

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第5690123号
(P5690123)

(45) 発行日 平成27年3月25日 (2015. 3. 25)

(24) 登録日 平成27年2月6日 (2015. 2. 6)

(51) Int. Cl.

F I

H O 1 H 47/00 (2006. 01)

H O 1 H 47/00

Z

H O 1 H 59/00 (2006. 01)

H O 1 H 59/00

請求項の数 10 (全 22 頁)

(21) 出願番号 特願2010-273081 (P2010-273081)
(22) 出願日 平成22年12月8日 (2010. 12. 8)
(65) 公開番号 特開2011-129516 (P2011-129516A)
(43) 公開日 平成23年6月30日 (2011. 6. 30)
審査請求日 平成25年12月3日 (2013. 12. 3)
(31) 優先権主張番号 12/639, 060
(32) 優先日 平成21年12月16日 (2009. 12. 16)
(33) 優先権主張国 米国 (US)

(73) 特許権者 390041542
ゼネラル・エレクトリック・カンパニー
アメリカ合衆国、ニューヨーク州 1 2 3
4 5、スケネクタデイ、リバーロード、1
番
(74) 代理人 100137545
弁理士 荒川 聡志
(74) 代理人 100105588
弁理士 小倉 博
(74) 代理人 100129779
弁理士 黒川 俊久

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 スイッチ構造体及び関連回路

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

第 1 特性時間にわたって開放構成と完全閉鎖構成との間で移動するように構成された第 1 電気機械スイッチ構造体 (1 0 2) であって、完全閉鎖構成にあるときに第 1 最低特性抵抗を有する第 1 電気機械スイッチ構造体と；

第 2 特性時間にわたって開放構成と完全閉鎖構成との間で移動するように構成され、完全閉鎖構成にあるときに第 2 最低特性抵抗を有する第 2 電気機械スイッチ構造体と、

前記第 1 及び第 2 電気機械スイッチ構造体と並列接続された転流回路 (1 2 0) であって、

前記第 1 電気機械スイッチ構造体の接点間のアーク形成を抑制するように構成された第 1 平衡ダイオードブリッジ (1 2 2) と、

前記第 2 電気機械スイッチ構造体の接点間のアーク形成を抑制するように構成された第 2 平衡ダイオードブリッジと、

前記第 1 及び第 2 平衡ダイオードブリッジの各々を通るパルス電流の流れを発生させるためにパルス信号を形成するように構成されたパルスキャパシタ (1 4 6) を含むパルス回路 (1 4 2) であって、前記パルス信号は前記第 1 及び第 2 電気機械スイッチ構造体の切り替え事象に関連して発生するパルス回路と、を含む転流回路とを備え、

前記第 1 及び第 2 電気機械スイッチ構造体は負荷回路に並列接続するように構成されており、

前記第 1 及び第 2 電気機械スイッチ構造体並びに前記第 1 及び第 2 平衡ダイオードブリッ

10

20

ジは、前記パルス回路及び前記第 1 平衡ダイオードブリッジに関する合計インダクタンスが前記第 1 特性時間と前記第 1 最低特性抵抗との積以下となり、前記パルス回路及び前記第 2 平衡ダイオードブリッジに関する合計インダクタンスが前記第 2 特性時間と前記第 2 最低特性抵抗との積以下となるように配置されている、
装置。

【請求項 2】

前記負荷回路が、電気負荷及び電源を含む、請求項 1 に記載の装置。

【請求項 3】

前記第 1 及び第 2 電気機械スイッチ構造体の各々が微小電気機械スイッチを含む、請求項 1 または 2 に記載の装置。

10

【請求項 4】

前記第 1 及び第 2 電気機械スイッチ構造体の各々が 1 つ以上の接点 (1 1 2) 及び 1 つ以上の可動要素 (1 1 0) を含み、前記 1 つ以上の可動要素の各々は、前記第 1 及び第 2 電気機械スイッチ構造体が完全閉鎖構成に配置されているときには前記 1 つ以上の接点のうち少なくとも 1 つと最大接触し、

前記 1 つ以上の可動要素の各々は、前記第 1 及び第 2 電気機械スイッチ構造体が開放構成に配置されているとき前記 1 つ以上の接点から開離している、請求項 1 乃至 3 のいずれかに記載の装置。

【請求項 5】

前記第 1 及び第 2 電気機械スイッチ構造体の各々が、可動要素 (1 1 0)、接点 (1 1 2)、及び、前記可動要素との電位差を確立するように選択的に電荷を受け取ることで、前記可動要素が前記接点と最大接触する最大接触位置と、前記可動要素が前記接点から開離している非接触位置との間で、前記可動要素を前記特性時間にわたって移動させるように構成された電極 (1 1 6) を含む、請求項 1 乃至 4 のいずれかに記載の装置。

20

【請求項 6】

前記第 1 及び第 2 電気機械スイッチ構造体の各々が、約 1 5 マイクロ秒以下の特性時間にわたって開放構成と完全閉鎖構成との間で移動するように構成されている、請求項 1 乃至 5 のいずれかに記載の装置。

【請求項 7】

前記第 1 及び第 2 電気機械スイッチ構造体の各々が、完全閉鎖構成にあるときに最低特性実効アレイ抵抗を有する電気機械スイッチのアレイを含む、請求項 1 乃至 6 のいずれかに記載の装置。

30

【請求項 8】

前記第 1 及び第 2 電気機械スイッチ構造体の各々のアレイが、並列接続された少なくとも 2 つの電気機械スイッチを含む、請求項 7 に記載の装置。

【請求項 9】

前記第 1 及び第 2 電気機械スイッチ構造体の各々のアレイが、直列接続された少なくとも 2 つの電気機械スイッチを含む、請求項 7 又は 8 に記載の装置。

【請求項 10】

前記転流回路が、前記第 1 電気機械スイッチ構造体と並列接続された第 1 転流回路と、前記第 2 電気機械スイッチ構造体と並列接続された第 2 転流回路とを含む、請求項 1 乃至 9 のいずれかに記載の装置。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明の実施形態は、概して電流切替装置に関し、特に微小電気機械スイッチ構造体に関する。

【背景技術】

【0002】

50

回路遮断器は、回路内の故障に起因する損傷から電気機器を保護するために設計された電気装置である。旧来、従来型の回路遮断器は高張る（微小）電気機械スイッチを含むことが多かった。残念ながら、これらの従来型の回路遮断器は寸法が大きく、切替機構を起動させるためには大きな力を要することがある。また、これらの回路遮断器のスイッチは、通常は比較的低速で動作する。更に、これらの回路遮断器は、組み立て作業が複雑な分、製造費が高くなることがある。加えて、従来型回路遮断器の切替機構の接点が物理的に分離すると、接点間にアークが形成され、このアークによって、回路内の電流が停止するまでスイッチ内で電流が流れ続ける場合がある。更に、アークに関連するエネルギーは、接点を著しく損傷したり、人を火傷させたりする危険がある。

【 0 0 0 3 】

10

低速な電気機械スイッチの代替として、比較的高速な半導体スイッチが、高速切替用途に採用されてきた。これらの半導体スイッチは、電圧又はバイアスの印加制御により、導電状態と非導電状態との間で切り替わる。しかし、半導体スイッチは、非導電状態に切り替わったときに接点間に物理的な間隙を形成しないので、名目上の非導電時には、漏れ電流が発生する。更に、導電状態で動作している半導体スイッチには、内部抵抗による電圧降下が発生する。電圧降下及び漏れ電流はいずれも、通常の動作環境下での電力損失及び過熱に繋がり、これがスイッチ性能と寿命に悪影響を及ぼす可能性がある。また、少なくとも部分的には半導体スイッチに関連する内在的な漏れ電流が原因で、回路遮断器用途に半導体スイッチを使用することはできない。

【 0 0 0 4 】

20

微小電気機械システム（MEMS）ベースの切替装置は、或る電流切替用途に関して上記マクロ電気機械スイッチと半導体スイッチの有効な代替品となり得る。MEMSベースのスイッチは、導電するように設定されているときは抵抗が小さく、装置を流れる電流を妨げるように設定されているときは電流漏洩が小さくなる（又は無くなる）傾向がある。更に、MEMSベースのスイッチは、マクロ電気機械スイッチよりも応答時間が短いはずである。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 5 】

【 特許文献 1 】 米国特許第 7 6 1 2 9 7 1 B 2 号

30

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 6 】

微小電気機械スイッチ構造体を提供する。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 0 7 】

一態様において、スイッチモジュール等の装置を提供する。この装置は、特性時間（例えば、約 15 マイクロ秒以下）にわたって開放構成と完全閉鎖構成との間で移動する電気機械スイッチ構造体を含む。完全閉鎖構成にあるとき、電気機械スイッチ構造体は最低特性抵抗を有する。

40

【 0 0 0 8 】

電気機械スイッチ構造体は、1つ以上の接点及び1つ以上の可動要素を有し、電気機械スイッチ構造体が完全閉鎖構成で配置されているときには各可動要素は接点の少なくとも1つと最大接触しており、電気機械スイッチ構造体が開放構成で配置されているときには各可動要素は接点から開離している。電気機械スイッチ構造体は、例えば、微小電気機械スイッチを含む。電気機械スイッチ構造体は電極も有しており、この電極は、可動要素との電位差を確立するように選択的に電荷を受け取ることで、可動要素が接点と最大接触する最大接触位置と、可動要素が接点から開離している非接触位置との間で、特性時間にわたって可動要素を移動させるように構成されている。

【 0 0 0 9 】

50

電気機械スイッチ構造体は、完全閉鎖構成にあるときに最低特性実効アレイ抵抗を有する、電気機械スイッチのアレイを含む。アレイは、並列接続された少なくとも2つの電気機械スイッチ及び/又は直列接続された少なくとも2つの電気機械スイッチを含む。

