

令和 4 年 4 月 16 日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04322

研究課題名(和文) 入出力電圧比10倍以上の高効率双方向DC-DCコンバータの開発

研究課題名(英文) Development of High Efficiency Bidirectional DC-DC Converter with 10 Times or More Input/Output Voltage Ratio

研究代表者

早乙女 英夫 (Saotome, Hideo)

千葉大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：50261938

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)： 研究計画調書に記載した提案回路について、仕様の策定、回路シミュレータによる回路設計および実機試作を行った。入力電圧仕様としては、配電システムと蓄電池との双方向電力伝送を想定し、DC100VおよびDC10Vとした。この仕様に対し、回路の共振用回路定数および変圧器の巻数を設計するアルゴリズムを開発し、これを適用して回路を設計し、実機製作を行い、設計結果の検証を行った。ここでは、変圧器の磁心の磁気飽和回避についても配慮した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、直流電力システムの中核となるDC-DC電力変換装置開発技術の発展に寄与し、直流電力システムのさらなる普及効果、高効率電力変換を実現したエネルギー・マネージメント及び新しい電力変換装置の製品化による産業界への経済的効果をもたらすことが期待できる。また、本研究の成果は、電力変換装置における高周波電力用磁気デバイスの新たな設計指針を構築する材料となり、パワーエレクトロニクス技術における磁気デバイス解析・設計の精度向上をもたらす。

LLC共振現象を適用したDC-DCコンバータの双方向化の際、回路上の枝抵抗値の把握が極めて重要な要因であることを明らかにした点など、産業上の意義は大きい。

研究成果の概要(英文)： Deciding specifications, circuit designing using a simulator, manufacturing trial circuits were carried out for the proposed bidirectional DC-DC converters in the protocol. Considering the DC distribution system and batteries, the input/output voltages were set to DC100V and DC10V. A novel algorithm was worked out for designing the circuits to satisfy the specifications and avoid the magnetic saturation in the applied core.

研究分野：磁気応用工学、パワーエレクトロニクス

キーワード：DC-DCコンバータ 双方向 フェライト 動的磁気損失

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

数ボルトから数百ボルトの電圧範囲で実現される直流配電システムは、地域、工場、マンションなどの集合住宅、戸建て住宅、自動車などへ広く適用される可能性がある。これらの直流配電システムには、通常、蓄電装置が設備され、蓄電装置に充電及び放電を行うことができる双方向 DC-DC コンバータが必要となる。蓄電池は数十ボルト程度の低圧直流電圧であることが多く、一方、配電系統電圧は、配電線のジュール損失の低減から、その 10 倍程度、またはそれ以上になる。また、蓄電池の製造工場では、その品質保証を行う充放電試験において、電力会社からの工場の受電電圧と蓄電池の試験電圧との比に同様の隔たりがあり、高い入出力電圧比の双方向 DC-DC コンバータが必要となる。ハイブリッド車などにおいては、従来の鉛蓄電池に起因する自動車電装品の直流電圧 12V と数百 V 程度のモーター駆動用インバータの直流入力電圧との間の双方向 DC-DC 電力変換が求められる可能性がある。本研究の学術的背景は、これら近未来技術の基盤となる、入出力電圧比が大きく、高効率の双方向 DC-DC コンバータの解析法及び回路設計法の確立が必要とされる点、さらに、従来の単方向 DC-DC コンバータの設計法とは異なる着眼点による設計法が求められる点にある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、入出力電圧比が大きい双方向 DC-DC コンバータの高効率化を実現した回路設計法の構築である。課題の本質は、電圧及び電流比が一桁違う入出力間の直流電力変換において、「双方向電力伝送と高効率化を共に実現すること」である。双方向電力伝送を実現するためには、回路が双方向に対して昇圧機能を有する必要がある。本研究においては LLC 電流共振型回路の適用及び変圧器の巻数比の検討を行う。一方、高効率化を実現するためには、LLC 電流共振型回路による ZVS (Zero Voltage Switching) を利用し、このコンバータの定格負荷時における駆動周波数を数 kHz～数十 kHz の範囲内でできるだけ低くする必要がある。しかしながら、大きな入出力電圧比を実現するには変圧器の適用が必須である中、駆動周波数の低周波数化は、入出力電圧の仕様が定まった条件において、変圧器の電圧時間積に値する磁束の増大、すなわち変圧器の大型化を招く。本研究における課題は、この駆動周波数の低周波数化と変圧器小型化のトレード・オフに対し、回路損失と昇圧機能との関係を定量的に捉えることに着眼点を置いた回路設計法の構築とその有効性の検証にある。コンバータの損失を考慮した双方向昇圧機能動作を解析・検証するため、コンバータの半導体素子のオン抵抗、変圧器の巻線抵抗、コンデンサの等価直列抵抗 (ESR)、基板の配線抵抗を考慮した回路シミュレーションを行う。これらの抵抗値の定量的考慮は、コンバータの双方向電力伝送動作を実現する上で極めて重要である。また、変圧器の鉄損を定量的に算出する高周波磁性体の鉄損モデルを回路へ適用する。以上の課題を総合的に捉え、双方向電力伝送と高効率化を共に実現するコンバータ回路の設計法を構築する。

