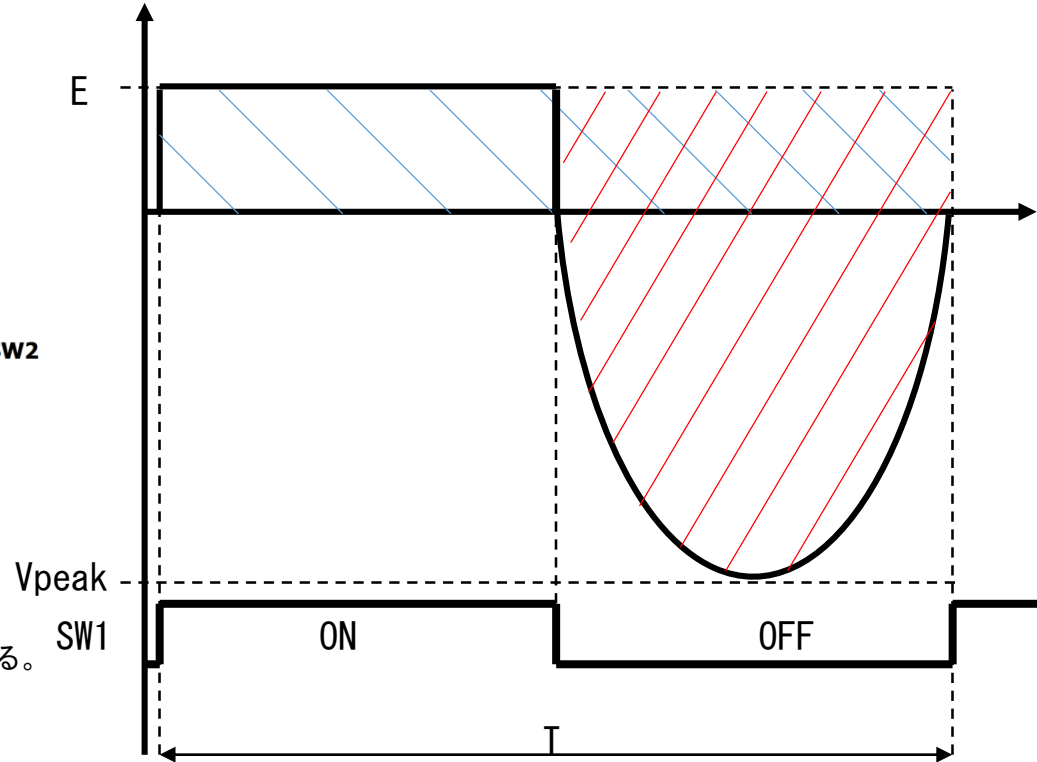


図2-4 動作解析

電源電圧の π 倍がピーク値となる波形を出力できる。
周波数は自動的に L_{out} と C_{out} の共振周波数となる。 ($L_1 \gg L_{out}$ の場合)

(項番2) IH電源について (3/3)

このIH電源を使う際の制約条件として

- ①電源電圧Eの π 倍が出力振幅となるのでMAXの出力電圧は $V_{rms}=26.7V$ となる。
(直流電源の仕様は12V2A)
- ②動作原理からTx側のコンデンサはコイルに対して並列に接続するため、P-P又はP-S方式(P15参照)を使用しなければならない。
- ③未確認だが高周波化には限界がある。(200kHzは動作確認済み)

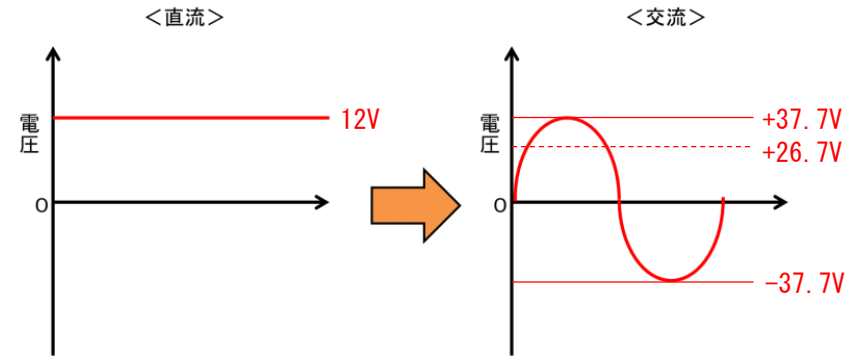


図2-5 最大出力電圧

→詳細な動作原理については資料P22-25に載せていますのでご確認ください。




参考文献


- ①漆谷 正義「IHモジュールを転用した WPTプラレール走行実験」 RFワールド, No. 43, pp. 119-125, Aug. 2018.
URL:<http://www.rf-world.jp/bn/RFW43/samples/p119-120.pdf>

次ページからkQ積に基づくWPT設計方法について述べますが、原理については、以下の参考文献をご覧ください。


kQ積に関する参考文献

- 
- ②大平孝、“高周波電力伝送系における最大効率の統一理論—「共鳴」も「結合」も用いない明解教授法—”、信学技報WPT2014-05, pp. 23-26, 2014年4月.
 - ③粟井郁雄、“ワイヤレス給電システムのkQ積理論再考—消費電力と入射電力比からの導出—” 信学技報WPT2016-44, pp. 11-16, 2017年1月.
 - ④大平 孝「frisとkQ」ITUジャーナル, vol. 49, no. 7, pp. 13-16, Jul. y 2019.
 - ⑤大平 孝「電界結合ワイヤレス電力伝送」MOTORエレクトロニクス, no. 10, pp. 93-102, Apr. 2019.
 - ⑥大平 孝「ワイヤレス電力伝送の基礎」RFワールド, no. 43, pp. 17-29, Aug. 2018.
 - ⑦大平 孝「ワイヤレス結合の最新常識kQ積をマスタしよう」グリーンエレクトロニクス, no. 19, pp. 78-88, Apr. 2017.

結合係数kに関する参考文献

- 
- ⑧大平 孝, 今更ながら, kって何?, “信学誌, vol. 102, no. 1, pp. 79-82, Aug. 2016

無負荷Q値に関する参考文献

- 
- ⑨大平 孝, “Qファクタは七色仮面,” 信学誌, vol. 99, no. 8, pp. 856-858, Aug. 2016
 - ⑩水野皓司, “今更ながら, Qって何?, “信学誌, vol. 99, no. 12, pp. 1191-1192, Dec. 2016

(項番4) WPT設計解析手順

本資料におけるWPT設計解析フローチャートを図4-1に示す。

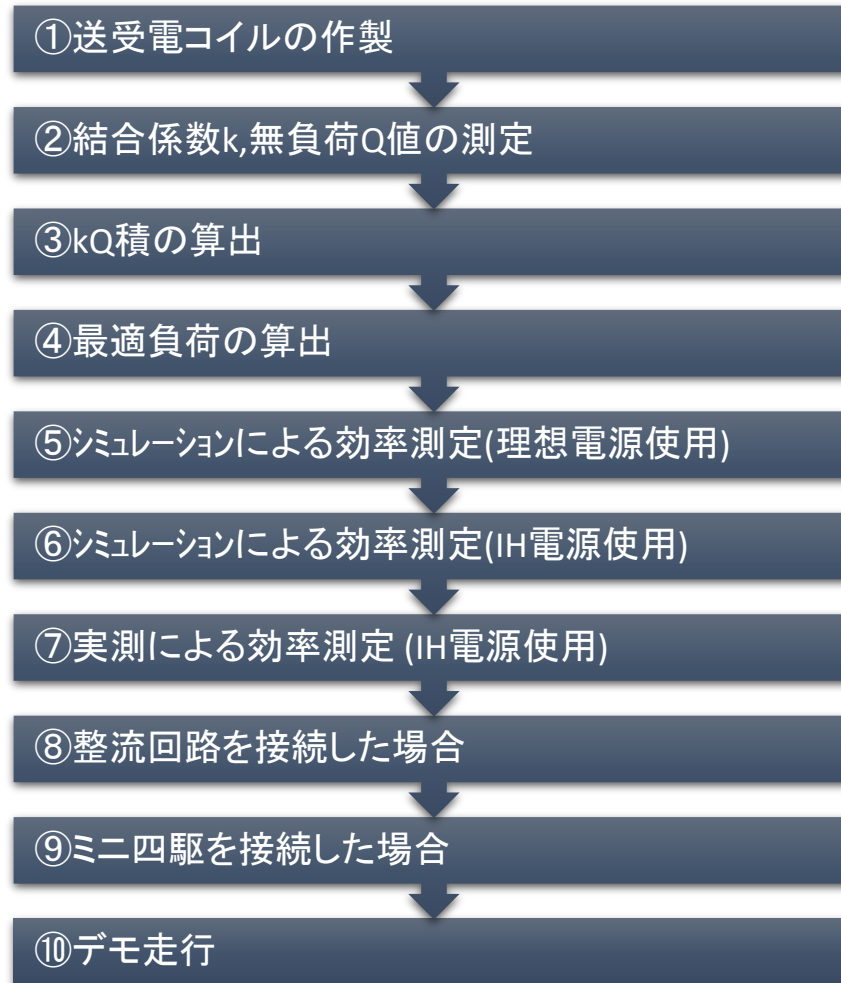
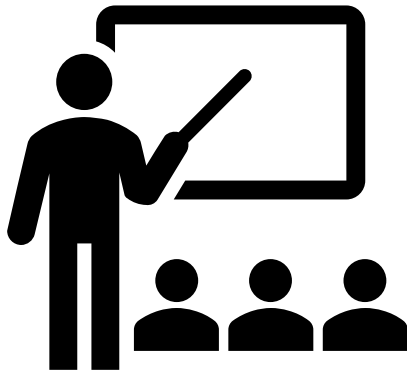


図4-1 WPT設計解析フローチャート

①送受電コイルの作製

今回作製した送電側 (Tx) と受電側 (Rx) のコイルを下図に示す。

4mの走行中給電を達成するためTxコイルは全長4mとし、Rxコイルはミニ四駆と同サイズとした。
(コイルを作製する際はコンテストHPの”競技ルール”をお読みください。)

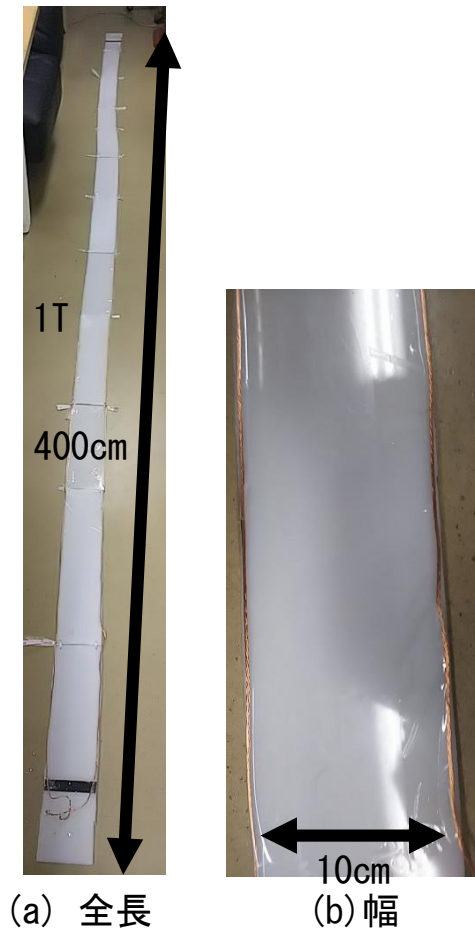
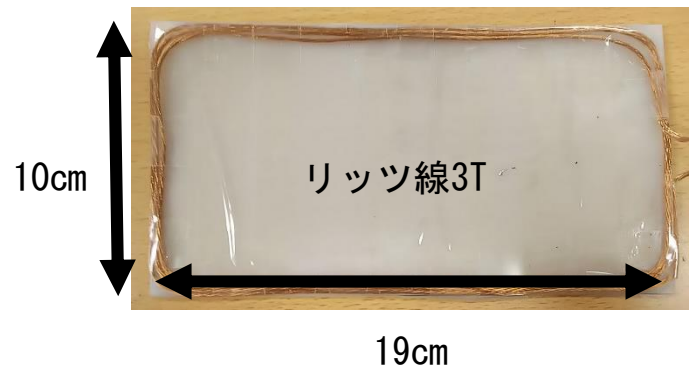


図4-1-1 Txコイル

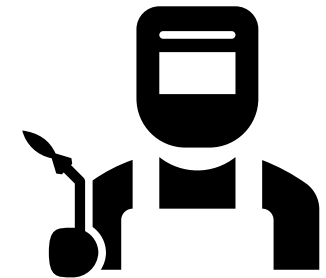


(a) Rxコイル単体



(b) ミニ四駆とのサイズ比

図4-1-2 Rxコイル



色々な形状の共振器を見たいっ!



