(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2020年4月2日(02.04.2020)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2020/066481 A1

(51) 国際特許分類:
H02K 19/12 (2006.01) *H02P 25/03* (2016.01)
H02K 19/28 (2006.01)

(21) 国際出願番号： PCT/JP2019/034472

(22) 国際出願日： 2019年9月2日(02.09.2019)

(25) 国際出願の言語： 日本語

(26) 国際公開の言語： 日本語

(30) 優先権データ：
特願 2018-179512 2018年9月25日(25.09.2018) JP

(71) 出願人: 株式会社デンソー (**DENSO CORPORATION**) [JP/JP]; 〒4488661 愛知県刈谷市昭和町１丁目１番地 Aichi (JP).

(72) 発明者: 瀬口 正弘 (**SEGUCHI, Masahiro**); 〒4488661 愛知県刈谷市昭和町１丁目１番地 株式会社デンソー内 Aichi (JP).

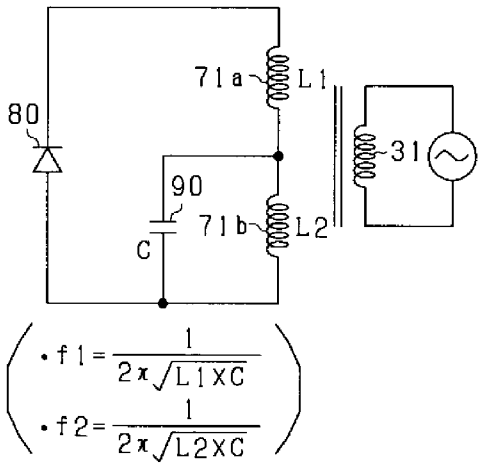
(74) 代理人: 山田 強 (**YAMADA, Tsuyoshi**); 〒4500002 愛知県名古屋市中村区名駅三丁目１３番２４号 第一はせ川ビル６階 Aichi (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,

WO 2020/066481 A1

(54) **Title:** FIELD WINDING-TYPE ROTARY ELECTRIC MACHINE

(54) 発明の名称： 界磁巻線型回転電機



(57) **Abstract:** This field winding-type rotary electric machine (30) is provided with: field windings (70, 73) having a series connection body of first winding units (71a, 74a) and second winding units (71b, 74b); and a rotor (60) having a radially protruding main pole part (62), wherein each of the first and second winding units is wound to the main pole part, and a harmonic wave current inducing a field current in the field winding flows through stator windings (31U-31W). This rotary electric machine is provided with: diodes (80, 81) connected to both ends of the series connection body; and capacitors (90) connected in series to the second winding units. When a serial resonance circuit including the first winding units and the capacitors and a parallel resonance circuit including the second winding units and the capacitors are constructed, and the inductances of the first and second winding units are L1 and L2 respectively, the inductances of the first and second winding units are set so as to satisfy at least one among "0.5<L2/L1<2" and "0.5<L1/L2<2".

[続葉有]

QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一 国際調査報告(条約第21条(3))

(57) 要約:界磁巻線型の回転電機(３０)は、第１巻線部(７１ａ,７４ａ)及び第２巻線部(７１ｂ,７４ｂ)の直列接続体を有する界磁巻線(７０,７３)と、径方向に突出する主極部(６２)を有するロータ(６０)と、を備え、第１,第２巻線部のそれぞれが各主極部に巻回され、界磁巻線に界磁電流を誘起させるための高調波電流がステータ巻線(３１Ｕ～３１Ｗ)に流れる。回転電機は、上記直列接続体の両端に接続されたダイオード(８０,８１)と、第２巻線部に並列接続されたコンデンサ(９０)と、を備える。第１巻線部及びコンデンサを含む直列共振回路と、第２巻線部及びコンデンサを含む並列共振回路とが構成され、第１,第２巻線部のインダクタンスをＬ１,Ｌ２とする場合、「０．５＜Ｌ２／Ｌ１＜２」及び「０．５＜Ｌ１／Ｌ２＜２」のうち、少なくとも一方を満たすように、第１,第２巻線部のインダクタンスが設定されている。

明　細　書

発明の名称 ： 界磁巻線型回転電機

関連出願の相互参照

[0001] 本出願は、２０１８年９月２５日に出願された日本出願番号２０１８－１７９５１２号に基づくもので、ここにその記載内容を援用する。

技術分野

[0002] 本開示は、界磁巻線型回転電機に関する。

背景技術

[0003] 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。

[0004] 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。

[0005] 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。

[0006] 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

[0007] 特許文献1：特開２０１８－４２４０１号公報

発明の概要

[0008] ここで、回転電機のトルクを高めるためには、界磁電流をさらに増加させることが望まれる。

[0009] 本開示は、界磁巻線に流れる界磁電流を増加させ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。

[0010] 本開示は、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、

前記直列接続体の両端のうち、前記第１巻線部側にカソードが接続され、前記第２巻線部側にアノードが接続されたダイオードと、

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、

前記第１巻線部のインダクタンスをＬ１とし、前記第２巻線部のインダクタンスをＬ２とする場合、「０．５＜Ｌ２／Ｌ１＜２」及び「０．５＜Ｌ１／Ｌ２＜２」のうち、少なくとも一方を満たすように、前記第１巻線部及び

前記第２巻線部それぞれのインダクタンスが設定されている。

[0011] 上記直列共振回路及び上記並列共振回路それぞれの共振周波数が等しく、ステータ巻線に流す高調波電流の周波数を上記共振周波数に一致させた場合に、界磁電流が最大となり、ひいてはトルクが最大となる特性を有する回転電機がある。ここで、回転電機のトルクが最大となる場合の高調波電流の周波数を基準周波数ｆ０とする。

[0012] 回転電機のトルクが最大となる高調波電流の周波数を設定するのが望ましいものの、実際には、ある幅を持って高調波電流の周波数範囲が設定される。この際、回転電機のトルクが、要求されるトルクの下限値以上となるように、その周波数範囲が設定される。

[0013] ここで、トルクが許容下限値Ｔｍｉｎと一致する高調波電流の２つの周波数のうち、低い方を下限周波数ｆＬとし、高い方を上限周波数ｆＨとする。本願開示者が開発中の回転電機においては、下限周波数ｆＬが上記基準周波数ｆ０の０．７倍の周波数であり、上限周波数ｆＨが基準周波数ｆ０の１．４倍である。下限周波数ｆＬ及び上限周波数ｆＨと基準周波数ｆ０との上述した関係を前提として、本願開示者は、上記直列共振回路の共振周波数を基準周波数ｆ０に一致させるとの条件を課すと、「０．５＜Ｌ２／Ｌ１＜２」なる条件が導かれるとの知見を得た。また、本願開示者は、上記並列共振回路の共振周波数を基準周波数ｆ０に一致させるとの条件を課すと、「０．５＜Ｌ１／Ｌ２＜２」なる条件が導かれるとの知見を得た。

[0014] そこで、本開示では、「０．５＜Ｌ２／Ｌ１＜２」及び「０．５＜Ｌ１／Ｌ２＜２」のうち、少なくとも一方を満たすように、前記第１巻線部及び前記第２巻線部それぞれのインダクタンスが設定されている。これにより、界磁電流を増加させることができる。

図面の簡単な説明

[0015] 本開示についての上記目的およびその他の目的、特徴や利点は、添付の図面を参照しながら下記の詳細な記述により、より明確になる。その図面は、

[図1]図１は、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であ

り、

[図2]図２は、ロータに備えられる電気回路を示す図であり、

[図3]図３は、ロータ及びステータの横断面図であり、

[図4]図４は、基本波電流及び高調波電流等の推移を示す図であり、

[図5]図５は、３相電流の推移を示す図であり、

[図6]図６は、基本波電流及び高調波電流等の推移を示す図であり、

[図7]図７は、３相電流の推移を示す図であり、

[図8]図８は、誘起電圧の発生パターンを示す図であり、

[図9]図９は、パターン２，３に対応する電気回路を示す図であり、

[図10]図１０は、直列共振回路を示す図であり、

[図11]図１１は、並列共振回路を示す図であり、

[図12]図１２は、界磁電流の整流回路を示す図であり、

[図13]図１３は、第１，第２巻線部及びコンデンサそれぞれに流れる電流の推移を示すタイムチャートであり、

[図14]図１４は、第１，第２巻線部及びコンデンサそれぞれに流れる電流の推移を示すタイムチャートであり、

[図15]図１５は、第１，第２巻線部及びコンデンサそれぞれに流れる電流の実機シミュレーションの結果を示すタイムチャートであり、

[図16]図１６は、高調波電流の周波数、界磁電流及びトルクの関係を示す特性図であり、

[図17]図１７は、第１実施形態の変形例２に係るロータに備えられる電気回路を示す図であり、

[図18]図１８は、第１実施形態の変形例３に係るロータに備えられる電気回路を示す図であり、

[図19]図１９は、第１実施形態の変形例３に係るロータに備えられる電気回路を示す図であり、

[図20]図２０は、第１実施形態の変形例４に係るロータ及びステータの横断面図であり、

[図21]図２１は、第２実施形態に係る磁束の流れを示す図であり、

[図22]図２２は、磁束の流れを示す図であり、

[図23]図２３は、第３実施形態に係るロータ及びステータの横断面図であり、

[図24]図２４は、図２３の一部を拡大して示す図であり、

[図25]図２５は、第４実施形態に係るロータ及びステータの横断面図であり、

[図26]図２６は、ロータに備えられる電気回路を示す図であり、

[図27]図２７は、第４実施形態の変形例に係るロータに備えられる電気回路を示す図である。

発明を実施するための形態

[0016] 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。

[0017] ＜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。

[0018] 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。

[0019] 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。

[0020] 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。

[0021] 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。

[0022] 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。

[0023] 続いて、ステータ５０及びロータ６０について説明する。

[0024] 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。

[0025] 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。

[0026] 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。

[0027] 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。

[0028] 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。

[0029] 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。

[0030] 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。

[0031] 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。

[0032] 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。

[0033] 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。

[0034] 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。

[0035] 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。

[0036] [数1]

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

[0037] [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。

[0038] 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。

[0039] 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。

[0040] 本実施形態において、ステータ巻線３１に流す高調波電流の周波数ｆｈは、第１共振周波数ｆ１と同じ周波数又はその近傍の周波数に設定されている。このため、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂに誘起される電流をより増加でき、界磁電流をより増加させることができる。

