

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7247991号
(P7247991)

(45)発行日 令和5年3月29日(2023.3.29)

(24)登録日 令和5年3月20日(2023.3.20)

(51)国際特許分類 F I
H 0 2 M 3/155(2006.01) H 0 2 M 3/155 F
H 0 2 M 3/155 H

請求項の数 6 (全21頁)

(21)出願番号	特願2020-140960(P2020-140960)	(73)特許権者	000003207
(22)出願日	令和2年8月24日(2020.8.24)		トヨタ自動車株式会社
(65)公開番号	特開2022-36647(P2022-36647A)		愛知県豊田市トヨタ町1番地
(43)公開日	令和4年3月8日(2022.3.8)	(74)代理人	100099759
審査請求日	令和4年3月14日(2022.3.14)		弁理士 青木 篤
		(74)代理人	100123582
			弁理士 三橋 真二
		(74)代理人	100092624
			弁理士 鶴田 準一
		(74)代理人	100147555
			弁理士 伊藤 公一
		(74)代理人	100123593
			弁理士 関根 宣夫
		(74)代理人	100133835
			弁理士 河野 努

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 電力供給システム、制御装置及びリアクトル電流測定方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

直流電力を供給する電源と、

前記電源と接続されるリアクトルと、前記リアクトルの一端に接続されるスイッチング素子とを有し、前記スイッチング素子がオンとオフとを繰り返すことで前記リアクトルに流れるリアクトル電流を制御して前記電源から供給される直流電力を変圧するDC - DCコンバータと、

前記DC - DCコンバータを制御する制御装置と、
を有し、

前記制御装置は、

前記リアクトル電流を測定する電流計による前記リアクトル電流の測定値をサンプリングするサンプリング周期を、前記スイッチング素子がオンとオフとを繰り返すスイッチング周期において前記リアクトル電流が増加する第1の期間の長さと同前記サンプリング周期の整数倍間の差分と、前記スイッチング周期において前記リアクトル電流が減衰する第2の期間の長さと同前記サンプリング周期の整数倍間の差分との和が最小化されるように設定するサンプリング周期設定部と、

前記設定されたサンプリング周期ごとに前記電流計による前記リアクトル電流の測定値をサンプリングし、前記スイッチング周期においてサンプリングされた前記リアクトル電流の測定値を平均化することで、前記スイッチング周期における前記リアクトル電流の平均値を測定する電流測定部と、

を有し、

前記サンプリング周期設定部は、

複数のサンプリング周期の候補のそれぞれについて、当該候補に対応する前記スイッチング周期におけるサンプリング回数に、前記スイッチング周期に対する前記スイッチング素子がオンとなる期間のデューティ比を乗じた値から、当該値に最も近い整数までの第1の距離を算出し、前記複数のサンプリング周期の候補のそれぞれについての前記第1の距離に基づいて、前記複数のサンプリング周期の候補のうち、前記第1の期間の長さと同候補の整数倍間の差分が最小となる候補を決定し、決定した当該候補を前記サンプリング周期として設定する電力供給システム。

【請求項2】

前記DC-DCコンバータへの入力電圧を測定する第1の電圧計と、

前記DC-DCコンバータからの出力電圧を測定する第2の電圧計とをさらに有し、

前記制御装置は、

前記入力電圧及び前記出力電圧と、前記デューティ比とに基づいて、前記DC-DCコンバータの動作モードが、前記スイッチング周期中に前記リアクトル電流が流れない期間が存在する不連続モードか前記スイッチング周期中に前記リアクトル電流が流れない期間が存在しない連続モードかを判定する動作モード判定部をさらに有し、

前記サンプリング周期設定部は、

前記DC-DCコンバータの動作モードが前記不連続モードである場合、前記複数のサンプリング周期の候補のそれぞれについて、当該候補に相当する前記スイッチング周期におけるサンプリング回数に前記スイッチング周期に対する前記第2の期間の比を乗じた値から、当該値に最も近い整数までの第2の距離をさらに算出し、前記複数のサンプリング周期の候補のそれぞれについての前記第1の距離及び前記第2の距離に基づいて、前記複数のサンプリング周期の候補のうち、前記第1の期間の長さと同候補の整数倍間の差分と、前記第2の期間の長さと同候補の整数倍間の差分との和が最小化される候補を決定し、決定した当該候補を前記サンプリング周期として設定する、請求項1に記載の電力供給システム。

【請求項3】

前記サンプリング周期設定部は、前記DC-DCコンバータの動作モードが前記連続モードである場合、前記複数のサンプリング周期の候補のそれぞれについて、前記第1の距離と1から前記第1の距離を減じた値の積を当該候補に対応する前記スイッチング周期におけるサンプリング回数の2乗で除した判定値を算出し、当該判定値が最小となる候補を、前記サンプリング周期として設定する、請求項2に記載の電力供給システム。

【請求項4】

前記サンプリング周期設定部は、前記DC-DCコンバータの動作モードが前記不連続モードである場合、前記複数のサンプリング周期の候補のそれぞれについて、前記第1の距離と1から前記第1の距離を減じた値の積と、前記第2の距離と1から前記第2の距離を減じた値の積に前記入力電圧に対する前記出力電圧の比に応じた係数を乗じた値との和を当該候補に対応する前記スイッチング周期におけるサンプリング回数の2乗で除した判定値を算出し、当該判定値が最小となる候補を、前記サンプリング周期として設定する、請求項2に記載の電力供給システム。

【請求項5】

電源と接続されるリアクトルと、前記リアクトルの一端に接続されるスイッチング素子とを有し、前記スイッチング素子がオンとオフとを繰り返すことで前記リアクトルに流れるリアクトル電流を制御して前記電源から供給される直流電力を変圧するDC-DCコンバータを制御する制御装置であって、

前記制御装置は、

前記リアクトル電流を測定する電流計による前記リアクトル電流の測定値をサンプリングするサンプリング周期を、前記スイッチング素子がオンとオフとを繰り返すスイッチング周期において前記リアクトル電流が増加する第1の期間の長さと同サンプリング周

10

20

30

40

50

期の整数倍間の差分と、前記スイッチング周期において前記リアクトル電流が減衰する第 2 の期間の長さとの和が最小化されるように設定するサンプリング周期設定部と、

前記設定されたサンプリング周期ごとに前記電流計による前記リアクトル電流の測定値をサンプリングし、前記スイッチング周期においてサンプリングされた前記リアクトル電流の測定値を平均化することで、前記スイッチング周期における前記リアクトル電流の平均値を測定する電流測定部と、

を有し、

前記サンプリング周期設定部は、

複数のサンプリング周期の候補のそれぞれについて、当該候補に対応する前記スイッチング周期におけるサンプリング回数に、前記スイッチング周期に対する前記スイッチング素子がオンとなる期間のデューティ比を乗じた値から、当該値に最も近い整数までの第 1 の距離を算出し、前記複数のサンプリング周期の候補のそれぞれについての前記第 1 の距離に基づいて、前記複数のサンプリング周期の候補のうち、前記第 1 の期間の長さとの当該候補の整数倍間の差分が最小となる候補を決定し、決定した当該候補を前記サンプリング周期として設定する制御装置。

10

【請求項 6】

電源と接続されるリアクトルと、前記リアクトルの一端に接続されるスイッチング素子とを有し、前記スイッチング素子がオンとオフとを繰り返すことで前記リアクトルに流れるリアクトル電流を制御して前記電源から供給される直流電力を変圧する DC - DC コンバータにおいて前記リアクトルに流れるリアクトル電流の測定方法であって、

20

前記リアクトル電流を測定する電流計による前記リアクトル電流の測定値をサンプリングするサンプリング周期を、前記スイッチング素子がオンとオフとを繰り返すスイッチング周期において前記リアクトル電流が増加する第 1 の期間の長さとの前記サンプリング周期の整数倍間の差分と、前記スイッチング周期において前記リアクトル電流が減衰する第 2 の期間の長さとの和が最小化されるように設定し、

前記設定されたサンプリング周期ごとに前記電流計による前記リアクトル電流の測定値をサンプリングし、前記スイッチング周期においてサンプリングされた前記リアクトル電流の測定値を平均化することで、前記スイッチング周期における前記リアクトル電流の平均値を測定する、

30

ことを含み、

前記サンプリング周期の設定は、

複数のサンプリング周期の候補のそれぞれについて、当該候補に対応する前記スイッチング周期におけるサンプリング回数に、前記スイッチング周期に対する前記スイッチング素子がオンとなる期間のデューティ比を乗じた値から、当該値に最も近い整数までの第 1 の距離を算出し、前記複数のサンプリング周期の候補のそれぞれについての前記第 1 の距離に基づいて、前記複数のサンプリング周期の候補のうち、前記第 1 の期間の長さとの当該候補の整数倍間の差分が最小となる候補を決定し、決定した当該候補を前記サンプリング周期として設定することを含む測定方法。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、入力された直流電力を変圧する DC - DC コンバータを有する電力供給システム、そのような DC - DC コンバータを制御する制御装置、及び DC - DC コンバータが有するリアクトルに流れるリアクトル電流を測定するリアクトル電流測定方法に関する。

【背景技術】

【0002】

燃料電池などの直流電源から供給される直流電力を昇圧するために、昇圧型の DC - DC コンバータ（以下、DC - DC コンバータを、単にコンバータと呼ぶ）が利用されるこ

