

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5464451号
(P5464451)

(45) 発行日 平成26年4月9日(2014.4.9)

(24) 登録日 平成26年1月31日(2014.1.31)

(51) Int.Cl.	F I
HO2M 3/155 (2006.01)	HO2M 3/155 C
	HO2M 3/155 Q
	HO2M 3/155 F
	HO2M 3/155 W

請求項の数 6 (全 18 頁)

(21) 出願番号	特願2011-521756 (P2011-521756)	(73) 特許権者	000003207
(86) (22) 出願日	平成21年7月10日 (2009.7.10)		トヨタ自動車株式会社
(86) 国際出願番号	PCT/JP2009/062594		愛知県豊田市トヨタ町1番地
(87) 国際公開番号	W02011/004492	(74) 代理人	100079108
(87) 国際公開日	平成23年1月13日 (2011.1.13)		弁理士 稲葉 良幸
審査請求日	平成23年11月15日 (2011.11.15)	(74) 代理人	100109346
			弁理士 大貫 敏史
		(74) 代理人	100117189
			弁理士 江口 昭彦
		(72) 発明者	長谷川 貴彦
			愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内
		(72) 発明者	北村 伸之
			愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 コンバータ制御装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

燃料電池の出力電圧を制御する主昇圧回路と補助回路とを備えたソフトスイッチングコンバータの制御装置であって、

前記補助回路は、

補助スイッチと、

主昇圧回路を構成する主スイッチに並列に接続され、かつ前記燃料電池の高電位側の端子と低電位側の端子に接続された、クランプダイオードとスナバコンデンサとが直列接続された第一直列接続体とを備え、

前記コンバータ制御装置は、

前記主スイッチをターンオフした場合に、前記クランプダイオードによってクランプされる前記スナバコンデンサの両端電圧を検知する検知手段と、

前記スナバコンデンサの両端電圧と設定された正常電圧閾値とを比較し、該両端電圧が正常電圧閾値を超えている場合に前記補助回路に異常が生じていると判断する判断手段と、

前記補助回路に異常が生じていると判断された場合に、ハードスイッチングを行う前記主昇圧回路の前記主スイッチに流れる電流の変化率を閾値変化率以下に制限するフェールセーフ手段と

を具備する、コンバータ制御装置。

【請求項2】

前記スナバコンデンサ両端電圧と前記主スイッチの両端電圧との差分電圧を求める差分導

出手段をさらに備え、

前記判断手段は、前記差分電圧と設定された故障判定閾値とを比較し、該差分電圧が該故障判定閾値を超えている場合に前記補助回路に異常が生じていると判断する、請求項 1 に記載のコンバータ制御装置。

【請求項 3】

前記フェールセーフ手段は、前記補助回路に異常が生じていると判断された場合のゲート抵抗を、前記補助回路が正常であると判断された場合の前記主スイッチのゲート抵抗よりも大な値に設定することで、前記電流の変化率を閾値変化率以下に制限する、請求項 1 または 2 に記載のコンバータ制御装置。

【請求項 4】

前記補助回路は、

前記クランプダイオードと前記スナバコンデンサとの接続部位と、前記主コイルの一端との間に接続された、ダイオードと補助コイルと前記補助スイッチとが直列接続された第二直列接続体をさらに備える、請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 の請求項に記載のコンバータ制御装置。

【請求項 5】

前記主昇圧回路は、

一端が前記燃料電池の高電位側の端子に接続された主コイルと、

アノードが前記主コイルの他端に接続された第一ダイオードと、

前記第一ダイオードのカソードと前記燃料電池の低電位側の端子に接続された平滑コンデンサとをさらに備え、

前記主スイッチは、一端が前記主コイルの他端に接続され、他端が前記燃料電池の低電位側の端子に接続されている、請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 の請求項に記載のコンバータ制御装置。

【請求項 6】

前記ソフトスイッチングコンバータは、

前記補助回路を、相毎に備えた多相ソフトスイッチングコンバータであり、

前記各相の補助回路を構成する補助コイルは、全相の補助回路について共通化されている、請求項 1 に記載のコンバータ制御装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、燃料電池の出力電圧を制御するコンバータ制御装置に関する。

【背景技術】

【0002】

自動車等に搭載される燃料電池システムにおいては、燃料電池の発電能力を超える急な負荷の変化等に対応するため、動力源として燃料電池とバッテリーとを備えたハイブリッド型の燃料電池システムが種々提案されている。

【0003】

ハイブリッド型の燃料電池システムにおいては、燃料電池の出力電圧やバッテリーの出力電圧を DC / DC コンバータで制御している。このような制御を行う DC / DC コンバータとしては、パワートランジスタ、IGBT、FET等のスイッチング素子を PWM 動作させて電圧の変換を行う形式のものが広く利用されている。DC / DC コンバータは、電子機器の省電力化、小型化及び高性能化に伴い、一層の低損失、高効率及び低ノイズ化が望まれており、特に、PWM 動作に伴うスイッチング損失やスイッチングサージの低減が望まれている。

【0004】

このようなスイッチング損失、スイッチングサージを低減させる技術のひとつにソフトスイッチング技術がある。ここで、ソフトスイッチングは、ZVS (Zero Voltage Switching) 又は ZCS (Zero Current Switching) を実現するためのスイッチング方式であり、パ

10

20

30

40

50

ワー半導体デバイスのスイッチング損失やそれに与えるストレスが低い。これに対してパワー半導体デバイスの持つスイッチング機能により電圧・電流を直接ターンオン・オフするスイッチング方式はハードスイッチングと称されている。以下の記述においてはZVS/ZCSの双方もしくはその一方が実現されている方式をソフトスイッチング、それ以外をハードスイッチングという。

【0005】

ソフトスイッチングは、例えばインダクタ、スイッチング素子、ダイオードを備えた一般的な昇降圧型DC/DCコンバータにスイッチング損失を低減するための補助回路を付加したもの（いわゆるソフトスイッチングコンバータ）によって実現される（例えば特許文献1参照）。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】特開2005-102438号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

このようなソフトスイッチングコンバータにおいて、補助回路に異常が生じると、ソフトスイッチングを実現できないため、かかる補助回路の異常を簡易かつ早期に検知する必要がある。

20

【0008】

本発明は以上説明した事情を鑑みてなされたものであり、ソフトスイッチングコンバータを構成する補助回路の異常を、簡易かつ早期に検知することが可能なコンバータ制御装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

上記課題を解決するため、本発明に係るコンバータ制御装置は、燃料電池の出力電圧を制御する主昇圧回路と補助回路とを備えたソフトスイッチングコンバータの制御装置であって、前記補助回路は、前記主昇圧回路を構成する主スイッチに並列に接続された補助スイッチと、前記主スイッチに並列に接続され、かつ前記燃料電池の高電位側の端子と低電位側の端子に接続された、クランプダイオードとスナバコンデンサとが直列接続された第一直列接続体とを備え、前記コンバータ制御装置は、前記主スイッチをターンオフした場合に、前記クランプダイオードによってクランプされる前記スナバコンデンサの両端電圧を検知する検知手段と、前記スナバコンデンサの両端電圧と設定された正常電圧閾値とを比較し、該両端電圧が正常電圧閾値を超えている場合に前期補助回路に異常が生じていると判断する判断手段とを具備することを特徴とする。

