(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7259543号
(P7259543)

(45)発行日　令和5年4月18日(2023.4.18)

(24)登録日　令和5年4月10日(2023.4.10)

(51)国際特許分類		FI		
H02K 19/26 (2006.01)		H02K	19/26	Z
H02K 19/36 (2006.01)		H02K	19/36	D
H02P 25/024 (2016.01)		H02P	25/024	
H02P 27/06 (2006.01)		H02P	27/06	

請求項の数　8　（全22頁）

(21)出願番号　特願2019-96348(P2019-96348)
(22)出願日　令和1年5月22日(2019.5.22)
(65)公開番号　特開2020-191743(P2020-191743A)
(43)公開日　令和2年11月26日(2020.11.26)
審査請求日　令和4年4月13日(2022.4.13)

(73)特許権者　000004260
株式会社デンソー
愛知県刈谷市昭和町１丁目１番地
(74)代理人　100121821
弁理士　山田 強
(74)代理人　100139480
弁理士　日野 京子
(74)代理人　100125575
弁理士　松田 洋
(74)代理人　100175134
弁理士　北 裕介
(72)発明者　瀬口 正弘
愛知県刈谷市昭和町１丁目１番地 株式会社デンソー内
審査官　三島木 英宏

最終頁に続く

(54)【発明の名称】　界磁巻線型回転電機

(57)【特許請求の範囲】

【請求項１】

ステータ巻線（３１Ｕ～３１Ｗ）を有するステータ（５０）と、

第１巻線部（７１ａ）及び第２巻線部（７１ｂ）の直列接続体を有する界磁巻線（７０）と、

ロータコア（６１）、及び周方向において所定間隔で設けられてかつ前記ロータコアから径方向に突出する主極部（６２）を有するロータ（６０）と、を備え、

前記第１巻線部及び前記第２巻線部のそれぞれが前記各主極部に巻回され、前記界磁巻線に界磁電流を誘起させるための高調波電流が前記ステータ巻線に流れる界磁巻線型回転電機（３０）において、

ダイオード（８０）と、

前記第２巻線部に並列接続されたコンデンサ（９０）と、を備え、

前記直列接続体の両端のうち、前記第１巻線部側に前記ダイオードの一端が接続され、前記第２巻線部側に前記ダイオードの他端が接続されており、

前記第１巻線部及び前記コンデンサを含む直列共振回路と、前記第２巻線部及び前記コンデンサを含む並列共振回路とが構成されており、

前記ステータ巻線に高調波電流を流す場合において、前記第１巻線部に流れる高調波電流により発生する磁束と前記第２巻線部に流れる高調波電流により発生する磁束との合成値である界磁合成磁束の振幅よりも、前記ステータ巻線に高調波電流が流れることにより発生する磁束と前記界磁合成磁束との合成値の振幅を小さくするように、前記コンデンサの

静電容量（Ｃ）と、前記第１巻線部に対する前記第２巻線部の巻数比（Ｎ２／Ｎ１）とが定められている界磁巻線型回転電機。

【請求項２】

前記第１巻線部が、径方向において前記第２巻線部よりも前記ステータに近い側に配置されている請求項１に記載の界磁巻線型回転電機。

【請求項３】

前記直列共振回路の共振周波数（ｆ１）を所定周波数（ｆｃｓｔ）に維持し、かつ、前記第１巻線部及び前記第２巻線部それぞれの巻数の合計値を所定巻数（Ｎｃｓｔ）に維持することを条件として前記静電容量を所定範囲で変化させた場合、前記巻数比の取り得る範囲が０．５以上であってかつ５．２以下の範囲であり、

前記静電容量が前記所定範囲内の値に定められ、かつ、前記巻数比が０．５以上であってかつ５．２以下の値に定められていることにより、前記直列共振回路の共振周波数が前記所定周波数とされている請求項１又は２に記載の界磁巻線型回転電機。

【請求項４】

前記第２巻線部の巻数をＮ２とし、前記静電容量をＣとする場合、前記ステータ巻線に流す高調波電流の周波数ｆｓが

【数１】

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{(2\times N2)^2\cdot C}} \le fs \le \frac{1}{2\pi\sqrt{(0.2\times N2)^2\cdot C}} \quad \ldots \quad (c1)$$

を満たす値に設定されている請求項３に記載の界磁巻線型回転電機。

【請求項５】

前記所定範囲が２０μＦ以上であってかつ５０μＦ以下の範囲である請求項３又は４に記載の界磁巻線型回転電機。

【請求項６】

前記巻数比が０．７以上であってかつ５．２以下の値に定められている請求項３～５のいずれか１項に記載の界磁巻線型回転電機。

【請求項７】

ステータ巻線（３１Ｕ～３１Ｗ）を有するステータ（５０）と、

第１巻線部（７１ａ）及び第２巻線部（７１ｂ）の直列接続体を有する界磁巻線（７０）と、

ロータコア（６１）、及び周方向において所定間隔で設けられてかつ前記ロータコアから径方向に突出する主極部（６２）を有するロータ（６０）と、を備え、

前記第１巻線部及び前記第２巻線部のそれぞれが前記各主極部に巻回され、前記界磁巻線に界磁電流を誘起させるための高調波電流が前記ステータ巻線に流れる界磁巻線型回転電機（３０）において、

ダイオード（８０）と、

前記第１巻線部に並列接続されたコンデンサ（１００）と、を備え、

前記直列接続体の両端のうち、前記第１巻線部側に前記ダイオードの一端が接続され、前記第２巻線部側に前記ダイオードの他端が接続されており、

前記第２巻線部及び前記コンデンサを含む直列共振回路と、前記第１巻線部及び前記コンデンサを含む並列共振回路とが構成されており、

前記ステータ巻線に高調波電流を流す場合において、前記第１巻線部に流れる高調波電流により発生する磁束と前記第２巻線部に流れる高調波電流により発生する磁束との合成値である界磁合成磁束の振幅よりも、前記ステータ巻線に高調波電流が流れることにより発生する磁束と前記界磁合成磁束との合成値の振幅を小さくするように、前記コンデンサの静電容量（Ｃ）と、前記第１巻線部に対する前記第２巻線部の巻数比（Ｎ２／Ｎ１）とが定められている界磁巻線型回転電機。

【請求項８】

前記第２巻線部が、径方向において前記第１巻線部よりも前記ステータに近い側に配置されている請求項７に記載の界磁巻線型回転電機。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【０００１】

本発明は、界磁巻線型回転電機に関する。

【背景技術】

【０００２】

この種の回転電機としては、特許文献１に見られるように、ステータ巻線を有するステータと、第１，第２巻線部の直列接続体からなる界磁巻線と、ロータコア及び主極部を有するロータと、ダイオードとを備えるものが知られている。主極部は、周方向において所定間隔で設けられてかつロータコアから径方向に突出している。ロータにおいて、上記直列接続体の両端のうち、第１巻線部側にダイオードのカソードが接続され、第２巻線部側にダイオードのアノードが接続されている。第１，第２巻線部のそれぞれは、各主極部に巻回されている。ステータ巻線には、トルクを発生させることを主とする基本波電流と、界磁巻線を励磁することを主とする高調波電流とが流れる。

【０００３】

ここで、高調波電流が流れると、周方向において隣り合う主極部とロータコアとを含む磁気回路に主磁束が流れる。主磁束が流れることにより、直列接続された第１，第２巻線部それぞれに誘起電圧が発生し、第１，第２巻線部に高調波成分を含む電流が誘起される。この際、ダイオードにより、第１，第２巻線部に流れる電流が一方向に整流される。これにより、ダイオードにより整流された方向に界磁巻線に界磁電流が流れ、界磁巻線が励磁される。

【０００４】

一方、高調波電流が流れると、主磁束の他に、漏れ磁束が発生する。漏れ磁束は、周方向に隣り合う主極部の一方から他方へとロータコアを介さずに横切るように流れ、界磁巻線に鎖交する。この場合、各巻線部内において、互いに逆極性となる誘起電圧が発生し、誘起される電流が減少する。その結果、第１，第２巻線部それぞれに誘起される電流の合計値が減少し、ひいては界磁巻線に流れる界磁電流が減少する。

【０００５】

そこで、特許文献１に記載の回転電機は、第２巻線部に並列接続されたコンデンサを備えている。これにより、界磁電流を増加させている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【０００６】

【文献】特開２０１８－４２４０１号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【０００７】

ステータ巻線に流れる高調波電流に起因して第１，第２巻線部それぞれに高調波電流が流れ、これにより磁束が発生する。一方、ステータ巻線に高調波電流が流れることによっても磁束が発生する。この場合において、第１，第２巻線部それぞれに流れる高調波電流により発生する磁束と、ステータ巻線に高調波電流が流れることにより発生する磁束とが合成され、その合成磁束の振幅が増加する懸念がある。合成磁束の振幅が増加すると、回転電機のトルクの直流成分に対する変動量を規定するトルクリップル率が増加してしまう。

