(19)国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 111987832 B
(45)授权公告日 2023.09.01

(21)申请号 202010413187.3

(22)申请日 2020.05.15

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 111987832 A

(43)申请公布日 2020.11.24

(30)优先权数据
2019-096348 2019.05.22 JP

(73)专利权人 株式会社电装
地址 日本爱知县

(72)发明人 濑口正弘

(74)专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司 31100
专利代理师 胡曼

(51)Int.Cl.
H02K 3/28(2006.01)
H02P 6/10(2006.01)
H02P 6/17(2016.01)
H02P 6/28(2016.01)
H02P 27/08(2006.01)
H02K 11/00(2016.01)

(56)对比文件
CN 109690925 A,2019.04.26
JP 2013183614 A,2013.09.12
WO 2018117144 A1,2018.06.28
CN 107529681 A,2018.01.02
JP 2015050919 A,2015.03.16
CN 106059200 A,2016.10.26
CN 104335464 A,2015.02.04
US 2017179864 A1,2017.06.22
ES 2587803 A1,2016.10.26

审查员 许晓燕

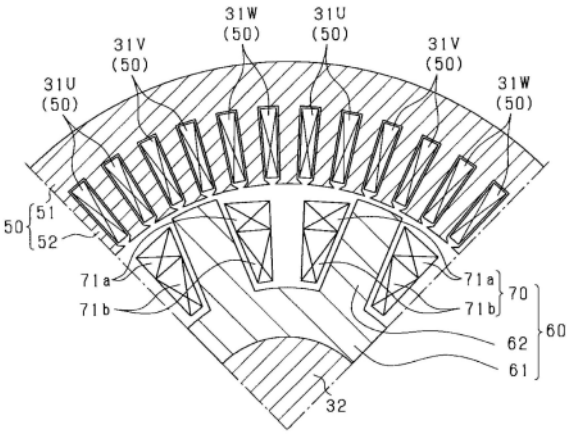
权利要求书2页 说明书15页 附图15页

(54)发明名称

励磁线圈型旋转电机

(57)摘要

一种励磁线圈型旋转电机，包括转子，在该转子中形成有串联共振电路和并联共振电路，所述串联共振电路包括第一绕组和电容器，所述并联共振电路包括第二绕组和电容器。第一绕组在径向上定位成比第二绕组更靠近定子。电容器的电容和匝数比设定成使得总合成磁通的振幅比励磁合成磁通的振幅低，所述匝数比是第二绕组的匝数与第一绕组的匝数的比值。总合成磁通是励磁合成磁通和由定子线圈的相绕组中流动的谐波电流产生的磁通的合成值。励磁合成磁通是由在第一绕组和第二绕组中流动的谐波电流产生的磁通的合成值。



CN 111987832 B

1.一种励磁线圈型旋转电机(30),包括:

定子(50),所述定子包括定子线圈(31),所述定子线圈具有多个相绕组(31U、31V、31W);

励磁线圈(70),所述励磁线圈包括串联连接的绕组对,所述串联连接的绕组对具有彼此串联连接的第一绕组(71a)和第二绕组(71b);以及

转子(60),所述转子包括转子芯部(61)和多个主极部(62),多个所述主极部在周向方向上以预定间隔形成,并且每个所述主极部从所述转子芯部径向地突出,

其中,

所述励磁线圈的所述第一绕组和所述第二绕组中的每一个缠绕于所述转子的每个所述主极部,

所述定子线圈的每个所述相绕组构造成被供给有谐波电流,以在所述励磁线圈中感应出励磁电流(If),

所述励磁线圈型旋转电机还包括二极管(80)和电容器(90),

所述二极管的阴极连接到所述串联连接的绕组对的第一绕组侧端,所述二极管的阳极连接到所述串联连接的绕组对的第二绕组侧端,

所述电容器与所述第二绕组并联连接,

在所述励磁线圈型旋转电机中,形成有串联共振电路和并联共振电路,所述串联共振电路包括所述第一绕组和所述电容器,所述并联共振电路包括所述第二绕组和所述电容器,

所述第一绕组在径向上定位成比所述第二绕组更靠近所述定子,

所述电容器的电容(C)以及作为所述第二绕组的匝数(N2)与所述第一绕组的匝数(N1)的比值的匝数比(N2/N1)被设定成使得当谐波电流被供给到所述定子线圈的所述相绕组时,总合成磁通(Φtotal)的振幅比励磁合成磁通(Φrt)的振幅低,所述总合成磁通是所述励磁合成磁通和由在所述定子线圈的所述相绕组中流动的谐波电流产生的磁通(Φs)的合成值,所述励磁合成磁通是由在所述第一绕组中流动的谐波电流产生的磁通(Φ1)和由在所述第二绕组中流动的谐波电流产生的磁通(Φ2)的合成值。

2.如权利要求1所述的励磁线圈型旋转电机,其特征在于,在将所述串联共振电路的共振频率(f1)维持在预定频率(fcst),并且将匝数总和(N1+N2)维持在预定匝数(Ncst)的条件下,在所述电容器的电容设定在预定范围内的情况下,所述匝数比设定为大于等于0.5且小于等于5.2,所述匝数总和是所述第一绕组的匝数和所述第二绕组的匝数之和。

3.如权利要求2所述的励磁线圈型旋转电机,其特征在于,

$$\frac{A}{2\pi\sqrt{(2\times N2)^2\cdot C}}\leq fs\leq\frac{A}{2\pi\sqrt{(0.2\times N2)^2\cdot C}}$$

其中,A是预定系数,N2是所述第二绕组的匝数,C是所述电容器的电容,fs是供给到所述定子线圈的所述相绕组的谐波电流的频率。

4.如权利要求2或3所述的励磁线圈型旋转电机,其特征在于,所述预定范围为大于等于20μF且小于等于50FμF。

5.如权利要求2至4中任一项所述的励磁线圈型旋转电机,其特征在于,所述匝数比设定为大于或等于0.7且小于或等于5.2。

6.一种励磁线圈型旋转电机(30),包括:

定子(50),所述定子包括定子线圈(31),所述定子线圈具有多个相绕组(31U、31V、31W);

励磁线圈(70),所述励磁线圈包括串联连接的绕组对,所述串联连接的绕组对具有彼此串联连接的第一绕组(71a)和第二绕组(71b);以及

转子(60),所述转子包括转子芯部(61)和多个主极部(62),多个所述主极部在周向方向上以预定间隔形成,并且每个所述主极部从所述转子芯部径向地突出,

其中,

所述励磁线圈的所述第一绕组和所述第二绕组中的每一个缠绕于所述转子的每个所述主极部,

所述定子线圈的每个所述相绕组构造成被供给有谐波电流,以在所述励磁线圈中感应出励磁电流,

所述励磁线圈型旋转电机还包括二极管(80)和电容器(100),

所述二极管的阴极连接到所述串联连接的绕组对的第一绕组侧端,所述二极管的阳极连接到所述串联连接的绕组对的第二绕组侧端,

所述电容器与所述第一绕组并联连接,

在所述励磁线圈型旋转电机中,形成有串联共振电路和并联共振电路,所述串联共振电路包括所述第二绕组和所述电容器,所述并联共振电路包括所述第一绕组和所述电容器,

所述第二绕组在径向上定位成比所述第一绕组更靠近所述定子,

所述电容器的电容(C)以及作为所述第二绕组的匝数(N2)与所述第一绕组的匝数(N1)的比值的匝数比(N2/N1)被设定成使得当谐波电流被供给到所述定子线圈的所述相绕组时,总合成磁通(Φtotal)的振幅比励磁合成磁通(Φrt)的振幅低,所述总合成磁通是所述励磁合成磁通和由在所述定子线圈的所述相绕组中流动的谐波电流产生的磁通(Φs)的合成值,所述励磁合成磁通是由在所述第一绕组中流动的谐波电流产生的磁通(Φ1)和由在所述第二绕组中流动的谐波电流产生的磁通(Φ2)的合成值。

励磁线圈型旋转电机

技术领域

[0001] 本公开涉及一种励磁线圈型旋转电机。

背景技术

[0002] 例如,从日本专利申请公布JP2018-042401A号,已知一种励磁线圈型旋转电机。该旋转电机包括:定子,所述定子具有定子线圈;励磁线圈,所述励磁线圈包括串联连接的绕组对,所述绕组对具有第一绕组和第二绕组;转子,所述转子具有转子芯部和多个主极部;以及二极管。主极部在周向方向上以预定间隔形成,并且从转子芯部径向地突出。二极管的阴极连接到串联连接的绕组对的第一绕组侧端,二极管的阳极连接到串联连接的绕组对的第二绕组侧端。第一绕组和第二绕组中的每一个缠绕于主极部中的每一个。定子线圈包括多个相绕组。在动作中,定子线圈的相绕组的每一个都供给有主要用于产生转矩的基波电流和主要用于激励励磁线圈的谐波电流两者。

[0003] 在向定子线圈的相绕组供给谐波电流时,主磁通流过磁路,该磁路包括彼此周向地相邻的主极部和转子芯部。因此,随着主磁通流过磁路,在彼此串联连接的第一绕组和第二绕组中分别感应出电压,从而在第一绕组和第二绕组中分别感应出具有谐波分量的电流。然后,在第一绕组和第二绕组中感应出的电流被二极管整流,以沿一个方向、即整流方向流动。其结果是,励磁电流沿整流方向在励磁线圈中流动,从而激励励磁线圈。

[0004] 另一方面,在向定子线圈的相绕组供给谐波电流时,除了主磁通之外,还会产生漏磁通。漏磁通不流过转子芯部,而是在周向相邻的成对的主极部的每一对之间流动,并且与励磁线圈交叉。在漏磁通与励磁线圈交叉时,第一绕组和第二绕组中分别感应出的电压可能在极性上彼此相反,由此减小第一绕组和第二绕组中分别感应出的电流之和,从而减小在励磁线圈中流动的励磁电流。

[0005] 为了解决上述问题,已知的励磁线圈型旋转电机还包括与第二绕组并联连接的电容器。因此,形成有包括第一绕组和电容器的串联共振电路以及包括第二绕组和电容器的并联共振电路,从而增大励磁电流。

[0006] 在已知的励磁线圈型旋转电机中,供给到定子线圈的相绕组的谐波电流导致谐波电流在第一绕组和第二绕组中流动。因此,磁通由在第一绕组和第二绕组中流动的谐波电流产生。另一方面,磁通也由定子线圈的相绕组中流动的谐波电流产生。在这种情况下,合成磁通的振幅可能增大,从而增大旋转电机的转矩脉动系数,所述合成磁通是由在第一绕组和第二绕组中流动的谐波电流产生的磁通与由在定子线圈的相绕组中流动的谐波电流产生的磁通的合成值。此处,转矩脉动系数表示旋转电机的转矩的变化量与转矩的DC(直流)分量的比值。

发明内容

[0007] 鉴于上述问题作出本公开。因此,本公开的主要目的是提供一种能够降低其转矩脉动系数的励磁线圈型旋转电机。

[0008] 根据本公开，提供了一种励磁线圈型旋转电机，包括定子、励磁线圈和转子。定子包括具有多个相绕组的定子线圈。励磁线圈包括串联连接的绕组对，该绕组对具有彼此串联连接的第一绕组和第二绕组。转子包括转子芯部和多个主极部，多个所述主极部在周向方向上以预定间隔形成，并且主极部中的每一个都从转子芯部径向地突出。励磁线圈的第一绕组和第二绕组中的每一个缠绕于转子的主极部中的每一个。定子线圈的每一个相绕组构造成供给有谐波电流，以在励磁线圈中感应出励磁电流。励磁线圈型旋转电机还包括二极管和电容器。二极管的阴极连接到串联连接的绕组对的第一绕组侧端，二极管的阳极连接到串联连接的绕组对的第二绕组侧端。电容器与第二绕组并联连接。在励磁线圈型旋转电机中，形成有串联共振电路和并联共振电路，所述串联共振电路包括第一绕组和电容器，所述并联共振电路包括第二绕组和电容器。第一绕组定位成在径向上比第二绕组更靠近定子。电容器的电容和匝数比被设定成使得当将谐波电流供给到定子线圈的相绕组时，总合成磁通的振幅比励磁合成磁通的振幅低，所述匝数比是第二绕组的匝数与第一绕组的匝数的比值。总合成磁通是励磁合成磁通和由定子线圈的相绕组中流动的谐波电流产生的磁通的合成值。励磁合成磁通是由第一绕组中流动的谐波电流产生的磁通和由第二绕组中流动的谐波电流产生的磁通的合成值。

[0009] 通过上述的构造，当谐波电流在定子线圈的相绕组中流动时，感应出谐波电流，以分别在励磁线圈的第一绕组和第二绕组中流动。例如，在包括第一绕组的串联共振电路中流动的谐波电流与在包括第二绕组的并联共振电路中流动的谐波电流之间的相位差大于120度且小于240度。此外，随着匝数比的变化，由第一绕组中流动的谐波电流产生的磁通的振幅和由第二绕组中流动的谐波电流产生的磁通的振幅都会发生变化。因此，励磁合成磁通的振幅也发生变化；励磁合成磁通是由在第一绕组中流动的谐波电流产生的磁通和由在第二绕组中流动的谐波电流产生的磁通的合成值。此外，随着励磁合成磁通的振幅的变化，总合成磁通的振幅也发生变化；总合成磁通是励磁合成磁通与由在定子线圈的相绕组中流动的谐波电流产生的磁通的合成值。也就是说，通过改变匝数比，可以使总合成磁通的振幅比励磁合成磁通的振幅低。鉴于上述，在根据本公开的励磁线圈型旋转电机中，将电容器的电容和匝数比设定成使得当谐波电流供给到定子线圈的相绕组时，总合成磁通的振幅变为比励磁合成磁通的振幅低。因此，可以降低旋转电机的转矩脉动系数。

[0010] 在另一实施方式中，在将串联共振电路的共振频率维持在预定频率，并且将匝数总和维持在预定匝数的条件下，在电容器的电容设定在预定范围内的情况下，将匝数比设定为大于等于0.5且小于等于5.2，所述匝数总和是第一绕组的匝数和第二绕组的匝数之和。换言之，通过将电容器的电容设定在预定范围内，并且将匝数比设定为大于等于0.5且小于等于5.2，从而将串联共振电路的共振频率设定为预定频率。此外，在设定串联共振电路的共振频率时，也相应地设定并联共振电路的共振频率。