30

【0010】

かかる構成によれば、スナバコンデンサの両端電圧が正常電圧閾値を超えている場合には、補助回路に異常（オープン故障など）が生じていると判断する。ここで、主スイッチに大きなサージ電圧 V_{su} が発生すると（図14参照）、主スイッチに大きなエネルギー損失が生じ、最悪の場合には異常過熱により素子破壊を招来する、あるいは素子の絶縁破壊を惹き起こす可能性があるが、上記構成によれば、補助回路の異常を簡易かつ早期に検知することができるため、迅速なフェールセーフ動作への移行が可能となり、これにより素子破壊などの問題を未然に防止することが可能となる。

40

【0011】

ここで、上記構成にあつては、前記スナバコンデンサ両端電圧と前記主スイッチの両端電圧との差分電圧を求める差分導出手段をさらに備え、前記判断手段は、前記差分電圧と設定された故障判定閾値とを比較し、該差分電圧が該故障判定値を超えている場合に前記補助回路に異常が生じていると判断する態様が好ましい。

【0012】

50

また、上記構成にあつては、前記補助回路に異常が生じていると判断された場合に、前記主昇圧回路の動作を停止するフェールセーフ手段をさらに具備する態様が好ましい。

【0013】

また、上記構成にあつては、前記補助回路に異常が生じていると判断された場合に、前記主昇圧回路の前記主スイッチに流れる電流の変化率を閾値変化率以下に制限するフェールセーフ手段をさらに具備する態様が好ましい。

【0014】

また、上記構成にあつては、前記フェールセーフ手段は、前記補助回路に異常が生じていると判断された場合のゲート抵抗を、前記補助回路が正常であると判断された場合の前記主スイッチのゲート抵抗よりも大な値に設定することで、前記電流の変化率を閾値変化率以下に制限する態様であっても良い。

10

【0015】

また、上記構成にあつては、前記フェールセーフ手段は、前記補助回路に異常が生じていると判断された場合の負荷の最大許容値を、前記補助回路が正常であると判断された場合の負荷の最大許容値よりも小さく設定することで、前記電流の変化率を閾値変化率以下に制限する態様も好ましい。

【0016】

さらにまた、上記構成にあつては、前記補助回路は、前記クランプダイオードと前記スナバコンデンサとの接続部位と、前記主コイルの一端との間に接続された、ダイオードと補助コイルと前記補助スイッチとが直列接続された第二直列接続体をさらに備える態様が好ましい。

20

【0017】

また、上記構成にあつては、前記主昇圧回路は、一端が前記燃料電池の高電位側の端子に接続された主コイルと、カソードが前記主コイルの他端に接続された第一ダイオードと、前記第一ダイオードのアノードと前記燃料電池の低電位側の端子に接続された平滑コンデンサとをさらに備え、前記主スイッチは、一端が前記主コイルの他端に接続され、他端が前記燃料電池の低電位側の端子に接続されている態様が好ましい。

【0018】

また、上記構成にあつては、前記ソフトスイッチングコンバータは、前記補助回路を、相毎に備えた多相ソフトスイッチングコンバータであり、前記各相の補助回路を構成する補助コイルは、全相の補助回路について共通化されている態様が好ましい。

30

【発明の効果】

【0019】

本発明によれば、ソフトスイッチングコンバータを構成する補助回路の異常を、簡易かつ早期に検知することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【0020】

【図1】本実施形態に係るFCHVシステムのシステム構成図である。

【図2】同実施形態に係る多相のFCソフトスイッチングコンバータの回路構成を示す図である。

40

【図3】同実施形態に係るFCソフトスイッチングコンバータの1相分の回路構成を示す図である。

【図4】同実施形態に係るソフトスイッチング処理を示すフローチャートである。

【図5】モード1の動作を示す図である。

【図6】モード2の動作を示す図である。

【図7】モード3の動作を示す図である。

【図8】モード4の動作を示す図である。

【図9】モード5の動作を示す図である。

【図10】モード6の動作を示す図である。

【図11】モード5のスナバコンデンサC2の電圧 V_c 、第1スイッチング素子S1にか

50

かる電圧 V_e 、第 1 スイッチング素子 S_1 を流れる電流 I_e の関係を例示した図である。
 【図 1 2】モード 2 からモード 3 への遷移過程における電圧・電流挙動を示す図である。
 【図 1 3】補助回路が正常な場合のスナバコンデンサの両端電圧、第 1 スイッチング素子の両端電圧、第 1 スイッチング素子に流れる電流を示す図である。
 【図 1 4】補助回路がオープン故障している場合のスナバコンデンサの両端電圧、第 1 スイッチング素子の両端電圧、第 1 スイッチング素子に流れる電流を示す図である。
 【図 1 5】補助回路故障判定処理を示すフローチャートである。
 【図 1 6】変形例に係る補助回路故障判定処理を示すフローチャートである。
 【図 1 7】補助回路の他の構成を例示した図である。
 【図 1 8】補助回路の他の構成を例示した図である。

10

【発明を実施するための形態】

【0021】

A. 本実施形態

以下、各図を参照しながら本発明に係わる実施形態について説明する。図 1 は本実施形態に係る車両に搭載された FCHV システムの構成を示す。なお、以下の説明では車両の一例として燃料電池自動車 (FCHV; Fuel Cell Hybrid Vehicle) を想定するが、電気自動車などにも適用可能である。また、車両のみならず各種移動体 (例えば、船舶や飛行機、ロボットなど) や定置型電源、さらには携帯型の燃料電池システムにも適用可能である。

【0022】

20

A-1. システムの全体構成

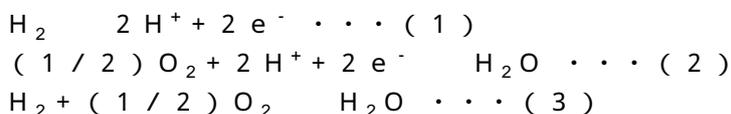
FCHV システム 100 は、燃料電池 110 とインバータ 140 の間に FC コンバータ 2500 が設けられるとともに、バッテリー 120 とインバータ 140 の間に DC/DC コンバータ (以下、バッテリーコンバータ) 180 が設けられている。

【0023】

燃料電池 110 は、複数の単位セルを直列に積層してなる固体高分子電解質型セルスタックである。燃料電池 110 には、燃料電池 110 の出力電圧 V_{fcms} を検出するための電圧センサ V_0 、及び出力電流 I_{fcms} を検出するための電流センサ I_0 が取り付けられている。燃料電池 110 においては、アノード極において (1) 式の酸化反応が生じ、カソード極において (2) 式の還元反応が生じ、燃料電池 110 全体としては (3) 式の起電反応が生じる。

30

【0024】



【0025】

単位セルは、高分子電解質膜等を燃料極及び空気極の二つの電極で挟み込んだ MEA を燃料ガスと酸化ガスとを供給するためのセパレータで挟み込んだ構造を有している。アノード極はアノード極用触媒層を多孔質支持層上に設けてあり、カソード極はカソード極用触媒層を多孔質支持層上に設けてある。

40

【0026】

燃料電池 110 には、燃料ガスをアノード極に供給する系統、酸化ガスをカソード極に供給する系統、及び冷却液を提供する系統 (いずれも図示略) が設けられており、コントローラ 160 からの制御信号に応じて、燃料ガスの供給量や酸化ガスの供給量を制御することにより、所望の電力を発電することが可能となっている。