【０００８】

本発明は、トルクリップル率を低減することができる界磁巻線型回転電機を提供することを主たる目的とする。

【課題を解決するための手段】

【０００９】

第１の発明は、ステータ巻線を有するステータと、
第１巻線部及び第２巻線部の直列接続体を有する界磁巻線と、
ロータコア、及び周方向において所定間隔で設けられてかつ前記ロータコアから径方向に突出する主極部を有するロータと、を備え、
前記第１巻線部及び前記第２巻線部のそれぞれが前記各主極部に巻回され、前記界磁巻線に界磁電流を誘起させるための高調波電流が前記ステータ巻線に流れる界磁巻線型回転電機において、
ダイオードと、
前記第２巻線部に並列接続されたコンデンサと、を備え、
前記直列接続体の両端のうち、前記第１巻線部側に前記ダイオードの一端が接続され、前記第２巻線部側に前記ダイオードの他端が接続されており、
前記第１巻線部及び前記コンデンサを含む直列共振回路と、前記第２巻線部及び前記コンデンサを含む並列共振回路とが構成されており、
前記ステータ巻線に高調波電流を流す場合において、前記第１巻線部に流れる高調波電流により発生する磁束と前記第２巻線部に流れる高調波電流により発生する磁束との合成値である界磁合成磁束の振幅よりも、前記ステータ巻線に高調波電流が流れることにより発生する磁束と前記界磁合成磁束との合成値の振幅を小さくするように、前記コンデンサの静電容量と、前記第１巻線部に対する前記第２巻線部の巻数比とが定められている。

【００１０】

ステータ巻線に高調波電流が流れると、第１，第２巻線部それぞれに高調波電流が流れる。例えば、第１巻線部を含む直列共振回路に流れる高調波電流と、第２巻線部を含む並列共振回路に流れる高調波電流との位相差は、１２０°よりも大きくてかつ２４０°よりも小さい。

【００１１】

ここで、第１巻線部に対する第２巻線部の巻数比を変えると、第１巻線部に高調波電流が流れることにより発生する磁束の振幅と、第２巻線部に高調波電流が流れることにより発生する磁束の振幅とが変わる。その結果、第１巻線部に流れる高調波電流により発生する磁束と第２巻線部に流れる高調波電流により発生する磁束との合成値である界磁合成磁束の振幅が変わる。この振幅が変わることにより、界磁合成磁束の振幅よりも、ステータ巻線に高調波電流が流れることにより発生する磁束と界磁合成磁束との合成値の振幅が変わる。つまり、巻数比を変えることにより、界磁合成磁束の振幅よりも、ステータ巻線に高調波電流が流れることにより発生する磁束と界磁合成磁束との合成値の振幅を小さくできる。

【００１２】

この点に鑑み、第１の発明では、ステータ巻線に高調波電流を流す場合において、界磁合成磁束の振幅よりも、ステータ巻線に高調波電流が流れることにより発生する磁束と界磁合成磁束との合成値の振幅を小さくするように、コンデンサの静電容量と巻数比とが定められている。これにより、回転電機のトルクリップル率を低減することができる。

【００１３】

第２の発明は、第１の発明において、前記直列共振回路の共振周波数を所定周波数に維持し、かつ、前記第１巻線部及び前記第２巻線部それぞれの巻数の合計値を所定巻数に維持することを条件として前記静電容量を所定範囲で変化させた場合、前記巻数比の取り得る範囲が０．５以上であってかつ５．２以下の範囲であり、
前記静電容量が前記所定範囲内の値に定められ、かつ、前記巻数比が０．５以上であってかつ５．２以下の値に定められていることにより、前記直列共振回路の共振周波数が前記所定周波数とされている。

【００１４】

第１，第２巻線部それぞれの巻数の合計値を所定巻数に維持することを条件として、第１巻線部を含む直列共振回路の共振周波数を所定周波数に維持するためには、コンデンサの静電容量を大きくするほど、第１巻線部に対する第２巻線部の巻数比を大きくする必要

がある。巻数の合計値を所定巻数に維持し、かつ、直列共振回路の共振周波数を所定周波数に維持するとの条件である第１条件を課してコンデンサの静電容量を所定範囲で変化させた場合、巻数比の取り得る範囲が０．５以上であってかつ５．２以下の範囲になることを本発明者は実験等により確認した。また、本発明者は、第１条件を課して巻数比を０．５～５．２の範囲内の値とすることにより、回転電機のトルクを高い値に維持できることも確認した。

【００１５】

一方、第１，第２巻線部それぞれの巻数の合計値を上記所定巻数に維持することを条件として、第２巻線部を含む並列共振回路の共振周波数を上記所定周波数に維持するためには、コンデンサの静電容量を大きくするほど、第１巻線部に対する第２巻線部の巻数比を小さくする必要がある。

【００１６】

ここで、巻数の合計値を所定巻数に維持し、かつ、並列共振回路の共振周波数を所定周波数に維持するとの条件である第２条件を課して巻数比を０．５～５．２の範囲内の値とする場合、巻数比が０．５～５．２の範囲の中間値となる場合に回転電機のトルクが高い値となるものの、その中間値から巻数比が離れるにつれてトルクが大きく減少することを本発明者は実験等により確認した。また、本発明者は、巻数比が０．５～５．２の範囲内とされる場合において、第１条件を課したときのトルクよりも第２条件を課したときのトルクの方が小さくなる傾向にあることを確認した。このような傾向があるのは、第１巻線部の方が第２巻線部よりも径方向においてステータ側に近いため、ステータ巻線に高調波電流が流れることで発生する磁束の影響を第１巻線部の方が受けやすいためであると考えられる。

【００１７】

以上から、並列共振回路に関する第２条件ではなく、直列共振回路に関する第１条件を課して静電容量及び巻数比を定める方が、回転電機のトルクを高い水準に維持できる。この際、静電容量として設定できる範囲が上記所定範囲であり、巻数比として設定できる範囲が０．５～５．２のため、静電容量及び巻数比を設定する場合の自由度を高めることができる。

【００１８】

以上を踏まえ、第２の発明では、静電容量が上記所定範囲内の値に定められ、かつ、巻数比が０．５以上であってかつ５．２以下の値に定められていることにより、直列共振回路の共振周波数が上記所定周波数とされている。このため、回転電機のトルクを高い水準に維持するための静電容量及び巻数比の設定に際し、その設定の自由度を高めることができる。

【００１９】

ここで、例えば、前記巻数比が０．７以上であってかつ５．２以下の値に定められていてもよい。この場合、トルクを高い水準に維持しつつ、トルクリップル率をより好適に低減することができる。