図4-1-3 Tx-RX

②結合係数 k 測定 (1/2)

結合係数 k の算出方法について(電気学会でよく使われている方法)
結合係数を測定する方法は様々な種類があるが、 k が0.1程度の小さな場合は
受電側ショート法では測定誤差が大きくなる。

★ 用意するものはインピーダンスアナライザ or VNA(ベクトルネットワークアナライザ)

手順1 結合係数 k を測定したい距離に設置し、
図4-2-3に示すようにb-dを接続し、 L_β を測定する。

$$L_\beta = L_1 + L_2 - 2M \quad \dots \quad \textcircled{1}$$

手順2 L_1, L_2 のインダクタンスを個別に測定し、その値を②③に代入して
 k を求める。

$$M = \frac{L_1 + L_2 - L_\beta}{2} \quad \dots \quad \textcircled{2} \quad k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad \dots \quad \textcircled{3}$$

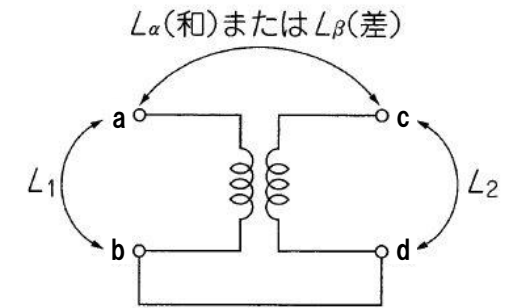


図4-2-1 等価回路

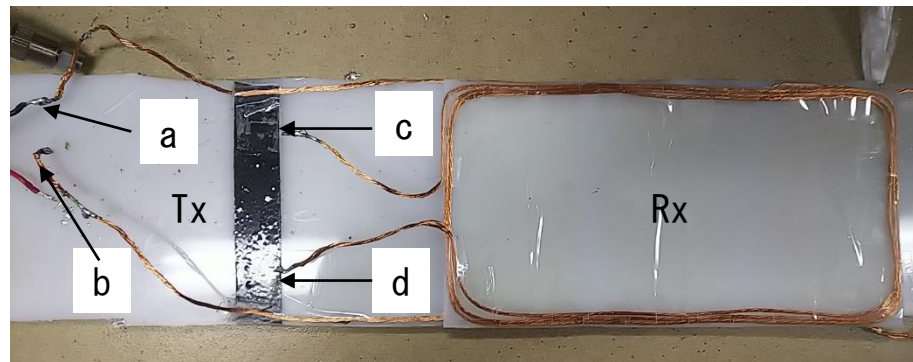


図4-2-2 Tx-RX接続前



b, dを接続

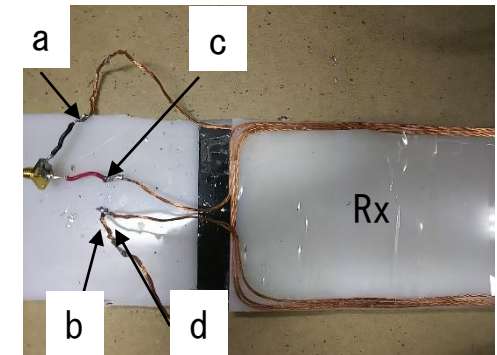


図4-2-3 Tx-RX接続後

②結合係数 k 測定 (2/2)

Tx-Rxの距離と位置ずれ特性を測定した。

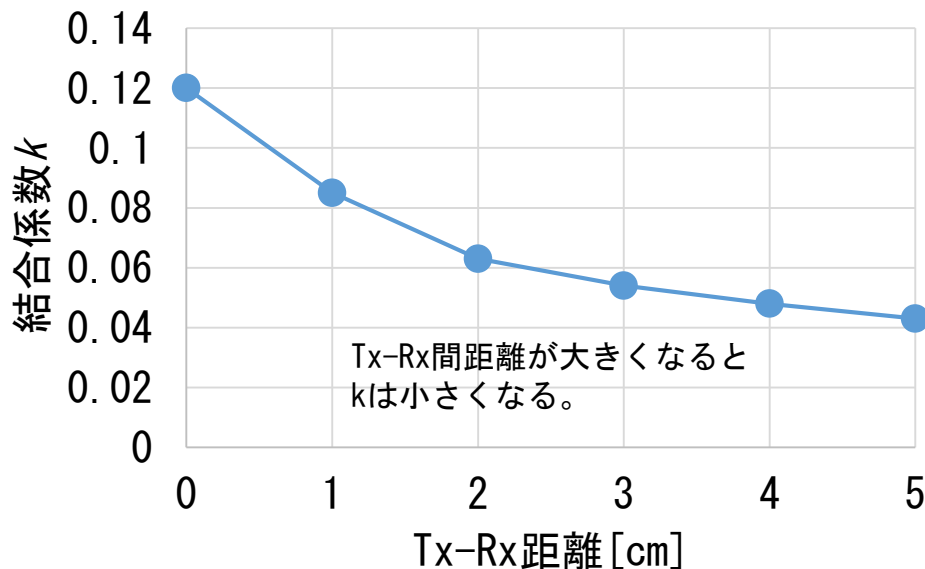
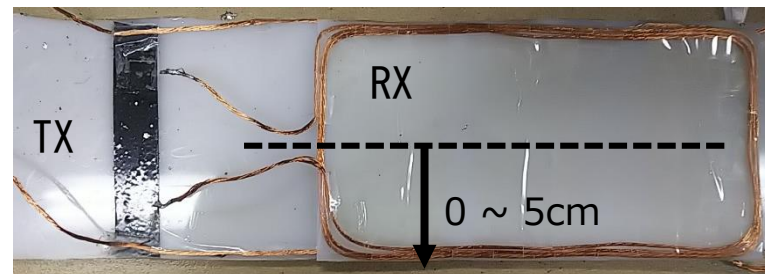
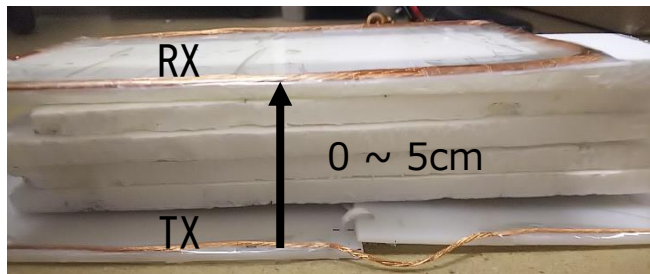


図4-2-4 Tx-RX距離特性

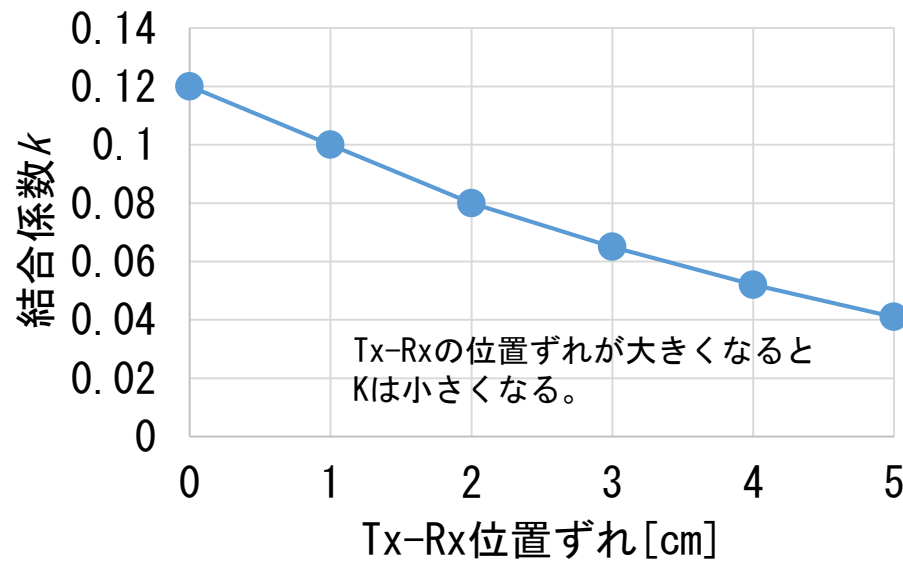


図4-2-5 Tx-RX位置ずれ特性

本仕様コイルの結合係数特性は距離や位置ずれが起きると結合係数が大きく低下するため、「位置の自由度」が低い。このことを「バスタビリティ」が低いとよく表現される。

②無負荷Q値測定(1/2)

無負荷Qの算出方法について

無負荷Q値測定の原理については以下の参考文献に詳しく示されている。

⑪小林禧夫 “マイクロ波共振器の測定技術” Microwave Workshop Digest (MWE2000), pp.431-442, 2000

★ 用意するものはVNA(ベクトルネットワークアナライザ)

測定手順に関して参考文献⑪から一部抜粋する。

- (1) $\omega = \omega_0$ における反射損 L_0 (dB) を測定する。
- (2) 式(2.23)より L_1 を計算する。
- (3) L_1 (dB) のときの ω_1, ω_2 を測定する。
- (4) 式(2.25),(2.27),(2.28)より Q_L, Q_u, Q_e を計算する。

まとめると、TxもしくはRxに使用したい周波数になるようにコンデンサを接続し、 S_{11} を測定する。測定データから図に示すパラメータを読み取り、計算式に基づき無負荷 Q_u 値を計算する。

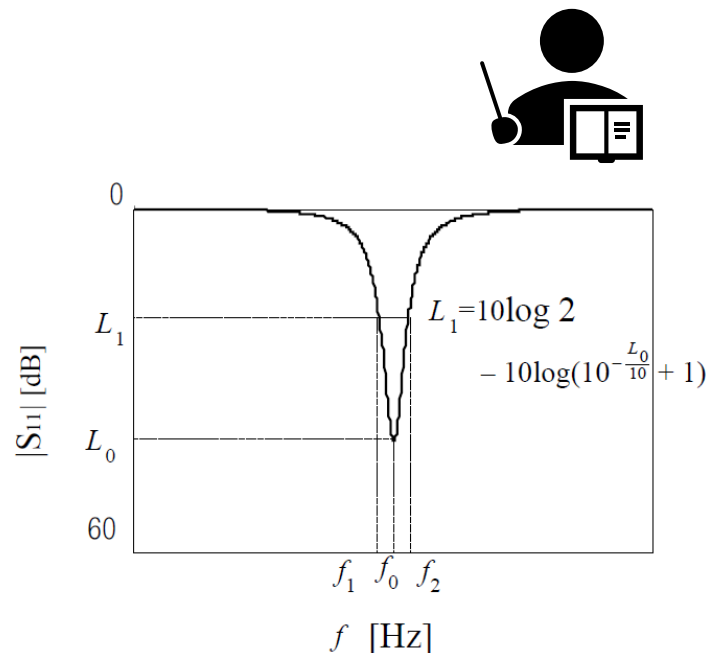


図4-2-6 参考文献⑪より抜粋

他にインピーダンスアナライザを用い、LとRを測定して Q_u を求める方法もある。

②無負荷 Q 値測定 (2/2)

実際に無負荷 Q 値を算出した。以下の表にまとめる。

表4-2-1 各パラメータ一覧

項番	項目	Tx	Rx	備考
1	L [uH]	8.7	3.9	
2	C [uF]	0.62	1.47	
3	f_0 [kHz]	68.5	66.5	
4	Q_u	14.6	32.7	

→ここまでのパラメータ, kQ により理論上の最大効率を算出する。



準備完了-!!