【0027】

FC コンバータ 2500 は、燃料電池 110 の出力電圧 V_{fcms} を制御する役割を担っており、一次側 (入力側: 燃料電池 110 側) に入力された出力電圧 V_{fcms} を、一次側と異なる電圧値に変換 (昇圧または降圧) して二次側 (出力側: インバータ 140 側) へ出力し、また逆に、二次側に入力された電圧を、二次側と異なる電圧に変換して

50

一次側に出力する双方向の電圧変換装置である。このFCコンバータ2500により、燃料電池110の出力電圧 V_{fcms} が目標出力に応じた電圧となるように制御する。

【0028】

バッテリー120は、負荷130に対して燃料電池110と並列に接続されており、余剰電力の貯蔵源、回生制動時の回生エネルギー貯蔵源、燃料電池車両の加速又は減速に伴う負荷変動時のエネルギーバッファとして機能する。バッテリー120としては、例えば、ニッケル・カドミウム蓄電池、ニッケル・水素蓄電池、リチウム二次電池等の二次電池が利用される。

【0029】

バッテリーコンバータ180は、インバータ140の入力電圧を制御する役割を担っており、例えばFCコンバータ2500と同様の回路構成を有している。なお、バッテリーコンバータ180として昇圧型のコンバータを採用しても良いが、これに代えて昇圧動作および降圧動作が可能な昇降圧型のコンバータを採用しても良く、インバータ140の入力電圧の制御が可能なあらゆる構成を採用することができる。

10

【0030】

インバータ140は、例えばパルス幅変調方式で駆動されるPWMインバータであり、コントローラ160からの制御指令に従って、燃料電池110またはバッテリー120から出力される直流電力を三相交流電力に変換して、トラクションモータ131の回転トルクを制御する。

【0031】

トラクションモータ131は、本車両の主動力となるものであり、減速時には回生電力を発生するようになっている。ディファレンシャル132は減速装置であり、トラクションモータ131の高速回転を所定の回転数に減速し、タイヤ133が設けられたシャフトを回転させる。シャフトには図示せぬ車輪速センサ等が設けられ、これにより当該車両の車速等が検知される。なお、本実施形態では、燃料電池110から供給される電力を受けて動作可能な全ての機器（トラクションモータ131、ディファレンシャル132を含む）を負荷130と総称している。

20

【0032】

コントローラ160は、FCHVシステム100の制御用のコンピュータシステムであり、例えばCPU、RAM、ROM等を備えている。コントローラ160は、センサ群170から供給される各種の信号（例えば、アクセル開度をあらわす信号や車速をあらわす信号、燃料電池110の出力電流や出力端子電圧をあらわす信号など）を入力して、負荷130の要求電力（すなわち、システム全体の要求電力）を求める。

30

【0033】

負荷130の要求電力は、例えば車両走行電力と補機電力との合計値である。補機電力には車載補機類（加湿器、エアコンプレッサ、水素ポンプ、及び冷却水循環ポンプ等）で消費される電力、車両走行に必要な装置（変速機、車輪制御装置、操舵装置、及び懸架装置等）で消費される電力、乗員空間内に配設される装置（空調装置、照明器具、及びオーディオ等）で消費される電力などが含まれる。

【0034】

そして、コントローラ（コンバータ制御装置）160は、燃料電池110とバッテリー120とのそれぞれの出力電力の配分を決定し、発電指令値を演算する。コントローラ160は、燃料電池110及びバッテリー120に対する要求電力を求めると、これらの要求電力が得られるようにFCコンバータ2500及びバッテリーコンバータ180の動作を制御する。

40

【0035】

A-2. FCコンバータの構成

図1に示すように、FCコンバータ2500は、U相、V相、W相によって構成された三相の共振型コンバータとしての回路構成を備えている。三相共振型コンバータの回路構成は、入力された直流電圧を一旦交流に変換するインバータ類似の回路部分と、その交流

50

を再び整流して異なる直流電圧に変換する部分とが組み合わされている。本実施形態では、FCコンバータ2500としてフリーホイール回路（詳細は後述）を備えた多相のソフトスイッチングコンバータ（以下、多相のFCソフトスイッチングコンバータ）を採用している。

【0036】

A-2-1. 多相のFCソフトスイッチングコンバータの説明

図2は、FCHVシステム100に搭載される多相のFCソフトスイッチングコンバータ2500の回路構成を示す図であり、図3は、多相のFCソフトスイッチングコンバータ2500の1相分の回路構成を示す図である。

【0037】

以下の説明では、多相のFCソフトスイッチングコンバータ2500を構成するU相、V相、W相のFCソフトスイッチングコンバータを、それぞれFCソフトスイッチングコンバータ250a、250b、250cと呼び、特に区別する必要がある場合には、単にFCソフトスイッチングコンバータ250と呼ぶ。また、FCソフトスイッチングコンバータ250に入力される昇圧前の電圧をコンバータ入力電圧 V_{in} と呼び、FCソフトスイッチングコンバータ250から出力される昇圧後の電圧をコンバータ出力電圧 V_{out} と呼ぶ。

【0038】

図3に示すように、各FCソフトスイッチングコンバータ250は、昇圧動作を行うための主昇圧回路22aと、ソフトスイッチング動作を行うための補助回路22bと、フリーホイール回路22cを備えて構成されている。

主昇圧回路22aは、IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) などからなる第1スイッチング素子S1とダイオードD4で構成されるスイッチング回路のスイッチ動作によって、コイルL1に蓄えられたエネルギーを負荷130にダイオードD5を介して解放することで燃料電池110の出力電圧を昇圧する。

【0039】

詳述すると、コイルL1の一端が燃料電池110の高電位側の端子に接続され、第1スイッチング素子S1の一端の極がコイルL1の他端に接続され、第1のスイッチング素子S1の他端の極が燃料電池110の低電位側の端子に接続されている。また、ダイオードD5のカソード端子がコイルL1の他端に接続され、さらに、平滑コンデンサとして機能するコンデンサC3は、ダイオードD5のアノード端子と第1スイッチング素子S1の他端との間に接続されている。主昇圧回路22aには、燃料電池110側に平滑コンデンサC1が設けられており、これにより燃料電池110の出力電流のリプルを低減することが可能となる。なお、第1スイッチング素子S1の両端電圧を検知する電圧センサSv1が設けられている。

【0040】

ここで、コンデンサC3にかかる電圧 V_H は、FCソフトスイッチングコンバータ150のコンバータ出力電圧 V_{out} となり、平滑コンデンサC1にかかる電圧 V_L は、燃料電池110の出力電圧であってFCソフトスイッチングコンバータ150のコンバータ入力電圧 V_{in} となる。

【0041】

補助回路22bには、第1スイッチング素子S1に並列に接続された、クランプダイオードD3とこのクランプダイオードD3に直列に接続されたスナバコンデンサC2とを含む第1直列接続体が含まれている。第1直列接続体は、クランプダイオードD3のカソード端子がコイルL1の他端に接続され、クランプダイオードD3のアノード端子がスナバコンデンサC2の一端に接続されている。さらに、スナバコンデンサC2の他端は、燃料電池110の低電位側の端子に接続されている。なお、スナバコンデンサC2の両端電圧を検知する電圧センサSv2が設けられている。