[0041] ここで、本開示者は、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。

[0042] 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。

[0043] 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。

[0044] 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。

[0045] ステータ巻線３１に流す高調波電流の周波数が第１共振周波数ｆ１とされる場合、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。第１共振周波数ｆ１と第２共振周波数ｆ２とが等しい又は近い値の場合、直列共振回路及び並列共振回路それぞれに流れる交流電流は最大又は最大に近い値となる。

[0046] 図１２に示す回路では、第１，第１巻線部７１ａ，７１ｂの合成インピーダンスが第１共振周波数ｆ１近傍において非常に大きくなる。このため、図１２に示す回路に流れる電流は、図１０及び図１１に示した回路に流れる交流成分の電流が主となる。図１２に示す回路には、ダイオード８０により整流された直流成分の電流が流れる。

[0047] 続いて、図１３及び図１４に、図１０～図１２に示した回路に流れる電流の推移を示す。図１３及び図１４において、ＩＣは、コンデンサ９０に流れる電流であるコンデンサ電流を示し、ＩＬ１は、第１巻線部７１ａに流れる電流を示す。ＩＬ２は、第２巻線部７１ｂに流れる電流を示し、Ｉｆは、図１２に示した回路に流れる直流成分の電流である界磁電流を示す。図１３及び図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。

[0048] コンデンサ電流ＩＣは、図１０の矢印にて示すように、第１巻線部７１ａからコンデンサ９０へと向かう方向に流れる場合を正とする。第１巻線部７１ａに流れる電流ＩＬ１は、図１０の矢印にて示すように、第１巻線部７１ａの第１端から第２端へと向かう方向に流れる場合を正とする。第２巻線部７１ｂに流れる電流ＩＬ２は、図１１の矢印にて示すように、第２巻線部７１ｂの第１端から第２端へと向かう方向に流れる場合を正とする。界磁電流Ｉｆは、図１２の矢印にて示すように、ダイオード８０のアノードからカソードへと向かう方向に流れる場合を正とする。

[0049] 図１３には、界磁巻線７０が励磁され始めた直後の状態を示す。図１３の第１期間Ｔ１においては、コンデンサ電流ＩＣが正の値となる。すなわち、第１期間Ｔ１においては、図１０の直列共振回路において、第１巻線部７１ａからコンデンサ９０へと電流が流れ込む。流入するコンデンサ電流ＩＣの

大きさと、第１巻線部７１ａに流れる電流ＩＬ１の大きさとは同等である。ここで、ステータ巻線３１に流す高調波電流の周波数ｆｈを第１共振周波数ｆ１とすることにより、直列共振回路に流れる交流電流が増加する。

[0050] 図１３の第１期間Ｔ１に時間的に隣接する第２期間Ｔ２においては、コンデンサ電流ＩＣが負の値となる。すなわち、第２期間Ｔ２においては、図１１の並列共振回路において、コンデンサ９０から第２巻線部７１ｂへと電流が流れ出る。流出するコンデンサ電流ＩＣの大きさと、第２巻線部７１ｂに流れる正の電流ＩＬ２の大きさとは同等である。

[0051] 第１期間Ｔ１の状態と、第２期間Ｔ２の状態とが繰り返されることにより、界磁電流Ｉｆは、図１４に示すように増加する。なお、図１５に、実機モデル相当の構成でシミュレーションを実施した結果を示す。

[0052] 本実施形態では、図１４に示すように、第１巻線部７１ａに流れる電流ＩＬ１と、第２巻線部７１ｂに流れる電流ＩＬ２との位相のずれ量θｓが電気角で１８０°である。これにより、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂで発生する磁界の合成磁界のリップル分を打ち消し合うようにすることができ、合成磁界をそのリップル分が平滑化された一定磁界にすることができる。

[0053] なお、位相のずれ量θｓは、「１２０°＜θｓ＜２４０°」のうち１８０°以外の値であってもよい。ずれ量θｓが１８０°±６０°の範囲にあれば、第１巻線部７１ａに流れる電流による磁界と第２巻線部７１ｂに流れる電流による磁界との合成磁界のリップルを低減することはできる。

[0054] 位相のずれ量θｓを上記のようにするために、本実施形態では、下式（ｅｑ３），（ｅｑ４）を満たすように、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂのインダクタンスＬ１，Ｌ２が設定されている。以下、この設定について説明する。

[0055] [数3]

$$\frac{1}{(1+B)^2} < \frac{L2}{L1} < \frac{1}{(1-A)^2} \quad \cdots \quad (eq3)$$

[0056] [数4]

$$\frac{1}{(1+B)^2} < \frac{L1}{L2} < \frac{1}{(1-A)^2} \quad \cdots \quad (eq4)$$

図１６に、高調波電流の周波数ｆｈ、界磁巻線７０に流れる界磁電流、及び回転電機３０のトルクの関係を示す。回転電機３０のトルクは、高調波電流の周波数ｆｈとして使用が想定される範囲において、ある周波数で最大となる。この最大トルクとなる周波数を基準周波数ｆ０と称すこととする。基準周波数ｆ０は、第１共振周波数ｆ１が第２共振周波数ｆ２と等しくなる場合の周波数である。高調波電流の周波数ｆｈを基準周波数ｆ０から乖離させていくと、界磁電流が低下し、ひいてはトルクが低下する。ここでは、界磁電流が小さくなるほど、トルクが低下する。

[0057] ここで、回転電機３０のトルクをその許容下限値Ｔｍｉｎ以上にすることを考える。許容下限値Ｔｍｉｎは、例えば、上記最大トルクの８０％～９０％の値に設定される。図１６において、トルクが許容下限値Ｔｍｉｎと一致する高調波電流の２つの周波数ｆｈのうち、低い方を下限周波数ｆＬと称し、高い方を上限周波数ｆＨと称すこととする。ここで、下限周波数ｆＬ及び上限周波数ｆＨを下式（ｅｑ５）のように表す。例えば、Ａ＝０．３（３０％）に設定され、Ｂ＝０．４（４０％）に設定される。

[0058] [数5]

$$\left.\begin{aligned} fL &= (1-A)f0, \quad 0<A<1 \\ fH &= (1+B)f0, \quad 0<B<1 \end{aligned}\right\} \quad \cdots \quad (eq5)$$

上式（ｅｑ５）において、実数Ａ，Ｂは、例えば、「０＜Ａ≦０．５、０＜Ｂ≦０．５」の範囲の値に設定され、望ましくは「０＜Ａ≦０．４、０＜Ｂ≦０．４」の範囲の値に設定される。第１共振周波数ｆ１及び第２共振周波数ｆ２のそれぞれは、下限周波数ｆＬよりも高くてかつ上限周波数ｆＨよりも低い周波数範囲にあることが望ましい。これにより、下式（ｅｑ６），

（ｅｑ７）が導かれる。

[0059] [数6]

$$(1-A)f0 < f1 < (1+B)f0 \quad \cdots \quad (eq6)$$

[0060] [数7]

$$(1-A)f0 < f2 < (1+B)f0 \quad \cdots \quad (eq7)$$

上式（ｅｑ６），（ｅｑ１）により、下式（ｅｑ８）が導かれる。

[0061] [数8]

$$(1-A)f0 < \frac{1}{2\pi\sqrt{L1\cdot C}} < (1+B)f0$$

$$\rightarrow (1-A)^2 f0^2 < \frac{1}{(2\pi)^2 L1\cdot C} < (1+B)^2 f0^2 \quad \cdots \quad (eq8)$$

ここで、下式（ｅｑ９）を用いると、上式（ｅｑ８）は下式（ｅｑ１０）になる。

[0062] [数9]

$$K = \frac{1}{f0^2(2\pi)^2 C} \quad \cdots \quad (eq9)$$

[0063] [数10]

$$(1-A)^2 < \frac{K}{L1} < (1+B)^2 \quad \cdots \quad (eq10)$$

上式（ｅｑ１０）において、Ｌ１について整理すると、下式（ｅｑ１１）が導かれる。

[0064]

[数11]

$$\frac{K}{(1+B)^2} < L1 < \frac{K}{(1-A)^2} \quad \cdots \quad (eq11)$$

一方、上式（ｅｑ７），（ｅｑ２）により、下式（ｅｑ１２）が導かれる。

[0065] [数12]

$$(1-A)f0 < \frac{1}{2\pi\sqrt{L2 \cdot C}} < (1+B)f0$$

$$\rightarrow (1-A)^2 f0^2 < \frac{1}{(2\pi)^2 L2 \cdot C} < (1+B)^2 f0^2 \quad \cdots \quad (eq12)$$

上式（ｅｑ１１）と同様に、上式（ｅｑ１２），（ｅｑ９）から下式（ｅｑ１３）が導かれる。

[0066] [数13]

$$\frac{K}{(1+B)^2} < L2 < \frac{K}{(1-A)^2} \quad \cdots \quad (eq13)$$

ここで、第１共振周波数ｆ１を基準周波数ｆ０に等しくするとの条件から、下式（ｅｑ１４）が導かれる。この場合、「Ｌ１＝Ｋ」となる。

[0067] [数14]

$$f0 = f1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1 \cdot C}}$$

$$\rightarrow L1 = \frac{1}{f0^2 (2\pi)^2 C} = K \ldots \quad (eq14)$$

「Ｋ＝Ｌ１」を上式（ｅｑ１３）に代入して整理すると、上式（ｅｑ３）が導かれる。

[0068] 一方、第２共振周波数ｆ２を基準周波数ｆ０に等しくするとの条件から、

下式（ｅｑ１５）が導かれる。この場合、「Ｌ２＝Ｋ」となる。

[0069] [数15]

$$f0 = f2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L2 \cdot C}}$$

$$\rightarrow L2 = \frac{1}{f0^2 (2\pi)^2 C} = K \ldots \quad (eq15)$$

「Ｋ＝Ｌ２」を上式（ｅｑ１１）に代入して整理すると、上式（ｅｑ４）が導かれる。

[0070] ここで、「Ａ＝０．３、Ｂ＝０．４」とする場合、上式（ｅｑ３）は「０．５＜Ｌ２／Ｌ１＜２」となる。また、「Ａ＝０．３、Ｂ＝０．４」とする場合、上式（ｅｑ４）は「０．５＜Ｌ１／Ｌ２＜２」となる。

[0071] ここで、Ｌ１，Ｌ２の関係について、例えば、「Ｌ１＝Ｌ２」に設定してもよい。この場合、ｆ１＝ｆ２となり、界磁電流の増大効果が大きくなる。

[0072] また、例えば、「０．５＜Ｌ２／Ｌ１＜２」及び「０．５＜Ｌ１／Ｌ２＜２」を満たすことを条件に、「Ｌ１≠Ｌ２」となるようにＬ１，Ｌ２を設定してもよい。以下、この設定の具体例について説明する。

