

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6639830号
(P6639830)

(45) 発行日 令和2年2月5日 (2020. 2. 5)

(24) 登録日 令和2年1月7日 (2020. 1. 7)

(51) Int. Cl.

A 6 1 B 5/055 (2006.01)

F 1

A 6 1 B 5/055 3 4 0

A 6 1 B 5/055 3 7 6

請求項の数 9 (全 24 頁)

(21) 出願番号 特願2015-158580 (P2015-158580)
 (22) 出願日 平成27年8月10日 (2015. 8. 10)
 (65) 公開番号 特開2017-35305 (P2017-35305A)
 (43) 公開日 平成29年2月16日 (2017. 2. 16)
 審査請求日 平成30年7月20日 (2018. 7. 20)

(73) 特許権者 594164542
 キヤノンメディカルシステムズ株式会社
 栃木県大田原市下石上1385番地
 (74) 代理人 110001771
 特許業務法人虎ノ門知的財産事務所
 (72) 発明者 待井 豊
 栃木県大田原市下石上1385番地 東芝
 メディカルシステムズ株式会社内
 (72) 発明者 古舘 直幸
 栃木県大田原市下石上1385番地 東芝
 メディカルシステムズ株式会社内
 (72) 発明者 川尻 将
 栃木県大田原市下石上1385番地 東芝
 メディカルシステムズ株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 磁気共鳴イメージング装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

電源に接続され自己インダクタンスを有する第1の回路と、前記第1の回路との間で相互インダクタンスを有する閉回路を少なくとも一つ有する第2の回路とを有する、傾斜磁場コイルを含む回路に対する等価回路を用いて、磁気共鳴イメージングで実行される撮像シーケンスが実行される時間が、印加される傾斜磁場の大きさの時間変化に応じて、前記傾斜磁場が立ち上がる区間と、前記傾斜磁場が一定になる区間と、前記傾斜磁場が立ち下がる区間とに分割された複数の時間区間ごとに、前記閉回路に流れる電流値を、前記撮像シーケンスに基づいて算出し、前記複数の時間区間ごとに算出された前記電流値に基づいて、前記等価回路上で消費されるジュール熱の大きさを算出し、前記ジュール熱の大きさに基づいて、前記撮像シーケンスの実行可否を前記撮像シーケンスの実行前に判定する判定部と、

前記判定部が前記撮像シーケンスを実行可と判定した場合に、前記撮像シーケンスを実行するシーケンス制御部と

を備える磁気共鳴イメージング装置。

【請求項 2】

前記判定部は、前記ジュール熱の大きさに基づいて、前記傾斜磁場コイルに電流を供給するコンデンサバンクの電圧値の推定値を算出し、前記電圧値の推定値に基づいて、前記撮像シーケンスの実行可否を前記撮像シーケンスの実行前に判定する、請求項1に記載の磁気共鳴イメージング装置。

【請求項 3】

前記シーケンス制御部は、所定の時刻における前記電圧値の推定値が指定した閾値まで回復しない場合に、繰り返し時間を延長させて前記撮像シーケンスを実行する、請求項 2 に記載の磁気共鳴イメージング装置。

【請求項 4】

前記シーケンス制御部は、前記電圧値の推定値が所定の閾値を下回った場合に、撮像における分解能を低下させて前記撮像シーケンスを実行する、請求項 2 に記載の磁気共鳴イメージング装置。

【請求項 5】

前記シーケンス制御部は、有効視野を増大させることにより、撮像における前記分解能を低下させる、請求項 4 に記載の磁気共鳴イメージング装置。

10

【請求項 6】

前記判定部は、前記複数の時間区間それぞれについて、前記コンデンサバンクの電圧値の推定値を算出する、請求項 2 に記載の磁気共鳴イメージング装置。

【請求項 7】

前記判定部は、前記電流値に基づいて、前記傾斜磁場コイルに印加される電圧値の推定値を算出する、請求項 1 ~ 6 のいずれか一つに記載の磁気共鳴イメージング装置。

【請求項 8】

前記判定部は、前記電流値に基づいて、前記傾斜磁場コイルに流れる電流値の推定値を算出する、請求項 1 ~ 7 のいずれか一つに記載の磁気共鳴イメージング装置。

20

【請求項 9】

前記判定部は、前記電流値に基づいて、前記傾斜磁場コイルの電流電圧特性を算出する、請求項 1 ~ 8 のいずれか一つに記載の磁気共鳴イメージング装置。

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明の実施形態は、磁気共鳴イメージング装置に関する。

【背景技術】**【0002】**

磁気共鳴イメージングに用いる傾斜磁場発生システムには、電力的な使用限界が存在する。このことを回避するため、傾斜磁場システムへの電流供給量が傾斜磁場発生システムの電力的な使用限界を確実に下回るような電流を傾斜磁場コイルに流すことで、傾斜磁場発生システムを安全に駆動する方法もある。

30

【0003】

しかしながら、傾斜磁場電源装置の電源供給能力に余裕があった場合、その余裕の分だけスライス枚数を増やす等の手段をとることで、より最適な条件で撮像できたことになる。従って、傾斜磁場発生システムの電力的な使用限界を撮像シーケンスに応じて正確に予想することができれば、電力的な使用限界の範囲内で最大限の傾斜磁場電流を流すことができ、傾斜磁場発生システムの性能を最大限引き出すことが可能になる。

【先行技術文献】

40

【特許文献】**【0004】**

【特許文献 1】特開 2013 - 000173 号公報

【発明の概要】**【発明が解決しようとする課題】****【0005】**

本発明が解決しようとする課題は、傾斜磁場発生システムの電氣的負荷を予測することができる磁気共鳴イメージング装置を提供することである。

【課題を解決するための手段】**【0006】**

50

実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置は、判定部と、シーケンス制御部とを備える。判定部は、電源に接続され自己インダクタンスを有する第１の回路と、前記第１の回路との間で相互インダクタンスを有する閉回路を少なくとも一つ有する第２の回路とを有する、傾斜磁場コイルを含む回路に対する等価回路を用いて、磁気共鳴イメージングで実行される撮像シーケンスが実行される時間が、印加される傾斜磁場の大きさの時間変化に応じて、前記傾斜磁場が立ち上がる区間と、前記傾斜磁場が一定になる区間と、前記傾斜磁場が立ち下がる区間とに分割された複数の時間区間ごとに、前記閉回路に流れる電流値を、磁気共鳴イメージングで実行される撮像シーケンスに基づいて算出し、前記複数の時間区間ごとに算出された前記電流値に基づいて、前記等価回路上で消費されるジュール熱の大きさを算出し、前記ジュール熱の大きさに基づいて、前記撮像シーケンスの実行可否を前記撮像シーケンスの実行前に判定する。シーケンス制御部は、前記判定部が前記撮像シーケンスを実行可と判定した場合に、前記撮像シーケンスを実行する。

10

【図面の簡単な説明】

【０００７】

【図１】図１は、第１の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置の構成を示すブロック図である。

【図２】図２は、第１の実施形態に係る傾斜磁場電源等の構成を示すブロック図である。

【図３】図３は、第１の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置の行う処理の手順を示したフローチャートである。

【図４】図４は、第１の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置の行う処理について説明した図である。

20

【図５Ａ】図５Ａは、第１の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置の行う処理について説明した図である。

【図５Ｂ】図５Ｂは、第１の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置の行う処理について説明した図である。

【図５Ｃ】図５Ｃは、第１の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置の行う処理について説明した図である。

【図６】図６は、第１の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置の行う処理の手順を示したフローチャートである。

【図７】図７は、第１の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置の行う処理について説明した図である。

30

【図８】図８は、第１の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置の行う処理について説明した図である。

【図９Ａ】図９Ａは、第２の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置の行う処理について説明した図である。

【図９Ｂ】図９Ｂは、第２の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置の行う処理について説明した図である。

【図９Ｃ】図９Ｃは、第２の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置の行う処理について説明した図である。

【発明を実施するための形態】

40

【０００８】

以下、添付図面を用いて、実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置を詳細に説明する。

【０００９】

（第１の実施形態）

図１を用いて、第１の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置の全体構成について説明する。図１は、第１の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置の構成を示すブロック図である。

【００１０】

図１に示すように、磁気共鳴イメージング装置１００は、静磁場磁石１０１と、シムコ

50

イル 130 と、傾斜磁場コイル 102 と、傾斜磁場電源 103 と、寝台 104 と、寝台制御回路 105 と、送信コイル 106 と、送信回路 107 と、受信コイル 108 と、受信回路 109 と、シーケンス制御回路 110 と、計算機システム 120 とを備える。なお、磁気共鳴イメージング装置 100 に被検体 P（例えば、人体）は含まれない。

【0011】

静磁場磁石 101 は、中空の円筒形状に形成された磁石であり、内部の空間に一様な静磁場を発生する。静磁場磁石 101 は、例えば、永久磁石、超伝導磁石等である。

【0012】

シムコイル 130 は、静磁場磁石 101 の内側において中空の円筒形状に形成されたコイルであり、図示されないシムコイル電源に接続され、シムコイル電源から供給される電源により、静磁場磁石 101 が発生した静磁場を均一化する。

10

【0013】

傾斜磁場コイル 102 は、中空の円筒形状に形成されたコイルであり、静磁場磁石 101 及びシムコイル 130 の内側に配置される。傾斜磁場コイル 102 は、図 2 に示されているように、互いに直交する X、Y、Z の各軸に対応する 3 つのコイル（X 軸傾斜磁場コイル 102 x、Y 軸傾斜磁場コイル 102 y、Z 軸傾斜磁場コイル 102 z）が組み合わされて形成されており、これら 3 つのコイルは、傾斜磁場電源 103 から個別に電流を受けて、X、Y、Z の各軸に沿って磁場強度が変化する傾斜磁場を発生させる。なお、Z 軸方向は、静磁場と同方向とする。また、Y 軸方向は、鉛直方向とし、X 軸方向は、Z 軸及び Y 軸に垂直な方向とする。