【0042】

さらに、補助回路22bには、ダイオードD2と第2スイッチング素子S2及びダイオ

10

20

30

40

50

ードD 1と、各相に共通の補助コイルL 2によって構成された第2直列接続体が含まれる。

第2直列接続体は、ダイオードD 2のアノード端子が第1直列接続体のダイオードD 3とスナバコンデンサC 2との接続部位に接続されている。さらに、ダイオードD 2のカソード端子が第2スイッチング素子(補助スイッチ)S 2の一端の極に接続されている。また、第2スイッチング素子S 2の他端の極は、補助コイルL 2とフリーホイール回路2 2 cの接続部位に接続されている。フリーホイールダイオードD 6のアノード端子は、燃料電池1 1 0の低電位側に接続される一方、フリーホイールダイオードD 6のカソード端子は補助コイルL 2に接続されている。このフリーホイール回路2 2 cは、各相に共通のフリーホイールダイオードD 6を備えており、補助コイルL 2が通電中に第2スイッチング素子S 2がオープン故障などした場合であっても、第2スイッチング素子S 2を破壊するようなサージ電圧の発生を未然に防ぐために設けられたフェールセーフ機能を実現するための回路である。なお、フリーホイール回路2 2 cを備えていない構成にも本発明を適用可能である。

【0043】

このように構成されるFCソフトスイッチングコンバータ2 5 0においては、コントローラ1 6 0が各相の第1スイッチング素子S 1のスイッチングデューティ比を調整することで、FCソフトスイッチングコンバータ2 5 0による昇圧比、すなわちコンバータ入力電圧 V_{in} に対するコンバータ出力電圧 V_{out} の比が制御される。また、第1スイッチング素子S 1のスイッチング動作において補助回路1 2 bの第2スイッチング素子S 2のスイッチング動作を介在させることで、ソフトスイッチングが実現される。

【0044】

次に、FCソフトスイッチングコンバータ2 5 0によるソフトスイッチング動作について、図4等を参照しながら説明する。図4は、ソフトスイッチング動作を介したFCソフトスイッチングコンバータ2 5 の一サイクルの処理(以下、ソフトスイッチング処理)を示すフローチャートであり、コントローラ1 6 0が図4に示すステップS 1 0 1~S 1 0 6を順次実行することによって一サイクルを形成する。なお、以下の説明では、FCソフトスイッチングコンバータ2 5の電流、電圧の状態をあらわすモードをそれぞれモード1~モード6として表現し、その状態を図5~図10に示す。また、図5~図10では回路を流れる電流を矢印で示す。

【0045】

<ソフトスイッチング動作>

まず、図4に示すソフトスイッチング処理が行われる初期状態は、燃料電池1 1 0から負荷1 3 0に要求される電力が供給されている状態、すなわち第1スイッチング素子S 1、第2スイッチング素子S 2がともにターンオフされることで、コイルL 1、ダイオードD 5を介して電流が負荷1 3 0に供給される状態にある。

【0046】

(モード1; 図5参照)

ステップS 1 0 1においては、第1スイッチング素子S 1のターンオフを保持する一方、第2スイッチング素子S 2をターンオンする。かかるスイッチング動作を行うと、FCソフトスイッチングコンバータ1 5 0の出力電圧 V_H と入力電圧 V_L の電位差により、負荷1 3 0側に流れていた電流がコイルL 1、ダイオードD 3、第2スイッチング素子S 2、補助コイルL 2を介して補助回路1 2 b側に徐々に移行してゆく。なお、図5中では、負荷1 3 0側から補助回路1 2 b側への電流の移行の様子を白抜き矢印で示している。

【0047】

また、第2スイッチング素子S 2をターンオンすることにより、図5に示す矢印D m 1の向きに電流の循環が発生する。ここで、第2スイッチング素子S 2の電流変化速度は、補助コイルL 2の両端電圧($V_H - V_L$)と補助コイルL 2のインダクタンスに従い増加していくが、第2スイッチング素子S 2に流れる電流は補助コイルL 2により抑制されるため、結果としてダイオードD 5を介して負荷1 3 0側に流れる電流(図5に示す矢印

10

20

30

40

50

D m 1 2 参照) のソフトターンオフが実現される。

ここで、モード 1 からモード 2 への遷移完了時間 t_{mode1} は下記式 (4) によって表される。

$$t_{mode1} = \max\left(I_p - \frac{\Delta I}{2}, 0\right) \times \frac{L2id}{(VH - VL)} \quad \dots (4)$$

I_p ; 相電流

$L2id$; 補助コイル $L2$ のインダクタンス

【 0 0 4 8 】

(モード 2 ; 図 6 参照)

上記遷移完了時間が経過し、ステップ $S102$ に移行すると、ダイオード $D5$ を流れる電流はゼロとなり、コイル $L1$ 及びダイオード $D5$ を介して補助回路 $12b$ 側に電流が流れ込むとともに (図 6 に示す矢印 $Dm21$ 参照)、代わってスナバコンデンサ $C2$ と燃料電池 110 の電圧 VL との電位差により、スナバコンデンサ $C2$ にチャージされていた電荷が補助回路 $12b$ 側に流れてゆく (図 6 に示す矢印 $Dm22$ 参照)。このスナバコンデンサ $C2$ の容量に応じて、第 1 スwitching 素子 $S1$ にかかる電圧が決定される。

10

【 0 0 4 9 】

ここで、図 12 はモード 2 からモード 3 への遷移過程における電圧・電流挙動を示す図であり、燃料電池 110 の電圧を太実線、スナバコンデンサ $C2$ の電圧を細実線、スナバコンデンサ $C2$ の電流を破線で示している。

図 6 に示す $Dm21$ の経路の通電が開始された後 (図 12 に示す (A) 参照)、スナバコンデンサ $C2$ の電圧 VH と燃料電池 110 の電圧 VL との電位差により、図 6 に示す $Dm22$ の経路の通電、すなわち補助コイル $L2$ への通電が開始される (図 12 に示す (B) 参照)。ここで、図 12 に示すように、スナバコンデンサ $C2$ の電流は、スナバコンデンサ $C2$ の電圧が燃料電池 110 の電圧 VL に到達するまで上昇し続ける。

20

【 0 0 5 0 】

詳述すると、スナバコンデンサ $C2$ の電圧 VH と燃料電池 110 の電圧 VL の電位差によってスナバコンデンサ $C2$ に蓄積された電荷が電源側に回生され始めるが (図 6 に示す矢印 $Dm22$)、もともとの電位差は $(VH - VL)$ であるため、スナバコンデンサ $C2$ に蓄積された電荷の流れ (放電) は電源電圧 (すなわち燃料電池 110 の電圧 VL) に到達したところ (図 12 に示すタイミング $Tt1$) でとまってしまふところ、補助コイル $L2$ の特性 (すなわち、電流を流し続けようとする特性) により、スナバコンデンサ $C2$ の電圧が VL 以下になっても電荷を流し続けようとする (図 12 に示す (C) 参照)。このとき、下記式 (4)' が成立すれば、スナバコンデンサ $C2$ の電荷はすべて流れる (放電) ことになる。

30

$$\frac{1}{2}L \cdot I^2 > \frac{1}{2}C \cdot V^2 \quad \dots (4)'$$

左辺 ; 補助コイル $L2$ に蓄積されたエネルギー

右辺 ; スナバコンデンサ $C2$ に残存するエネルギー

【 0 0 5 1 】

スナバコンデンサ $C2$ に蓄積された電荷がなくなると、図 6 に示す $Dm23$ の経路でフリーホイール動作を行い、通電を継続する (図 12 に示す (D) 参照)。これにより、補助コイル $L2$ に蓄積されたエネルギーが全て放出される。なお、補助コイル $L2$ の一端にはダイオード $D2$ のアノードが接続されているため、 LC 共振は半波で止まる。このため、スナバコンデンサ $C2$ は、放電後に $0V$ を保持することになる。