③kQ積の算出方法 (1/2)

Tx-Rx間距離=0cm, 位置ずれ=0cmと最も結合係数kが高いときのkQ積を求め、効率に変換した。

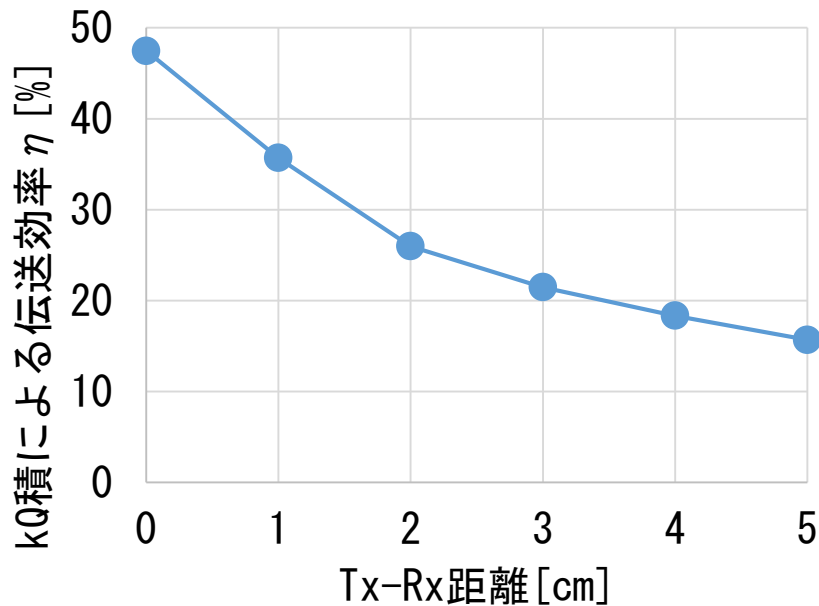


$$kQ積 = fm = k\sqrt{Q_{tx}Q_{rx}} = 0.12\sqrt{14.6 \times 32.7} = 2.62$$

$$\eta[\%] = \frac{fm^2}{(1 + \sqrt{1 + fm^2})^2} \times 100 = 47.5\%$$

Tx-Rx間距離による効率の変化を次に示す。

表4-3-1 Tx-Rx距離による理論効率特性一覧



Tx-Rx距離 [cm]	結合係数k	kQ積	効率 [%]	備考
0	0.12	2.62	47.5	
1	0.085	1.86	35.7	
2	0.063	1.38	26.0	
3	0.054	1.18	21.5	
4	0.048	1.05	18.3	
5	0.043	0.94	15.7	

図4-3-1 Tx-Rx距離による理論効率特性

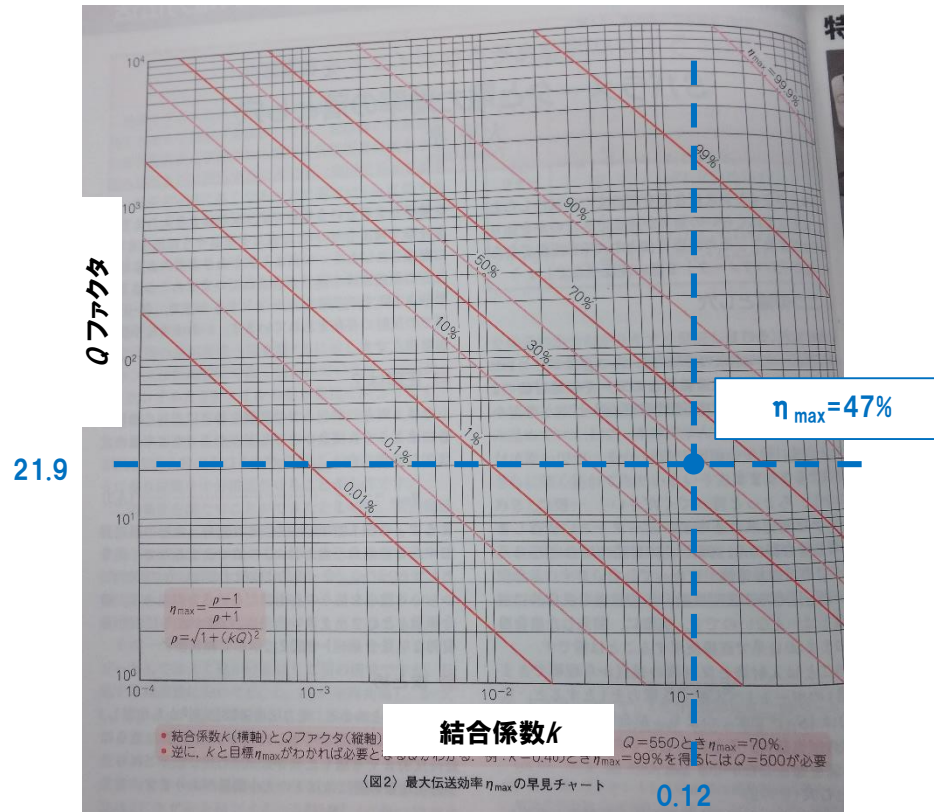
→理論上**47.5%**の効率で電力伝送可能。

③kQ積の算出方法 (2/2)

前頁で示したほかに、 k と Q から最大効率をグラフから読み取る方法があり、「最大伝送効率 η_{\max} 早見チャート」(図4-3-2)を紹介する。

参考文献⑫

大平 孝「Sパラメータと電力効率の落とし穴」RFワールド, No. 43, pp. 27-28, Aug. 2018.



計算機なしでOK！！

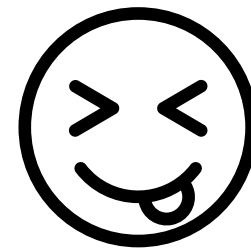


図4-3-2 参考文献⑫より抜粋



④最適負荷の算出方法

kQ積における最大効率 η_{max} は47.5%であった。(距離0cm)

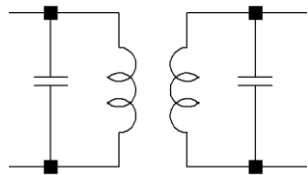
注意が必要なのはこの最大効率は「最適な負荷」を接続した場合の効率である。最適負荷に関しては下記の参考文献⑬にて詳しく述べられている。

参考文献

⑬遠井 敬大, 金子 裕良, 阿部 茂 “非接触給電の最大効率の結合係数kとコイルのQによる表現”
電気学会研究会資料, SPC, 半導体電力変換研究会 2011(176), pp.17-22, 2011-12-01

詳細は参考文献⑬にまかせ、今回はP-P方式を採用しているのので、下記の計算式により 20.4Ω となる。

$$R_{LMAX PP} = \frac{r_2 Q_{rx}}{k} \sqrt{\frac{Q_{rx}}{Q_{tx}}} = \frac{0.05 \times 32.7}{0.12} \sqrt{\frac{32.7}{14.6}} = 20.4$$



送電側のLに対して「並列」にC
受電側のLに対しても「並列」にCが
接続されているので「P-P方式」です。

また、P-S方式だと最適負荷は 0.13Ω となる。

$$R_{LMAX PS} = kr_2 \sqrt{Q_{tx} Q_{rx}} = 0.12 \times 0.05 \sqrt{14.6 \times 32.7} = 0.13\Omega$$

方式により、最適負荷は異なります。その他にも様々なパラメータ、特性が変わるので各方式の「個性」を考えつつ方式を選んでください。

表4-4-1 ⑫より抜粋

表1 最大効率 η_{max} とその抵抗負荷の値 R_{Lmax}

Table 1. η_{max} and R_{Lmax} .

Resonant capacitor	※ η_{max}	R_{Lmax}
SP	$1 + \frac{2}{k\sqrt{Q_1 Q_2}}$	$\frac{r_2 Q_2}{k} \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}}$
PS		$kr_2 \sqrt{Q_1 Q_2}$
SS		$kr_2 \sqrt{Q_1 Q_2}$
PP		$\frac{r_2 Q_2}{k} \sqrt{\frac{Q_2}{Q_1}}$

※ $\frac{1}{k^2} \frac{Q_2}{Q_1} \gg 1$ の場合

⑤ Simよる効率測定結果 (理想電源使用)

「LT-SPICE」を用いてkQ積の確認を行った。

「simetrix/simplis」の要素版(無料)もお勧めです!LT-SPICEより解析速度が早い!

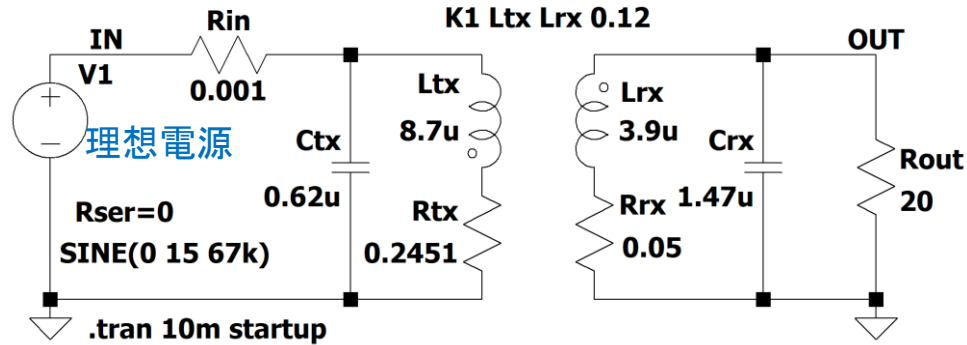


図4-5-1 LT-Spiceシミュレーション回路

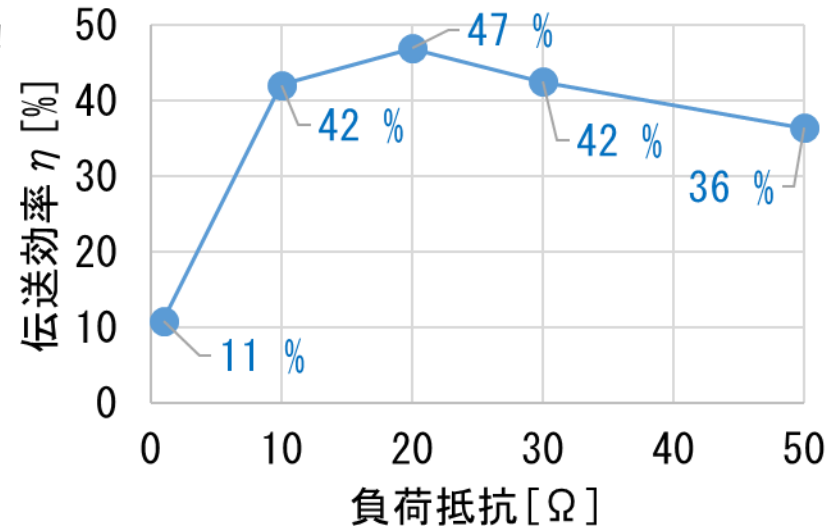


図4-5-2 伝送効率の負荷抵抗特性

表4-5-1 各負荷抵時の測定値(実効値)