【0010】

転流回路は、電気機械スイッチ構造体と並列接続される。転流回路は、電気機械スイッチ構造体の接点間のアーク形成を抑制するように構成された平衡ダイオードブリッジを含む。転流回路はまた、平衡ダイオードブリッジを通るパルス電流の流れを発生させるためにパルス信号を形成するように構成されたパルスキャパシタを含むパルス回路を含む。パルス信号は、電気機械スイッチ構造体の切り替え事象に関連して生成される。電気機械スイッチ構造体及び平衡ダイオードブリッジは、転流回路に関する合計インダクタンスが特性時間と最低特性抵抗との積以下になるように配置される。

10

【0011】

幾つかの実施形態において第2電気機械スイッチ構造体を含み、第2電気機械スイッチ構造体は、第2特性時間にわたって開放構成と完全閉鎖構成との間で移動するように構成される。第2電気機械スイッチ構造体は、完全閉鎖構成にあるとき、第2最低特性抵抗を有する。(第1)電気機械スイッチ構造体はその後、第1特性時間及び第1最低特性抵抗に関連付けられる。第1及び第2電気機械スイッチ構造体は、転流回路が第1及び第2電気機械スイッチ構造体のそれぞれと並列接続された状態で、負荷回路と並列接続するように構成される。第1平衡ダイオードブリッジは、第1電気機械スイッチ構造体の接点間のアーク形成を抑制するように構成され、第2平衡ダイオードブリッジは、第2電気機械スイッチ構造体の接点間のアーク形成を抑制するように構成される。パルス回路は、第1及び第2平衡ダイオードブリッジのそれぞれを通るパルス電流の流れを発生させるためにパルス信号を形成するように構成されたパルスキャパシタを含み、このパルス信号は、第1及び第2電気機械スイッチ構造体の切り替え事象に関連して生成される。第1及び第2電気機械スイッチ構造体並びに第1及び第2平衡ダイオードブリッジは、パルス回路及び第1平衡ダイオードブリッジに関する合計インダクタンスが第1特性時間と第1最低特性抵抗との積以下になり、パルス回路及び第2平衡ダイオードブリッジに関する合計インダクタンスが第2特性時間と第2最低特性抵抗との積以下になるように配置される。

20

【0012】

別の態様において、スイッチモジュール等の装置を提供する。この装置は、第1特性時間にわたって完全開放構成と完全閉鎖構成との間で移動するように構成された第1電気機械スイッチ構造体と、第2特性時間にわたって完全開放構成と完全閉鎖構成との間で移動するように構成された第2電気機械スイッチ構造体とを含む。第1電気機械スイッチ構造体は、完全閉鎖構成にあるときに第1最低特性抵抗を有し、第2電気機械スイッチ構造体は、完全閉鎖構成にあるときに第2最低特性抵抗を有する。第2電気機械スイッチ構造体は、第1電気機械構造体と並列又は直列接続するように構成される。

30

【0013】

第1転流回路は、第1電気機械スイッチ構造体と並列接続される。第1転流回路は、第1平衡ダイオードブリッジ及び第1パルス回路を含む。第1平衡ダイオードブリッジは、第1電気機械スイッチ構造体の接点間のアーク形成を抑制するように構成される。第1パルス回路は、第1平衡ダイオードブリッジを通るパルス電流の流れを発生させるためにパルス信号を形成するように構成されたパルスキャパシタを含み、このパルス信号は、第1電気機械スイッチ構造体の切り替え事象に関連して生成される。

40

【0014】

第2転流回路は、第2電気機械スイッチ構造体と並列接続される。第2転流回路は、第2平衡ダイオードブリッジ及び第2パルス回路を含む。第2平衡ダイオードブリッジは、第2電気機械スイッチ構造体の接点間のアーク形成を抑制するように構成される。第2パルス回路は、第2平衡ダイオードブリッジを通るパルス電流の流れを発生させるためにパルス信号を形成するように構成されたパルスキャパシタを含み、このパルス信号は、第2電気機械スイッチ構造体の切り替え事象に関連して生成される。

50

【 0 0 1 5 】

第 1 電気機械スイッチ構造体及び第 1 平衡ダイオードブリッジは、第 1 転流回路に関する合計インダクタンスが第 1 特性時間と第 1 最低特性抵抗との積以下になるように配置される。第 2 電気機械スイッチ構造体及び第 2 平衡ダイオードブリッジも、第 2 転流回路に関する合計インダクタンスが第 2 特性時間と第 2 最低特性抵抗との積以下になるように配置される。

【 0 0 1 6 】

更に別の態様において、電気機械スイッチ構造体及び該電気機械スイッチ構造体に並列接続された転流回路を含む装置を提供するステップを含む方法を開示する。電気機械スイッチ構造体は、開放構成と完全閉鎖構成との間で移動するように構成され、完全閉鎖構成のときには最低特性抵抗を有する。転流回路は、電気機械スイッチ構造体の接点間のアーク形成を抑制するように構成された平衡ダイオードブリッジを含む。パルスキャパシタを含むパルス回路は、平衡ダイオードブリッジを通るパルス電流の流れを発生させるためにパルス信号を形成するように構成され、このパルス信号は、電気機械スイッチ構造体の切り替え事象に関連して生成される。静電力を印加して、電気機械スイッチ構造体を完全閉鎖構成に移動させる。静電力を変更することによって、特性時間にわたって電気機械スイッチ構造体を完全閉鎖構成から開放構成に移動させる。このときの特性時間は、該転流回路に関する合計インダクタンスを最低特性抵抗で割った商よりも大きい。

【 0 0 1 7 】

全図面を通して対応する部品に対応する符号で示す添付図面を参照しながら以下の詳細な説明を読むと、本発明のこれら及びその他の特徴、態様、利点の理解が深まるであろう。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 1 8 】

【 図 1 】 例示的实施形態に従って構成されたスイッチモジュールの模式図である。

【 図 2 】 例示的な電気機械スイッチの模式的斜視図である。

【 図 3 】 図 2 のスイッチの側面図である。

【 図 4 】 部分閉鎖構成にある図 2 のスイッチの側面図である。

【 図 5 】 完全閉鎖構成にある図 2 のスイッチの側面図である。

【 図 6 】 図 2 のスイッチの時間関数としてのスイッチ抵抗、ゲート電圧、及び作動力のグラフである。

【 図 7 】 図 1 のスイッチモジュールの動作例を示す模式図である。

【 図 8 】 図 1 のスイッチモジュールの動作例を示す模式図である。

【 図 9 】 図 1 のスイッチモジュールの動作例を示す模式図である。

【 図 1 0 】 図 1 のスイッチモジュールの動作例を示す模式図である。

【 図 1 1 】 その他の例示的实施形態に従って構成された各スイッチモジュールの模式図である。

【 図 1 2 】 その他の例示的实施形態に従って構成された各スイッチモジュールの模式図である。

【 図 1 3 】 その他の例示的实施形態に従って構成された各スイッチモジュールの模式図である。

【 図 1 4 】 その他の例示的实施形態に従って構成された各スイッチモジュールの模式図である。

【 図 1 5 】 その他の例示的实施形態に従って構成された各スイッチモジュールの模式図である。

【 図 1 6 】 図 1 のスイッチモジュール用の等価回路の模式図である。

【 発明を実施するための形態 】

【 0 0 1 9 】

これより、全図面を通して対応する部品に対応する符号で示す添付図面を参照しながら、本発明の実施例を説明する。これらの実施形態は、上記及びその他の需要に応え得るも

10

20

30

40

50

のである。

【0020】

図1を参照すると、例示的实施形態に従って構成された、(例えばモータスタート用途に組み合わせて使用する)スイッチモジュール100のような装置が示されている。スイッチモジュール100は、微小電気機械スイッチ又は微小電気機械システム(MEMS)スイッチ102等の、電気機械スイッチ構造体を含む。MEMSスイッチ102は、例えば負荷インダクタンス L_L 及び負荷抵抗 R_L によって特徴付けられる電気負荷106も含む、負荷回路104の一部として組み込まれる。なお、負荷回路104は内在的なインダクタンス及び抵抗も含み、このインダクタンス及び抵抗が有効な負荷インダクタンス L_L 及び負荷抵抗 R_L に影響を与え、これらに含まれると考えられる。電源108も、負荷回路104に含まれ、電圧 V_L を提供する。更に後述するように、動作中、負荷回路電流 I_L は、負荷回路104と、場合によってはMEMSスイッチ102を流れる。

10

【0021】

図1及び2を参照すると、MEMSスイッチ102は、可動要素(例えば片持梁110)及び接点112(例えば導電パッド)等の接点を含む。梁110及び接点112は、基板114等の下支え構造によって支持される。梁110及び接点112を共通基板114上に配置することにより、従来の微細加工技術(例えば、電気メッキ、蒸着、フォトリソグラフィ、ウェット及び/又はドライエッチング等)を用いたMEMSスイッチ102の製造が容易になり、その結果得られるスイッチは、数又は数十マイクロメートル及び/又はナノメートル程度の寸法を有する。

20

【0022】

なお、上述した電気機械スイッチ構造体は、単一の可動要素を有する孤立スイッチ102に関するものであるが、電気機械スイッチ構造体が並列、直列、又はその両方で接続された電気機械スイッチのアレイを含んでもよく、アレイの各スイッチは、共通又は個別の接点に関連付けられた可動要素を含む。したがって、本明細書を通して「スイッチ」(例えば、MEMSスイッチ102)という表現は、単一のスイッチ又はスイッチアレイのいずれかを指すと理解されたい。

【0023】

図1～6を参照すると、MEMSスイッチ102は、梁110が接点112から開離している(例えば、図3に描写されているような)非接触又は「開放」構成又は状態と、梁が接点と最大接触して電氣的な連通を確立する(例えば、図5に描写されているような)接触又は「完全閉鎖」構成又は状態との間で、選択的に移動可能に構成される。例えば、梁が自然に(すなわち、外部から印加される力が存在しない状態で)非接触構成に配置されるように、開放構成と完全閉鎖構成との間で移動するときに変形を受けるように梁110を構成したり、機械的エネルギーを保存しながら接触位置に留まるように梁110を変形したりできる。その他の実施形態において、梁110が変形しない構成が接触構成であってもよい。