40

【 0 0 5 2 】

ここで、モード 2 からモード 3 への遷移完了時間 t_{mode2} は下記式 (5) によって表される。

$$t_{mode2} = t_{mode2}' \quad \dots (5)$$

$$t_{mode2}' = \pi \sqrt{L2id \cdot C2d} \quad \dots (5)'$$

$C2d$; コンデンサ $C2$ の容量

50

【 0 0 5 3 】

(モード3 ; 図7 参照)

図6に示すDm22の経路で電流が流れる動作が終了し、スナバコンデンサC2の電荷が抜けきる、あるいは最小電圧(MIN電圧)となると、第1スイッチング素子S1がターンオンされ、ステップS103に移行する。スナバコンデンサC2の電圧がゼロとなった状態では、第1スイッチング素子S1にかかる電圧もゼロとなるため、ZVS(Zero Voltage Switching)が実現される。かかる状態では、コイルL1に流れる電流I11は、矢印Dm31に示す補助回路12b側に流れる電流Idm31と矢印Dm32に示す第1スイッチング素子S1を介して流れる電流Idm32の和となる(下記式(6)参照)。

$$I11 = Idm31 + Idm32 \quad \dots (6)$$

10

【 0 0 5 4 】

ここで、第1スイッチング素子S1に流れる電流Idm31は、補助回路12b側に流れる電流Idm31の減少速度に応じて決定される。補助回路12b側に流れる電流Idm31の電流変化速度は下記式(7)によって表わされる、すなわち補助回路12b側に流れる電流Idm31は下記式(7)の変化速度で減少していくため、第1スイッチング素子S1をターンオンしたとしても第1スイッチング素子S1に流れる電流が急に立ち上がることはなく、ZCS(Zero Current Switching)が実現される。

$$\frac{di}{dt} = \frac{-VL}{L2} \quad \dots (7)$$

【 0 0 5 5 】

(モード4 ; 図8 参照)

そして、ステップS104では、ステップS103の状態が継続することで、コイルL1に流れ込んでいく電流量を増加させてコイルL1に蓄えられるエネルギーを徐々に増加してゆく(図8に矢印Dm42参照)。ここで、補助回路12bにはダイオードD2が存在するため、補助コイルL2に逆電流は流れず、第2スイッチング素子S2を介してスナバコンデンサC2に充電が行われることはない。また、この時点で第1スイッチング素子S1はターンオンしているため、ダイオードD3を経由してスナバコンデンサC2に充電が行われることもない。従って、コイルL1の電流=第1スイッチング素子S1の電流となり、コイルL1に蓄えられるエネルギーを徐々に増加してゆく。ここで、第1スイッチング素子S1のターンオン時間Tslは、下記式(8)によって近似的に表される。

$$Tsl = (1 - VL/VH) * Tcon \quad \dots (8)$$

Tcon ; 制御周期

なお、制御周期とは、ステップS101~ステップS106までの一連の処理を一周期(一サイクル)としたときのソフトスイッチング処理の時間周期を意味する。

【 0 0 5 6 】

(モード5 ; 図9 参照)

ステップS104においてコイルL1に所望のエネルギーが蓄えられると、第1スイッチング素子S12がターンオフされ、図9に矢印Dm51で示す経路に電流が流れる。ここで、図11は、モード5におけるスナバコンデンサC2の電圧Vc、第1スイッチング素子S1にかかる電圧Ve、第1スイッチング素子S1を流れる電流Ieの関係を例示した図である。上記スイッチング動作が行われると、モード2において電荷が抜かれて低電圧状態となっているスナバコンデンサC2に電荷がチャージされ、これにより、スナバコンデンサC2の電圧VcはFCソフトスイッチングコンバータ150のコンバータ出力電圧VHに向かって上昇する。このとき、第1スイッチング素子S1にかかる電圧Veの上昇速度は、スナバコンデンサC2への充電により抑制され(すなわち、電圧の立ち上がりが鈍化され)、ターンオフ時(図11に示す参照)のスイッチング損失を低減するZVS動作をすることが可能となる。

40

【 0 0 5 7 】

(モード6 ; 図10 参照)

スナバコンデンサC2が電圧VHまで充電されると、コイルL1に蓄えられたエネルギー

50

が負荷 130 側に解放される（図 10 に示す矢印 D m 6 1 参照）。ここで、第 1 スイッチング素子 S 1 のターンオフ時間 T s 2 は、下記式（9）によって近似的に表される。

$$T_{s2} = (V_L / V_H) * T_{con} \quad \dots (9)$$

【 0 0 5 8 】

以上説明したソフトスイッチング処理を行うことで F C ソフトスイッチングコンバータ 150 のスイッチング損失を可及的に抑制した上で、燃料電池 110 の出力電圧を所望の電圧に上昇し、負荷 130 に供給することが可能となる。

【 0 0 5 9 】

< 補助回路 22 b の故障判定 >

ここで、図 13 は、F C ソフトスイッチングコンバータ 150 の補助回路 22 b が正常な場合のスナバコンデンサ C 2 の両端電圧（実線）、第 1 スイッチング素子 S 1 の両端電圧（破線）、第 1 スイッチング素子 S 1 に流れる電流（一点鎖線）を示す図であり、図 14 は、F C ソフトスイッチングコンバータ 150 の補助回路 22 b にオープン故障が生じている場合（すなわち、第 2 スイッチング素子 S 2 が常時オフしている場合）のスナバコンデンサ C 2 の両端電圧（実線）、第 1 スイッチング素子 S 1 の両端電圧（破線）、第 1 スイッチング素子 S 1 に流れる電流（一点鎖線）を示す図である。

なお、以下では、説明の便宜上、補助回路 22 b が正常な場合のスナバコンデンサ C 2 の両端電圧 V c 2、第 1 スイッチング素子 S 1 の両端電圧 V s 1 をそれぞれソフトスイッチ C 2 電圧、ソフトスイッチ S 1 電圧と呼び、補助回路 22 b がオープン故障している場合のスナバコンデンサ C 2 の両端電圧 V c 2、第 1 スイッチング素子 S 1 の両端電圧 V s 1 をそれぞれハードスイッチ C 2 電圧、ハードスイッチ S 1 電圧と呼ぶ。

【 0 0 6 0 】

a . 補助回路 22 b が正常な場合（図 13 参照）

補助回路 22 b が正常な状態において、スイッチング素子をターンオフすると（図 8 に示すモード 4 図 9 に示すモード 5 参照）、コイル L 1 に溜まったエネルギーが解放され、図 9 に矢印 D m 5 1 で示す経路に電流が流れる。これにより、モード 2 において電荷が抜かれて低電圧状態となっているスナバコンデンサ C 2 に電荷がチャージされ、ソフトスイッチ C 2 電圧は上昇してゆく。ここで、ソフトスイッチ S 1 電圧はクランプダイオード D 3 によってクランプされ、ソフトスイッチ C 2 電圧がソフトスイッチ S 1 電圧、すなわち電圧 V H に収束してゆく。