50

とがある。このような昇圧型のコンバータは、例えば、リアクトルと、スイッチング素子を有する。そして、スイッチング素子のスイッチング周期に対する、スイッチング素子がオンとなる期間の比であるデューティ比を制御することで、リアクトルを流れる電流（以下、単にリアクトル電流と呼ぶことがある）が制御され、その結果としてコンバータに入力される電圧に対するコンバータから出力される電圧の変圧比（この例では、昇圧比）が制御される。そのため、変圧比を適切に制御するためには、リアクトル電流を正確に測定することが求められる。そこで、コンバータのリアクトル電流を測定する技術が提案されている（例えば、特許文献 1 を参照）。

【 0 0 0 3 】

例えば、特許文献 1 に記載された平均リアクトル電流検出装置は、スイッチング素子のスイッチング制御の周期においてリアクトルの電流値が非線形的に変化する期間が存在するか否か判定する。そしてこの平均リアクトル電流検出装置は、そのような期間が存在する場合に、電圧変換器の入力電圧、出力電圧、リアクトルの値、及び、スイッチング素子の ON 期間と OFF 期間との比率に基づいて、スイッチング制御の周期におけるリアクトルの電流量の平均値を推定する。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 0 4 】

【 文献 】 特開 2 0 1 0 - 2 7 9 1 5 1 号 公 報

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 0 5 】

上記の技術により、昇圧コンバータのスイッチング素子のスイッチング制御の周期におけるリアクトル電流の平均値の測定値の信頼性が向上する。しかし、昇圧コンバータのリアクトル電流をより精度良く測定する手法が求められている。

【 0 0 0 6 】

そこで、本発明は、DC - DC コンバータのリアクトル電流の測定精度を向上することが可能な電力供給システム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 】

【 0 0 0 7 】

本発明の一つの形態によれば、電力供給システムが提供される。この電力供給システムは、直流電力を供給する電源と、電源と接続されるリアクトルと、リアクトルの一端に接続されるスイッチング素子とを有し、スイッチング素子がオンとオフとを繰り返すことでリアクトル電流に流れるリアクトル電流を制御して電源から供給される直流電力を変圧する DC - DC コンバータと、DC - DC コンバータを制御する制御装置とを有する。制御装置は、リアクトル電流を測定する電流計によるリアクトル電流の測定値をサンプリングするサンプリング周期を、スイッチング素子がオンとオフとを繰り返すスイッチング周期においてリアクトル電流が増加する第 1 の期間の長さサンプリング周期の整数倍間の差分と、スイッチング周期においてリアクトル電流が減衰する第 2 の期間の長さサンプリング周期の整数倍間の差分との和が最小化されるように設定するサンプリング周期設定部と、設定されたサンプリング周期ごとに電流計によるリアクトル電流の測定値をサンプリングし、スイッチング周期においてサンプリングされたリアクトル電流の測定値を平均化することで、スイッチング周期におけるリアクトル電流の平均値を測定する電流測定部とを有する。

【 0 0 0 8 】

この電力供給システムにおいて、制御装置のサンプリング周期設定部は、複数のサンプリング周期の候補のそれぞれについて、その候補に対応するスイッチング周期におけるサンプリング回数に、スイッチング周期に対するスイッチング素子がオンとなる期間のデューティ比を乗じた値から、その値に最も近い整数までの第 1 の距離を算出し、複数のサンプリング周期の候補のそれぞれについての第 1 の距離に基づいて、複数のサンプリング周

10

20

30

40

50

期の候補のうち、第1の期間の長さとその候補の整数倍間の差分が最小となる候補を決定し、決定した候補をサンプリング周期として設定することが好ましい。

【0009】

また、この電力供給システムは、DC-DCコンバータへの入力電圧を測定する第1の電圧計と、DC-DCコンバータからの出力電圧を測定する第2の電圧計とをさらに有することが好ましい。そして制御装置は、入力電圧及び出力電圧と、デューティ比とに基づいて、DC-DCコンバータの動作モードが、スイッチング周期中にリアクトル電流が流れない期間が存在する不連続モードかスイッチング周期中にリアクトル電流が流れない期間が存在しない連続モードかを判定する動作モード判定部をさらに有し、サンプリング周期設定部は、DC-DCコンバータの動作モードが不連続モードである場合、複数のサンプリング周期の候補のそれぞれについて、その候補に相当するスイッチング周期におけるサンプリング回数にスイッチング周期に対する第2の期間の比を乗じた値から、その値に最も近い整数までの第2の距離をさらに算出し、複数のサンプリング周期の候補のそれぞれについての第1の距離及び第2の距離に基づいて、複数のサンプリング周期の候補のうち、第1の期間の長さとその候補の整数倍間の差分と、第2の期間の長さとその候補の整数倍間の差分との和が最小化される候補を決定し、決定した候補をサンプリング周期として設定することが好ましい。

10

【0010】

この場合において、サンプリング周期設定部は、DC-DCコンバータの動作モードが連続モードである場合、複数のサンプリング周期の候補のそれぞれについて、第1の距離と1から第1の距離を減じた値の積をその候補に対応するスイッチング周期におけるサンプリング回数の2乗で除した判定値を算出し、その判定値が最小となる候補を、サンプリング周期として設定することが好ましい。

20

【0011】

あるいは、サンプリング周期設定部は、DC-DCコンバータの動作モードが不連続モードである場合、複数のサンプリング周期の候補のそれぞれについて、第1の距離と1から第1の距離を減じた値の積と、第2の距離と1から第2の距離を減じた値の積に入力電圧に対する出力電圧の比に応じた係数を乗じた値との和をその候補に対応するスイッチング周期におけるサンプリング回数の2乗で除した判定値を算出し、その判定値が最小となる候補を、サンプリング周期として設定することが好ましい。

30

【0012】

本発明の他の形態によれば、電源と接続されるリアクトルと、リアクトルの一端に接続されるスイッチング素子とを有し、スイッチング素子がオンとオフとを繰り返すことでリアクトルに流れるリアクトル電流を制御して電源から供給される直流電力を変圧するDC-DCコンバータを制御する制御装置が提供される。この制御装置は、リアクトルに流れるリアクトル電流を測定する電流計によるリアクトル電流の測定値をサンプリングするサンプリング周期を、スイッチング素子がオンとオフとを繰り返すスイッチング周期においてリアクトル電流が増加する第1の期間の長さやサンプリング周期の整数倍間の差分と、スイッチング周期においてリアクトル電流が減衰する第2の期間の長さやサンプリング周期の整数倍間の差分との和が最小化されるように設定するサンプリング周期設定部と、設定されたサンプリング周期ごとに電流計によるリアクトル電流の測定値をサンプリングし、スイッチング周期においてサンプリングされたリアクトル電流の測定値を平均化することで、スイッチング周期におけるリアクトル電流の平均値を測定する電流測定部とを有する。

40

【0013】

本発明のさらに他の形態によれば、電源と接続されるリアクトルと、リアクトルの一端に接続されるスイッチング素子とを有し、スイッチング素子がオンとオフとを繰り返すことでリアクトルに流れるリアクトル電流を制御して電源から供給される直流電力を変圧するDC-DCコンバータにおいてリアクトルに流れるリアクトル電流の測定方法が提供される。この測定方法は、リアクトルに流れるリアクトル電流を測定する電流計によるリア

50

クトル電流の測定値をサンプリングするサンプリング周期を、スイッチング素子がオンとオフとを繰り返すスイッチング周期においてリアクトル電流が増加する第1の期間の長さとしてサンプリング周期の整数倍間の差分と、スイッチング周期においてリアクトル電流が減衰する第2の期間の長さとしてサンプリング周期の整数倍間の差分との和が最小化されるように設定し、設定されたサンプリング周期ごとに電流計によるリアクトル電流の測定値をサンプリングし、スイッチング周期においてサンプリングされたリアクトル電流の測定値を平均化することで、スイッチング周期におけるリアクトル電流の平均値を測定することを含む。

【発明の効果】

【0014】

本発明に係る電力供給システムは、DC-DCコンバータのリアクトル電流の測定精度を向上できるという効果を奏する。

【図面の簡単な説明】

【0015】

【図1】一つの実施形態による電力供給システムの概略構成図である。

【図2】リアクトル電流測定処理を含むDC-DCコンバータの制御処理に関する、コントローラのプロセッサの機能ブロック図である。

【図3】(a)及び(b)は、それぞれ、比較例として、スイッチング周期中におけるオン期間がサンプリング周期の整数倍とならない場合における、スイッチング周期中におけるリアクトル電流の平均値の測定値の一例を示す図である。

【図4】スイッチング周期中におけるオン期間がサンプリング周期の整数倍となる場合における、スイッチング周期中におけるリアクトル電流の平均値の測定値の一例を示す図である。

【図5】昇圧コンバータが連続モードで動作する場合における、サンプリング周期の設定の概要の説明図である。

【図6】昇圧コンバータが不連続モードで動作する場合における、サンプリング周期の設定の概要の説明図である。

【図7】本実施形態による、リアクトル電流測定処理を含む、DC-DCコンバータの制御処理の動作フローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0016】