20

【0014】

なお、傾斜磁場コイル 102 によって発生する X、Y、Z 各軸の傾斜磁場は、例えば、スライス選択用傾斜磁場 G_s、位相エンコード用傾斜磁場 G_e、及びリードアウト用傾斜磁場 G_r を形成する。スライス選択用傾斜磁場 G_s は、任意に撮像断面を決めるために利用される。位相エンコード用傾斜磁場 G_e は、空間的位置に応じて MR 信号の位相を変化させるために利用される。リードアウト用傾斜磁場 G_r は、空間的位置に応じて MR 信号の周波数を変化させるために利用される。

【0015】

傾斜磁場電源 103 は、傾斜磁場コイル 102 に電流を供給する。この構成については図 2 を用いて後述する。

30

【0016】

寝台 104 は、被検体 P が載置される天板 104 a を備え、寝台制御回路 105 による制御のもと、天板 104 a を、被検体 P が載置された状態で傾斜磁場コイル 102 の空洞（撮像口）内へ挿入する。通常、寝台 104 は、長手方向が静磁場磁石 101 の中心軸と平行になるように設置される。寝台制御回路 105 は、計算機システム 120 による制御のもと、寝台 104 を駆動して天板 104 a を長手方向及び上下方向へ移動する。

【0017】

送信コイル 106 は、傾斜磁場コイル 102 の内側に配置され、送信回路 107 から RF（Radio Frequency）パルスの供給を受けて、高周波磁場を発生する。送信回路 107 は、対象とする原子核の種類及び磁場の強度で決まるラーモア周波数に対応する RF パルスを送信コイル 106 に供給する。

40

【0018】

受信コイル 108 は、傾斜磁場コイル 102 の内側に配置され、高周波磁場の影響によって被検体 P から発せられる MR 信号を受信する。受信コイル 108 は、MR 信号を受信すると、受信した MR 信号を受信回路 109 へ出力する。例えば、受信コイル 108 は、1 以上、典型的には複数のコイルエレメントを有するコイルアレイである。

【0019】

受信回路 109 は、受信コイル 108 から出力される MR 信号に基づいて MR データを生成する。具体的には、受信回路 109 は、受信コイル 108 から出力される MR 信号に対して、前置増幅、中間周波変換、位相検波、低周波増幅、フィルタリング等の各種信号

50

処理を施した後、各種信号処理が施されたデータに対してアナログ/デジタル変換する。これにより、受信回路 109 は、デジタル化された複素数データである MR データを生成する。受信回路 109 が生成した MR データは、生データとも呼ばれる。

【0020】

また、受信回路 109 は、生成した MR データをシーケンス制御回路 110 へ送信する。なお、受信回路 109 は、静磁場磁石 101 や傾斜磁場コイル 102 等を備える架台装置側に備えられていてもよい。

【0021】

ここで、第 1 の実施形態において、受信コイル 108 の各コイルエレメントから出力される MR 信号は、適宜分配合成されることで、チャンネル等と呼ばれる単位で受信回路 109 10 10 9 に出力される。このため、MR データは、受信回路 109 以降の後段の処理においてチャンネル毎に取り扱われる。

【0022】

コイルエレメントの総数とチャンネルの総数との関係は、同一の場合もあれば、コイルエレメントの総数に対してチャンネルの総数が少ない場合、あるいは反対に、コイルエレメントの総数に対してチャンネルの総数が多い場合もある。なお、分配合成のタイミングは、上述したタイミングに限られるものではない。MR 信号若しくは MR データは、後述する画像生成機能 122 による処理の前までに、チャンネル単位に分配合成されればよい。

【0023】

シーケンス制御回路 110 は、計算機システム 120 20 120 から送信される撮像シーケンスの情報に基づいて、傾斜磁場電源 103、送信回路 107 及び受信回路 109 を駆動することによって、被検体 P の撮像を行う。

【0024】

撮像シーケンスとは、磁気共鳴イメージング装置 100 による検査に含まれる複数のプロトコルそれぞれに対応するパルスシーケンスを指す。撮像シーケンスの情報には、傾斜磁場電源 103 が傾斜磁場コイル 102 に供給する電源の強さや電源を供給するタイミング、送信回路 107 が送信コイル 106 に送信する RF パルスの強さや RF パルスを印加するタイミング、受信回路 109 が MR 信号を検出するタイミング等が定義される。

【0025】

なお、シーケンス制御回路 110 は、傾斜磁場電源 103、送信回路 107 及び受信回路 109、30 109、シムコイル電源等を駆動して被検体 P を撮像した結果、受信回路 109 から MR データを受信すると、受信した MR データを計算機システム 120 へ転送する。

【0026】

なお、磁気共鳴イメージング装置は、図示しない温度センサを備えても良い。温度センサは、例えば、温度を取得する温度計である。温度センサは、温度センサが設置された場所の温度を取得すると、シーケンス制御回路 110 に温度情報を送信する。

【0027】

シーケンス制御回路 110 は、温度情報を温度センサから受信すると、計算機システム 120 40 120 の処理回路 150 に温度情報を送信する。処理回路 150 は、シーケンス制御回路 110 を通じて、温度を取得する。

【0028】

温度センサとしては、赤外線放射温度計等の非接触式の温度計であってもよく、また、サーミスタ温度計や熱電対温度計等の接触式の温度計であってもよい。

【0029】

計算機システム 120 は、磁気共鳴イメージング装置 100 の全体制御や、データ収集、画像生成等を行う。計算機システム 120 は、処理回路 150、記憶回路 123、入力装置 124、ディスプレイ 125 を備える。また、処理回路 150 は、判定機能 11、インタフェース機能 121、画像生成機能 122、制御機能 126 を有する。

【0030】

第 1 の実施形態では、判定機能 11、インタフェース機能 121、画像生成機能 122 50 122

、制御機能１２６にて行われる各処理機能は、コンピュータによって実行可能なプログラムの形態で記憶回路１２３へ記憶されている。処理回路１５０はプログラムを記憶回路１２３から読み出し、実行することで各プログラムに対応する機能を実現するプロセッサである。換言すると、各プログラムを読みだした状態の処理回路１５０は、図１の処理回路１５０内に示された各機能を有することになる。なお、図１においては単一の処理回路１５０にて、判定機能１１、インタフェース機能１２１、画像生成機能１２２、制御機能１２６にて行われる処理機能が実現されるものとして説明したが、複数の独立したプロセッサを組み合わせることで処理回路１５０を構成し、各プロセッサがプログラムを実行することにより機能を実現するものとしても構わない。

【００３１】

10

換言すると、上述のそれぞれの機能がプログラムとして構成され、１つの処理回路が各プログラムを実行する場合であってもよいし、特定の機能が専用の独立したプログラム実行回路に実装される場合であってもよい。なお、処理回路１５０の有する判定機能１１、シーケンス制御回路１１０は、それぞれ判定部、シーケンス制御部の一例である。

【００３２】

上記説明において用いた「プロセッサ」という文言は、例えば、CPU (Central Processing Unit)、GPU (Graphical Processing Unit) 或いは、特定用途向け集積回路 (Application Specific Integrated Circuit: ASIC)、プログラマブル論理デバイス (例えば、単純プログラマブル論理デバイス (Simple Programmable Logic Device: SPLD)、複合プログラマブル論理デバイス (Complex Programmable Logic Device: CPLD)、及びフィールドプログラマブルゲートアレイ (Field Programmable Gate Array: FPGA)) 等の回路を意味する。プロセッサは記憶回路１２３に保存されたプログラムを読み出し実行することで機能を実現する。なお、記憶回路１２３にプログラムを保存する代わりに、プロセッサの回路内にプログラムを直接組み込むよう構成しても構わない。この場合、プロセッサは回路内に組み込まれたプログラムを読み出し実行することで機能を実現する。なお、寝台制御回路１０５、送信回路１０７、受信回路１０９等も同様に、上記のプロセッサなどの電子回路により構成される。

20

【００３３】

30

処理回路１５０は、判定機能１１により、撮像シーケンスの実行可否を撮像シーケンスの実行前に判定する。判定機能１１の具体的な処理については後述する。

【００３４】

処理回路１５０は、インタフェース機能１２１により、撮像シーケンスの情報をシーケンス制御回路１１０へ送信し、シーケンス制御回路１１０からMRデータを受信する。また、処理回路１５０は、インタフェース機能１２１を通じて、MRデータを受信すると、受信したMRデータを記憶回路１２３に格納する。

【００３５】

処理回路１５０は、画像生成機能１２２により、インタフェース機能１２１を通じて受信したMRデータや、記憶回路１２３に保管されたデータを用いて、画像の生成を行う。なお、処理回路１５０は、画像生成機能１２２によって得られた画像は、必要に応じてディスプレイ１２５や記憶回路１２３に送信する。

40

【００３６】

処理回路１５０は、制御機能１２６により、磁気共鳴イメージング装置１００の全体制御を行う。例えば、処理回路１５０は、制御機能１２６により、入力装置１２４を介して操作者から入力される撮像条件に基づいて撮像シーケンスの情報を生成し、生成した撮像シーケンスの情報をシーケンス制御回路１１０に送信することによって撮像を制御する。

【００３７】

記憶回路１２３は、処理回路１５０がインタフェース機能１２１を通じて受信したMRデータや、画像生成機能１２２により生成された画像データ等を記憶する。例えば、記憶

50

回路 1 2 3 は、R A M (Random Access Memory)、フラッシュメモリ等の半導体メモリ素子、ハードディスク、光ディスク等である。

【 0 0 3 8 】

入力装置 1 2 4 は、操作者からの各種指示や情報入力を受け付ける。入力装置 1 2 4 は、例えば、マウスやトラックボール等のポインティングデバイス、あるいはキーボード等の入力デバイスである。

【 0 0 3 9 】

ディスプレイ 1 2 5 は、処理回路 1 5 0 における制御機能 1 2 6 による制御のもと、画像データ等の各種の情報を表示する。ディスプレイ 1 2 5 は、例えば、液晶表示器等の表示デバイスである。