[0011] 更具体而言，为了使包括第一绕组的串联共振电路的共振频率在将匝数总和维持在预定匝数的条件下维持在预定频率，需要将电容器的电容和匝数比设定成使得电容器的电容越高，则匝数比越高。本申请的发明人通过实验研究证实，在将串联共振电路的共振频率维持在预定频率，并且将匝数总和维持在预定匝数的条件(以下，称为第一条件)下，当电容器的电容在预定范围内变化时，匝数比落在0.5～5.2的范围内。此外，发明人还通过实验研究证实，在第一条件下，通过将匝数比设定在0.5～5.2的范围内，可以将旋转电机的转矩

维持得较高。

[0012] 另一方面，为了使包括第二绕组的并联共振电路的共振频率在将匝数总和维持在预定匝数的条件下维持在预定频率，需要将电容器的电容和匝数比设定成使得电容器的电容越高，则匝数比越高。发明人通过实验研究证实：在将并联共振电路的共振频率维持在预定频率，并且将匝数总和维持在预定匝数的条件(以下，称为第二条件)下，在将匝数比设定在0.7～5.2的范围的情况下，当匝数比等于该范围内的中间值时，旋转电机的转矩变为最大；当匝数比偏离中间值时，旋转电机的转矩显著下降。此外，发明人还通过实验研究证实，当将匝数比设定在0.5～5.2范围内时，旋转电机的转矩在第二条件下趋于比在第一条件下低。这是因为第一绕组定位成在径向上比第二绕组更靠近定子，因此，第一绕组比第二绕组更容易受到由定子线圈的相绕组中流动的谐波电流产生的磁通的影响。

[0013] 由此，通过在与串联共振电路有关的第一条件下设定电容器的电容和匝数比，可以将旋转电机的转矩维持成，比在与并联共振电路有关的第二条件下高。此外，在第一条件下，电容器的电容可以设定在预定范围内，并且匝数比可以设定在0.5～5.2的范围内；因此，提高了设定电容器的电容和匝数比的自由度。

[0014] 鉴于上述，在另一实施方式中，通过将电容器的电容设定在预定范围内，并且将匝数比设定在0.5～5.2的范围内，从而将串联共振电路的共振频率设定为预定频率。因此，可以提高设定电容器的电容和匝数比的自由度，以将旋转电机的转矩维持得较高。例如，匝数比可以设定为在0.7～5.2的范围内。在这种情况下，可以有效地降低转矩脉动系数，同时将旋转电机的转矩维持得较高。

附图说明

[0015] 图1是包括根据第一实施方式的励磁线圈型旋转电机的旋转电机系统的总体构造图。

[0016] 图2是励磁线圈型旋转电机中形成的共振电路的构造图。

[0017] 图3是励磁线圈型旋转电机的转子的一部分和定子的一部分的横向剖视图。

[0018] 图4是示出根据第一实施方式的供给到定子的定子线圈的每一个相绕组的基波电流、谐波电流和合成电流的波形的波形图。

[0019] 图5是示出根据第一实施方式的供给到定子线圈的三相交流电流的波形的波形图。

[0020] 图6是示出根据变形例的供给到定子线圈的每一个相绕组的基波电流、谐波电流和合成电流的波形的波形图。

[0021] 图7是示出根据图6所示的变形例的供给到定子线圈的三相交流电流的波形的波形图。

[0022] 图8是示出励磁线圈型旋转电机的励磁线圈的第一绕组和第二绕组中感应出的电压的模式的表。

[0023] 图9A和图9B是示出在励磁线圈的第一绕组和第二绕组中感应出的电流的流动的示意电路图，所述电流对应于图8所示的模式2、3。

[0024] 图10是示出在励磁线圈型旋转电机中形成的串联共振电路的示意电路图。

[0025] 图11是示出在励磁线圈型旋转电机中形成的并联共振电路的示意电路图。

[0026] 图12是示出在励磁线圈型旋转电机中形成的整流电路的示意电路图。

[0027] 图13A、图13B和图13C是示出在Φ1与Φ2的不同振幅比下的第一磁通Φ1、第二磁通Φ2和励磁合成磁通Φrt的波形的波形图。

[0028] 图14A、图14B和图14C是示出在Φ1、Φ2、Φs的不同振幅比下的第一磁通Φ1、第二磁通Φ2、励磁合成磁通Φrt、定子侧磁通Φs和总合成磁通Φtotal的波形的波形图。

[0029] 图15是示出励磁电流、转矩和转矩脉动系数相对于包括在共振电路中的电容器的电容以及第一绕组与第二绕组之间的匝数比的关系的表。

[0030] 图16A是示出励磁电流及转矩与电容器的电容的关系的图表。

[0031] 图16B是示出转矩脉动系数与电容器的电容的关系的图表。

[0032] 图17A是示出励磁电流及转矩与第一绕组和第二绕组之间的匝数比的关系的图表。

[0033] 图17B是示出转矩脉动系数与第一绕组和第二绕组之间的匝数比的关系的图表。

[0034] 图18是根据第二实施方式的励磁线圈型旋转电机的转子的一部分和定子的一部分的横向剖视图。

[0035] 图19是图18的一部分的放大图。

[0036] 图20是根据变形例的励磁线圈型旋转电机的转子的一部分和定子的一部分的横向剖视图。

[0037] 图21是根据图20所示的变形例的形成在励磁线圈型旋转电机中的共振电路的构造图。

[0038] 图22是根据另一变形例的形成在励磁线圈型旋转电机中的共振电路的构造图。

[0039] 图23A和图23B是示出根据又一变形例的在励磁线圈型旋转电机的励磁线圈的第一绕组和第二绕组中感应出的电流的流动的示意电路图。

具体实施方式

[0040] 下面，参照附图对示例性实施方式进行描述。应当注意，为了明确和理解，已在每幅图中尽可能对在整体说明中具有相同功能的相同部件标注相同的附图标记，并且为了避免赘述，不再对相同部件进行重复说明。

[0041] [第一实施方式]

[0042] 图1示出了包括根据第一实施方式的励磁线圈型旋转电机30的旋转电机系统的总体构造。

[0043] 如图1所示，除了旋转电机30之外，旋转电机系统还包括直流电源10、逆变器20和控制器40。

[0044] 旋转电机30是励磁线圈型同步旋转电机。更具体而言，在本实施方式中，控制器40控制旋转电机30以用作ISG(集成式起动发电机)或MG(电动发电机)。此外，旋转电机30、逆变器20和控制器40可以集成到单个驱动装置中或构造成单个组件。

[0045] 如图3所示，旋转电机30包括具有励磁线圈70的转子60。在本实施方式中，如图2和图3所示，励磁线圈70包括串联连接的绕组对，该绕组对包括彼此串联连接的第一绕组71a和第二绕组71b。例如，通过压缩成型来形成励磁线圈70，以提高其占空系数和组装性。此外，励磁线圈70例如由铝线形成。铝线的比重相对较低。因此，通过铝线来形成励磁线圈70，

可以降低转子60旋转期间的离心力。此外，铝线的强度和硬度两者都比铜线低。因此，铝线适于被压缩成型。

[0046] 旋转电机30还包括具有定子线圈31的定子50。定子线圈31例如由铜线形成。如图1和图3所示，定子线圈31包括布置成电角度彼此偏移120度的U相绕组31U、V相绕组31V和W相绕组31W。

[0047] 如图1所示，逆变器20包括：串联连接的U相开关对，所述U相开关对具有U相上臂开关SUp和U相下臂开关SUn；串联连接的V相开关对，所述V相开关对具有V相上臂开关SVp和V相下臂开关SVn；以及串联连接的W相开关对，所述W相开关对具有W相上臂开关SWp和W相下臂开关SWn。

[0048] U相的上臂开关SUp与下臂开关SUn之间的连接点处连接有定子线圈31的U相绕组31U的第一端。V相的上臂开关SVp与下臂开关SVn之间的连接点处连接有定子线圈31的V相绕组31V的第一端。W相的上臂开关SWp与下臂开关SWn之间的连接点处连接有定子线圈31的W相绕组31W的第一端。U相绕组31U的第二端、V相绕组31V的第二端和W相绕组31W的第二端被连接在一起，以在它们之间限定出中性点。即，在本实施方式中，定子线圈31的U相绕组31U、V相绕组31V和W相绕组31W是星形连接的。

[0049] 此外，在本实施方式中，每个开关SUp、SVp、SWp、SUn、SVn、SWn由IGBT(绝缘栅双极晶体管)来实现。此外，每个开关SUp、SVp、SWp、SUn、SVn、SWn反并联连接有续流二极管。

[0050] U相上臂开关SUp、V相上臂开关SVp和W相上臂开关SWp中的每一个的集电极都连接到直流电源10的正极端子。U相下臂开关SUn、V相下臂开关SVn和W相下臂开关SWn中的每一个的发射极都连接到直流电源10的负极端子。另外，平滑电容器11与直流电源10并联连接。

[0051] 旋转电机系统还包括角度检测单元41。角度检测单元41构造成输出指示旋转电机30的转子60的旋转角度的角度信号。从角度检测单元41输出的角度信号被输入到控制器40。

[0052] 接下来，将参考图2和图3，详细描述旋转电机30的定子50和转子60的构造。

[0053] 如图3所示，定子50和转子60两者都与转轴32同轴地布置。在下文中，转轴32的中心轴线延伸的方向将被称为轴向方向；从转轴32的中心轴线径向延伸的方向将被称为径向方向；并且沿以转轴32的中心轴线为中心的圆延伸的方向将被称为周向方向。

[0054] 定子50通过沿轴向方向层叠多个软磁钢板而形成。定子50具有环形定子芯部51和多个极齿52，每个极齿从定子芯部51径向向内突出，并且在周向方向上以相等间隔间隔开。在每对周向相邻的极齿52之间形成有一个槽。更具体而言，在本实施方式中，将极齿52的数量设定为四十八；相应地，槽数也等于四十八。另外，定子线圈31的U相绕组31U、V相绕组31V和W相绕组31W中的每一个以分布卷绕方式或集中卷绕方式缠绕于极齿52。

[0055] 转子60也通过沿轴向方向层叠多个软磁钢板而形成。转子60具有圆柱形转子芯部61和多个主极部62，每个主极部从转子芯部61径向向外突出，并且在周向方向上以相等间隔间隔开。主极部62的远端面(或径向外端面)径向地面对定子50的极齿52的远端面(或径向内端面)。更具体而言，在本实施方式中，将主极部62的数量设定为八。

[0056] 在转子60的主极部62中的每一个上，励磁线圈70的第一绕组71a缠绕于径向外侧(即定子侧)，而励磁线圈70的第二绕组71b缠绕于径向内侧(即非定子侧)。也就是说，第一绕组71a定位成比第二绕组71b更靠近定子50(即更朝径向外侧)。此外，在主极部62中的每

一个上，第一绕组71a和第二绕组71以相同方向缠绕。此外，对于每对周向相邻的主极部62，周向相邻的成对的主极部62中的一个上的第一绕组71a和第二绕组71b的缠绕方向与周向相邻的成对的主极部62中的另一个上的第一绕组71a和第二绕组71b的缠绕方向相反。因此，周向相邻的成对的主极部62的磁化方向彼此相反。

[0057] 图2示出形成在转子60中的电路，该转子60具有缠绕于相同的主极部62的励磁线圈70的第一绕组71a和第二绕组71b。在转子60中设置有电容器90和作为整流元件的二极管80。第一绕组71a的第一端(或串联连接的绕组对的第一绕组侧端)与二极管80的阴极连接。第一绕组71a的第二端与第二绕组71b的第一端连接。第二绕组71b的第二端(即串联连接的绕组对的第二绕组侧端)与二极管80的阳极连接。电容器90与第二绕组71b并联连接。此外，在图2中，L1表示第一绕组71a的电感；L2表示第二绕组71b的电感；C表示电容器90的电容。

[0058] 接下来，将详细描述控制器40。应当注意，控制器40的每个功能的一部分或全部可以通过诸如一个或多个集成电路的硬件、或者通过存储在非暂时性有形存储介质上的软件和执行该软件的计算机来实现。

[0059] 控制器40获取从角度检测单元41输出的角度信号。然后，基于获取的角度信号，控制器40生成用于接通/关断逆变器20的开关SUp、SVp、SWp、SUn、SVn、SWn的驱动信号。

[0060] 具体而言，当驱动旋转电机30用作电动机以将从直流电源10输出的直流电转换为交流电，并将所得的交流电供给到U相绕组31U、V相绕组31V和W相绕组31W时，控制器40生成用于接通/关断开关SUp、SVp、SWp、SUn、SVn、SWn的驱动信号，并将生成的驱动信号输出到开关SUp、SVp、SWp、SUn、SVn、SWn的栅极。具体而言，当驱动旋转电机30用作发电机以将从U相绕组31U、V相绕组31V和W相绕组31W输出的交流电转换为直流电，并将所得的直流电供给到直流电源10时，控制器40生成用于接通/关断开关SUp、SVp、SWp、SUn、SVn、SWn的驱动信号，并将生成的驱动信号输出到开关SUp、SVp、SWp、SUn、SVn、SWn的栅极。

[0061] 在本实施方式中，控制器40接通/关断逆变器20的开关SUp、SVp、SWp、SUn、SVn、SWn，以向U相绕组31U、V相绕组31V和W相绕组31W中的每一个供给由基波电流和谐波电流合成的合成电流。如图4的(a)所示，基波电流是主要用于使旋转电机30产生转矩的电流。如图4的(b)所示，谐波电流是主要用于激励励磁线圈70的电流。如图4的(c)所示，合成电流是基波电流和谐波电流的合成值，并且作为相电流供给到U相绕组31U、V相绕组31V和W相绕组31W中的每一个。此外，对图4中的纵轴标上刻度，以指示基波电流、谐波电流和合成电流之间的振幅的关系。应当注意，谐波电流也可以替代地具有三角形波形。

[0062] 如图5所示，分别供给到U相绕组31U、V相绕组31V和W相绕组31W的U相电流IU、V相电流IV和W相电流IW的相位彼此偏移120度电角度。

[0063] 在本实施方式中，如图4的(a)、(b)所示，谐波电流的包络周期被设定为基波电流周期的1/2。谐波电流的包络由图4的(b)中的单点划线表示。此外，谐波电流包络达到峰值的定时与基波电流达到峰值的定时相偏移。更具体而言，谐波电流包络达到峰值的定时与基波电流达到变化中心(即0)的定时重合。控制器40分别控制基波电流和谐波电流中的每一个的振幅和周期。