項番	Vin[V]	Pin[W]	Vout[V]	Rout[Ω]	Pout[W]	η [%]	備考
1	10.5	2.1	0.5	1	0.2	11	
2	10.5	3.9	4.1	10	1.7	42	
3	10.5	5.5	7.2	20	2.6	47	最大効率
4	10.5	6.5	9.1	30	2.8	42	
5	10.5	8.0	12.0	50	2.9	36	

表4-5-2 理論値との比較

項目	理論値	シミュレーション値
最大効率	47.5%	47%
最適負荷	20.4Ω	20Ω

→最適負荷と最大効率が一致。

⑥ Simによる効率測定結果 (IH電源使用) (1/4)

IH電源を使用時の伝送効率を「シミュレーション」し、比較をした。

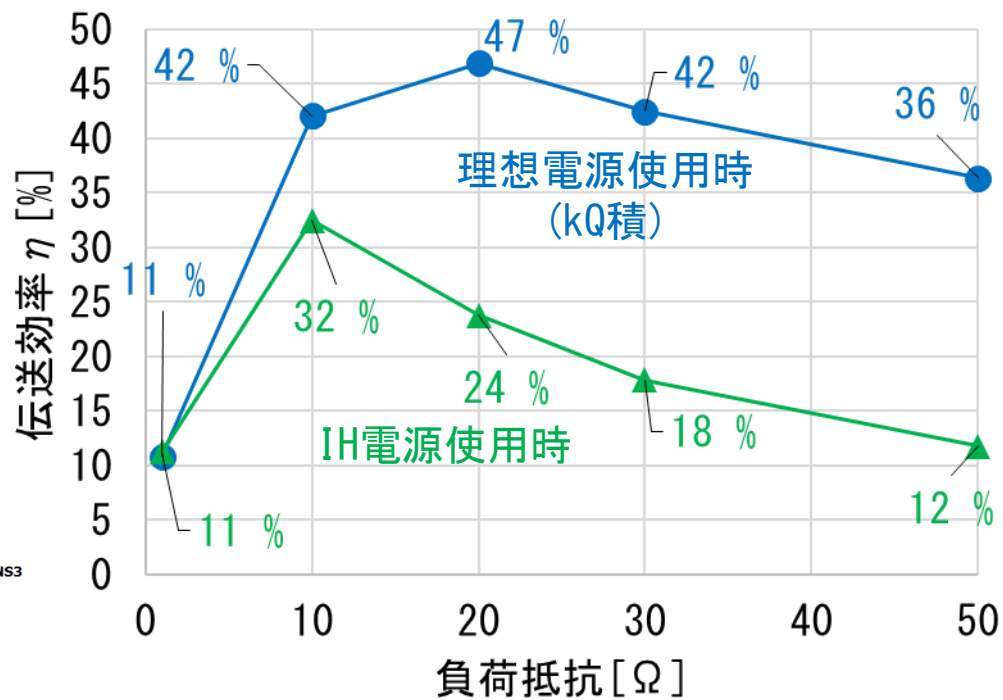
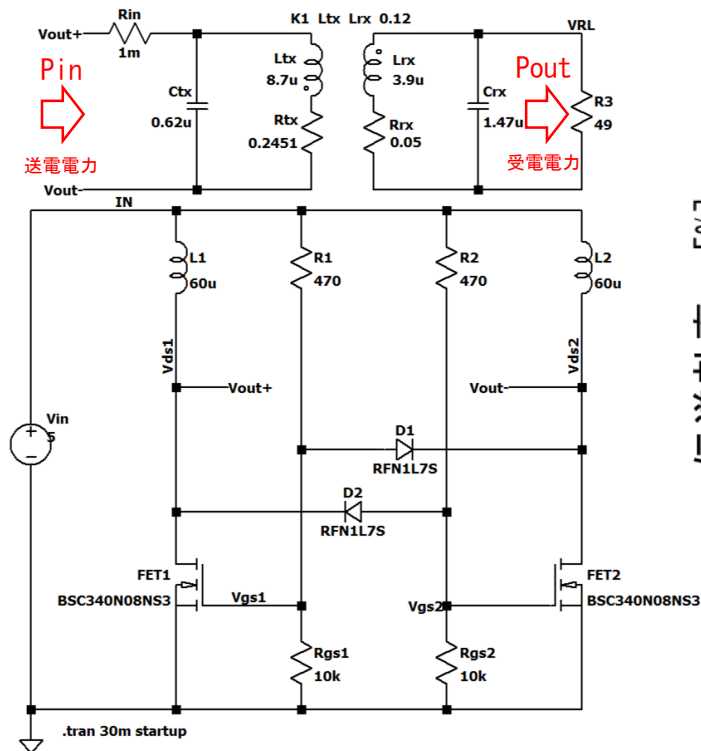


図4-6-1 IH電源使用時のシミュレーション回路

図4-6-2 電源の違いによる電力伝送効率の違い
※IH電源の効率は含まれていない。 $\eta = P_{out}/P_{in}$

最大効率が47%→32%、最大効率抵抗値は20Ω→10Ωに低下した。

⑥Simによる効率測定結果 (IH電源使用) (2/4)

効率低下の原因を探るべく動作波形を確認した。
シミュレーションにおける各動作時の波形を示す。(負荷抵抗20Ω接続時)

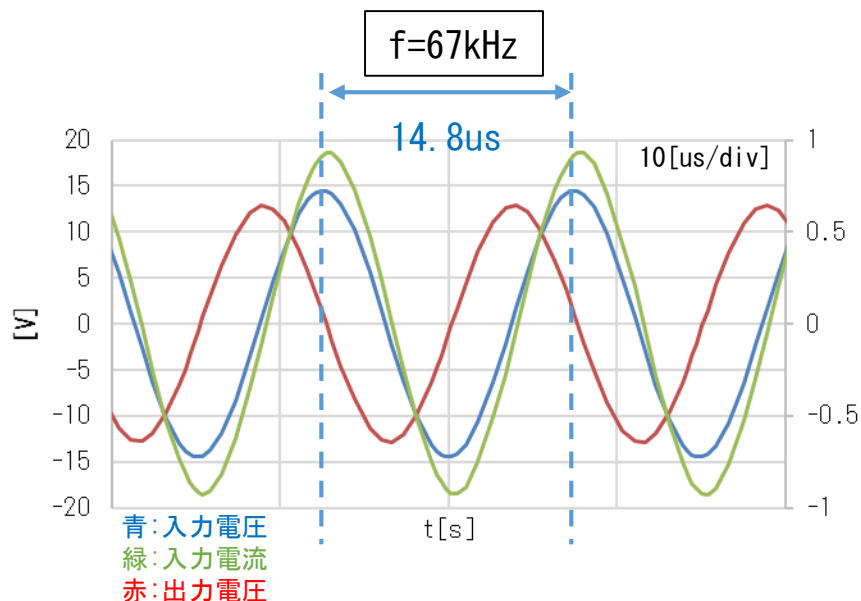


図4-6-3 理想電源使用時

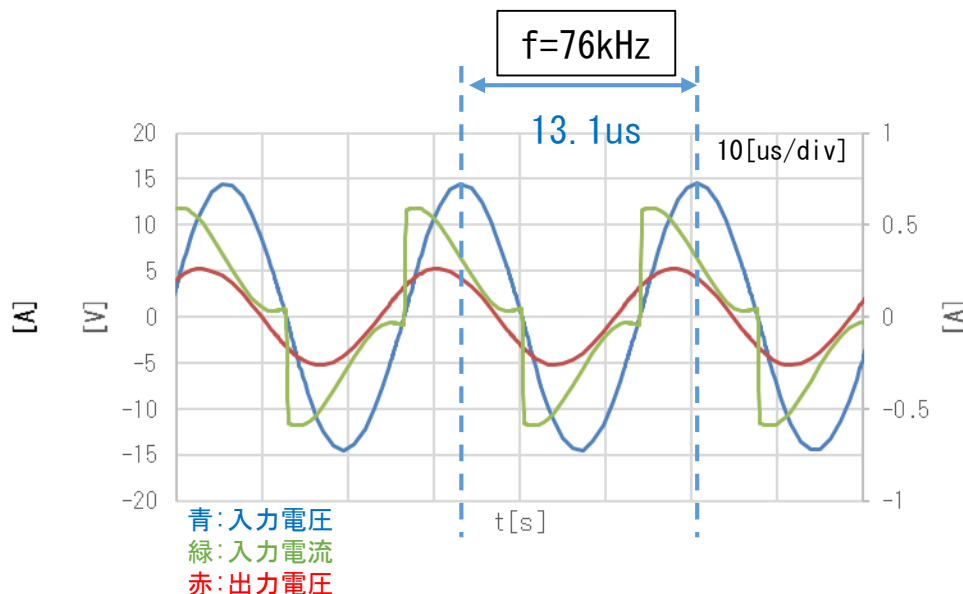


図4-6-4 IH電源使用時

効率低下の原因→駆動周波数が67kHz→76kHzと+12%のずれ。
また、IH電源使用時には入力電流波形が正弦波ではなくなっている。

※この例のようにWPTシステムが理論通り動作できていないときは大抵共振周波数がずれてます。(体験談)

⑥ Simによる効率測定結果 (IH電源使用) (3/4)

IH電源使用時の共振周波数ずれはIH電源のインダクタンスが原因であった。

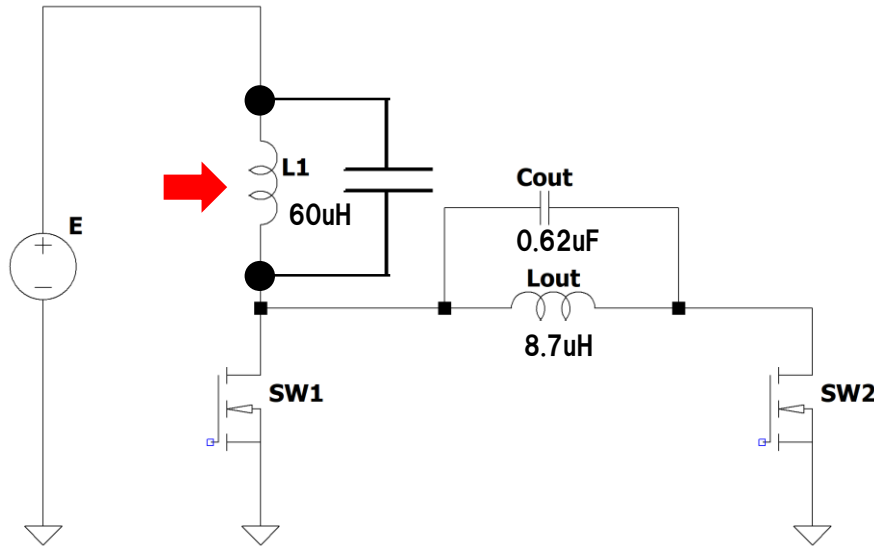


図4-6-5 IH電源使用時のシミュレーション回路

送電側の狙いの共振周波数は

$$f_{tx0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{out}C_{out}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{8.7\mu H \times 0.62\mu F}} = 68\text{kHz}$$

となる。しかしL₁がL_{out}に対して直列に接続しているので実際は

$$f_{tx0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\frac{L_{out}L_1}{L_{out} + L_1}C_{out}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{7.6\mu H \times 0.62\mu F}} = 73\text{kHz}$$