10

【 0 0 4 0 】

以上のように、実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 1 0 0 の全体構成について説明した。続いて、傾斜磁場電源 1 0 3 が、傾斜磁場コイル 1 0 2 に電流を供給する処理について、図 2 を用いて説明する。図 2 は、第 1 の実施形態に係る傾斜磁場電源 1 0 3 等の構成を示すブロック図である。

【 0 0 4 1 】

図 2 に示されるように、例えば、傾斜磁場電源 1 0 3 は、ポストレギュレータ 2 0 と、コンデンサバンク 2 1 x ~ 2 1 z、パワーステージ 2 2 x ~ 2 2 z を備える。

【 0 0 4 2 】

ポストレギュレータ 2 0 は、後述するパワーステージ 2 2 x ~ 2 2 z にエネルギーを供給する電源の役割を持つ装置である。ポストレギュレータ 2 0 は、パワーステージ 2 2 x ~ 2 2 z の動作に合わせて、パワーステージ 2 2 x ~ 2 2 z が必要とするエネルギーを供給する。ポストレギュレータ 2 0 の具体例としては、例えば交流電源を整流することにより得られた所定の直流電源である。ポストレギュレータ 2 0 は、例えば、C V (C o n s t a n t V o l t a g e) / C C (C o n s t a n t C u r r e n t) 特性を有する直流電源である。この場合、ポストレギュレータ 2 0 は、後段の負荷が大きい場合には定電流源として機能し、逆に後段の負荷が小さい場合には定電圧源として機能する。ただし、以下の実施例中で説明する状況においては、後段の負荷が大きいので、ポストレギュレータ 2 0 は、定電流源として機能する。

20

【 0 0 4 3 】

コンデンサバンク 2 1 x ~ 2 1 z は、ポストレギュレータ 2 0 では補うことのできない電力供給を負担する電池の役割をするコンデンサである。コンデンサバンク 2 1 x、コンデンサバンク 2 1 y、コンデンサバンク 2 1 z は、それぞれ x 軸傾斜磁場コイル 1 0 2 x、y 軸傾斜磁場コイル 1 0 2 y、z 軸傾斜磁場コイル 1 0 2 z に対応するコンデンサバンクを表す。コンデンサバンク 2 1 x ~ 2 1 z の構成例としては、例えば電解コンデンサがある。コンデンサバンク 2 1 x ~ 2 1 z は、ポストレギュレータ 2 0 及び、対応するパワーステージ 2 2 x ~ 2 2 z に接続され、ポストレギュレータ 2 0 から流入した電力を一時的に貯蔵し、貯蔵した電力を、必要に応じてパワーステージ 2 2 x ~ 2 2 z に対して放出する。

30

【 0 0 4 4 】

ここで、コンデンサバンクの役割としては、以下の通りである。すなわち、短時間に全軸の傾斜磁場コイル 1 0 2 x ~ 1 0 2 z に大電流を流すことが必要となった場合、必要な電力供給量が、一時的にポストレギュレータ 2 0 が供給することのできる電力を上回る場合がある。このような場合でも、コンデンサバンク 2 1 x ~ 2 1 z が存在することで、傾斜磁場コイル 1 0 2 x ~ 1 0 2 z に安定して電力を供給することができる。

40

【 0 0 4 5 】

パワーステージ 2 2 x ~ 2 2 z は、シーケンス波形を大電流パルスに変換する増幅器である。パワーステージ 2 2 x、パワーステージ 2 2 y、パワーステージ 2 2 z は、それぞれ x 軸傾斜磁場コイル 1 0 2 x、y 軸傾斜磁場コイル 1 0 2 y、z 軸傾斜磁場コイル 1 0 2 z に対応する増幅器である。パワーステージ 2 2 x ~ 2 2 z は、シーケンス制御回路 1

50

10 からシーケンス波形に対応する制御信号を受信して、受信した制御信号を大電流パルスに増幅して変換し、傾斜磁場コイル 102 に出力する。

【0046】

以上のように、傾斜磁場電源 103 は、撮像シーケンスの実行に必要な電流を傾斜磁場コイル 102 に供給する。

【0047】

次に、実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 に係る背景について説明する。傾斜磁場電源 103 及び傾斜磁場コイル 102 を含む傾斜磁場発生システムにおけるエネルギー収支については、以下の式(1)で表される。

【数1】

$$E_a^{\text{total}} + E_g^{\text{total}} = E_c^{\text{total}} + E_p^{\text{total}} \quad \cdots(1)$$

10

【0048】

ここで、 E_a^{total} は、パワーステージ 22x、22y、22z で消費される消費エネルギーである。 E_g^{total} は、傾斜磁場コイル 102x、102y、102z で消費される消費エネルギーである。 E_c^{total} は、コンデンサバンク 21x、21y、21z から傾斜磁場コイル 102x、102y、102z に供給されたエネルギーである。 E_p^{total} は、ポストレギュレータ 20 から供給されたエネルギーである。式(1)は、傾斜磁場発生システムにおいて、供給されるエネルギーと消費されるエネルギーが等しくなるというエネルギー保存則を表している。

20

【0049】

E_c^{total} は、具体的には式(2)で表される。

【数2】

$$E_c^{\text{total}} = \frac{1}{2} C V_c(0)^2 - \frac{1}{2} C V_c(t)^2 \quad \cdots(2)$$

【0050】

ここで、C は、コンデンサバンク 21x、21y、21z の静電容量であり、 $V_c(t)$ は時刻 t におけるコンデンサバンク 21x、21y、21z の電圧を表す。 $V_c(0)$ は、t = 0 すなわち初期状態におけるコンデンサバンク 21x、21y、21z の電圧を表す。

30

【0051】

E_p^{total} は、具体的には式(3)で表される。

【数3】

$$E_p^{\text{total}} = \int_0^t V_c(t') I_p(t') dt' \quad \cdots(3)$$

【0052】

ここで、 $I_p(t')$ は、時刻 t' においてポストレギュレータ 20 から供給される電流値を表す。以下の実施形態では、ポストレギュレータ 20 が、供給される電流値が所定の値になるように動作する場合で説明する。

40

【0053】

また、 E_a^{total} は、例えば式(4)で表される。

【数4】

$$E_a^{\text{total}} = \int_0^t (\alpha I(t')^2 + \beta I(t') + \gamma) dt' \quad \cdots(4)$$

【0054】

ここで、 $I(t')$ は、時刻 t' においてパワーステージ 22x、22y、22z から出力される電流値を表す。また、これは同時に、傾斜磁場コイル 102x、102y、102z に供給される電流値になっている。また、 α 、 β 、 γ は、経験的に算出される所定のパラメータである。

50

【 0 0 5 5 】

すなわち、パワーステージ 2 2 x、2 2 y、2 2 z は、実際には複雑な回路で構成されているものの、その全消費エネルギーは、結局のところその最終的な出力電流 $I(t')$ と関連すると考えることができる。それらの効果は、例えば係数、 α 、 β で表現される。 α は、出力電流 $I(t')$ が 0 であるときのパワーステージ 2 2 x、2 2 y、2 2 z の消費エネルギーであり、 β は、出力電流 $I(t')$ に対して線形な部分のパワーステージ 2 2 x、2 2 y、2 2 z の消費エネルギーであり、 γ は、出力電流 $I(t')$ に対して非線形な部分のパワーステージ 2 2 x、2 2 y、2 2 z の消費エネルギーを、出力電流 $I(t')$ に対して 2 次の非線形の効果が支配的であると考えて算出した係数である。

【 0 0 5 6 】

また、出力電流 $I(t')$ は、傾斜磁場の波形に対応する。逆に、傾斜磁場の波形が定まれば、すなわち傾斜磁場の波形が定まれば、出力電流 $I(t')$ が定まる。従って、撮像シーケンスが定まった時、出力電流 $I(t')$ は既知の変数となる。

【 0 0 5 7 】

また、 E_g^{total} は、例えば式 (5) のような関数系に書くことができると考えられる。

【 数 5 】

$$E_g^{total} = \int_0^t f(R(\omega), I(t')) dt' \quad \dots(5)$$

【 0 0 5 8 】

ここで、 R は抵抗であり、 ω は周波数であり、 f は所定の関数である。すなわち、傾斜磁場コイル 1 0 2 x、1 0 2 y、1 0 2 z で消費されるエネルギーは、時刻 t' において傾斜磁場コイル 1 0 2 x、1 0 2 y、1 0 2 z に流れる電流 $I(t')$ の関数である、時刻 t' における消費エネルギーを時間で積分したものである。また、時刻 t' における消費エネルギーは、電流 $I(t')$ に依存し、傾斜磁場コイル 1 0 2 x、1 0 2 y、1 0 2 z の等価回路としての抵抗 R は、周波数 ω に依存する。式 (5) は形式的な式であり、傾斜磁場コイル 1 0 2 x、1 0 2 y、1 0 2 z で消費されるエネルギーの具体的な表式については後述する。

【 0 0 5 9 】

ここで、エネルギー保存則である式 (1) 及び各エネルギーの式である式 (2) ~ 式 (5) について整理する。これらの式で、 C 、 α 、 β は所定のパラメータであり既知の量である。また、 I_p は、ポストレギュレータ 2 0 の規格から定まる既知の量である。また、 I は、実行可否を判定する対象の傾斜磁場の波形に応じて定まる既知の量である。また、 f 及び $R(\omega)$ は、後述するように等価回路の性質から定まる既知の量である。従って、未知の変数は V_c のみであるから、 V_c の $t = 0$ における初期値が定まれば、式 (1) 及び式 (2) ~ (5) を連立することにより、処理回路 1 5 0 は、判定機能 1 1 により、時刻 t におけるコンデンサバンク 2 1 x ~ 2 1 z の電圧 $V_c(t)$ の値を算出することができる。