【 0 0 6 1 】

b . 補助回路 22 b にオープン故障が生じている場合（図 14 参照）

補助回路 22 b にオープン故障が生じている場合には、スイッチング素子をターンオフする前にハードスイッチ C 2 の両端電圧 V c 2 は V H を保持する。ここで、第 1 スイッチング素子 S 1 がターンオフされると、補助回路 22 b が正常に動作しないために第 1 スイッチング素子 S 1 にサージ電圧 V s u が発生する。このサージ電圧 V s u はクランプダイオード D 3 によってクランプされ、スナバコンデンサ C 2 によってハードスイッチ C 2 電圧としてあらわれる。ハードスイッチ S 1 電圧は、最終的に V H に収束してゆくが、ハードスイッチ C 2 電圧はサージ電圧 V s u にクランプされるため、本実施形態では、スナバコンデンサ C 2 の両端電圧 V c 2 と第 1 スイッチング素子 S 1 の両端電圧 V s 1 との差分電圧 V を求め、求めた差分電圧 V が差分電圧閾値以上である場合に、補助回路 22 b に故障（オープン故障）が生じていると判断する。もちろん、差分電圧 V を求めることなく、スナバコンデンサ C 2 の両端電圧 V c 2 のみを検出し、検出したコンデンサ C 2 の両端電圧 V c 2 が正常電圧閾値以上である場合に故障（オープン故障）が生じていると判断しても良い（詳細は変形例 1 参照）。なお、差分電圧閾値や正常電圧閾値については、予め実験などによって求めておけば良い。以下、補助回路 22 b の故障判定処理について、図 15 を参照しながら説明する。

【 0 0 6 2 】

図 15 は、コントローラ 160 によって実行される補助回路 22 b の故障判定処理を示すフローチャートである。

10

20

30

40

50

コントローラ（差分導出手段）160は、例えば図8に示すモード4から図9に示すモード5への移行に伴い、第1スイッチング素子S1をターンオフすると（ステップS1）、スナバコンデンサC2の両端電圧 V_{c2} と第1スイッチング素子S1の両端電圧 V_{s1} とを検出し、差分電圧 V を求める。

コントローラ160は、求めた差分電圧 V とメモリ（図示略）に格納された電圧閾値とを比較し、差分電圧 V が差分電圧閾値以上であるか否かを判断する（ステップS2）。

【0063】

コントローラ160は、差分電圧 V が差分電圧閾値未満である場合には、補助回路22bは正常であると判断し、処理を終了する。

一方、コントローラ（判断手段、フェールセーフ手段）160は、差分電圧 V が差分電圧閾値以上である場合には、補助回路22bに故障（オープン故障）が生じていると判断し、ステップS3に示すフェールセーフ動作へ移行し、処理を終了する。ここで、フェールセーフ動作としては、補助回路22bにオープン故障が生じていると判断された相（例えばU相）のコンバータを停止し、残りの相（例えばV相、W相）のコンバータを利用して負荷130を駆動する。

【0064】

周知のとおり、スイッチング素子S1に大きなサージ電圧 V_{su} が発生すると（図15参照）、スイッチング素子S1に大きなエネルギー損失が生じ、最悪の場合には異常過熱により素子破壊を招来するなどの問題が発生する。そこで、本実施形態では、上記の如く補助回路22bにオープン故障が生じていると判断された相のコンバータについては、運転を停止し、これにより素子破壊などの問題を未然に防止することが可能となる。

【0065】

B．変形例

<変形例1>

図16は、変形例1に係る補助回路22bの故障判定処理を示すフローチャートである。なお、図16に示すステップのうち、前掲図15に対応するステップについては同一符号を付し、詳細な説明は割愛する。

コントローラ（差分導出手段）160は、第1スイッチング素子S1をターンオフすると（ステップS1）、スナバコンデンサC2の両端電圧 V_{c2} を検知する。

コントローラ160は、検知したスナバコンデンサC2の両端電圧 V_{c2} とメモリ（図示略）に格納された正常電圧閾値とを比較し、スナバコンデンサC2の両端電圧 V_{c2} が正常電圧閾値以上であるか否かを判断する（ステップSa2）。

【0066】

コントローラ160は、スナバコンデンサC2の両端電圧 V_{c2} が正常電圧閾値未満である場合には、補助回路22bは正常であると判断し、処理を終了する。

一方、コントローラ（判断手段、フェールセーフ手段）160は、スナバコンデンサC2の両端電圧 V_{c2} が正常電圧閾値以上である場合には、補助回路22bに故障（オープン故障）が生じていると判断し、ステップS3に示すフェールセーフ動作へ移行し、処理を終了する。ここで、フェールセーフ動作としては、補助回路22bにオープン故障が生じていると判断された相（例えばU相）のコンバータを停止し、残りの相（例えばV相、W相）のコンバータを利用して負荷130を駆動する。

【0067】

<変形例2>

上述した本実施形態では、フェールセーフ動作として、オープン故障が生じていると判断された相のコンバータを停止し、残りの相のコンバータを利用して負荷130を駆動する場合について説明したが、これに限る趣旨ではない。例えば、オープン故障が生じていると判断された相についてはソフトスイッチングではなくハードスイッチングを行うようにしても良い。ただし、ハードスイッチングを行う場合には、第1スイッチング素子S1について素子破壊などの問題が生じ得るため、予め電流の変化率を抑えるように出力制限

10

20

30

40

50

をかければ良い。具体的には、コントローラ（フェールセーフ手段）160は、第1スイッチング素子S1に流れる電流の変化率が予め設定された閾値変化率以下となるように、監視・制限する。具体的には、ハードスイッチングを行う場合には第1スイッチング素子S1のゲート抵抗を大きくする、あるいは負荷130の最大許容値を低く設定することで、出力制限をかければ良い。ここで、第1スイッチング素子S1のゲート抵抗については、例えば補助回路22bが正常な場合に利用するゲート抵抗（以下、第1ゲート抵抗）R1と、補助回路22bにオープン故障が生じている場合に利用する抵抗値の大きなゲート抵抗（以下、第2ゲート抵抗）R2（ $> R1$ ）を用意しておく。コントローラ160は、図15や図16に示す故障判定処理を実行結果に基づき、第1スイッチング素子S1のゲート抵抗の選択切換を行う。すなわち、コントローラ160は、補助回路22bが正常であると判断すると（ステップS2またはステップS2a；NO）、第1ゲート抵抗R1を選択する一方、補助回路22bにオープン故障が生じていると判断すると（ステップS2またはステップS2a；YES）、第2ゲート抵抗R2を選択する。かかる構成によって素子破壊などの問題を未然に防止しても良い。なお、負荷130の最大許容値の選択切換を行う場合の動作については、第1スイッチング素子S1のゲート抵抗の選択切換を行う場合と同様に説明することができるため、説明を割愛する。また、第1スイッチング素子S1のゲート抵抗値や負荷130の最大許容値については、予め実験などによって求めておければ良い。

10

【0068】

また、差分電圧Vが電圧閾値以上になる原因として、スイッチング素子をターンオフする前にスナバコンデンサC2の電荷が十分に抜けきれていないことが考えられる。この場合には、補助回路22bの第2スイッチング素子Sのオン、オフタイミングを適宜変化させることで、スナバコンデンサC2の電荷が十分に抜けきれているかを確認した上で、もう一度差分電圧Vを求めることで補助回路22bにオープン故障が生じているか否かを判断するようにしても良い。