30

【0024】

MEMSスイッチ102は電極116を含み、この電極は、ゲート電圧源118と電氣的に連通している。ゲート電圧源118は、ゲート電圧 V_G を電極に提供し、これによって電極に電荷が供給される。電極116が帯電すると、電極と梁110との間に電位差が生じ、静電動作力 F_A は梁を電極に向かって(そして、最終的に接触するように、接点112にも向かって)引っばるように作用する。

40

【0025】

ゲート電圧 V_G は、時間 t_0 におけるゼロから時間 t_1 における V_{G1} の値まで変化する。静電動作力 F_A は、ゲート電圧 V_G と共に(必ずしも線形ではないが)変化する。ゲート電圧 V_G (及び静電動作力 F_A)が増加すると、作動力が梁110を接点112に向かって移動させ、最終的には(図6の時間 t_1 において)作動力(図6のゲート電圧 V_{G1} に対応する)は十分に梁を変形させる大きさになり、梁と接点との間が電氣的に連通する。これは名目上、梁110が接点112と接触しているときに発生するが、2つの間の

50

開離は小さく、梁と接点を開離させ得るいかなる物理的間隙も超えて電氣的連通が可能（例えば、電界放出による）なので、実際には梁と接点が接触する前にも電氣的連通は可能性である。いずれにせよ、時間 t_1 において、特性スイッチ抵抗 R_S （梁 110 及び接点 112 で表される実効抵抗）は、本質的に無限大（梁が接点から開離しているときの t_0 から t_1 までの期間の R_S の値）から、やや大きいが有限の値 $R_{S\text{MAX}}$ まで変化する。なお、電気機械スイッチ構造体が電気機械スイッチのアレイを含む実施形態では、特性スイッチ抵抗はスイッチアレイの実効抵抗（すなわち、スイッチアレイを単一で同等の抵抗に置き換えた場合に予想される抵抗）に等しい。

【0026】

ゲート電圧 V_G は、時間 t_2 において最大値 $V_{G\text{MAX}}$ まで増加し続ける。ゲート電圧 V_G が増加すると、作動力 F_A もまた増加し、梁 110 を接点 112 に更に全体的に接触させる。それに応じて、特性スイッチ抵抗 R_S は、 t_1 から t_2 間での時間にわたって $R_{S\text{MAX}}$ から $R_{S\text{MIN}}$ の最小値まで減少する。スイッチ 102 の特性スイッチ抵抗 R_S の最小値は、スイッチの完全閉鎖構成を示し、スイッチのその他の構成（例えば、「部分閉鎖」又は反対に「部分開放」と称される、図 4 の構成）は、より高い抵抗値によって特徴付けられる。

【0027】

上述のように、スイッチ 102 が完全閉鎖構成にあるとき、梁 110 は接点 112 と最大接触する。この場合、「最大接触」という用語は、梁と接点との間で実際になされる接触の最大量を指すものであって、それら 2 つの構造体の間の可能な接触の最大量ではない。大抵の場合、電極 116 に印加されるゲート電圧 V_G を増加させることにより、梁 110 及び接点 112 がより密接に接触することが当てはまる。スイッチ 102 がスイッチのアレイを含む実施形態において、完全閉鎖構成は、アレイのスイッチが全て最大限閉鎖している状態を指し、部分閉鎖構成は、スイッチアレイのうち少なくとも 1 つのスイッチが完全に閉鎖していない状態を示す。例えば、スイッチアレイは、1 つ以上の接点及び 1 つ以上の可動要素を含み、可動要素のそれぞれは、電気機械スイッチ構造体全体が完全閉鎖構成にあるときに少なくとも 1 つの関連する接点と最大接触しており、各可動要素は、電気機械スイッチ構造体が開放構成にあるときには、関連する接点から開離している。

【0028】

切り替え事象（すなわちスイッチ 102 の非導電状態から導電状態へ、又はその逆の移動）の間、ゲート電圧 V_G は、 $t_2 - t_0$ に等しい切り替え事象時間 T_{TOT} にわたって変化する。しかし、スイッチ 102 を、 $t_2 - t_1$ に等しい特性時間 T_C にわたって、開放構成（梁 110 及び接点 112 が、その間の電氣的連通を実質的に辛うじて排除する程度に開離している構成）から完全閉鎖構成へ移動するように構成してもよい。スイッチ 102 が開放される切り替え事象に際し、ゲート電圧 V_G は、増加ではなく減少するだろう。スイッチ 102 がスイッチアレイを含む場合、特性時間 T_C は、アレイの第 1 スwitch の閉鎖時点とアレイの全てのスイッチが最大限まで閉鎖した時点との間の時間を指す。電気機械スイッチ構造体が電気機械スイッチのアレイを含む実施形態において、スイッチアレイに関する「特性時間」は、実効アレイ抵抗が最低になるスイッチの構成から、実効アレイ抵抗が無限大となる構成へ移動するのに必要な時間（例えば並列の 2 つのスイッチの場合、各スイッチに関する開放時間の長い方、直列の 2 つのスイッチの場合、開放時間の短い方）を指す。

【0029】

再び図 1 を参照すると、転流回路 120 は、スイッチ 102 と並列接続される。転流回路 120 は、第 1 分岐 124 及び第 2 分岐 126 を有する平衡ダイオードブリッジ 122 を含む。本明細書で使用する場合、「平衡ダイオードブリッジ」という用語は、第 1 及び第 2 分岐 124、126 の両方にわたる電圧降下が実質的に等しくなるように構成されたダイオードブリッジを指す。平衡ダイオードブリッジ 122 の第 1 分岐 124 は、直列回路で相互に結合された第 1 ダイオード 128 及び第 2 ダイオード 130 を含む。同様に、第 2 分岐 126 は、直列で動作可能に結合された第 3 ダイオード 132 及び第 4 ダイオード

10

20

30

40

50

ド 1 3 4 を含む。

【 0 0 3 0 】

電圧スナバ回路 1 3 6 は、スイッチ 1 0 2 と並列に結合され、高速接点開離の間の電圧オーバーシュートを制限するように構成される。或る実施形態において、スナバ回路 1 3 6 は、スナバ抵抗器（図示せず）と直列に結合されたスナバキャパシタ（図示せず）を含む。スナバキャパシタにより、スイッチ 1 0 2 の順次開放中の過渡電圧共有が改善する。更に、スナバ抵抗器は、スイッチ 1 0 2 の閉鎖動作中に、スナバキャパシタが生成する電流のいかなるパルスも抑制する。その他の或る実施形態において、電圧スナバ回路 1 3 6 は、金属酸化物バリスタ（MOV）（図示せず）を含む。

【 0 0 3 1 】

第 1 MEMS スwitch 1 0 2 は、平衡ダイオードブリッジ 1 2 2 の中点 1 3 8、1 4 0 をまたいで並列に接続される。第 1 中点 1 3 8 は第 1 及び第 2 ダイオード 1 2 8、1 3 0 の間に位置し、第 2 中点 1 4 0 は第 3 及び第 4 ダイオード 1 3 2、1 3 4 の間に位置する。

【 0 0 3 2 】

転流回路 1 2 0 は、平衡ダイオードブリッジ 1 2 2 と動作可能に関連付けられて結合されたパルス回路 1 4 2 も含む。パルス回路 1 4 2 は、スイッチ条件を検出し、スイッチ条件にตอบสนองして切り替え事象（スイッチ 1 0 2 の開放又は閉鎖）を開始するように構成される。本明細書で使用する場合、「スイッチ条件」という用語は、スイッチ 1 0 2 の現在の動作状態を変更するきっかけとなる条件を指す。スイッチ条件は、回路故障又はスイッチ ON / OFF 要求を含むがこれらに限定されない、多くの動作にตอบสนองして発生する。

【 0 0 3 3 】

パルス回路 1 4 2 は、相互に直列に結合されたパルススイッチ 1 4 4 及びパルスキャパシタ 1 4 6 を含み、パルスキャパシタは容量 C_{PULSE} を有する。パルス回路 1 4 2 は、パルススイッチ 1 4 4 と直列に結合した第 1 ダイオード 1 4 8 も含み、パルスインダクタンス L_{PULSE} によって特徴付けられる。パルスキャパシタ 1 4 6 は、平衡ダイオードブリッジ 1 2 2 を通るパルス電流 I_{PULSE} を誘発するためにパルス信号を形成するように構成される。パルス信号は、例えば、スイッチ 1 0 2 の切り替え事象に関連して生成される。パルスインダクタンス L_{PULSE} 、ダイオード 1 4 8、パルススイッチ 1 4 4、及びパルスキャパシタ 1 4 6 は、直列に結合されてパルス回路 1 4 2 の第 1 分岐を形成し、第 1 分岐の部品はパルス電流を整形すると共にタイミングを調節するように構成される。

【 0 0 3 4 】

図 2 及び 7 ~ 1 0 を参照すると、後に詳述するように、動作中、平衡ダイオードブリッジ 1 2 2 は、スイッチ 1 0 2 の接点間（例えば梁 1 1 0 及び接点 1 1 2）のアーキ形成を抑制するように構成される。こうすることにより、幾つかの実施形態において、電流を流しながら（ほぼゼロ電圧ではあるが）、MEMS スwitch 1 0 2 を閉鎖状態から開放状態へ迅速に（例えばピコ秒又はナノ秒レベルで）切り替えることができる。

【 0 0 3 5 】

図 7 ~ 1 0 は、スイッチモジュール 1 0 0 の動作例を示す概略フローチャートである。スイッチモジュール 1 0 0 の動作例の初期状態を図 7 に示す。図示において、スイッチ 1 0 2 は完全閉鎖構成で始動し、 V_L / R_L にほぼ等しい値を有する負荷電流 I_L が負荷回路 1 0 4 に存在する。