【図面の簡単な説明】

【００２０】

【図１】第１実施形態に係る回転電機の制御システムの全体構成図。

【図２】ロータに備えられる電気回路を示す図。

【図３】ロータ及びステータの横断面図。

【図４】基本波電流及び高調波電流等の推移を示す図。

【図５】３相電流の推移を示す図。

【図６】基本波電流及び高調波電流等の推移を示す図。

【図７】３相電流の推移を示す図。

【図８】誘起電圧の発生パターンを示す図。

【図９】パターン２，３に対応する電気回路を示す図。

【図１０】直列共振回路を示す図。

【図１１】並列共振回路を示す図。
【図１２】界磁電流の整流回路を示す図。
【図１３】第１磁束、第２磁束及び界磁合成磁束の推移を示すタイムチャート。
【図１４】第１磁束、第２磁束、界磁合成磁束、ステータ側磁束及び全合成磁束の推移を示すタイムチャート。
【図１５】コンデンサの静電容量及び巻数比に対する界磁電流、トルク及びトルクリップル率の関係を示す図。
【図１６】静電容量に対する界磁電流、トルク及びトルクリップル率の関係を示す図。
【図１７】巻数比に対する界磁電流、トルク及びトルクリップル率の関係を示す図。
【図１８】第２実施形態に係るロータ及びステータの横断面図。
【図１９】図１８の一部を拡大して示す図。
【図２０】その他の実施形態に係るロータ及びステータの横断面図。
【図２１】ロータに備えられる電気回路を示す図。
【図２２】その他の実施形態に係るロータに備えられる電気回路を示す図。
【図２３】その他の実施形態に係るロータに備えられる電気回路を示す図。
【発明を実施するための形態】
【００２１】
以下、実施形態を図面に基づいて説明する。本実施形態における回転電機は、例えば車両に搭載される。なお、以下の各実施形態相互において、互いに同一又は均等である部分には、図中、同一符号を付しており、同一符号の部分についてはその説明を援用する。
【００２２】
＜第１実施形態＞
まず、図１～図３を用いて説明する。制御システムは、直流電源１０、インバータ２０、回転電機３０及び制御装置４０を備えている。本実施形態では、回転電機３０として、界磁巻線型の同期機が用いられている。また、本実施形態において、制御装置４０は、回転電機３０が、電動機兼発電機であるＩＳＧ（Integrated Starter Generator）やＭＧ（Motor Generator）として機能するように、回転電機３０を制御する。例えば、回転電機３０、インバータ２０及び制御装置４０を備えて機電一体型駆動装置が構成されたり、回転電機３０、インバータ２０及び制御装置４０それぞれが各コンポーネントで構成されたりしている。
【００２３】
回転電機３０は、界磁巻線７０を有するロータ６０を備えている。界磁巻線７０は、第１巻線部７１ａ及び第２巻線部７１ｂの直列接続体からなる。界磁巻線７０は、例えば圧縮成形にて構成されている。これにより、占積率が向上し、界磁巻線の組付性が向上する。なお、界磁巻線７０は、例えばアルミ線で構成されていればよい。アルミ線は、比重が小さく、ロータ６０が回転する場合における遠心力を低減できる。また、アルミ線は、銅線に比べて強度及び硬さが低く、圧縮成形する場合に好適である。
【００２４】
回転電機３０は、ステータ巻線３１を有するステータ５０を備えている。ステータ巻線３１は、例えば銅線で構成されており、電気角で互いに１２０°ずれた状態で配置されたＵ，Ｖ，Ｗ相巻線３１Ｕ，３１Ｖ，３１Ｗを含む。
【００２５】
インバータ２０は、Ｕ，Ｖ，Ｗ相上アームスイッチＳＵｐ，ＳＶｐ，ＳＷｐと、Ｕ，Ｖ，Ｗ相下アームスイッチＳＵｎ，ＳＶｎ，ＳＷｎとの直列接続体を備えている。Ｕ，Ｖ，Ｗ相上アームスイッチＳＵｐ，ＳＶｐ，ＳＷｐと、Ｕ，Ｖ，Ｗ相下アームスイッチＳＵｎ，ＳＶｎ，ＳＷｎとの接続点には、Ｕ，Ｖ，Ｗ相巻線３１Ｕ，３１Ｖ，３１Ｗの第１端が接続されている。Ｕ，Ｖ，Ｗ相巻線３１Ｕ，３１Ｖ，３１Ｗの第２端は、中性点で接続されている。すなわち、本実施形態において、Ｕ，Ｖ，Ｗ相巻線３１Ｕ，３１Ｖ，３１Ｗは、星形結線されている。なお、本実施形態において、各スイッチＳＵｐ～ＳＷｎは、ＩＧＢＴである。各スイッチＳＵｐ，ＳＶｐ，ＳＷｐ，ＳＵｎ，ＳＶｎ，ＳＷｎには、フリー

ホイールダイオードが逆並列に接続されている。

【００２６】

Ｕ，Ｖ，Ｗ相上アームスイッチＳＵｐ，ＳＶｐ，ＳＷｐのコレクタには、直流電源１０の正極端子が接続されている。Ｕ，Ｖ，Ｗ相下アームスイッチＳＵｎ，ＳＶｎ，ＳＷｎのエミッタには、直流電源１０の負極端子が接続されている。なお、直流電源１０には、平滑コンデンサ１１が並列接続されている。

【００２７】

制御システムは、角度検出部４１を備えている。角度検出部４１は、ロータ６０の回転角に応じた信号である角度信号を出力する。角度検出部４１の出力信号は、制御装置４０に入力される。

【００２８】

続いて、ステータ５０及びロータ６０について説明する。

【００２９】

ステータ５０及びロータ６０は、いずれも回転軸３２と共に同軸上に配置されている。以下の記載では、回転軸３２が延びる方向を軸方向とし、回転軸３２の中心から放射状に延びる方向を径方向とし、回転軸３２を中心として円周状に延びる方向を周方向としている。

【００３０】

ステータ５０は、軟磁性体からなる積層鋼板により構成されており、円環状のステータコア５１と、ステータコア５１から径方向内側に向かって突出する複数のティース５２とを有している。本実施形態において、各相巻線３１Ｕ，３１Ｖ，３１Ｗは、ティース５２に分布巻き又は集中巻きされている。本実施形態では、図３に示すように、ティースは周方向において等間隔に４８個設けられている。このため、回転電機３０は、４８スロットのものである。

【００３１】

ロータ６０は、軟磁性体からなる積層鋼板により構成されており、円筒形状のロータコア６１と、ロータコア６１から径方向外側に向かって突出する複数の主極部６２とを有している。各主極部６２の先端側の面は、ティース５２の端面に対向している。本実施形態において、主極部６２は、周方向において等間隔に８個設けられている。

【００３２】

各主極部６２において、径方向外側に第１巻線部７１ａが巻回され、第１巻線部７１ａよりも径方向内側に第２巻線部７１ｂが巻回されている。各主極部６２において、第１巻線部７１ａ及び第２巻線部７１ｂの巻方向は互いに同じになっている。また、周方向に隣り合う主極部６２のうち、一方に巻回された各巻線部７１ａ，７１ｂの巻方向と、他方に巻回された各巻線部７１ａ，７１ｂの巻方向とが逆になっている。このため、周方向に隣り合う主極部６２同士で互いに磁化方向が逆になる。

【００３３】

図２に、共通の主極部６２に巻回された各巻線部７１ａ，７１ｂを備えるロータ側の電気回路を示す。ロータ６０には、整流素子としてのダイオード８０と、コンデンサ９０とが設けられている。ダイオード８０のカソードには、第１巻線部７１ａの第１端が接続され、第１巻線部７１ａの第２端には、第２巻線部７１ｂの第１端が接続されている。第２巻線部７１ｂの第２端には、ダイオード８０のアノードが接続されている。第２巻線部７１ｂには、コンデンサ９０が並列接続されている。図２において、Ｌ１は第１巻線部７１ａのインダクタンスを示し、Ｌ２は第２巻線部７１ｂのインダクタンスを示し、Ｃはコンデンサ９０の静電容量を示す。

【００３４】

続いて、制御装置４０について説明する。なお、制御装置４０の各機能の一部又は全部は、例えば、１つ又は複数の集積回路等によりハードウェア的に構成されていてもよい。また、制御装置４０の各機能は、例えば、非遷移的実体的記録媒体に記録されたソフトウェア及びそれを実行するコンピュータによって構成されていてもよい。

【００３５】
制御装置４０は、角度検出部４１の角度信号を取得し、取得した角度信号に基づいて、インバータ２０を構成する各スイッチＳＵｐ～ＳＷｎをオンオフする駆動信号を生成する。詳しくは、制御装置４０は、回転電機３０を電動機として駆動させる場合、直流電源１０から出力された直流電力を交流電力に変換してＵ，Ｖ，Ｗ相巻線３１Ｕ，３１Ｖ，３１Ｗに供給すべく、各アームスイッチＳＵｐ～ＳＷｎをオンオフする駆動信号を生成し、生成した駆動信号を各アームスイッチＳＵｐ～ＳＷｎのゲートに供給する。一方、制御装置４０は、回転電機３０を発電機として駆動させる場合、Ｕ，Ｖ，Ｗ相巻線３１Ｕ，３１Ｖ，３１Ｗから出力された交流電力を直流電力に変換して直流電源１０に供給すべく、各アームスイッチＳＵｐ～ＳＷｎをオンオフする駆動信号を生成する。

【００３６】
制御装置４０は、各相巻線３１Ｕ，３１Ｖ，３１Ｗに基本波電流及び高調波電流の合成電流を流すように各スイッチＳＵｐ～ＳＷｎをオンオフする。基本波電流は、図４（ａ）に示すように、回転電機３０にトルクを発生させることを主とする電流である。高調波電流は、図４（ｂ）に示すように、界磁巻線７０を励磁することを主とする電流である。図４（ｃ）は、基本波電流と高調波電流との合成電流としての相電流を示す。図４に示す縦軸の値は、図４（ａ）～図４（ｃ）それぞれに示す波形の大きさの相対関係を示す。各相巻線３１Ｕ，３１Ｖ，３１Ｗに流れる相電流ＩＵ，ＩＶ，ＩＷは、図５に示すように、電気角で１２０°ずつずれている。なお、高調波は当然三角波でもよい。