【 0 0 6 0 】

実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 1 0 0 に係る第 1 の背景として、現実の傾斜磁場コイル 1 0 2 x ~ 1 0 2 z は、複雑な電氣的、磁氣的特性を有する。

【 0 0 6 1 】

そのような特性の例としては、第 1 には、例えば表皮効果が挙げられる。ここで、表皮効果とは、交流電流が導体中を流れるとき、導体表面において電流密度が高く、導体表面から離れるにしたがって電流密度が低下する効果のことをいう。高周波電流が導体を通るときに、導体内の相互インダクタンスに起因する起電力により、導体表面から離れた場所では、電流が遮蔽され、電流密度が低下する。この結果、交流電流においては電流密度が表皮深さ程度の浅い領域に集中するため、電気抵抗が増加する。典型的には、表皮効果としては、周波数 ω の平方根に比例して、交流の電気抵抗が増加する。

【 0 0 6 2 】

10

20

30

40

50

また、そのような特性の例としては、例えば渦電流による熱損失が挙げられる。ここで、渦電流とは、急激な磁場の変化により導体内に生じる誘導電流のことである。導体内に生じた渦電流は、導体中でジュール熱に変換され、傾斜磁場コイル 102 を発熱させる。

【0063】

傾斜磁場コイル 102 の特性を再現する等価回路モデルとして、最も単純には、傾斜磁場コイル 102 を、コイル抵抗 R とコイルの自己インダクタンス L が直列に配線された等価回路で表すことが考えられよう。しかし、このような、傾斜磁場コイル 102 を、コイル抵抗の直列回路で表したのみのモデルでは、上述した現実の傾斜磁場コイル 102 の特性を十分に再現できない。

【0064】

また、傾斜磁場コイル 102 において消費されるエネルギーを算出する算出方法として、最も単純には、傾斜磁場コイル 102 自身が所定のコイル抵抗を有するとして、傾斜磁場電源 103 に接続された当該コイル抵抗において消費されるエネルギー（ジュール熱）を算出する方法が考えられよう。しかし、傾斜磁場電源 103 に接続された抵抗において消費されるエネルギーのみを、傾斜磁場コイル 102 において消費されるエネルギーとしてカウントする方法では、現実の傾斜磁場コイル 102 において消費されるエネルギーを十分に再現できない。すなわち、傾斜磁場コイル 102 において消費されるエネルギーを説明するために導入される抵抗は、傾斜磁場電源 103 に接続された回路において直接的に電圧降下を引き起こすとは限らない。

【0065】

実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 に係る第 2 の背景として、コンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧推定をするにあたり、計算負荷を考慮する必要がある。例えば、コンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧降下を推定する際に、パワーステージ 22x ~ 22z の出力電圧の電圧降下が、傾斜磁場コイル 102 に磁氣的に接続された仮想コイルとの相互インダクタンスにより生じると考えて微分方程式を立式することもできる。しかし、この微分方程式を直接解くのは計算負荷が大きく、また数値的不安定性の原因になる。従って、計算負荷が少ない方法が望まれる。

【0066】

実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 に係る第 3 の背景として、傾斜磁場の波形（時間変化）は、一般に微分不可能な、または微分係数を定義することが適切でない振る舞いを持つことが多い。例えば、一般に傾斜磁場の波形は、ディラックのデルタ関数的な波形や、ヘヴィサイドのステップ関数的な波形を多く含む。ところで、式（1）及び式（2）～（5）を連立して得られた式は、時刻 t に関する積分方程式なので、時刻 t に関して微分して微分方程式を得ることができる。また、得られた微分方程式は、所定の方法で解くことができ、所定の微分係数を用いた関数で表現できる。しかしながら、傾斜磁場の波形に対して微分係数を設定することが適切でないために、微分方程式を用いた手法を用いると、数値的不安定を誘発することになる。従って、撮像シーケンスを区分的に連続な複数の関数に分割し、当該区間ごとに定義された差分方程式により数値評価を行うことが望まれる。

【0067】

第 1 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 は、かかる背景のもとに構成されたものである。以下、第 1 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 の行う処理について、適宜図 4、図 5A、図 5B、図 5C、図 7 及び図 8 を参照しながら、図 3 及び図 6 を用いて説明する。図 3 及び図 6 は、第 1 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 の行う処理の手順を示したフローチャートである。図 3 は、全体の処理の流れを示したフローチャートであり、図 6 は、図 3 のステップ S105 について詳しく説明したフローチャートである。図 4、図 5A、図 5B、図 5C、図 7 及び図 8 は、第 1 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 の行う処理について説明した図である。

【0068】

第 1 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 の有する処理回路 150 は、判

10

20

30

40

50

定機能 11 により、撮像シーケンスの実行可否の判断対象である撮像シーケンスを複数の時間区間に分割する（ステップ S 101）。このことを図 4 を用いて説明する。

【0069】

前述したように、式（1）及び式（2）～（5）を連立することにより、コンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧 $V_c(t)$ を算出することは可能である。ここで、前述したように、傾斜磁場の波形は、全時間区間で微分可能であるとは限られないので、撮像シーケンスを複数の時間区間に分割することが合理的である。図 4 は、このような状況を表している。

【0070】

図 4 の上段は傾斜磁場の波形 50 を表す。すなわち、波形 50 は、傾斜磁場コイル 102 を用いて印加される傾斜磁場の大きさの時間変化に対応する。波形 50 と、傾斜磁場コイル 102 に流れる電流 $I(t)$ とは概ね相似形になることから、波形 50 は、傾斜磁場コイル 102 に流れる電流 $I(t)$ の波形をも表している。波形 50 は、時刻 t_0 、 t_1 、 t_2 、 t_3 、 t_4 、 t_5 、 t_6 、 t_7 の付近で、その微分係数（印加される傾斜磁場の大きさの時間変化）が不連続に変化する。処理回路 150 は、判定機能 11 により、撮像シーケンスが実行される時間を、印加される傾斜磁場の大きさの時間変化が不連続に変化する点を境界として、複数の時間区間に分割する。換言すると、処理回路 150 は、判定機能 11 により、撮像シーケンスが実行される時間を、印加される傾斜磁場の大きさの時間変化に応じて複数の時間区間に分割する。なお、撮像シーケンスが実行される時間を複数の時間区間を分割するにあたって、例えば撮像シーケンスの立ち上がりや撮像シーケンスの立ち下がりが生じる時刻、さらに撮像シーケンスが一定となる区間の両端の時刻を、時間区間の分割点とする。例えば、処理回路 150 は、撮像シーケンス開始時刻（ t_0 ）から、撮像シーケンス終了時刻（ t_7 ）までの時間区間を、 $t_0 \sim t_1$ 、 $t_1 \sim t_2$ 、 $t_2 \sim t_3$ 、 $t_3 \sim t_4$ 、 $t_4 \sim t_5$ 、 $t_5 \sim t_6$ 、 $t_6 \sim t_7$ の複数の時間区間に分割する。

【0071】

かかるのち、処理回路 150 は、判定機能 11 により、分割された複数の時間区間ごとに、処理を行う。例えば、処理回路 150 は、判定機能 11 により、初めに、計算対象中の時間区間を、 $t_0 \sim t_1$ に設定する。処理回路 150 は、判定機能 11 により、 $t_0 \sim t_1$ の時間区間での処理を終了すると、続いて、計算対象中の時間区間を、 $t_1 \sim t_2$ に設定する。処理回路 150 は、判定機能 11 により、 $t_1 \sim t_2$ の時間区間での処理を終了すると、計算対象中の時間区間を、 $t_2 \sim t_3$ に設定する。以下同様に処理を行い、処理回路 150 は、 $t_6 \sim t_7$ の時間区間での処理を終了すると、一連の処理を終了する。

【0072】

なお、図 4 に示されたグラフ 51 は、処理回路 150 が、後述する判定機能 11 の処理により算出した、コンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧の時間変化 $V_c(t)$ である。また、図 4 に示されたグラフ 52 は、ポストレギュレータ 20 が供給する電圧 $I_p(t)$ の時間変化である。

【0073】

続いて、処理回路 150 は、判定機能 11 により、当該撮像シーケンス印加開始時の、コンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧の値を取得する（ステップ S 102）。この電圧の値は、例えばコンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧のデフォルト値として設定されている初期値である。

【0074】

続いて、処理回路 150 は、判定機能 11 により、計算対象中の時間区間におけるパワーステージ 22x ~ 22z の出力電流推定値を取得する（ステップ S 103）。ここで、パワーステージ 22x ~ 22z の出力電流推定値は、傾斜磁場の波形と相似するから、パワーステージ 22x ~ 22z の出力電流推定値を取得することは、計算対象中の時間区間が開始されてから終了するまでの傾斜磁場の波形を取得することと同等である。処理回路 150 は、パワーステージ 22x ~ 22z の出力電流推定値を、記憶回路 123 から、又

は入力装置 1 2 4 を通じたユーザからの入力を通じて取得する。

【 0 0 7 5 】

図 5 A ~ 図 5 C において、処理回路 1 5 0 が判定機能 1 1 により取得したパワーステージ 2 2 x ~ 2 2 z の出力電流推定値の具体例が示されている。

【 0 0 7 6 】

図 5 A の直線 4 0 は、時刻 t における出力電流推定値 $I(t)$ が、一次関数的に立ち上がっていく場合の出力電流推定値を時刻 t の関数としてプロットしたものである。出力電流推定値は、 $t = t_{n-1}$ において $I(t_{n-1})$ であり、 $t = t_n$ において $I(t_n)$ であり、 $t = t' = t_{n-1} + t_n$ のとき $I(t')$ となる。この場合、式 (6) が成り立つ。