[0073] ＜具体例１＞

ｆ１＞ｆ２とする場合、上式（ｅｑ１），（ｅｑ２）から「Ｌ２＞Ｌ１」が導かれる。この場合、下式（ｅｑ１６）が成立する。

[0074] [数16]

$$\frac{L2}{L1} > 1, \quad \frac{L1}{L2} < 1 \quad \ldots \quad (eq16)$$

ここで、「Ａ＝０．２、Ｂ＝０．２」に設定する。この設定は、例えば、許容下限値Ｔｍｉｎが上記最大トルクの９０％の値に設定される場合のものである。この場合、上式（ｅｑ３），（ｅｑ４），（ｅｑ１６）から、「１＜Ｌ２／Ｌ１＜１．５６」及び「０．６９＜Ｌ１／Ｌ２＜１」が導かれる。

[0075] ＜具体例２＞

ｆ２＞ｆ１とする場合、上式（ｅｑ１），（ｅｑ２）から「Ｌ１＞Ｌ２」が導かれる。この場合、下式（ｅｑ１７）が成立する。

[0076] [数17]

$$\frac{L2}{L1}<1,\quad \frac{L1}{L2}>1 \quad \cdots \quad (eq17)$$

ここで、上記具体例１と同様に、「Ａ＝０．２、Ｂ＝０．２」に設定する。この場合、上式（ｅｑ３），（ｅｑ４），（ｅｑ１７）から、「０．６９＜Ｌ２／Ｌ１＜１」及び「１＜Ｌ１／Ｌ２＜１．５６」が導かれる。

[0077] 以上のように、Ａ，Ｂの絶対値を小さくする、すなわち、ｆＬ～ｆＨで規定される周波数範囲を狭くすると、Ｌ２／Ｌ１及びＬ１／Ｌ２それぞれが取り得る範囲が狭くなる。

[0078] 以上説明したように、上式（ｅｑ３），（ｅｑ４）を満たすように第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂのインダクタンスＬ１，Ｌ２を設定することにより、界磁電流を増加させることができる。

[0079] また、本実施形態によれば、各インダクタンスＬ１，Ｌ２といった簡易なパラメータに基づいて、界磁電流を増加させる構成を実現することができる。

[0080] ＜第１実施形態の変形例１＞

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。

[0081] 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。

[0082] ＜第１実施形態の変形例２＞

図１７に示すように、整流ダイオード８０にツェナーダイオード８１が並列接続されていてもよい。これにより、ダイオード８０、界磁巻線７０及びコンデンサ９０にかかるサージ電圧を吸収することができ、ダイオード８０、界磁巻線７０及びコンデンサ９０の劣化を抑制することができる。

[0083] なお、サージ電圧は、例えば、ステータ巻線３１に流れる高調波電流が正弦波から大きく歪むことにより発生し得る。特に、特開２０１０－２７３４７６号公報や特開２０１８－９８９０７号公報に記載されているように、１８０度矩形波通電制御が実施される場合において、高調波電流を流すために、ステータ巻線３１に印加する電圧にパルス状の電圧が重畳されるときは、高調波電流の歪が大きくなり、サージ電圧が大きくなりやすい。このため、サージ電圧が大きくなりやすい構成においては、ツェナーダイオード８１が備えられるメリットが大きい。

[0084] ＜第１実施形態の変形例３＞

図１８に示すように、整流ダイオード８０に代えて、ツェナーダイオード８１のみが備えられていてもよい。これにより、ツェナーダイオード８１が、整流機能及びサージ吸収機能を兼ねることになる。その結果、回転電機３０の部品数を削減することができる。

[0085] なお、ツェナーダイオード８１は、図１９に示すように、複数備えられていてもよい。図１９には、ツェナーダイオード８１が２つ備えられる例を示した。

[0086] ＜第１実施形態の変形例４＞

図２０に示すような界磁巻線７３が用いられてもよい。詳しくは、主極部６２に第１巻線部７４ａが巻回され、第１巻線部７４ａの外側に第２巻線部７４ｂが巻回されている。

[0087] ＜第２実施形態＞

本実施形態では、第１巻線部７１ａのターン数をＮ１とし、第２巻線部７１ｂのターン数をＮ２とする場合、「Ｎ１＜Ｎ２」に設定されている。以下、この設定について説明する。

[0088] 第１巻線部７１ａのインダクタンスＬ１は下式（ｅｑ１８）で表すことができ、第２巻線部７１ｂのインダクタンスＬ２は下式（ｅｑ１９）で表すことができる。

[0089] [数18]

$$L1=\mu\cdot N1^2\frac{S1}{m1} \quad \cdots \quad (eq18)$$

[0090] [数19]

$$L2=\mu\cdot N2^2\frac{S2}{m2} \quad \cdots \quad (eq19)$$

上式（ｅｑ１８），（ｅｑ１９）において、μは透磁率を示し、Ｓ１，Ｓ２は、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂに通電された場合に形成される磁気回路の磁路面積（磁路の断面積）を示し、ｍ１，ｍ２は、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂに通電された場合に形成される磁気回路の磁路長を示す。

[0091] 図２１には、Ｓ１／ｍ１がＳ２／ｍ２と同等である例を示す。ここでは、無負荷に近い状態を示し、磁束は細い破線のみを通る。この場合、「Ｌ１＝Ｌ２」とするためには「Ｎ１＝Ｎ２」とすればよい。

[0092] しかしながら、実際には、図２１の太い破線の様な漏れ磁束が存在し、その漏れ磁束等に起因して、Ｓ１がＳ２に対して大きくなり、また、ｍ１がｍ２に対して短くなる傾向にある。その結果、Ｓ１／ｍ１がＳ２／ｍ２よりも大きくなる。この場合の他の例を図２２に示す。この例は、最大負荷に近い状態を示す。Ｓ１／ｍ１がＳ２／ｍ２よりも大きくなる場合、「Ｌ１＝Ｌ２」とするためには「Ｎ１＜Ｎ２」にすることが要求される。

[0093] ＜第３実施形態＞

図２３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。また、仕切部１００の周方向長さは、各巻線部７１ａ，７１ｂの周方向長さ以上とされている。

[0094] 仕切部１００は、図２４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。

[0095] 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。

[0096] なお、図２０に示す構成においても、第１巻線部７４ａと第２巻線部７４ｂとの間に仕切部が介在していてもよい。

[0097] ＜第４実施形態＞

本実施形態において、界磁巻線７０は、図２５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。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。

[0098] 図２６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。

[0099] 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２６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。

[0100] 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（ｅｑ２０），（ｅｑ２１）で表される。

[0101] [数20]

$$f3=\frac{1}{2\pi\sqrt{(L1+L2)\cdot C2}} \quad \cdots \quad (eq20)$$

[0102] [数21]

$$f4=\frac{1}{2\pi\sqrt{L3\cdot C2}} \quad \cdots \quad (eq21)$$

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。ちなみに、ｆ１，ｆ２と同様に、「ｆ３＝ｆ４」に設定されればよい。

[0103] 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。

[0104] ＜第４実施形態の変形例＞

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２７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。

[0105] ＜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。

[0106] ・上式（ｅｑ３），（ｅｑ４）の双方ではなく、いずれか１つを満たすように、第１，第２巻線部７１ａ，７１ｂのインダクタンスＬ１，Ｌ２が設定されていてもよい。具体的には例えば、「０．５＜Ｌ２／Ｌ１＜２」及び「

０．５＜Ｌ１／Ｌ２＜２」のいずれか１つを満たすように、インダクタンスＬ１，Ｌ２が設定されていてもよい。

[0107] ・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。

[0108] ・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。

[0109] 本開示は、実施例に準拠して記述されたが、本開示は当該実施例や構造に限定されるものではないと理解される。本開示は、様々な変形例や均等範囲内の変形をも包含する。加えて、様々な組み合わせや形態、さらには、それらに一要素のみ、それ以上、あるいはそれ以下、を含む他の組み合わせや形態をも、本開示の範疇や思想範囲に入るものである。

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，７４ａ）及び第２巻線部（７１ｂ，７４ｂ）の直列接続体を有する界磁巻線（７０，７３）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、

前記直列接続体の両端のうち、前記第１巻線部側にカソードが接続され、前記第２巻線部側にアノードが接続されたダイオード（８０，８１）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、

前記第１巻線部のインダクタンスをＬ１とし、前記第２巻線部のインダクタンスをＬ２とする場合、「０．５＜Ｌ２／Ｌ１＜２」及び「０．５＜Ｌ１／Ｌ２＜２」のうち、少なくとも一方を満たすように、前記第１巻線部及び前記第２巻線部それぞれのインダクタンスが設定されている界磁巻線型回転電機。

[請求項2] 「０．５＜Ｌ２／Ｌ１＜２」及び「０．５＜Ｌ１／Ｌ２＜２」の双方を満たすように、前記第１巻線部及び前記第２巻線部それぞれのインダクタンスが設定されている請求項１に記載の界磁巻線型回転電機。

[請求項3] ステータ巻線（３１Ｕ～３１Ｗ）を有するステータ（５０）と、

第１巻線部（７１ａ，７４ａ）及び第２巻線部（７１ｂ，７４ｂ）

の直列接続体を有する界磁巻線（７０，７３）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、

前記直列接続体の両端のうち、前記第１巻線部側にカソードが接続され、前記第２巻線部側にアノードが接続されたダイオード（８０，８１）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、

前記直列共振回路及び前記並列共振回路それぞれの共振周波数が等しく、前記高調波電流の周波数を前記共振周波数に一致させた場合に前記回転電機のトルクが最大となり、前記回転電機のトルクが最大となる場合の前記高調波電流の周波数を基準周波数ｆ０とし、

前記回転電機のトルクがその許容下限値（Ｔｍｉｎ）と等しくなる前記高調波電流の２つの周波数のうち、低い方である下限周波数ｆＬと、高い方である上限周波数ｆＨとを下式（ｃ１）で表し、

[数1]

$$\left.\begin{aligned} fL &= (1-A)f0, \quad 0<A<1 \\ fH &= (1+B)f0, \quad 0<B<1 \end{aligned}\right\} \quad \cdots \quad (c1)$$

前記第１巻線部のインダクタンスをＬ１とし、前記第２巻線部のインダクタンスをＬ２とする場合、下式（ｃ２）及び下式（ｃ３）のうち、少なくとも一方を満たすように、前記第１巻線部及び前記第２巻