3. 研究の方法

本研究の対象となる DC-DC コンバータの回路動作及び設計検証例として、図 1 (a)～(d) に示す 4 種の回路を提案した。各回路の左側が高圧側、右側が低圧側で、それぞれに H (High) および L (Low) の添字を用いて各回路定数を表している。高圧側および低圧側直流電圧 V_H および V_L は、例えば、400V および 24V というように 10 倍以上の電圧比であることを想定している。この電圧比は、主として変圧器の巻数比 N_H / N_L によって実現している。この電圧比のため、低圧側は大電流であるのに対して高圧側は小電流となることから、図 1 (a)～(d) の高圧側はすべて同一の半波入出回路とした。図 1 (a) は、昇圧機能を有する LLC 電流共振形 DC-DC コンバータ回路を変圧器に対して対称に構成したもので、本研究における解析の基本回路である。変圧器には、エアギャップ付きフェライト鉄心、もしくは、低透磁率の圧粉鉄心の適用を考え、高圧側及び低圧側のインダクタンス L_H および L_L は、変圧器の漏れインダクタンスを利用し、変圧器とこれらインダクタは一体型 (インテグレーション) の設定とする。変圧器の相互インダクタンスは L_M とし、巻数比 N_H / N_L の部分は、等価回路上、理想変圧器とした。図 1 (a) では大電流となる低圧側も高圧側と同様の回路構成としたが、半波入出力回路では入出力電流の平均値に対して瞬時電流の波高値及び実効値が大きくなり、FET チャネル抵抗のジュール損失が大きくなる。そこで、低圧側には、大電流に対応させるため、全波入出力が行える図 1 (b)～(d) に示す回路を実用検討対象とする。

これらの回路に対して、回路シミュレーションおよび試作・実験検証を行い、回路設計アルゴリズムの構築を行った。

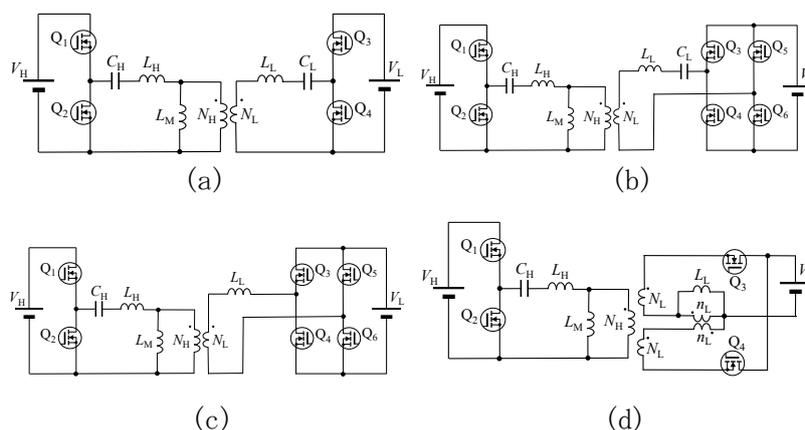


図1 双方向 DC-DC コンバータの主回路構成 (変圧器とインダクタは一体化して実現)