以下、図を参照しつつ、コンバータを有する電力供給システム、コンバータを制御する制御装置、及び、その電力供給システムで実行されるリアクトル電流測定処理について説明する。この電力供給システムは、コンバータが有するスイッチング素子がオンとなる状態とオフとなる状態とを繰り返す周期、すなわちスイッチング周期における、リアクトルに流れる電流（すなわち、リアクトル電流）の平均値を測定する。その際、この電力供給システムは、スイッチング周期中においてスイッチング素子がオンとなる期間及びスイッチング素子がオンからオフになるタイミングからリアクトル電流がゼロまたは極小値になるまでの期間のそれぞれと、リアクトル電流の測定値をサンプリングするサンプリング周期の整数倍との差分の和が最小化されるようにそのサンプリング周期を設定する。これにより、この電力供給システムは、リアクトル電流の測定値をサンプリングするタイミングによらずに、スイッチング周期におけるリアクトル電流の平均値の測定値の誤差を小さくして、そのリアクトル電流の平均値の測定精度の向上を図る。なお、以下では、説明の便宜上、スイッチング素子がオンとなる期間（すなわち、リアクトル電流が増加する第1の期間）を、単にオン期間と呼ぶことがある。また、スイッチング素子がオンからオフになるタイミングからリアクトル電流がゼロまたは極小値になるまでの期間（すなわち、リアクトル電流が減衰する第2の期間）を、単に減衰期間と呼ぶことがある。さらに、スイッチング周期におけるリアクトル電流の平均値を、単に平均電流と呼ぶことがある。

【0017】

以下では、リアクトル電流の測定対象となるコンバータが、昇圧型のコンバータ（以下

10

20

30

40

50

、単に昇圧コンバータと呼ぶ) であるとして、電力供給システム、制御装置及びリアクトル電流測定処理について説明する。しかし、リアクトル電流の測定対象となるコンバータは、昇圧コンバータに限られず、降圧型のコンバータ(以下、単に降圧コンバータと呼ぶ)であってもよく、あるいは、昇圧または降圧の何れも可能なコンバータ(以下、単に昇降圧コンバータと呼ぶ)であってもよい。

【0018】

図1は、一つの実施形態による電力供給システムの概略構成図である。図1に示されるように、電力供給システム1は、電源2と、昇圧コンバータ3と、二つの電圧計4、5と、電流計6と、コントローラ7とを有する。そして電力供給システム1は、電源2から供給される直流電力を昇圧コンバータ3により昇圧し、昇圧された直流電力を負荷回路8へ供給する。なお、図1に示される例では、電源2に接続される昇圧コンバータ3の数は一つであるが、電源2に対して並列に複数の昇圧コンバータが接続されてもよい。そしてコントローラ7が複数の昇圧コンバータを制御してもよい。この場合には、昇圧コンバータごとに、図1に示されるようにその昇圧コンバータに対して接続される二つの電圧計及び一つの電流計が設けられればよい。

10

【0019】

電源2は、直流電力を供給する電源であり、本実施形態では、燃料電池とすることができ、なお、電源2は、燃料電池に限られず、鉛蓄電池あるいはリチウムイオン電池など、他の方式の直流電源であってもよい。電源2から供給される直流電力は、昇圧コンバータ3に入力される。

20

【0020】

昇圧コンバータ3は、電源2から供給された直流電力を昇圧し、昇圧された直流電力を負荷回路8へ出力する。そのために、昇圧コンバータ3は、リアクトル11と、ダイオード12と、スイッチング素子13と、平滑コンデンサ14とを有する。

【0021】

リアクトル11は、電源2と負荷回路8との間に接続される。ダイオード12は、リアクトル11と平滑コンデンサ14との間に、ダイオード12のアノードがリアクトル11の一端と接続され、ダイオード12のカソードが平滑コンデンサ14の一端と接続されるように配置される。すなわち、ダイオード12は、リアクトル11から平滑コンデンサ14へ向けてリアクトル電流が流れるように配置される。

30

【0022】

スイッチング素子13は、例えば、MOSFETあるいは絶縁ゲートバイポーラトランジスタといった、半導体によるスイッチング素子とすることができる。スイッチング素子13は、リアクトル11の電源2と接続される側の一端と反対側のリアクトル11の他端に接続される。すなわち、スイッチング素子13は、リアクトル11とダイオード12との間に一端が接続され、他端が接地され、かつ、コントローラ7からの制御信号に従ってオン・オフが切り替えられるように設けられる。そしてコントローラ7がスイッチング素子13をオンにすると、スイッチング素子13を介してリアクトル11に流れるリアクトル電流によりリアクトル11にエネルギーが蓄積される。そしてコントローラ7がスイッチング素子13をオフにすると、リアクトル11に蓄積されていたエネルギーによるリアクトル電流が平滑コンデンサ14へ流れる。

40

【0023】

平滑コンデンサ14は、リアクトル11から流入するリアクトル電流により蓄積される電力を平滑化して負荷回路8へ出力する。したがって、コントローラ7がスイッチング素子13についてオン・オフを周期的に切り替えることで平滑コンデンサ14に蓄積される電力が増加し、その結果として昇圧コンバータ3に供給された直流電力は昇圧されてから出力されることになる。

【0024】

電圧計4は、第1の電圧計の一例であり、電源2と昇圧コンバータ3との間に設けられ、昇圧コンバータ3へ入力される電圧(以下、単に入力電圧と呼ぶことがある)を測定す

50

る。そして電圧計 4 は、入力電圧の測定値をコントローラ 7 へ出力する。

【 0 0 2 5 】

電圧計 5 は、第 2 の電圧計の一例であり、ダイオード 1 2 と、平滑コンデンサ 1 4 との間に設けられ、昇圧コンバータ 3 から出力される電圧（以下、単に出力電圧と呼ぶことがある）を測定する。なお、電圧計 5 は、平滑コンデンサ 1 4 と負荷回路 8 との間に設けられてもよい。そして電圧計 5 は、出力電圧の測定値をコントローラ 7 へ出力する。

【 0 0 2 6 】

電流計 6 は、リアクトル 1 1 とダイオード 1 2 との間においてスイッチング素子 1 3 が接続される箇所よりもリアクトル 1 1 側に設けられ、リアクトル 1 1 を流れるリアクトル電流を測定する。そして電流計 6 は、そのリアクトル電流の測定値をコントローラ 7 へ出力する。なお、電流計 6 は、昇圧コンバータ 3 と別個に設けられてもよく、あるいは、昇圧コンバータ 3 の一部品として、昇圧コンバータ 3 に組み込まれていてもよい。

【 0 0 2 7 】

コントローラ 7 は、制御装置の一例であり、昇圧コンバータ 3 を含む電力供給システム 1 全体を制御する。具体的に、コントローラ 7 は、他の装置、例えば、電力供給システム 1 が組み込まれる装置の制御装置から通知された、電源 2 から供給される電力の目標値（以下、単に目標電力値と呼ぶ）に基づいて昇圧コンバータ 3 に対する電流指令値を求め、求めた電流指令値に従って、スイッチング素子 1 3 のスイッチング周期に対する、スイッチング素子 1 3 がオンとなる期間の比であるデューティ比を設定する。そしてコントローラ 7 は、所定のスイッチング周期ごとに、設定したデューティ比で、スイッチング素子 1 3 に対してオン・オフを切り替えさせる。また、コントローラ 7 は、昇圧コンバータ 3 のリアクトルの平均電流を測定し、測定した平均電流に従ってデューティ比を更新する。

【 0 0 2 8 】

そのために、コントローラ 7 は、通信インターフェース 2 1 と、メモリ 2 2 と、プロセッサ 2 3 とを有する。通信インターフェース 2 1、メモリ 2 2 及びプロセッサ 2 3 は、互いに別個の回路として構成されてもよく、あるいは、一つの集積回路として構成されてもよい。

【 0 0 2 9 】

通信インターフェース 2 1 は、二つの電圧計 4、5、電流計 6 及び他の装置とコントローラ 7 とを接続するためのインターフェース回路と、昇圧コンバータ 3 のスイッチング素子 1 3 への制御信号を出力するためのゲートドライバなどを有する。そして通信インターフェース 2 1 は、電圧計 4 から受け取った、昇圧コンバータ 3 への入力電圧の測定値、電圧計 5 から受け取った、昇圧コンバータ 3 からの出力電圧の測定値、電流計 6 からのリアクトル電流の測定値をプロセッサ 2 3 へわたす。また、通信インターフェース 2 1 は、プロセッサ 2 3 からの制御信号を昇圧コンバータ 3 のスイッチング素子 1 3 へ出力する。さらに、通信インターフェース 2 1 は、他の装置から受け取った、目標電力値をプロセッサ 2 3 へわたす。さらにまた、通信インターフェース 2 1 は、プロセッサ 2 3 から受け取った、スイッチング周期におけるリアクトル電流の平均値を表す情報を、他の装置へ出力してもよい。

【 0 0 3 0 】

メモリ 2 2 は、記憶部の一例であり、例えば、不揮発性の半導体メモリ及び揮発性の半導体メモリを有する。そしてメモリ 2 2 は、電力供給システム 1 の制御に利用される各種の情報を記憶する。例えば、メモリ 2 2 は、電流指令値とデューティ比との対応関係を表すテーブル、及び、昇圧コンバータ 3 のリアクトルの平均電流を測定するために利用される各種の情報を記憶する。さらに、メモリ 2 2 は、電力供給システム 1 が動作している間にプロセッサ 2 3 により算出される各種のデータを一時的に記憶する。