線部それぞれのインダクタンスが設定されている界磁巻線型回転電機。

[数2]

$$\frac{1}{(1+B)^2} < \frac{L2}{L1} < \frac{1}{(1-A)^2} \quad \cdots \quad (c2)$$

[数3]

$$\frac{1}{(1+B)^2} < \frac{L1}{L2} < \frac{1}{(1-A)^2} \quad \cdots \quad (c3)$$

[請求項4] 前記直列共振回路に流れる電流と、前記並列共振回路に流れる電流との位相のずれ量をθｓとする場合、「１２０°＜θｓ＜２４０°」である請求項１～３のいずれか１項に記載の界磁巻線型回転電機。

[請求項5] 前記第１巻線部は、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おり、

前記第１巻線部のターン数をＮ１とし、前記第２巻線部のターン数をＮ２とする場合、「Ｎ１＜Ｎ２」に設定されている請求項１～４のいずれか１項に記載の界磁巻線型回転電機。

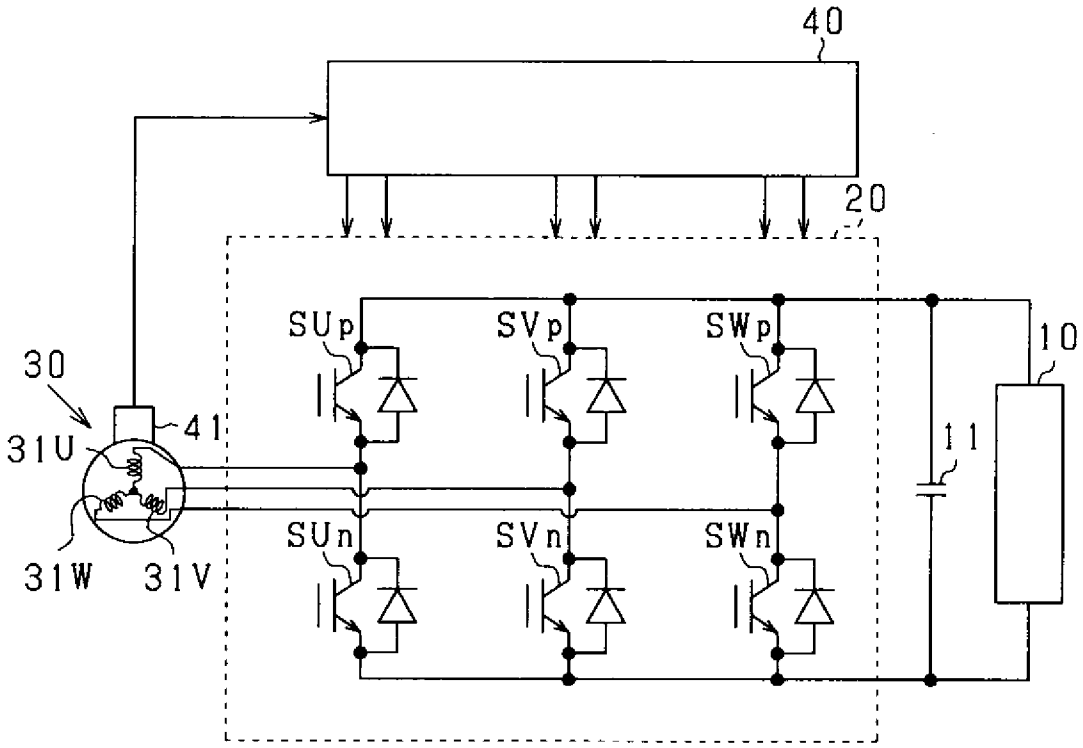
[請求項6] 前記ダイオードは、互いに並列接続された整流ダイオード（８０）及びツェナーダイオード（８１）である請求項１～５のいずれか１項に記載の界磁巻線型回転電機。

[請求項7] 前記ダイオードは、ツェナーダイオード（８１）のみからなる請求項１～５のいずれか１項に記載の界磁巻線型回転電機。

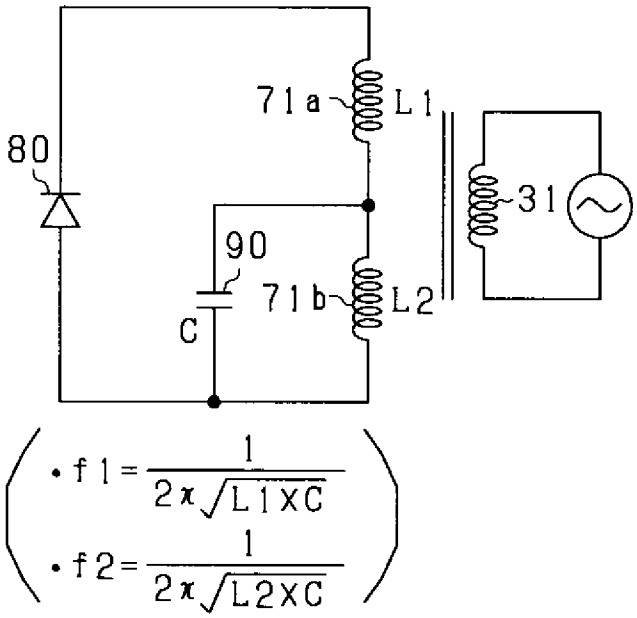
[請求項8] 前記ダイオードは、直列接続された複数のツェナーダイオード（８１）である請求項１～７のいずれか１項に記載の界磁巻線型回転電機。

[請求項9] 前記高調波電流の周波数が前記直列共振回路の共振周波数に設定されている請求項１～８のいずれか１項に記載の界磁巻線型回転電機。

[図1]

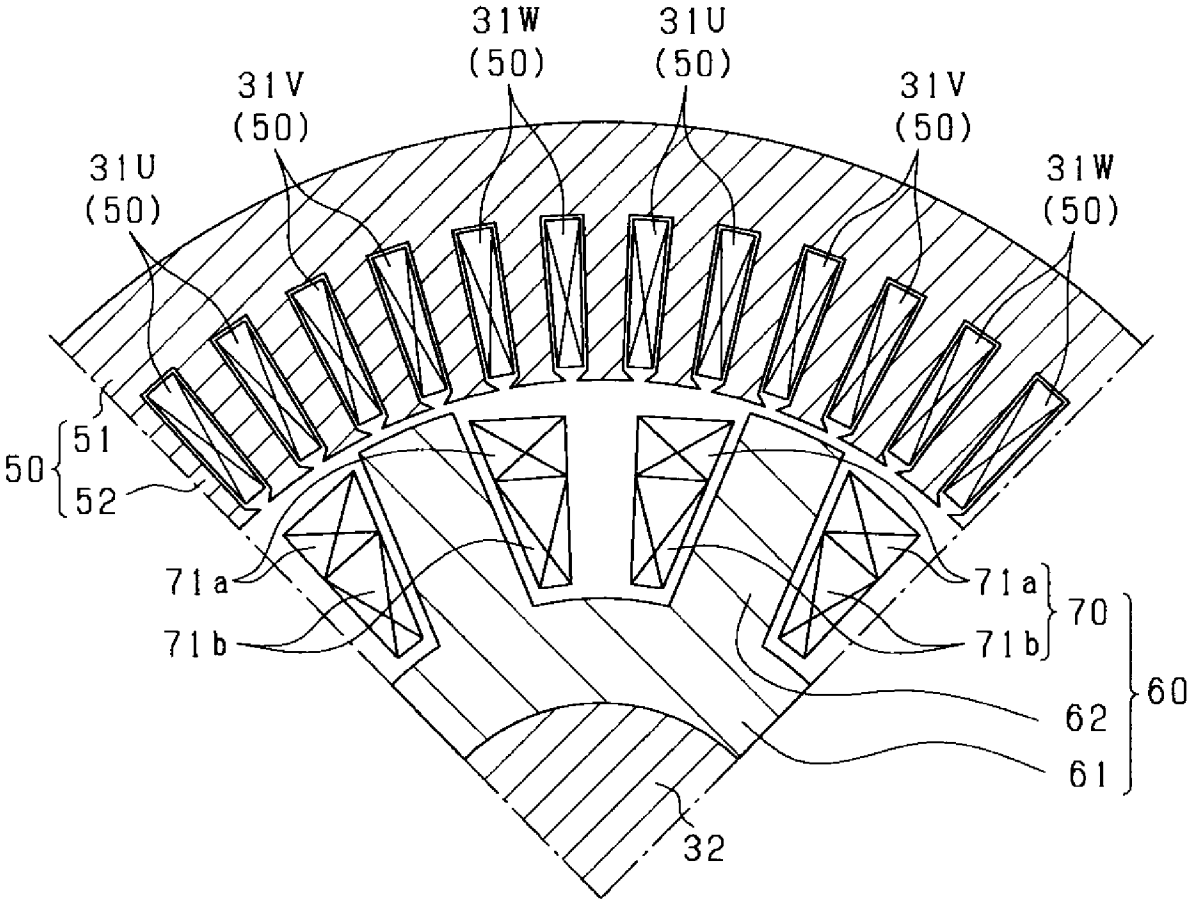


[図2]