[0064] 通过将图4的(b)所示的谐波电流叠加在图4的(a)所示的基波电流上，可以对分别在U相绕组31U、V相绕组31V和W相绕组31W中流动的相电流的最大值的增大进行抑制，从而可以在不增大逆变器20的容量的情况下，使旋转电机30的转矩与指令转矩一致。

[0065] 作为替代，可以应用图6的(b)所示的谐波电流来代替图4的(b)所示的谐波电流。图6的(a)所示的基波电流与图4的(a)所示的基波电流相同。图6的(b)所示的谐波电流在相位上与图4的(b)所示的谐波电流偏移基波电流的周期的1/4。图6的(c)所示的合成电流是图6的(a)所示的基波电流和图6的(b)所示的谐波电流的合成值。在这种情况下，如图6的(a)、(b)所示，谐波电流包络达到峰值的定时与基波电流达到峰值的定时重合。此外，在这种情况下，图7示出了分别供给到U相绕组31U、V相绕组31V和W相绕组31W的U相电流IU、V相电流IV和W相电流IW。此外，还可以应用相位在图4的(b)所示谐波电流的相位与图6的(b)所示谐波电流的相位之间的谐波电流。

[0066] 在本实施方式中，励磁线圈70的第一绕组71a、电容器90和二极管80一起形成串联共振电路。该串联共振电路具有在下文中将被称为第一共振频率f1的共振频率。可以基于第一绕组71a的电感L1和电容器90的电容C通过以下等式(eq1)来计算第一共振频率f1。此外，励磁线圈70的第二绕组71b和电容器90一起形成并联共振电路。该并联共振电路具有在下文中将被称为第二共振频率f2的共振频率。可以基于第二绕组71b的电感L2和电容器90的电容C通过以下等式(eq2)来计算第二共振频率f2。

[0067] $$f1=\frac{1}{2\pi\sqrt{L1\cdot C}} \quad \cdots \quad (eq1)$$

[0068] $$f2=\frac{1}{2\pi\sqrt{L2\cdot C}} \quad \cdots \quad (eq2)$$

[0069] 在谐波电流在U相绕组31U、V相绕组31V和W相绕组31W中的每一个中流动时，主磁通由于谐波而变化；该主磁通流过包括转子芯部61、极齿52、定子芯部51以及彼此周向相邻的主极部62的磁路。通过主磁通的变化，在第一绕组71a和第二绕组71b中分别感应出电压，由此在第一绕组71a和第二绕组71b中分别感应出电流。此外，当在第一绕组71a和第二绕组71b中分别感应出的电压的极性与图8所示的模式1和模式4中的极性相同时，第一绕组71a和第二绕组71b中分别感应出的电流没有被彼此抵消，由此增大励磁线圈70中感应出的总电流。此外，分别在第一绕组71a和第二绕组71b中感应出的电流被二极管80整流，以沿一个方向、即整流方向流动。因此，励磁电流沿整流方向在励磁线圈70中流动，从而激励励磁线圈70。此外，在图8中，e1表示在第一绕组71a中感应出的电压；e2表示在第二绕组71b中感应出的电压。

[0070] 另一方面，在谐波电流在U相绕组31U、V相绕组31V和W相绕组31W中的每一个中的流动时，除了主磁通之外，还会产生漏磁通。漏磁通不流过转子芯部61，而是在周向相邻的成对的主极部62的每一个之间流动，并且与励磁线圈70交叉。当漏磁通与励磁线圈70交叉时，在第一绕组71a和第二绕组71b中分别感应出的电压可能在极性上彼此相反，由此减小在第一绕组71a和第二绕组71b中分别感应出的电流之和，从而减小在励磁线圈70中流动的励磁电流。

[0071] 为了解决上述问题，在本实施方式中，电容器90与第二绕组71b并联连接。因此，当在第一绕组71a和第二绕组71b中分别感应出的电压在极性上如图8所示的模式2和模式3中那样彼此相反时，在第一绕组71a和第二绕组71b中感应出的电流经由电容器90流动，而不会彼此抵消。更具体而言，如图9A所示，第一绕组71a中感应出的电流和第二绕组71b中感应出的电流两者都可以经由电容器90流向二极管80的阳极。否则，如图9B所示，电流可以经由

第二绕组71b从电容器90流向二极管80的阳极。其结果是，可以增大在励磁线圈70中流动的励磁电流。

[0072] 此外，本申请的发明人已经对图8所示的模式2和模式3作出了进一步的研究。研究结果将在下文中进行描述。

[0073] 图2所示的电路基本上包括图10～图12所示的三个子电路。图10所示的子电路是包括第一绕组71a、电容器90和二极管80的串联共振电路。图11所示的子电路是包括第二绕组71b和电容器90的并联共振电路。图12所示的子电路是包括第一绕组71a、第二绕组71b和二极管80的整流电路。

[0074] 在图10所示的串联共振电路中，在第一共振频率f1处，阻抗变为最低，交流电流变为最高。此外，由于串联共振电路中包括二极管80，因此，半波电流在串联共振电路中流动。另一方面，在图11所示的并联共振电路中，在第二共振频率f2处，阻抗变为最低，交流电流变为最高。

[0075] 在串联共振电路中，在第一共振频率f1处变化的电流被供给到电容器90。然后，供给到电容器90的电流被二极管80半波整流成半波电流。另外，在串联共振电路中，被二极管80阻断的电流经由并联共振电路中包括的第二绕组71b返回到二极管80的阳极。

[0076] 本申请的发明人发现，通过适当地设定电容器90的电容C及第二绕组71b的匝数N2与第一绕组71a的匝数N1的比值(在下文中，称为匝数比N2/N1)，可以降低旋转电机30的转矩脉动系数。在本实施方式中，转矩脉动系数表示旋转电机30的转矩中的变化量ΔTr/2与转矩的直流分量Tdc的比值(ΔTr/Tdc)。发明人的发现将在下文中进行详细描述。

[0077] 在谐波电流在定子线圈31的相绕组31U～31W中流动时，以与在定子线圈31的相绕组31U～31W中流动的谐波电流相同频率而变化的谐波电流被感应出，以分别在励磁线圈70的第一绕组71a和第二绕组71b中流动。例如，在包括第一绕组71a的串联共振电路中流动的谐波电流与在包括第二绕组71b的并联共振电路中流动的谐波电流之间的相位差大于120度且小于240度。

[0078] 随着匝数比N2/N1的变化，第一磁通Φ1的振幅和第二磁通Φ2的振幅两者都发生变化。此处，第一磁通Φ1表示在第一绕组71a中流动的谐波电流产生的磁通；第二磁通Φ2表示在第二绕组71b中流动的谐波电流产生的磁通。因此，作为第一磁通Φ1和第二磁通Φ2的合成值的励磁合成磁通Φrt的振幅也发生变化。

[0079] 图13A～图13C示出了在Φ1与Φ2之间的不同振幅比下的第一磁通Φ1、第二磁通Φ2和励磁合成磁通Φrt的波形。通过改变匝数比N2/N1，可以改变Φ1与Φ2之间的振幅比。在图13A～图13C所示的示例中，第一磁通Φ1与第二磁通Φ2之间的相位差等于180度。此外，在图13A～图13C中，对纵轴标上刻度，以指示磁通Φ1、Φ2、Φrt之间的振幅关系。

[0080] 图13A示出了当Φ1与Φ2之间的振幅比等于1:1时，第一磁通Φ1、第二磁通Φ2和励磁合成磁通Φrt的波形。在图13A所示的示例中，由于第一磁通Φ1的振幅等于第二磁通Φ2的振幅，因此，励磁合成磁通Φrt仅具有直流分量。

[0081] 图13B示出了当Φ1与Φ2之间的振幅比等于1.4:1时，第一磁通Φ1、第二磁通Φ2和励磁合成磁通Φrt的波形。在图13B所示的示例中，由于第一磁通Φ1的振幅比第二磁通Φ2的振幅高，因此，励磁合成磁通Φrt以与第二磁通Φ2相同的相位变化。

[0082] 图13C示出了当Φ1与Φ2之间的振幅比等于1:1.4时，第一磁通Φ1、第二磁通Φ2

和励磁合成磁通Φrt的波形。在图13C所示的示例中，由于第二磁通Φ2的振幅比第一磁通Φ1的振幅高，因此，励磁合成磁通Φrt以与第一磁通Φ1相同的相位变化。

[0083] 随着励磁合成磁通Φrt振幅的变化，作为定子侧磁通Φs与励磁合成磁通Φrt的合成值的总合成磁通Φtotal的振幅也发生变化。此处，定子侧磁通Φs表示在定子线圈31的相绕组31U～31W中流动的谐波电流产生的磁通。也就是说，通过改变匝数比N2/N1，可以使总合成磁通Φtotal的振幅比励磁合成磁通Φrt的振幅低。例如，励磁合成磁通Φrt与定子侧磁通Φs之间的相位差大于120度且小于240度。

[0084] 图14A～图14C示出了在Φ1、Φ2、Φs的不同振幅比下的第一磁通Φ1、第二磁通Φ2、励磁合成磁通Φrt、定子侧磁通Φs和总合成磁通Φtotal的波形。在图14A～图14C所示的示例中，第一磁通Φ1与第二磁通Φ2之间的相位差Φ等于180度。此外，在图14A～图14C中，对纵轴标上刻度，以指示磁通Φ1、Φ2、Φrt、Φs、Φtotal之间的振幅的关系。

[0085] 图14A示出了当Φ1、Φ2、Φs之间的振幅比等于1:0.9:1.1，并且励磁合成磁通Φrt与定子侧磁通Φs之间的相位差等于180度时，第一磁通Φ1、第二磁通Φ2、励磁合成磁通Φrt、定子侧磁通Φs和总合成磁通Φtotal的波形。如图14A所示，即使目的是使励磁合成磁通Φrt平滑，但是由于定子侧磁通Φs的影响，不总是能够降低总合成磁通Φtotal的振幅。

[0086] 图14B示出了当Φ1、Φ2、Φs之间的振幅比等于1.5:0.7:1.1，并且励磁合成磁通Φrt与定子侧磁通Φs之间的相位差等于180度时，第一磁通Φ1、第二磁通Φ2、励磁合成磁通Φrt、定子侧磁通Φs和总合成磁通Φtotal的波形。在图14B所示的示例中，可以比在图14A所示的示例更有效地降低总合成磁通Φtotal的振幅。因此，总合成磁通Φtotal的振幅变为比励磁合成磁通Φrt的振幅低。

[0087] 图14C示出了当Φ1、Φ2、Φs之间的振幅比等于0.7:1.5:1.1，并且励磁合成磁通Φrt与定子侧磁通Φs之间的相位差等于0度时，第一磁通Φ1、第二磁通Φ2、励磁合成磁通Φrt、定子侧磁通Φs和总合成磁通Φtotal的波形。在图14C所示的示例中，由于励磁合成磁通Φrt与定子侧磁通Φs之间的相位差等于0度，因此，总合成磁通Φtotal的振幅变为比励磁合成磁通Φrt的振幅高。

[0088] 鉴于上述，在本实施方式中，将电容器90的电容C和匝数比N2/N1设定成使得当谐波电流供给到定子线圈31的相绕组31U～31W时，总合成磁通Φtotal的振幅变为比励磁合成磁通Φrt的振幅低。因此，可以降低旋转电机30的转矩脉动系数。在普通的PWM控制中，谐波电流被叠加在基波电流上是本领域众所周知的。本申请的发明人首先发现，通过使由励磁合成磁通Φrt引起的转矩脉动和由定子侧磁通Φs引起的转矩脉动彼此抵消，可以使旋转电机30的转矩脉动系数比普通电动机的转矩脉动系数低。

[0089] 此外，本申请的发明人还发现，在确保旋转电机30的高转矩方面，关注串联共振电路的共振比关注并联共振电路的共振更有效。此外，发明人还发现，较为理想的是，将供给到定子线圈31的相绕组31U～31W的谐波电流的频率fs设定为等于或接近串联共振电路的第一共振频率f1。在下文中，将详细描述发明人的上述发现。

[0090] 为了在将匝数总和(N1+N2)(即，第一绕组71a的匝数N1和第二绕组71b的匝数N2之和)维持在预定匝数Ncst的条件下，使串联共振电路的第一共振频率f1维持在预定频率fcst，需要将电容器90的电容C和匝数比N2/N1设定成使得电容器90的电容C越高，则匝数比

N2/N1越高。另外，例如，预定频率fcst被设定成可由逆变器20实现且满足稍后描述的不等式(eq3)的fs的值。此处，fs是供给到定子线圈31的相绕组31U～31W的谐波电流的频率。

[0091] 如图15所示，在将匝数总和(N1+N2)维持在预定匝数Ncst，并且将第一共振频率f1持在预定频率fcst的条件下，当电容器90的电容C在15μF～55μF的范围内变化时，匝数比N2/N1落在0.5～10.2的范围内。另外，在图15中，在上述条件下的电容C、匝数比N2/N1、励磁电流If、转矩和转矩脉动系数如A线所示。

[0092] 本申请的发明人通过实验研究证实，在上述A线的条件下，通过将转数比N2/N1设定在0.5到5.2的范围内，可以将旋转电机30的转矩维持得较高。

[0093] 图16A示出了励磁电流If及旋转电机30的转矩与电容器90的电容C的关系。图16B示出了旋转电机30的转矩脉动系数与电容器90的电容C的关系。图17A示出了励磁电流If及旋转电机30的转矩与匝数比N2/N1的关系。图17B示出了旋转电机30的转矩脉动系数与匝数比N2/N1的关系。

[0094] 从图15、图16A～图16B和图17A～图17B可以看出，在将串联共振电路的第一共振频率f1维持在预定频率fcst的情况下，通过将电容器90的电容C设定在20μF～50μF的范围内，并且将匝数比N2/N1设定在0.5～5.2的范围内(即，20μF≤C≤μ50F且0.5≤N2/N1≤5.2)可以将旋转电机30的转矩维持得较高。另一方面，在将匝数总和(N1+N2)维持在预定匝数Ncst的条件下，为了使并联共振电路的第二共振频率f2维持在预定频率fcst，需要将电容器90的电容C和匝数比N2/N1设定成使得电容器90的电容C越高，则匝数比N2/N1越低。在图15中，在上述条件下的电容C、匝数比N2/N1、励磁电流If和转矩如B线所示。