【数 6】

$$I(t') = I(t_{n-1}) + SR \times \Delta t_n \quad \cdots(6)$$

【 0 0 7 7 】

ここで、 SR はスリュー・レート (Slew Rate) であり、傾斜磁場の立ち上がり速度を表すパラメータである。

【 0 0 7 8 】

図 5 B の直線 4 1 は、時刻 t における出力電流推定値 $I(t)$ が、フラット (一定) である場合の出力電流推定値を時刻 t の関数としてプロットしたものである。出力電流推定値は、 $t_{n-1} \leq t' \leq t_n$ であるすべての $t = t'$ において、一定値 $I(t_n)$ となる。この場合、式 (7) が成り立つ。

【数 7】

$$I(t') = I(t_n) \quad \cdots(7)$$

【 0 0 7 9 】

図 5 C の直線 4 2 は、時刻 t における出力電流推定値 $I(t)$ が、一次関数的に立ち下がっていく場合の出力電流推定値を時刻 t の関数としてプロットしたものである。出力電流推定値は、 $t = t_{n-1}$ において $I(t_{n-1})$ であり、 $t = t_n$ において $I(t_n)$ であり、 $t = t' = t_{n-1} + t_n$ のとき $I(t')$ となる。この場合、図 5 A の場合と同様に、式 (6) が成り立つ。但し、この場合、係数 SR は負になる。

【 0 0 8 0 】

続いて、処理回路 1 5 0 は、判定機能 1 1 により、計算対象中の時間区間が開始されてから終了するまでの、パワーステージ 2 2 x ~ 2 2 z の消費エネルギー推定値 E_a を取得する (ステップ S 1 0 4)。ここで、パワーステージ 2 2 x ~ 2 2 z の消費エネルギー推定値 E_a の表式は、式 (8) で表すことができる。

【数 8】

$$E_a = \int_{t_{n-1}}^{t_{n-1} + \Delta t} (\alpha I(t')^2 + \beta I(t') + \gamma) dt' \quad \cdots(8)$$

【 0 0 8 1 】

ここで、時刻 t' における出力電流推定値 $I(t')$ の関数形はステップ S 1 0 3 において既知であるので、処理回路 1 5 0 は、判定機能 1 1 により、式 (8) における出力電流推定値 $I(t')$ の表式にステップ S 1 0 3 で取得した代入し、積分を実行することで、パワーステージ 2 2 x ~ 2 2 z で消費される消費エネルギー推定値 E_a を算出する。

【 0 0 8 2 】

例えば、出力電流推定値 $I(t')$ が、式 (6) で与えられる場合、(すなわち、出力電流 $I(t')$ が、一次関数的に立ち上がって若しくは立ち下がっていく場合)、式 (8) の積分を実行すると、処理回路 1 5 0 は、判定機能 1 1 により、パワーステージ 2 2 x ~ 2 2 z で消費される消費エネルギー E_a を、式 (9) のように算出する。

10

20

30

40

【数 9】

$$E_a = \frac{\alpha}{3} SR^2 (\Delta t)^3 + \frac{\beta}{2} SR (\Delta t)^2 + \alpha SRI(t_{n-1}) (\Delta t)^2 + (\alpha I(t_{n-1})^2 + \beta I(t_{n-1}) + \gamma) (\Delta t) \quad \dots(9)$$

【0083】

また、出力電流推定値 $I(t')$ が式(7)で与えられる場合、(すなわち、出力電流 $I(t')$ が、一定な場合)、式(8)の積分を実行すると、処理回路150は、判定機能11により、パワーステージ22x~22zで消費される消費エネルギー E_a を、式(10)のように算出する。

【数10】

$$E_a = (\alpha I(t_n)^2 + \beta I(t_n) + \gamma) (\Delta t) \quad \dots(10)$$

10

【0084】

また、出力電流 $I(t')$ が、その他の関数系である場合でも、出力電流 $I(t')$ の表式を、式(8)に代入して積分を実行することで、処理回路150は、判定機能11により、パワーステージ22x~22zで消費される消費エネルギー E_a を算出することができる。

【0085】

次に、処理回路150は、計算対象中の時間区間における傾斜磁場コイル102での消費エネルギー推定値 E_g を算出する(ステップS105)。

【0086】

20

ここで、前述したように、現実の傾斜磁場コイル102は、例えば表皮効果や渦電流に起因した複雑な電氣的、磁氣的特性を有する。これらの特性を十分再現できるよう、第1の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置100の処理回路150は、判定機能11は、所定の等価回路を用いて傾斜磁場コイル102での消費エネルギー推定値 E_g を算出する。

【0087】

ステップS104の処理の詳細は、図6のフローチャートに示されている。図6は、図3のステップS104の処理をより詳細に説明したステップである。具体的には、図3のステップS104は、図6のステップS150及びステップS151で構成される。

【0088】

30

処理回路150は、判定機能11により、所定の等価回路における仮想回路に流れる電流値を算出する(ステップS150)。この処理について、図7を用いて説明する。

【0089】

図7に示されている回路は、傾斜磁場電源103により電圧が印加された傾斜磁場コイル102の電氣的特性を示す等価回路の一例である。ここで、傾斜磁場コイル102を含む等価回路は、例えば、第1の回路30と、閉回路31及び閉回路32からなる第2の回路とからなる。

【0090】

第1の回路30は、傾斜磁場電源103に接続され、抵抗値 R を有する抵抗38と、自己インダクタンス L_1 を有するコイル33とからなる。閉回路31は、抵抗値 R_2 を有する抵抗36と、自己インダクタンス L_2 を有するコイル34とからなる。閉回路32は、抵抗値 R_3 を有する抵抗37と、自己インダクタンス L_3 を有するコイル35となる。また、コイル33とコイル34の間には、相互インダクタンス M_{12} が、コイル33とコイル35の間には、相互インダクタンス M_{13} とが存在する。

40

【0091】

ここで、時刻を t とし、第1の回路30に流れる電流を $i_1(t)$ 、閉回路31に流れる電流を $i_2(t)$ 、閉回路32に流れる電流を $i_3(t)$ とし、閉回路31及び閉回路32について回路の方程式を立てると、次の式(11)が成り立つ。

【数 1 1】

$$\left. \begin{aligned} L_2 \frac{di_2(t)}{dt} + R_2 i_2(t) &= M_{12} \frac{di_1(t)}{dt} \\ L_3 \frac{di_3(t)}{dt} + R_3 i_3(t) &= M_{13} \frac{di_1(t)}{dt} \end{aligned} \right\} \dots(11)$$

【0092】

ここで、第1の回路30に対して閉回路31及び閉回路32が相互インダクタンスを通じて及ぼす効果は、第1の回路30に流れる電流 $i_1(t)$ に対して高次摂動の効果であるから一般に小さく、例えば省略可能である。

10

【0093】

また、ここで、電流 $i_1(t)$ は、傾斜磁場のパルスシーケンスの波形に対応する量である。すなわち、パルスシーケンスの波形変化とは、電流 $i_1(t)$ の時間変化である。また、電流 $i_1(t)$ は、ステップS103で、処理回路150が、判定機能11により取得した、計算対象中の時間区間におけるパワーステージ22x~22zの出力電流推定値 $I(t)$ に対応する量である。

【0094】

続いて、処理回路150は、判定機能11により、撮像シーケンスの情報に基づいて閉回路31及び閉回路32に流れる電流値($i_2(t)$ 及び $i_3(t)$)を算出する。

20

【0095】

この方法としては、例えばラプラス変換を用いた所定の方法がある。また、微分方程式を、一般解を変数分離法で解いたのち、特殊解を定数変化法で解くなどしてもよい。式(11)は、時刻 t に関して1階線形微分方程式であるから、任意の電流 $i_1(t)$ の関数系に対して解くことができ、電流 $i_2(t)$ 及び電流 $i_3(t)$ を、電流 $i_1(t)$ の関数として、表現することができる。

【0096】

一例として、電流 $i_1(t)$ が、時刻 $t=0$ で値 i_0 をとり、一定の速度SRで電流値が増大(又は減少)していく場合、電流 $i_1(t)$ は、次の式(12)のように表される。

【数 1 2】

$$i_1(t) = SR \times t + i_0 \quad \dots(12)$$

30

【0097】

この場合、微分方程式を解くと、電流 $i_2(t)$ 及び電流 $i_3(t)$ は、次の式(13)のように表される。

【数 1 3】

$$\left. \begin{aligned} i_2(t) &= \frac{SR \times M_{12}}{R_2} \left(1 - e^{-\frac{R_2}{L_2} t} \right) + i_2(0) e^{-\frac{R_2}{L_2} t} \\ i_3(t) &= \frac{SR \times M_{13}}{R_3} \left(1 - e^{-\frac{R_3}{L_3} t} \right) + i_3(0) e^{-\frac{R_3}{L_3} t} \end{aligned} \right\} \dots(13)$$

40

【0098】

従って、処理回路150は、式(13)を用いることにより、閉回路31及び閉回路32に流れる電流値を算出できる。

【0099】

また、別の例として、電流 $i_1(t)$ が、一定の値 i_0 をとる場合、電流 $i_1(t)$ は、次の式(14)のように表される。

50

【数 1 4】

$$i_1(t) = i_0 \quad \dots(14)$$

【0 1 0 0】

この場合、微分方程式を解くと、電流 $i_2(t)$ 及び電流 $i_3(t)$ は、次の式 (15) のように表される。

【数 1 5】

$$\left. \begin{aligned} i_2(t) &= i_2(0)e^{-\frac{R_2}{L_2}t} \\ i_3(t) &= i_3(0)e^{-\frac{R_3}{L_3}t} \end{aligned} \right\} \dots(15)$$

10

【0 1 0 1】

従って、処理回路 150 は、式 (13) を用いることにより、閉回路 31 及び閉回路 32 に流れる電流値を算出できる。

【0 1 0 2】

以上をまとめると、処理回路 150 は、判定機能 11 により、傾斜磁場電源 103 に接続され自己インダクタンス L_1 を有する第 1 の回路 30 と、第 1 の回路 30 との間で相互インダクタンスを有する閉回路 31 及び 32 を有する第 2 の回路とを、傾斜磁場コイル 102 を含む回路に対する等価回路とする。処理回路 150 は、判定機能 11 により、閉回路 31 及び 32 に流れる電流値 $i_2(t)$ 、 $i_3(t)$ を、磁気共鳴イメージングで実行される撮像シーケンスに基づいて算出する。すなわち、処理回路 150 は、判定機能 11 により、複数の時間区間ごとに、等価回路により導かれる微分方程式を解く。