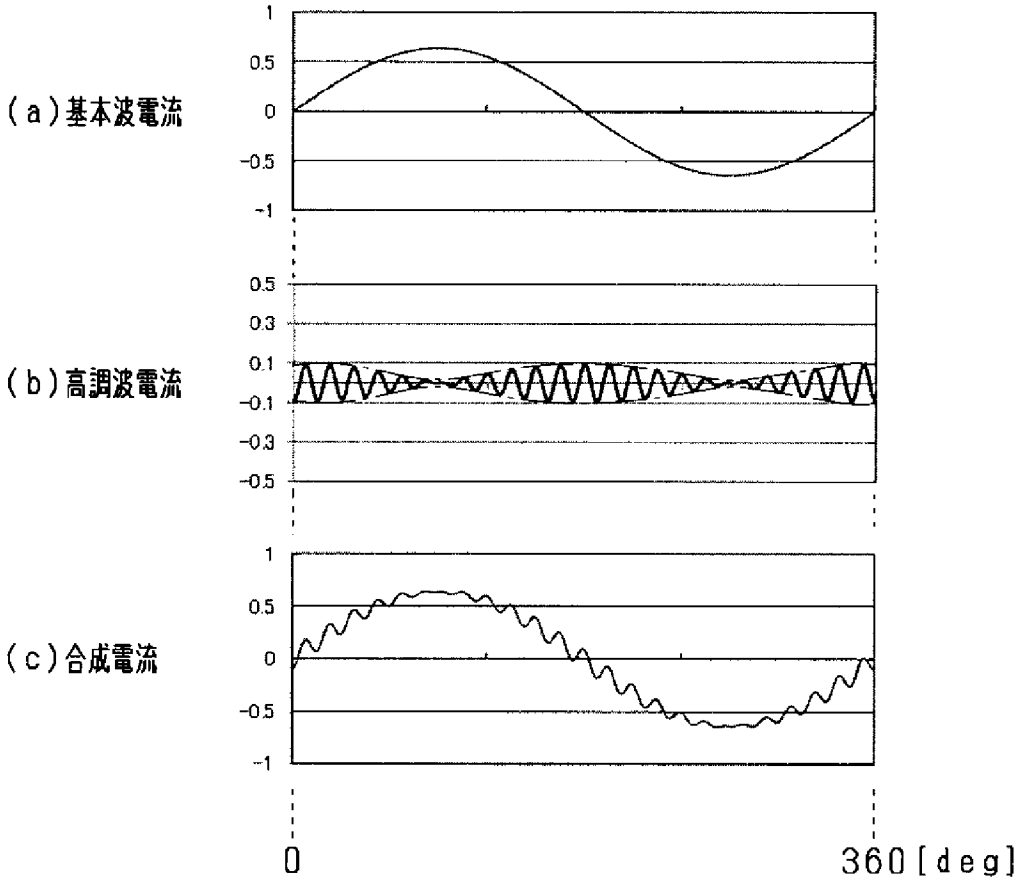


$$\left(\begin{array}{l} \cdot f1 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{L1 \times C}} \\ \cdot f2 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{L2 \times C}} \end{array} \right)$$

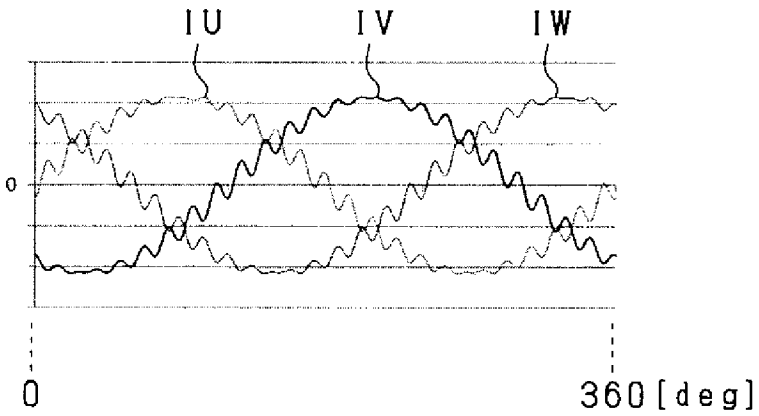
[図3]


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

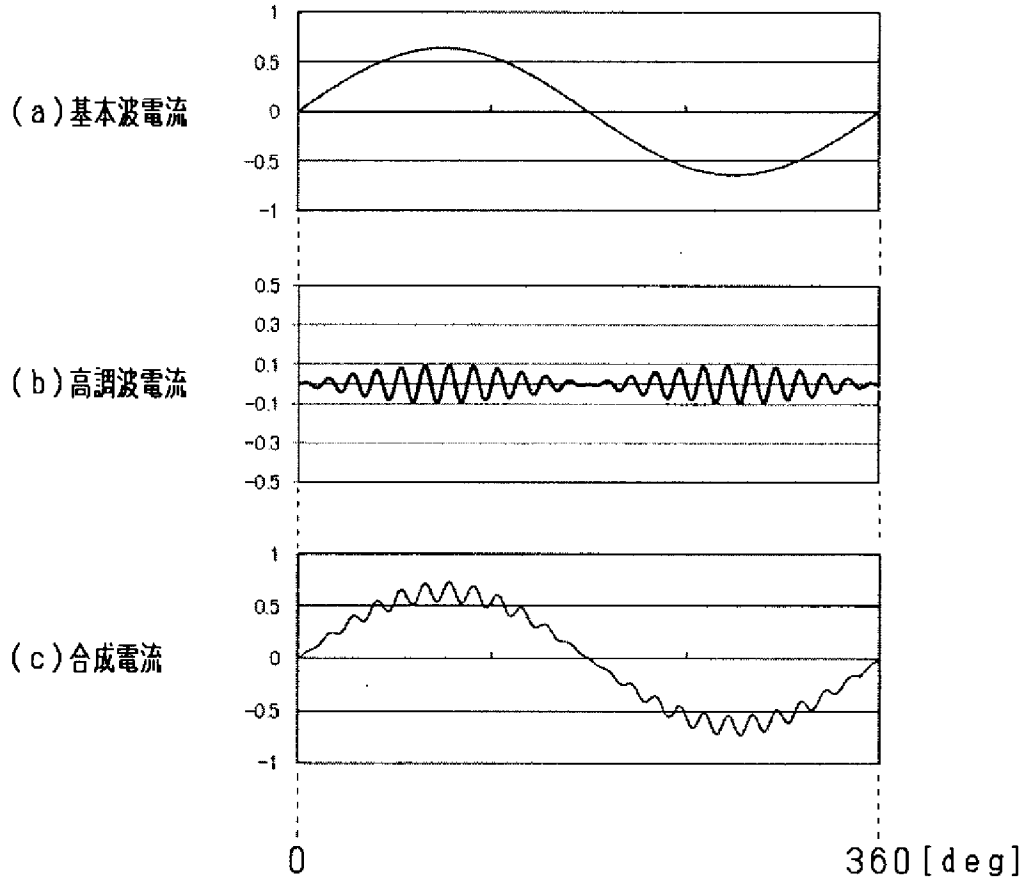
[図4]


(a)基本波電流
(b)高調波電流
(c)合成電流
1
0.5
0
-0.5
-1
0.5
0.3
0.1
-0.1
-0.3
-0.5
0
360[deg]

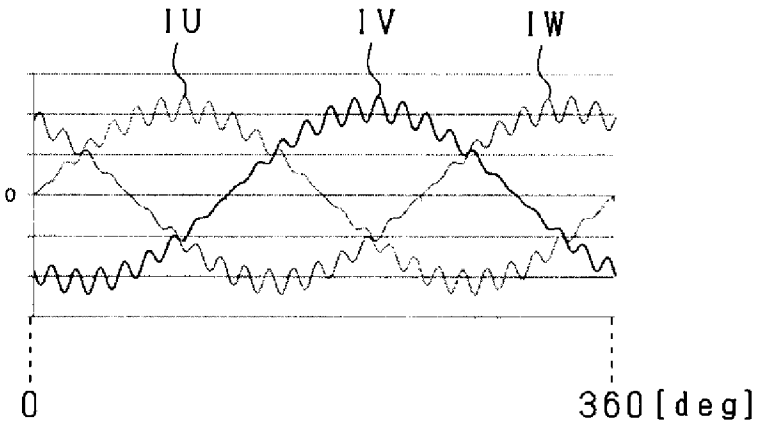
[図5]


IU
IV
IW
0
0
360[deg]

[図6]


(a)基本波電流
(b)高調波電流
(c)合成電流
1
0.5
0
-0.5
-1
0.5
0.3
0.1
-0.1
-0.3
-0.5
0
360[deg]

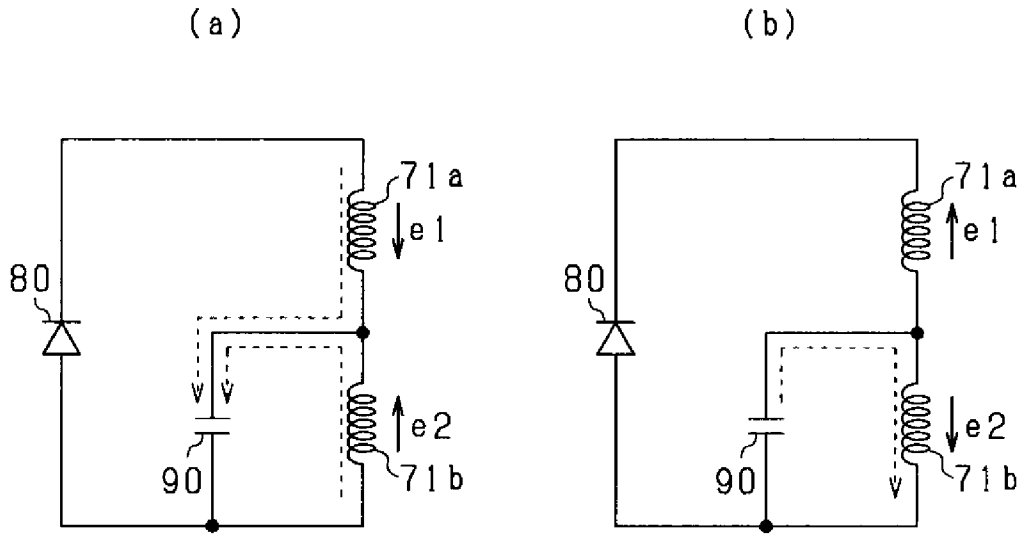
[図7]


IU
IV
IW
0
0
360[deg]

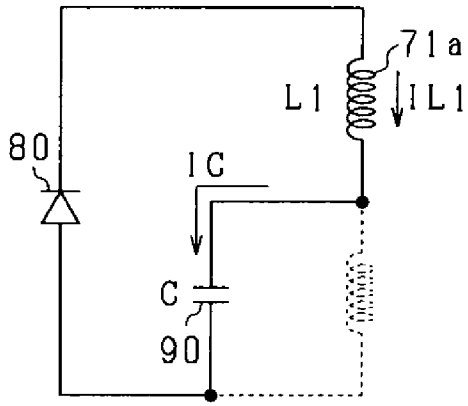
[図8]

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

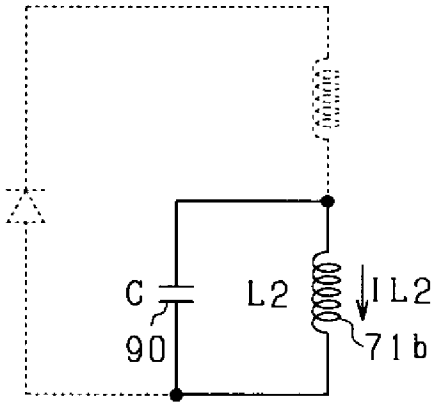
[図9]