【 0 0 3 6 】

更に、この動作例を説明するに際し、完全閉鎖構成にある MEMS スwitch 1 0 2 に関する特性抵抗 R_{SMIN} が十分に小さいため、MEMS スwitch の抵抗を通る負荷電流によって生じる電圧が、パルスをかけたときにダイオードブリッジ 1 2 2 の中点 1 3 8、1 4 0 の間のほぼゼロの電圧差に対してごくわずかな影響しか及ぼさない、と仮定する。例えば、完全閉鎖 MEMS スwitch 1 0 2 に関する特性抵抗 R_{SMIN} は十分に小さく、最大予想負荷電流によって数ミリボルト未満の電圧降下を生じる、と仮定する。

10

20

30

40

50

【 0 0 3 7 】

なお、スイッチモジュール 1 0 0 のこの初期条件において、パルススイッチ 1 4 4 は第 1 開放状態にある。加えて、パルス回路 1 4 2 には電流が無い（すなわち、 $I_{PULSE} = 0$ ）。また、パルス回路 1 4 2 において、キャパシタ 1 4 6 は電圧 V_{PULSE} に予め帯電されており、 V_{PULSE} は、負荷電流の転送間隔の間に予想される負荷電流 I_L よりもかなり大きい（例えば 2 倍の）最大振幅を有するパルス電流の半正弦波を発生させ得る電圧である。なお、 C_{PULSE} 及び L_{PULSE} を、パルス回路 1 4 2 に共振を誘発するように選択できる。

【 0 0 3 8 】

図 8 は、パルス回路 1 4 2 を起動させるプロセスの模式図である。なお、検出回路（図示せず）をパルス回路 1 4 2 に結合してもよい。検出回路としては、例えば、負荷回路電流 I_L のレベル及び / 又は電圧レベル V_L の値を検知するように構成された検知回路（図示せず）を含む。更に、検出回路を、上述のようなスイッチ条件を検出するように構成してもよい。一実施形態において、スイッチ条件は、所定の閾値を超える電流レベル及び / 又は電圧レベルによって発生する。

10

【 0 0 3 9 】

パルス回路 1 4 2 は、スイッチ 1 0 2 の現在の完全閉鎖構成を開放構成に切り替えるためのスイッチ条件を検出するように構成される。一実施形態において、スイッチ条件は、所定の閾値レベルを超える負荷回路 1 0 4 の電圧レベル又は負荷電流によって発生する、故障条件である。しかし、当然ながら、スイッチ条件は、MEMS スwitch 1 0 2 の所与

20

【 0 0 4 0 】

一実施形態において、パルススイッチ 1 4 4 は、検出された切替条件の結果としてのトリガ信号の受信に応答して、正弦波パルスを発生する。パルススイッチ 1 4 4 の起動によって、パルス回路 1 4 2 における共振正弦波パルス電流 I_{PULSE} を開始する。パルス電流 I_{PULSE} の電流方向は、参照符号 1 5 0 及び 1 5 2 で表される。更に、平衡ダイオードブリッジ 1 2 2 の第 1 分岐 1 2 4 の第 1 ダイオード 1 2 8 及び第 2 ダイオード 1 3 0 を通るパルス電流 I_{PULSE} の電流方向及び相対振幅は、電流ベクトル 1 5 4 及び 1 5 6 によってそれぞれ表される。同様に、電流ベクトル 1 5 8 及び 1 6 0 は、第 3 ダイオード 1 3 2 及び第 4 ダイオード 1 3 4 をそれぞれ通るパルス回路電流の電流方向及び相対

30

【 0 0 4 1 】

最大正弦波ブリッジパルス電流の値は、パルスキャパシタ 1 4 6 の初期電圧、パルスキャパシタの値 C_{PULSE} 、及びパルス回路 1 4 2 のインダクタンス値 L_{PULSE} によって定まる。 C_{PULSE} 及び L_{PULSE} の値により、パルス電流 I_{PULSE} の半正弦波のパルス幅も定まる。ブリッジ電流パルス幅は、負荷電流 I_L の変化率及び負荷故障条件の間の所望の最大通過電流に基づいて予測される、システム負荷電流ターンオフ要件を満たすように調整される。パルススイッチ 1 4 4 は、MEMS スwitch 1 0 2 の開放に先立って導電状態となるように構成される。

【 0 0 4 2 】

40

なお、パルススイッチ 1 4 4 の起動には、平衡ダイオードブリッジ 1 2 2 を通るパルス電流 I_{PULSE} のタイミングを制御することにより、切り替え事象の間の MEMS スwitch 1 0 2 の接点（例えば、梁 1 1 0 及び接点 1 1 2）を通る経路のインピーダンスよりも低いインピーダンス経路を作ることにも含まれる。加えて、パルススイッチ 1 4 4 を起動させて、MEMS スwitch 1 0 2 の接点全体にわたって所望の電圧降下を得ることもできる。

【 0 0 4 3 】

一実施形態において、パルススイッチ 1 4 4 は、例えば、ナノ秒からマイクロ秒の範囲の切替速度を有するように構成された半導体スイッチである。パルススイッチ 1 4 4 の切替速度は、故障条件における負荷電流の予測立ち上がり時間と比較して、相対的に速くあ

50

るべきである。MEMSスイッチ102の電流定格は、負荷電流 I_L の立ち上がりの定格に依存し、ひいては上述したように、負荷回路104におけるインダクタンス L_L 及び供給電圧 V_L に依存する。MEMSスイッチ102の定格を適宜定めて、パルス回路142の速度性能と比較して負荷電流 I_L が速く立ち上がった場合でも、より大きい負荷電流 I_L を扱えるようにできる。

【0044】

パルス電流 I_{PULSE} は、ゼロ値から増加し、平衡ダイオードブリッジ122の第1及び第2分岐124、126の間で均等に分かれる。一実施形態によると、平衡ダイオードブリッジ122の分岐124、126にわたる電圧降下の差は、上述したように、ごくわずかになるように設計される。また、上述したように、ダイオードブリッジ122を、ダイオードブリッジ122の第1及び第2分岐124、126にわたる電圧降下が実質的に等しくなるように、釣り合わせることにもできる。更に、現時点で完全閉鎖状態にあるMEMSスイッチ102の抵抗は比較的小さいので、MEMSスイッチ全体にわたって電圧降下が比較的小さくなる。しかし、(例えば、MEMSスイッチの元々の設計によって)MEMSスイッチ102全体の電圧降下が大きい場合、ダイオードブリッジ122がMEMSスイッチと並列に動作可能に結合されている分、ダイオードブリッジ122の平衡に影響が及ぶ可能性がある。MEMSスイッチ102の抵抗によってMEMSスイッチ全体に深刻な電圧降下が生じた場合、ダイオードブリッジ122により最大ブリッジパルス電流の振幅を増加させることによって、結果的に生じた不均衡を調整できる。

【0045】

そして、図9は、MEMSスイッチ102の開放を開始する模式図である。上述したように、パルス回路142のパルススイッチ144は、MEMSスイッチ102の開放に先立って起動される。パルス電流 I_{PULSE} が増加すると、パルス回路142の共振作用のため、パルスキャパシタ146全体の電圧が減少する。MEMSスイッチ102が完全に閉鎖して導電しているON条件において、MEMSスイッチは、負荷回路電流 I_L に対して比較的低いインピーダンスの経路を示す。

【0046】

パルス電流 I_{PULSE} の振幅が負荷回路電流 I_L の振幅よりも大きくなると(例えば、パルス回路142の共振作用のため)、MEMSスイッチ102の現在の動作状態を、完全閉鎖且つ導電状態から、MEMSスイッチ102が開放及びターンオフを開始する増抵抗条件(例えば、梁110がまだ接点112と接触しているが、この2つの間の接触圧がスイッチ開放プロセスによって減少する状態)へ切り替えるために、ゲート電圧がMEMSスイッチ102に印加される。これによって特性スイッチ抵抗が増加し、結果として、負荷電流 I_L が開始し、MEMSスイッチ102から転流回路120に迂回する。

【0047】

現時点のこの条件において、平衡ダイオードブリッジ122は、増加中の特性抵抗に関連付けられたMEMSスイッチ102を通る経路と比較して、負荷電流 I_L への相対的に低いインピーダンスの経路を示す。なお、MEMSスイッチ102を通る負荷電流 I_L のこの迂回は、負荷回路電流 I_L の変化率と比較して極めて速いプロセスである。上述したように、高速電流迂回の障害を回避するために、MEMSスイッチ102と平衡ダイオードブリッジ122との間の接続162、164にそれぞれ関連するインダクタンス L_1 及び L_2 は小さいことが望ましい。

【0048】

MEMSスイッチ102から転流回路120への電流伝達プロセスが続くにつれて、第1ダイオード128及び第4ダイオード134のそれぞれの電流が増加し、同時に、第2ダイオード130及び第3ダイオード132のそれぞれの電流が減少する。伝達プロセスは、MEMSスイッチ102の接点(例えば、梁110及び接点112)が開離してその間に物理的間隙を形成し、負荷電流 I_L の全てが第1ダイオード128及び第4ダイオード134によって流れると完了する。

【0049】

方向 166 に向かって MEMS スイッチ 102 からダイオードブリッジ 122 へ負荷電流 I_L が迂回した結果、ダイオードブリッジの第 1 及び第 2 分岐 124、126 に不均衡が生じる。更に、パルス電流 I_{PULSE} が減衰すると、パルスキャパシタ 146 全体の電圧が逆行（例えば、「逆起電力」として作用）し続け、これが負荷回路電流 I_L を最終的にゼロまで減少させる。ダイオードブリッジ 122 の第 2 ダイオード 130 及び第 3 ダイオード 132 はその後、逆バイアスがかけられ、それに伴って負荷電流 I_L はパルス回路 142 を通るように方向付けられる。そして、負荷電流 I_L はパルスキャパシタ 146 のパルスインダクタンス L_{PULSE} 及び容量 C_{PULSE} によって特徴付けられる直列共振回路と相互作用するようになる。