【００３７】
本実施形態では、図４（ａ），（ｂ）に示すように、高調波電流の包絡線が、基本波電流の１／２の周期を有している。包絡線を、図４（ｂ）に一点鎖線にて示す。そして、包絡線がそのピーク値となるタイミングが、基本波電流がそのピーク値となるタイミングからずれている。具体的には、包絡線がそのピーク値となるタイミングが、基本波電流がその変動中心（０）となるタイミングとされている。制御装置４０は、基本波電流及び高調波電流それぞれの振幅及び周期を独立に制御する。

【００３８】
図４（ｂ）に示す高調波電流を流すことにより、各相巻線３１Ｕ，３１Ｖ，３１Ｗに流れる相電流の最大値を低減でき、インバータ２０の容量を増やさずに回転電機３０のトルクを指令されたトルクにすることができる。

【００３９】
ちなみに、高調波電流としては、図６（ｂ）に示すものであってもよい。図６（ａ），（ｃ）は、先の図４（ａ），（ｃ）に対応している。図６（ａ），（ｂ）に示すように、高調波電流の包絡線がそのピーク値となるタイミングが、基本波電流がそのピーク値となるタイミングとされている。図６（ｂ）に示す高調波電流は、図４（ｂ）に示す高調波電流の位相を、基本波電流の周期の１／４だけずらしたものである。この場合に各相巻線３１Ｕ，３１Ｖ，３１Ｗに流れる相電流ＩＵ，ＩＶ，ＩＷの推移を図７に示す。なお、高調波がこの２つの位相の間を取ることも当然可能である。

【００４０】
本実施形態では、第１巻線部７１ａ、コンデンサ９０及びダイオード８０からなる直列共振回路が構成され、第２巻線部７１ｂ及びコンデンサ９０からなる並列共振回路が構成されている。直列共振回路の共振周波数である第１共振周波数をｆ１とし、並列共振回路の共振周波数である第２共振周波数をｆ２とする。各共振周波数ｆ１，ｆ２は、下式（ｅｑ１），（ｅｑ２）で表される。

【００４１】
【数１】

$$f1=\frac{1}{2\pi\sqrt{L1\cdot C}} \quad \ldots \quad (eq1)$$

【００４２】
【数２】

$$f2=\frac{1}{2\pi\sqrt{L2\cdot C}} \quad \cdots \quad (eq2)$$

各相巻線３１Ｕ，３１Ｖ，３１Ｗに高調波電流が流れると、周方向において隣り合う主極部６２、ロータコア６１、ティース５２及びステータコア５１を含む磁気回路に主磁束の高調波による変動が発生する。主磁束の変動が起きることにより、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂそれぞれに誘起電圧が発生し、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂに電流が誘起される。この際、図８のパターン１，４に示すように、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂそれぞれに極性の同じ誘起電圧が発生する場合、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂそれぞれの誘起電流が相殺されないため、誘起電流が増加する。ダイオード８０により、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂに流れる電流が一方向に整流される。これにより、ダイオード８０により整流された方向に界磁巻線７０に界磁電流が流れ、界磁巻線が励磁される。なお、図８において、ｅ１は第１巻線部７１ａに発生する誘起電圧を示し、ｅ２は第２巻線部７１ｂに発生する誘起電圧を示す。

【００４３】
一方、高調波電流が流れると、主磁束の変動の他に、漏れ磁束が発生し易くなる。漏れ磁束は、周方向に隣り合う主極部６２の一方から他方へとロータコア６１を介さずに横切るように流れ、界磁巻線７０に鎖交する。この際、各巻線部７１ａ，７１ｂに鎖交する漏れ磁束も発生する。漏れ磁束が界磁巻線７０に鎖交すると、第１巻線部７１ａ内において、ある方向の誘起電圧が発生し、また、第２巻線部７１ｂ内においては異なる方向の誘起電圧が発生する場合がある。その結果、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂそれぞれに誘起される電流の合計値が減少し、ひいては界磁巻線７０に流れる界磁電流が減少する。

【００４４】
そこで、本実施形態では、第２巻線部７１ｂにコンデンサ９０が並列接続されている。このため、図８のパターン２，３に示すように、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂそれぞれに発生する誘起電圧が逆極性となる場合であっても、コンデンサ９０を介して誘起電流が流れるため、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂに流れる誘起電流は、互いに相殺されることがない。このため、図９（ａ）に示すように、第１巻線部７１ａで誘起された電流と、第２巻線部７１ｂで誘起された電流とがコンデンサ９０を介してダイオード８０のアノード側へと流れたり、図９（ｂ）に示すように、コンデンサ９０から第２巻線部７１ｂを介してダイオード８０のアノード側へと電流が流れたりする。その結果、界磁巻線７０に流れる界磁電流を増加させることができる。

【００４５】
ここで、本発明者は、パターン２，３の場合についてさらに考察した。以下、これについて説明する。

【００４６】
図２に示した回路は、基本的には、図１０～図１２に示す３つの回路からなる。図１０は、第１巻線部７１ａ、コンデンサ９０及びダイオード８０からなる直列共振回路を示し、図１１は、第２巻線部７１ｂ及びコンデンサ９０からなる並列共振回路を示す。図１２は、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂ及びダイオード８０からなる界磁電流の整流回路を示す。

【００４７】
図１０に示す直列共振回路では、第１共振周波数ｆ１でインピーダンスが最小となり、交流電流が最大となる。また、この直列共振回路には、ダイオード８０があるため半波電流が流れる。図１１に示す並列共振回路では、第２共振周波数ｆ２でインピーダンスが最小となり、交流電流が最大となる。

【００４８】

直列共振回路において、第１共振周波数ｆ１で変動する電流がコンデンサ９０に供給される。コンデンサ９０に供給された電流は、ダイオード８０により半波電流となる。ここで、直列共振回路においてダイオード８０により阻止された電流は、並列共振回路の第２巻線部７１ｂを介してダイオード８０のカソード側へと戻される。

【００４９】

ここで、本発明者は、コンデンサ９０の静電容量Ｃと、第１巻線部７１ａの巻数Ｎ１に対する第２巻線部７１ｂの巻数Ｎ２の比率（以下、巻数比Ｎ２／Ｎ１）とを適正に定めることにより、回転電機３０のトルクリップル率を低減することができるとの知見を得た。本実施形態において、トルクリップル率とは、回転電機３０のトルクの直流成分Ｔｄｃに対するトルクの変動量１／２「ΔＴｒ」の比率（ΔＴｒ／Ｔｄｃ）のことをいう。以下、上記知見について説明する。

【００５０】

ステータ巻線に高調波電流が流れると、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂそれぞれに、ステータ巻線に流れる高調波電流と同等の周波数で変動する高調波電流が流れる。例えば、第１巻線部７１ａを含む直列共振回路に流れる高調波電流と、第２巻線部７１ｂを含む並列共振回路に流れる高調波電流との位相差は、１２０°よりも大きくてかつ２４０°よりも小さい。

【００５１】

ここで、巻数比Ｎ２／Ｎ１を変えると、第１巻線部７１ａに高調波電流が流れることにより発生する磁束（以下、第１磁束φ１）の振幅と、第２巻線部７１ｂに高調波電流が流れることにより発生する磁束（以下、第２磁束φ２）の振幅とが変わる。その結果、第１巻線部７１ａに流れる高調波電流により発生する磁束と第２巻線部７１ｂに流れる高調波電流により発生する磁束との合成値である界磁合成磁束φｒｔの振幅が変わる。この振幅が変わることを図１３を用いて説明する。図１３は、第１磁束φ１、第２磁束φ２及び界磁合成磁束φｒｔの推移を示す図である。図１３には、第１磁束φ１と第２磁束φ２との位相差が１８０°の例を示す。また、図１３に示す縦軸の値は、各波形の大きさの相対関係を示すためのものである。

【００５２】

図１３（ａ）は、第１磁束φ１の振幅と第２磁束φ２の振幅との比率が１：１の場合を示す。この比率は、巻数比Ｎ２／Ｎ１を変えることにより変えることができる。第１磁束φ１の振幅と第２磁束φ２の振幅とが等しいため、界磁合成磁束φｒｔは直流成分のみとなる。

【００５３】

図１３（ｂ）は、第１磁束φ１の振幅と第２磁束φ２の振幅との比率が１．４：１の場合を示す。第１磁束φ１の振幅の方が第２磁束φ２の振幅よりも大きいため、界磁合成磁束φｒｔは、第１磁束φ１と同じ位相で変動する。

【００５４】

図１３（ｃ）は、第１磁束φ１の振幅と第２磁束φ２の振幅との比率が１：１．４の場合を示す。第２磁束φ２の振幅の方が第１磁束φ１の振幅よりも大きいため、界磁合成磁束φｒｔは、第２磁束φ２と同じ位相で変動する。