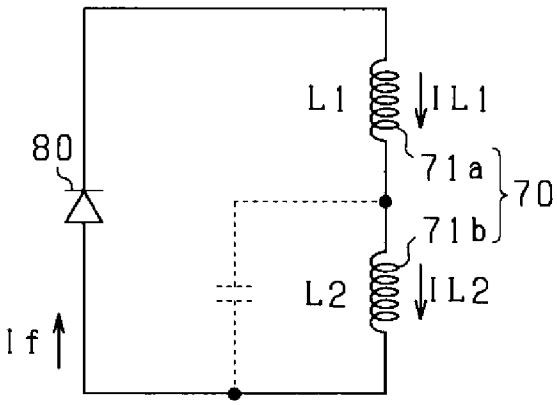
[図10]



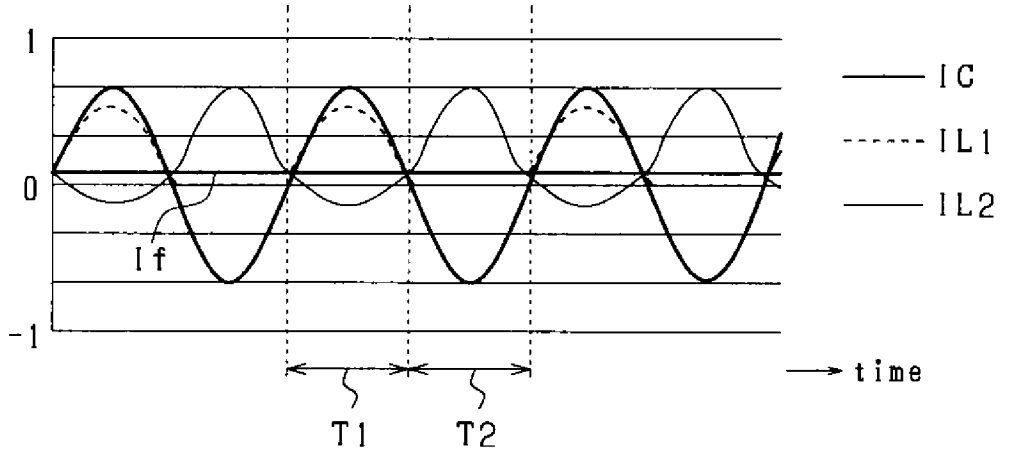
[図11]



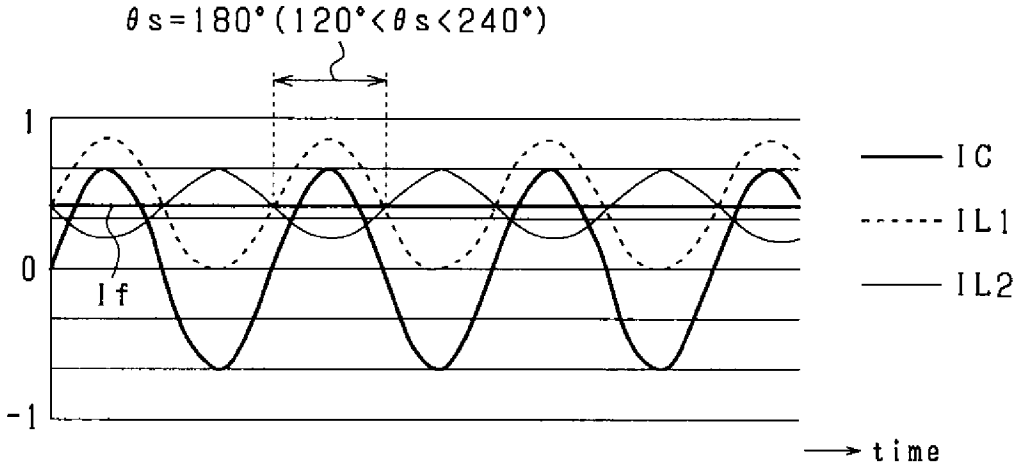
[図12]



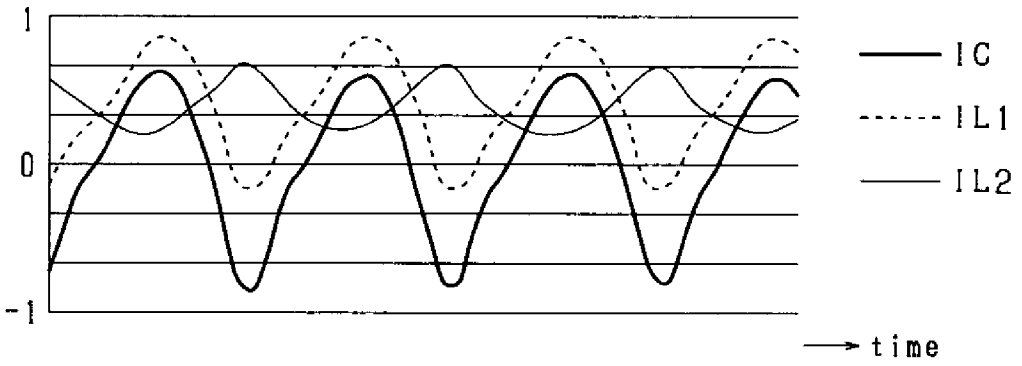
[図13]


1
0
-1
If
IC
IL1
IL2
time
T1
T2

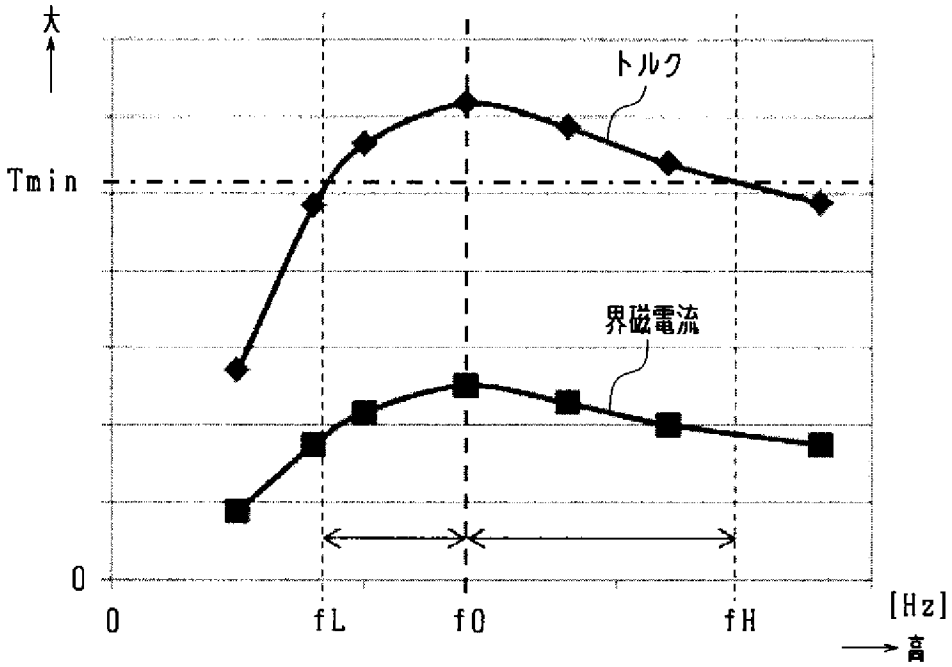
[図14]


θs=180°(120°<θs<240°)
1
0
-1
If
IC
IL1
IL2
time

[図15]

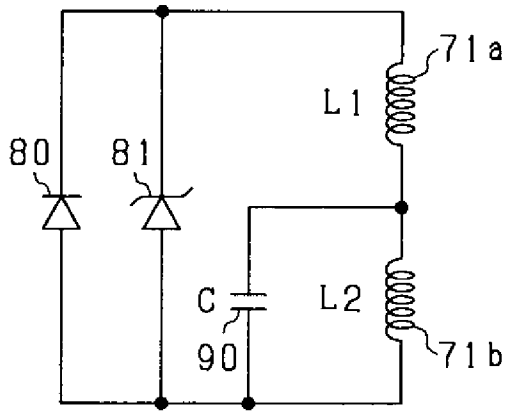

1
0
-1
IC
IL1
IL2
time

[図16]

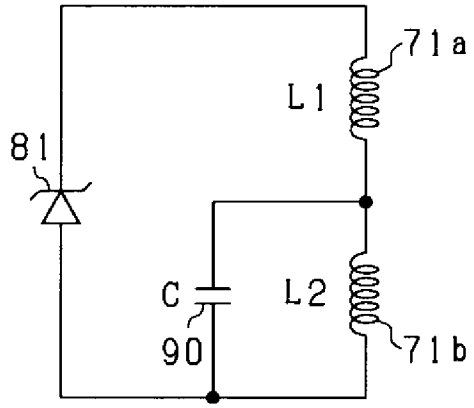


$$\begin{pmatrix} \cdot fL=(1-A)f0,\ 0<A<1 \\ \cdot fH=(1+B)f0,\ 0<B<1 \end{pmatrix}$$

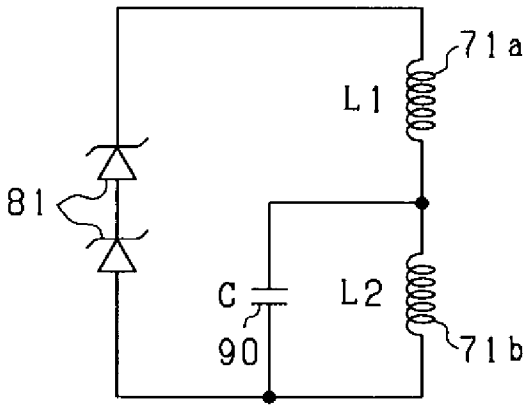
[図17]



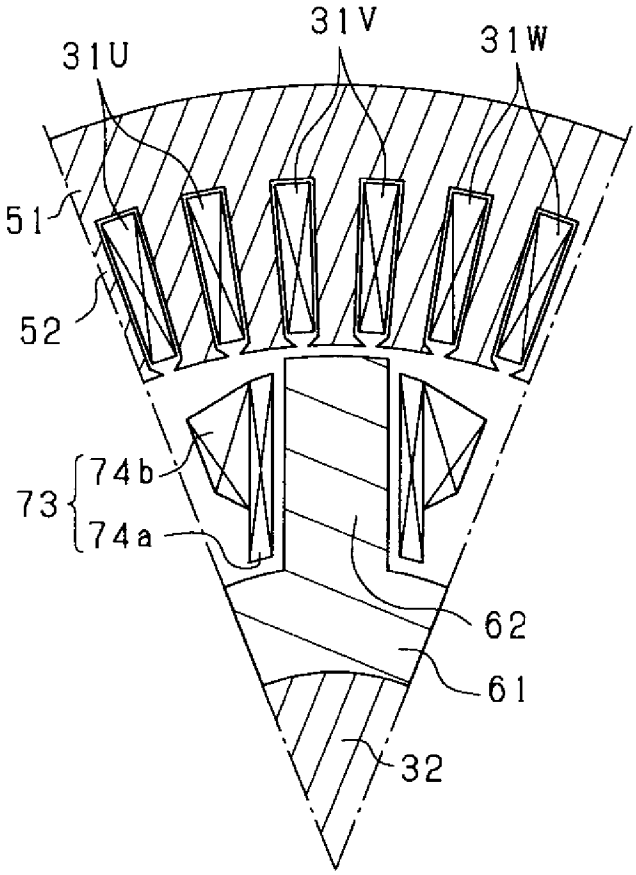
[図18]