となり、動作させたい共振周波数からずれてしまう。

対策→L1のインダクタンスを打ち消すために並列にコンデンサを接続。

⑥Simによる効率測定結果 (IH電源使用) (4/4)

L_1, L_2 にそれぞれ $C = 94\text{nF}$ ($47\text{nF} \times 2$) を接続し、効率と動作波形を測定した。

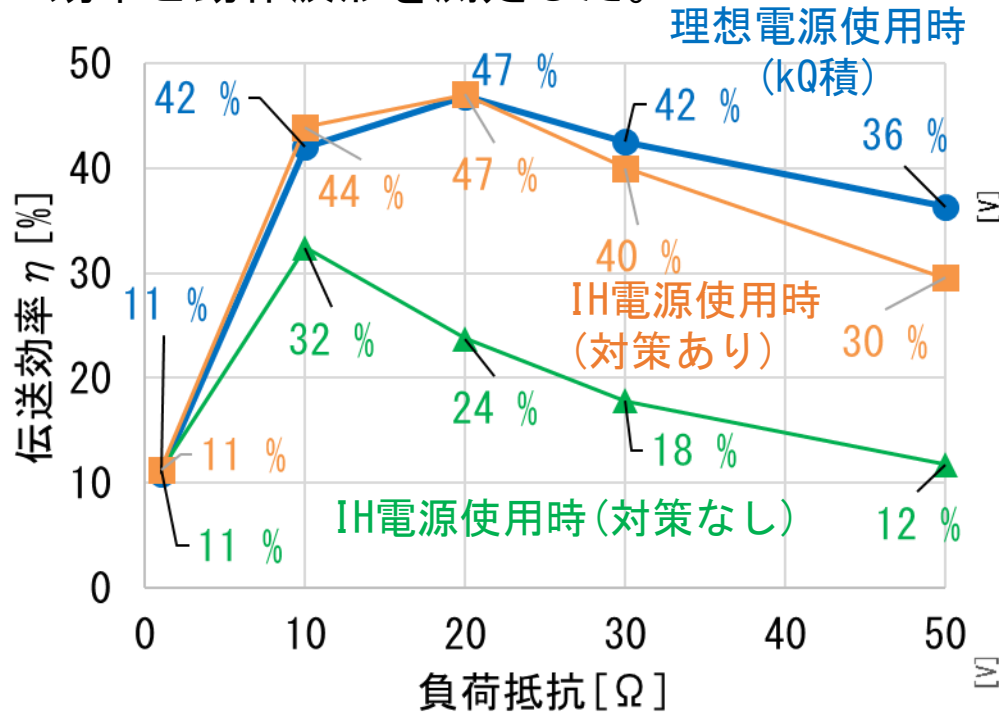
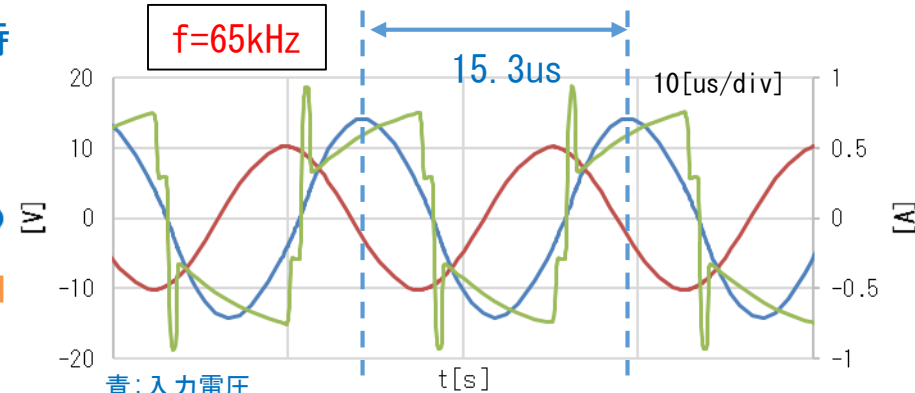


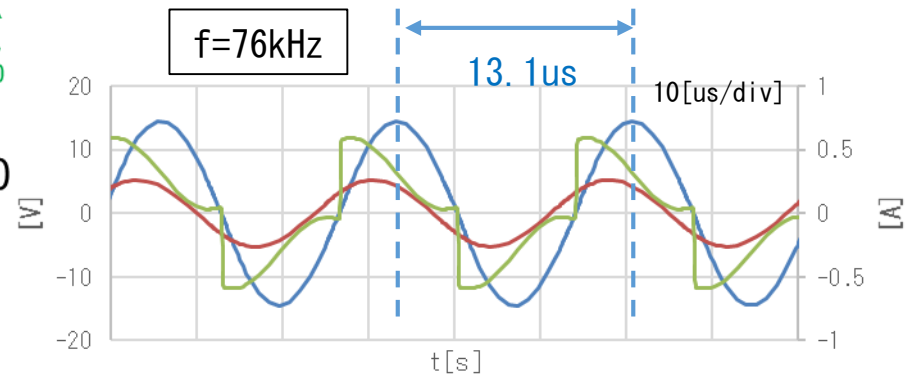
図4-6-6 対策の有無による電力伝送効率の違い

周波数ずれを対策することにより、kQ積による効率と同レベルの効率を達成できた。

(入力電流波形も正弦波に近づいた!)



(a) 並列Cあり (94nF)



(b) 並列Cなし

図4-6-6 コンデンサの有無による動作波形

⑦実測による効率測定結果 (IH電源使用)

電力伝送効率の実測を行い、シミュレーションとの比較を行った。
測定にはオシロスコープを用いた。

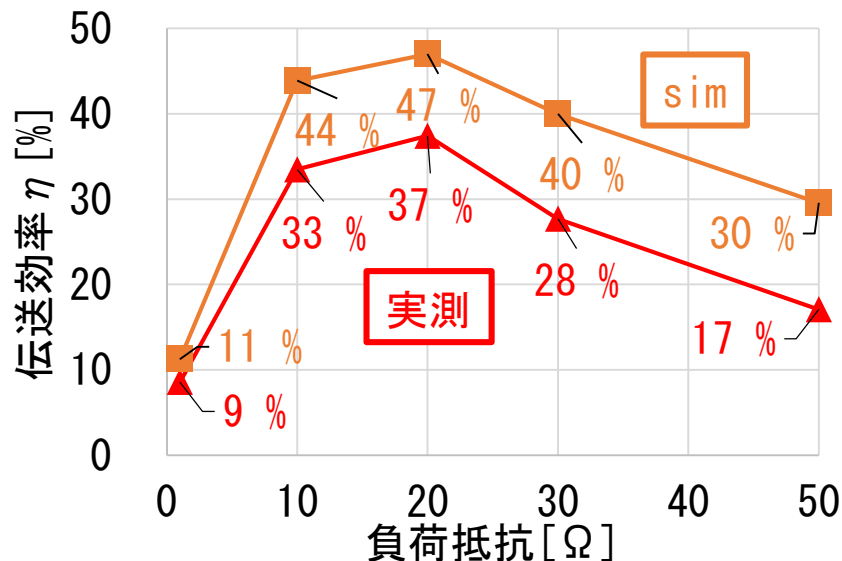


図4-7-1 対策の有無による電力伝送効率の違い

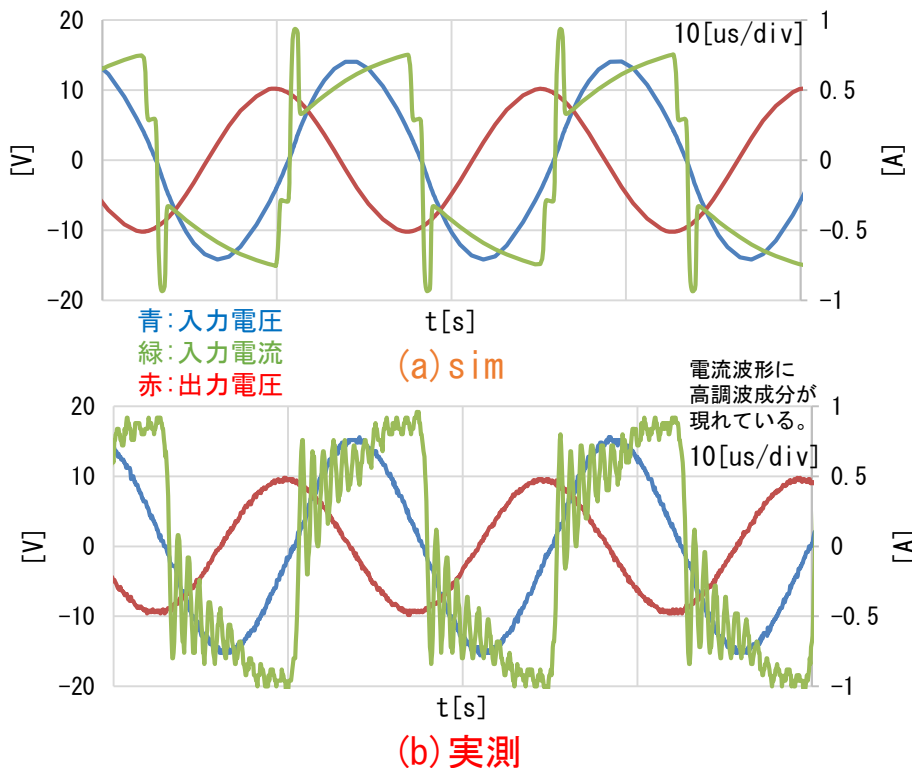


図4-7-2 動作波形の比較 (負荷20Ω)

simと実測ともに負荷抵抗20Ωにおいて最大効率となったが、
最大効率値は実測で37%が最大値となり、kQ積に比べて10%小さい値となった。

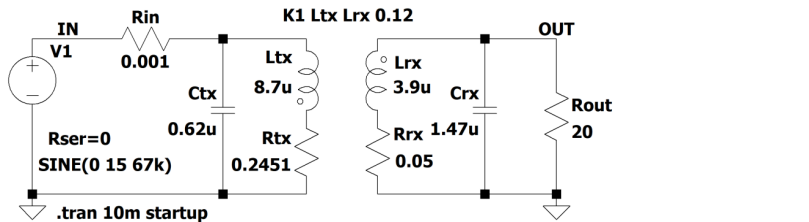
→高周波損失の増加とIH電源内の L_1 , L_2 の抵抗成分が効率低下の原因と考える。

⑧ 整流回路を接続した場合

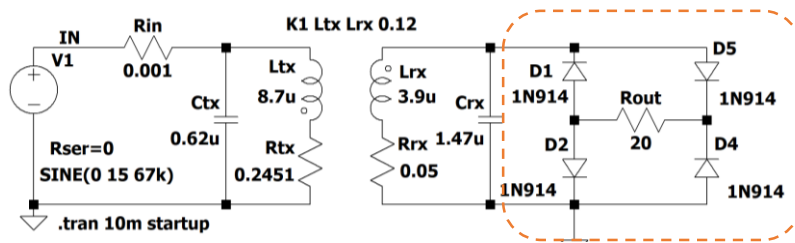
整流回路を接続した場合の効率の変化をシミュレーション上で確認した。

(a), (b) の効率の違いは整流回路により力率が低下することが原因である。

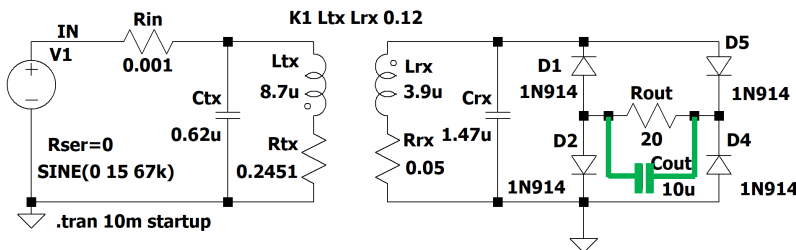
(b), (c) で最適負荷の違いは C_{out} が追加されることで負荷の見かけ上のインピーダンスが変化したからである。