【 0 0 3 1 】

プロセッサ 2 3 は、例えば、1 以上の演算回路と、その周辺回路とを有する。さらに、プロセッサ 2 3 は、サンプリング周期が可変なサンプリング回路を有する。そしてプロセッサ 2 3 は、昇圧コンバータ 3 のスイッチング素子 1 3 のデューティ比を設定し、スイッ

10

20

30

40

50

チング周期ごとに、設定したデューティ比に従って、スイッチング素子 1 3 のオン・オフを切り替えさせる。さらに、プロセッサ 2 3 は、所定の周期ごとに、昇圧コンバータ 3 のリアクトルの平均電流を測定し、測定したリアクトルの平均電流に従ってデューティ比を更新する。

【 0 0 3 2 】

図 2 は、リアクトル電流測定処理を含むコンバータの制御処理に関する、プロセッサ 2 3 の機能ブロック図である。プロセッサ 2 3 は、動作モード判定部 3 1 と、サンプリング周期設定部 3 2 と、電流測定部 3 3 と、制御部 3 4 とを有する。

【 0 0 3 3 】

動作モード判定部 3 1 は、所定の周期ごと（例えば、昇圧コンバータ 3 のスイッチング素子 1 3 のスイッチング周期ごと）に、昇圧コンバータ 3 の動作モードを判定する。本実施形態では、動作モード判定部 3 1 は、入力電圧、出力電圧及びデューティ比に基づいて、昇圧コンバータ 3 の動作モードが、スイッチング周期中にリアクトル電流がゼロとなり、リアクトル電流が流れない期間が存在する不連続モードと、そのような期間が存在しない連続モードのうちの何れのモードに該当するか判定する。

【 0 0 3 4 】

本実施形態では、昇圧コンバータ 3 の特性上、出力電圧 V_H と入力電圧 V_L の差 $(V_H - V_L)$ に対する出力電圧 V_H の比にデューティ比 D を乗じて得られるモード判定値 $\{D \times V_H / (V_H - V_L)\}$ が 1 以上であれば、スイッチング周期中でリアクトル電流がゼロにならず、昇圧コンバータ 3 の動作モードは連続モードとなる。一方、モード判定値が 1 未満であれば、スイッチング周期中でリアクトル電流がゼロとなる期間が存在し、昇圧コンバータ 3 の動作モードは不連続モードとなる。したがって、動作モード判定部 3 1 は、電圧計 4 から受信した昇圧コンバータ 3 の入力電圧 V_L と、電圧計 5 から受信した昇圧コンバータ 3 からの出力電圧 V_H とスイッチング素子 1 3 のデューティ比 D とからモード判定値を算出し、算出したモード判定値が 1 未満か否かを判定する。そしてモード判定値が 1 未満である場合、動作モード判定部 3 1 は、昇圧コンバータ 3 の現在の動作モードは不連続モードであると判定する。一方、モード判定値が 1 以上である場合、動作モード判定部 3 1 は、昇圧コンバータ 3 の現在の動作モードは連続モードであると判定する。

【 0 0 3 5 】

なお、昇圧コンバータ 3 の代わりに降圧コンバータが電力供給システムに含まれる場合、モード判定値は $\{D \times V_L / V_H\}$ となる。そしてモード判定値が 1 以上であれば、降圧コンバータの動作モードは連続モードとなり、一方、モード判定値が 1 未満であれば、降圧コンバータの動作モードは不連続モードとなる。同様に、昇圧コンバータ 3 の代わりに昇降圧コンバータが電力供給システムに含まれる場合、モード判定値は $\{D \times (V_H + V_L) / V_H\}$ となる。そしてモード判定値が 1 以上であれば、昇降圧コンバータの動作モードは連続モードとなり、一方、モード判定値が 1 未満であれば、昇降圧コンバータの動作モードは不連続モードとなる。したがって、降圧コンバータまたは昇降圧コンバータが電力供給システムに含まれる場合も、動作モード判定部 3 1 は、上記の実施形態と同様にモード判定値を算出し、算出したモード判定値が 1 未満か否かで、コンバータの動作モードを判定すればよい。

【 0 0 3 6 】

動作モード判定部 3 1 は、昇圧コンバータ 3 の動作モードを判定する度に、判定した動作モードをサンプリング周期設定部 3 2 へ通知する。

【 0 0 3 7 】

サンプリング周期設定部 3 2 は、昇圧コンバータ 3 のスイッチング素子 1 3 のスイッチング周期中において電流計 6 により測定されたリアクトル電流をサンプリングするサンプリング回数及びそのサンプリング周期を設定する。本実施形態では、サンプリング周期設定部 3 2 は、動作モード判定部 3 1 から通知された、昇圧コンバータ 3 の動作モードに応じて、オン期間とサンプリング周期の整数倍間の差分と減衰期間とサンプリング周期の整数倍間の差分の和を最小化するように、そのサンプリング周期を設定する。

【 0 0 3 8 】

10

20

30

40

50

本実施形態では、サンプリング周期設定部 3 2 は、以下の手順に従ってサンプリング周期を設定する。

(1) 昇圧コンバータ 3 のスイッチング素子 1 3 のスイッチング周期 T 中に設定可能なサンプリング回数の最大値 Nmax (以下、最大サンプリング回数と呼ぶことがある) の算出

(2) 最大サンプリング回数 Nmax 以下の各整数、すなわち、サンプリング回数候補 N (N=1, 2, ..., Nmax) について、そのサンプリング回数候補 N とデューティ比 D との積とその積に最も近い整数間の距離 (第 1 の距離) k[N] を算出

(3) 昇圧コンバータ 3 の動作モードに応じて、各サンプリング回数候補 N について算出した距離 k[N] から、スイッチング周期中におけるオン期間及び減衰期間のそれぞれとサンプリング周期の整数倍間の差分の和が最小となるサンプリング回数 N_{opt} を設定するとともに、サンプリング周期 T_{sample}=T/N_{opt} を設定

10

【 0 0 3 9 】

手順 (1) について、サンプリング周期設定部 3 2 は、次式を満たす整数 N のうち、最大の整数を最大サンプリング回数 Nmax とする。

【 数 1 】

$$T_{\text{samplemin}} < \frac{T}{N} \quad (1)$$

ここで、T_{samplemin} は、プロセッサ 2 3 が有するサンプリング回路の性能上、設定可能なサンプリング周期の最小値である。また T は、上記のように、昇圧コンバータ 3 のスイッチング素子 1 3 のスイッチング周期である。これらの値は、例えば、メモリ 2 2 に予め記憶されていればよい。

20

【 0 0 4 0 】

例えば、設定可能なサンプリング周期の最小値 T_{samplemin} が 2 μs であり、スイッチング周期 T が 50 μs であるとする、最大サンプリング回数 Nmax は 50/2=25 となる。

【 0 0 4 1 】

なお、スイッチング周期が一定である場合には、最大サンプリング回数 Nmax も一定値となる。そこでこの場合には、メモリ 2 2 に最大サンプリング回数 Nmax は予め記憶されていてよい。そして手順 (1) は省略されてもよい。

30

【 0 0 4 2 】

手順 (2) について、サンプリング周期設定部 3 2 は、最大サンプリング回数 Nmax 以下の各サンプリング回数候補 N (N=1, 2, ..., Nmax) について、そのサンプリング回数候補 N とデューティ比 D との積とその積に最も近い整数間の距離 k[N] を算出する。そしてサンプリング周期設定部 3 2 は、各サンプリング回数候補 N とその距離 k[N] とを対応付けてメモリ 2 2 に記憶する。

【 0 0 4 3 】

例えば、デューティ比 D が 38.1% である場合における、距離 k[N] の一例を以下に示す。以下に示す例では、サンプリング回数候補 N の値が 15 ~ 25 のときの距離 k[N] が示される。

40

【表 1】

表 1 距離 $k[N]$ の値の例 (デューティ比 $D=38.1\%$)

N	$k[N]$
15	0.285
16	0.096
17	0.477
18	0.142
19	0.239
20	0.380
21	0.001
22	0.382
23	0.237
24	0.144
25	0.475

例えば、表中に示される、 $N=15$ の場合、 $N \times D=5.715$ となるので、 $N \times D$ に最も近い整数までの距離 $k[N]$ は $|5.715-6|=0.285$ となる。また、 $N=21$ の場合、 $N \times D=8.001$ となるので、 $N \times D$ に最も近い整数までの距離 $k[N]$ は $|8.001-8|=0.001$ となる。

【0044】

手順(3)について、サンプリング周期設定部32は、昇圧コンバータ3の動作モードに応じて、各サンプリング回数候補 N について算出した距離 $k[N]$ から、スイッチング周期中におけるオン期間及び減衰期間のそれぞれとサンプリング周期の整数倍間の差分の和が最小となるようにサンプリング回数 N_{opt} 及びサンプリング周期 T_{sample} を設定する。

【0045】

昇圧コンバータ3の動作モードが連続モードである場合、サンプリング周期設定部32は、次式が最小となるサンプリング回数候補 N を、サンプリング回数 N_{opt} として算出する。そしてサンプリング周期設定部32は、サンプリング周期 T_{sample} を T/N_{opt} に設定する。