4. 研究成果

当初提案した4つの回路トポロジーのうち、研究計画調書に記載した図1(c)の回路が本研究目的において最も適したコンバータ回路であることが分かった。本回路の各枝 (ブランチ) における抵抗成分 (FET オン抵抗, 磁気デバイス巻線抵抗, フィルムコンデンサおよび電解コンデンサの ESR, 配線抵抗など) を実験的に精査し, それらの定量的精密測定を行った。特に, 電解コンデンサの ESR による損失は他の抵抗損失に比較して大きく, この ESR 値測定が重要であり, LCR メータによる測定では直流電圧依存性を考慮できないことから, 直流バイアス下における測定回路を提案した。磁気デバイスの巻線抵抗値は周波数依存性があるが, この中で近接効果による部分は巻線配置構造に依存するので, 巻線配置を変えた磁気デバイスの試作と有限要素法による解析から, 交流抵抗が比較的小さくなる巻線配置構造を見出した。これらの各枝抵抗を把握することで, 本回路の実測損失が説明できることをシミュレーションと実験との比較から明らかにした。以上より, 本回路の仕様から各回路定数を設計できる。

また, 研究計画調書に記載されていなかった双方向 DC-DC コンバータ回路を研究機期間中に考案し, その代表的な動作特性を確認した。本回路は, 研究代表者らが以前にハイブリッド形 DC-DC コンバータとして開発したものであるが, 逆方向の電力伝送において, 主素子のスイッチングタイミングを工夫することで, 双方向動作が可能となることが分かった。

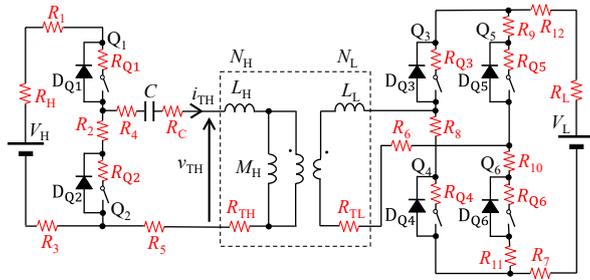
さらに, 高周波電力用磁性体であるフェライトの磁気損失解析においては, 前年度に実験事実として発見した, 「異なる要因の2つの磁気損失があること」を, 今年度には昨年度とは別の Mn-Zn フェライトにおいても認められることを検証し, この実験事実の普遍性を確認した。また, 2つ目の磁気損失にあたる動的磁気損失を考慮した磁化特性モデルの汎用性を確認した。

上記の詳細について以下に述べる。

(1) 双方向に電力伝送可能な DC-DC コンバータの開発

図2に本研究目的において最も適したコンバータ回路である図1(c)のブランチ抵抗と試作回路におけるそれらの値を示す。ここで, 共振用コンデンサ C の ESR 値は, 使用されている誘電体の静電正接, 静電容量および回路の駆動周波数から算出した。また, 直流電圧源として図中に示した部分は電解コンデンサであり, これらの ESR は図3の測定回路の測定電圧 V および測定電流 I_{AC} との比 V_0/I_{AC} から算出した。図2に点線で示した枠はトランスであり, 各巻線はリッツ線を適用した。リッツ線適用で表皮効果による巻線の交流抵抗値を抑制することはできるが, 近接効果による等価交流抵抗値の増加は抑制できない。よって, 各巻線のコア内配置構造に依存する交流抵抗値を LCR メータで測定した。このように, できるだけ厳密に回路のブランチ抵抗値を把握することで回路動作の定量的把握が可能となり, 図4に示すように, 実測波形とシミュレーション波形の整合がとれるようになった。本研究により, ブランチ抵抗値の精度がコンバータの最大出力電力を支配することが明らかとなった。コンバータの出力電圧は一定に保たれた状態で負荷が変動するした場合, 回路の駆動周波数を制御する必要がある。逆に言えば, 駆動周波数制御により出力電圧を一定に保っている。図5はこの特性を示すもので, 実線が実測値, 点線がシミュレーション結果である。両者が一致していることが分かり, これは, 駆動周波数の設計において, ブランチ抵抗値の定量的把握が極めて重要であることを示している。