【００５５】

界磁合成磁束φｒｔの振幅が変わることにより、界磁合成磁束φｒｔの振幅よりも、ステータ巻線に高調波電流が流れることにより発生する磁束（以下、ステータ側磁束φｓ）と界磁合成磁束φｒｔとの合成値（以下、全合成磁束φｔｏｔａｌ）の振幅が変わる。つまり、巻数比Ｎ２／Ｎ１を変えることにより、界磁合成磁束φｒｔの振幅よりも、全合成磁束φｔｏｔａｌの振幅を小さくできる。界磁合成磁束φｒｔとステータ側磁束φｓとの位相差は、例えば、１２０°よりも大きくてかつ２４０°よりも小さい。図１４を用いて、全合成磁束φｔｏｔａｌの振幅を小さくできることを説明する。図１４は、第１磁束φ１、第２磁束φ２、界磁合成磁束φｒｔ、ステータ側磁束φｓ及び全合成磁束φｔｏｔａｌの推移を示す図である。図１４には、第１磁束φ１と第２磁束φ２との位相差が１８０

°の例を示す。また、図１４に示す縦軸の値は、各波形の大きさの相対関係を示すためのものである。

【００５６】

図１４（ａ）は、第１磁束φ１、第２磁束φ２及びステータ側磁束φｓそれぞれの振幅の比率が１：０．９：１．１であり、界磁合成磁束φｒｔとステータ側磁束φｓとの位相差が１８０°の場合を示す。図１４（ａ）に示すように、界磁合成磁束φｒｔの平滑化を狙ったとしても、ステータ側磁束φｓの影響があるため、全合成磁束φｔｏｔａｌの振幅を低減できるとは限らない。

【００５７】

図１４（ｂ）は、第１磁束φ１、第２磁束φ２及びステータ側磁束φｓそれぞれの振幅の比率が１．５：０．７：１．１であり、界磁合成磁束φｒｔとステータ側磁束φｓとの位相差が１８０°の場合を示す。図１４（ｂ）に示す例では、図１４（ａ）に示す場合よりも全合成磁束φｔｏｔａｌの振幅の低減効果が大きく、全合成磁束φｔｏｔａｌの振幅が、界磁合成磁束φｒｔの振幅よりも小さくなっている。

【００５８】

図１４（ｃ）は、第１磁束φ１、第２磁束φ２及びステータ側磁束φｓそれぞれの振幅の比率が０．７：１．５：１．１であり、界磁合成磁束φｒｔとステータ側磁束φｓとの位相差が０°の場合を示す。図１４（ｃ）に示す例では、界磁合成磁束φｒｔとステータ側磁束φｓとの位相差が０°のため、全合成磁束φｔｏｔａｌの振幅が、界磁合成磁束φｒｔの振幅よりも大きくなってしまう。

【００５９】

以上を踏まえ、本実施形態では、ステータ巻線に高調波電流を流す場合において、界磁合成磁束φｒｔの振幅よりも全合成磁束φｔｏｔａｌの振幅を小さくするように、コンデンサ９０の静電容量Ｃと巻数比Ｎ２／Ｎ１とが定められている。これにより、回転電機３０のトルクリップル率を低減することができる。通常のＰＷＭ制御でも基本波に高調波が乗っていることは周知であり、この界磁のリップルとステータの高調波をうまく相殺できれば、むしろ通常のモータよりも低リップルが可能である。

【００６０】

また、本発明者は、トルクを高い水準にするためには、並列共振回路よりも直列共振回路の共振性に着目した方がよく、ステータ巻線に流す高調波電流の周波数ｆｓを直列共振回路の第１共振周波数ｆ１と同じ値又は近い値に設定した方がよいとの知見を得た。以下、この知見について説明する。

【００６１】

第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂそれぞれの巻数の合計値「Ｎ１＋Ｎ２」を所定巻数Ｎｃｓｔに維持することを条件として、直列共振回路の第１共振周波数ｆ１を所定周波数ｆｃｓｔに維持するためには、コンデンサ９０の静電容量Ｃを大きくするほど、巻数比Ｎ２／Ｎ１を大きくする必要がある。なお、所定周波数ｆｃｓｔは、例えば、インバータ２０で実現可能な周波数に設定される。

【００６２】

巻数の合計値「Ｎ１＋Ｎ２」を所定巻数Ｎｃｓｔに維持し、かつ、第１共振周波数ｆ１を所定周波数ｆｃｓｔに維持するとの条件を課してコンデンサ９０の静電容量Ｃを１５μＦ以上であってかつ５５μＦ以下の範囲で変化させた場合、図１５に示すように、巻数比Ｎ２／Ｎ１の取り得る範囲が０．５以上であってかつ１０．２以下の範囲になる。図１５には、この条件を課した場合における静電容量Ｃ、巻数比Ｎ２／Ｎ１、界磁電流Ｉｆ、トルク及びトルクリップル率をＡラインの場合として示している。

【００６３】

また、本発明者は、Ａラインの条件を課して巻数比Ｎ２／Ｎ１を０．５～５．２の範囲内の値とすることにより、回転電機３０のトルクを高い値に維持できることも確認した。図１６（ａ）に、横軸をコンデンサ９０の静電容量Ｃとし、縦軸をトルク及び界磁電流とするデータを示す。また、図１７（ａ）に、横軸を巻数比Ｎ２／Ｎ１とし、縦軸をトルク

及び界磁電流とするデータを示す。

【００６４】

図１５～図１７のデータから、静電容量Ｃが２０μＦ以上であってかつ５０μＦ以下の範囲内の値に定められ、かつ、巻数比Ｎ２／Ｎ１が０．５以上であってかつ５．２以下の値に定められていることにより、直列共振回路の第１共振周波数ｆ１が所定周波数ｆｃｓｔとされている場合、トルクを高い水準に維持することができる。

【００６５】

一方、巻数の合計値「Ｎ１＋Ｎ２」を所定巻数Ｎｃｓｔに維持することを条件として、並列共振回路の第２共振周波数ｆ２を所定周波数ｆｃｓｔに維持するためには、コンデンサ９０の静電容量Ｃを大きくするほど、巻数比Ｎ２／Ｎ１を小さくする必要がある。

【００６６】

ここで、巻数の合計値「Ｎ１＋Ｎ２」を所定巻数Ｎｃｓｔに維持し、かつ、第２共振周波数ｆ２を所定周波数ｆｃｓｔに維持するとの条件を課して巻数比Ｎ２／Ｎ１を０．７～５．２の範囲内の値とする場合、図１５、図１６（ａ）及び図１７（ａ）に示すように、巻数比Ｎ２／Ｎ１が１．７の場合に回転電機３０のトルクが最大値をとるものの、巻数比Ｎ２／Ｎ１が１．７から離れるにつれてトルクが大きく減少する。図１５には、この条件を課した場合における静電容量Ｃ、巻数比Ｎ２／Ｎ１、界磁電流Ｉｆ及びトルクをＢラインとして示している。

【００６７】

巻数比が０．５～５．２の範囲内とされる場合において、第１共振周波数ｆ１を所定周波数ｆｃｓｔに維持するとの条件を課したＡラインのトルクよりも、第２共振周波数ｆ２を所定周波数ｆｃｓｔに維持するとの条件を課したＢラインのトルクの方が小さくなる傾向にある。このような傾向があるのは、第１巻線部７１ａの方が第２巻線部７１ｂよりも径方向においてステータ５０側に近いため、ステータ巻線に高調波電流が流れることで発生する磁束の影響を第１巻線部７１ａの方が受けやすいためであると考えられる。

【００６８】

以上から、並列共振回路に関するＢラインの条件ではなく、直列共振回路に関するＡラインの条件を課して静電容量Ｃ及び巻数比Ｎ２／Ｎ１を定める方が、回転電機３０のトルクを高い水準に維持できる。この際、静電容量Ｃとして設定できる範囲が２０μＦ以上であってかつ５０μＦ以下の範囲であり、巻数比Ｎ２／Ｎ１として設定できる範囲が０．５～５．２のため、静電容量Ｃ及び巻数比Ｎ２／Ｎ１を設定する場合の自由度を高めることができる。

【００６９】

図１６（ｂ）に、横軸をコンデンサ９０の静電容量Ｃとし、縦軸をトルクリップル率とするデータを示し、図１７（ｂ）に、横軸を巻数比Ｎ２／Ｎ１とし、縦軸をトルクリップル率とするデータを示す。これらデータから、静電容量Ｃが２０μＦ以上であってかつ５０μＦ以下の値に定められ、巻数比Ｎ２／Ｎ１が０．７以上であってかつ５．２以下の値に定められる場合、高トルクを維持しつつ、トルクリップル率の低減効果を高めることができる。