[0095] 从图15、图16A和图17A可以看出，在将匝数总和(N1+N2)维持在预定匝数Ncst，并且将第二共振频率f2维持在预定频率fcst的条件下，在将匝数比N2/N1设定在0.7～5.2(即，0.7≤N2/N1≤5.2)的范围内的情况下，当匝数比N2/N1等于1.7时，旋转电机30的转矩变为最高。此外，随着匝数比N2/N1偏离1.7，旋转电机30的转矩显著下降。

[0096] 当将匝数比N2/N1设定在0.5～5.2的范围内时，旋转电机30的转矩在B线条件(即，将第二共振频率f2维持在预定频率fcst的条件)下趋于比在A线条件(即，将第一共振频率f1维持在预定频率fcst的条件)低。这是因为第一绕组71a定位成在径向上比第二绕组71b更靠近定子50，因此，第一绕组71a比第二绕组71b更容易受到由定子线圈31的相绕组31U～31W中流动的谐波电流产生的磁通的影响。

[0097] 由此，通过在与串联共振电路有关的A线条件下设定电容C和匝数比N2/N1，可以将旋转电机30的转矩维持成比在与并联共振电路有关的B线条件下更高。此外，在A线条件下，电容C可以设定在20μF～50μF范围内，并且匝数比N2/N1可以设定在0.5～5.2范围内；由此，提高了设定电容C和匝数比N2/N1的自由度。

[0098] 从图16B和图17B可以看出，在将电容C设定在20μF～50μF范围内，并且将匝数比N2/N1设定在0.7～5.2范围内的情况下，可以有效地降低转矩脉动系数，同时将旋转电机30的转矩维持得较高。

[0099] 在本实施方式中，供给到定子线圈31的相绕组31U～31W的谐波电流的频率fs被设定为满足以下不等式(eq3)。此外，控制器40控制逆变器20以向定子线圈31的相绕组31U～31W供给具有设定频率fs的谐波电流。

[0100] $$\frac{A}{2\pi\sqrt{(2\times N2)^2\cdot C}}\leq fs\leq\frac{A}{2\pi\sqrt{(0.2\times N2)^2\cdot C}} \quad \cdots \quad (eq3)$$

[0101] 上述不等式(eq3)推导如下。不等式(0.5≤N2/N1≤5.2)可以被转换为(0.19≤N1/N2≤2)。此外，为了简单起见，使用(0.20≤N1/N2≤2)来代替(0.19≤N1/N2≤2)。此外，由(0.20≤N1/N2≤2)推导出(0.20×N2≤N1≤2×N2)。此外，第一绕组71a的电感L1和第二绕组71b的电感L2可以通过以下的等式来表示：

[0102] $L1=\mu\times N1^2\times(S1/l1)$；以及

[0103] $L2=\mu\times N2^2\times(S2/l2)$，

[0104] 其中，μ为导磁率，N1为第一绕组71a的匝数，S1、l1分别为第一绕组71a的横截面积和磁路长度，N2为第二绕组71b的匝数，S2、l2分别为第二绕组71b的横截面积和磁路长度。

[0105] 将电感L1、L2的等式分别代入如上所述的等式(eq1)和(eq2)，可以推导出以下等式：

[0106] $f1=1/(2\times\pi\times\sqrt{\mu\times N1^2\times(S1/l1)\times C})=A/(2\times\pi\times\sqrt{N1^2\times C})$；以及

[0107] $f2=1/(2\times\pi\times\sqrt{\mu\times N2^2\times(S2/l2)\times C})=A/(2\times\pi\times\sqrt{N2^2\times C})$，

[0108] 其中，A是预定系数。

[0109] 此外，预定系数A可以由以下等式来表示：

[0110] $$A=1/\sqrt{\mu\times(S1/l1)}=1/\sqrt{\mu\times(S2/l2)}$$

[0111] 此外，在本实施方式中，供给到定子线圈31的相绕组31U～31W的谐波电流的频率fs被设定为等于串联共振电路的第一共振频率f1、即$fs=f1=A/(2\times\pi\times\sqrt{N1^2\times C})$。

[0112] 然后，由上述fs的等式和不等式(0.20×N2≤N1≤2×N2)推导出上述不等式(eq3)。

[0113] 此外，通过将下面的等式(eq4)代入上述的不等式(eq3)，推导出下面的不等式(eq5)。

[0114] $$fH=\frac{A}{2\pi\sqrt{N2^2\cdot C}} \quad \cdots \quad (eq4)$$

[0115] $0.5fH\leq fs\leq 5fH$...(eq5)

[0116] 根据本实施方式，能够实现以下有益效果。

[0117] 在本实施方式中，励磁线圈型旋转电机30包括定子50、励磁线圈70和转子60。定子50包括定子线圈31，所述定子线圈31具有U相绕组31U、V相绕组31V和W相绕组31W。励磁线圈70包括串联连接的绕组对，该绕组对具有彼此串联连接的第一绕组71a和第二绕组71b。转子60包括转子芯部61和主极部62，所述主极部62在周向方向上以预定间隔形成，并且主极部中的每一个都从转子芯部61径向地突出。励磁线圈70的第一绕组71a和第二绕组71b中的每一个缠绕于转子60的主极部62中的每一个。定子线圈31的相绕组31U～31W的每一个构造成供给有谐波电流，以在励磁线圈70中感应励磁电流If。励磁线圈型旋转电机30还包括二极管80和电容器90。二极管80的阴极连接到串联连接的绕组对的第一绕组侧端，二极管80的阳极连接到串联连接的绕组对的第二绕组侧端。电容器90与第二绕组71b并联连接。在励磁线圈型旋转电机30中，形成有串联共振电路和并联共振电路，所述串联共振电路包括第

一绕组71a和电容器90，所述并联共振电路包括第二绕组71b和电容器90。第一绕组71a在径向上定位成比第二绕组71b更靠近定子50。电容器90的电容C以及第二绕组71b的匝数N2与第一绕组71a的匝数N1的比值的匝数比N2/N1被设定成使得当谐波电流被供给到定子线圈31的相绕组31U～31W时，总合成磁通Φtotal的振幅比励磁合成磁通Φrt的振幅低。总合成磁通Φtotal是由在定子线圈31的相绕组31U～31W中流动的谐波电流产生的定子侧磁通Φs和励磁合成磁通Φrt的合成值。励磁合成磁通Φrt是由在第一绕组71a中流动的谐波电流产生的第一磁通Φ1和由在第二绕组71b中流动的谐波电流产生的第二磁通Φ2的合成值。

[0118] 通过上述构造，在谐波电流在定子线圈31的相绕组31U～31W中流动时，谐波电流被感应出，以分别在励磁线圈70的第一绕组71a和第二绕组71b中流动。例如，在包括第一绕组71a的串联共振电路中流动的谐波电流与在包括第二绕组71b的并联共振电路中流动的谐波电流之间的相位差大于120度且小于240度。此外，随着匝数比N2/N1的变化，由在第一绕组71a中流动的谐波电流产生的第一磁通Φ1的振幅和由在第二绕组71b中流动的谐波电流产生的第二磁通Φ2的振幅都会发生变化。因此，作为第一磁通Φ1和第二磁通Φ2的合成值的励磁合成磁通Φrt的振幅也发生变化。此外，随着励磁合成磁通Φrt的振幅的变化，作为励磁合成磁通Φrt的合成值的总合成磁通Φtotal的振幅和由定子线圈31的相绕组31U～31W中的谐波电流产生的定子侧磁通Φs的振幅也发生变化。也就是说，通过改变匝数比N2/N1，可以使总合成磁通Φtotal的振幅比励磁合成磁通Φrt的振幅低。鉴于上述，在本实施方式中，将电容器90的电容C和匝数比N2/N1设定成使得当谐波电流供给到定子线圈31的相绕组31U～31W时，总合成磁通Φtotal的振幅变为比励磁合成磁通Φrt的振幅低。因此，可以降低旋转电机30的转矩脉动系数。

[0119] 此外，在本实施方式中，在将串联共振电路的第一共振频率f1维持在预定频率fcst，并且将匝数总和(N1+N2)维持在预定匝数Ncst的条件下，在电容器90的电容C被设定在20μF～50μF的范围内的情况下，匝数比N2/N1被设定在0.5～5.2的范围内。换言之，通过将电容器90的电容C设定在20μF～50μF的范围内，并且将匝数比N2/N1设定在0.5～5.2的范围内，从而将串联共振电路的第一共振频率f1设定为预定频率fcst。另外，在设定第一共振频率f1时，也相应地设定并联共振电路的第二共振频率f2。

[0120] 更具体而言，在将匝数总和(N1+N2)维持在预定匝数Ncst的条件下，为了使包括第一绕组71a的串联共振电路的第一共振频率f1维持在预定频率fcst，需要将电容器90的电容C和匝数比N2/N1设定成使得电容器90的电容C越高，则匝数比N2/N1越高。本申请的发明人通过实验研究证实，在A线条件(即，将串联共振电路的第一共振频率f1维持在预定频率fcst，并且将匝数总和(N1+N2)维持在预定匝数Ncs的条件)下，当电容器90的电容C在20μF～50μF的范围内变化时，匝数比N2/N1落在0.5～5.2的范围内。此外，发明人还通过实验研究证实，在A线条件下，通过将匝数比N2/N1设定在0.5～5.2的范围内，旋转电机30的转矩可以维持得较高。

[0121] 另一方面，在将匝数总和(N1+N2)维持在预定匝数Ncst的条件下，为了使包括第二绕组71b的并联共振电路的第二共振频率f2维持在预定频率fcst，需要将电容器90的电容C和匝数比N2/N1设定成使得电容器90的电容C越高，则匝数比N2/N1越低。发明人通过实验研究证实：在B线条件(即，将并联共振电路的第二共振频率f2维持在预定频率fcst，并且将匝数总和(N1+N2)维持在在预定匝数Ncst的条件)下，在将匝数比N2/N1设定在0.7～5.2范围

内的情况下，当匝数比N2/N1等于1.7时，旋转电机30的转矩变为最高；当匝数比N2/N1偏离1.7时，旋转电机30的转矩显著下降。此外，发明人还通过实验研究证实，当将匝数比N2/N1设定在0.5～5.2的范围内时，旋转电机30在B线条件下的转矩趋于比在A线条件下的转矩低。这是因为第一绕组71a定位成在径向上比第二绕组71b更靠近定子50，因此，第一绕组71a比第二绕组71b更容易受到由在定子线圈31的相绕组31U～31W中流动的谐波电流产生的定子侧磁通Φs的影响。

[0122] 因此，通过在与串联共振电路有关的A线条件下设定电容器90的电容C和匝数比N2/N1，可以将旋转电机30的转矩维持成比在与并联共振电路有关的B线条件下更高。此外，在A线条件下，电容C可以设定在20μF～50μF范围内，并且匝数比N2/N1可以设定在0.5～5.2范围内；由此，提高了设定电容C和匝数比N2/N1的自由度。

[0123] 鉴于上述，在本实施方式中，通过将电容器90的电容C设定在20μF～50μF的范围内，并且将匝数比N2/N1设定在0.5～5.2的范围内，串联共振电路的第一共振频率f1被设定为预定频率fcst。因此，可以提高设定电容C和匝数比N2/N1的自由度，以将旋转电机30的转矩维持得较高。例如，匝数比N2/N1可以设定为在0.7～5.2的范围内。在这种情况下，可以有效地降低转矩脉动系数，同时将旋转电机30的转矩维持得较高。

[0124] [第一实施方式的变形例]

[0125] 励磁线圈70的第一绕组71a和第二绕组71b中的每一个可以由矩形导线(即具有矩形截面形状的电导线)形成。在这种情况下，可以提高励磁线圈70的占空系数，从而提高励磁线圈型旋转电机30的效率。此外，在这种情况下，励磁线圈70的第一绕组71a和第二绕组71b的相邻部分彼此表面接触；因此，当离心力施加到绕组71a、71b时，可以降低作用于绕组71a与绕组71b的相邻部分之间的负载，从而防止损坏绕组71a、71b的绝缘涂层。此外，在这种情况下，可以提高励磁线圈70的安培匝数(AT)，从而扩大励磁线圈70的激励范围。其结果是，可以提高励磁线圈型旋转电机30的转矩可控性。

[0126] 另外，诸如日本专利申请公开JP2008-178211A号的图5(A)中所示的一个示例那样，励磁线圈70的第一绕组71a和第二绕组71b中的每一个可以由矩形导线的α绕组构成。

[0127] [第二实施方式]

[0128] 如图18所示，在根据第二实施方式的励磁线圈型旋转电机30中，在转子60中，在励磁线圈70的第一绕组71a与第二绕组71b之间设置有分割构件100；分割构件100由软磁性材料形成。例如，每个分割构件100呈环形，并且供转子60的其中一个主极部62插入其中心孔中。此外，当沿轴向方向观察时，每个分割构件100呈沿周向方向延伸的细长形状。由于分割构件100插设在励磁线圈70的第一绕组71a与第二绕组71b之间，两个绕组71a、71b彼此径向分离。此外，分割构件100的径向厚度比第一绕组71a和第二绕组71b中的每一个的径向厚度小。

[0129] 此外，如图19所示，每个分割构件100可以由多个由软磁性材料(例如，磁钢)制成并沿径向方向层叠的片材构成。通过上述构造，可以降低分割构件100中的涡电流损耗。此外，由于片材沿径向方向层叠，可以根据片材的厚度将分割构件100的径向厚度设定为较小的值，同时确保分割构件100的周向长度。

[0130] 在本实施方式中，由于分割构件100插设在励磁线圈70的第一绕组71a与第二绕组71b之间，大部分漏磁通流过分割构件100，而不是流过励磁线圈70。因此，不容易在第一绕

组71a和第二绕组71b中分别感应出相反极性的电压;也不容易在第一绕组71a和第二绕组71b的每一个的不同部分中分别感应出相反极性的电压。其结果是,在图8所示的四个模式中的每一个中,可以增大第一绕组71a和第二绕组71b的每一个中感应出的电流。

[0131] 虽然已经示出了和描述了上述特定实施方式,但是本领域技术人员将理解,在不脱离本公开的精神的情况下,可以进行各种变形、改变和改进。

[0132] (1)在如上所述的实施方式中,励磁线圈70包括串联连接的绕组对,该绕组对具有彼此串联连接的第一绕组71a和第二绕组71b。

[0133] 作为替代,如图20所示,励磁线圈70可以包括串联连接的绕组群,该绕组群具有彼此串联连接的第一绕组71a、第二绕组71b和第三绕组71c。第一绕组71a～第三绕组71c中的每一个缠绕于转子60的主极部62中的每一个。更具体而言,在每个主极部62上,第一绕组71a～第三绕组71c缠绕成使得:第一绕组71a位于径向最外侧(即最靠近定子50);第三绕组71c位于径向最内侧(即最远离定子50);并且第二绕组71b径向地插设在第一绕组71a与第三绕组71c之间。此外,在每个主极部62上,第一绕组71a～第三绕组71c以相同方向缠绕。此外,对于周向相邻的成对的主极部62,周向相邻的成对的主极部62中的一个上的第一绕组71a～第三绕组71c的缠绕方向与周向相邻的成对的主极部62中的另一个的第一绕组71a～第三绕组71c的缠绕方向相反。因此,周向相邻的成对的主极部62的磁化方向彼此相反。