【0050】

10

ここで図 10 において、負荷電流 I_L の低減プロセスの模式図を参照する。MEMS スイッチ 102 の接点（例えば、梁 110 及び接点 112）が開離した瞬間に、無限大の抵抗が生じる。更に、ダイオードブリッジ 122 は MEMS スイッチ 102 の接点 110、112 にわたってほぼゼロの電圧を維持していない。また、負荷回路電流 I_L は、第 1 ダイオード 128 及び第 4 ダイオード 134 を通る電流と等しくなる。上述したように、第 2 ダイオード 130 及び第 3 ダイオード 132 を通る電流は存在していない。

【0051】

加えて、MEMS スイッチ 102 の接点 112 から梁 110 までの電圧差は、パルスインダクタンス L_{PULSE} 、パルスキャパシタ 146 の容量 C_{PULSE} 、負荷インダクタンス L_L 、及び負荷抵抗 R_L による減衰を含むネット共振回路によって定まる割合で、電圧 V_L のおよそ 2 倍の最大値まで上昇している。更に、負荷回路電流 I_L と等しくなっているパルス電流 I_{PULSE} は、ダイオードブリッジ 122 及びパルス回路ダイオード 168 の逆行阻止作用により、共振的にゼロまで減少し、ゼロ値を維持している。パルスキャパシタ 146 全体にわたる電圧は、この時点で最小値まで共振的に逆行しており、この最小値は、パルスキャパシタが再び帯電するまで維持されることになる。

20

【0052】

ダイオードブリッジ 122 は、接点が開離して MEMS スイッチが開放されるまで、MEMS スイッチ 102 の接点 110、112 にわたってほぼゼロの電圧を維持するように構成されているので、開放時に MEMS スイッチの接点間に生じ易いかなるアークも抑制し、損傷を防止できる。加えて、MEMS スイッチ 102 の接点 110、112 は、MEMS スイッチを通る大幅に低減された電流において、開放状態に近付く。また、負荷インダクタンス L_L に蓄えられた（負荷回路 104 及び電源 108 のインダクタンスを含む）いかなるエネルギーもパルスキャパシタ 146 に伝達され、電圧散逸回路（図示せず）で吸収される。電圧スナバ回路 136 は、ブリッジ 122 と MEMS スイッチ 102 との間のインターフェースに残る誘導エネルギーによる高速接点開離の間、電圧オーバーシュートを制限するように構成される。更に、開放時の MEMS スイッチ 102 の接点 110、112 にわたる再印加電圧の増加率を、スナバ回路 136 を使用して制御できる。

30

【0053】

上述のように、スイッチモジュールの実施形態において、電気機械スイッチを、個別にもスイッチアレイの一部としても採用できる。例えば、図 11 を参照すると、スイッチモジュール 200 は、平衡ダイオードブリッジ 222 の中点 238、240 の間にアレイとして配置され、直列接続された、幾つかの電気機械スイッチ 202a、202b を含む。パルス回路 242 はその後、上述のように、平衡ダイオードブリッジ 222 全体に対して接続される。端子 203 を使用して、スイッチモジュール 200 を、例えば負荷回路（図示せず）に接続する。図 12 を参照すると、別の実施形態として、スイッチモジュール 300 は、平衡ダイオードブリッジ 322 の中点 338、340 の間にアレイとして配置され、並列接続された、幾つかの電気機械スイッチ 302a、302b を含む。ここでも、パルス回路 342 は平衡ダイオードブリッジ 322 全体に対して接続され、端子 303 を使用してスイッチモジュール 300 を負荷回路（図示せず）に接続する。図 13 を参照すると、更に別の実施形態において、スイッチモジュール 400 は、平衡ダイオードブリッ

40

50

ジ 4 2 2 の中点 4 3 8、4 4 0 の間にアレイとして配置され、直列及び並列の両方で接続された、幾つかの電気機械スイッチ 4 0 2 a、4 0 2 b、4 0 2 c、4 0 2 d を含む。ここでも、パルス回路 4 4 2 は平衡ダイオードブリッジ 4 2 2 全体に対して接続され、端子 4 0 3 を使用してスイッチモジュール 4 0 0 を負荷回路（図示せず）に接続する。

【 0 0 5 4 】

再び図 1 を参照すると、転流回路 1 4 2 は、合計インダクタンス L_{COM} に関連付けられる。合計転流回路インダクタンス L_{COM} は、例えば、MEMS スイッチ 1 0 2 と平衡ダイオードブリッジ 1 2 2 との間の接続 1 6 2、1 6 4 にそれぞれ関連するインダクタンス L_1 及び L_2 、パルス回路インダクタンス L_{PULSE} 、及び平衡ダイオードブリッジ 1 2 2 に関連するインダクタンス L_B を含む。MEMS スイッチ 1 0 2 及び平衡ダイオードブリッジ 1 2 2 は、転流回路 1 2 0 に関連する合計インダクタンス L_{COM} がスイッチ開放の特性時間 T_C と最低特性スイッチ抵抗 R_{SMIN} （すなわち、完全閉鎖構成にあるスイッチに関するスイッチ抵抗）との積以下になるように配置される。以下に説明するように、スイッチモジュール 1 0 0 をこのように構成することは、スイッチ 1 0 2 全体の電圧サージ回避に役立つ。

【 0 0 5 5 】

合計インダクタンス L_{COM} を積 $R_{SMIN} \cdot T_C$ 以下に維持するために、最低特性スイッチ抵抗 R_{SMIN} 及び / 又はスイッチ 1 0 2 が開放されている特性時間 T_C を増加させることができる。しかし、最低特性スイッチ抵抗 R_{SMIN} を増加させることで、スイッチモジュール 1 0 0 におけるエネルギー損失が増加する可能性がある。スイッチ 1 0 2 が開放される特性時間 T_C を $\cdot BR$ 掬ちした結果、開放前にスイッチを流れる電流が増加する可能性がある。これは、負荷に損傷を与える十分なレベルに達する前にスイッチモジュールが故障電流を迂回させることを意図している場合には、許容できない。このように、幾つかの実施形態において、スイッチ 1 0 2 は、約 15 マイクロ秒以下の特性時間 T_C にわたって開放及び完全閉鎖構成の間で移動するように構成される。スイッチ 1 0 2 の開放時間が制御可能な用途において、幾つかの実施形態では、耐え得る限界値をわずかに下回る電圧レベルで（すなわち、 $L_{COM} = R_{SMIN} \cdot T_C$ ）、ブリッジ 1 2 2 内への電流転流の間に定電圧を発生させるようにスイッチの開放を制御することが望ましい。なお、これよりも高い電圧ではスイッチ 1 0 2 に損傷を与える結果となり、これよりも低い電圧では無駄に長時間を費やす結果となる。

【 0 0 5 6 】

上記の制限を考慮すると、転流回路内に含まれる領域を限定するように、転流回路の部品（例えば、ダイオードブリッジ 1 2 2、接続 1 6 2、1 6 4、及びパルス回路 1 4 2）を物理的に配置することによって、転流回路 1 4 2 に関するインダクタンス L_{COM} を積 $R_{SMIN} \cdot T_C$ 以下に維持することが望ましい。例えば、MEMS スイッチ 1 0 2 及び平衡ダイオードブリッジ 1 2 2 は、平衡ダイオードブリッジ、及び特に MEMS スイッチ 1 0 2 への接続 1 6 2、1 6 4 によって生じる寄生インダクタンスを最小化できるように、近接して組み立てられる。一実施形態において、MEMS スイッチ 1 0 2 は、例えば、単一のパッケージ又は同じダイにおいて、平衡ダイオードブリッジ 1 2 2 と一体化される。MEMS スイッチ 1 0 2 と平衡ダイオードブリッジ 1 2 2 との間の内在的なインダクタンスは、このようにして、ターンオフ切り替え事象の間にダイオードブリッジへの負荷電流の伝達を行う際に、MEMS スイッチ 1 0 2 の接点 1 1 0、1 1 2 にわたる電圧の数パーセント未満の di/dt 電圧を発生する。

【 0 0 5 7 】

図 1 4 を参照すると、別の例示的实施形態に従って構成されたスイッチモジュール 5 0 0 が示されている。スイッチモジュール 5 0 0 は、第 1 電気機械スイッチ構造体 5 0 2 a、第 2 電気機械スイッチ構造体 5 0 2 b、並びに第 3、第 4、第 5、及び第 6 電気機械スイッチ構造体 5 0 2 c、5 0 2 d、5 0 2 e、5 0 2 f を含み、これらは各々、1 つのスイッチ或いは直列、並列、又はその両方で相互に接続されたスイッチのアレイを含む。電気機械スイッチ構造体 5 0 2 a ~ f の各々は、それぞれの特性時間にわたって開放構成と

10

20

30

40

50

完全閉鎖構成（後者はそれぞれの最低特性スイッチ抵抗に関連付けられている）との間で移動するように構成される。

【0058】

電気機械スイッチ構造体502a～fは、負荷回路504と、相互に並列に（例えば、図14のスイッチ構造体502a及び502d参照）、相互に直列に（例えば、図14のスイッチ構造体502a及び502b参照）、又はその両方で、接続するように構成される。例えば、電気機械スイッチ構造体502a～fは、負荷回路504をスイッチ構造体全体に接続させる端子503に関連付けられる。負荷回路504は、例えば、電気負荷506及び電源508を含む。