【数2】

$$\frac{k[N](1-k[N])}{N^2} \quad (2)$$

【0046】

ここで、(2)式の値を最小化するサンプリング回数候補 N が、スイッチング周期中におけるオン期間及び減衰期間のそれぞれとサンプリング周期の整数倍間の差分の和を最小化すること、及び、スイッチング周期中におけるオン期間及び減衰期間のそれぞれとサンプリング周期の整数倍間の差分の和が最小化される場合に、リアクトル11の平均電流の差分が最小化されることについて説明する。

【0047】

図3(a)及び図3(b)は、それぞれ、比較例として、スイッチング周期中におけるオン期間がサンプリング周期の整数倍とならない場合における、スイッチング周期中におけるリアクトル電流の平均値の測定値の一例を示す図である。図3(a)及び図3(b)のそれぞれにおいて、横軸は時間を表し、縦軸はリアクトル電流の大きさを表す。そして波形300は、昇圧コンバータ3が連続モードで動作する場合における、リアクトル電流の時間変化を表す。さらに、図3(a)及び図3(b)に示される例では、スイッチング周期中におけるオン期間 $T_{on}(=T \times D)$ が、サンプリング周期 T_{sample} の2.5倍になっている。なお、昇圧コンバータ3が連続モードで動作する場合、スイッチング周期とオン期間との差が減衰期間になるので、オン期間がサンプリング周期の整数倍にならない場合、減衰

10

20

30

40

50

期間もサンプリング周期の整数倍にならない。

【 0 0 4 8 】

図 3 (a) に示される例では、サンプリング周期が、リアクトル電流が極小値となるタイミング t_{\min} を基準として設定されている。そのため、個々のサンプリング点 3 0 1 のうちの一つが、リアクトル電流が極小値となるタイミング t_{\min} に設定されることとなる。そのため、各サンプリング点 3 0 1 におけるリアクトル電流の測定値の平均値 I_{measure} は、スイッチング周期における実際のリアクトルの平均電流 I_{ave} よりも小さくなる。このことは、各サンプリング点 3 0 1 にておけるリアクトル電流の測定値の平均値 I_{measure} とスイッチング周期における実際のリアクトルの平均電流 I_{ave} との関係を表す次式から明らかである。

【数 3】

$$I_{\text{measure}} = I_{\text{ave}} - \frac{0.5 \times (1 - 0.5)}{N^2 D (1 - D)} \times \frac{\Delta I}{2} \quad (3)$$

なお、 I は、リアクトル電流の極大値と極小値との差を表す。(3) 式の右辺の第 2 項は常に負となるので、この例では、リアクトル電流の測定値の平均値 I_{measure} は、スイッチング周期における実際のリアクトルの平均電流 I_{ave} よりも小さくなる。

【 0 0 4 9 】

図 3 (b) に示される例では、サンプリング周期が、リアクトル電流が極大値となるタイミング t_{\max} を基準として設定されている。そのため、個々のサンプリング点 3 0 2 のうちの一つが、リアクトル電流が極大値となるタイミング t_{\max} に設定されることとなる。そのため、各サンプリング点 3 0 2 におけるリアクトル電流の測定値の平均値 I_{measure} は、スイッチング周期における実際のリアクトルの平均電流 I_{ave} よりも大きくなる。このことは、各サンプリング点 3 0 2 におけるリアクトル電流の測定値の平均値 I_{measure} とスイッチング周期における実際のリアクトルの平均電流 I_{ave} との関係を表す次式から明らかである。

【数 4】

$$I_{\text{measure}} = I_{\text{ave}} + \frac{0.5 \times (1 - 0.5)}{N^2 D (1 - D)} \times \frac{\Delta I}{2} \quad (4)$$

(4) 式の右辺の第 2 項は常に正となるので、この例では、リアクトル電流の測定値の平均値 I_{measure} は、スイッチング周期における実際のリアクトルの平均電流 I_{ave} よりも大きくなる。このように、オン期間がサンプリング周期の整数倍にならない場合、リアクトル電流の測定値の平均値 I_{measure} とスイッチング周期における実際のリアクトルの平均電流 I_{ave} との間に、個々のサンプリング点の設定タイミングに応じた誤差が生じることになる。

【 0 0 5 0 】

図 4 は、スイッチング周期中におけるオン期間がサンプリング周期の整数倍となる場合における、スイッチング周期中におけるリアクトル電流の平均値の測定値の一例を示す図である。図 4 において、横軸は時間を表し、縦軸はリアクトル電流の大きさを表す。そして波形 4 0 0 は、昇圧コンバータ 3 が連続モードで動作する場合における、リアクトル電流の時間変化を表す。オン期間 $T_{\text{on}} (= D \times T)$ がサンプリング周期 T_{sample} の整数倍となる場合、サンプリング点のタイミングによらず、各サンプリング点におけるリアクトル電流の測定値の平均値 I_{measure} は、スイッチング周期における実際のリアクトルの平均電流 I_{ave} と等しくなる。この場合、リアクトル電流が極大値及び極小値のそれぞれとなるタイミングがサンプリング点 4 0 1 の一つとして設定される場合に限らず、個々のサンプリング点 4 0 1 よりも所定時間だけ遅延したタイミングにサンプリング点 4 0 2 が設定されてもよい。これは、リアクトル電流が増加する期間とリアクトル電流が減少する期間とで、サンプリング点のタイミングのずれによるリアクトル電流の値のずれが互いに打ち消されるた

10

20

30

40

50

めである。

【 0 0 5 1 】

このように、オン期間がサンプリング周期の整数倍となる場合、個々のサンプリング点のタイミングによらず、各サンプリング点におけるリアクトル電流の測定値を平均することで、スイッチング周期におけるリアクトルの平均電流が正確に測定される。そこで、サンプリング周期設定部 3 2 は、オン期間とサンプリング周期の整数倍間の差分が最小化されるように、サンプリング周期を設定する。なお、昇圧コンバータ 3 が連続モードで動作する場合、減衰期間の長さは、スイッチング周期とオン期間の長さの差に等しいので、オン期間とサンプリング周期の整数倍間の差分が最小化されれば、減衰期間とサンプリング周期の整数倍間の差分も最小化される。さらに、サンプリング周期設定部 3 2 は、(2) 式に示されるように、上記の差分を最小化した上で、サンプリング周期ができるだけ短くなるようにサンプリング周期を設定することが好ましい。

10

【 0 0 5 2 】

図 5 は、昇圧コンバータ 3 が連続モードで動作する場合における、サンプリング周期の設定の概要の説明図である。図 5 において、横軸は時間を表し、縦軸はリアクトル電流を表す。そして波形 5 0 0 は、リアクトル電流の時間変化を表す。図 5 に示されるように、スイッチング周期 T において N 個のサンプリング点 5 0 1 が設定され(すなわち、サンプリング周期 T/N)、リアクトル電流が極小値となるタイミングから最初のサンプリング点までの遅延時間が t_d であり、リアクトル電流が極大値となるタイミングからその直前のサンプリング点までの時間差が t であるとする。また、リアクトル電流の極大値とリアクトル電流の極小値の差が ΔI であるとする。この場合、スイッチング周期 T における、各サンプリング点 5 0 1 におけるリアクトル電流の測定値の平均値 I_{measure} は次式で表される。

20

【 数 5 】

$$I_{\text{measure}} = \frac{1}{N} \left[I(t_d) + I\left(t_d + \frac{T}{N}\right) + I\left(t_d + \frac{2T}{N}\right) + \dots + I\left(t_d + \frac{(N-1)T}{N}\right) \right]$$

$$= I_{\text{ave}} + \frac{\frac{Nt_d}{T} \left(1 - \frac{Nt_d}{T}\right) - \frac{Nt_\alpha}{T} \left(1 - \frac{Nt_\alpha}{T}\right) \Delta I}{N^2 D(1-D)} \frac{1}{2} \quad (5)$$

30

ここで、 $I(t)$ は、サンプリング点 t におけるリアクトル電流の測定値を表し、 I_{ave} は、スイッチング周期における実際のリアクトルの平均電流を表す。

【 0 0 5 3 】

図 5 に示される波形 5 0 0 から明らかなように、スイッチング周期 T 中のサンプリング回数候補 N とデューティ比 D との積が整数である場合、 $(t_d + t)N/T$ は 1 となる。このことから、 $(t_d + t)N/T$ の小数部分と $N \times D$ の小数部分とは一致する。そこで、(5) 式において、時間差 t を距離 $k[N]$ で置換するとともに、各サンプリング点 5 0 1 におけるリアクトル電流の測定値の平均値 I_{measure} とスイッチング周期における実際のリアクトルの平均電流 I_{ave} 間の誤差が最大化されるよう、遅延時間 t_d を設定することで、次式が得られる。

【 数 6 】

$$I_{\text{measure}} = I_{\text{ave}} \pm \frac{k[N](1-k[N])}{N^2} \frac{1}{D(1-D)} \frac{\Delta I}{2} \quad (6)$$

40

【 0 0 5 4 】

したがって、(6) 式の右辺の第 2 項の絶対値が小さいほど、各サンプリング点 5 0 1 におけるリアクトル電流の測定値の平均値 I_{measure} とスイッチング周期における実際のリアクトルの平均電流 I_{ave} 間の誤差が小さくなることが分かる。そして(6) 式の第 2 項の絶対値を最小化するためには、(2) 式が最小化されればよいことが分かる。