20

【0 1 0 3】

なお、図 8 に、閉回路 31 及び 32 に流れる電流の波形の具体例が示されている。波形 50 は、パワーステージ 22x ~ 22z の出力電流推定値 $I(t)$ の波形である。波形 50 は、第 1 の回路 30 に流れる電流 $i_1(t)$ の波形に対応する。この時、波形 61 は、閉回路 31 に流れる電流の波形、波形 62 は、閉回路 32 に流れる電流の波形の具体例を示している。

【0 1 0 4】

30

図 6 に戻って、処理回路 150 は、判定機能 11 により、計算対象中の時間区間が終了するまでの傾斜磁場コイルの消費エネルギー推定値を算出する (ステップ S151)。具体的には、処理回路 150 は、判定機能 11 により、各時刻において等価回路上で消費されるジュール熱の大きさを、傾斜磁場コイル 102 の消費エネルギーの推定値と算出する。ここで、第 1 の回路 30 における抵抗 38、閉回路 31 における抵抗 36、閉回路 32 における抵抗 37 において、エネルギーが消費される。ここで、抵抗 38 の大きさは一般に小さくなるように設計されることが多い。従って、処理回路 150 は、例えば、各時刻における傾斜磁場コイル 102 の消費エネルギーの推定値 $E_g(t)$ を、閉回路 31 における消費エネルギー $E_2(t)$ 及び閉回路 32 における消費エネルギー $E_3(t)$ を主に考慮して、式 (16) のように算出する。

40

【数 1 6】

$$\begin{aligned} E_g &= E_2 + E_3 \\ &= \int_0^{\Delta t} R_2 i_2(t)^2 dt + \int_0^{\Delta t} R_3 i_3(t)^2 dt \quad \dots(16) \end{aligned}$$

【0 1 0 5】

第 1 の回路 30 に流れる電流 $i_1(t)$ が、式 (12) で表される場合、式 (13) を式 (16) に代入することにより、処理回路 150 は、例えば、各時刻における傾斜磁場コイル 102 の消費エネルギーの推定値 $E_g(t)$ を、式 (17) のように算出する。

【数 1 7】

$$\left. \begin{aligned}
 E_2 &= \left(\frac{SR \times M_{12}}{R_2} \right)^2 \left\{ R_2 \Delta t - 2L_2 \left(1 - e^{-\frac{R_2}{L_2} \Delta t} \right) + \frac{L_2}{2} \left(1 - e^{-\frac{2R_2}{L_2} \Delta t} \right) \right\} \\
 &\quad + \frac{SR \times M_{12} L_2 i_2(0)}{R_2} \left(1 - e^{-\frac{R_2}{L_2} \Delta t} \right)^2 + \frac{L_2 i_2(0)^2}{2} \left(1 - e^{-\frac{2R_2}{L_2} \Delta t} \right) \\
 E_3 &= \left(\frac{SR \times M_{13}}{R_3} \right)^2 \left\{ R_3 \Delta t - 2L_3 \left(1 - e^{-\frac{R_3}{L_3} \Delta t} \right) + \frac{L_3}{2} \left(1 - e^{-\frac{2R_3}{L_3} \Delta t} \right) \right\} \\
 &\quad + \frac{SR \times M_{13} L_3 i_3(0)}{R_3} \left(1 - e^{-\frac{R_3}{L_3} \Delta t} \right)^2 + \frac{L_3 i_3(0)^2}{2} \left(1 - e^{-\frac{2R_3}{L_3} \Delta t} \right)
 \end{aligned} \right\} \dots(17)$$

10

【0 1 0 6】

また、第 1 の回路 3 0 に流れる電流 $i_1(t)$ が、式 (1 4) で表される場合、式 (1 5) を式 (1 6) に代入することにより、処理回路 1 5 0 は、例えば、各時刻における傾斜磁場コイル 1 0 2 の消費エネルギーの推定値 $E_g(t)$ を、式 (1 8) のように算出する。

20

【数 1 8】

$$\left. \begin{aligned}
 E_2 &= \frac{L_2 i_2(0)^2}{2} \left(1 - e^{-\frac{2R_2}{L_2} \Delta t} \right) \\
 E_3 &= \frac{L_3 i_3(0)^2}{2} \left(1 - e^{-\frac{2R_3}{L_3} \Delta t} \right)
 \end{aligned} \right\} \dots(18)$$

30

【0 1 0 7】

すなわち、処理回路 1 5 0 は、判定機能 1 1 により、閉回路 3 1、3 2 に流れる電流値に基づいて、傾斜磁場コイル 1 0 2 で消費されるエネルギーの推定値を算出する。

【0 1 0 8】

なお、等価回路の回路構成としては、上記構成は一例を示したに過ぎず、実施形態は上述の例に限られない。例えば、閉回路の個数は 2 個には限られず、例えば 1 個でも良いし 3 個でもよい。また、処理回路 1 5 0 は、等価回路として、誘電損失等の効果を取り入れるためコンデンサを含む回路を用いても良い。また、処理回路 1 5 0 は、閉回路についての方程式のみを用いる例を説明したが、第 1 の回路についての方程式を用いても良い。また、処理回路 1 5 0 は、判定機能 1 1 により、閉回路に流れる電流値に基づいて、傾斜磁場コイル 1 0 2 に印加される電圧値の推定値、電流値の推定値、傾斜磁場コイル 1 0 2 の電流電圧特性等を算出してもよい。

40

【0 1 0 9】

図 3 に戻って、処理回路 1 5 0 は、判定機能 1 1 により、計算対象中の時間区間が終了した時のコンデンサバンク 2 1 x ~ 2 1 z の電圧を算出する (ステップ S 1 0 6)。

【0 1 1 0】

コンデンサバンク 2 1 x ~ 2 1 z の電圧算出の方法について、簡単に説明する。初めに、式 (1) と同様に、以下に示される式 (1 9) が成り立つ。

【数 19】

$$E_a + E_g = E_c + E_p \quad \dots(19)$$

【0111】

ここで、 E_a は、分割された一つの時間区間において、パワーステージ 22x ~ 22z で消費される消費エネルギーである。 E_g は、分割された一つの時間区間において、傾斜磁場コイル 102 で消費される消費エネルギーである。 E_c は、分割された一つの時間区間において、コンデンサバンク 21x ~ 21z から傾斜磁場コイル 102 に供給されたエネルギーである。 $E_{a \text{ total}}$ は、分割された一つの時間区間において、ポストレギュレータ 20 から共有されたエネルギーである。

10

【0112】

次に、式(19)の右辺の E_p に係る積分は、離散化を行うことにより、以下の式(20)のように近似できる。

【数 20】

$$E_p = \left. \begin{aligned} & \int_{t_{n-1}}^{t_n} V_c(t) \cdot I_p(t) dt \\ & \doteq \frac{V_c(t_n) + V_c(t_{n-1})}{2} \cdot I_p(t_n) \cdot \Delta t \end{aligned} \right\} \dots(20)$$

【0113】

ここで、 n は、処理回路 150 が、判定機能 11 により分割した複数の時間区間の番号である。また、 t_n は、 $n - 1$ 番目の時間区間における最大の時刻である。また、 t_{n-1} は、 $n - 1$ 番目の時間区間における最小の時刻である。換言すると、 n 番目の時間区間は、 $t_n \sim t_{n+1}$ である。すなわち、1 番目の時間区間は $t_0 \sim t_1$ であり、2 番目の時間区間は $t_1 \sim t_2$ であり、以下同様である。また t は、以下の式(21)で定義される値である。

20

【数 21】

$$\Delta t = t_n - t_{n-1} \quad \dots(21)$$

【0114】

また、式(19)の右辺は E_c は、以下の式(22)で表される。

30

【数 22】

$$E_c = \frac{1}{2} C \cdot V_c(t_{n-1})^2 - \frac{1}{2} C \cdot V_c(t_n)^2 \quad \dots(22)$$

【0115】

式(20)及び式(22)を式(19)に代入すると、以下の式(23)を得る。

【数 23】

$$E_a + E_g = \frac{1}{2} C \cdot V_c(t_{n-1})^2 - \frac{1}{2} C \cdot V_c(t_n)^2 + \frac{V_c(t_n) + V_c(t_{n-1})}{2} \cdot I_p(t_n) \Delta t \quad \dots(23)$$

40

【0116】

式(23)は、 $V_c(t_n)$ に関する 2 次方程式であるから、 $V_c(t_n)$ について解くと、以下の式(24)を得る。

【数 24】

$$V_c(t_n) = \frac{1}{2} \left[\frac{I_p(t_n) \Delta t}{C} + \sqrt{\left(\frac{I_p(t_n) \Delta t}{C} \right)^2 - 4 \left(\frac{I_p(t_n) \Delta t}{C} V_c(t_{n-1}) - V_c(t_{n-1})^2 + \frac{2}{C} (E_a + E_g) \right)} \right] \quad \dots(24)$$

【0117】

50

換言すると、処理回路 150 は、判定機能 11 により、複数の時間区間それぞれについて、両端の時刻において満たすべき関係式を算出し、算出した関係式に基づいて、コンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧値の推定値を算出する。このように、処理回路 150 は、判定機能 11 により、式 (24) 式に基づいて、 $t = t_{n-1}$ におけるコンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧値 $V_c(t_{n-1})$ に基づいて、 $t = t_n$ におけるコンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧値 $V_c(t_n)$ を算出することができる。