[0134] 图21示出形成在具有缠绕于相同的主极部62的励磁线圈70的第一绕组71a～第三绕组71c的转子60中的电路。

[0135] 在转子60中,除了电容器90(在下文中,称为第一电容器90)之外,还设置有第二电容器91。第三绕组71c的第一端与第二绕组71b的第二端连接。第三绕组71c的第二端与二极管80的阳极连接。第二电容器91与第三绕组71c并联连接。此外,在图21中,L3表示第三绕组71c的电感,C1、C2分别表示第一电容器90和第二电容器91的电容。

[0136] 励磁线圈70的第一绕组71a、第一电容器90和二极管80一起形成第一串联共振电路。第一串联共振电路具有在下文中将被称为第一共振频率f1的共振频率;第一共振频率f1可以由第一实施方式中描述的等式(eq1)来计算。励磁线圈70的第二绕组71b和第一电容器90一起形成第一并联共振电路。第一并联共振电路具有在下文中将被称为第二共振频率f2的共振频率;第二共振频率f2可以由第一实施方式中描述的等式(eq2)来计算。励磁线圈70的第一绕组71a和第二绕组71b、第二电容器91和二极管80一起形成第二串联共振电路。第二串联共振电路具有在下文中将被称为第三共振频率f3的共振频率;第三共振频率f3可以通过以下等式(eq6)来计算。励磁线圈70的第三绕组71c和第二电容器91一起形成第二并联共振电路。第二并联共振电路具有在下文中将被称为第四共振频率f4的共振频率;第四共振频率f4可以通过以下等式(eq7)来计算。

[0137] $$f3=\frac{1}{2\pi\sqrt{(L1+L2)\cdot C2}} \quad \cdots \quad (eq6)$$

[0138] $$f4=\frac{1}{2\pi\sqrt{L3\cdot C2}} \quad \cdots \quad (eq7)$$

[0139] 第二串联共振电路和第二并联共振电路的功能类似于第一串联共振电路和第一并联共振电路。

[0140] 通过上述构造,当供给到定子线圈31的相绕组31U～31W的谐波电流的频率fs偏离

给定频率(例如,第一共振频率f1)时,如果频率fs等于或接近第三共振频率f3或第四共振频率f4,则仍然可以增大励磁线圈70中流动的励磁电流。

[0141] 此外,当旋转电机30的电角频率较高时,供给到定子线圈31的相绕组31U～31W的谐波电流的频率fs可能偏离给定频率。这是因为电角频率越高,则允许在基波电流的每个周期内叠加的谐波电流的周期数M(此处,M是自然数)越小,并且因此当在基波电流的每个周期内叠加的谐波电流的周期数由M变为(M-1)时,频率fs的变化就越大。例如,当数量M在4和3之间变化时,频率fs的变化约为30%。此处,"M=3"表示对于定子线圈31的每个相电流,在基波电流的每个周期内叠加在相电流的基波电流上的谐波电流的周期数等于3;并且3被认为是可以用来在励磁线圈70中感应出励磁电流的M的最小值。

[0142] (2)如图22所示,励磁线圈70还可以包括串接连接的绕组群,该绕组群具有(n+1)个彼此串接连接的绕组,其中,n是大于或等于3的自然数。在这种情况下,形成在转子60中的电路中包括的电容器的数量等于n。

[0143] (3)如图23A和图23B所示,电容器100可以与第一绕组71a并联连接。在这种情况下,第二绕组71b、电容器100和二极管80一起形成串联共振电路;第一绕组71a和电容器100一起形成并联共振电路。此外,在这种情况下,第二绕组71b定位成在径向上比第一绕组71a更靠近定子50。换言之,在转子60的每个主极部62上,第一绕组71a缠绕于径向内侧(即非定子侧),而第二绕组71b缠绕于径向外侧(即定子侧)。

[0144] 在图23A和图23B中所示的电流中,可以将电容器100的电容C和匝数比N2/N1(即,第二绕组71b的匝数N2与第一绕组71a的匝数N1的比值)设定成使得当谐波电流供给到定子线圈31的相绕组31U～31W时,总合成磁通的Φtotal振幅变为比励磁合成磁通Φrt的振幅低。此处,如第一实施方式中所述,总合成磁通Φtotal是由在定子线圈31的相绕组31U～31W中流动的谐波电流产生的定子侧磁通Φs和励磁合成磁通Φrt的合成值。励磁合成磁通Φrt是由在第一绕组71a中流动的谐波电流产生的第一磁通Φ1和由在第二绕组71b中流动的谐波电流产生的第二磁通Φ2的合成值。

[0145] (4)在如上所述的实施方式中,旋转电机30是转子60布置在定子50的径向内侧的内转子型旋转电机。

[0146] 作为替代,旋转电机30可以是转子布置在定子的径向外侧的外转子型旋转电机。在这种情况下,转子可以包括转子芯部和主极部,每个主极部从转子芯部径向向内突出,并且在周向方向上以预定间隔间隔开。

[0147] (5)在如上所述的实施方式中,励磁线圈70由铝线形成。替代地,励磁线圈70可以由其他材料、诸如铜线或CNTs(碳纳米管)形成。

[0148] 此外,在如上所述的实施方式中,励磁线圈70通过压缩成型来形成。替代地,励磁线圈70可以在没有压缩成型的情况下形成。

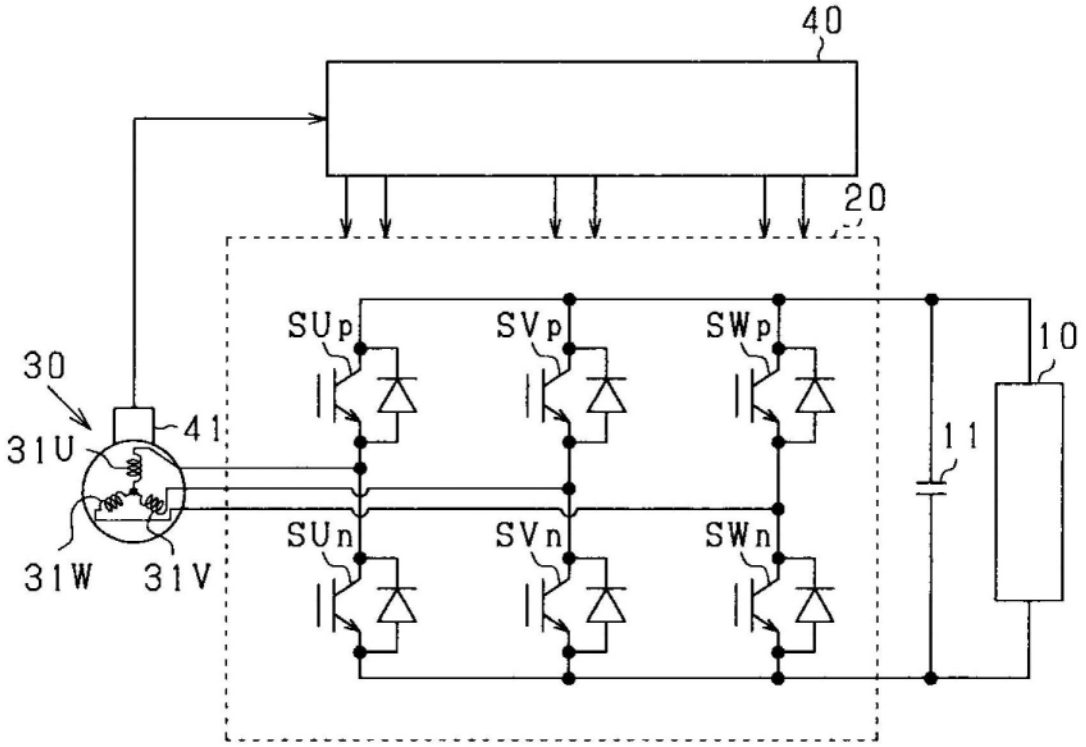

40
20
30
31U
31W
31V
41
SUp
SVp
SWp
SUn
SVn
SWn
10
11

图1

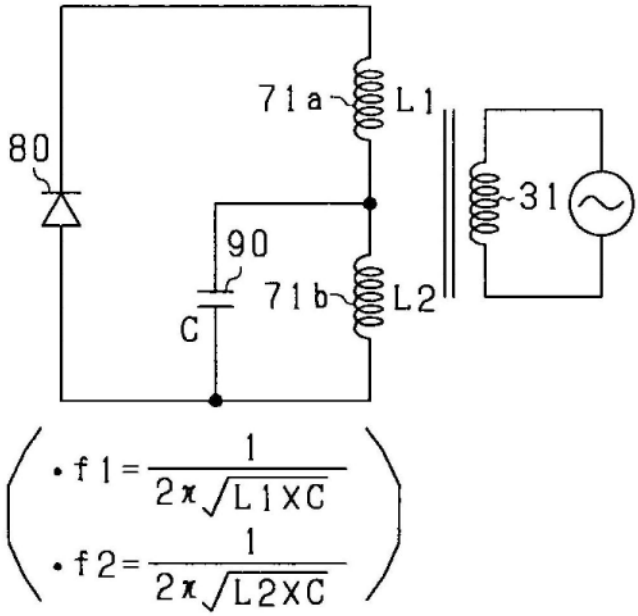

80
71a
L1
31
90
C
71b
L2
$\cdot f1=\frac{1}{2\pi\sqrt{L1XC}}$
$\cdot f2=\frac{1}{2\pi\sqrt{L2XC}}$

图2

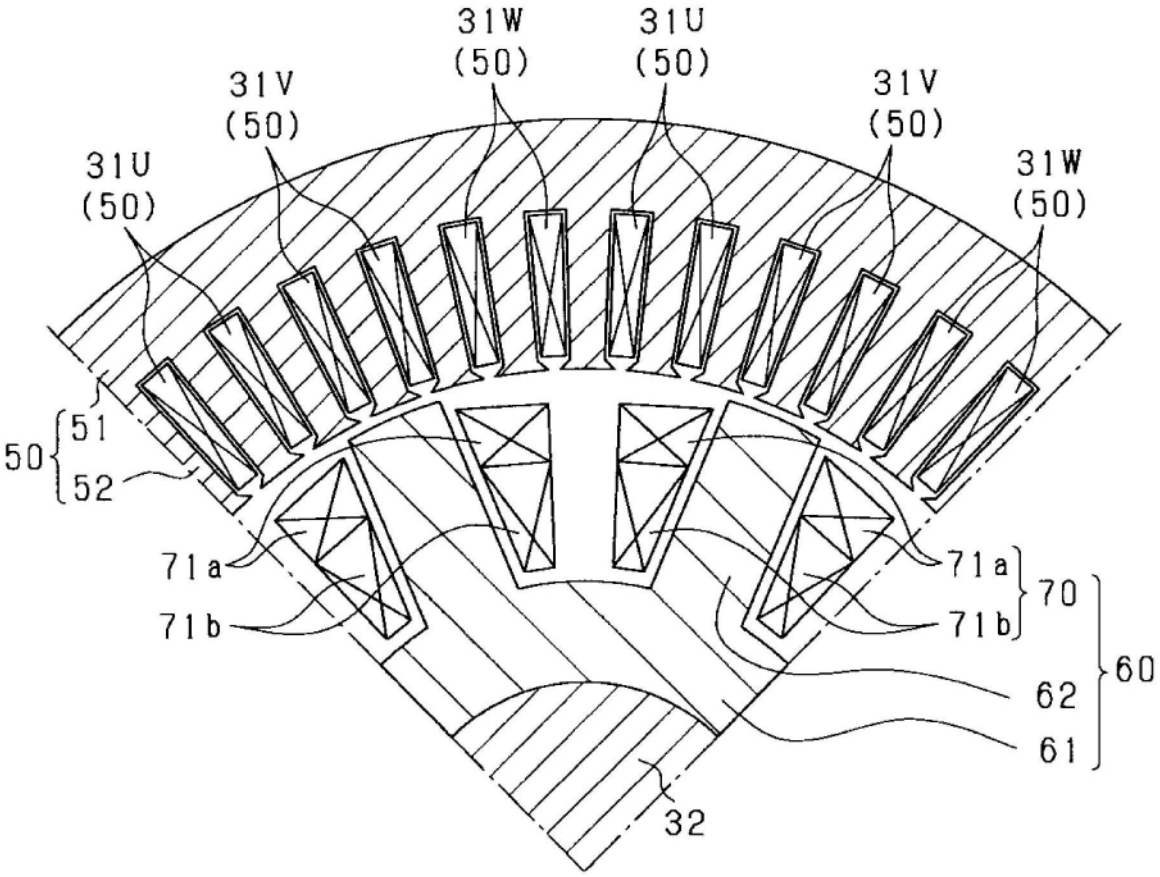

31W
(50)
31U
(50)
31V
(50)
31V
(50)
31U
(50)
31W
(50)
50
51
52
71a
71b
71a
71b
70
60
62
61
32