(a) 整流回路無し



(b) 整流回路有り-Cout無



(c) 整流回路有り-Cout有

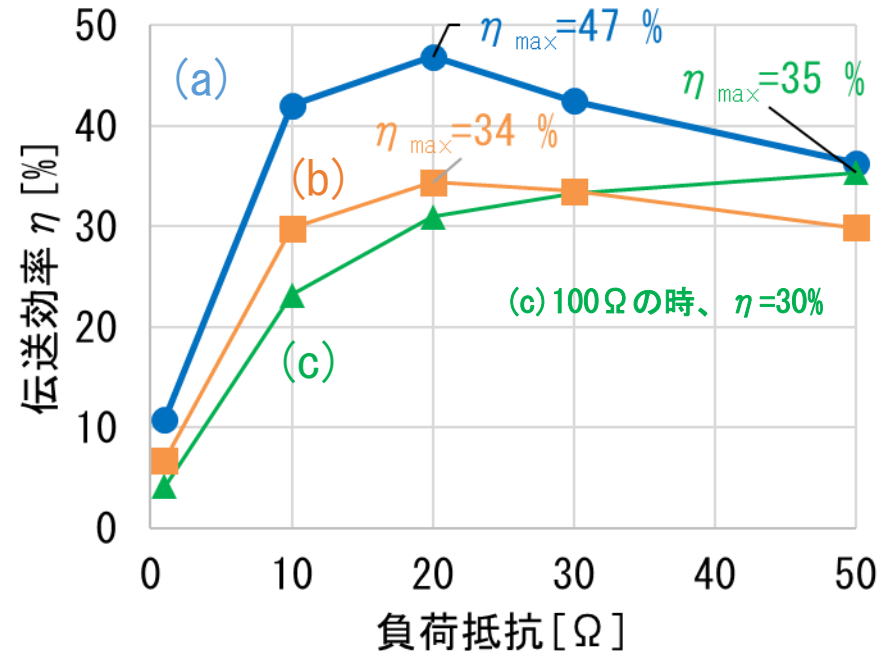


図4-8-1 それぞれの回路の伝送効率の負荷特性

整流回路の種類には全波整流、半波整流、倍電圧、倍電流、同期整流等がある。どの方式が最適か考えてみてください。



⑨ミニ四駆を接続した場合

最後にミニ四駆を接続した場合について述べる。

ミニ四駆の「モーター」は純粋な負荷抵抗ではない。 L と R で構成され、モーターの回転率によりインピーダンスが変化することから、最大効率(最適負荷)で動作させるのは非常に難易度が高い。

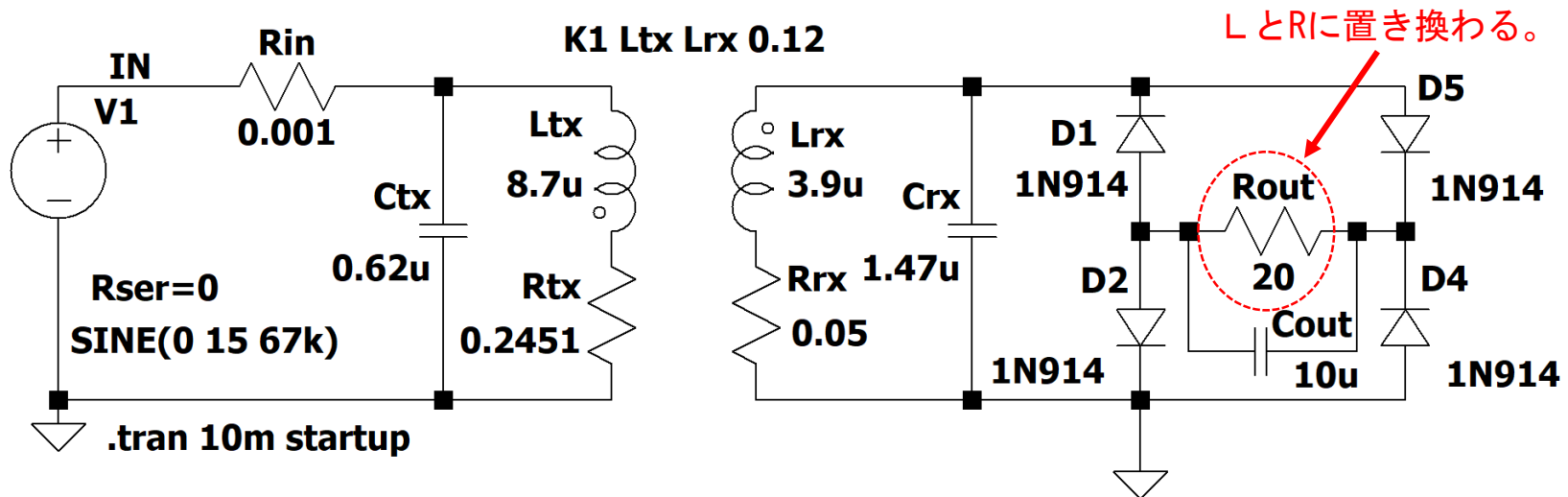


図4-9-1 整流回路込みの回路図

ミニ四駆を速く走らせるためにどれだけ多くの電力を受電させられるかがコンテストのポイントになるので、ミニ四駆を最大効率で動作させるために参加者の方々がどんな知恵と技術を形にするのか。当日、色々教えてください。



インピーダンス変換に関する参考資料:

⑭粟井郁雄、”磁界結合共振器型WPTシステムの設計法—4つのインピーダンス変換法の有効利用—”、信学技報、WPT2016-25, pp. 31-36, 2016年10月.

⑩デモ走行 (1/2)

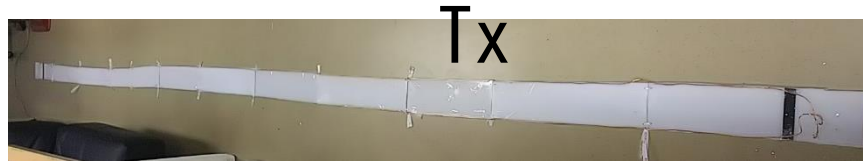
今回の入力直流電源の仕様は「12V-2A」合計24W。ミニ四駆の電池駆動時の電力はおよそ「3V-0.5A」合計1.5Wなのでシステムとしての効率が**6.3%**あれば動作可能である。今回作製したコイルはkQ積で47%、IH電源、整流回路等により効率は低下するが、多少、最適負荷から外れても十分にミニ四駆を走らせる電力を確保できる。

以下に今回のデモシステムの構成を示す。DC/DCコンバータはミニ四駆のモーターの破壊防止と力率改善のために接続した。



IH電源 ¥780

+

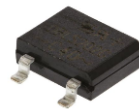


Txコイル+コンデンサ¥????



Rxコイル+コンデンサ¥????

+



※1フルブリッジダイオード+整流コンデンサ¥????

+



※2DC/DC¥290

+



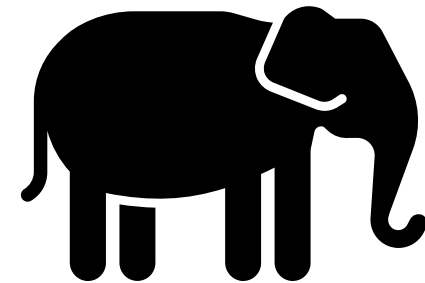
ミニ四駆¥500@AMAZON

※1 DBLS202G RD¥78 @RSオンライン

※2 SODIAL (R) ミニDC-DCコンバータステップダウンモジュール調整可能電源出力0.8-20V@AMAZON

⑩デモ走行 (2/2)

実際の走行時の画像を示す。



4mを6sで走ります。

本資料がデモシステムを作製の参考になれば幸いです。

本資料内でご指摘、ご質問等がありましたら些細な点でもよろしいので御連絡頂けると幸いです。
伊藤宛 ryuji_ito@s-finx.com

おまけ

IH電源解析 (1/5)

①の期間(V_{ds1} が32V→12V)