【００７０】

本実施形態では、ステータ巻線に流す高調波電流の周波数ｆｓが下式（ｅｑ３）を満たす値に設定されている。この設定となるように、制御装置４０は、インバータ２０を制御する。以下、この設定について説明する。

【００７１】

【数３】

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{(2\times N2)^2\cdot C}} \le fs \le \frac{1}{2\pi\sqrt{(0.2\times N2)^2\cdot C}} \quad \ldots \quad (eq3)$$

「０．５≦Ｎ２／Ｎ１≦５．２」を変形すると、「０．１９≦Ｎ１／Ｎ２≦２」となる

。ここでは、簡単化するために「０．２≦Ｎ１／Ｎ２≦２」とする。「０．２≦Ｎ１／Ｎ２≦２」から「０．２×Ｎ２≦Ｎ１≦２×Ｎ２」が導かれる。ここで、巻線部のインダクタンスが巻線部の巻数の２乗に比例すること、及び上式（ｅｑ１）から、上式（ｅｑ３）が導かれる。なお、下式（ｅｑ４）を定義する場合、上式（ｅｑ３）は下式（ｅｑ５）で表される。

【００７２】

【数４】

$$fH = \frac{1}{2\pi\sqrt{N2^2 \cdot C}} \quad \ldots \quad (eq4)$$

【００７３】

【数５】

$$0.5fH \leq fs \leq 5fH \quad \ldots \quad (eq5)$$

例えば、上式（ｅｑ３）を満たすことを条件として、「ｆｓ＝ｆ１」に設定することができる。

【００７４】

以上説明したように、本実施形態では、コンデンサ９０の静電容量Ｃが２０μＦ以上であってかつ５０μＦ以下の範囲内の値に定められ、かつ、巻数比Ｎ２／Ｎ１が０．５以上であってかつ５．２以下の値に定められていることにより、直列共振回路の第１共振周波数ｆ１が所定周波数ｆｃｓｔとされている。また、第１共振周波数ｆ１が定まることにより、並列共振回路の第２共振周波数ｆ２が定まる。これにより、回転電機３０のトルクを高い水準に維持しつつ、トルクリップル率を低減することができる。

【００７５】

＜第１実施形態の変形例＞

界磁巻線の第１，第２巻線部のそれぞれが、平角線にて構成されていてもよい。平角線が用いられることにより、界磁巻線の占積率を高めることができ、損失を低減できる。また、平角線によれば、巻線部に遠心力が作用した場合に、巻線間にかかる荷重を面で受けることができるため、巻線の被膜の損傷を防止できる。また、平角線によれば、アンペアターン（ＡＴ）を大きくすることができ、界磁巻線の励磁範囲を拡大できる。その結果、トルク制御性が向上する。

【００７６】

なお、第１，第２巻線部のそれぞれが、平角線を使用したα巻にて構成されていてもよい。平角線を使用したα巻の巻線部としては、例えば、特開２００８－１７８２１１号公報の図５（Ａ）に示すものを用いることができる。

【００７７】

＜第２実施形態＞

図１８に示すように、ロータ６０において、第１巻線部７１ａと第２巻線部７１ｂとの間に、軟磁性体からなる仕切部１００が設けられていてもよい。仕切部１００は、例えば、環状をなしており、仕切部１００の中心孔が主極部６２に挿し込まれた状態とされている。仕切部１００は、軸方向から見た場合において、周方向に延びる扁平形状をなしている。仕切部１００が第１巻線部７１ａと第２巻線部７１ｂとの間に介在することにより、径方向において第１巻線部７１ａと第２巻線部７１ｂとが仕切部１００により遮断されている。仕切部１００の径方向厚さは、第１巻線部７１ａ及び第２巻線部７１ｂそれぞれの径方向厚さよりも小さい。

【００７８】

仕切部１００は、図１９に示すように、軟磁性体が径方向に積層されることにより構成されていればよい。これにより、渦電流損失の低減を図ることができる。また、積層方向

を径方向とすることにより、仕切部１００の周方向長さを確保しつつ、径方向厚さを鋼板板厚寸法に合わせて薄く設定できる。

【００７９】

仕切部１００が設けられることにより、漏れ磁束の大部分は、界磁巻線７０ではなく、仕切部１００を流れるようになる。その結果、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂそれぞれにおいて、さらにその内部の部分コイルで互いに逆極性となる誘起電圧が発生しにくくなり、誘起される電流が増加する。これにより、図８に示すパターン１～４それぞれにおいて第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂそれぞれに誘起される電流を増加させることができる。

【００８０】

＜その他の実施形態＞

なお、上記各実施形態は、以下のように変更して実施してもよい。

【００８１】

・界磁巻線７０は、図２０に示すように、第１巻線部７１ａ、第２巻線部７１ｂ及び第３巻線部７１ｃの直列接続体からなるものであってもよい。各主極部６２において、径方向において最も外側に第１巻線部７１ａが巻回され、第１巻線部７１ａよりも径方向内側に第２巻線部７１ｂが巻回され、第２巻線部７１ｂよりも径方向内側に第３巻線部７１ｃが巻回されている。各主極部６２において、各巻線部７１ａ，７１ｂ，７１ｃの巻方向は互いに同じになっている。また、周方向に隣り合う主極部６２のうち、一方に巻回された各巻線部７１ａ，７１ｂ，７１ｃの巻方向と、他方に巻回された各巻線部７１ａ，７１ｂ，７１ｃの巻方向とが逆になっている。

【００８２】

図２１に、共通の主極部６２に巻回された各巻線部７１ａ，７１ｂ，７１ｃを備えるロータ側の電気回路を示す。なお、本実施形態では、コンデンサ９０を第１コンデンサ９０と称すこととする。

【００８３】

ロータ６０には、第１コンデンサ９０と、第２コンデンサ９１とが設けられている。第２巻線部７１ｂの第２端には、第３巻線部７１ｃの第１端が接続されている。第３巻線部７１ｃの第２端には、ダイオード８０のアノードが接続されている。第３巻線部７１ｃには、第２コンデンサ９１が並列接続されている。図２１において、Ｌ３は第３巻線部７１ｃのインダクタンスを示し、Ｃ１，Ｃ２は第１，第２コンデンサ９０，９１の静電容量を示す。

【００８４】

本実施形態において、第１巻線部７１ａ、第１コンデンサ９０及びダイオード８０からなる直列共振回路を第１直列共振回路と称し、第２巻線部７１ｂ及び第１コンデンサ９０からなる並列共振回路を第１並列共振回路と称すこととする。本実施形態では、さらに、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂ、第２コンデンサ９１及びダイオード８０からなる第２直列共振回路と、第３巻線部７１ｃ及び第２コンデンサ９１からなる第２並列共振回路とが構成されている。第２直列共振回路の共振周波数である第３共振周波数をｆ３とし、第２並列共振回路の共振周波数である第４共振周波数をｆ４とすると、各共振周波数ｆ３，ｆ４は、下式（ｅｑ６），（ｅｑ７）で表される。

【００８５】

【数６】

$$f3=\frac{1}{2\pi\sqrt{(L1+L2)\cdot C2}} \quad \ldots \quad (eq6)$$

【００８６】

【数７】

$$f4=\frac{1}{2\pi\sqrt{L3\cdot C2}} \quad \cdots \quad (eq7)$$

第２直列共振回路及び第２並列共振回路は、第１直列共振回路及び第１並列共振回路と同様に機能する。この構成によれば、例えば、各相巻線３１Ｕ，３１Ｖ，３１Ｗに流す高調波電流の周波数が設定した周波数からずれた場合であっても、ずれた周波数が第３，第４共振回路の共振周波数ｆ３，ｆ４となるとき、その周波数において界磁電流の増大効果を得ることができる。

【００８７】

ここで、高調波電流の周波数が設定した周波数からずれる現象は、例えば、回転電機３０の電気角周波数が高い領域で生じ得る。これは、電気角周波数が高いほど、基本波電流の１周期に重畳できる高調波電流の数Ｍ（Ｍは自然数）が少なくなり、重畳する高調波電流の数がＭからＭ－１になる場合の周波数変動が大きいためである。例えば、Ｍが４と３の間で変わる場合、３０％前後の周波数の変動があり、この前後における高調波電流の周波数ｆｈは、少なくとも３０％程度の変動がある。Ｍ＝３は、３相電流のうち１相あたりの基本波電流の１周期に３周期分の高調波電流が含まれることを示し、界磁巻線の励磁周波数としては最小単位であると考えられる。