【0059】

電気機械スイッチ構造体502a～fの各々は、それぞれの転流回路520a～fと並列接続される。転流回路520a～fの各々は、電気機械スイッチ構造体502a～fの接点ひとつひとつとの間のアーク形成を抑制するように構成された平衡ダイオードブリッジ522a～fを含む。転流回路520a～fの各々は、関連する平衡ダイオードブリッジ522a～fにパルス電流を流すために切り替え事象と関連付けられたパルス信号を生成するように構成された、それぞれのパルス回路542a～fも含む。各電気機械スイッチ構造体502a～f及び関連する平衡ダイオードブリッジ522a～fはそれぞれ、電気機械スイッチ構造体502a～f及び関連する転流回路520a～fの各組合せにおいて（例えば、スイッチ502a及び転流回路520aが1つの関連組合せ、スイッチ502b及び転流回路520bがもう1つの関連組合せ等）、転流回路に関連する合計インダクタンスが、関連スイッチに関連付けられた特性時間と関連スイッチの最低特性抵抗との積以下になるように、相互に対して配置される。幾つかの実施形態において、電圧評価ネットワーク（図示せず）も、スイッチモジュール500に含まれる。

【0060】

スイッチ/ブリッジ/パルス回路の各組合せは、相互に独立して動作してもよく、各パルス回路は、それぞれ保護されているスイッチの許容可能な電圧及び電流レベルに応じたサイズである。スイッチ502a～fと可能な限り物理的に接近してダイオードブリッジ522a～f（及び関連するダイオード）を配置することによって、転流ループの浮遊インダクタンスが減少する。更に、各電気機械スイッチ502a～f（電気機械スイッチ構造体がスイッチのアレイを含む場合には電気機械スイッチのセット）に専用の転流回路520a～fを設けることによって、各スイッチ/スイッチアレイを、電圧サージを損傷する危険から保護することができる。スイッチ/スイッチアレイとこれに関連する転流回路との各組合せを個別のモジュール要素とすると、転流回路のインダクタンスが最低スイッチ抵抗とスイッチの特性開放時間との積以下になるように各要素を構成して、様々な構成においてモジュール要素を組み立てることによって、スイッチモジュール500を製造できる。

【0061】

スイッチモジュール500は、複数の転流回路520a～fを含む。幾つかの実施形態において、例えば転流回路のうちの幾つかを集約することによって、スイッチモジュール全体の複雑さを緩和することが望ましい。具体的には、図15を参照すると、そこには、別の例示的实施形態に従って構成されたスイッチモジュール600が示されている。スイッチモジュール600は、端子603を通じて、負荷回路（図示せず）に、相互に並列に（例えば、図15のスイッチ構造体602a及び602d参照）、及び相互に直列に（例えば、図15のスイッチ構造体602a及び602b参照）、接続するように構成された複数の電気機械スイッチ602a～fを含む。

【0062】

各電気機械スイッチ構造体602a～fは、それぞれの平衡ダイオードブリッジ622a～fと並列接続される。更に、外部負荷回路と並列接続されるように構成されたスイッチ（例えば、図15のスイッチ構造体602a及び602d、スイッチ構造体602b及び602e、ならびにスイッチ構造体602c及び602f）において、それぞれのバル

10

20

30

40

50

ス回路 6 4 2 a ~ c は、関連するスイッチ 6 0 2 a ~ f 向けの適切な平衡ダイオードブリッジ 6 2 2 a ~ f にパルス電流を流すため、切り替え事象と関連して、パルス信号を生成するように構成される。

【 0 0 6 3 】

各電気機械スイッチ構造体 6 0 2 a ~ f 及び関連する平衡ダイオードブリッジ 6 2 2 a ~ f はそれぞれ、電気機械スイッチ構造体 6 0 2 a ~ f と、関連する平衡ダイオードブリッジ 6 2 2 a ~ f と、パルス回路 6 4 2 a ~ c との各組合せにおいて（例えば、スイッチ 6 0 2 a、平衡ダイオードブリッジ 6 2 2 a、及びパルス回路 6 4 2 a が 1 つの関連する組合せ；スイッチ 6 0 2 b、平衡ダイオードブリッジ 6 2 2 b、及びパルス回路 6 4 2 b が 1 つの関連する組合せ；並びにスイッチ 6 0 2 d、平衡ダイオードブリッジ 6 2 2 d、及びパルス回路 6 4 2 a が 1 つの関連する組合せ、等）、パルス回路 / 平衡ダイオードブリッジの組合せに関連する合計インダクタンスが特性時間と関連スイッチの最低特性抵抗との積以下になるように、互いに対して配置される。

【 0 0 6 4 】

ここでも、幾つかの実施形態において、結果的な浮遊インダクタンスを最小限に抑えるために、各ダイオードブリッジ 6 2 2 a ~ f を、それぞれ関連するスイッチ 6 0 2 a ~ f に可能な限り物理的に近くに配置されるように接続することが望ましい。更に、単一のパルス回路 6 4 2 a ~ c の動作は、電流のパルスを、接続されているダイオードブリッジの全てに印加する（例えば、図 1 5 に示される実施形態では、パルス回路 6 4 2 a からのパルスはダイオードブリッジ 6 2 2 a 及び 6 2 2 d に電流を供給する）。合計パルス電流は、接続されているダイオードブリッジの全てに対してほぼ均一に分配され、各ダイオードブリッジの電流容量は、関連するスイッチから流れる負荷電流に応じたサイズとなる。各ダイオードブリッジ 6 2 2 a ~ f と各パルス回路 6 4 2 a ~ c の電圧定格は、単一のスイッチの電圧定格から定めることもできる。

【 0 0 6 5 】

図 1 を参照すると、全体的に、平衡ダイオードブリッジ 1 2 2 は、切り替え事象の間、関連する MEMS スwitch 1 0 2 に対して切替保護を提供できる。幾つかの実施形態において、転流回路 1 4 2 に関する合計インダクタンスが特性時間とスイッチの最低特性抵抗との積以下になるようにスイッチ 1 0 2 及び平衡ダイオードブリッジ 1 2 2 を構成することによって、浮遊インダクタンスによるスイッチ開放時の電圧サージ損傷が緩和される。例えば、図 1 6 を参照すると、図 1 のスイッチモジュール 1 0 0 に関して適用可能な等価回路 7 0 0 が示されており、この等価回路は、スイッチ 1 0 2（図 1）が転流回路 1 4 2（図 1）によって保護された状態で開放している間のスイッチモジュールの動作を表している。

【 0 0 6 6 】

図 1 及び 1 6 を参照すると、 $I_L(t)$ は、負荷（又は故障）電流を表す。負荷電流パルスの間、 $I_L(t)$ は完全に外部回路によって定まる。 $I_B(t)$ 及び $I_S(t)$ は、ダイオードブリッジ 1 2 2 及びスイッチ 1 0 2 を流れる負荷電流の一部である。伝達プロセスが開始すると、この電流の全てがスイッチ 1 0 2 を流れる。スイッチ 1 0 2 の抵抗 $R_S(t)$ は時間関数に従って変化し、スイッチが完全閉鎖構成にあるときには最初は最小値 R_{SMIN} であって、スイッチが開放されると無限大まで上昇する。 L_{COM} は、転流される電流が流れる転流回路 1 4 2 のインダクタンスである。この電流は、例えば、短絡ダイオード 1 2 8、1 3 0、1 3 2、1 3 4 を備える、転流回路 1 4 2 の実装及び接続を解析し、接続点 1 6 2、1 6 4 からみた実効インダクタンスを計算することによって求められる。 R_D は、MEMS スwitch 1 0 2 からみたダイオードブリッジ 1 2 2 の等価抵抗である（多くの場合、ダイオードブリッジの等価抵抗 R_D は、転流回路 1 4 2 及び負荷回路 1 0 4 を流れる電流の非線形関数であるが、この抵抗は線形抵抗器を用いても十分に概算可能である）。

【 0 0 6 7 】

等価回路 7 0 0 の目的においては、スナバ回路 1 3 6 を無視する。スイッチ 1 0 2 が開

10

20

30

40

50

放している間、スイッチにかかる電圧は、スイッチの溶解電圧（０．５から１．０Ｖ程度）に制限される。したがって、スナバ回路１３６は、溶解電圧に匹敵する電圧の変化を誘発する必要がある。このファクターによって、スナバ回路に関する許容可能な容量を約２０ナノファラッドに制限し、スイッチ開放時間を約８マイクロ秒とすると、スイッチ１０２の切り替え事象の間にスナバ回路１３６を流れる電流は、合計負荷電流の０．２％未満になると予想される。したがって、スナバ回路１３６は、スイッチが開放後まで、スイッチ１０２にかかる過渡電圧に対して実際には何ら影響を与えず、転流プロセス中はスナバ回路１３６を無視できる。

【００６８】

図１６の回路の過渡挙動は、一次的な、時間依存微分方程式で表される。

10

【００６９】

【数１】

$$L_D \cdot \frac{dI_D(t)}{dt} = R_S(t) \cdot (I_L(t) - I_D(t)) - R_D \cdot I_D(t) \\ I_D(0) = 0$$

【００７０】

等式（１）は、以下のように書き換えられる。

【００７１】

20

【数２】

$$L_D \cdot \frac{dI_D(t)}{dt} + (R_D + R_S(t)) \cdot I_D(t) = R_S(t) \cdot I_L(t) \\ I_D(0) = 0$$

【００７２】

等式（２）は、アレイスイッチ抵抗及び負荷電流の両方の、任意の時間関数があっても、以下の閉形式解を有する。

【００７３】

【数３】

30

$$I_D(t) = \frac{1}{L_{COM}} \cdot \int_0^t e^{\frac{-1}{L_{COM}} \int_\tau^t (R_D + R_S(\lambda)) d\lambda} \cdot R_S(\tau) \cdot I_L(\tau) \cdot d\tau$$

【００７４】

ダイオード抵抗 R_D が無視できるほど小さい（ $R_D = 0$ ）場合、負荷電流は、切り替え事象の間、ほぼ一定となり（ $I_L(t) = I_L$ ）、スイッチ１０２の開放は、スイッチ抵抗 $R_S(t)$ が以下の式となるように特性時間 T_C にわたって均等に分散する。