图3

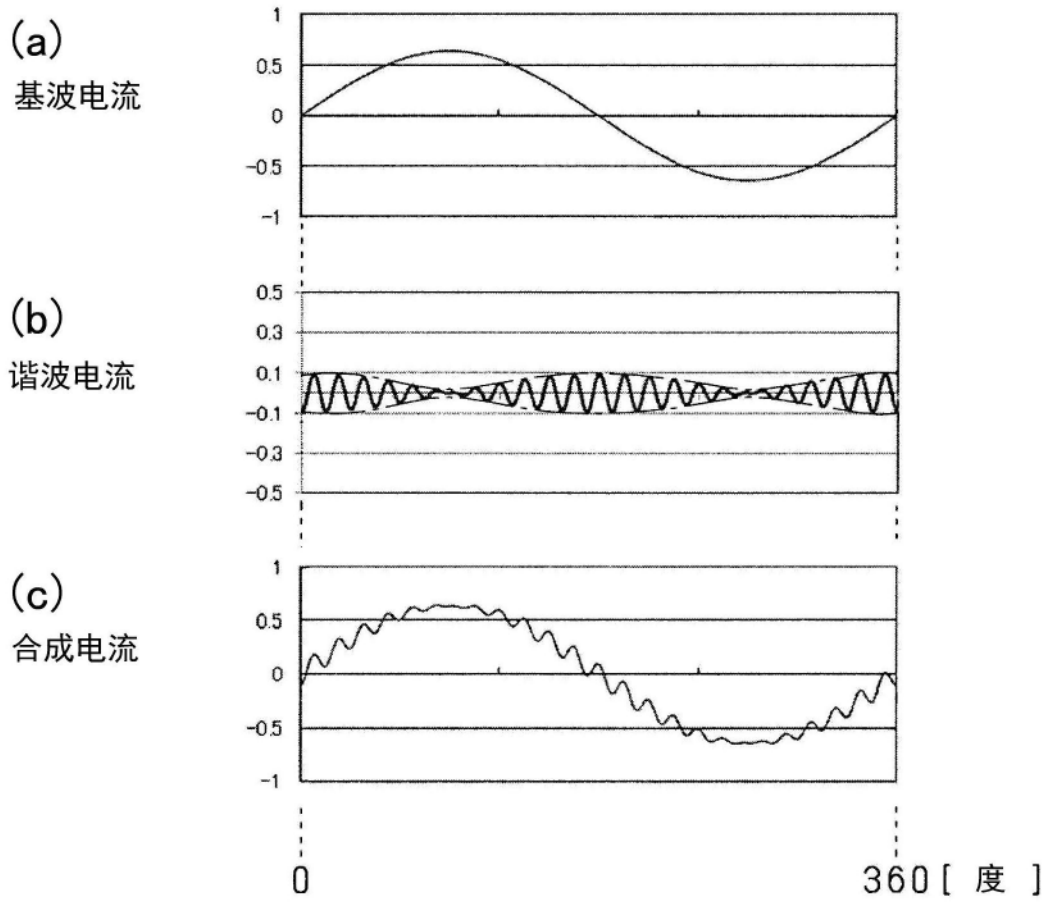

(a)
基波电流
1
0.5
0
-0.5
-1
(b)
谐波电流
0.5
0.3
0.1
-0.1
-0.3
-0.5
(c)
合成电流
1
0.5
0
-0.5
-1
0
360[度]

图4

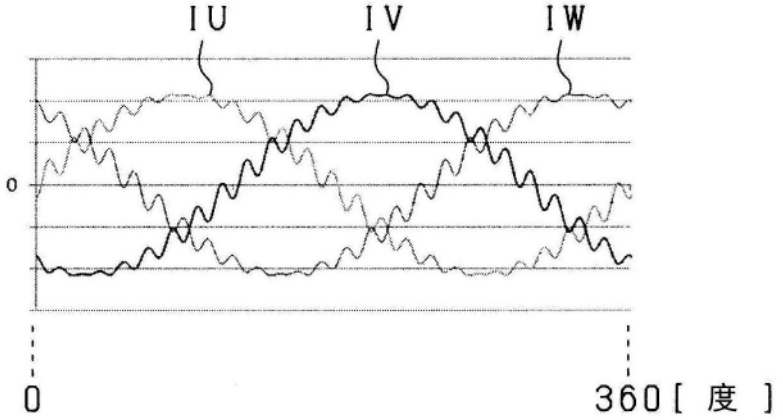

IU
IV
IW
0
0
360[度]

图5

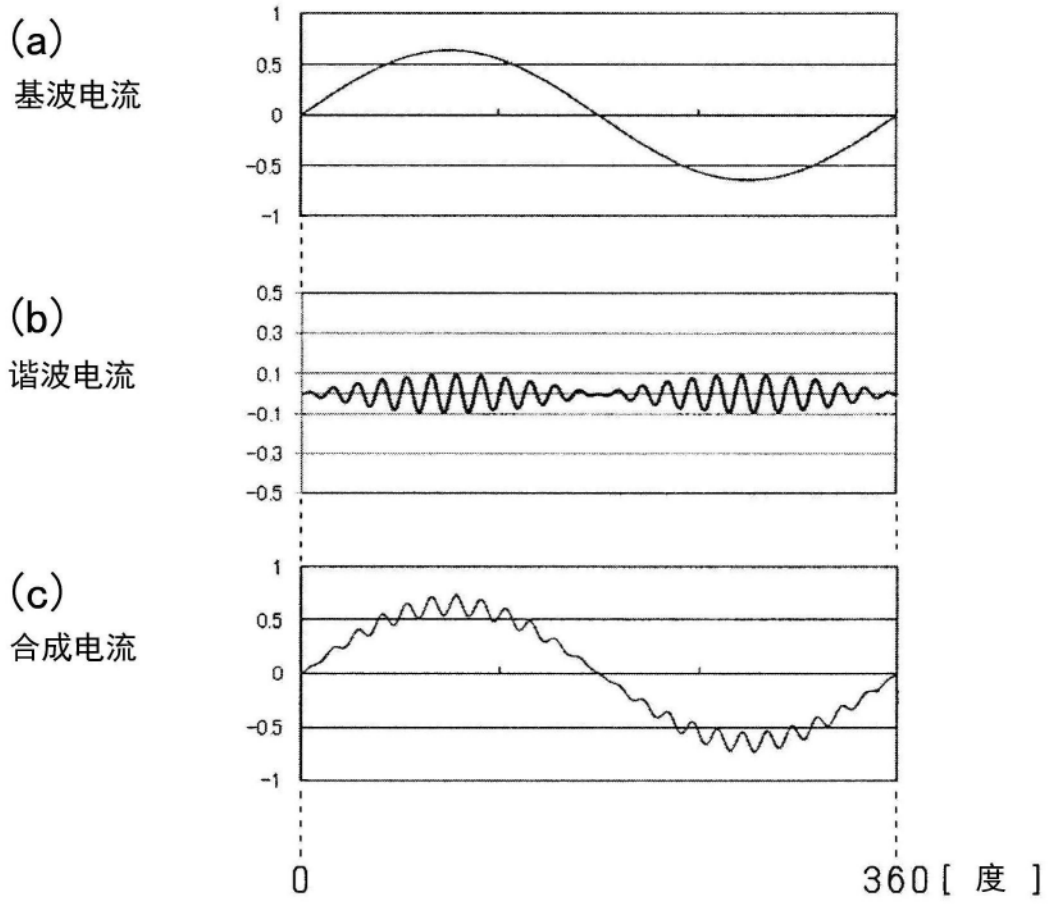

(a)
基波电流
1
0.5
0
-0.5
-1
(b)
谐波电流
0.5
0.3
0.1
-0.1
-0.3
-0.5
(c)
合成电流
1
0.5
0
-0.5
-1
0
360[度]

图6

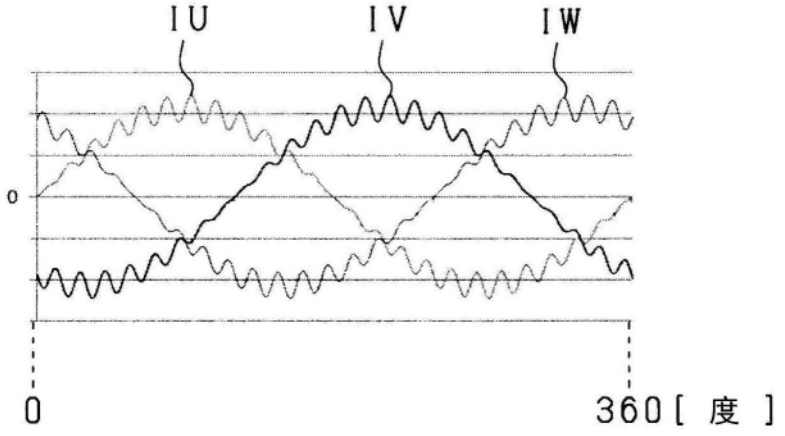

IU
IV
IW
0
0
360[度]