【0118】

処理回路 150 が、判定機能 11 により、 $t = t_{n-1}$ におけるコンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧値 $V_c(t_{n-1})$ に基づいて、 $t = t_n$ におけるコンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧値 $V_c(t_n)$ を算出すると、処理回路 150 は、判定機能 11 により、計算対象中の時間区間 $t_{n-1} \sim t_n$ が最後の時間区間であるか否かを判断する。処理回路 150 は、判定機能 11 により、計算対象中の時間区間 $t_{n-1} \sim t_n$ が最後の時間区間でないと判断すると (ステップ S107 No)、処理回路 150 は、判定機能 11 により、次の時間区間 $t_n \sim t_{n+1}$ を、計算対象中の時間区間に設定し、(ステップ S108)、ステップ S103 以降の処理が繰り返される。

【0119】

また、処理回路 150 が、判定機能 11 により、計算対象中の時間区間 $t_{n-1} \sim t_n$ が最後の時間区間であると判定した場合 (ステップ S107 Yes)、最後の時間区間まで計算を行うことができたので計算を終了する。

【0120】

続いて、処理回路 150 は、判定機能 11 により、閉回路 31, 32 を流れる電流値 $i_2(t)$ や電流値 $i_3(t)$ に基づいて、撮像シーケンスの実行可否をシーケンスの実行前に判定する (ステップ S109)。具体的には、処理回路 150 は、判定機能 11 により、電流値に基づいて、傾斜磁場コイル 102 に電流を供給するコンデンサバンクの電圧値の推定値を算出し、算出した電圧値の推定値に基づいて、撮像シーケンスの実行可否をシーケンスの実行前に判定する。

【0121】

また、シーケンス制御回路 110 は、処理回路 150 が、判定機能 11 により撮像シーケンスを実行可と判定した場合に、撮像シーケンスを実行する。また、シーケンス制御回路 110 は、処理回路 150 が、判定機能 11 により撮像シーケンスを実行不可と判定した場合に、入力装置 124 を通じてユーザから撮像条件の再設定を受け付けても良い。

【0122】

撮像シーケンスの実行可否の判断基準としては、例えば、判定機能 11 により、処理回路 150 は、算出したコンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧値が所定の値を上回っていれば、当該撮像シーケンスを実行可とし、下回っていれば、当該撮像シーケンスを実行不可と判定してもよい。また、撮像シーケンスの実行可否の判断基準としては、例えば、判定機能 11 により、処理回路 150 は、算出した閉回路 31, 32 を流れる電流値が所定の値を下回っていれば、当該撮像シーケンスを実行可とし、上回っていれば、当該撮像シーケンスを実行不可と判定してもよい。

【0123】

実施形態では、ポストレギュレータ 20 が、供給される電流の値が所定の値になるように動作する場合で説明したが、実施形態はこれに限られない。例えば、ポストレギュレータ 20 は、供給される電圧の値が所定の値になるように動作してもよい。

【0124】

実施形態では、パワーステージ 22x、22y、22z で消費されるエネルギーが、出力電流の 2 次関数である場合で説明したが、実施形態はこれに限られない。例えば、パワーステージ 22x、22y、22z の消費エネルギーとして、例えば電圧電流特性の実測値を用いて算出してもよい。

【0125】

以上のように、第 1 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 の有する処理回

10

20

30

40

50

路 150 は、傾斜磁場電源 103 に接続された傾斜磁場コイル 102 に対する等価回路として、傾斜磁場電源 103 に接続されたコイルと相互インダクタンスを持つ相互誘導コイルに流れる電流値に着目して当該電流値を算出する。その後、処理回路 150 は、求めた電流値から傾斜磁場コイル 102 の消費エネルギーを算出し、算出した消費エネルギーを基に、コンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧を算出する。このことにより、第 1 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 は、傾斜磁場発生システムの電氣的負荷を予測することができる。より具体的には、第 1 の実施形態に係る等価回路を用いることにより、第 1 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 は、精度のよいコンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧推定を、計算負荷を抑えながら行うことができる。その結果、第 1 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 は、最適化した条件で撮像シーケンスを実行することが可能になる。

10

【0126】

(第 2 の実施形態)

第 1 の実施形態では、処理回路 150 が、判定機能 11 により、コンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧値の推定値に基づいて、撮像シーケンスの実行可否を判定した。第 2 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 は、算出したコンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧値の推定値に基づいて、撮像条件の制御を行う。

【0127】

図 9A、図 9B 及び図 9C は、第 2 の実施形態に係る磁気共鳴イメージング装置 100 の行う処理について説明した図である。図 9A のグラフ 80 は、コンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧値の推定値の時間変化を表している。シーケンス制御回路 110 は、コンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧の推定値が所定の閾値 83 (V_{TH1}) を下回った場合に、撮像における分解能を低下させて撮像シーケンスを実行する。分解能とは、例えばスライス方向の分解能やリードアウト方向の分解能、位相エンコード方向の分解能である。

20

スライス方向の分解能を低下させるためには、例えば、スライス厚を厚くする。リードアウト方向と位相エンコード方向の分解能を低下させるためには、例えば、画像のマトリクス数を減らす。または、撮像における有効視野 (FOV: Field Of View) を増大させてもよい。撮像における有効視野の大きさは、傾斜磁場の勾配と関連する。すなわち、撮像における有効視野の大きさが大きくなるほど、傾斜磁場の勾配がゆるやかになる。これにより、コンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧値が低下するのを防止することができる。

30

【0128】

図 9B のグラフ 81 は、同様に、コンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧値の推定値の時間変化を示している。グラフ 81 は、撮像シーケンスの実行によりコンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧が低下し、その後電圧がゆるやかに回復していく場合について説明している。シーケンス制御回路 110 は、所定の時刻におけるコンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧の推定値がフリップパルスの印加時 82 において指定した閾値 84 (V_{TH2}) まで回復しない場合に、繰り返し時間 (TR) を延長させて撮像シーケンスを実行する。

40

フリップパルスの印加時 82 にコンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧値の推定値が指定した閾値 84 まで回復しない場合、繰り返し時間が短すぎると考えられる。従って、シーケンス制御回路 110 は、繰り返し時間を延長させて撮像シーケンスを実行する。これにより、フリップパルスの印加時に、コンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧が十分な値を保持することができる。

【0129】

図 9C のグラフ 90 は、同様に、コンデンサバンク 21x ~ 21z の電圧値の推定値の時間変化を示しているが、例えば SPAIR (Spectral Attenuated IR) 法など、プリパルスの印加を伴うパルスシーケンスの場合を示している。かかる場合、時刻 91 で IR (Inversion Recovery) パルスであるプリパル

50

スが印加され、時刻 9 2 でプリップパルスが印加される。この場合、プリパルスの印加にかかわらず、シーケンス制御回路 1 1 0 は、所定の時刻におけるコンデンサバンク 2 1 x ~ 2 1 z の電圧の推定値がフリップパルスの印加時 9 2 において指定した閾値 (V_{TH2}) まで回復しない場合に、繰り返し時間 (TR) を延長させて撮像シーケンスを実行する。

【0130】

第 2 の実施形態では、シーケンス制御回路 1 1 0 は、(1) コンデンサバンク 2 1 x ~ 2 1 z の電圧値の推定値が、所定の閾値を下回るかどうか (V_{c-Min}) (2) コンデンサバンク 2 1 x ~ 2 1 z の電圧値の推定値が、次の励起パルス印加時に所定の閾値まで回復しているかどうか ($V_{c-Stable}$) の 2 つの判定基準を基に、撮像シーケンス制御を行う。これにより、磁気共鳴イメージング装置 1 0 0 は、コンデンサバンク 2 1 x ~ 2 1 z の電圧値が不足する状況を回避することができ、効率のより制御が行うことが可能になる。

【0131】

(プログラム)

上述した実施形態の中で示した処理手順に示された指示は、ソフトウェアであるプログラムに基づいて実行されることが可能である。汎用の計算機システムが、このプログラムを予め記憶しておき、このプログラムを読み込むことにより、上述した実施形態の磁気共鳴イメージング装置 1 0 0 による効果と同様な効果を得ることも可能である。上述した実施形態で記述された指示は、コンピュータに実行させることのできるプログラムとして、磁気ディスク (フレキシブルディスク、ハードディスク等)、光ディスク (CD-ROM、CD-R、CD-RW、DVD-ROM、DVD±R、DVD±RW等)、半導体メモリ、又はこれに類する記録媒体に記録される。コンピュータ又は組み込みシステムが読み取り可能な記憶媒体であれば、その記憶形式は何れの形態であってもよい。コンピュータは、この記録媒体からプログラムを読み込み、このプログラムに基づいてプログラムに記述されている指示を CPU で実行させれば、上述した実施形態の磁気共鳴イメージング装置 1 0 0 と同様な動作を実現することができる。もちろん、コンピュータがプログラムを取得する場合又は読み込む場合はネットワークを通じて取得又は読み込んでよい。

【0132】

また、記憶媒体からコンピュータや組み込みシステムにインストールされたプログラムの指示に基づきコンピュータ上で稼働している OS (オペレーティングシステム) や、データベース管理ソフト、ネットワーク等の MW (ミドルウェア) 等が、上述した実施形態を実現するための各処理の一部を実行してもよい。

【0133】

更に、記憶媒体は、コンピュータあるいは組み込みシステムと独立した媒体に限らず、LAN (Local Area Network) やインターネット等により伝達されたプログラムをダウンロードして記憶又は一時記憶した記憶媒体も含まれる。

【0134】

また、記憶媒体は 1 つに限られず、複数の媒体から、上述した実施形態における処理が実行される場合も、実施形態における記憶媒体に含まれ、媒体の構成は何れの構成であってもよい。

【0135】

なお、実施形態におけるコンピュータ又は組み込みシステムは、記憶媒体に記憶されたプログラムに基づき、上述した実施形態における各処理を実行するためのものであって、パソコン、マイコン等の 1 つからなる装置、複数の装置がネットワーク接続されたシステム等の何れの構成であってもよい。

【0136】

また、実施形態におけるコンピュータとは、パソコンに限らず、情報処理機器に含まれる演算処理装置、マイコン等も含み、プログラムによって実施形態における機能を実現することが可能な機器、装置を総称している。