【００７５】

【数４】

40

$$R_S(t) = \frac{R_{SMIN}}{1 - t/T_C}, 0 \leq t \leq T_C$$

【００７６】

（４）を（３）に直接代入して簡略化すると、ダイオード電流 $I_D(t)$ の単純な式ができる。

【００７７】

【数５】

$$I_D(t) = I_L \cdot \left(1 - \left(1 - t/T_C \right)^{R_{SMIN} T_C / L_{COM}} \right)$$

【００７８】

50

数式(5)のダイオード電流 $I_D(t)$ を負荷電流から差し引くと、スイッチ電流 $I_S(t)$ になる。

【0079】

【数6】

$$I_S(t) = I_L \cdot (1 - t/T_C)^{R_{SMIN} T_C / L_{COM}}$$

【0080】

数式(4)に示したスイッチ抵抗 $R_S(t)$ の式を、数式(6)に掛けると、スイッチ102にかかる電圧 $V_S(t)$ が求められる。

【0081】

【数7】

$$V_S(t) = I_L \cdot R_{SMIN} \cdot (1 - t/T_C)^{R_{SMIN} T_C / L_{COM} - 1}$$

【0082】

数式(7)より、スイッチ102にかかる電圧 $V_S(t)$ の挙動が指数の符号に依存していることがわかる。指数が正の場合 ($L_{COM} < R_{SMIN} \cdot T_C$)、スイッチ電圧 $V_S(t)$ は時間と共に減衰し；指数がゼロの場合 ($L_{COM} = R_{SMIN} \cdot T_C$)、電圧 $V_S(t)$ は一定であり；指数が負の場合 ($L_{COM} > R_{SMIN} \cdot T_C$)、電圧 $V_S(t)$ は時間と共に上昇する（特異点まで）。物理的に、 $T_C = L_{COM} / R_{SMIN}$ の値は、2つの異なる状態の境界を示す。 T_C の値が比較的大きい場合、スイッチ102を通る電流が切り替え事象の期間にわたって減少するように、開放しているスイッチ102によって拒絶されるよりも高速で、電流がダイオードブリッジ122に迂回する。しかし、 T_C の値が比較的小さい場合、電流が十分な速さでダイオードブリッジ122に迂回することは不可能で、スイッチ102を通る電流は時間と共に増加する。

【0083】

合計インダクタンスが転流回路 $L_{COM} \cdot R_{SMIN} \cdot T_C$ に関連付けられるように、スイッチ102及び平衡ダイオードブリッジ122を配置することによって、スイッチ102に関する電圧 $V_S(t)$ は、幾つかの実施形態において、一定のまま維持されるか、又は切り替え事象に関連して時間と共に減衰する。このように、幾つかの実施形態において、スイッチ102の開放時の電圧サージ損傷が緩和される。

【0084】

ここでは、本発明の一部の特徴のみを説明したが、当業者には数多くの修正及び改変が想到可能であろう。したがって、添付の特許請求の範囲は、このような修正及び改変も本発明の技術的範囲に含まれるものとして包含することを理解されたい。

【符号の説明】

【0085】

- 100 スイッチモジュール
- 102 微小電気機械システム(MEMS)スイッチ
- 104 負荷回路
- 106 電気負荷
- 108 電源
- 110 片持梁
- 112 接点
- 114 基板
- 116 電極
- 118 ゲート電圧源
- 120 転流回路
- 122 平衡ダイオードブリッジ
- 124 平衡ダイオードブリッジの第1分岐

10

20

30

40

50

1 2 6	平衡ダイオードブリッジの第 2 分岐	
1 2 8	第 1 ダイオード	
1 3 0	第 2 ダイオード	
1 3 2	第 3 ダイオード	
1 3 4	第 4 ダイオード	
1 3 6	電圧スナバ回路	
1 3 8、1 4 0	平衡ダイオードブリッジの中点	
1 4 2	パルス回路	
1 4 4	パルススイッチ	
1 4 6	パルスキャパシタ	10
1 4 8	ダイオード	
1 5 0、1 5 2	パルス電流 I_{PULSE} の電流方向	
1 5 4、1 5 6、1 5 8、1 6 0	電流ベクトル	
1 6 2、1 6 4	電気接続	
1 6 6	方向	
1 6 8	パルス回路ダイオード	
2 0 0	スイッチモジュール	
2 0 2 a、2 0 2 b	電気機械スイッチ	
2 0 3	端子	
2 2 2	平衡ダイオードブリッジ	20
2 3 8、2 4 0	平衡ダイオードブリッジの中点	
2 4 2	パルス回路	
3 0 0	スイッチモジュール	
3 0 2 a、3 0 2 b	電気機械スイッチ	
3 0 3	端子	
3 2 2	平衡ダイオードブリッジ	
3 3 8、3 4 0	平衡ダイオードブリッジの中点	
3 4 2	パルス回路	
4 0 0	スイッチモジュール	
4 0 2 a、4 0 2 b、4 0 2 c、4 0 2 d	電気機械スイッチ	30
4 0 3	端子	
4 2 2	平衡ダイオードブリッジ	
4 3 8、4 4 0	平衡ダイオードブリッジの中点	
4 4 2	パルス回路	
5 0 0	スイッチモジュール	
5 0 2 a	第 1 電気機械スイッチ構造体	
5 0 2 b	第 2 電気機械スイッチ構造体	
5 0 2 c、5 0 2 d、5 0 2 e、5 0 2 f	第 3、第 4、第 5、第 6 電気機械スイッチ構造体	
5 0 3	端子	40
5 0 4	負荷回路	
5 0 6	電気負荷	
5 0 8	電源	
5 2 0 a ~ f	転流回路	
5 2 2 a ~ f	平衡ダイオードブリッジ	
5 4 2 a ~ f	パルス回路	
6 0 0	スイッチモジュール	
6 0 2 a ~ f	複数の電気機械スイッチ	
6 0 3	端子	
6 2 2 a ~ f	平衡ダイオードブリッジ	50