【 0 0 5 5 】

50

したがって、サンプリング周期設定部 3 2 は、(2) 式が最小化されるサンプリング回数候補 N を、サンプリング回数 N_{opt} として算出し、サンプリング周期を T/N_{opt} に設定する。距離 $k[N]$ の定義により、距離 $k[N]$ の取り得る値の範囲は $0 \sim 0.5$ であるので、距離 $k[N]$ が最小値となる場合に、(2) 式が最小化されることになる。そして距離 $k[N]$ が最小となる場合、スイッチング周期中におけるオン期間とサンプリング周期の整数倍間の差分が最小化される。また上記のように、減衰期間とサンプリング周期の整数倍間の差分も最小化される。さらに、サンプリング周期が短いほど、(2) 式の値は小さくなる。ただし、距離 $k[N]$ がゼロとなる場合、すなわち、オン期間とサンプリング周期の整数倍間の差分がゼロになる場合には、(2) 式はゼロとなる。そのため、オン期間とサンプリング周期の整数倍間の差分がゼロになるサンプリング周期の候補が複数存在する場合には、サンプリング周期設定部 3 2 は、その複数の候補の何れをサンプリング周期に設定してもよい。

10

【 0 0 5 6 】

次に、昇圧コンバータ 3 の動作モードが不連続モードである場合における、サンプリング周期の設定について説明する。昇圧コンバータ 3 の動作モードが不連続モードである場合、サンプリング周期設定部 3 2 は、次式が最小となるサンプリング回数候補 N を、サンプリング回数 N_{opt} として算出する。

【数 7】

$$\frac{k[N](1 - k[N]) + \left(\frac{V_H}{V_L} - 1\right) k_2[N](1 - k_2[N])}{N^2} \quad (\text{昇圧型}) \quad (7)$$

20

ここで、 $k_2[N]$ は、積 $\{N \times D \times V_L / (V_H - V_L)\}$ と、その積に最も近い整数までの距離 (第 2 の距離) を表す。なお、この積における項 $\{D \times V_L / (V_H - V_L)\}$ は、スイッチング周期 T に対する、減衰期間の長さの比を表す。減衰期間の長さは、昇圧コンバータ 3 が有するリアクトル 1 1 についてのインダクタの平衡条件から導出される。このことから、 $k_2[N]$ は、スイッチング周期中のサンプリング回数が N 回である場合における、減衰期間とサンプリング周期の整数倍間の差分を表す。したがって、(7) 式を最小化するためには、オン期間とサンプリング周期の整数倍間の差分と、減衰期間とサンプリング周期の整数倍間の差分の和を最小化するとともに、サンプリング周期をできるだけ短くすればよいことが分かる。

30

【 0 0 5 7 】

なお、昇圧コンバータ 3 の代わりに降圧コンバータまたは昇降圧コンバータが用いられている場合、サンプリング周期設定部 3 2 は、次式が最小となるサンプリング回数候補 N を、サンプリング回数 N_{opt} として算出すればよい。

【数 8】

$$\frac{k[N](1 - k[N]) + \left(\frac{V_H}{V_L - V_H}\right) k_2[N](1 - k_2[N])}{N^2} \quad (\text{降圧型}) \quad (7 - 1)$$

$$\frac{k[N](1 - k[N]) + \left(\frac{V_H}{V_L}\right) k_2[N](1 - k_2[N])}{N^2} \quad (\text{昇降圧型}) \quad (7 - 2)$$

40

【 0 0 5 8 】

降圧コンバータが用いられている場合、 $k_2[N]$ は、積 $\{N \times D \times (V_L - V_H) / V_H\}$ と、その積に最も近い整数までの距離 (第 2 の距離) を表す。そして項 $\{D \times (V_L - V_H) / V_H\}$ は、スイッチング周期 T に対する、減衰期間の長さの比を表す。また、昇降圧コンバータが用いられている場合、 $k_2[N]$ は、積 $\{N \times D \times V_L / V_H\}$ と、その積に最も近い整数までの距離 (第 2 の距離) を表す。そして項 $\{D \times V_L / V_H\}$ は、スイッチング周期 T に対する、減衰期間の長さの

50

比を表す。

【 0 0 5 9 】

あるいは、サンプリング周期設定部 3 2 は、次式が最小となるサンプリング回数候補 N を、サンプリング回数 N_{opt} として算出してもよい。

【 数 9 】

$$\frac{k[N](1 - k[N]) + 0.25(r - 1)}{N^2} \quad (\text{昇圧型}) \quad (8)$$

ここで、係数 r は、昇圧コンバータ 3 による目標昇圧比 (V_H/V_L) であり、例えば、1 に設定される。

10

【 0 0 6 0 】

また、昇圧コンバータ 3 の代わりに降圧コンバータまたは昇降圧コンバータが用いられている場合、サンプリング周期設定部 3 2 は、次式が最小となるサンプリング回数候補 N を、サンプリング回数 N_{opt} として算出してもよい。

【 数 1 0 】

$$\frac{k[N](1 - k[N]) + 0.25\left(\frac{r}{1 - r}\right)}{N^2} \quad (\text{降圧型}) \quad (8 - 1)$$

$$\frac{k[N](1 - k[N]) + 0.25r}{N^2} \quad (\text{昇降圧型}) \quad (8 - 2)$$

20

【 0 0 6 1 】

サンプリング周期設定部 3 2 は、(7) 式または (8) 式に従って算出されたサンプリング回数 N_{opt} に基づいて、サンプリング周期 $T_{sample}(=T/N_{opt})$ を設定すればよい。また、サンプリング周期設定部 3 2 は、昇圧コンバータ 3 の代わりに降圧コンバータが用いられている場合、(7 - 1) 式または (8 - 1) 式に従って算出されたサンプリング回数 N_{opt} に基づいて、サンプリング周期 $T_{sample}(=T/N_{opt})$ を設定すればよい。さらにまた、サンプリング周期設定部 3 2 は、昇圧コンバータ 3 の代わりに昇降圧コンバータが用いられている場合、(7 - 2) 式または (8 - 2) 式に従って算出されたサンプリング回数 N_{opt} に基づいて、サンプリング周期 $T_{sample}(=T/N_{opt})$ を設定すればよい。

30

【 0 0 6 2 】

図 6 は、昇圧コンバータ 3 が不連続モードで動作する場合における、サンプリング周期の設定の概要の説明図である。図 6 において、横軸は、サンプリング周期で正規化された時間を表し、縦軸はリアクトル電流を表す。そして波形 6 0 0 は、リアクトル電流の時間変化を表す。図 6 に示されるように、スイッチング周期 T において N 個のサンプリング点 6 0 1 が設定され (すなわち、サンプリング周期 T/N)、リアクトル電流が極小値となるタイミングから最初のサンプリング点までの遅延時間をサンプリング周期で正規化した値が k であり、リアクトル電流が極大値となるタイミングからその直前のサンプリング点までの時間差をサンプリング周期で正規化した値が k_2 であるとする。また、リアクトル電流がゼロになるタイミングからその直前のサンプリング点までの時間差をサンプリング周期で正規化した値が k であるとする。さらに、リアクトル電流の極大値とリアクトル電流の極小値の差が I_p であるとする。さらにまた、 k 、 k_2 、 I_p の関係から、 k 、 k_2 、 I_p を、 k 、 k_2 、 I_p を用いて表すように、 k 、 k_2 、 I_p で置換し、さらに $I_{measure}$ の誤差が最大となるように k 、 k_2 、 I_p を設定することによって、スイッチング周期 T における、各サンプリング点 6 0 1 におけるリアクトル電流の測定値の平均値 $I_{measure}$ は次式で表される。

40

【 数 1 1 】

50

$$\begin{aligned}
 I_{\text{measure}} &= \frac{1}{N} [I(t_0) + I(t_1) + I(t_2) + \dots + I(t_{N-1})] \\
 &= \frac{I_p}{2} (D + D_2) + \frac{I_p}{2DN^2} \left\{ k[N](1 - k[N]) + \frac{D}{D_2} k_2[N](1 - k_2[N]) \right\} \\
 &= \frac{I_p}{2} (D + D_2) + \frac{I_p}{2D} \frac{1}{N^2} \left\{ k[N](1 - k[N]) + \left(\frac{V_H}{V_L} - 1 \right) k_2[N](1 - k_2[N]) \right\} \quad (9)
 \end{aligned}$$

ここで、 $I(t_i)$ ($i=0, 1, \dots, N-1$)は、サンプリング点 t_i におけるリアクトル電流の測定値を表し、 D_2 は、 $D \times V_L / (V_H - V_L)$ である。また、昇圧コンバータ3の代わりに降圧コンバータが用いられている場合、(9)式において、項 $\{(V_H/V_L)-1\}$ の代わりに、項 $\{V_H/(V_L-V_H)\}$ が用いられればよい。同様に、昇圧コンバータ3の代わりに昇降圧コンバータが用いられている場合、(9)式において、項 $\{(V_H/V_L)-1\}$ の代わりに、項 $\{V_H/V_L\}$ が用いられればよい。

10

【0063】

(9)式から明らかなように、右辺の第1項が、オン期間及び減衰期間における実際のリアクトルの電流の平均値となる。したがって、(9)式の右辺の第2項の絶対値が小さいほど、各サンプリング点601におけるリアクトル電流の測定値の平均値 I_{measure} とスイッチング周期における実際のリアクトルの平均電流間の誤差が小さくなることが分かる。そして(9)式の第2項の絶対値を最小化するためには、(7)式が最小化されればよいことが分かる。また、昇圧コンバータ3の入力電圧 V_L 及び出力電圧 V_H の測定精度が、サンプリング周期の設定において不十分である場合、(7)式において $k_2[N]=0.5$ 、 $V_H/V_L=r$ と仮定することで(8)式が得られる。したがって、サンプリング周期設定部32は、(8)式が最小化されるように、サンプリング回数 N_{opt} を設定してもよい。