FET2がONしており、の向きに電流が流れる。
また負荷(L_{out})には の向きに電流が流れる。

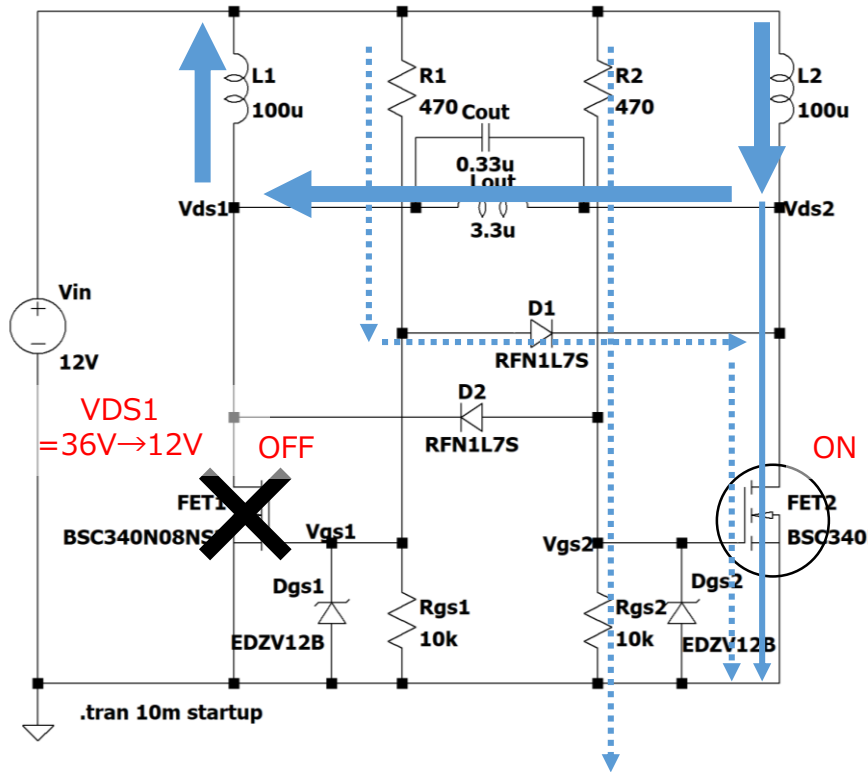


図1 動作解析①

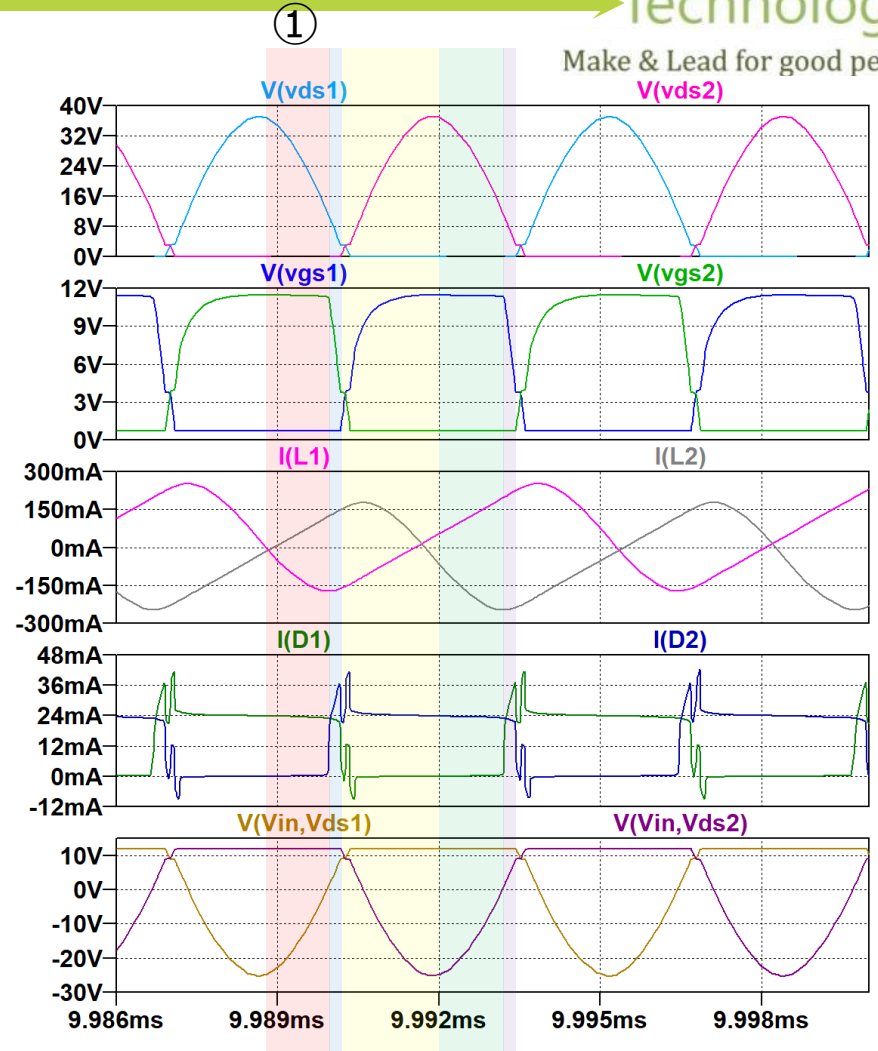


図2 動作波形①

IH電源解析 (2/5)

②の期間(V_{ds1} が12V以下)

V_{ds1} の低下により、D2に電流 $\cdots\cdots\rightarrow$ が流れる。
すると、 R_{gs2} に電流が流れなくなり V_{gs2} が低下、FET2がOFFしていき、D1に電流が流れなくなる。代わりに R_{gs1} の電流 $\cdots\cdots\rightarrow$ が増加、 V_{gs1} 電圧が増加しFET1がONする。

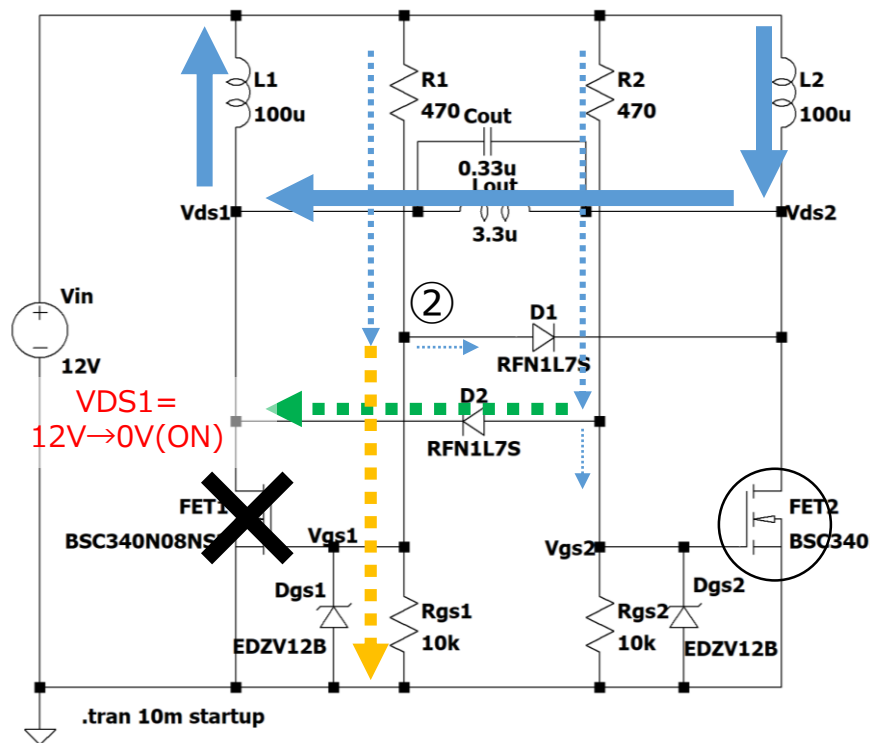


図3 動作解析②

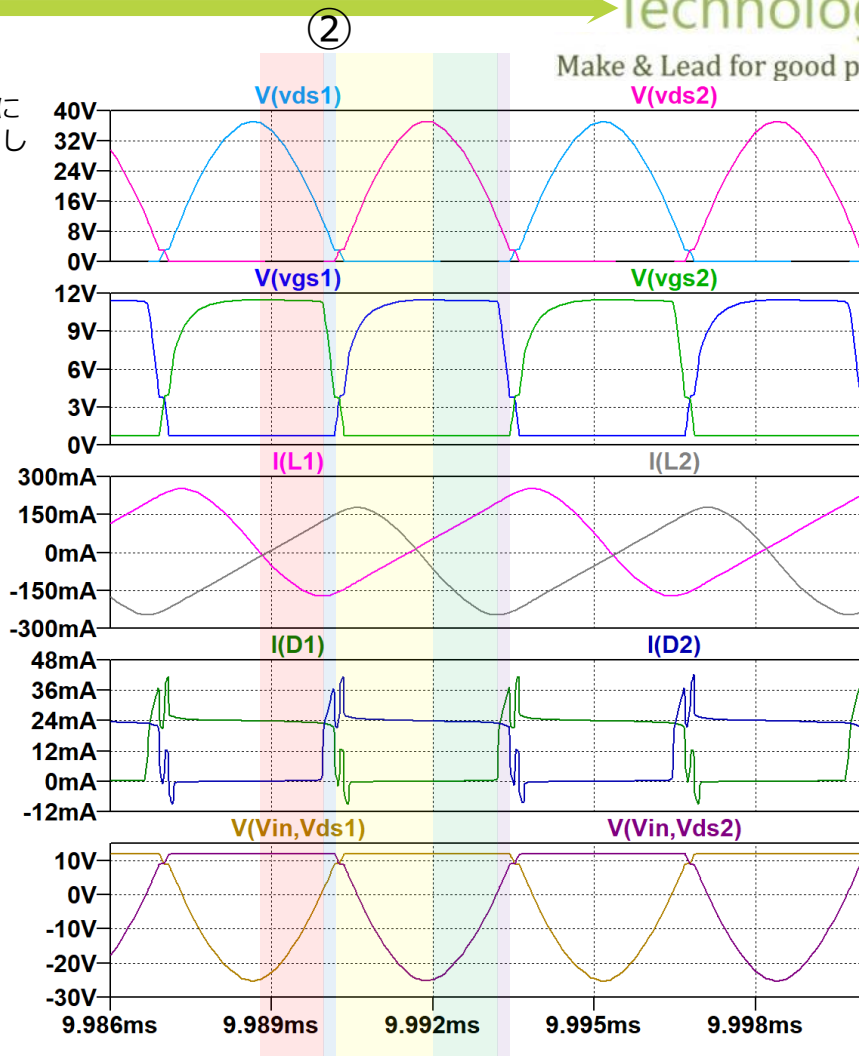


図4 動作波形②

IH電源解析 (3/5)

③の期間(V_{ds2} が $2V \rightarrow 32V$)

FET1がONして、 \rightarrow の向きに電流を流そうとするが、
 インダクタンスが逆向き \rightarrow に電流を流し続けるので流れない。
 インダクタンスがエネルギーを放出すると転流し④の期間に移行する。

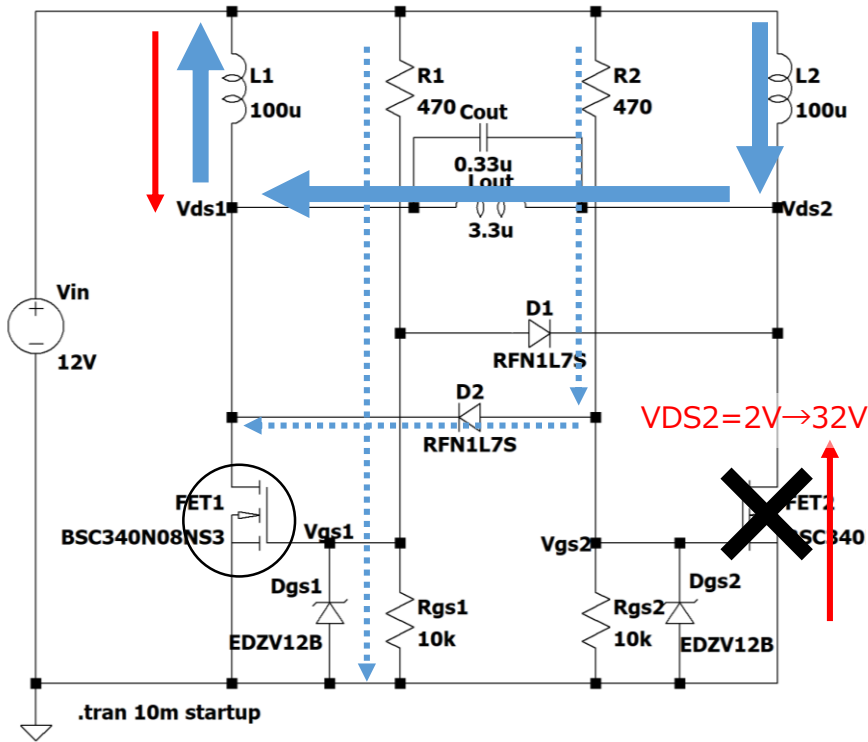


図5 動作解析③

③

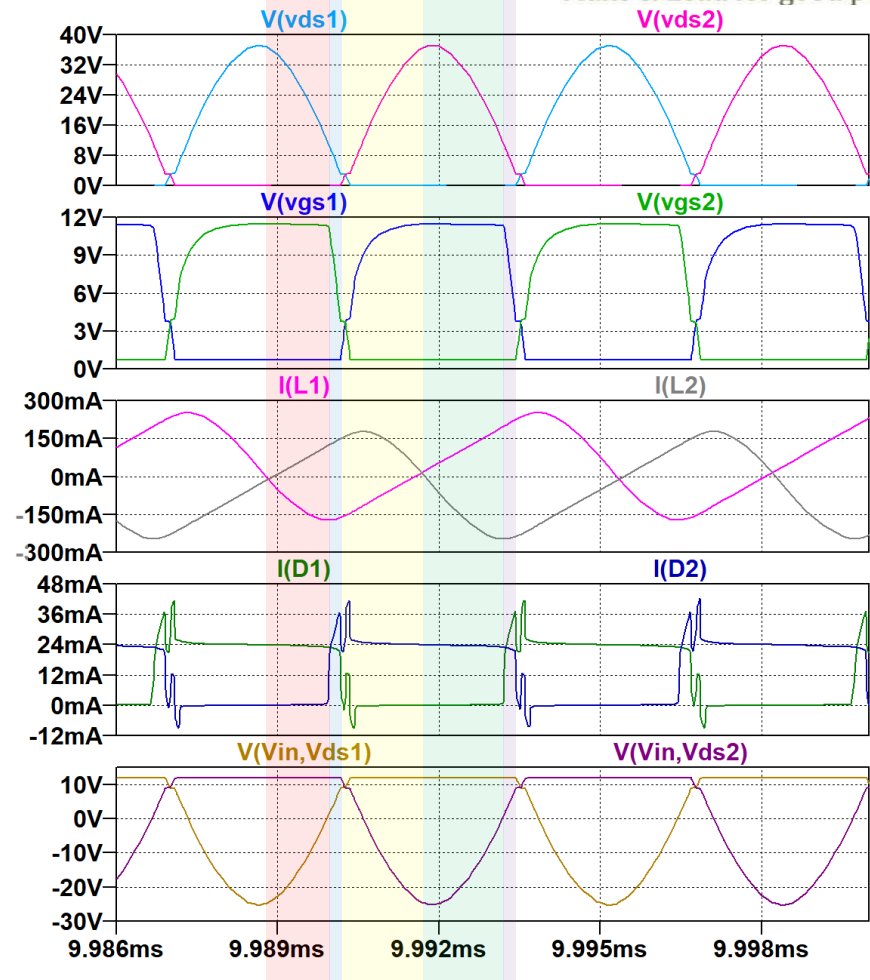


図6 動作波形③

IH電源解析 (4/5)