【 0 1 3 7 】

以上述べた少なくとも一つの実施形態の磁気共鳴イメージング装置によれば、傾斜磁場発生システムの電氣的負荷を予測することができる。

【 0 1 3 8 】

本発明のいくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は、例として提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。これら実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置き換え、変更を行うことができる。これら実施形態やその変形は、発明の範囲や要旨に含まれると同様に、特許請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれるものである。

【 符号の説明 】

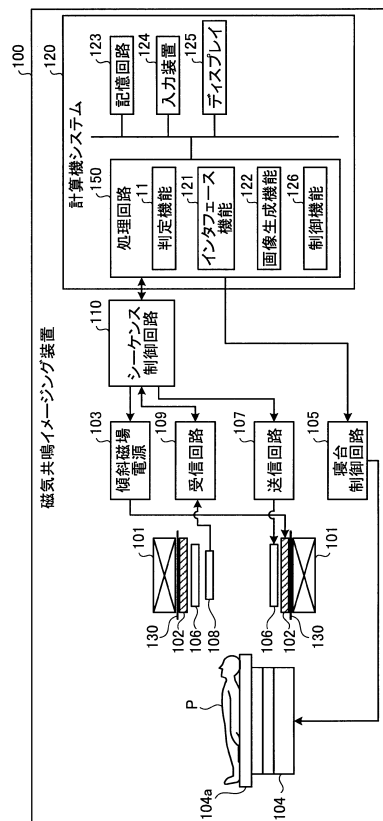
【 0 1 3 9 】

1 1 判定機能

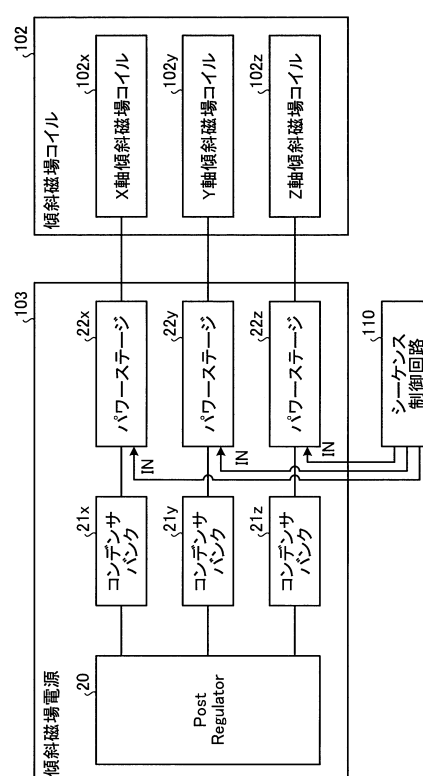
1 1 0 シーケンス制御回路

10

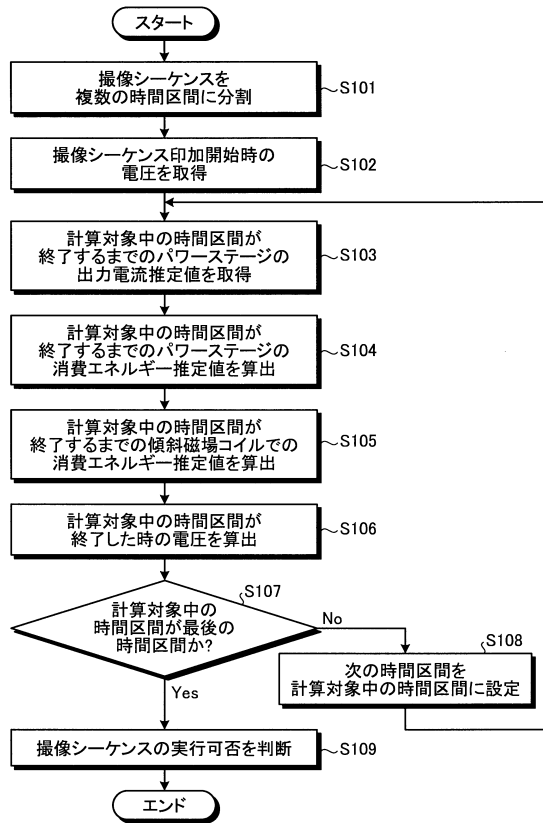
【 図 1 】



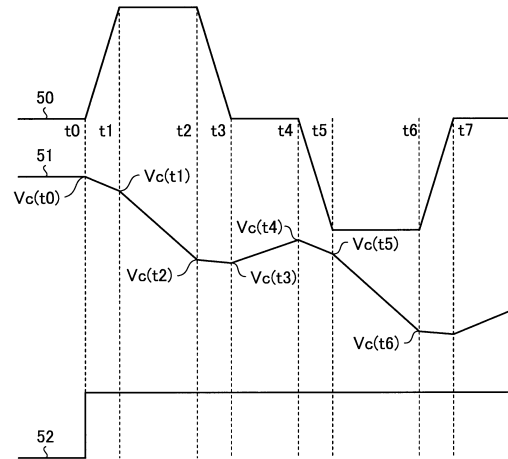
【 図 2 】



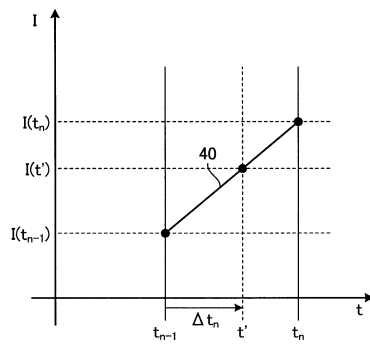
【図 3】



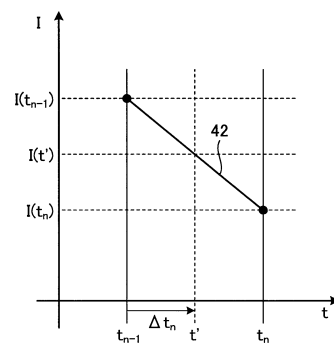
【図 4】



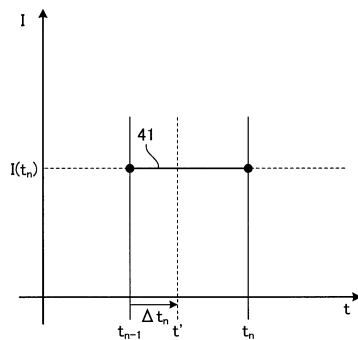
【図 5 A】



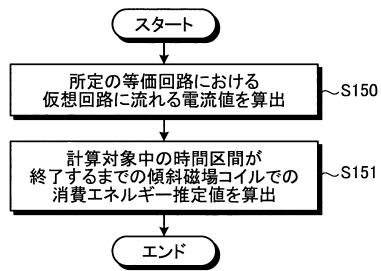
【図 5 C】



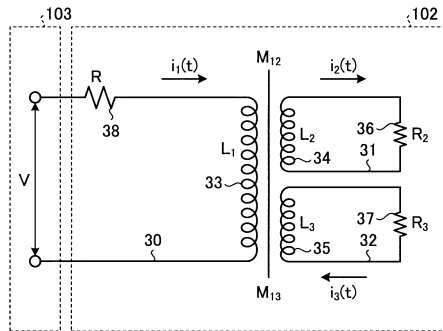
【図 5 B】



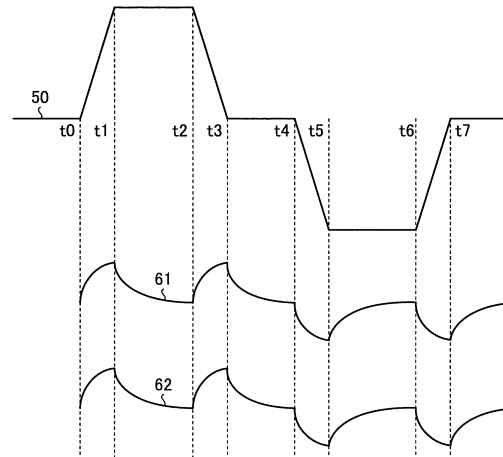
【図 6】



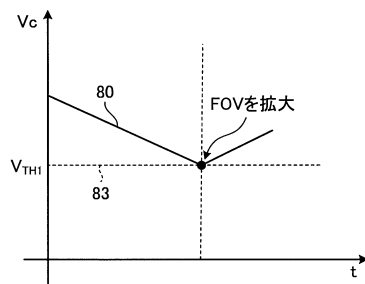
【図 7】



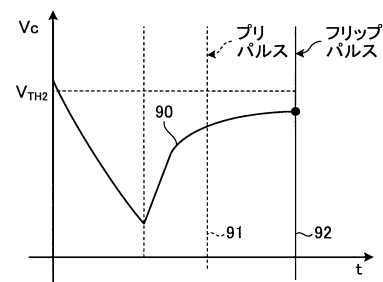
【図 8】



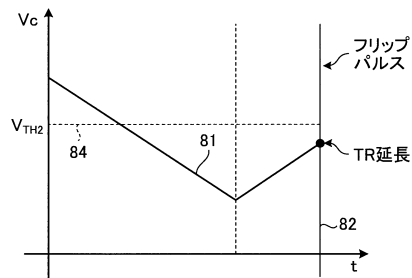
【図 9 A】



【図 9 C】



【図 9 B】



フロントページの続き

(72)発明者 三浦 資弘

栃木県大田原市下石上 1 3 8 5 番地 東芝メディカルシステムズ株式会社内

審査官 後藤 順也

(56)参考文献 特開 2 0 1 4 - 0 6 4 8 9 8 (J P , A)

特開 2 0 1 4 - 0 6 4 8 9 7 (J P , A)

米国特許出願公開第 2 0 1 4 / 0 0 7 0 8 1 2 (U S , A 1)

特開 2 0 1 3 - 0 0 0 1 7 3 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

A 6 1 B 5 / 0 5 5

G 0 1 R 3 3 / 2 0 - 3 3 / 6 4