【００８８】

・界磁巻線が４つ以上の巻線部の直列接続体からなっていてもよい。この場合、図２２に示すように、巻線部の数をｎ＋１個とすると、コンデンサの数がｎ個となる。

【００８９】

・図２３に示すように、コンデンサ１００が第１巻線部７１ａに並列接続されていてもよい。この場合、第２巻線部７１ｂ、コンデンサ１００及びダイオード８０からなる直列共振回路と、第１巻線部７１ａ及びコンデンサ１００からなる並列共振回路とが構成される。ここでは、第２巻線部７１ｂが、径方向において第１巻線部７１ａよりもステータ５０に近い側に配置されていればよい。

【００９０】

図２３に示す構成において、ステータ巻線に高調波電流を流す場合に、第１巻線部７１ａに流れる高調波電流により発生する磁束と第２巻線部７１ｂに流れる高調波電流により発生する磁束との合成値である界磁合成磁束の振幅よりも、ステータ巻線に高調波電流が流れることにより発生する磁束と界磁合成磁束との合成値の振幅を小さくするように、コンデンサ１００の静電容量と、第１巻線部７１ａに対する第２巻線部７１ｂの巻数比Ｎ２／Ｎ１とが定められればよい。

【００９１】

・回転電機としては、インナロータ型のものに限らず、アウタロータ型のものであってもよい。この場合、主極部は、ロータコアから径方向内側に突出している。

【００９２】

・ロータの界磁巻線としては、アルミ線に限らず、例えば、銅線又はＣＮＴ（カーボンナノチューブ）等であってもよい。また、界磁巻線は、圧縮成形で無くてもよい。

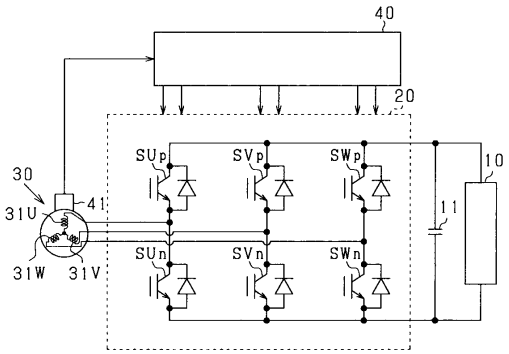
【符号の説明】

【００９３】

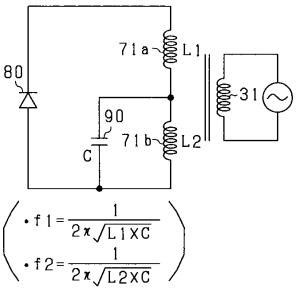
３０…回転電機、５０…ステータ、６０…ロータ、７０…界磁巻線、７１ａ，７１ｂ…第１，第２巻線部、８０…ダイオード、９０…コンデンサ。

【図面】

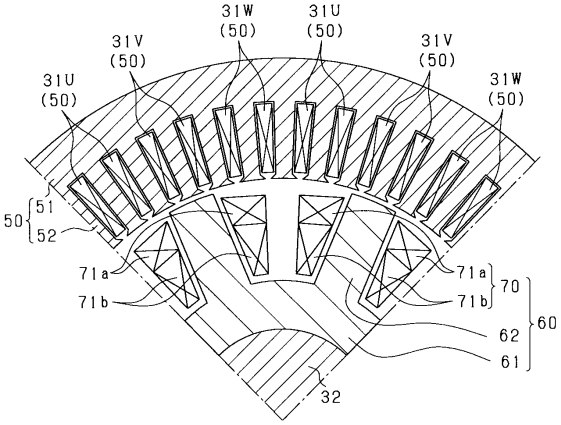
【図１】


40
20
30
31U
41
31W
31V
SUp
SVp
SWp
SUn
SVn
SWn
10
11

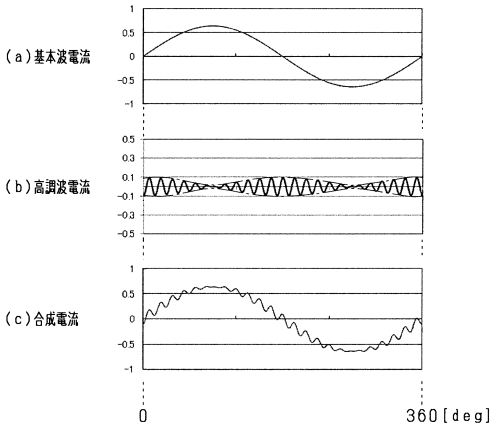
【図２】


71a
L1
80
31
90
C
71b
L2
・f1 = 1 / 2π√(L1XC)
・f2 = 1 / 2π√(L2XC)

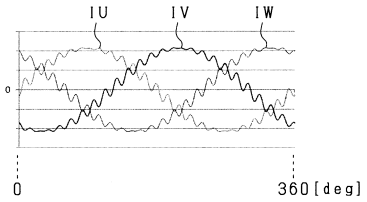
【図３】


31W (50)
31U (50)
31V (50)
31V (50)
31U (50)
31W (50)
50
51
52
71a
71b
70
60
62
61
32

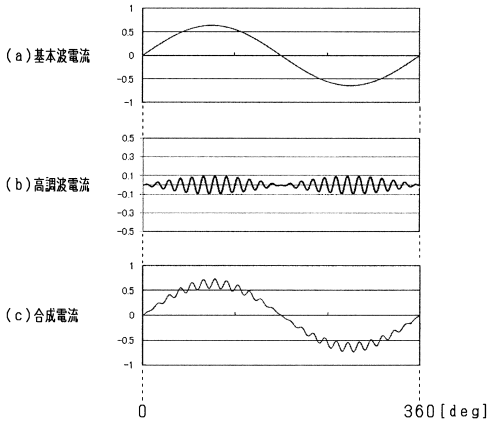
【図４】


(a)基本波電流
(b)高調波電流
(c)合成電流
0
360[deg]