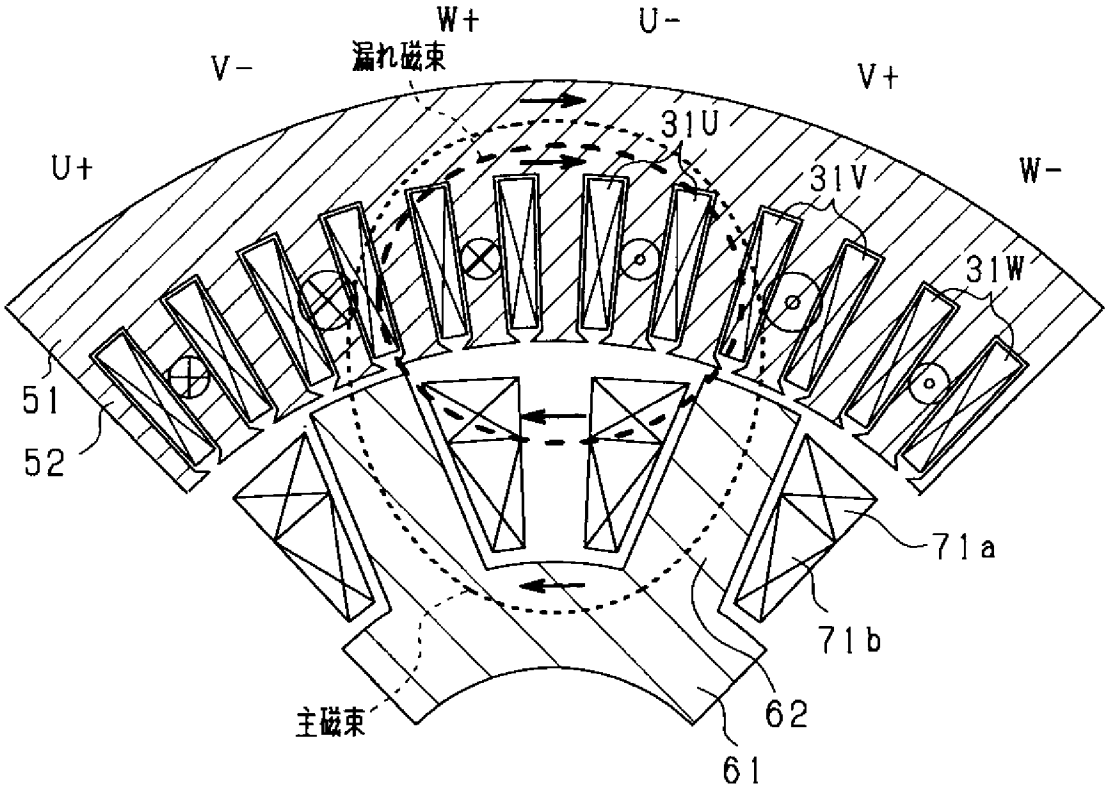
[図19]



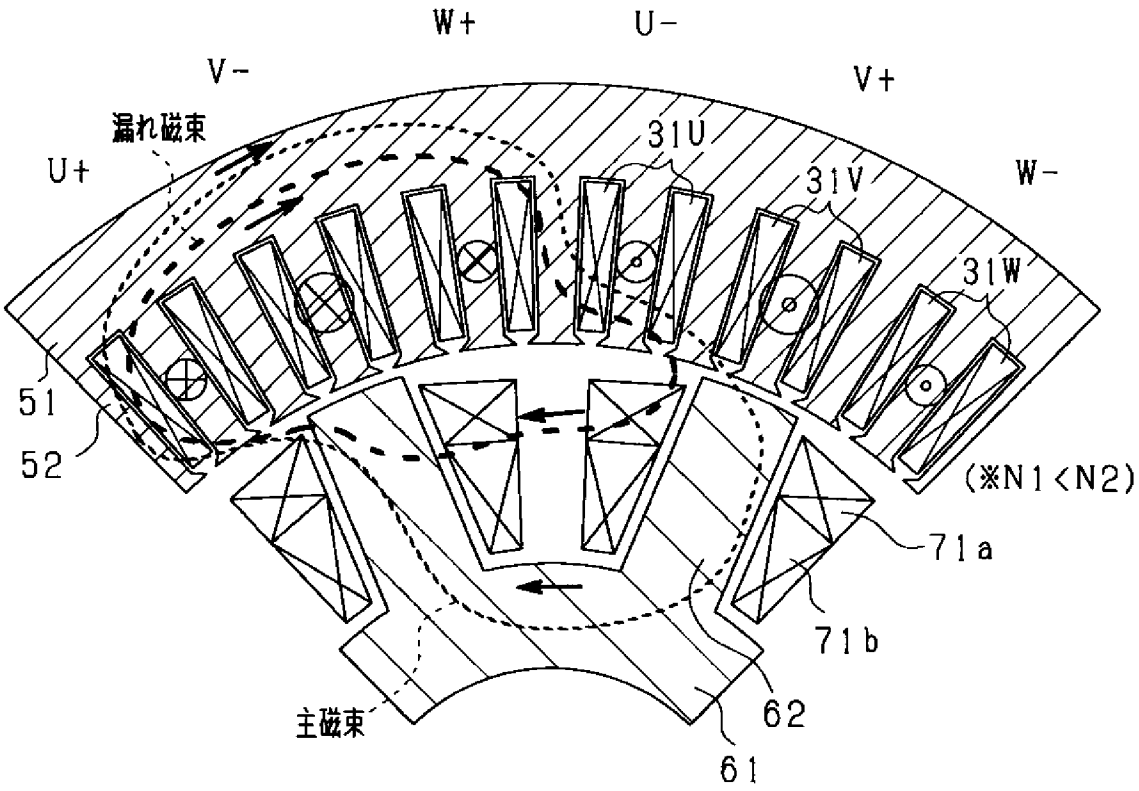
[図20]



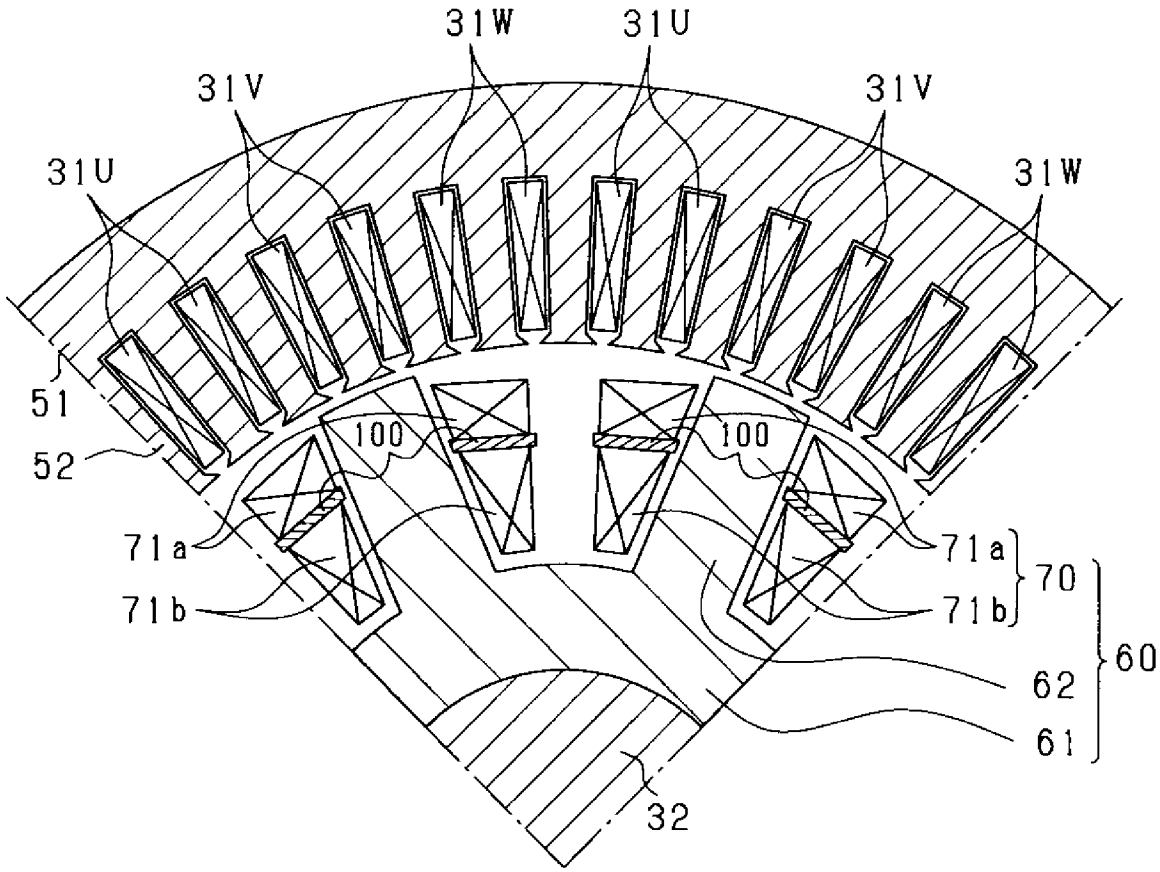
[図21]