以上の設計の裏付け要因を元に, LLC 形双方向 DC-DC コンバータの設計アルゴリズムが構築できた。



R_{Q1}	119	R_4	1.3
R_{Q2}	119	R_5	1.1
R_{Q3}	2.2	R_6	1.8
R_{Q4}	2.7	R_7	1.6
R_{Q5}	2.2	R_8	0.5
R_{Q6}	2.2	R_9	0.5
R_1	4.4	R_{10}	0.4
R_2	1.7	R_{11}	0.6
R_3	3.0	R_{12}	0.5

図2 図1(c)回路のブランチ抵抗と試作回路におけるそれらの値 (mΩ)

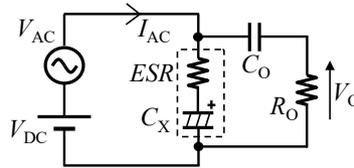
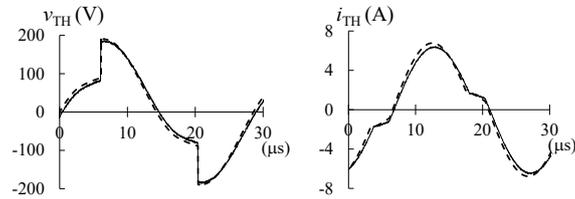
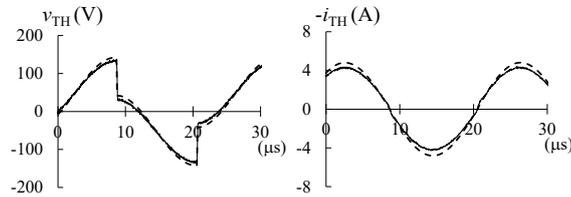


図3 電解コンデンサの ESR 測定回路 ($C_o = 6.8 (\mu F)$, $R_o = 100 (k\Omega)$)

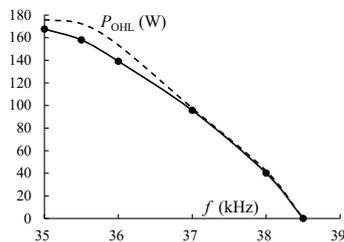


(a) 電力伝送方向 $V_H \Rightarrow V_L$ (回路駆動周波数=35 (kHz))

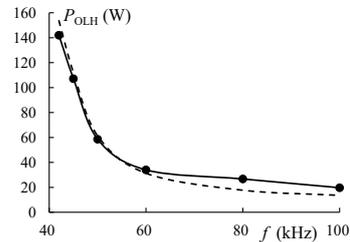


(b) 電力伝送方向 $V_L \Rightarrow V_H$ (回路駆動周波数=42 (kHz))

図4 変圧器の電圧・電流波形 実験波形：実線，シミュレーション波形：点線



(a)電力伝送方向 $V_H \Rightarrow V_L$



(b)電力伝送方向 $V_L \Rightarrow V_H$

図5 出力特性

(2) 低リップル形双方向 DC-DC コンバータの開発

LLC 形コンバータは回路共振により ZVS (ゼロ電圧スイッチング) を実現することでスイッチング損失を低減している一方、平滑用電解コンデンサのリップル電流が大きく、その ESR による損失が低電圧・大電流時に大きくなる。この問題点を解決できる回路として、ハイブリッド形 DC-DC コンバータ (図6) があるが、その双方向動作の実現はされていない。本研究では、上記