20

【0069】

<変形例3>

また、上述した本実施形態では、補助回路22bに含まれる第2直列接続体として、ダイオードD2のアノード端子が第1直列接続体のダイオードD3とスナバコンデンサC2との接続部位に接続され、ダイオードD2のカソード端子が第2スイッチング素子（補助スイッチ）S2の一端の極に接続されている例を説明したが（図3参照）、この第2直列接続体の回路トポロジーについて、コイルL2、ダイオードD2、第2スイッチング素子S2などによるスイッチング回路の直列順序は適宜入れ替えた態様も採用し得る。具体的には、図16や図17に示すように、フリーホイール回路22cを除くとともにコイルL2と第2スイッチング素子S2などによるスイッチング回路の順序を入れ替えても良い。

30

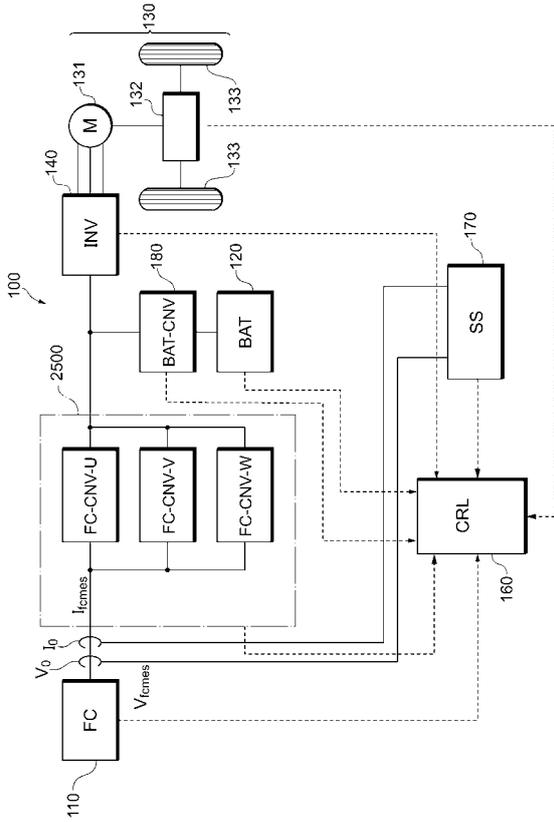
【符号の説明】

【0070】

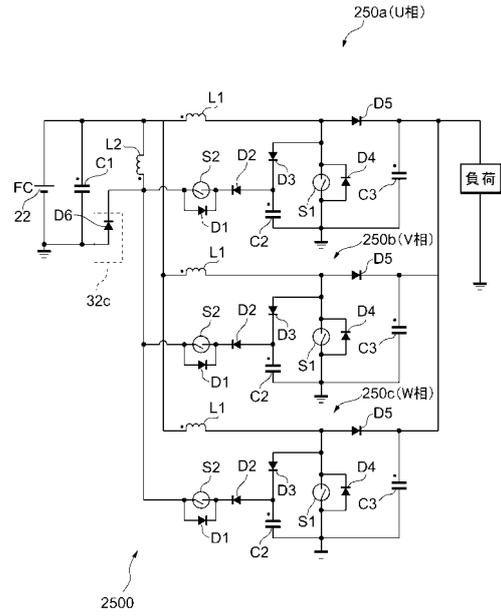
100...FCHVシステム、110...燃料電池、120...バッテリー、130...負荷、140...インバータ、2500...FCコンバータ、160...コントローラ、170...センサ群、180...バッテリーコンバータ、250...FCソフトスイッチングコンバータ、22a...主昇圧回路、22b...補助回路、22c...フリーホイール回路、S1,S2...スイッチング素子、C1,C3...平滑コンデンサ、C2...スナバコンデンサ、L1,L2,...コイル、D1,D2,D3,D4,D5...ダイオード、D6...フリーホイールダイオード。