20

【0064】

サンプリング周期設定部32は、設定したサンプリング回数 N_{opt} 及びサンプリング周期 T_{sample} を電流測定部33へ通知する。

【0065】

電流測定部33は、サンプリング回路を介して、サンプリング周期設定部32から通知されたサンプリング周期 T_{sample} ごとに電流計6により測定されたリアクトル電流の測定値を取得する。そして電流測定部33は、スイッチング周期におけるサンプリング回数 N_{opt} 分のリアクトル電流の測定値をそのサンプリング回数 N_{opt} で平均化することで、スイッチング周期におけるリアクトルの平均電流 I_{ave} を測定する。そして電流測定部33は、測定したそのリアクトルの平均電流を制御部34へ通知する。

30

【0066】

制御部34は、電流測定部33から通知された、スイッチング周期におけるリアクトルの平均電流 I_{ave} に基づいて、昇圧コンバータ3を制御する。例えば、制御部34は、他の装置からコントローラ7が受信した目標電力値を、電源2から出力される電圧、すなわち、昇圧コンバータ3への入力電圧で除することで、電流指令値を算出する。そして制御部34は、メモリ22に予め記憶されている、電流指令値と昇圧コンバータ3のスイッチング素子13のデューティ比との対応関係を表すテーブルを参照することで、電流指令値に対応するデューティ比を決定する。制御部34は、スイッチング周期ごとに、決定したデューティ比で昇圧コンバータ3のスイッチング素子13がオン・オフを繰り返すようにスイッチング素子13に対する制御信号を出力することで、昇圧コンバータ3を制御する。また、制御部34は、目標電力値と昇圧コンバータ3への入力電圧とに基づいて、目標昇圧比を設定してもよい。

40

【0067】

そして制御部34は、電流測定部33から通知された、スイッチング周期におけるリアクトルの平均電流 I_{ave} と電流指令値との差が小さくなるように、デューティ比を更新することで、昇圧コンバータ3をフィードバック制御する。その際、制御部34は、例えば、比例制御、比例積分制御あるいはPID制御の何れかに従って、デューティ比を更新すれば

50

よい。

【 0 0 6 8 】

図 7 は、本実施形態による、リアクトル電流測定処理を含む、コンバータの制御処理の動作フローチャートである。プロセッサ 2 3 は、所定の周期ごとに、以下に示す動作フローチャートに従ってコンバータの制御処理を実行すればよい。なお、以下に示す動作フローチャートの各ステップのうち、ステップ S 1 0 1 ~ S 1 0 8 の処理がリアクトル電流測定処理に含まれる。

【 0 0 6 9 】

プロセッサ 2 3 の動作モード判定部 3 1 は、電圧計 4 により測定される昇圧コンバータ 3 への入力電圧 V_L 、電圧計 5 により測定される昇圧コンバータ 3 からの出力電圧 V_H 、及び、昇圧コンバータ 3 のスイッチング素子 1 3 に適用されるデューティ比 D に基づいて、昇圧コンバータ 3 の現在の動作モードを判定する（ステップ S 1 0 1 ）。

10

【 0 0 7 0 】

プロセッサ 2 3 のサンプリング周期設定部 3 2 は、スイッチング素子 1 3 のスイッチング周期中に設定可能なサンプリング回数の最大値 N_{max} を算出する（ステップ S 1 0 2 ）。また、サンプリング周期設定部 3 2 は、1 から設定可能なサンプリング回数の最大値 N_{max} までの各整数（すなわち、サンプリング周期の候補に対応する、サンプリング回数の候補） N について、その整数 N とデューティ比 D との積とその積に最も近い整数間の距離 $k[N]$ を算出する（ステップ S 1 0 3 ）。

【 0 0 7 1 】

さらに、サンプリング周期設定部 3 2 は、動作モード判定部 3 1 から通知された昇圧コンバータ 3 の現在の動作モードが不連続モードか否か判定する（ステップ S 1 0 4 ）。

20

【 0 0 7 2 】

昇圧コンバータ 3 の現在の動作モードが連続モードである場合（ステップ S 1 0 4 - No）、サンプリング周期設定部 3 2 は、1 ~ N_{max} までのそれぞれのサンプリング回数候補 N についての距離 $k[N]$ に基づいて、スイッチング素子 1 3 がオンとなっているオン期間とサンプリング周期の整数倍間の差分の和が最小化されるように、スイッチング周期 T 中のサンプリング回数 N_{opt} 及びサンプリング周期 T_{sample} を設定する（ステップ S 1 0 5 ）。

【 0 0 7 3 】

一方、昇圧コンバータ 3 の現在の動作モードが不連続モードである場合（ステップ S 1 0 4 - Yes）、サンプリング周期設定部 3 2 は、1 から設定可能なサンプリング回数の最大値 N_{max} までの各サンプリング回数候補 N について、その候補 N と $D \times V_L / (V_H - V_L)$ との積とその積に最も近い整数間の距離 $k_2[N]$ を算出する（ステップ S 1 0 6 ）。なお、上記のように、昇圧コンバータ 3 の代わりに降圧コンバータが用いられている場合、サンプリング周期設定部 3 2 は、候補 N と $D \times (V_L - V_H) / V_H$ との積とその積に最も近い整数間の距離を、距離 $k_2[N]$ として算出すればよい。また、昇圧コンバータ 3 の代わりに昇降圧コンバータが用いられている場合、サンプリング周期設定部 3 2 は、候補 N と $D \times V_L / V_H$ との積とその積に最も近い整数間の距離を、距離 $k_2[N]$ として算出すればよい。そしてサンプリング周期設定部 3 2 は、1 ~ N_{max} までのそれぞれのサンプリング回数候補 N についての距離 $k[N]$ 及び距離 $k_2[N]$ に基づいて、オン期間とサンプリング周期の整数倍間の差分と減衰期間とサンプリング周期の整数倍間の差分との和が最小化されるように、スイッチング周期 T 中のサンプリング回数 N_{opt} 及びサンプリング周期 T_{sample} を設定する（ステップ S 1 0 7 ）。

30

【 0 0 7 4 】

ステップ S 1 0 5 または S 1 0 7 の後、プロセッサ 2 3 の電流測定部 3 3 は、設定されたサンプリング周期 T_{sample} ごとに、電流計 6 によるリアクトル電流の測定値を取得し、取得したリアクトル電流の測定値をサンプリング回数 N_{opt} で平均化することで、スイッチング周期中のリアクトルの平均電流 I_{ave} を求める（ステップ S 1 0 8 ）。

40

【 0 0 7 5 】

プロセッサ 2 3 の制御部 3 4 は、求められたスイッチング周期中のリアクトルの平均電

50

流 I_{ave} と電流指令値との差が小さくなるように、昇圧コンバータ3をフィードバック制御する(ステップS109)。そしてプロセッサ23は、昇圧コンバータ3の制御処理を終了する。

【0076】

以上に説明してきたように、この電力供給システムは、昇圧コンバータが有するスイッチング素子のスイッチング周期における、リアクトルに流れるリアクトル電流の平均値を測定する。その際、この電力供給システムは、オン期間及び減衰期間のそれぞれと、リアクトル電流の測定値をサンプリングするサンプリング周期の整数倍との差分の和が最小化されるようにそのサンプリング周期を設定する。これにより、この電力供給システムは、リアクトル電流の測定値をサンプリングするタイミングによらずに、スイッチング周期におけるリアクトル電流の平均値の測定値の誤差を小さくして、そのリアクトル電流の平均値の測定精度を向上することができる。

10

【0077】

なお、上記の実施形態において、昇圧コンバータは、いわゆる磁気結合型の昇圧コンバータであってもよい。この場合でも、コントローラ7は、上記の実施形態と同様の処理を各相のリアクトルに対して適用することで、各相についてスイッチング周期におけるリアクトルの平均電流を求めることができる。

【0078】

さらに他の変形例によれば、電流測定部33により求められた、スイッチング周期におけるリアクトルの平均電流 I_{ave} は、昇圧コンバータ3の制御以外に利用されてもよい。例えば、プロセッサ23は、電源2から供給される電力を算出するためにその平均電流 I_{ave} を利用してもよい。すなわち、プロセッサ23は、電源2からの出力電圧に、その平均電流 I_{ave} を乗じることで、電源2から供給される電力を求めることができる。

20

【0079】

以上のように、当業者は、本発明の範囲内で、実施される形態に合わせて様々な変更を行うことができる。

【符号の説明】

【0080】

- 1 電力供給システム
- 2 電源
- 3 昇圧コンバータ
- 4、5 電圧計
- 6 電流計
- 7 コントローラ
- 8 負荷回路
- 11 リアクトル
- 12 ダイオード
- 13 スwitching素子
- 14 平滑コンデンサ
- 21 通信インターフェース
- 22 メモリ
- 23 プロセッサ
- 31 動作モード判定部
- 32 サンプリング周期設定部
- 33 電流測定部
- 34 制御部