④の期間(Vds2が32V→ π - π →12V)
 インダクタンスのエネルギー放出が終わり → の向きに電流を流す。

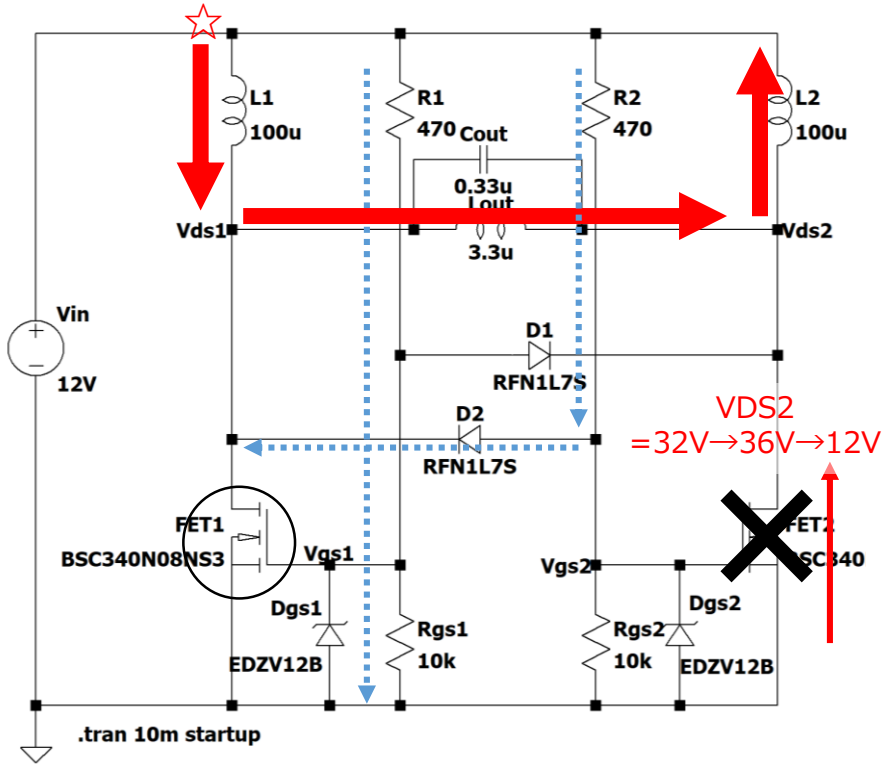


図7 動作解析④

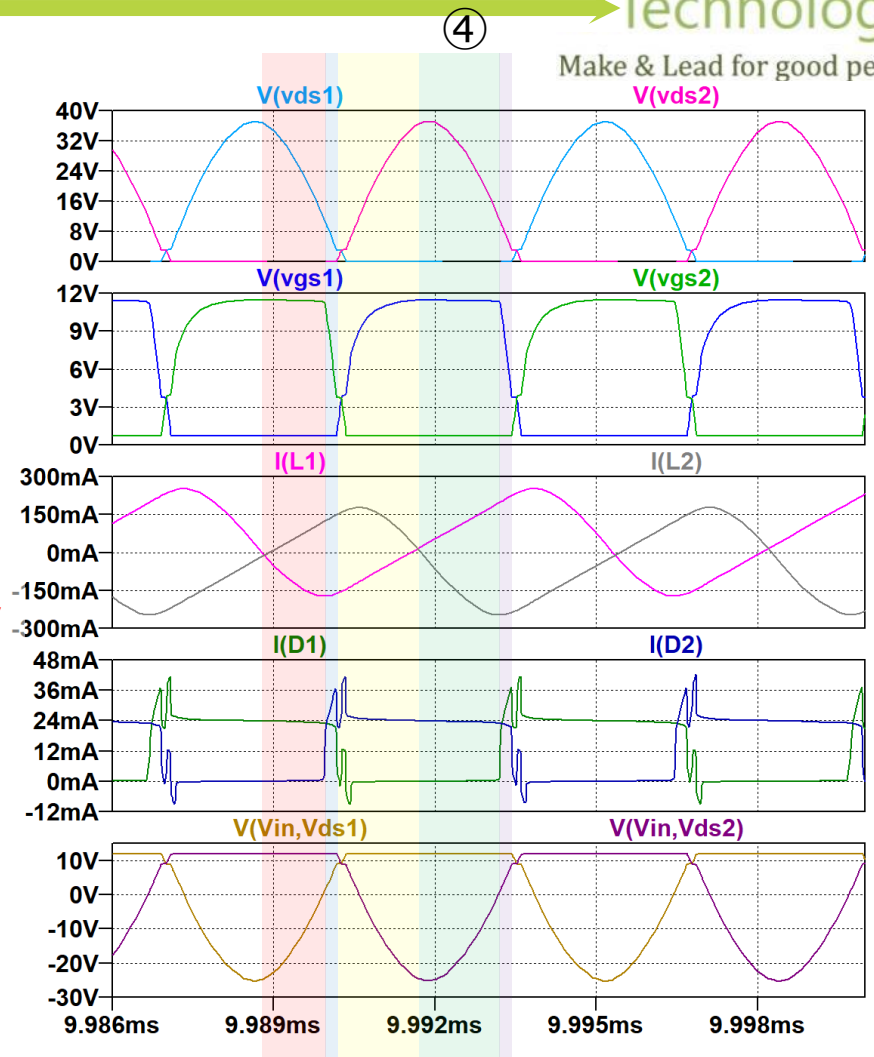


図8 動作波形⑤

IH電源解析 (5/5)

⑤

⑤の期間(V_{ds2} が12V以下)

V_{ds2} の低下により、D1に電流 $\cdots\cdots\rightarrow$ が流れる。
すると、 R_{gs1} に電流が流れなくなり V_{gs1} が低下、FET1がOFFしていき、D2に電流が流れなくなる。代わりに R_{gs2} の電流 $\cdots\cdots\rightarrow$ が増加し、 V_{gs2} 電圧が増加しFET2がONする。

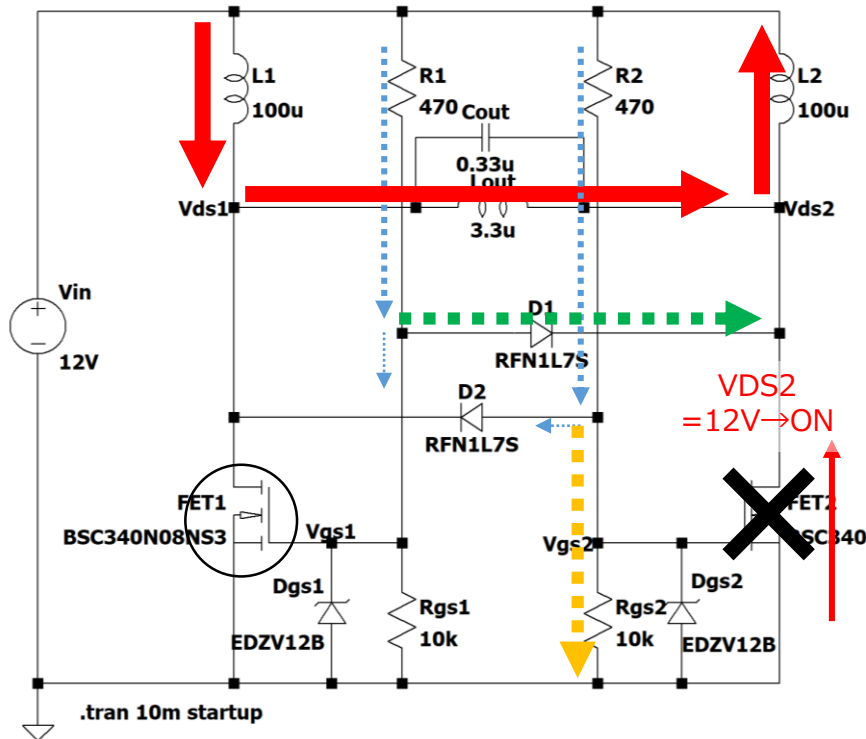


図9 動作解析⑥

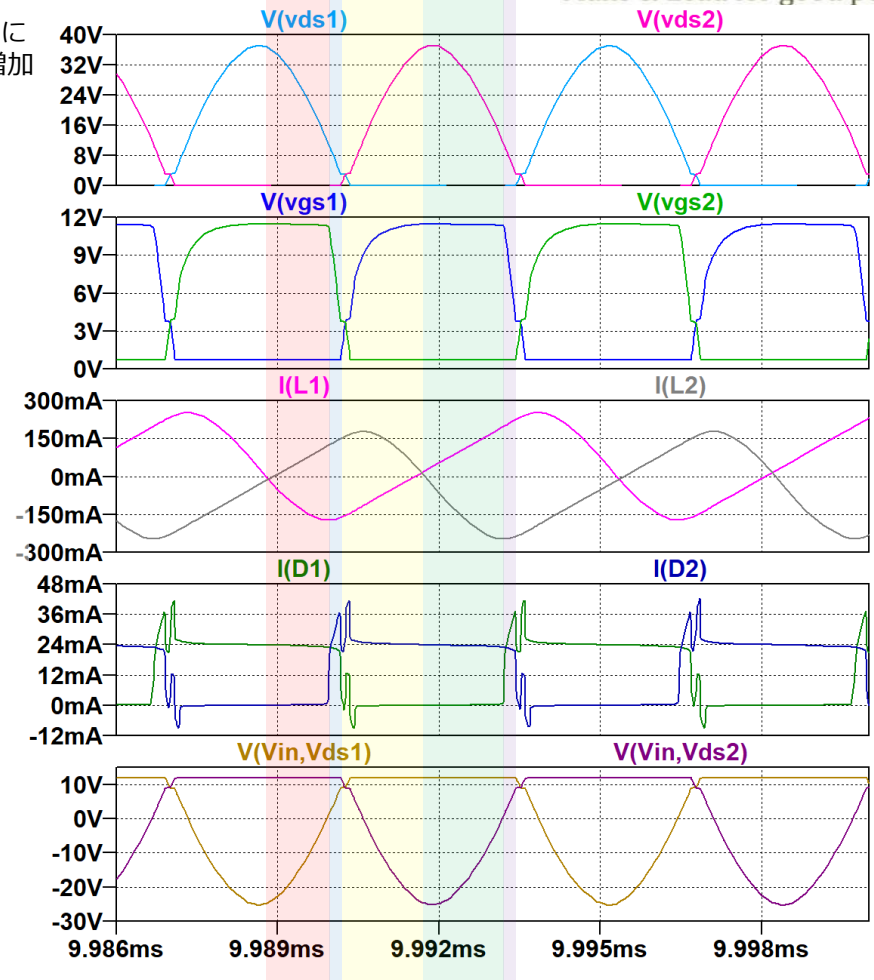


図10 動作波形⑦