图7

模式		1	2	3	4
感应电压的方向	71a e1	↑	↓	↑	↓
	71b e2	↑	↑	↓	↓

图8

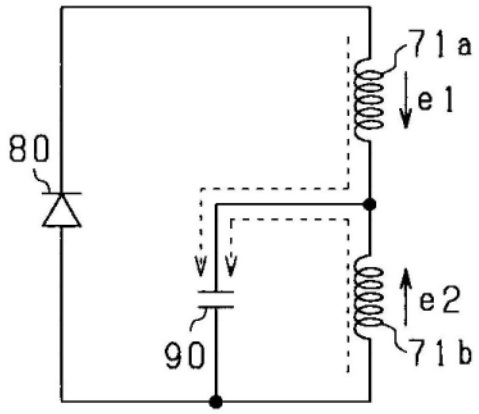


图9A

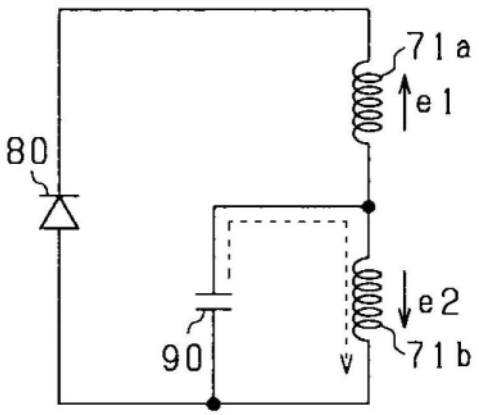


图9B

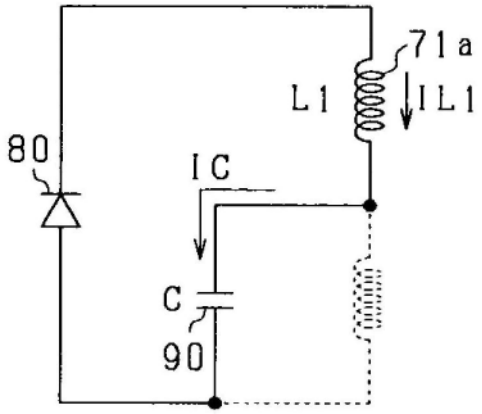


图10

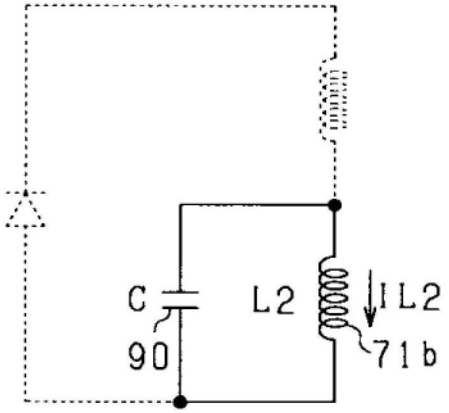


图11

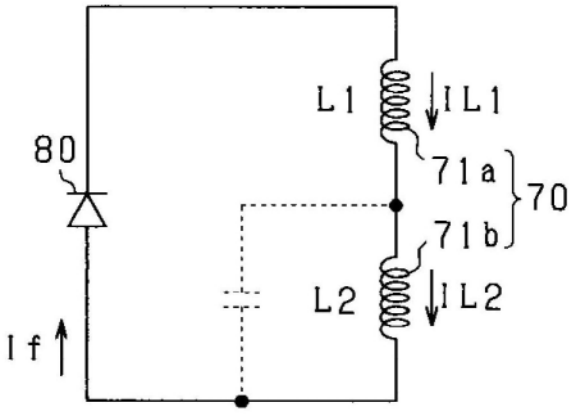


图12

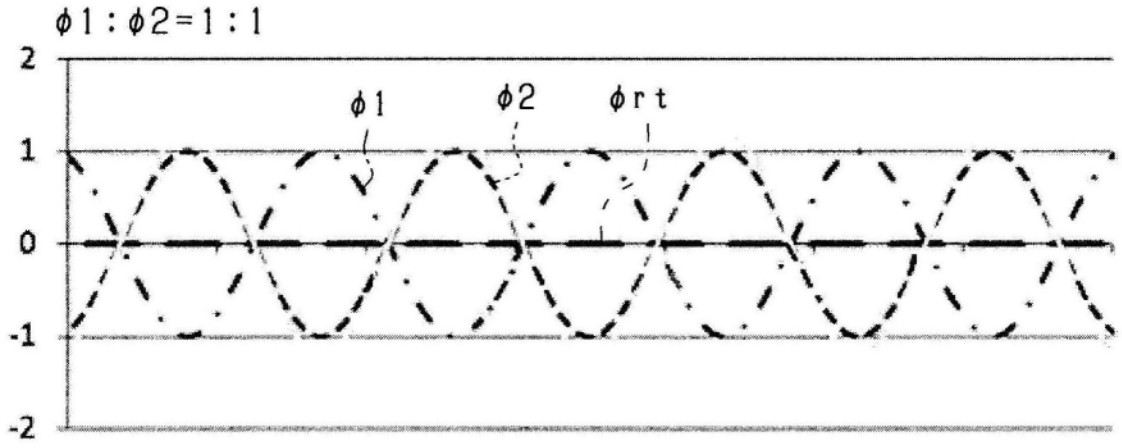


图13A

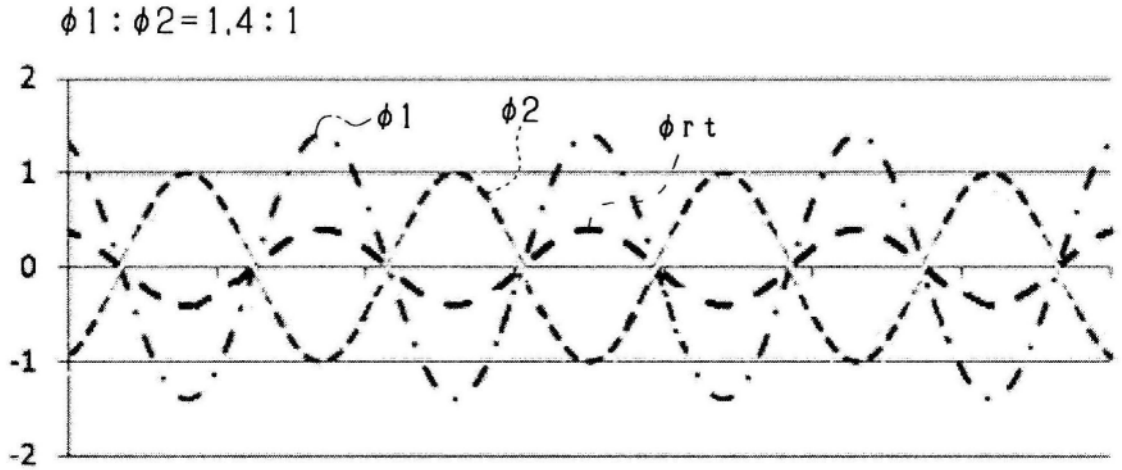


图13B

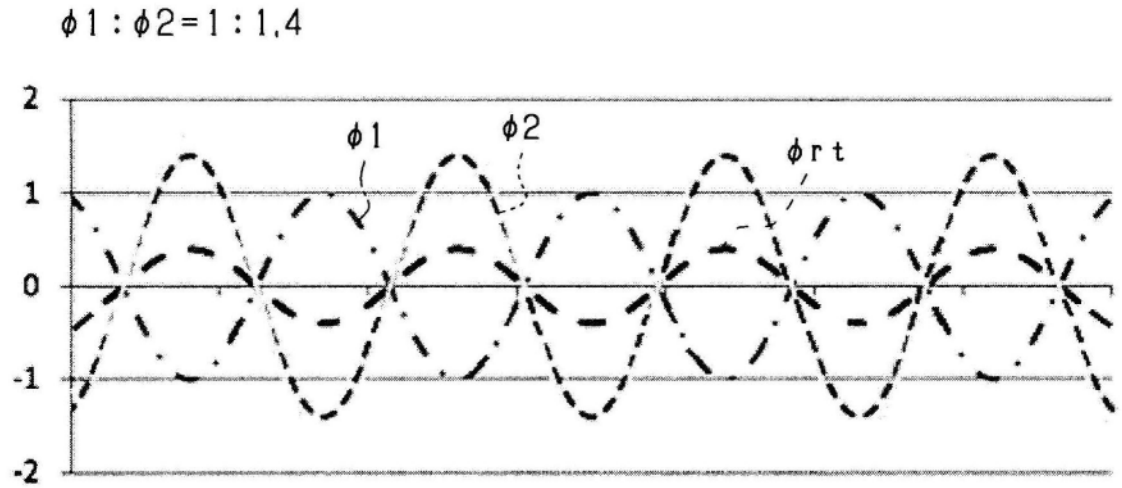


图13C

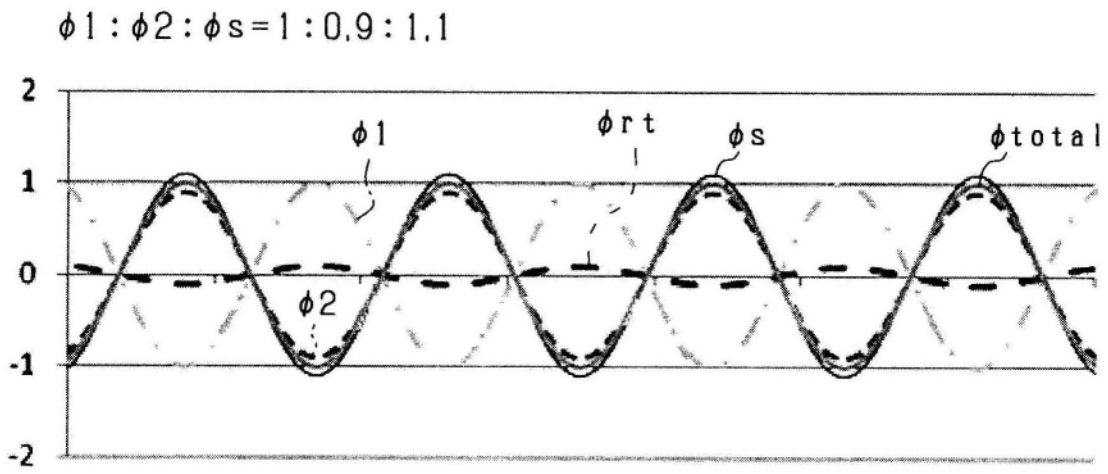


图14A

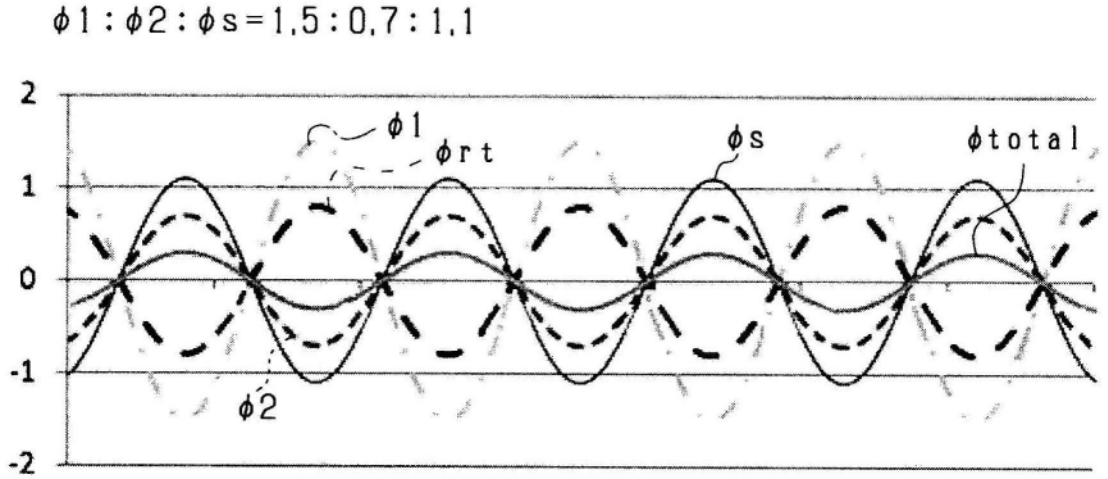


图14B

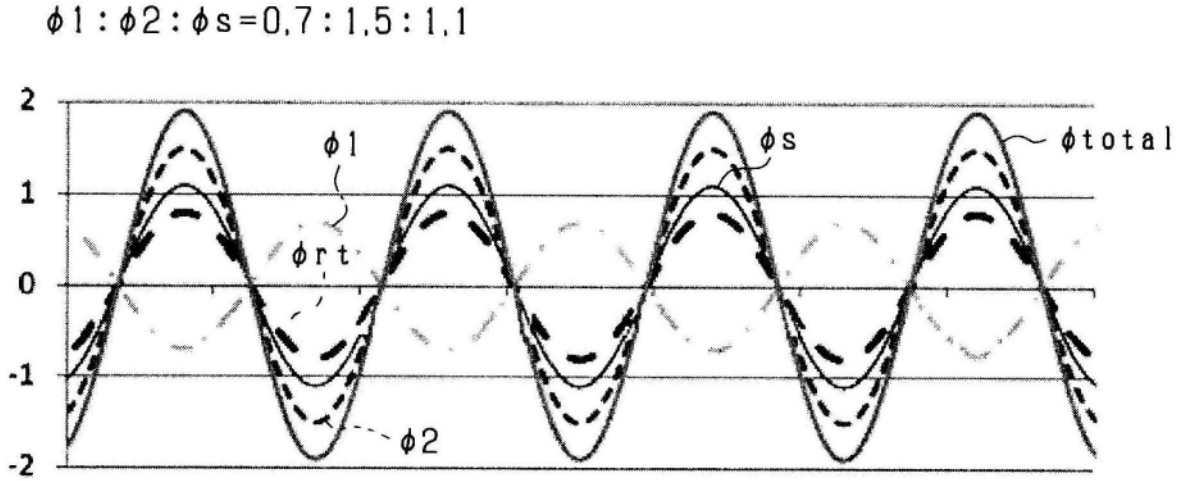


图14C

电容		A线				B线		
[μF]	[-]	N2/N1	If[A]	转矩 [Nm]	转矩脉动系数[-]	N2/N1	If[A]	转矩 [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

图15

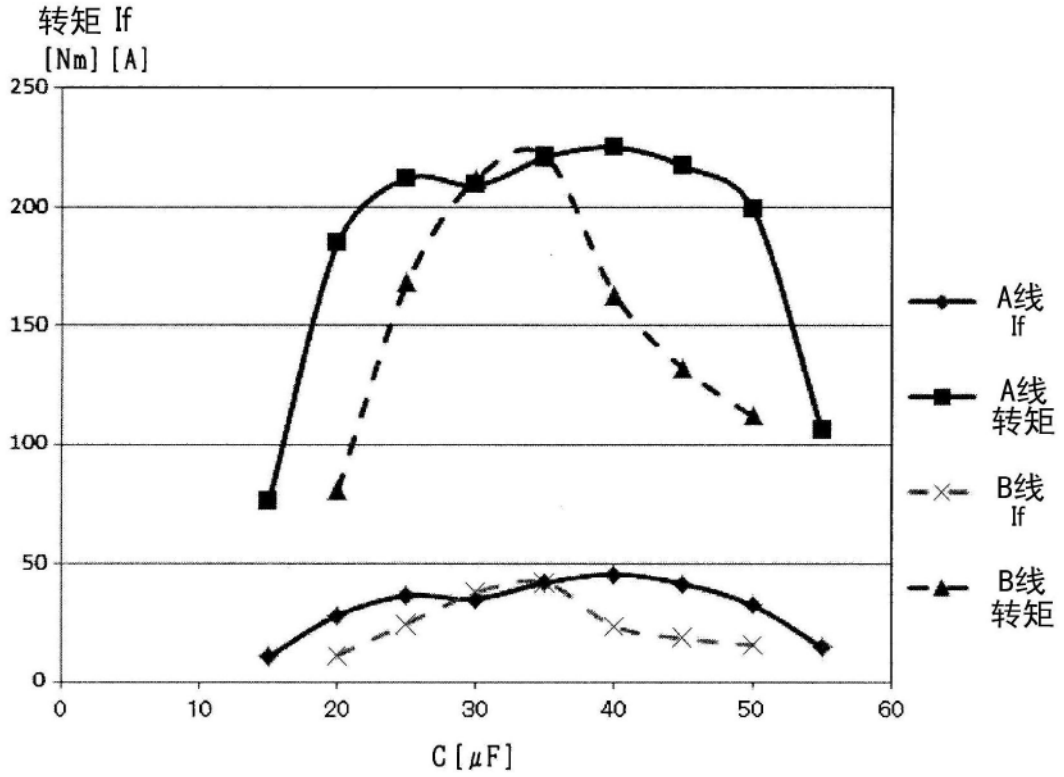


图16A

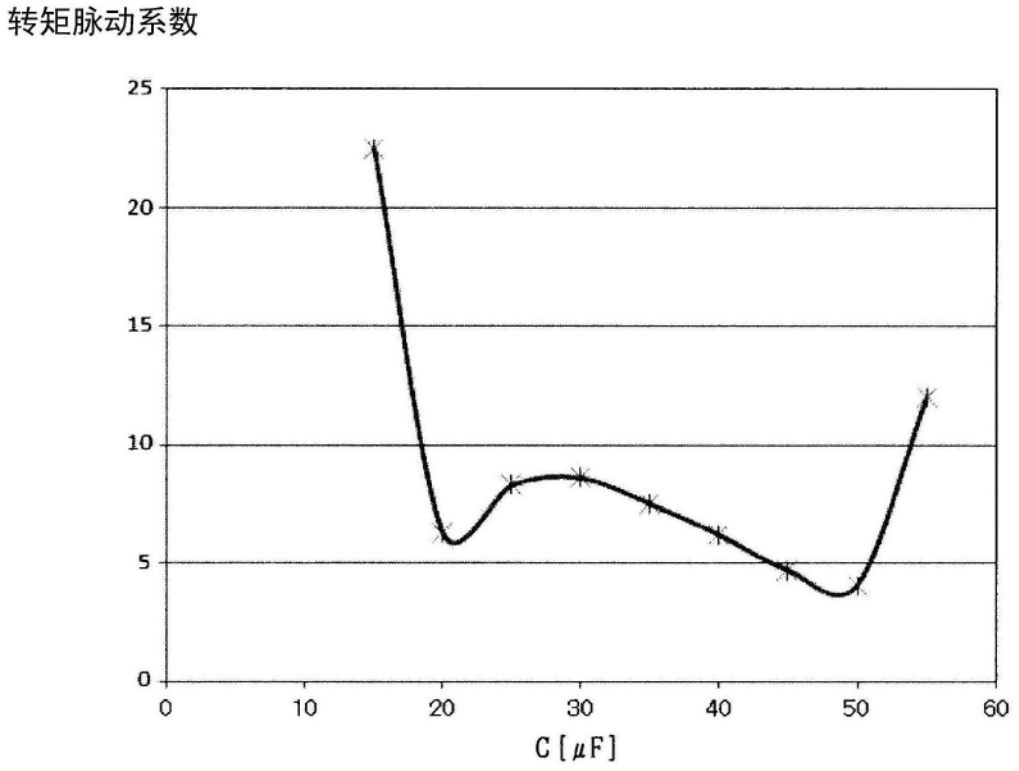

转矩脉动系数
25
20
15
10
5
0
0
10
20
30
40
50
60
C [μF]

图16B

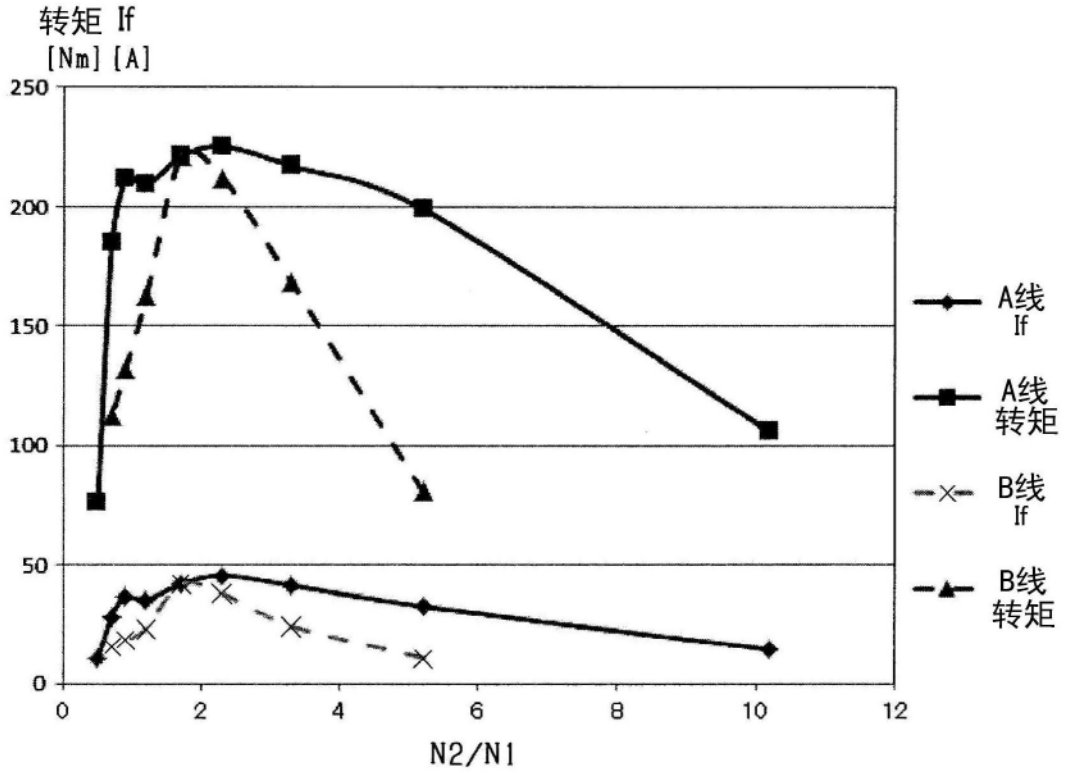

转矩 If
[Nm] [A]
250
200
150
100
50
0
0
2
4
6
8
10
12
N2/N1
A线 If
A线 转矩
B线 If
B线 转矩