30

40

50

【図面】
【図 1】

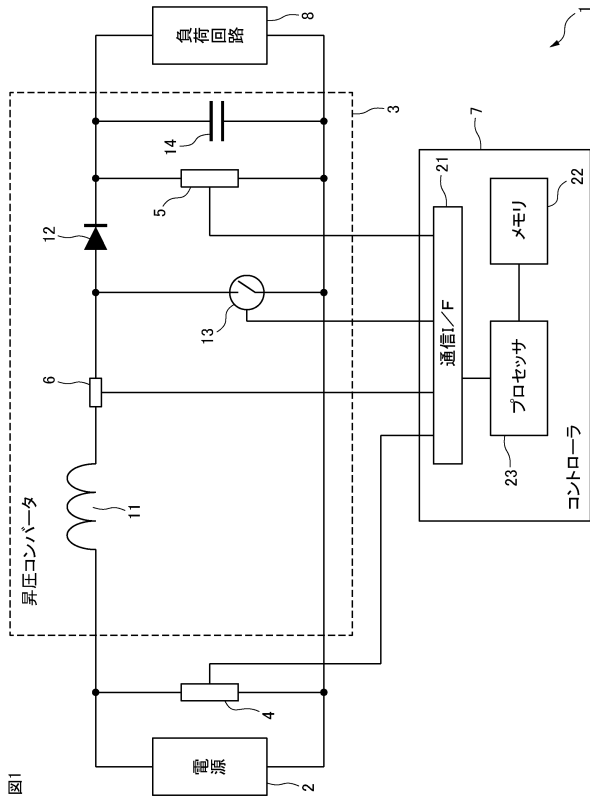


図1

【図 2】

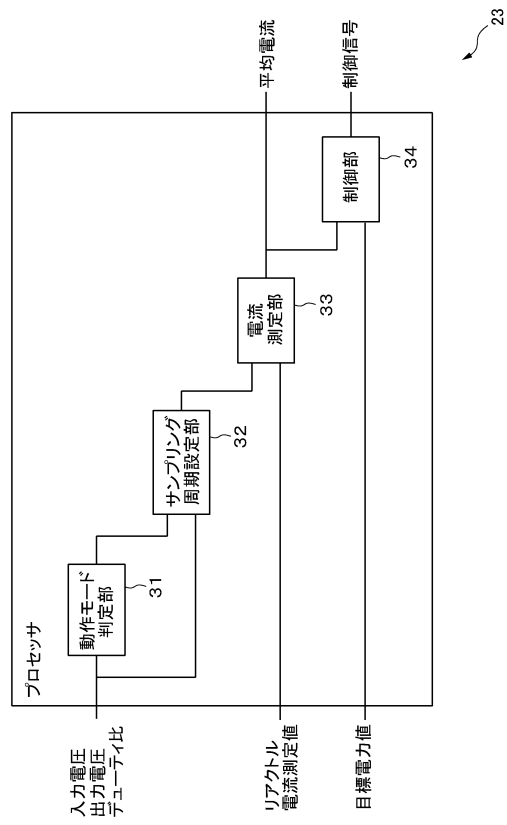


図2

【図 3】

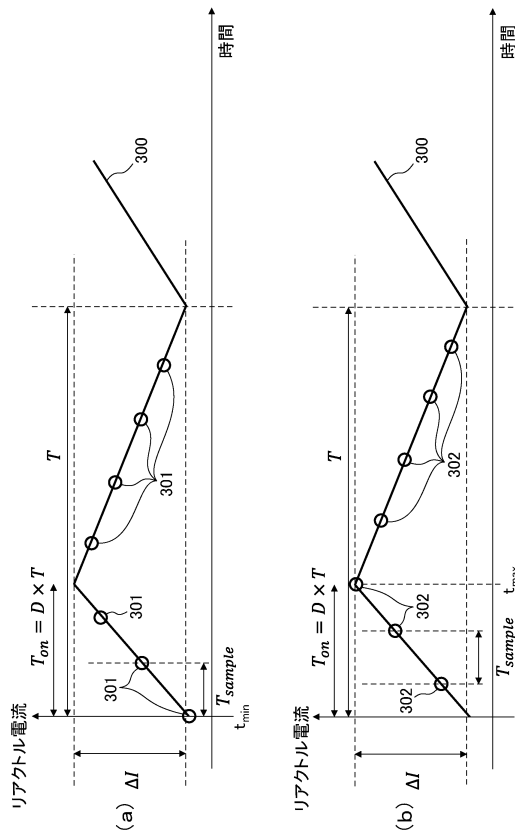


図3

【図 4】

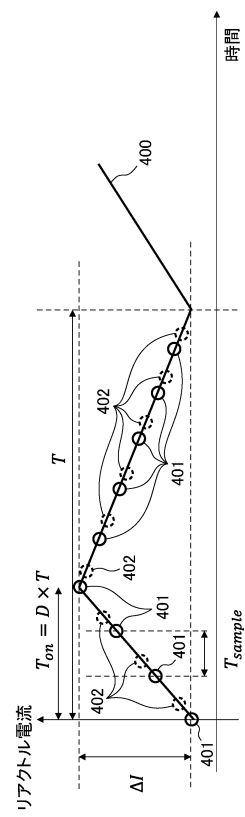
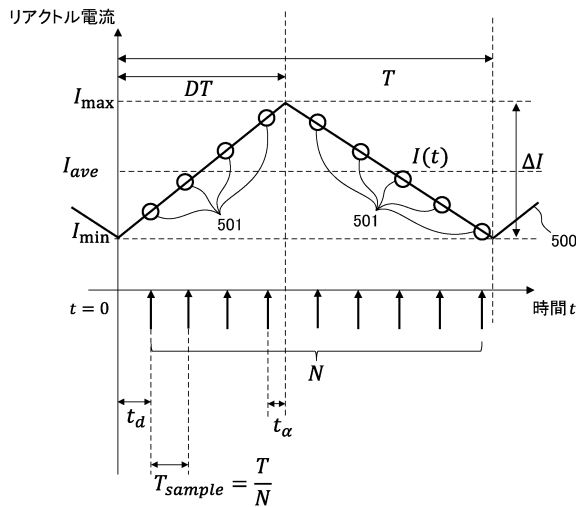


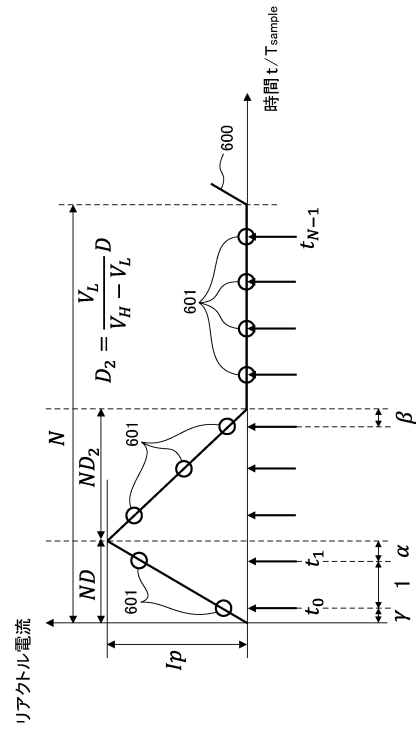
図4

【 図 5 】

図5



【 図 6 】



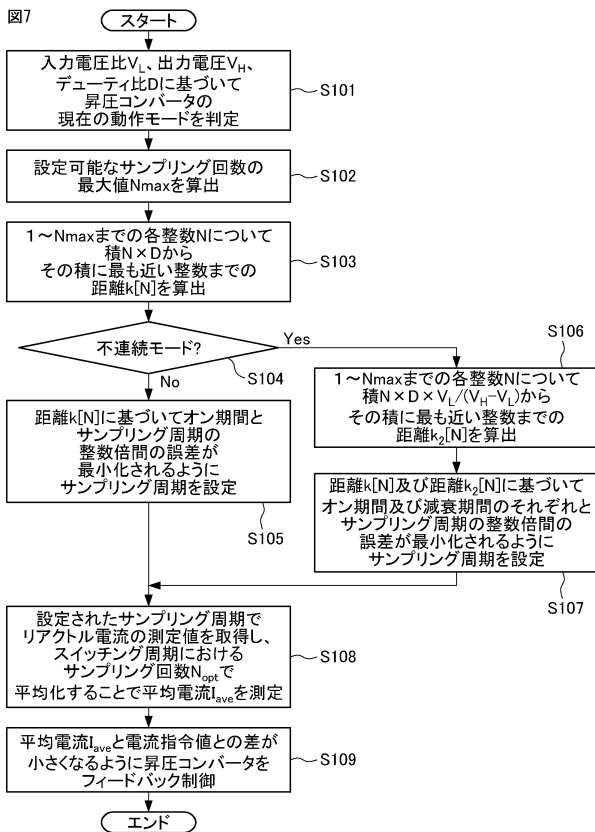
10

20

図6

【 図 7 】

図7



30

40

50

フロントページの続き

- (72)発明者 柳沼 大貴
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 野中 真人
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 南 啓大
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 木村 理知
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 金子 智彦
愛知県豊田市トヨタ町1番地 トヨタ自動車株式会社内
- 審査官 麻生 哲朗
- (56)参考文献 米国特許出願公開第2012/0078556(US, A1)
特開2014-158377(JP, A)
米国特許第10433378(US, B1)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
H02M 3/155