W+
U-
V-
漏れ磁束
V+
U+
31U
W-
31V
31W
51
52
71a
71b
主磁束
62
61

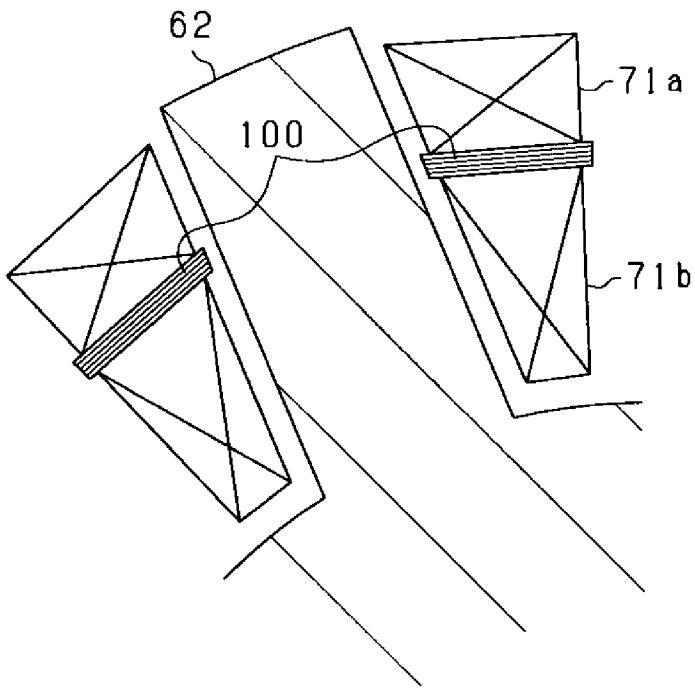
[図22]


W+
U-
V-
V+
漏れ磁束
U+
31U
31V
W-
31W
51
52
(※N1<N2)
71a
71b
主磁束
62
61

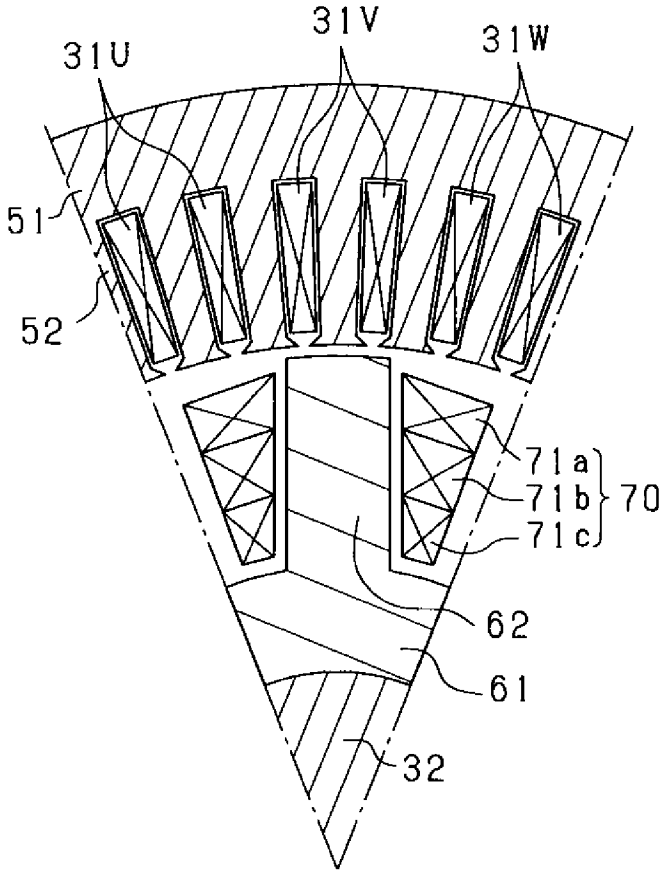
[図23]


31W
31U
31V
31V
31U
31W
51
52
100
100
71a
71b
71a
71b
70
60
62
61
32

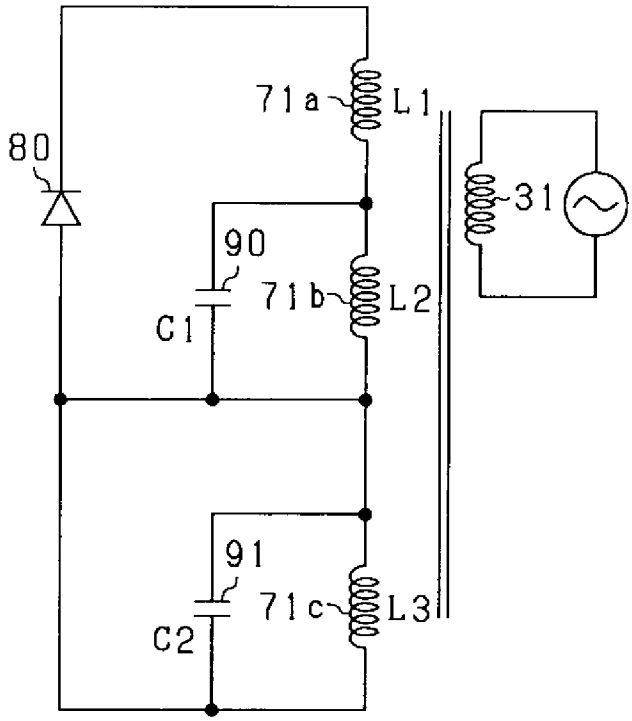
[図24]


62
71a
100
71b

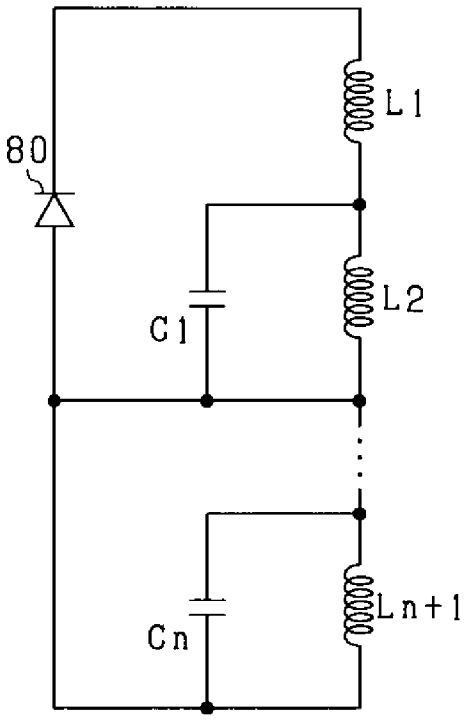
[図25]



[図26]



[図27]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2019/034472

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
Int.Cl. H02K19/12(2006.01)i, H02K19/28(2006.01)i, H02P25/03(2016.01)i
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
Int.Cl. H02K19/12, H02K19/28, H02P25/03

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan	1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan	1971-2019
Registered utility model specifications of Japan	1996-2019
Published registered utility model applications of Japan	1994-2019

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2018-42401 A (DENSO CORP.) 15 March 2018, paragraphs [0021]-[0028], [0035]-[0037], [0055]-[0061], fig. 1-2, 6, 10 & US 2019/0207491 A1, paragraphs [0041]-[0048], [0055]-[0057], [0075]-[0081], fig. 1-2, 6, 10 & WO 2018/047768 A1 & CN 109690925 A	1-9
Y	JP 2008-178211 A (DENSO CORP.) 31 July 2008, paragraphs [0031]-[0032], [0038], fig. 1, 5(A)-(C) & US 2008/0079375 A1, paragraphs [0206]-[0209], [0221], fig. 35, 39A-C	1-9

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.
☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed
"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
30 October 2019 (30.10.2019)	12 November 2019 (12.11.2019)

Name and mailing address of the ISA/	Authorized officer
Japan Patent Office 3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915, Japan	Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2019/034472

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2014-7837 A (TOYOTA MOTOR CORP.) 16 January 2014, claim 4, paragraph [0044], fig. 5 (Family: none)	9
A	JP 2018-98907 A (DENSO CORP.) 21 June 2018, paragraphs [0092]-[0099], fig. 20-22 & WO 2018/110458 A1 & CN 110063018 A	1-9
A	JP 2013-5575 A (TOYOTA MOTOR CORP.) 07 January 2013, entire text, all drawings (Family: none)	1-9
A	US 2016/0049838 A1 (FEAAM GMBH) 18 February 2016, entire text, all drawings & WO 2014/147181 A2 & DE 102013102900 A1 & CN 105164903 A	1-9

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２０１９／０３４４７２

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　H02K19/12(2006.01)i, H02K19/28(2006.01)i, H02P25/03(2016.01)i

Ｂ．　調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　H02K19/12, H02K19/28, H02P25/03

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	１９２２－１９９６年
日本国公開実用新案公報	１９７１－２０１９年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０１９年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０１９年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

Ｃ．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
Y	JP 2018-42401 A (株式会社デンソー) 2018.03.15, 段落[００２１]－[００２８]、[００３５]－[００３７]、[００５５]－[００６１]、図１－２、図６、図１０ & US 2019/0207491 A1, 段落[００４１]－[００４８]、[００５５]－[００５７]、[００７５]－[００８１]、図１－２、図６、図１０ & WO 2018/047768 A1 & CN 109690925 A	1-9
Y	JP 2008-178211 A (株式会社デンソー) 2008.07.31, 段落[００３１]－[００３２]、[００３８]、図１、図５（Ａ）－（Ｃ）	1-9

☑ Ｃ欄の続きにも文献が列挙されている。　☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

＊　引用文献のカテゴリー
「Ａ」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「Ｅ」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「Ｌ」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「Ｏ」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「Ｐ」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献
「Ｔ」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「Ｘ」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Ｙ」特に関連のある文献であって、当該文献と他の１以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「＆」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日	国際調査報告の発送日
３０．１０．２０１９	１２．１１．２０１９

国際調査機関の名称及びあて先
日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ）
郵便番号１００－８９１５
東京都千代田区霞が関三丁目４番３号

特許庁審査官（権限のある職員）　３Ｖ　４６５６
田村　惠里加
電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３３５７

Ｃ（続き）．　関連すると認められる文献

引用文献のカテゴリー＊	引用文献名　及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する請求項の番号
	& US 2008/0079375 A1, 段落[０２０６]－[０２０９]、[０２２１]、図３５、図３９Ａ－Ｃ	
Y	JP 2014-7837 A (トヨタ自動車株式会社) 2014.01.16, 特許請求の範囲の請求項４、段落[００４４]、図５ (ファミリーなし)	9
A	JP 2018-98907 A (株式会社デンソー) 2018.06.21, 段落[００９２]－[００９９]、図２０－２２ & WO 2018/110458 A1 & CN 110063018 A	1-9
A	JP 2013-5575 A (トヨタ自動車株式会社) 2013.01.07, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-9
A	US 2016/0049838 A1 (FEAAM GMBH) 2016.02.18, 全文、全図 & WO 2014/147181 A2 & DE 102013102900 A1 & CN 105164903 A	1-9