图17A

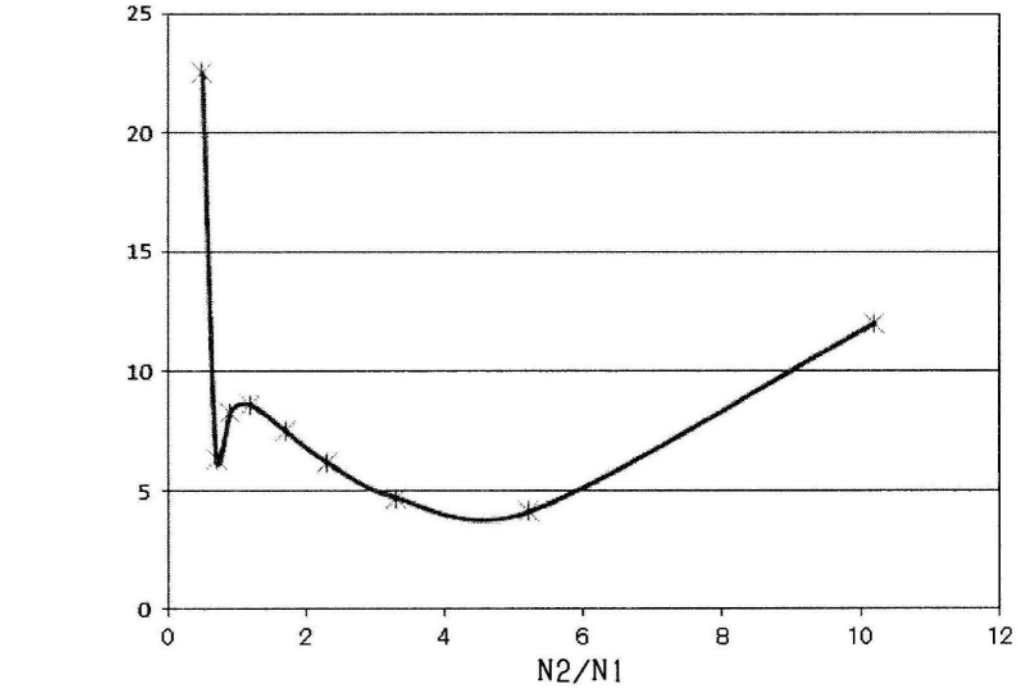


图17B

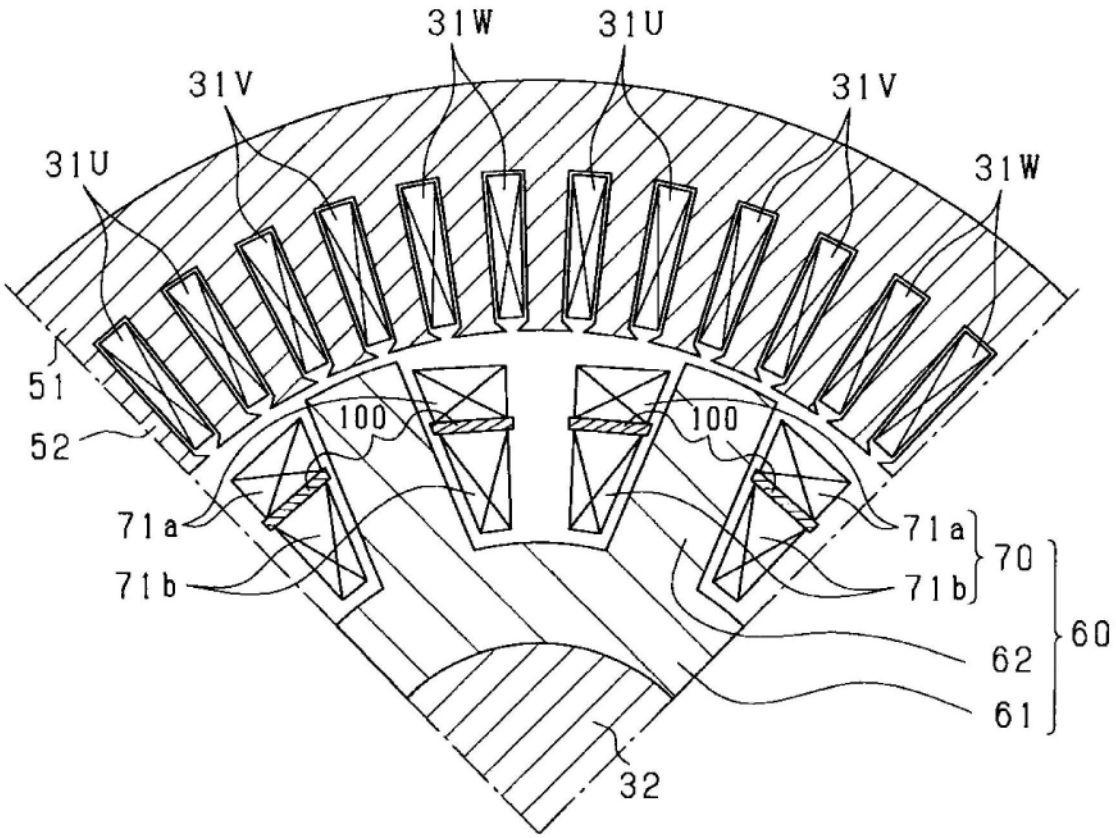

31W
31U
31V
31V
31U
31W
51
52
100
100
71a
71b
71a
71b
70
60
62
61
32

图18

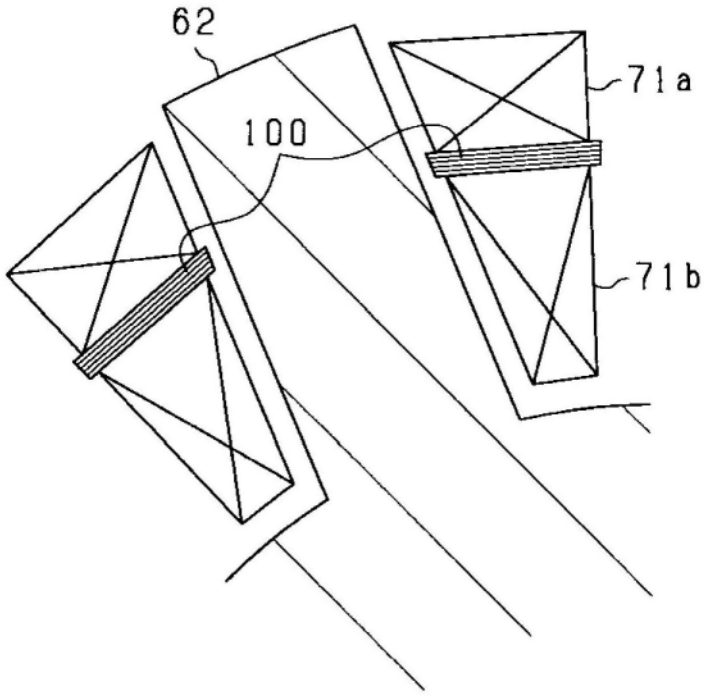

62
71a
100
71b

图19

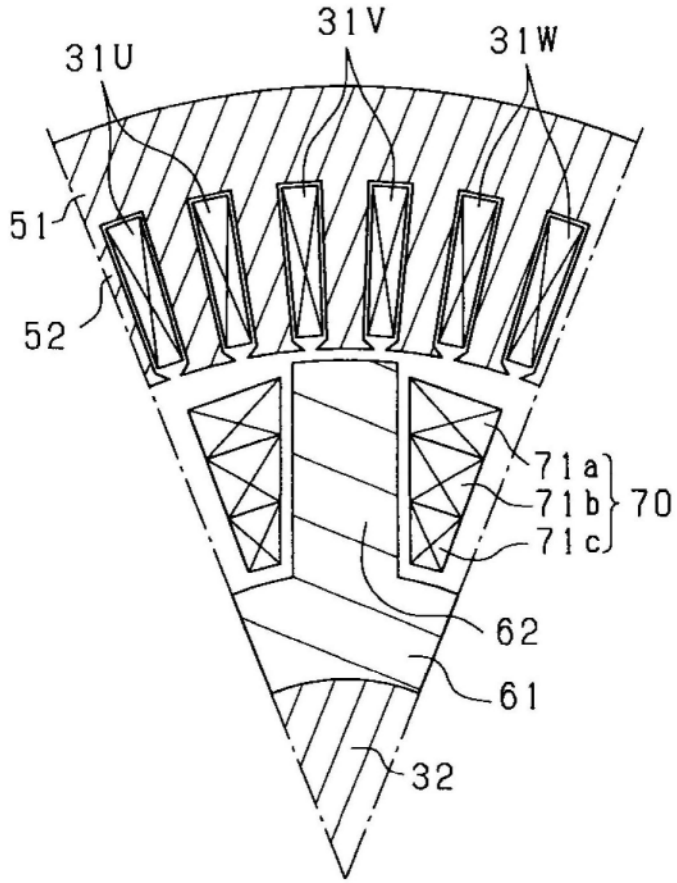


图20

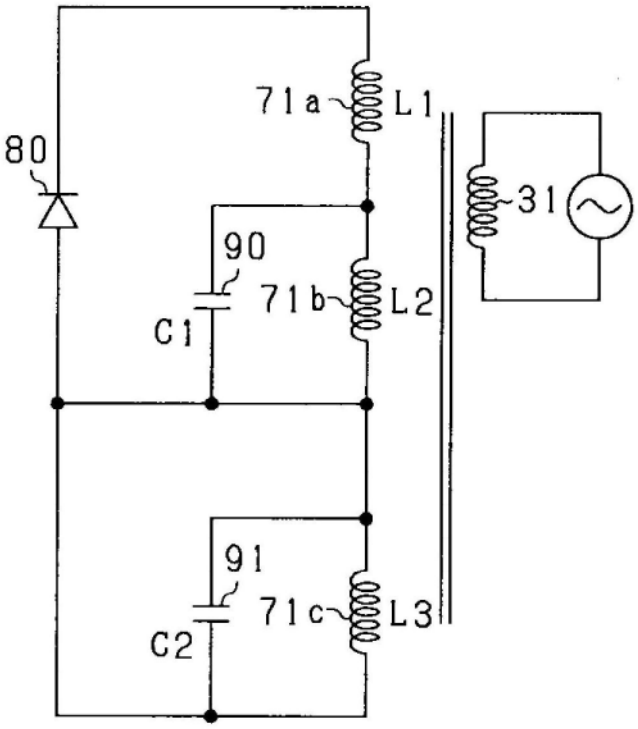


图21

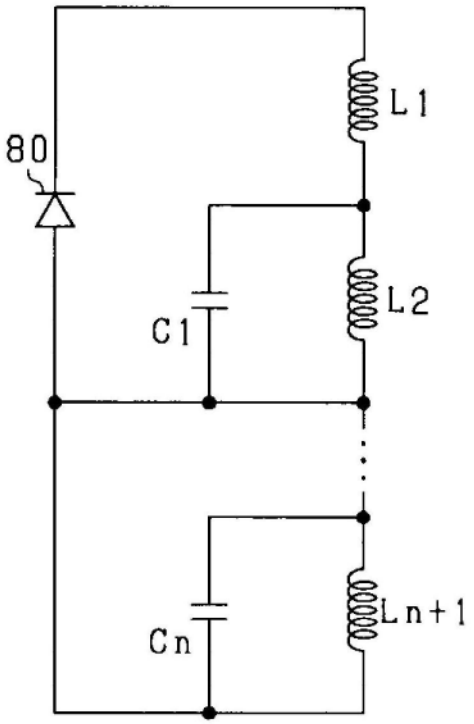


图22

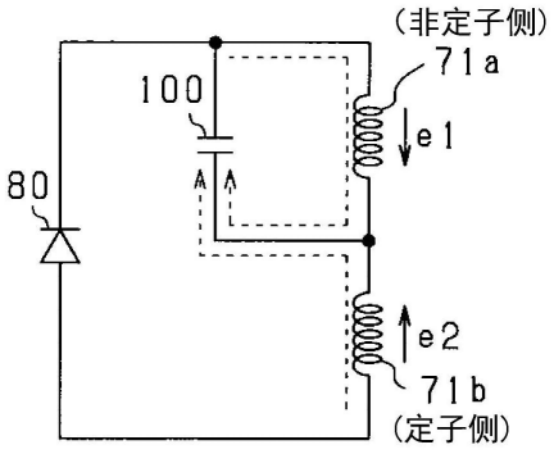


图23A

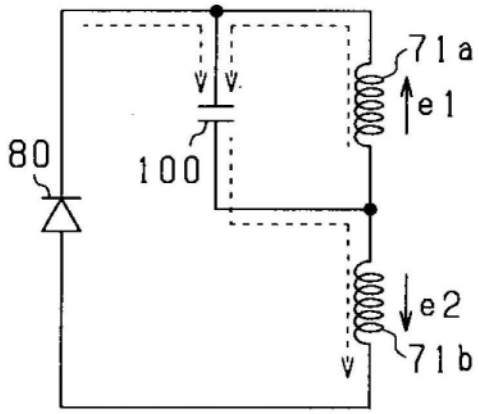


图23B