6 4 2 a ~ c パルス回路
7 0 0 等価回路

【図 1】

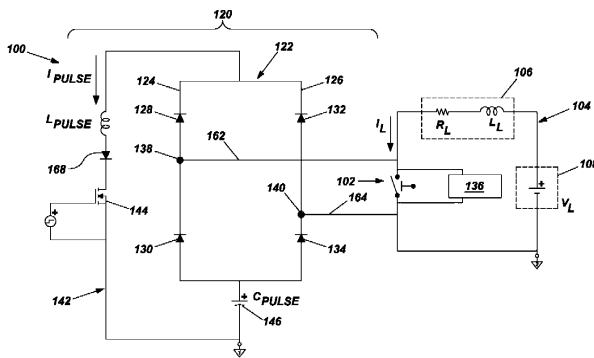


Fig. 1

【図 3】

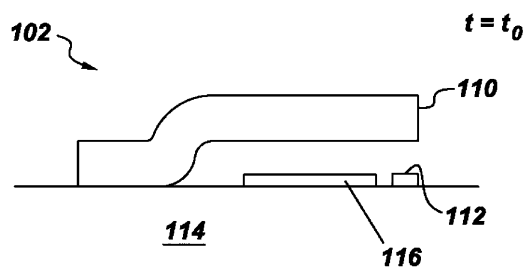


Fig. 3

【図 2】

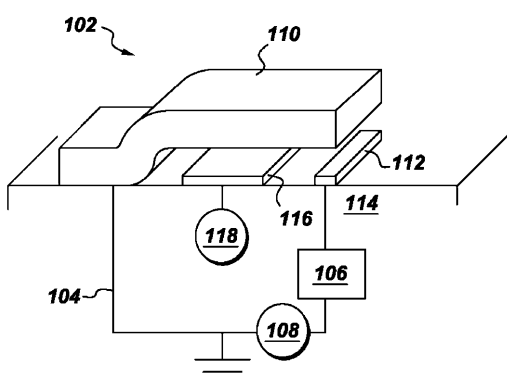


Fig. 2

【図 4】

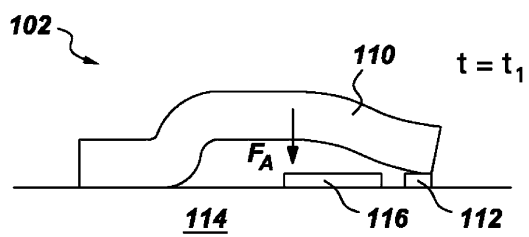


Fig. 4

【図 5】

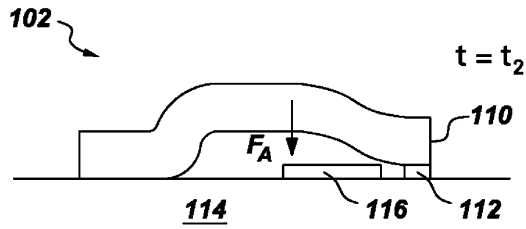


Fig. 5

【図 6】

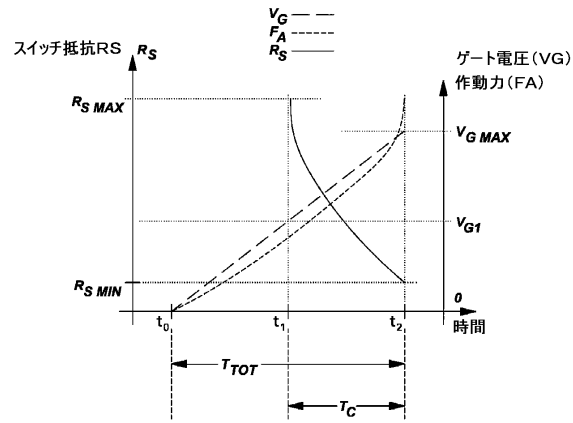


Fig. 6

【図 7】

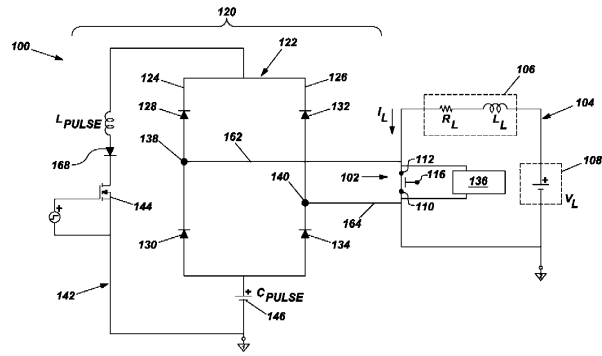


Fig. 7

【図 8】

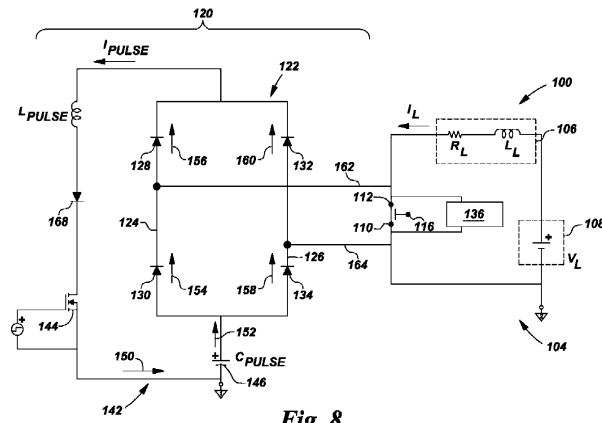


Fig. 8

【図 9】

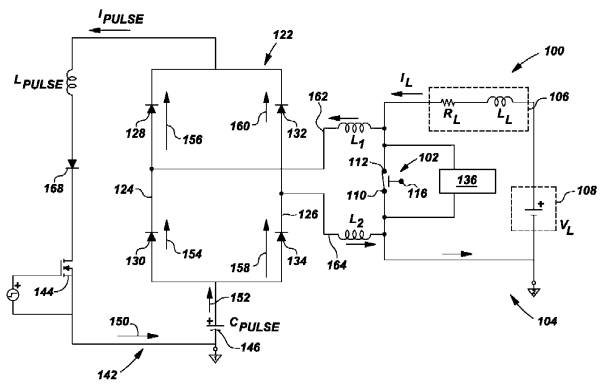


Fig. 9

【図 11】

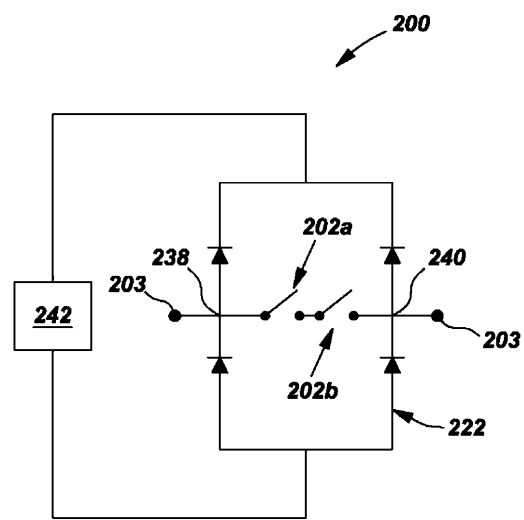


Fig. 11

【図 10】

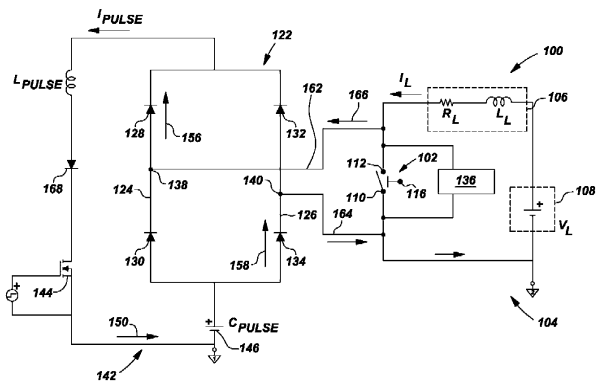
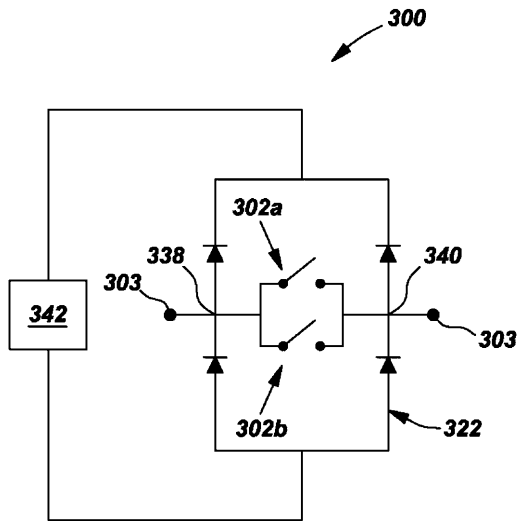
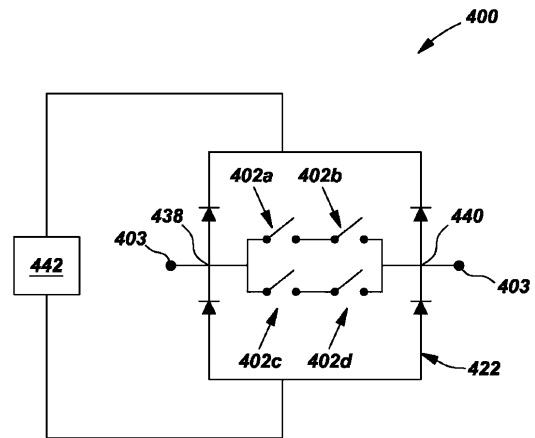


Fig. 10

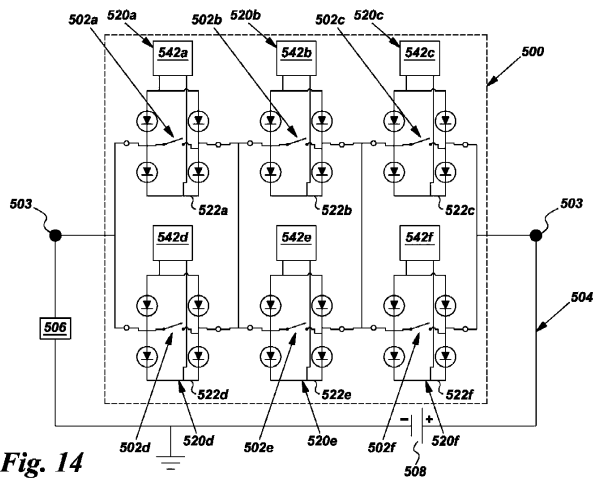
【図 12】

*Fig. 12*

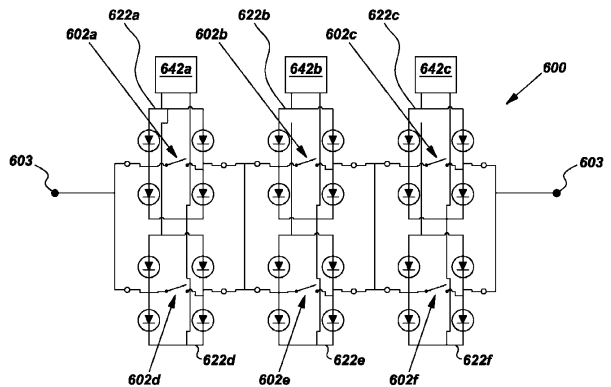
【図 13】

*Fig. 13*

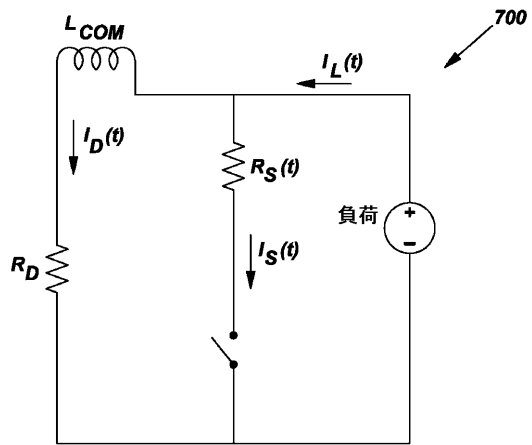
【図 14】

*Fig. 14*

【図 15】

*Fig. 15*

【図 16】

**Fig. 16**

フロントページの続き

- (72)発明者 アルン・ヴィルバクシャ・ゴウダ
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、ニスカユナ、リサーチ・サークル、1番、グローバル・リサーチ、ビルディング・ケイ1 - 4エイ59、パテント・ドケット・ルーム(番地なし)
- (72)発明者 カスリーン・アン・オブライエン
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、ニスカユナ、リサーチ・サークル、1番、グローバル・リサーチ、ビルディング・ケイ1 - 4エイ59、パテント・ドケット・ルーム(番地なし)
- (72)発明者 ジョン・ノートン・パーク
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、レックスフォード、グルームズ・ロード、723番
- (72)発明者 ウィリアム・ジェームス・ブレマラニ
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、スコティア、ウッドヘイヴン・ドライブ、133番
- (72)発明者 オーウェン・ジャニス・サミュエル・シェレンズ
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、ニスカユナ、リサーチ・サークル、1番、グローバル・リサーチ、ビルディング・ケイ1 - 4エイ59、パテント・ドケット・ルーム(番地なし)
- (72)発明者 カナカサバパティ・スブラマニアン
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、ニスカユナ、リサーチ・サークル、1番、グローバル・リサーチ、ビルディング・ケイ1 - 4エイ59、パテント・ドケット・ルーム(番地なし)

審査官 出野 智之

- (56)参考文献 特開2008-192597(JP, A)
特開2006-331742(JP, A)
特表2007-535798(JP, A)
特表2010-530119(JP, A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H01H 47/00
H01H 59/00