40

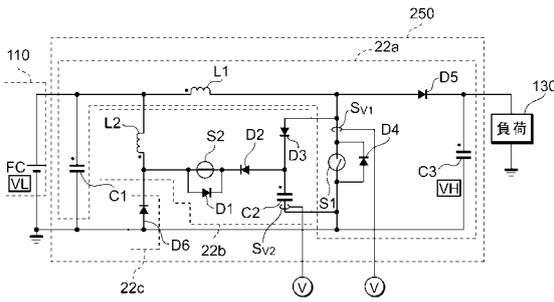
【図1】



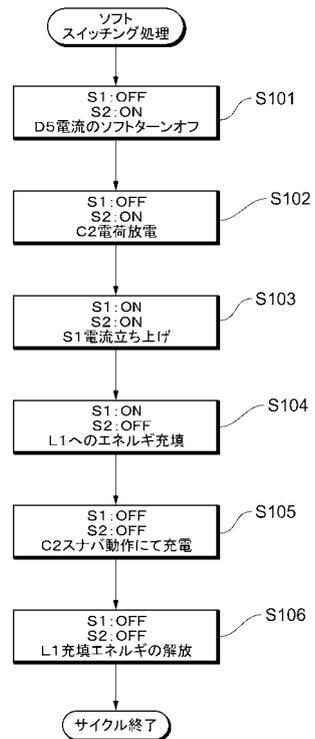
【図2】



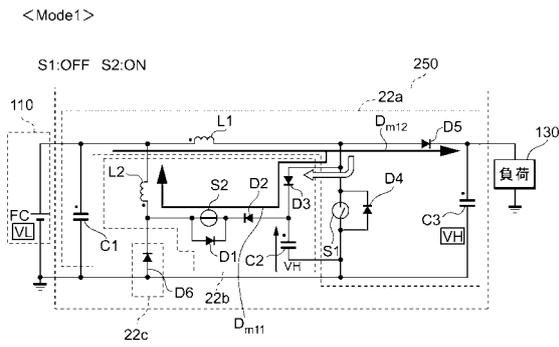
【図3】



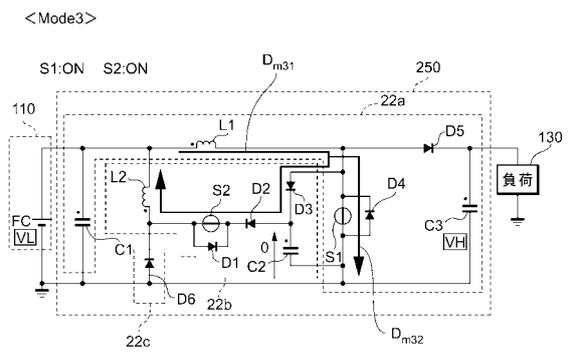
【図4】



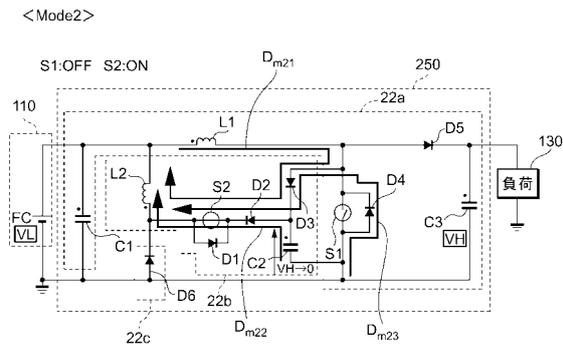
【図5】



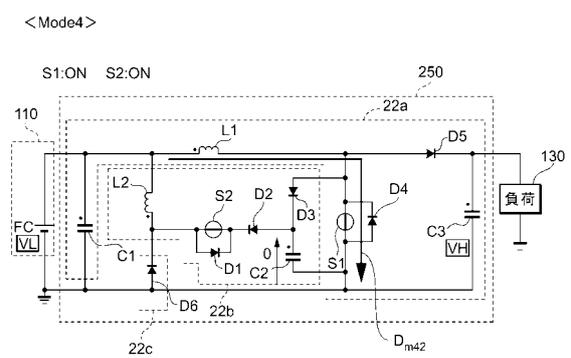
【図7】



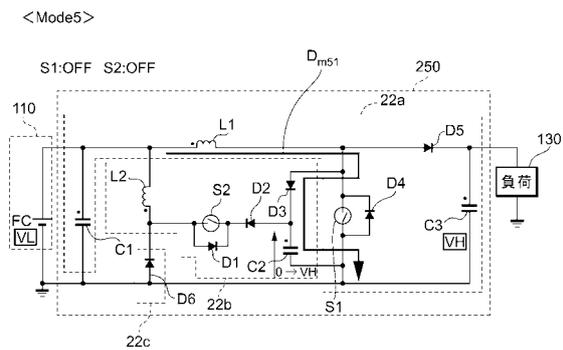
【図6】



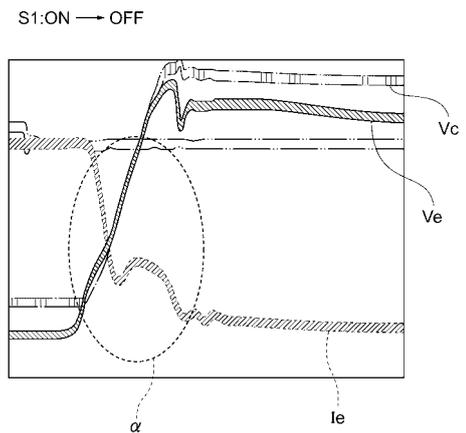
【図8】



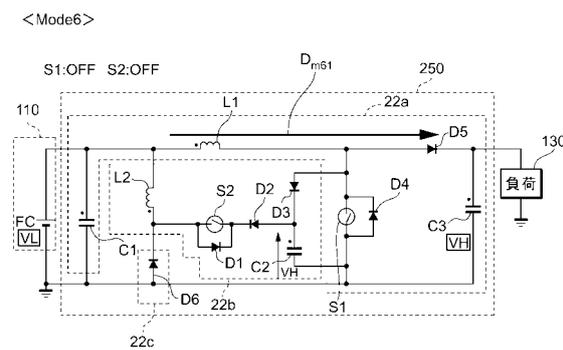
【図9】



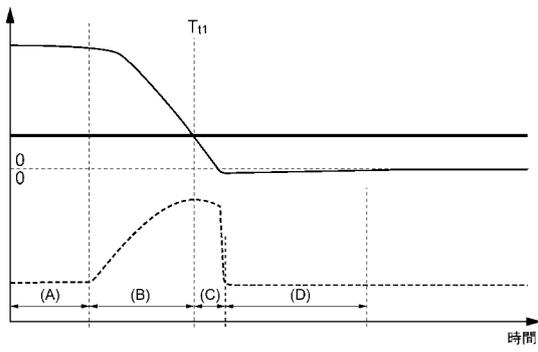
【図11】



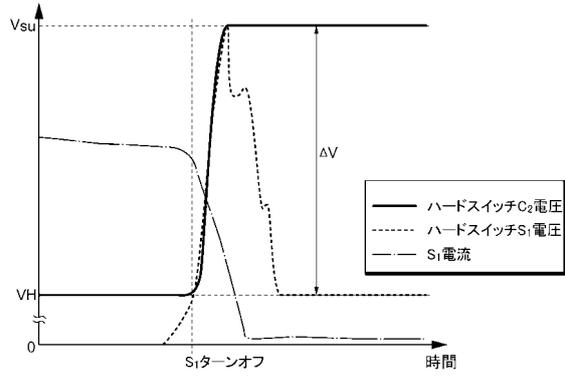
【図10】



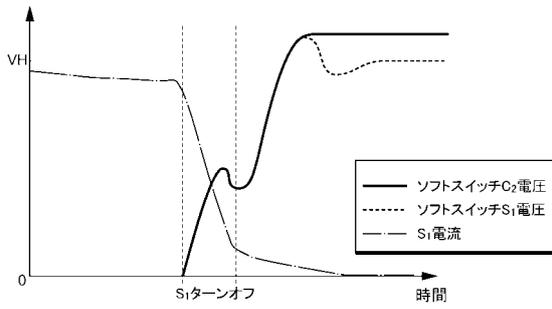
【図12】



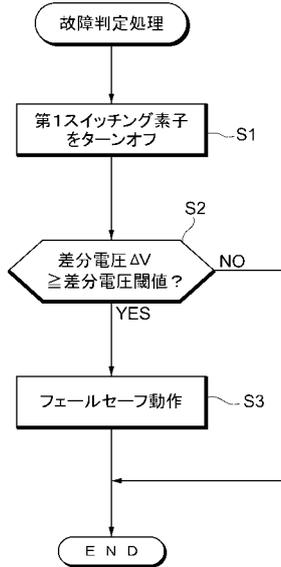
【図14】



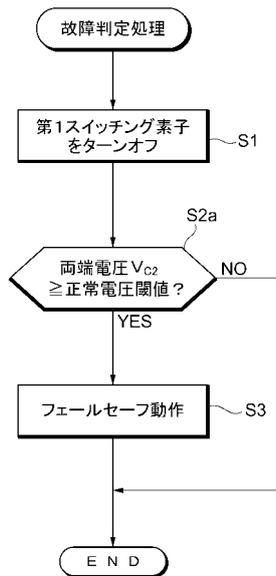
【図13】



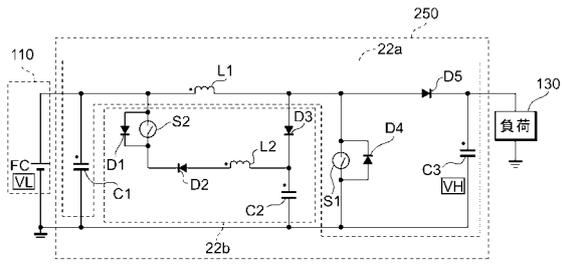
【図15】



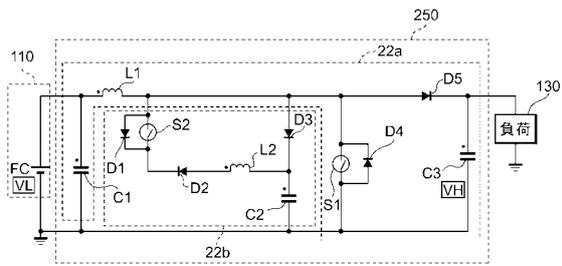
【図16】



【図 17】



【図 18】



フロントページの続き

(72)発明者 真鍋 晃太
愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内

審査官 安池 一貴

(56)参考文献 特開2000-036308(JP,A)
国際公開第2006/098376(WO,A1)
特開平08-021861(JP,A)
特開2008-079447(JP,A)
特開2002-198792(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H02M 3/155