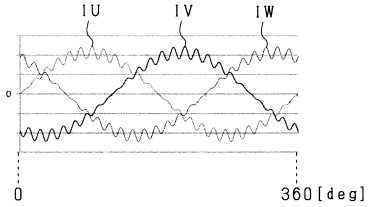
【図５】



【図６】



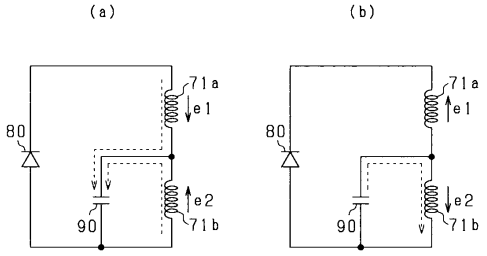
【図７】



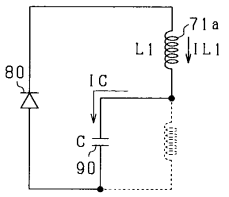
【図８】

パターン		1	2	3	4
発生電圧方向	e1 71a	↑	↓	↑	↓
	e2 71b	↑	↑	↓	↓

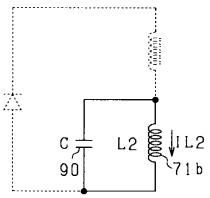
【図９】



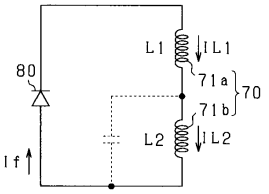
【図１０】



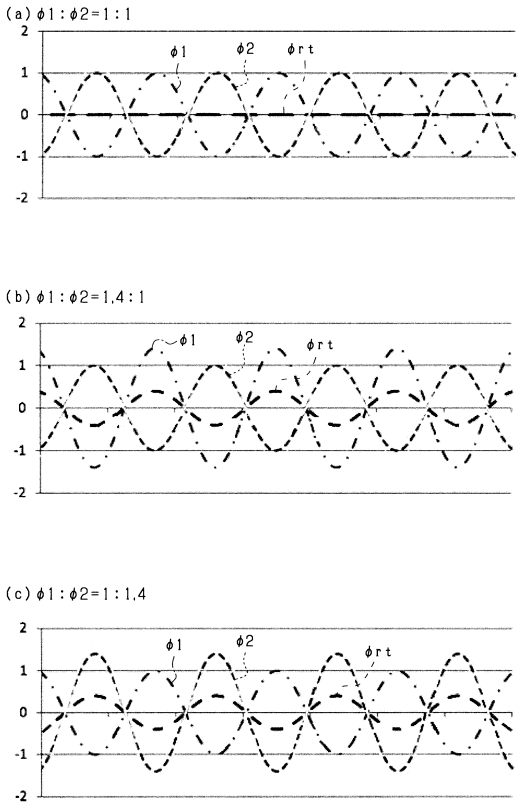
【図１１】



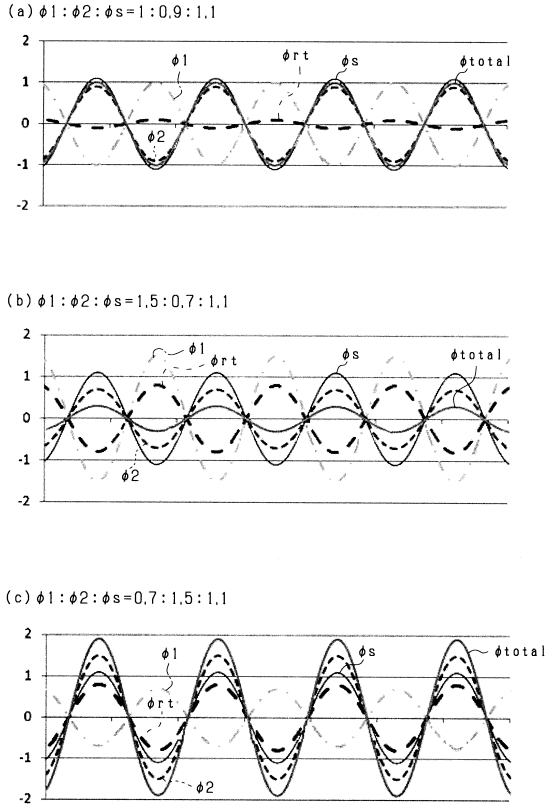
【図１２】



【図１３】



【図１４】

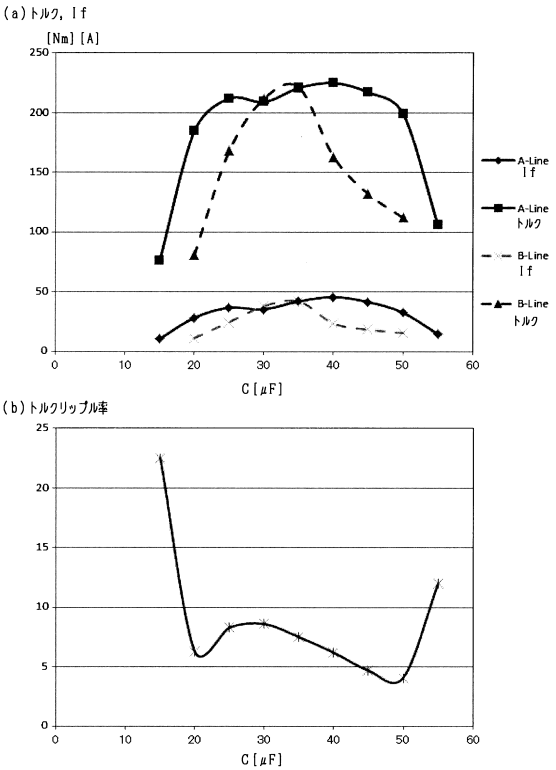


【図１５】

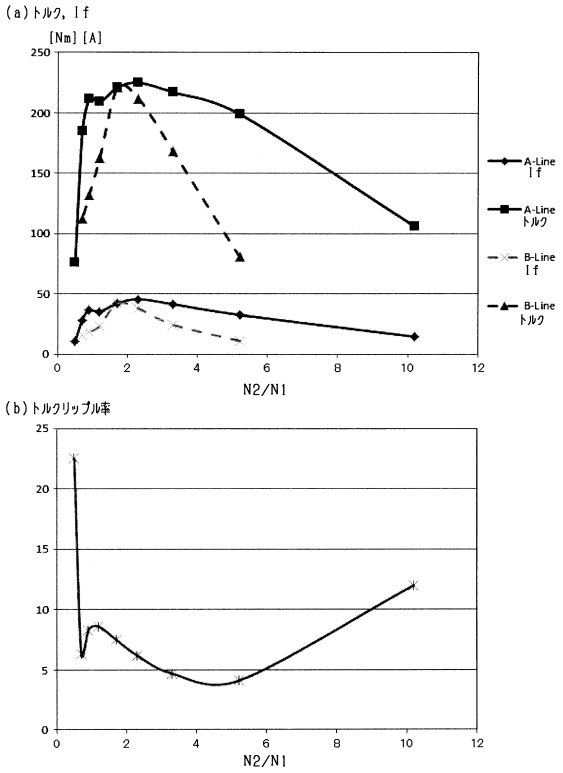
Capacitance		A-Line				B-Line		
[μF]	[-]	N2/N1	If[A]	Torque[Nm]	Torque ripple ratio[-]	N2/N1	If[A]	Torque[Nm]
15	0.6	0.5	10.4	76.1	22.5			
20	0.8	0.7	28.1	185	6.3	5.2	11	80.5
25	1	0.9	36.6	212	8.3	3.3	24.4	168
30	1.2	1.2	35.3	209	8.6	2.3	38	212
35	1.4	1.7	42	221	7.5	1.7	42	221
40	1.6	2.3	45.6	225	6.2	1.2	23.4	163
45	1.8	3.3	41.5	217	4.7	0.9	18.2	132
50	2.0	5.2	32.6	199	4.1	0.7	15.4	112
55	2.2	10.2	14.5	106	12			

N1+N2=Ncst

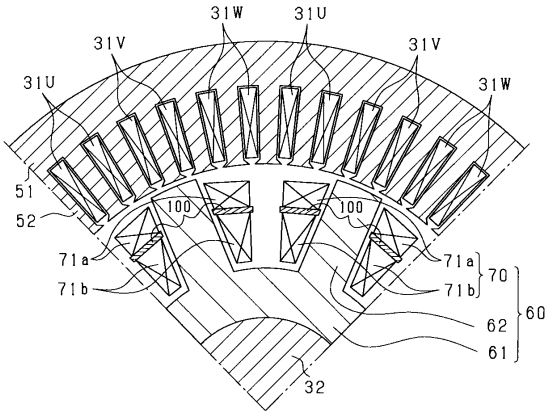
【図１６】



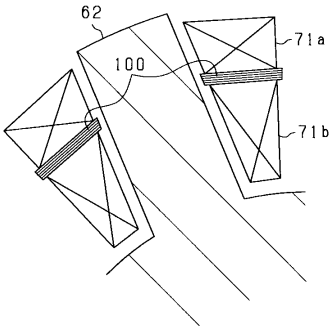
【図１７】



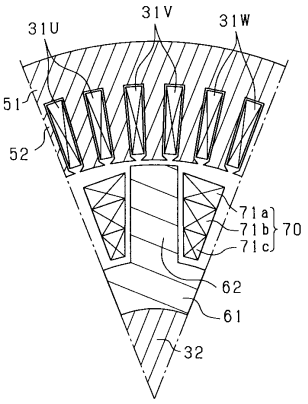
【図１８】



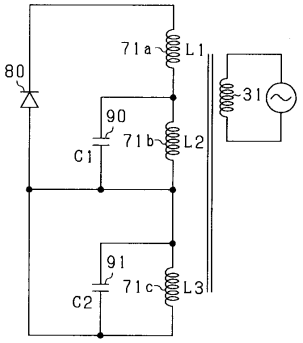
【図１９】



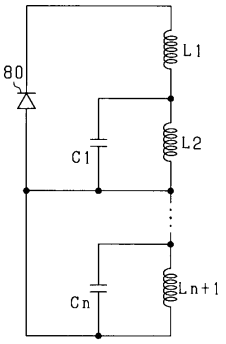
【図２０】



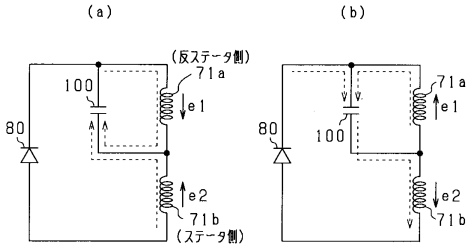
【図２１】


80
71a
L1
31
90
71b
L2
C1
91
71c
L3
C2

【図２２】


80
L1
C1
L2
Cn
Ln+1

【図２３】


(a)
(b)
(反ステータ側)
71a
100
e1
80
e2
71b
(ステータ側)
71a
e1
80
100
e2
71b

フロントページの続き

(56)参考文献　特開２０１８－１０２１１１（ＪＰ，Ａ）
特開２０２０－０５４０６４（ＪＰ，Ａ）
特開２０１７－１１８６０３（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野　(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０２Ｋ　１９／２６
Ｈ０２Ｋ　１９／３６
Ｈ０２Ｐ　２５／０２４
Ｈ０２Ｐ　２７／０６