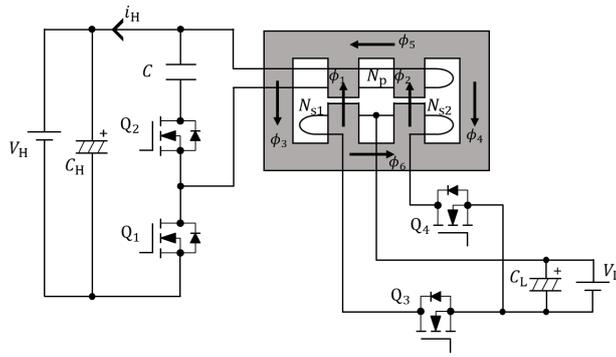


図6 ハイブリッド形双方向 DC-DC コンバータ

(1)に示した LLC 形双方向 DC-DC コンバータに加え、このハイブリッド形コンバータの双方向化への試みを行い、その基本動作を確認した。

(3) フェライトの電力損失

Mn-Zn 系フェライト 2 種について B-H ループを測定し、低周波励磁時における所謂直流ヒステリシスを分離したものおよびそれ以外の B-H 特性をそれぞれ図7の左図および右図に示す。ここで、実線と点線で2種のフェライトそれぞれを示している。また、これらの図において水色、黄色および赤色の線はそれぞれフェライトの温度が 20℃、40℃および 60℃の場合を示し、2種のフェライトとも、左図と右図の温度特性が異なる実験結果を得た。このことは、B-H ループの面積が磁気損失であるので、直流ヒステリシス損失と右図の面積に当たる動的磁気損失は異なる温度特性を示しており、両者の物理的要因が異なっている可能性を示唆するものである。

このことは、フェライト製造側には新しい損失評価パラメータを与え、パワーエレクトロニクス回路開発者側には2つの磁気損失を反映させたフェライトコアの等価回路を与えるものである。

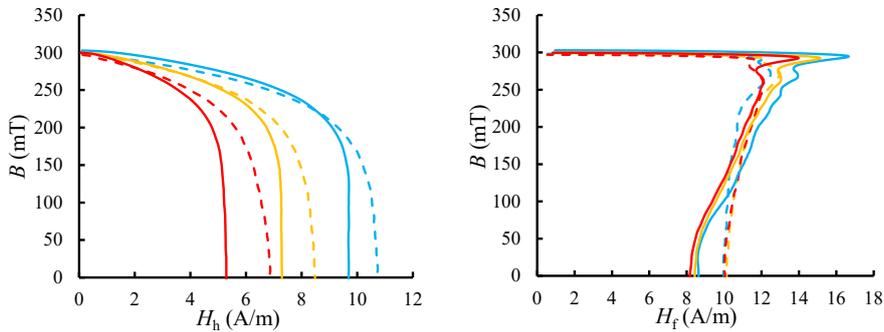


図7 フェライトの2つの磁気損失

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Saotome H., Washizu T.	4. 巻 44
2. 論文標題 Decomposition of Magnetic Field Intensity in Ferrite Based on Time Derivative of Magnetic Flux Density and Power Loss	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of the Magnetics Society of Japan	6. 最初と最後の頁 102 ~ 107
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3379/msjmag.2007R004	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 北野宏希, 五来一樹, 清水優太, 鈴木黎矢, 早乙女英夫
2. 発表標題 LLC共振・センタータップ方式双方向DC-DCコンバータ
3. 学会等名 電気学会・半導体電力変換研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鷲巣樹, 早乙女英夫
2. 発表標題 dB/dtによって分離されたフェライト内各磁界成分の温度特性
3. 学会等名 電気学会・マグネティックス研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 吉田 慎吾, 早乙女 英夫, 宮城 大輔
2. 発表標題 磁界分離解析に基づくフェライトの磁気損失に関する考察
3. 学会等名 電気学会・マグネティックス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀬川 康樹, 早乙女 英夫, 宮城 大輔
2. 発表標題 ハイブリッド型DC-DCコンバータの双方向化の検討
3. 学会等名 電気学会・マグネティックス研究会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------